

**MINISTRY OF EDUCATION OF THE REPUBLIC OF BELARUS
STATE COMMITTEE ON STANDARDIZATION OF THE REPUBLIC
OF BELARUS
NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS**

BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

BELARUSIAN STATE INSTITUTE OF METROLOGY

**INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES
OF BELARUS**

INSTRUMENTATION ENGINEERING-2021

**Proceedings
of the 14th International Scientific and Technical Conference**

November 17–19, 2021
Minsk, Belarus

**Minsk
BNTU
2021**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО СТАНДАРТИЗАЦИИ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ**

**БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ НАН БЕЛАРУСИ**

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2021

**Материалы
14-й Международной научно-технической конференции**

17–19 ноября 2021 года
Минск, Республика Беларусь

**Минск
БНТУ
2021**

УДК 681.2(063)
ББК 34.9я431
П 75

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор О.К. Гусев (председатель);
канд. техн. наук, доцент Р.И. Воробей; д-р техн. наук, доцент Н.А. Жагора;
д-р техн. наук, профессор М.Г. Киселёв; д-р физ.-мат. наук, доцент М.А. Князев;
д-р физ.-мат. наук, профессор Н.В. Кулешов; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р физ.-мат. наук,
профессор А.М. Маляревич; д-р физ.-мат. наук В.В. Машко; чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук,
профессор Ю.М. Плескачевский; канд. техн. наук, доцент А.Л. Савченко; канд. техн. наук, доцент
А.И. Свистун; д-р техн. наук, профессор П.С. Серенков; д-р техн. наук, профессор В.Л. Соломахо;
канд. техн. наук, доцент А.К. Тявловский; академик НАН Беларуси, д-р техн. наук,
профессор С.А. Чижик; д-р физ.-мат. наук, профессор К.В. Юмашев;
канд. техн. наук, доцент Н.Н. Ризноокая (отв. секретарь)

Рецензенты:

д-р техн. наук, профессор В.Е. Матюшков;
д-р физ.-мат. наук, профессор А.Л. Толстик

Издание включает материалы 14-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение-2021» по направлениям: измерительные системы и приборы, технические средства безопасности; методы исследований и метрологическое обеспечение измерений; физические, физико-математические, материаловедческие и технологические основы приборостроения; оптико-электронные системы, лазерная техника и технологии.

Материалы конференции могут представлять интерес для научных работников, преподавателей вузов, аспирантов и магистрантов, специалистов реального сектора экономики, занимающихся исследованиями, разработкой и производством приборов и измерительных систем.

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

УДК 535.07

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СНАЙПЕРСКИХ ПРИЦЕЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ КРАТНОСТИ

Стасилович В.А., Шишкин И.П., Шкадаревич А.П.

УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье представлен прогресс проектирования, конструирования и контроля оптических прицелов обладающих высокими оптическими характеристиками. Представлены основные параметры, которые необходимо достигнуть для создания и производства прицела высокого уровня. Дана таблица параметров для разработанных приборов, выпускаемых предприятием.

Ключевые слова: оптический прицел, панкратическая система, конструирование, расчет оптической системы, испытания оптических прицелов.

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF SNIPER SIGHTS OF VARIABLE MULTIPLICITY

Stasilovich V., Shishkin I., Shkadarevich A.

Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk, Belarus

Annotation. The article present the progress, design, construction and control of optical sights with high optical characteristics. The main parameters that need be achieved to create a high-level sight production. The table of parameters for the developed devices manufactured by the enterprise is given.

Key words: optical sight, zoom-system, designing, calculation of the optical system, optical sights tests.

Адрес для переписки: Стасилович В.А., Макаенка 23, 220114, г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: stasilovich19@gmail.com

Прогресс в создании снайперского вооружения и применение специальных боеприпасов привел к увеличению дальности стрельбы и стабильности баллистических характеристик. В этой связи выдвигаются повышенные требования к оптическим прицелам, которые вносят не менее значимый вклад в достижения высокой точности поражения цели, такие как: повышение кратности при одновременном расширении перепада увеличений (параметр Z), высокое качество изображений во всех диапазонах изменения Z , стабильность линии прицеливания как при изменении кратности, так и в условиях повышенных механических перегрузок и широкого диапазона рабочих температур.

Холдинг БелОМО имеет более чем 40-летний опыт производства снайперских прицелов. За эти годы выпущено более полумиллиона подобных изделий, при этом наиболее массовым является прицел ПСО-1, который находит потребителей до настоящего времени.

В данной работе на примере разработанных и серийно выпускаемых прицелов с перепадом кратностей $Z = 4-8$ проведен анализ современных подходов к проектированию, конструированию и технологическому обеспечению заданных технических параметров, находящихся на уровне лучших мировых образцов.

В основу расчета оптической системы прицела положено достижение следующих целевых

параметров: высокая разрешающая способность оптической системы на оси прицела и минимальное ее снижение на краю поля зрения, высокие параметры частотно-контрастной характеристики во всем диапазоне увеличений, оптимальные параметры изображения прицельной сетки и ее элементов, максимальное светопропускание, при минимальном рассеянии, поиск критичных недостаткам оптических элементов, упрощение и унификация оптической системы (применение однотипных элементов, минимального количества марок стекол), обеспечения термостабильности оптического изображения. Оптические характеристики ряда разработанных и изготавливаемых прицелов приведены в табл. 1.

Основной сложностью при конструировании оптических прицелов является обеспечение минимальной децентрировки и наклона оптических компонентов по отношению к оптической оси системы, обеспечения стабильности положения прицельного элемента сетки при изменении увеличения, достижения необходимых точностных параметров панкратической системы и параллаксической отстройки при перемещении линз, механическая стабильность их положения при высоких ударных (до 1000 g) и длительных до 5 мс нагрузках, а также вибрационная устойчивость к резонансным частотам, плавность хода механических узлов (панкратической системы), при одновременной четкой их работе и пыле- и влаго-

защищенности прицела по классу IP68, а также четкая работа маховиков горизонтальной и вертикальной выверок с ощутимым шагом, отсутствием проскальзываний. Также необходимо

понимать специфику условий работы и параметров прицела, для выбора наиболее подходящих компонентов прицела.

Таблица 1. Предельные параметры приборов разработанных и выпускаемых НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Вид контроля и испытаний	Параметры испытаний				
	GS3-12×50	GS5-25×56M1	GS3-24×56	GS1-8×24	GS1-8×24FFP
Увеличение	3–12	5–25	3–24	1–8	1–8
Контроль поверхностей линз объективов	N=3 $\Delta N=0.3$	N=2 $\Delta N=0.3$	N=3 $\Delta N=0.3$	N=5 $\Delta N=0.5$	N=5 $\Delta N=0.5$
Ударные нагрузки	450g 1–2 мс	600g 1–2 мс	450g 1–2 мс	450g 1–2 мс	450g 1–2 мс
Вибрационные нагрузки	4g 20–80 Гц 4g 25 Гц				
Увод линии прицеливания	0,1 мрад	0,05 мрад	0,1 мрад	0,1 мрад	0,1 мрад
Разрешающая способность	2,8''	2,5''	2,5''	4''	4''
Пропускание	Не менее 85-90%				
Угол поля зрения	6,3° 1,95°	3,1° 0,85°	6,6° 0,85°	20° 2,7°	20° 2,7°
Удаление выходного зрачка	80 мм	85 мм	85 мм	85 мм	85 мм
Диаметр выходного зрачка	10 мм 3 мм	10 мм 2,1 мм	9 мм 2,3 мм	9,5 мм 3 мм	9,5 мм 3 мм
Тепловые нагрузки	-40°–+50°				
Пыле- и влагозащита	IP68	IP68	IP67	IP67	IP68
Усилие вращения элементов	Не более 70 Н·м				
Шаг маховика выверки	0,1 мрад				

Технологические аспекты реализации прицелов современного уровня обусловлены оптимизацией изготовления оптических и механических деталей, процесса сборки и юстировки, а также контроля качества. При этом создание технологического прицела начинается во время разработки и конструирования прицела с учетом имеющегося оборудования обработки и контроля деталей, узлов и всего прицела в целом. Особая роль отводится выбору способа крепления деталей, оптимизации механических процессов нанесения как оптических, так и механических покрытий, а также обеспечения чистоты поля зрения и отсутствия осыпки на всех оптических элементах прибора. Однако вопрос высокого качества изображения оптических прицелов решается не только децентрировкой и наклоном оптических элементов относительно общей оптической оси, но также применением высококачественного стекла, высокой точности обработки оптических элементов, соответствие положения оптических элементов панкратической системы расчетному при изменении увеличения [1]. Причем для различных оптических систем влияния качества изготовления поверхностей оптических элементов и их децентрировка и наклон относительно общей оптической оси будут иметь различную степень влияния на построение конечного изображения, но соответствие положения оптического элемен-

та его расчетному значению будет иметь глобальный характер. При этом необходимо учитывать, что при изменении увеличения прицела положение объективов панкратической системы изменяется нелинейным образом, что отражается на усложнении конструкции деталей панкратической системы, поиске компромисса между эргономичностью и простотой изготовления [2]. Приведенные в таблице 1 критерии напрямую влияют на особенности контролируемых параметров.

В итоге проведенной работы на предприятии НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО», создано новое поколение оптических прицелов переменной кратности, основные характеристики которых представлены в таблице 1 по видам испытаний. По своему качеству и техническому уровню представленные прицелы находятся на уровне лучших мировых образцов и успешно поставляются на экспорт.

Литература

1. Заварзин, В. А. Оптический прицел переменного увеличения / В. А. Заварзин // Вестник московского государственного технического университета им. Баумана. Серия «Приборостроение». – 2009. – С. 11–21.
2. Киселёв, А. С. О проблеме точности сборки и юстировки оптических прицелов / А. С. Киселёв, А. С. Киселёв, В. Н. Назаров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2006. – С. 180–186.

УДК 621

ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ И СОЗДАНИЕ ЭТАЛОНА НА ИХ ОСНОВЕ

Вольнец А.С.

РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приводятся результаты разработки и применения методов и средств измерения плотности потока энергии электромагнитного поля в микроволновом диапазоне и создания эталона на их основе.

Ключевые слова: плотность потока энергии электромагнитного поля, методы измерений, эталон.

HIGH-PRECISION METHODS AND MEANS OF MEASURING THE ENERGY FLUX DENSITY OF THE ELECTROMAGNETIC FIELD IN THE MICROWAVE RANGE AND CREATION OF THE STANDARD

Volynets A.

Belarusian State Institute of Metrology
Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the results of the development and application of methods and instruments for measuring the energy flow density of the electromagnetic field in the microwave range and the creation of a standard.

Key words: energy flux density of the electromagnetic field, measurement methods, standard.

Адрес для переписки: Вольнец А.С., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: info@belgim.by

Измерение плотности потока энергии (далее – ППЭ) электромагнитного поля является предметом государственного регулирования. Так в соответствии с Законом Республики Беларусь «Об обеспечении единства измерений» измерители уровней электромагнитных излучений и измерительные антенны входят в перечень категорий средств измерений, подлежащих обязательной государственной поверке при применении в измерениях для обеспечения защиты жизни и здоровья человека, обороны и безопасности государства, экспертизы на электромагнитную совместимость. В Республике Беларусь эксплуатируется большое количество средств измерений, которые обеспечивают контроль параметров электромагнитного поля и метрологическую оценку которых необходимо обеспечить. Эксплуатируемая до разработки эталона в Республике Беларусь установка для поверки измерителей ППЭ электромагнитного поля П1-9 не обеспечивала метрологическую оценку средств измерений ППЭ с требуемой точностью, кроме того не обеспечивалась возможность позиционирования при проведении измерений новых моделей средств измерений. Появилась необходимость разработки усовершенствованных методов воспроизведения и передачи единицы ППЭ электромагнитного поля, созданию и внедрению на их основе эталона единицы ППЭ электромагнитного поля миллиметрового диапазона, а также исследованию его характеристик. Для достижения поставленной цели были решены следующие научные задачи:

1. Анализ существующих и разработка усовершенствованных методов воспроизведения единицы ППЭ электромагнитного поля и передачи ее размера различным типам средств измерений, анализ источников погрешности измерений.

2. Разработка метода уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте и алгоритмов применения его при высокоточных измерениях ППЭ электромагнитного поля, а также при определении эффективной площади измерительной антенны методом трех антенн.

3. Разработка метода определения коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, позволяющего упростить процедуру измерений для получения большей информации о пространственной и частотной структуре электромагнитного поля в безэховой камере при сокращении времени выполнения измерений с сохранением точности измерений.

4. Создание на основе разработанных высокоточных методов и средств измерений ППЭ электромагнитного поля аппаратно-программных средств эталона с характеристиками, соответствующими требованиям уровня развития техники.

5. Оценивание точностных характеристик эталона при воспроизведении и передаче единицы ППЭ с учетом предложенных методов уменьшения составляющих погрешности измерений.

Среди методов воспроизведения и передачи единицы ППЭ для исследований был выбран метод эталонной антенны. В основу метода положено поочередное измерение в заданной точке пространства ППЭ исследуемым и эталонным измерителем ППЭ, состоящим из эталонной антенны и измерителя мощности, расчет ППЭ по формуле

$$P_{ЭТ} = \frac{P_{ПА}}{S_{ЭТ}},$$

где $P_{ПА}$ – значение мощности сигнала на выходе эталонной измерительной антенны, Вт; $S_{ЭТ}$ – эф-

эффективная площадь эталонной измерительной антенны, м^2 [1].

Для реализации функции воспроизведения и передачи единицы ППЭ были разработаны методики измерений для различных типов средств измерений. Учитывая наличие задач по метрологической оценке антенн с эллиптической поляризационной характеристикой, был теоретически обоснован и экспериментально подтвержден метод применения эталонных антенн с линейной поляризацией для определения коэффициента усиления антенн с эллиптической поляризацией способом замещения на основе введения дополнительных корректирующих коэффициентов, зависящих от параметров эллиптичности антенн. Искомый коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризацией находят расчетным путем по формуле:

$$G_{\text{ЭЛ}} = G_{\text{лин}} + G_{\text{кор}} + 3,$$

где $G_{\text{ЭЛ}}$ – коэффициент усиления антенны с эллиптической поляризацией, дБ; $G_{\text{лин}}$ – коэффициент усиления, определенный с помощью линейно поляризованной эталонной антенны, дБ; $G_{\text{кор}}$ – корректирующий коэффициент, дБ.

Корректирующий коэффициент рассчитывают исходя из коэффициента эллиптичности антенны по формуле:

$$G_{\text{кор}} = 10 \cdot \lg \left(0,5 \left(1 + \frac{1}{Z} \right) \right),$$

где Z – коэффициент эллиптичности антенны [2].

Результаты теоретических и экспериментальных исследований показали, что расширенная неопределенность результатов измерений коэффициента усиления антенны с эллиптической поляризационной характеристикой по предложенной методике составляет $\pm 1,0$ дБ.

Среди источников погрешности измерений при воспроизведении и передаче единицы ППЭ электромагнитного поля, дающих основной вклад в неисключенную систематическую погрешность и определяющих точностные характеристики метода эталонной антенны, были выделены неидеальность характеристик измерителя мощности при измерениях мощности на выходе эталонной антенны, погрешность определения эффективной площади эталонной антенны, погрешность из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте, переотражения электромагнитных полей от стен безэховой камеры.

Для уменьшения погрешности из-за рассогласования был разработан модернизированный метод уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте эталона за счет применения поправочного множителя на основе результатов экспериментальных исследований комплексных коэффициентов отражения эталонной измерительной антенны и термоэлектрического преобразователя измерителя мощности. Выполнен анализ эффективности метода, проведены экспериментальные исследования и определены

поправочные множители для работы с эталоном. Практическое использование метода позволило снизить погрешность из-за рассогласования в 9–10 раз до уровня $\pm(0,1-1,6) \cdot 10^{-2}$ [3].

Разработан модернизированный метод трех антенн, отличительной особенностью которого является коррекция результатов измерений с использованием поправочного множителя, определяемого из значений комплексных коэффициентов отражения компонентов сверхвысокочастотного измерительного и излучающего тракта эталона. Доказано, что предложенная модернизация метода позволяет уменьшить его погрешность в 3–5 раз до уровня $\pm(2,9-3,9) \cdot 10^{-2}$. Определена эффективная площадь эталонных измерительных антенн модернизированным методом, подтверждена метрологическая совместимость полученных результатов с результатами измерений национального метрологического института Российской Федерации [4].

Для уменьшения исключения неисключенной систематической погрешности из-за переотражений от стен безэховой камеры была разработана методика выполнения измерений коэффициента безэховости экранированной безэховой камеры, основанная на сравнении теоретических и экспериментальных данных о напряженности электромагнитного поля, создаваемого перемещающейся прецизионной антенной. Основным преимуществом методики является существенное сокращение времени выполнения измерений за счет использования автоматизированных измерительных комплексов и разработанных алгоритмов обработки данных. На основании экспериментальных исследований доказана сопоставимость результатов измерений по разработанной методике с результатами известного метода. Практическое применение метода позволило уменьшить погрешность измерений из-за переотражений в безэховой камере в диапазоне частот от 1 до 18 ГГц в 2–3 раза [5].

Разработана структура построения эталона, его блоков и компонентов, создано устройство позиционирования, позволяющее осуществить установку эталонных и исследуемых измерительных антенн (измерителей плотности потока энергии), произвести под управлением программного обеспечения их позиционирование. Эталон был утвержден в качестве Национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля НЭ РБ 26-15 в 2015 году, по результатам выполненной научно-исследовательской работы в 2020 году были улучшены его метрологические характеристики и утвержден новый паспорт эталона.

Заключение. Разработанные методы позволили сократить границы неисключенной систематической погрешности воспроизведения единицы в 2,5–3,0 раза от уровня $\pm(1,0-23,4) \cdot 10^{-2}$ до уровня $\pm(4,0-6,7) \cdot 10^{-2}$ и тем самым существенно повысить точность измерений в области электромагнитных полей и излучений в стране. Созданный на основе разработанных высокоточных методов и средств измерений ППЭ эталон обеспечивает воспроизведение единицы ППЭ в диапа-

зоне частот от 300 МГц до 39,65 ГГц со средним квадратическим отклонением результатов измерений $(0,1-1,3) \cdot 10^{-2}$ при числе измерений $n = 5$ и неисключенной систематической погрешностью $\pm(4,0-6,7) \cdot 10^{-2}$. Доверительные границы суммарной погрешности воспроизведения единицы ППЭ электромагнитного поля эталоном в зависимости от диапазона частот оспроизводимой единицы составляют $\pm(4,0-7,8) \cdot 10^{-2}$ при доверительной вероятности $p=0,95$. Среднее квадратическое отклонение суммы неисключенных систематических и случайных погрешностей метода передачи размера единицы составляет $(1,8-5,5) \cdot 10^{-2}$. Расширенная неопределенность измерений при воспроизведении единицы ППЭ электромагнитного поля эталоном составляет $(4,2-7,5) \cdot 10^{-2}$ [6].

Литература

1. Вольнец, А. С. Национальный эталон единицы плотности потока энергии электромагнитного поля / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2016. – № 2. – С. 10–19.

2. Вольнец, А. С. Калибровка антенн с круговой поляризацией с использованием линейно поляризованных эталонных антенн / А. С. Вольнец, А. В. Гусинский // Метрология и приборостроение. – 2015. – № 1. – С. 18–22.

3. Вольнец, А. С. Повышение точностных характеристик национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля за счет уменьшения погрешности из-за рассогласования в сверхвысокочастотном измерительном тракте / А. С. Вольнец, А. В. Гусинский, А. М. Кострикин // Метрология и приборостроение. – 2017. – № 1. – С. 17–24.

4. Вольнец, А. С. Определение эффективной площади эталонных антенн национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля методом трех антенн / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2018. – № 3. – С. 3–9.

5. Вольнец, А. С. Реализация метода КСВн при определении коэффициента беззховости экранированной беззховой камеры / А.С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 1. – С. 18–24.

6. Вольнец, А. С. Совершенствование национального эталона единицы плотности потока энергии электромагнитного поля / А. С. Вольнец // Метрология и приборостроение. – 2020. – № 2. – С. 10–19.

УДК 531.383

ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЗИЦИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Матвеев В.В.

ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация

Аннотация. Рассматривается волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором при позиционном возбуждении стоячей волны. Теоретически и экспериментально доказана нелинейная зависимость амплитуд колебаний пучности и узла от угловой скорости основания. Предложен способ формирования выходного сигнала гироскопа прямого измерения, позволяющий расширить линейную зону рабочей характеристики. Приведена структурная схема гироскопа для огибающих амплитуд колебаний пучности и узла стоячей волны.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, стоячая волна, структурная схема.

CORIOLIS VIBRATION GYROSCOPE WITH POSITIONAL EXCITATION OF A STANDING WAVE

Matveev V.

FSBEI HE "Tula State University"
Tula, Russia

Abstract. A Coriolis vibrating gyroscope with a metal resonator under positional excitation of a standing wave is considered. The nonlinear dependence of the amplitudes of the oscillations of the antinode and the node on the angular velocity of the base has been theoretically and experimentally proved. A method for generating the output signal of a direct measurement gyroscope is proposed, which makes it possible to expand the linear zone of the operating characteristic. The block diagram of the gyroscope for the envelopes of the amplitudes of the oscillations of the antinode and the node of the standing wave is presented.

Key words: Coriolis vibrating gyroscope, standing wave, structural diagram.

Адрес для переписки: Матвеев В.В., пр. Ленина, 92, г. Тула 300012, Российская Федерация
e-mail: matweew.valery@yandex.ru

Математическая модель ВТГ. В волновом твердотельном гироскопе (ВТГ) с позиционным возбуждением для обнаружения угловой скорости основания используется свойство инерции

стоячей волны, возбуждаемой в резонаторе (рис. 1). Точки резонатора с максимальной амплитудой радиальных колебаний называются пучностями (*antinode*), а с минимальным – узла-

ми (*node*). При вращении основания с угловой скоростью Ω возникают колебания узлов, амплитуда которых пропорциональна Ω .

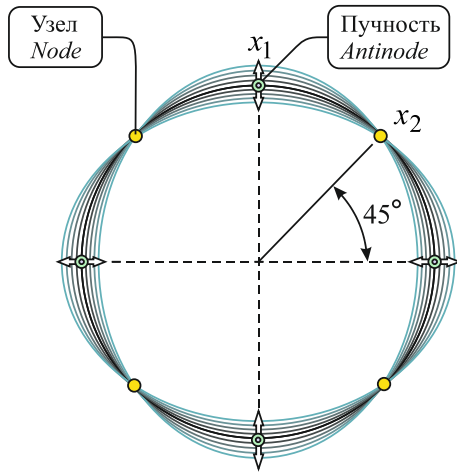


Рисунок 1 – Стоячая волна в резонаторе

Математическая модель ВТГ, описывающая колебания пучности и узла, сводится к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, предложенных докт. Д. Линчем (*D. Lynch*) [1]:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi\omega_1\dot{x}_1 + (\omega_1^2 - \Omega^2)x_1 &= f_0 \sin \nu t + 2K\Omega\dot{x}_2, \\ \ddot{x}_2 + 2\xi\omega_2\dot{x}_2 + (\omega_2^2 - \Omega^2)x_2 &= -2K\Omega\dot{x}_1, \end{aligned} \right\} (1)$$

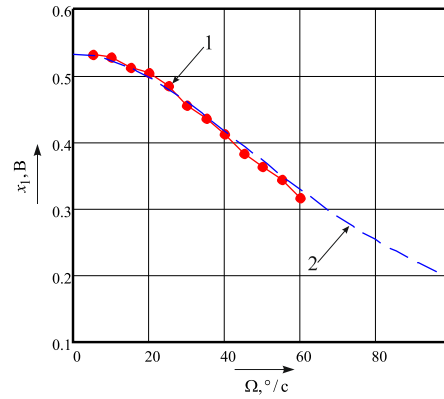
где x_1, x_2 ; ω_1, ω_2 – радиальные перемещения пучности и узла и собственные частоты резонатора соответственно; ξ – относительный коэффициент демпфирования; Ω – угловая скорость основания; K – коэффициенты Брайана; f_0, ν – амплитуда и частота, ускорения кромки резонатора, придаваемая системой возбуждения.

Анализ характеристик ВТГ. Установившиеся амплитуды колебаний пучности и узла, полученные на основании системы уравнений (1) в резонансном режиме ($\omega_1 = \omega_2 = \nu$) имеют вид

$$x_{10}^{уст} = \frac{Tf_0}{2\nu(1+n\Omega^2)}, x_{20}^{уст} = \frac{T^2Kf_0}{2\nu} \frac{\Omega}{1+n\Omega^2}, (2)$$

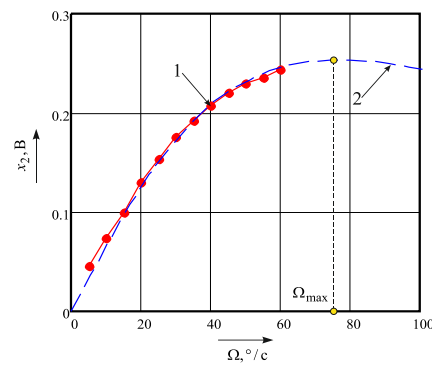
где $T = 2Q/\nu$ – постоянная времени резонатора ($Q = 1/(2\xi)$ – добротность), $n = K^2T^2$.

Из решений (2) следует, что колебания пучности и узла имеют нелинейную зависимость от угловой скорости основания. Степень нелинейности определяется значением коэффициента n . На рис. 2, 3 приведены экспериментальные и теоретические зависимости амплитуд колебаний пучности и узла ВТГ от угловой скорости основания, иллюстрирующие нелинейную зависимость. Из рис. 2 также следует, что амплитуда узла возрастает с увеличением угловой скорости до значения Ω_{max} , а затем начинает снижаться.



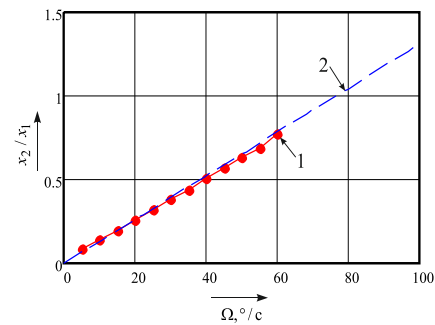
1 – эксперимент, 2 – теория

Рисунок 2 – Зависимость амплитуды пучности от угловой скорости основания



1 – эксперимент, 2 – теория

Рисунок 3 – Зависимость амплитуды узла от угловой скорости основания:



1 – эксперимент, 2 – теория

Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость отношения амплитуд узла к амплитуде пучности ВТГ с металлическим резонатором от угловой скорости

Максимум амплитуды вторичных колебаний достигается при угловой скорости

$$\Omega_{max} = \frac{1}{TK} = \frac{\nu}{2QK}. (3)$$

Для постоянной времени резонатора ВТГ $T = 1,8$ с и коэффициенте Брайна $K = 0,4$ максимум амплитуды узла будет достигаться при угловой скорости основания ≈ 76 °/с, что свидетельствует из анализа рис. 3.

Для расширения линейности характеристики ВТГ прямого измерения, необходимо формировать сигнал об измеряемой угловой скорости, как отношение амплитуды узла к амплитуде пучности:

$$\frac{x_{20}^{уст}}{x_{10}^{уст}} = TK\Omega. \quad (4)$$

Отношение амплитуд линейно зависит от угловой скорости основания, что подтверждается результатами экспериментов на рис. 4.

Структурная схема ВТГ. На рис. 5 приведена структурная схема ВТГ прямого измерения по огибающим амплитуд колебаний пучности и узла.

Структурная схема соответствует случаю постоянной угловой скорости основания и резонансной настройке контуров пучности (узла) и позволяет моделировать ВТГ без учета высокочастотной несущей колебаний резонатора [2]. Кроме того, схема позволяет исследовать ВТГ в компенсационном режиме путем формирования соответствующих обратных связей и включения в цепи корректирующих звеньев.

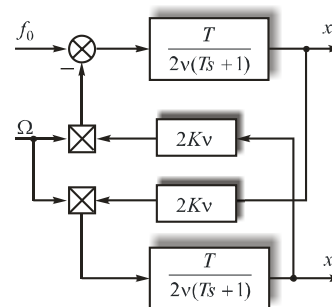


Рисунок 5 – Структурная схема КВГ для огибающих колебаний резонатора

Литература

1. Lynch, D. D. Coriolis vibratory gyroscope. IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros / D. D. Lynch, IEEE std.1431 annex B. – P. 56–66.

2. Информационные характеристики микромеханических гироскопов на основе кремниевой технологии микроэлектромеханических систем / Л. А. Северов, [и др.] // Изв. вузов «Приборостроение» – 2011. – № 8. – С. 12–22.

УДК 519.7

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРИБОРОСТРОЕНИЮ

Лебедев А.Н.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Предложены новые методы решения трех главных задач в области защиты информации как при ее передаче по каналам связи, в частности, через интернет, так и при ее хранении на носителях и в процессе обработки на процессорах вычислительных и управляющих устройств. Это, во-первых, задача построения стойких и эффективных алгоритмов защитного кодирования данных, во-вторых, задача построения стойких и практически реализуемых алгоритмов выработки общего секрета (ключа) парой удаленных пользователей сети при помощи обмена только открытыми сообщениями и, в-третьих, задача надежной цифровой аутентификации передаваемых сообщений и хранимой информации.
Ключевые слова: защитное кодирование данных, обобщенный протокол Диффи-Хеллмана, цифровая аутентификация, легковесные алгоритмы, массовые микроконтроллеры общего назначения.

CONTEMPORARY INFORMATION SECURITY TECHNOLOGIES TO INSTRUMENT ENGINEERING

Lebedev A.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. New methods of solving three main tasks in the field of information security are proposed, both when it is transmitted via public communication channels, in particular, via the Internet, and when it is stored on various types of media and directly during processing on processors of modern computing and control devices. This is, firstly, the task of building persistent and effective algorithms for data security encoding, secondly, the task of building persistent and practically implementable algorithms for generating a common secret (key) by a pair of remote network users using the exchange of only open messages, and, thirdly, the task of reliable digital authentication of transmitted messages and stored information. We have proposed some new one way functions for generalization of the Diffie-Hellman protocol.

Key words: security data encoding, generalized Diffie-Hellman protocol, digital authentication, lightweight algorithms, general-purpose mass microcontrollers.

*Адрес для переписки: Лебедев А.Н., 2-я Бауманская ул. 5, стр 1, г. Москва 105005, Российская Федерация
lebedevan@bmstu.ru*

Введение. Алгоритм защитного кодирования NASH (рис. 1) [1].

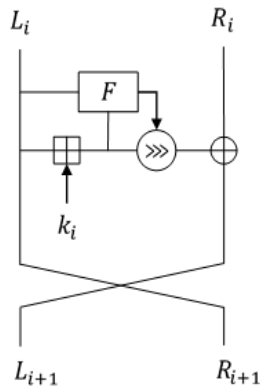


Рисунок 1 – Схема раунда i алгоритма NASH

Символами L_i и R_i обозначены левая и правая половинки блока данных, символом k_i обозначен раундовый ключ.

Формулы преобразования блока данных:

$$R_{i+1} = L_i,$$

$$L_{i+1} = (L_i \boxplus k_i \ggg F(L_i, L_i \boxplus k_i)) \oplus R_i.$$

В последнем раунде половинки выходного блока L_{i+1} , R_{i+1} не меняются местами, то есть:

$$L_{i+1} = L_i,$$

$$R_{i+1} = (L_i \boxplus k_i \ggg F(L_i, L_i \boxplus k_i)) \oplus R_i.$$

В работах [2–4] предложен новый общий метод формирования общего секрета (ключа, кода, аутентификатора) парой пользователей информационной системы (в частности, сети интернет), радикально расширяющий известные варианты протокола Диффи-Хеллмана и его обобщений, как его оригинального варианта, так и его модификаций с взаимной аутентификацией сторон или с аутентификацией только одной из них.

Оригинальный протокол Диффи-Хеллмана и его модификации [2, 3], что применяются для формирования общего секрета (ключа взаимной аутентификации) парой пользователей информационной системы (например, сети интернет), использующих для обмена сообщениями общедоступный канал передачи данных, состоят в следующем:

– пользователи, обозначаемые как *Алиса* и *Боб*, умеют вычислять значения конечных однонаправленных функций $f(x)$, $g(x, y)$;

– функция $f(x)$ определена на некотором конечном множестве X большой мощности и принимает значения из большого конечного множества Y , то есть $f(x) : X \rightarrow Y$;

– функция $g(x, y)$ определена на декартовом произведении этих множеств $X \times Y$ и принимает

значения из третьего большого конечного множества Z , то есть $g(x, y) : X \times Y \rightarrow Z$;

– стороны независимо выбирают случайные элементы x_1, x_2 множества X , вычисляют значения $f(x_1), f(x_2)$ и обмениваются ими по доступному им каналу связи, например, по сети интернет, то есть передают $f(x_1) \leftrightarrow f(x_2)$,

– затем они вычисляют общий секрет (ключ, аутентификатор) пары (*Алиса*, *Боб*) по формулам $K = g(x_1, f(x_2)) = g(x_2, f(x_1))$.

Протокол DHFL

Шаг	Информация Алисы	Информация Боба
1	Случайно выбирает $x_1, x_1 \in X$	Случайно выбирает $x_2, x_2 \in X$
2	Вычисляет элемент $Q_1 = g \otimes g \otimes \dots \otimes g$ «умножая его» x_1 раз	Вычисляет элемент $Q_2 = g \otimes g \otimes \dots \otimes g$ «умножая его» x_2 раз
3	Получает от партнера $Q_2 = g \otimes g \otimes \dots \otimes g$ «умноженный» x_2 раз	Получает от партнера $Q_1 = g \otimes g \otimes \dots \otimes g$ «умноженный» x_1 раз
4	Вычисляет элемент $K_1 = Q_2 \otimes Q_2 \otimes \dots \otimes Q_2$ «умножая его» x_1 раз	Вычисляет элемент $K_2 = Q_1 \otimes Q_1 \otimes \dots \otimes Q_1$ «умножая его» x_2 раз

Предлагаются функции $f(x)$, $g(x, y)$ построенные на взаимно однозначном дробно-линейном преобразовании в показателях дискретной экспоненты над большим простым полем \mathbb{Z}_p , или взаимно однозначном дробно-линейном преобразовании в показателе кратности некоторой заданной заранее точки $P \in E_{a,b}(\mathbb{F})$ в группе точек эллиптической кривой над большим конечным полем

$$\mathbb{F}, E_{a,b}(P) = \{(x, y) | x, y \in \mathbb{F}, y^2 = x^3 + ax + b(\mathbb{F})\}.$$

Идея использования дробно-линейного взаимно однозначного преобразования именно для этой цели была впервые высказана в работах автора настоящего доклада [2, 3].

Поскольку новая операция умножения \otimes ассоциативна, то возможна перестановка скобок, а перестановкой скобок доказывается равенство:

$$K = K_1 = Q_2 \otimes Q_2 \otimes \dots \otimes Q_2 = K_2 = Q_1 \otimes Q_1 \otimes \dots \otimes Q_1.$$

Таким образом, получившийся алгоритм корректен.

В работе [5] предложен новый метод защиты от манипулирования ценами в ходе электронных биржевых торгов. Алгоритмическая база метода построена на современных алгоритмах защиты данных и аутентификации трейдеров. Он может быть реализован в виде множества конкретных опций.

Литература

1. Лебедев, А. Н. Легковесный алгоритм защитного кодирования – NASH / А. Н. Лебедев, А. М. Карондеев, А. А. Козлов // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 56–64.
2. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Куроша. : тезисы докладов. – М.: Издательство МГУ, 2018. – С. 123–127.
3. Лебедев, А. Н. Новая арифметика конечного коммутативного кольца и ее использование в криптографии / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 49–63.
4. Лебедев, А. Н. Новый протокол выработки общего секрета / А. Н. Лебедев, А. О. Кокорин // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 97–104.
5. Лебедев, А. Н. Методы защитного кодирования и аутентификации данных в организации биржевых торгов / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 65–89.

УДК 534-16; 534-8:621.9.048.6

**ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ
РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТИПОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ
ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ**
Степаненко Д.А.¹, Бунчук К.А.²

¹Белорусский национальный технический университет
²РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты работ по исследованию и практической реализации новых типов ультразвуковых колебательных систем на основе кольцевых упругих элементов. Описаны механико-математические и компьютерные методы моделирования колебаний и методика экспериментального определения эксплуатационных характеристик кольцевых волноводов-концентраторов, обеспечивающих усиление ультразвуковых колебаний по амплитуде. Рассмотрены перспективные направления их применения в технике и медицине и преимущества по сравнению с традиционно применяемыми стержневыми концентраторами.

Ключевые слова: ультразвуковые концентраторы, кольцевые волноводы, усиление колебаний.

**PHYSICAL, MATHEMATICAL AND ENGINEERING ASPECTS
OF THE DEVELOPMENT OF NOVEL ULTRASONIC VIBRATORY SYSTEMS
FOR APPLICATION IN ENGINEERING AND MEDICINE**
Stepanenko D.¹, Bunchuk K.²

¹Belarusian National Technical University
²State Unitary Innovative Enterprise “Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”
Minsk, Belarus

Abstract. The article presents results of the works on the study and practical implementation of novel ultrasonic vibratory systems based on application of ring-shaped elastic elements. It describes mechanical-mathematical and computer methods used for modelling of vibrations and methodology used for experimental determination of operational characteristics of ring-shaped waveguides ensuring amplification of ultrasonic vibrations amplitude. Potential applications of ring-shaped waveguides in engineering and medicine and their advantages over traditionally used bar waveguides (horns) are considered.

Key words: ultrasonic horns, ring-shaped waveguides, amplification of vibrations.

*Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by*

Низкочастотные ультразвуковые колебания высокой интенсивности с частотой от 20 до 100 кГц и интенсивностью более 1 Вт/см² являются эффективным средством повышения производительности и точности выполнения многих технологических операций, таких как обработка металлов давлением и резанием, размерная обработка хрупких материалов, очистка деталей от загрязнений, сварка и пайка. Ультразвуковые аппараты и инструменты также находят широкое применение в медицине, в частности в общей и сердечно-сосудистой хирургии используются

хирургические инструменты, рабочим окончанием которых сообщаются ультразвуковые колебания, что позволяет снизить травматичность хирургических операций за счет обеспечения гемостатического эффекта и селективности разрушения патологических тканей. С учетом широкого спектра практических применений ультразвука значительный интерес со стороны инженерного сообщества вызывают проблемы разработки и внедрения новых типов ультразвуковых колебательных систем (УЗКС), в частности, в БНТУ проводятся работы по ис-

следованию и практической реализации УЗКС на основе кольцевых упругих элементов.

Идея применения кольцевых упругих элементов в ультразвуковой технике не является принципиально новой и описана в ряде литературных источников, однако физико-математические аспекты практической реализации этой идеи являются недостаточно исследованными. В частности, до недавнего времени отсутствовали исследования, посвященные возможности применения кольцевых упругих элементов в качестве волноводов-концентраторов, обеспечивающих усиление ультразвуковых колебаний по амплитуде. Традиционно в ультразвуковой технике усиление колебаний по амплитуде реализуется с помощью стержневых концентраторов, представляющих собой осесимметричные стержни с изменяющейся в осевом направлении продольной жесткостью, что технически достигается за счет геометрического профилирования стержня (осевого изменения площади его поперечного сечения) или за счет создания осевого градиента модуля продольной упругости. Недостатками таких концентраторов являются значительные масса и габаритные размеры (особенно в области низких частот). Усилительная функция кольцевых волноводов-концентраторов реализуется за счет окружного изменения их изгибной жесткости, что, как и в случае стержневых концентраторов, может достигаться путем геометрического профилирования либо путем создания градиента физико-механических свойств материала. При этом концентратор временно трансформирует создаваемые ультразвуковым преобразователем продольные колебательные смещения в изгибные, усиливая их по амплитуде, а затем снова трансформирует их в продольные колебания, сообщаемые рабочему инструменту.

Простейшими конструктивными вариантами кольцевых волноводов-концентраторов являются кольцевые упругие элементы с параллельными плоскими поверхностями и эксцентричным взаимным расположением цилиндрических поверхностей и кольцевые упругие элементы с коаксиальными цилиндрическими поверхностями и наклонными плоскими поверхностями. Такие концентраторы являются простыми в изготовлении и имеют массу и габаритные размеры, значительно меньшие по сравнению со стержневыми концентраторами (например, габаритные размеры стержневых концентраторов из среднеуглеродистой стали с собственной частотой колебаний 20 кГц составляют порядка 120 мм, в то время как диаметр кольцевого концентратора с той же собственной частотой может быть сокращен до 40 мм и менее).

Интересной с практической точки зрения также представляется возможность частотного согласования кольцевых концентраторов с ультразвуковым преобразователем путем изменения статической нагрузки на связанный с концентратором рабочий инструмент: возникающая при этом статическая деформация будет приводить к смещению амплитудно-частотной характеристики

(АЧХ) концентратора, практически не оказывая влияния на АЧХ преобразователя, так как продольная жесткость преобразователя существенно выше изгибной жесткости концентратора.

Для описанных выше конструктивных вариантов кольцевых волноводов-концентраторов были разработаны компьютерные и механико-математические модели их колебаний, позволяющие определять основные эксплуатационные характеристики концентраторов, такие как собственные частоты колебаний и значения коэффициента усиления колебаний по амплитуде. Моделирование производилось с помощью метода конечных элементов (МКЭ) с применением программы COMSOL Multiphysics и с помощью метода гармонического баланса (МГБ), позволяющего представить распределение параметров колебаний по длине концентратора в полуаналитическом виде с использованием многочленов Фурье. При этом было показано, что МГБ дает наиболее точные результаты при использовании механико-математической модели, основанной на уравнениях изгибных колебаний типа Тимошенко, дополнительно учитывающих по сравнению с более простыми уравнениями типа Эйлера-Бернулли такие факторы, как растяжимость нейтральной оси, инерцию вращения поперечного сечения и сдвиговые напряжения. При этом наличие собственных форм колебаний, связанных с растяжением нейтральной оси, предсказывается только при использовании уравнений типа Тимошенко.

Для подтверждения результатов моделирования была разработана методика экспериментального определения эксплуатационных характеристик кольцевых волноводов-концентраторов, основанная на ударном возбуждении колебаний с последующей регистрацией отклика волновода с помощью пленочного пьезоэлектрического датчика, конформно закрепленного на его поверхности посредством адгезионного соединения. На основе теории контактного взаимодействия упругих тел при ударе были обоснованы параметры ударного элемента, необходимые для возбуждения колебаний в требуемом частотном диапазоне (до 50 кГц). Предложенная методика также позволяет определять механическую добротность концентратора на каждой из собственных частот колебаний.

Концентраторы с градиентом физико-механических свойств материала могут быть практически реализованы путем сварки двух кольцевых сегментов из разнородных материалов, в частности, были изготовлены опытные образцы таких концентраторов путем сварки трением с перемешиванием. Для подобных составных концентраторов разработаны модели их колебаний, основанные на применении МКЭ, МГБ и метода передаточных матриц. На основе разработанных моделей показано, что усиление колебаний по амплитуде составными кольцевыми концентраторами обеспечивается при их работе на собственных формах колебаний, связанных с растяжением нейтральной оси. При

этом зависимость коэффициента усиления от центрального угла входного сегмента концентратора характеризуется наличием ряда локальных максимумов, что дает возможность оптимизации концентратора по коэффициенту усиления путем варьирования его геометрических параметров.

Анализ вынужденных колебаний кольцевого упругого элемента постоянной изгибной жесткости (равнотолщинного кольца из однородного материала) под действием сосредоточенной нагрузки показывает, что он также может выполнять усилительную функцию при условии работы в окolorезонансном режиме, то есть при наличии рассогласования между собственной частотой его колебаний и частотой вынуждающего воздействия (рабочей частотой ультразвукового преобразователя). Колебания концентратора будут иметь при этом многомодовый характер, то есть в нем будет одновременно возбуждаться множество собственных форм колебаний. Доминирующими по амплитуде будут моды, собственные частоты которых наиболее близки к частоте вынуждающего воздействия. Вследствие противофазности этих мод их сложение будет приводить к снижению

амплитуды во входном сечении концентратора и ее увеличению в диаметрально противоположном выходном сечении, что соответствует усилению колебаний по амплитуде.

Потенциальными практическими применениями кольцевых волноводов-концентраторов являются ультразвуковая размерная обработка, ультразвуковая сварка проволочных выводов изделий микроэлектронной техники и ультразвуковая хирургия. В частности, известны исследования В.П. Лугового и И.В. Лугового, демонстрирующие эффективность применения кольцевых упругих элементов для повышения производительности ультразвуковой размерной обработки хрупких неметаллических материалов. Опытный образец УЗКС с кольцевым концентратором также прошел предварительные испытания на базе ОАО «Планар-СО», где имеются перспективы его применения в установках ультразвукового присоединения выводов. В ультразвуковой хирургии применение кольцевых концентраторов вместо традиционно используемых стержневых дает возможность повышения эргономичности хирургических инструментов за счет снижения их массы и габаритных размеров.

УДК 681.2

К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА Сервачинский И.Ю., Свистун А.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Статья посвящена истории приборостроительного факультета БНТУ, занимающегося подготовкой высококвалифицированных специалистов в области приборостроения.

Ключевые слова: приборостроение, приборостроительный факультет, кафедра, специальность.

TO THE HISTORY OF THE CREATION OF THE INSTRUMENTATION ENGINEERING FACULTY OF BELARUSIAN NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY Servachynski I., Svistun A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The article deals with the history of the Instrumentation Engineering Faculty of the Belarusian National Technical University that trains highly qualified specialists in the field of instrumentation engineering.

Key words: instrumentation, instrumentation engineering faculty, department, specialty.

*Адрес для переписки: Сервачинский И.Ю., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: servachinskij@bntu.by*

Приборостроительный факультет – это структурное подразделение Белорусского национального технического университета, ведущее подготовку специалистов высшей квалификации по комплексу специальностей и специализаций приборостроительного профиля. Будучи одним из самых молодых факультетов БНТУ, приборостроительный факультет имеет свою историю и свои традиции.

Родоначальницей всех приборостроительных специальностей БНТУ (тогда – Белорусский политехнический институт, БПИ) явилась кафедра

«Приборы точной механики», которая была открыта в 1961 г. на машиностроительном факультете Белорусского политехнического института. Первым заведующим кафедрой, возглавлявшим ее на протяжении 23 лет, был заслуженный работник высшей школы Республики Беларусь, профессор С.С. Костюкович.

Ускоренное развитие промышленности БССР в 1970-е гг. и увеличение значения приборостроения привели к росту и совершенствованию соответствующего направления высшего технического образования. Флагманом в данной сфере являлся

именно Белорусский политехнический институт. Большую роль в развитии приборостроительного образования сыграл тогдашний ректор БПИ, профессор Валентин Дмитриевич Ткачев (ректор БПИ в 1976–1983 гг.). По его инициативе в 1976 г. был организован оптико-механический факультет. Его деканами в разное время были Р.И. Томилин, В.И. Клецко, М.Г. Киселев. В том же, 1976-м году под руководством д.ф.-м. наук Г.С. Круглика была основана кафедра «Лазерная техника и технологии», а в 1977 г. – кафедра «Экспериментальная и теоретическая физика» (зав. кафедрой – д.ф.-м.н., профессор Д.С. Доманевский). В 1979 г. была открыта новая кафедра «Полупроводниковая микро- и оптоэлектроника» (зав. кафедрой – к.ф.-м.н., доцент В.Б. Яржембицкий).

В связи с дальнейшим расширением спектра приборостроительных специальностей в 1978 г. в БПИ был открыт инженерно-физический факультет, призванный готовить инженеров по специальностям «Оптическое и оптико-электронное приборостроение», «Технология оптического приборостроения», «Полупроводниковые и микроэлектронные приборы», «Прикладная математика». Деканами ИФФ были Г.С. Круглик и А.Ф. Литвинко. В 1981 г. в структуре факультета была создана кафедра «Инженерная математика», первым заведующим которой был избран д.ф.-м.н., профессор В.А. Ибрагимов.

В 1984 г. оптико-механический факультет и инженерно-физический факультет были объединены в один, и факультет стал именоваться инженерно-физическим. Таким образом был создан единый мощный факультет приборостроительного направления. Возглавил его д.т.н., профессор М.Г. Киселев.

В структуре факультета произошли изменения. На базе кафедр «Приборы точной механики» и «Киноаппаратура» были созданы кафедры «Технология производства приборов» (зав. кафедрой – д.т.н., профессор М.Г.Киселев) и «Стандартизация, метрология и информационные системы» (зав. кафедрой – д.т.н., профессор В.Л.Соломахо). В дальнейшем кафедра «Технология производства приборов» была переименована в кафедру «Конструирование и производство приборов».

В марте 1985 г. инженерно-физический факультет был переименован в приборостроительный. До 1998 г. деканом факультета являлся заслуженный работник образования Республики Беларусь, д.т.н., профессор М.Г. Киселев. Позже факультет возглавляли доцент В.И. Шамкалович, профессор О.К. Гусев, профессор А.М. Маляревич. В настоящее время факультетом руководит доцент А.И. Свистун.

В рамках приборостроительного факультета продолжилось совершенствование его структуры. Так, в 1987 г. на базе родственных кафедр «Полупроводниковая микро- и оптоэлектроника» и «Химия и технология специальных материалов» была образована кафедра «Технология материалов и приборы электронной техники» (зав. кафедрой – д.т.н., профессор Н.Н. Ермоленко). В 1993 г. на ПСФ организована новая кафедра – «Информационно-измерительная техника», которая в 1998 г. была объединена с кафедрой «Технология материалов и приборы электронной техники» в одну кафедру «Информационно-измерительная техника и технологии», существующую и в настоящее время. Заведующим объединенной кафедрой стал д.ф.-м.н., профессор И.Е. Зуйков.

В 2007 г. из состава кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» выделилась кафедра «Микро- и нанотехника» (зав. кафедрой, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор Ю.М. Плескачевский), чем в основном закончилось формирование современной структуры приборостроительного факультета. В 2010 году из факультета выделилась специальность «Спортивная инженерия», вошедшая во вновь созданный спортивно-технический факультет.

В настоящее время на факультете функционирует 4 научных подразделения: научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий, научно-исследовательская лаборатория полупроводниковой техники, научно-исследовательская лаборатория оптико-электронного приборостроения и отраслевая лаборатория инновационных приборов МЭМС-технологий; 2 студенческие научно-исследовательские лаборатории: «Приборостроение» и «Качество».

Сегодня в составе приборостроительного факультета находятся 7 кафедр, обеспечивающих подготовку кадров по 10 специальностям I степени получения высшего образования и по 2 специальностям II степени. На факультете проводится подготовка научных кадров высшей квалификации через докторантуру, аспирантуру и соискательство, работает докторский совет по защите диссертаций. С 2008 ежегодно на факультете проводятся Международная научно-техническая конференция «Приборостроение» и Международная научно-техническая конференция молодых ученых и студентов «Новые направления развития приборостроения». На базе факультета с 2010 года издается научно-технический журнал «Приборы и методы измерений», который включен в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований, различные базы цитирования Web of Science, РИНЦ и др.

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 681.785; 504.064

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ МИКРОЧАСТИЦАМИ

Алексеев В.А.¹, Юран С.И.², Усольцев В.П.¹

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,

²Ижевская государственная сельскохозяйственная академия
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрена система контроля загрязнений водоемов микрочастицами (мелкие фракции пластика), которая устанавливается на передвижную надводную или подводную станцию. Система снабжена устройством для непрерывного пропускания потока воды через измерительный блок на основе оптоэлектронного лазерного датчика. Для получения достоверной оценки степени загрязнения водной среды в виде мелких частиц предлагается использовать устройство для закручивания потока жидкости в виде спиралевидной геликоидальной трубы. При этом легкие фракции, содержащие различные загрязнители, включая микрочастицы пластика, концентрируются в центре потока, что повышает достоверность их обнаружения при лазерном зондировании.

Ключевые слова: загрязнение водоемов, лазерный датчик, микрочастицы, органические загрязнители, система контроля.

MICROPARTICLE POLLUTION CONTROL SYSTEM FOR NATURAL RESERVOIRS

Alekseev V.¹, Yuran S.², Usoltsev V.¹

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,

²Izhevsk State Agricultural Academy
Izhevsk, Russia

Abstract. A system for monitoring water pollution with microparticles (small fractions of plastic), which is installed on a mobile surface or underwater station, is considered. The system is equipped with a device for continuous transmission of water flow through the measuring unit based on an optoelectronic laser sensor. To obtain a reliable assessment of the degree of contamination of the aquatic environment in the form of small particles, it is proposed to use a device for twisting the liquid flow in the form of a spiral helical tube. At the same time, light fractions containing various pollutants, including plastic microparticles, are concentrated in the center of the flow, which increases the reliability of their detection during laser sensing.

Key words: pollution of water bodies, laser sensor, microparticles, organic pollutants, control system.

Адрес для переписки: Юран С.И., ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Российская Федерация
e-mail: yuran-49@yandex.ru

В последние годы существует проблема загрязнения естественных водоемов (рек, озер, морей, океанов) мелкими частицами, образующимися в результате разрушения изделий из пластмасс, в том числе из полиэтилена, различных органических загрязнителей. Следы этих загрязнений обнаруживаются даже в Арктике. Некоторые виды загрязнений активно влияют на морскую фауну и флору, проникая внутрь различных живых объектов, что приводит к гибели или мутации живого мира.

Известные системы и приборы, определяющие содержание частиц в процессе прокачки воды из естественного водоема, как правило, имеют низкую достоверность и не позволяют проводить оценку загрязнений в виде мелких включений из пластмассы, в том числе полиэтилена. Этот же недостаток имеют и лабораторные методы анализа, основанные на взятии и анализе проб, а также лидарные оценки с использованием аэро-, космических объектов. Малая плотность объектов и малая масса частиц не позво-

ляют фиксировать их с лидаров, а взятие проб не дает достоверную оценку огромных территорий естественных водоемов.

Поэтому задачей настоящей работы является разработка системы для обнаружения и оценки степени загрязнений в виде мелких частиц (легких фракций), содержащихся в естественных водоемах и системах очистки воды.

В работе для получения достоверной оценки степени загрязнения водной среды в виде мелких включений из пластмассы предлагается использовать устройства для закручивания потоков жидкости [1–3]. К ним относится спиралевидная геликоидальная труба Шаубергера. В результате применения устройства закручивания потоков жидкости водный поток в трубе разделяется на легкие и тяжелые фракции. Тяжелые фракции концентрируются ближе к стенкам трубы. Легкие фракции, содержащие различные загрязнители, включая микрочастицы пластика, концентрируются в центре потока. Подобные устройства используются при перекачке смесей жидкости и

руды, перекачки нефтепродуктов, а также для очистки жидкостей от мелкодисперсных загрязнителей в виде различных загрязняющих частиц, например, в виде песка.

Структурная схема системы для контроля содержания микрочастиц в воде представлена на рис. 1.

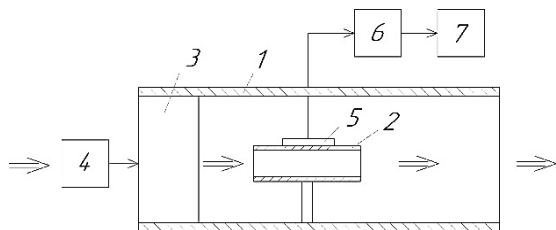


Рисунок 1 – Структурная схема системы

Система содержит пробозаборную емкость 1 в виде трубы с входным и выходным отверстиями, внутри которой размещена цилиндрическая оболочка 2 с меньшим диаметром, установленная соосно с пробозаборной емкостью 1.

На входе пробозаборной емкости 1 установлена спиралевидная геликоидальная труба 3, соединенная с насосом 4 для подачи жидкости из водоема, при этом цилиндрическая оболочка 2 размещена по центру пробозаборной емкости 1 и прикреплена кронштейном 4 к стенке пробозаборной емкости 1.

Внутри цилиндрической оболочки 2 размещен оптоэлектронный лазерный датчик 5, работающий, например, в инфракрасном диапазоне спектра [4, 5], и предназначенный для фиксации загрязнений в виде мелких частиц. В качестве источника излучения оптоэлектронного датчика может использоваться лазерный диод типа GN04850B2G с мощностью излучения 55 мВт.

Выход датчика 5 через измерительный блок 6, предназначенный для преобразования и предварительной обработки сигналов с оптоэлектронного лазерного датчика 5, соединен с бортовым компьютером 7, который производит подсчет количества порций загрязнений за определенное время. Это позволяет производить оценку загрязнения водоемов.

Измерительный блок 6 может быть выполнен на основе микроконтроллера, содержащего микропроцессорное ядро, соединенное системной шиной с FLASH-памятью программ, SRAM-памятью данных, многоканальным аналого-цифровым преобразователем, к одной из линий которого подключен выход датчика 5, и универсальным асинхронным передатчиком UART, выход которого подключен к бортовому компьютеру.

Система контроля функционирует следующим образом.

Блоки системы устанавливаются на передвижную надводную или подводную станцию,

например, на базе малых судов, которая движется в акватории, выбранной для исследований, в естественном водоеме. При ее движении вода с помощью насоса 4 закачивается в геликоидальную трубу Шаубергера 3. При движении жидкости по трубе Шаубергера 3 происходит ее раскручивание. При этом тяжелые фракции загрязнений прижимаются к стенкам пробозаборной емкости 1, а легкие фракции загрязнений концентрируются в центре пробозаборной емкости 1, проникая во внутреннюю оболочку 2. Оптоэлектронный лазерный датчик 5 фиксирует загрязнение (легкие фракции) и через измерительный блок 6 передает сигнал в бортовой компьютер 7, который производит подсчет порций загрязнений, например, в виде мелких частиц пластика по времени, что позволяет получить оценку загрязнения полученных проб протекающей жидкости. После выхода воды из внутренней оболочки 2 и пройдя через водозаборную емкость 1 вода возвращается в водоем.

Степень загрязнения будет оцениваться количеством обнаруженных порций микрочастиц к объему прошедшей через трубу жидкости. Чем большее количество жидкости пройдет через трубу, тем более достоверной будет оценка загрязнения водоема в выделенной для исследования акватории.

Таким образом, разработанная система контроля позволяет более точно определить загрязнение акватории водоема микрочастицами, например, мелкими фракциями пластика и органики, что повышает степень экологической безопасности естественных водоемов и систем очистки воды. Результаты, получаемые с помощью системы контроля, могут оперативно использоваться в дальнейшем для очистки водной среды от этого вида загрязнений.

За счет использования в составе системы измерительного блока, выполненного на основе микроконтроллера, обеспечивается более высокая производительность определения процента (степени) загрязнения акватории водоема.

Литература

1. Гельмгольц, Г. Основы вихревой теории / Г. Гельмгольц. – М. : ИКИ, 2002. – 82 с.
2. Гринспен, Х. Теория вращающихся жидкостей / Х. Гринспен. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 304 с.
3. Шаубергер, В. Энергия воды / В. Шаубергер. – М.: «Яуза», «Эксмо», 2007. – 320 с.
4. Опτικο-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В. И. Козинцев [и др.] ; под ред. В. Н. Рождествина. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 527 с.
5. Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод / В. А. Алексеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 1. – С. 7–16.

УДК 681.2.083

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА «RANDOM FOREST» К РАСПОЗНАВАНИЮ ТИПА ГОРЕНИЯ ХЛОПКА

Антошин А.А.¹, Безлюдов А.А.¹, Галузо В.Е.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Скорость развития пожара в помещении и ущерб зависят от типа горения: пламенное горение или тление. Обладание информацией о типе горения на начальном этапе пожара позволит принять правильные и необходимые меры для спасения людей и материальных ценностей. В работе описано применение алгоритма «Random Forest» к распознаванию типа горения хлопка на основе динамики величины потока оптического излучения, прошедшего сквозь задымленную среду. Показана возможность получения моделей распознавания приемлемой точности, сформулированы способы повышения точности создаваемых моделей.

Ключевые слова: тип горения, Random Forest, пожар, динамика величины потока излучения.

APPLICATION OF THE “RANDOM FOREST” ALGORITHM TO RECOGNIZING THE TYPE OF COTTON BURNING

Antoshin A.¹, Bezliudov A.¹, Galuzo V.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University of Informatics And Radioelectronics
Minsk, Belarus

Abstract. The rate of development of a fire in a room and the damage depends on the type of combustion: fiery combustion or smoldering. Having information about the type of combustion at the initial stage of a fire will allow taking the correct and necessary measures to save people and property. The paper describes the application of the “Random Forest” algorithm to the recognition of the type of cotton burning on the basis of the dynamics of the magnitude of the optical radiation flux passed through the smoky environment. The possibility of obtaining recognition models of acceptable accuracy is shown, methods of increasing the accuracy of the created models are formulated.

Key words: type of combustion, Random Forest, fire, dynamics of the magnitude of the radiation flux.

Адрес для переписки: Антошин А.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

На сегодня методы обнаружения пожара в помещении автоматическими системами пожарной сигнализации не позволяют оценить потенциальную опасность возгорания. Данный факт является одной из причин применения алгоритмов работы систем пожарной автоматики, не учитывающих скорость нарастания величин, характеризующих опасные факторы пожара, и зависящий от этого наиболее вероятный сценарий пожара. Одним из способов получения информации о скорости развития возгорания может стать распознавание типа горения: пламенной или тлеющий пожар. Ранее было показано [1, 2], что динамика изменения величины оптического излучения, прошедшего сквозь задымленную газозвудушную среду, отличается для пламенного горения, тления, высокотемпературного пиролиза таких материалов как поролон и хлопок. Методика анализа изменения величины потока оптического излучения предполагает получение и сравнение характеристических кривых, рассчитанных для временного промежутка от 30 до 60 секунд на начальной стадии горения [3]. Задачей настоящей работы являлся поиск метода автоматизации процесса анализа и сравнения ха-

рактеристических кривых различных типов горения хлопчатобумажных фитилей.

Временные зависимости величины потока оптического излучения, прошедшего сквозь задымленную среду, были получены в ходе экспериментальных исследований на установке «Дымовой канал» [4]. Всего было проведено 37 экспериментов, включающих сценарии пламенного горения, тления, пиролиза хлопчатобумажных фитилей. В некоторых экспериментах применялись фитили с разной плотностью материала. В одиннадцати экспериментах с пламенным горением семь или четырнадцать фитилей массой от 3 г до 13 г длиной по 10 см каждый подвешивались у пола огневой камеры экспериментальной установки, поджег фитилей осуществлялся спичками. В экспериментах с тлением фитили также подвешивались у пола огневой камеры, поджег осуществлялся спичками, после чего пламя сдувалось, устанавливался тлеющий режим горения. Количество фитилей в экспериментах с тлением равнялось семи или четырнадцати, длина каждого составляла 10 см, общая масса варьировалась от 2,5 г до 13 г. Проведено двенадцать экспериментов с тлением фитилей.

Пиролиз фитилей осуществлялся при их размещении на предварительно разогретой до температуры 600–700 °С электрической нагревательной плитке. Число фитилей в экспериментах с пиролизом составляло семь или четырнадцать штук, длина – 10 см, масса от 3 г до 13 г. Проведено четырнадцать экспериментов с пиролизом фитилей.

В качестве метода для анализа полученных из экспериментальных зависимостей характеристических кривых динамики изменения величины потока оптического излучения был принят алгоритм машинного обучения «Random Forest» [5]. Данный алгоритм применяется, в частности, для решения задач классификации, к которым можно отнести и задачу распознавания типа горения. Результатом работы алгоритма является «обученная» модель, способная на основе обработки входных данных, описывающих объект, процесс или явление отнести его к заранее обозначенным категориям. В случае распознавания типа горения такими категориями являются пламенное горение, тление, пиролиз. Для обучения модели ей передавался набор входных данных (признаков) с метками, указывающими на принадлежность отдельных составляющих набора определенному типу горения. В качестве признаков выступали ширина интервала изменения характеристической кривой, положение максимума кривой и абсолютное значение в точке максимума. Положение всех тридцати семи наборов признаков в виде точек в трехмерном пространстве представлено на рис. 1.

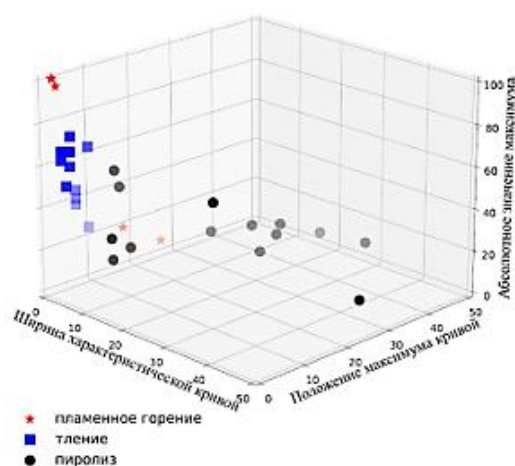


Рисунок 1 – Положение наборов признаков в трехмерном пространстве

Обучение модели осуществлялось на основе двадцати девяти наборов признаков, случайным образом отобранных из всего имеющегося набора признаков. Оставшиеся восемь наборов (20%) использовались для проверки точности получаемой модели. Всего было построено одна тысяча моделей. Гистограмма распределения количества моделей от их точности представлена на рис. 2.

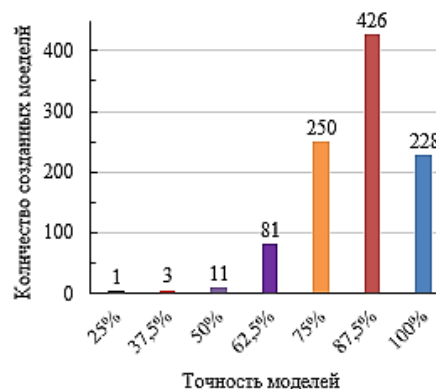


Рисунок 2 – Гистограмма распределения количества моделей от их точности

Средняя точность среди всех моделей составила 84,6%. Наиболее часто модели ошибались в распознавании пламенного горения, классифицируя его как пиролиз, а также ошибочно принимали пиролиз за тление. Значимости каждого из трех признаков для обучения модели оказались схожи и составили по долям 0,38 – ширина интервала изменения характеристической кривой, 0,32 – абсолютное значение в точке максимума, 0,30 – положение максимума характеристической кривой.

Полученные результаты применения алгоритма «Random Forest» к распознаванию типа горения хлопка позволяют говорить о возможности получения модели распознавания приемлемой точности на основе признаков, характеризующих динамику изменения величины прошедшего сквозь задымленную среду потока оптического излучения. И хотя можно контролировать точность отдельно полученной модели и принять для решения задач любую из них, точность ряда полученных моделей распознавания была низкой. Улучшить качество получаемых моделей возможно следующими способами:

- увеличением набора экспериментальных данных. Тридцать семь наборов является сравнительно малым числом;
- расширением числа признаков для обучения/распознавания за счет добавления данных об изменении концентрации угарного газа, температуры в процессе горения;
- использования в качестве признаков не только числовых, а логических и категориальных типов данных.

Литература

1. Кучура, Е. А. Анализ динамики изменения пропускающей способности среды при пламенном горении и пиролизе поролон в помещении / Е.А. Кучура, А. А. Безлюдов, А. А. Антошин // Новые направления развития приборостроения : материалы 14 междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, 14–16 апреля 2021 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. :

О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 33–34.

2. Анализ динамики потока оптического излучения, прошедшего через задымленную среду при пиролизе и тлении хлопка в помещении / А. А. Антошин [и др.] // Приборостроение-2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 128–130.

3. Антошин, А. А. Измерение интенсивности прошедшего и рассеянного вперед оптического излучения в задымленной среде / А. А. Антошин, А. А. Безлюдов,

В. И. Никитин // Актуальные проблемы пожарной безопасности : материалы 31 междунар. науч.-практ. конф. ; редкол.: Е.Ю. Сушкина (ответственный редактор) [и др.]. – М.: ВНИИПО, 2019. – 707 с.

4. Установка, моделирующая пожары в начальной стадии развития / И.Е. Зуйков [и др.] // Достижения физики неразрушающего контроля и технической диагностики: сб. науч. тр. – Мн.: Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2011. – 226 с.

5. Sklearn.ensemble.RandomForestClassifier [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://scikit-learn.org>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 628.74

ОСОБЕННОСТИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Антошин А.А.¹, Галузо В.Е.², Мельничук В.В.², Пинаев А.И.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен комплексный подход в организации противопожарной защиты транспортных средств.

Ключевые слова: система пожарной сигнализации, пожаротушение, транспортные средства.

FEATURES OF FIRE ALARM AND FIRE EXTINGUISHING VEHICLES

Antoshin A.¹, Haluzo V.², Melnichuk V.², Pinaev A.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus

Abstract. An integrated approach to the organization of fire protection of vehicles is considered.

Key words: fire alarm system, fire extinguishing, vehicles.

Адрес для переписки: Галузо В.Е., ул. П.Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru

Актуальность пожарной сигнализации и пожаротушения транспортных средств, существовала всегда, однако в силу сложности реализации, громоздкости оборудования широко использовалась в тех отраслях, где являлась жизненно необходимой: авиационная и морская техника, отдельные виды военной техники и т.п.

Особенностью их применения является использование в качестве огнетушащих составов газовых смесей, как правило, углекислоты. Аппаратура пожарной сигнализации являлась достаточно громоздкой и дорогостоящей. Применение газа для пожаротушения предполагает целый ряд ограничений: наличие места для расположения баллонов, необходимость регулярного контроля давления, отсек, в котором предполагается пожаротушение, должен быть условно герметичным.

Развитие микроэлектронной базы, а также новых типов пожарных извещателей позволило существенно снизить массогабаритные показатели аппаратуры, повысить эффективность обнаружения возгорания, существенно уменьшить стоимость оборудования. Появление автоматиче-

ских порошковых и аэрозольных генераторов в комплексе с новой аппаратной поддержкой позволило существенно расширить область применения пожарной сигнализации и пожаротушения в том числе на колесную и гусеничную технику (автомобили, автобусы, троллейбусы, тягачи), рельсовый транспорт (трамваи), железнодорожную технику (тепловозы и электровозы, грузовые и пассажирские вагоны).

Широкое внедрение систем пожарной безопасности выявило и ряд проблем, подлежащих учету и решению:

– широкий температурный диапазон эксплуатации транспортных средств (от минус 50 до плюс 70 °С);

– значительный диапазон вибровоздействий как по спектру, так по амплитуде и ускорениям;

– непредсказуемая электромагнитная обстановка;

– существенная запыленность и загрязненность среды;

– отсутствие предсказуемой герметичности объекта на момент обнаружения возгорания;

– слабо подготовленный персонал для работы с данного вида оборудованием в силу редкости его применения и меняющегося кадрового состава.

Наличие этих обстоятельств сейчас во многом является сдерживающим фактором на пути массового применения такого вида систем.

Решение проблем в плане аппаратного обеспечения лежит в целом ряде плоскостей:

– обоснованный выбор элементной базы, грамотное проектирование конструкций аппаратуры и мест их расположения на транспортном средстве;

– многоплановые процедуры испытаний во всех предполагаемых режимах эксплуатации;

– максимальная автоматизация процессов управления пожарной сигнализацией и пожаротушением;

– максимально простая и доходчивая форма представления оператору (водителю, машинисту) информации о происходящих событиях.

В плане определения пожара рациональным представляется использование в качестве извещателей линейных температурных извещателей (ЛТИ), а также точечных тепловых извещателей с автопрограммируемым режимом работы. Применение других типов извещателей (дымовых, извещателей пламени) представляется нецелесообразным в силу указанных выше ограничений. Факт сработки двух извещателей во многом снижает вероятность ложных срабатываний системы. Автопрограммируемость извещателей позволяет адаптировать их параметры (оценка скорости нарастания температуры, порогов срабатывания) к температуре окружающей среды и обстановке на объекте, например, предварительная сработка ЛТИ.

Наличие ручного и автоматического режима в устройствах такого рода является обязательным как с точки зрения реакции на ложное срабатывание, так и запуске тушения при отсутствии сигнализации, но при наличии видимых факторов возгорания. Для перехода из одного режима в другой следует предусматривать как ручное вмешательство, так и автоматический режим поскольку оператор часто забывает произвести необходимые манипуляции. Автоматический переход в ручной режим должен включаться в случае наличия оператора на объекте, например, по включению условно «замка зажигания» или для ЖД транспорта – запуска двигателей. Работу системы кроме световой и звуковой сигнализации должна сопровождать речевая информация, содержащая не только обнаруженные факты, но и инструкции о порядке действия в тех или иных обстоятельствах. Немаловажным явля-

ется автоматический контроль и диагностика всех компонентов системы.

Особые требования предъявляются и к установкам пожаротушения. Кроме вышеперечисленных климатических и механических воздействий следует учитывать непредсказуемую герметичность защищаемого отсека, наличие высокотемпературной аэрозольной струи на выходе аэрозольных генераторов, требования к минимизации массогабаритных показателей.

Проведенные исследования показали, что импульсные порошковые генераторы, за счет ударной волны хорошо тушат возгорания как в открытых, так и закрытых от прямого действия порошка объемах, но только ниже факела распыла. В свою очередь аэрозольные генераторы удачно работают на открытых очагах возгорания как выше, так и ниже факела распыла. Тушение возгорания в закрытых очагах, расположенных ниже факела распыла, оказывается проблематичным в связи с тем, что, будучи легкой фракцией, он выталкивается из очага восходящими потоками воздуха.

Используемая при испытаниях значительная негерметичность отсека (для приближения к реальным условиям) не позволила аэрозольным генераторам устранить возгорание путем создания необходимой концентрации. Учитывая, что испытывались генераторы разных предприятий производителей, можно констатировать, что ни порошковые, ни аэрозольные генераторы не являются полностью эффективными установками пожаротушения.

Наиболее удачно показал себя комбинированный порошково-аэрозольный генератор, разработанный фирмой «Авангардспецмонтажплюс» (РБ) совместно с НПО «Восток» (РФ). Суть устройства состоит в том, что аэрозольный генератор внутри своего корпуса содержит эжектор, обеспечивающий охлаждение аэрозольной струи подсосываемым потоком воздуха. В этот эжектор засыпался огнетушащий порошок, закрытый разрывной мембраной на заданное давление. Выброс порошка производился встроенным газогенерирующим зарядом. При подаче импульса на запуск пожаротушения газогенерирующий заряд через разрывную мембрану осуществлял импульсный выброс порошка, освобождая эжектор, который в последующем способствовал охлаждению аэрозольной смеси. Конструкция продемонстрировала лучшие показатели для данных условий испытаний.

Резюмируя изложенное можно отметить, что работы по созданию эффективных и надежных во всех отношениях систем пожарной сигнализации и пожаротушения транспортных средств являются многоплановыми, не тривиальными и однозначно нуждаются в продолжении.

УДК 621

ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ДЫМОВЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Антошин А.А., Лодято А.П.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В статье рассмотрено влияние экспозиционной дозы опасных факторов пожара на человека в зависимости от разброса параметров дымовых пожарных извещателей и различных сценариев пожара.

Ключевые слова: Опасные факторы пожара, дымовые пожарные извещатели, неопределенность.

INFLUENCE OF TEST RESULT INDETERMINACY OF FIRE DETECTORS ON PEOPLE SAFETY EVACUATION IN CASE OF FIRE

Antoshin A., Lodyato A.

Belarusian national technical university
Minsk, Belarus

Abstract. The article considers the influence of the exposure dose of dangerous fire factors on a human, depending on the spread of parameters of smoke fire detectors and various scenarios of fire.

Key words: dangerous fire factors, smoke fire detectors, indeterminacy.

Адрес для переписки: Антошин А.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Aantoshyn@bntu.by

Методика испытания дымовых пожарных извещателей постоянно привлекает внимание многих исследователей [1, 2]. Однако в работах отсутствует анализ связи требований к пожарным извещателям с условиями в помещении, возникающих при пожаре, после нахождения в которых, люди не способны предпринять эффективные меры для своего спасения.

При возникновении пожара, на человека будут оказывать негативное влияние опасные факторы пожара (далее – ОФП). Согласно ИСО 13571 к таким факторам можно отнести:

- лучистая и конвекционная теплота;
- токсичные и удушающие газы и раздражающие вещества, образовавшихся во время пожара;
- ухудшенная видимость.

Воздействие удушающих токсичных газов на человека характеризуется экспозиционной дозой [3, 4]. Согласно приведенной в [5] статистике основными причинами гибели людей на пожарах за 2020 год стало отравление удушающими продуктами горения. Несмотря на это наиболее распространены являются дымовые пожарные извещатели (ДПИ), а не газовые. Такое положение дел требует детального изучения погрешностей ДПИ при определении условий возникновения опасности для людей во время пожара. В частности в литературе отсутствует информация о влиянии неопределенности результатов испытания дымовых пожарных извещателей на безопасность людей при пожаре в помещении с установленными там ДПИ.

В работе рассматривается сформулированная выше проблема в условиях пожара, характеристики которого близки к характеристикам тестового пожара ТП-3, используемого при испытании ДПИ.

В Республике Беларусь в настоящее время действует технический регламент Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 043/2017, который устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения.

Согласно нему подтверждение соответствия продукции можно осуществлять выполнением требований регламента либо выполнением требований стандартов, включенных в перечень стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований указанного технического регламента.

Таковыми стандартами, являются СТБ 11.16.03-2009 и ГОСТ Р 53325-2012. Погрешность измерения параметров при проведении испытаний не должна превышать 10 % и 5 % согласно требованиям ГОСТ Р 53325-2012 и СТБ 11.16.03-2009 соответственно.

В работе рассмотрены огневое испытание извещателя по ГОСТ Р 53325-2012. В ходе испытаний используется тестовый очаг пожара ТП-3 (тление со свечением хлопка). Критерием окончания испытания будет, является выполнение одного из следующих условий:

- достижение значения удельной оптической плотности среды 2,0 дБ/м (рис. 1);
- достижение значения концентрации монооксида углерода 150 ppm (рис. 2);
- достижение времени проведения испытаний 750 с.

Предполагаем, что в помещении возможно развитие пожара по законам, приведенным на графиках и по наихудшему сценарию, т.е. достижение значения концентрации монооксида углерода 150 ppm одновременно с достижением

значения удельной значения оптической плотности среды 2,0 дБ в момент времени 750 с.

Учитывая допустимую погрешность средств измерений, ДПИ может иметь истинные значения 2,2 дБ/м, 165 ppm, 825 с, что является несоответствием требованиям стандартов.

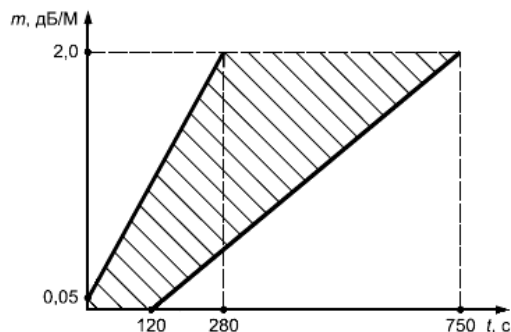


Рисунок 1 – Изменение значения удельной оптической плотности среды в зависимости от времени проведения испытаний

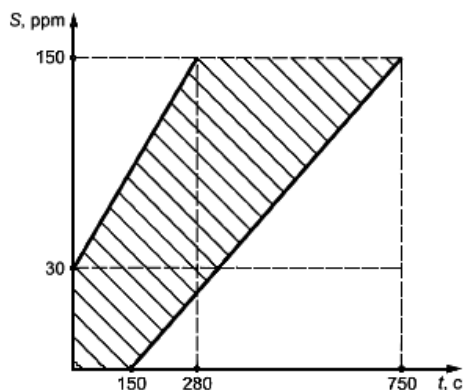


Рисунок 2 – Изменение значения концентрации монооксида углерода в зависимости от времени проведения испытаний

Рассмотрим сценарий развития пожара в помещении для случая, когда увеличение значения удельной оптической плотности среды прекратилось, ввиду особенностей развития пожара, после достижения 2,0 дБ. В этом случае пожар не будет обнаружен ДПИ и воздействие отравляющих веществ на человека может нести длительный характер. Оценим при помощи расчета длительное воздействие угарного газа на спящего в помещении в течение 6 часов человека согласно ISO 13571:2007.

$$X_{FED} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\varphi_{CO}}{35000} \Delta t \quad (1)$$

где φ_{CO} – средняя концентрация СО на временном отрезке Δt , ppm; 35000 – множитель удельной экспозиционной дозы для монооксида угле-

рода, оказывающий опасное влияние на человека; Δt – временной отрезок, мин.

Подставляя имеющиеся значения ($\varphi_{CO} = 165$ ppm, $\Delta t = 360$ мин.) получаем показатель X_{FED} равный 1,7.

Исходя из ISO 13571:2007 значение X_{FED} равное 1,0 приводит человека в состояние неспособности самостоятельно покинуть опасную зону, что может привести к летальному исходу.

Выполним расчет для случая срабатывания ДПИ при наиболее благоприятных условиях – достижения удельной оптической плотности и концентрации монооксида углерода 0,05 дБ/м и 30 ppm на момент времени 120 с. Учитывая погрешность измерений, истинные значения могут составлять 0,055 дБ/м, 33 ppm и 132 с.

Рассмотрим сценарий развития пожара, когда удельная оптическая плотность дыма в помещении достигла значения 0,05. В этом случае ДПИ не обнаружит пожар и на человека также будет оказано длительное воздействие угарного газа.

Полученные значения X_{FED} для промежутка времени 6 часов в этом случае составит 0,34. Считается, что значение показателя X_{FED} равное 0,3 гарантирует безопасную эвакуацию людей.

По полученным данным можно сделать следующее заключение: влияние неопределенности параметров извещателя на обнаружение пожара, в зависимости от модели развития пожара, может оказывать негативное влияние на находящегося в помещении человека

Литература

1. Cleary, T. G. A Study on the Performance of Current Smoke Alarms to the New Fire and Nuisance Tests Prescribed in ANSI/UL 217-2015 / T. G. Cleary // NIST Technical Note 1947, 2016. – 84 p.
2. Standard for Safety for Smoke Alarms : ANSI/UL 217-2015. – Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, IL, 2015.
3. Томаков, М. В. Средства индивидуальной защиты людей при пожаре и техногенных авариях : методические указания для проведения практических занятий и выполнения самостоятельной внеаудиторной работы по дисциплине «Безопасность жизнедеятельности» для студентов всех направлений подготовки и специальностей / М. В. Томаков, В. И. Томаков. – Курск, 2015. – С. 41–42.
4. Мацапура, А. И. Динамика изменения концентрации угарного газа в помещении при тлеющем пожаре / А. И. Мацапура, С. А. Волков, А. А. Антошин // Новые направления развития приборостроения : материалы 12 международной науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов, 17–19 апреля 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О.К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 36–37;
5. Пожары и пожарная безопасность в 2020 году : статистический сборник / П. В. Полехин [и др.] ; под общ. ред. Д. М. Гордиенко. – Москва : ВНИИПО, 2021. – 112 с.

УДК 621

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Ардашев Д.С., Москалёва А.В., Савлевич В.А., Романчук Д.И., Микитевич В.А., Пантелеев К.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе предложена методика исследования фотоэлектрических процессов на поверхности диэлектриков с использованием электрометрического зонда в совокупности с дополнительным внешним оптическим воздействием в ультрафиолетовом спектре. Приведена конструкция осветителя, обеспечивающая механическое сопряжение с существующей измерительной системой картирования пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала.

Ключевые слова: электростатический потенциал, ультрафиолетовое излучение, полимер, сканирующий зонд Кельвина.

TECHNIQUE FOR STUDYING PHOTOELECTRIC PROCESSES ON THE DIELECTRIC SURFACES

Ardashev D., Moskaleva A., Savlevich V., Romanchuk D., Mikitsevich U., Pantsialeyeu K.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper proposes a technique for studying photoelectric processes on the surface of dielectrics using an electrometric probe in combination with an additional external optical effect in the ultraviolet spectrum. The design of the illuminator, which provides a mechanical interface with the existing measuring system for mapping the spatial distribution of the surface electrostatic potential, is presented.

Key words: electrostatic potential, ultraviolet radiation, polymer, Scanning Kelvin Probe.

*Адрес для переписки: Пантелеев К.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: k.pantsialeyeu@bntu.by*

Введение. С каждым годом объемы мирового производства полимеров растут, что связано с расширением области их применения. В связи с этим актуальным становится вопрос о сроке их службы, а также изучения факторов, влияющих на их эксплуатационные свойства. К таким фактором относится УФ-излучение. УФ-излучение – это электромагнитное излучение, занимающее спектральную область между видимым и рентгеновским излучением в пределах длин волн от 400 до 10 нанометров. Для широкого ряда полимерных и композиционных материалов под действием УФ-излучения могут наблюдаться различные неблагоприятные явления: ухудшение механических свойств, уменьшение прочности и повышение хрупкости, потеря эстетического вида и др. Все эти явления происходят за счет уничтожения связей между атомами в полимерах под воздействием электромагнитных волн УФ спектра.

Для повышения стойкости материалов к УФ воздействию в их состав вводят различные наполнители и активные вещества, при этом технологический процесс производства стойких к УФ воздействию материалов непрерывно совершенствуется. В этой связи возникает необходимость в совершенствовании существующих и разработке новых методов исследования свойств диэлектрических материалов.

Целью настоящей работы является разработка методики исследования фотоэлектрических про-

цессов на поверхности диэлектриков с использованием электрометрического зонда в совокупности с дополнительным внешним оптическим воздействием, в частности, УФ.

Приборы и методы измерений. В качестве средств измерения используется установка, разработанная в БНТУ и реализующая метод, так называемого, сканирующего зонда Кельвина [1]. Установка обеспечивает пространственное картирование и визуализацию распределения собственных и/или приобретенных в результате внешнего воздействия поверхностных электростатических потенциалов диэлектрика [2]. Для реализации цели настоящих исследований в качестве источника внешнего энергетического воздействия используется специально разработанный источник оптического излучения в УФ спектре. Использование электрометрического метода в совокупности с оптическим воздействием в УФ спектре позволит проследить за течением фотоэлектрических процессов непосредственно на поверхности исследуемого образца [3, 4].

Выбор источника излучения и разработка осветителя. Для генерации электромагнитных волн в УФ диапазоне существуют различные источники: светодиоды, ртутные и люминесцентные лампы и пр. Ртутные и люминесцентные лампы имеют сложные схемы управления, обладают сложной регулировкой потока излучения, при этом невозможно быстро изменять па-

раметры излучения, что является недостатком использования таких ламп в лабораторных исследованиях. Светодиоды более просты в управлении, не требуют высоковольтных источников питания, обладают малой инерционностью.

После анализа выбран УФ-светодиод CP5WUV365. Его основные параметры:

- длина волны, нм: 365–370;
- телесный угол, °: 120;
- интенсивность излучения, мВт/см²: 200;
- диапазон рабочих напряжений, В: 3,4–3,8.

Конструкция осветителя состоит из блока управления, блока питания, источника тока (рис. 1), а также устройства механического сопряжения осветителя с существующей устаканкой картирования поверхностных электростатических потенциалов.

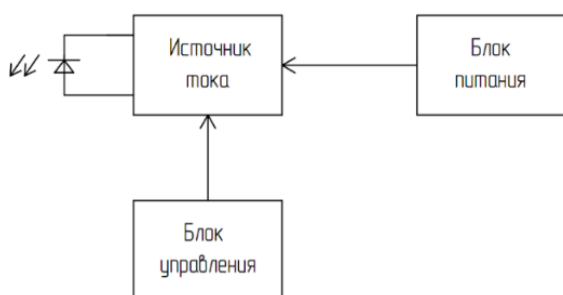


Рисунок 1 – Структурная схема осветителя

Источник тока совместно с блоком управления обеспечивает плавное изменение тока светодиода, что позволяет плавно изменять интенсивность излучения.

Методика исследования фотоэлектрических процессов на поверхности диэлектриков под воздействием УФ-излучения. На рис. 2 приведен внешний вид разработанного осветителя, закрепленного над предметным столиком установки сканирования электростатических потенциалов поверхности диэлектрика.

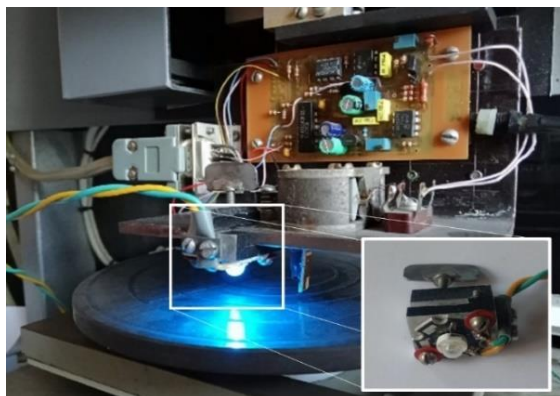


Рисунок 2 – Осветитель в составе измерительной установки картирования пространственного распределения поверхностного электростатического потенциала

Методика измерения включает следующее. После установки зонда над измеряемой поверхностью производится отсчет. Затем на участок поверхности под зондом воздействуют УФ излучением и производится второй отсчет. Результаты измерений до и после воздействия приведены на рис. 3.

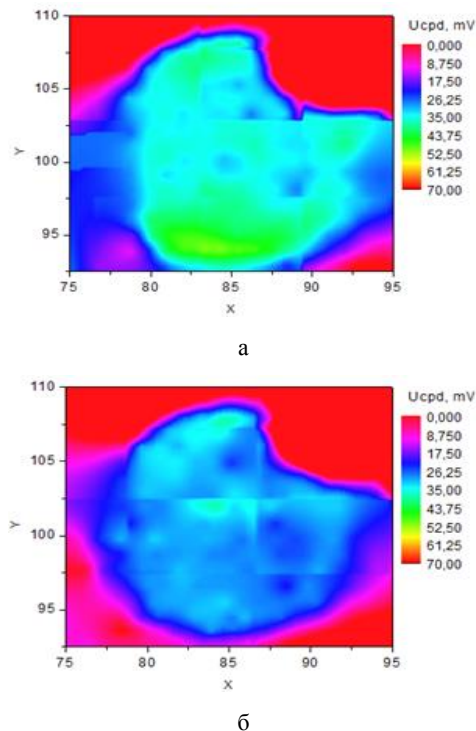


Рисунок 3 – Карты распределения поверхностного потенциала образца ПА-6, наполненного углеродным наноматериалом (1 мас. %) до (а) и после воздействия (б)

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Республики Беларусь (грант, № гос. рег. 20211488).

Литература

1. Zharin, A. Charge sensitive techniques in control of the homogeneity of optical metallic surfaces / A. Zharin, K. Pantišaleyeu, K. Kierczyński // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2016. – Vol. 92, № 8. – P. 190–193.
2. Анализ распределения электрофизических и фотоэлектрических свойств нанокомпозитных полимеров модифицированным зондом Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // *Приборы и методы измерений*. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 386–397.
3. Digital contact potential probe in studying the deformation of dielectric materials / K. Pantišaleyeu [et al.] // *IAPGOŚ*. – 2020. – № 4. – P. 57–60.
4. Influence of rapid thermal treatment of initial silicon wafers on the electrophysical properties of silicon dioxide obtained by pyrogenous oxidation / V. Pilipenko [et al.] // *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*. – 2019. – Vol. 23, № 3. – P. 283–290.

УДК 621.391; 004.716

ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ «УМНОЙ» АУДИТОРИИ
Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Произведен анализ основных факторов, определяющих комфортную деятельность в «умной аудитории».

Ключевые слова: микроклиматические условия, освещенность, спектральный состав светового излучения, звуковой фон.

ABOUT OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE “SMART” AUDIENCE
Bogdan P., Zaitseva E., Baranov P., Stepanenko A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The analysis of the main factors determining the comfortable activity in the “smart audience” is made.
Key words: microclimatic conditions, illumination, spectral composition of light radiation, sound background.

Адрес для переписки: Зайцева Е.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Одной из составных частей макросистемы «интеллектуальная окружающая среда» является система обучения. Оставляя открытым вопрос об альтернативности или совместимости дистанционного и очного обучения, рассмотрим комфортность «умной» аудитории и эффективность работы в ней для студентов и преподавателя. Очевидно, что целью ее создания является обеспечение благоприятных физических и психологических условий обучения, стимуляция заинтересованности в овладении и использовании информации, развитие творческого мышления.

Для создания благоприятных физических условий необходимо создать оптимальные для организма человека микроклиматические условия в помещении (температура, скорость движения воздуха, влажность, интенсивность электромагнитного поля), а также оптимизировать освещенность, спектральный состав светового излучения, звуковой фон, запахи, тактильную информацию, учитывая возможность оптимизации временных градиентов этих факторов и параметров. Кроме того, важным фактором является эргономичность мебели.

Параметры большинства указанных факторов нормированы. В соответствии с СанПиН 2.2.4.548–96 «2.2.4. Физические факторы производственной среды. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» характерны следующие параметры: оптимальная температура 19–21 °С, допустимая 18–24 °С; оптимальная влажность 60–40 %, допустимая не более 15–75 %. Очевидно, что они имеют широкий диапазон допустимых значений, кроме того, не нормируется возможное их изменение во времени, поэтому ввиду актуальности проблемы ей посвящено большое количество исследований.

В [1] приведены результаты исследования компанией TECH STEROWNIKI в 2016–2017

годах по установлению оптимальной температуры в различных помещениях жилья, где уровень температуры выбирался жильцами. На основании построенной гистограммы установлено, что оптимальной температурой для большинства участвующих в эксперименте являлся диапазон 21–22 градуса Цельсия (исключая ванную и спальню). В [2] приводятся исследования по устойчивости внимания студентов в различных аудиториях. Этот показатель отличался вдвое при практически одной и той же температуре воздуха в помещении (22,8 и 22,6 градусов), влажности 74 и 85 %, на основании чего была приведена гипотеза о различном уровне других неконтролируемых параметрах, например освещенности.

В [3] приведены результаты исследования взаимосвязи ряда психофизиологических показателей с метеорологическими погодными факторами у студентов. У группы студентов обнаружена взаимосвязь показателей произвольного внимания к основным метеофакторам погоды.

Анализ вышеприведенных и других источников позволяет сделать вывод, что исследования производились при изменении одного или нескольких климатических параметров, в то же время значения других параметров не фиксировались и, соответственно, не учитывались. Отсюда очевидна необходимость проведения многофакторного эксперимента, который позволит систематизировать воздействие климатических факторов.

Исследования [4] позволили выявить оптимальный уровень освещенности поверхности при чтении текстов относительно критериев «время зрительно-моторной реакции» и «уменьшения чувствительности сетчатки», составляющий 650 люкс. Чтение часто осуществляется с цифровых носителей, где в соответствии со стандартами

[5, 6] нормируется яркость дисплея или экрана. Если рассматривать дисплей как перпендикулярно отражающую поверхность с коэффициентом отражения ρ , можно связать его яркость B с освещенностью E формулой

$$B = \frac{E \rho}{\pi},$$

откуда можно вычислить оптимальную яркость экрана, составляющую при ρ , равном 1,207 кд/м².

В стандарте [5] нормируются ограничения на некоторые цветовые сочетания шрифта и фона, например, для чтения текстов, буквенно-цифровых знаков и символов не следует применять синий и красный цвета спектра на темном фоне и красный цвет спектра на синем фоне и синий цвет спектра на красном фоне. Там же указано, что насыщенные крайние цвета видимого спектра приводят к нежелательным эффектам глубины изображаемого пространства и не должны применяться для изображений, которые требуют непрерывного просмотра или чтения.

Традиционно для текстовых документов используется белый фон. В то же время исследования [7] по влиянию цветной фотостимуляции на α - и β - ритмы энцефалограммы показали, что наибольший эффект воспроизведения ранее запомненных слов наблюдался при воздействии зеленым и синим цветом, чем красным. Поэтому целесообразно провести сравнительное исследование утомляемости при использовании в качестве фона синего и зеленого цвета.

Актуальной является задача выбора уровня и спектрального состава фонового звукового ряда при чтении и выполнении контрольных заданий [8]. Установлен факт утомления мезенцефальных и таламических структур слухового анализатора после прослушивания громкой музыки [9]. Исследовано влияние запахов на количество ошибок при трудовой деятельности. Установлено, что запах лимона у программистов уменьшает количество ошибок на 54 %, жасмина – на 33, лаванды – на 20 % [10]. Необходимо дальнейшее исследование влияния данного фактора в аспекте количественной оценки (интенсивность запаха, изменение ее во времени), а также учет индиви-

дуальных особенностей обучающихся. При этом необходимо предварительное индивидуальное тестирование.

Литература

1. Как температура в помещении влияет на здоровье человека и его производительность? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://techpribor.com>. – Дата доступа: 05.09.2021.
2. Толоконникова, Е. П. Оценка влияния микроклимата помещений на состояние работоспособности студентов / Е. П. Толоконникова, В. И. Попов // Системный анализ и управление в биомедицинских системах. – 2009. – Т 8, № 4. – С. 951–954.
3. Глушак, Д. Н. Влияние метеорологических факторов на состояние произвольного внимания у студентов-медиков / Д. Н. Глушак, Ю. М. Кондакова // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. Спецвыпуск 1. Психофизиология и психонейроэндокринология. – 2018. – Т. 16. – С. 47.
4. Финк, А. В. Исследование влияния уровня освещенности на чувствительность сетчатки глаз и время зрительно-моторной реакции / А. В. Финк // Известия Алтайского государственного университета. Биологические науки. – 2009. – Т. 63, № 3. – С. 31–33.
5. Средства отображения информации индивидуального пользования. Общие эргономические требования и требования безопасности : ГОСТ Р 50948-2001.
6. Средства отображения информации коллективного пользования. Требования к визуальному отображению информации и способы измерения : ГОСТ Р 52870-2007.
7. Яценко, М. В. Влияние светового фотостимуляционного воздействия на воспроизведение вербальной информации / М. В. Яценко // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. – 2018. – Т. 16, спецвыпуск 1. – С. 146.
8. Вербенко, П. С. Оценка роли музыки в жизни студента медицинского вуза / П. С. Вербенко, Э. Ф. Измаилов, М. Б. Бровиченко-Яропуд // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. – 2018. – Т. 16., спецвыпуск 1. – С. 42.
9. Функциональное состояние зрительного и слухового анализаторов в динамике зрительной и аудиальной нагрузки / А. А. Мейсак [и др.] // Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии. – 2018. – Т. 16, спецвыпуск 1. – С. 97–98.
10. Папченко, Е. В. Роль запахов в эргономике / Е. В. Папченко // Гуманитарные и социальные науки, 2008. – № 6. – С. 11–15.

УДК 621.383

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЫСОКОЙ
ЛИНЕЙНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ**
**Борисенок С.В.¹, Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Жуковский П.В.², Свистун А.И.¹, Тявловский А.К.¹,
Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹**

¹*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

²*Люблинский технический университет
Люблин, Польша*

Аннотация. Предлагается схема измерительного преобразователя, основанная на применении нескольких фотоприемников на базе полупроводников с низкой концентрацией глубокой примеси с различающимися параметрами. Достижение линейности характеристик преобразования производится путем объединения перекрывающихся линейных участков характеристик разных фотоэлектрических преобразователей, входящих в состав преобразователя.

Ключевые слова: фотоприемник, измерительный фотоэлектрический преобразователь, характеристика чувствительности, диапазон преобразования.

**THE MEASURING PHOTO-ELECTRIC CONVERTER WITH HIGH LINEARITY
OF THE POWER CHARACTERISTIC**

**Borisenok S.¹, Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Zukowski P.², Svistun A.¹, Tyavlovsky A.¹, Tyavlovsky K.¹,
Shadurskaya L.¹**

¹*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

²*Lublin University of Technology
Lublin, Poland*

Abstract. The circuit design of the measuring converter based on application of several photodetectors on the basis of semiconductors with low concentration of a deep impurity with discriminated parameters is offered. Linearity achievement characteristics transformations is made by an union of recoated linear sections of characteristics of the different photo-electric converters which are a part of the converter.
Key words: photodetector, the measuring photo-electric converter, the sensitivity characteristic, transformation range.

*Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Основными критериями при проектировании или выборе первичных фотоэлектрических преобразователей являются соответствие областей спектра сигнала и спектральной чувствительности фотоприемника и его достаточный динамический диапазон энергетической характеристики чувствительности. Именно динамический диапазон первичного преобразователя [1] часто ограничивает свойства системы оптической диагностики в целом [2]. Принципиально измерительная задача может быть решена путем применения одноэлементных фотоприемников с большим динамическим диапазоном преобразования [3, 4]. Однако недостатком применения таких фотоприемников является наличие на энергетической передаточной характеристике достаточно большого участка с нелинейной зависимостью [4] между участками поддиапазонов характеристики с линейной зависимостью. Это, в свою очередь, приводит к неполному использованию диапазона преобразования АЦП измерительного преобразователя.

Для полупроводников, используемых при изготовлении широкодиапазонных фотоприемни-

ков, изменение постоянных времени жизни и комбинации достигает нескольких десятичных порядков [4], что обеспечивает и соответствующее изменение вида энергетической характеристики чувствительности. Автоматическая перезарядка зарядовых состояний глубокого примесного центра при увеличении интенсивности оптического сигнала приводит [3, 4] к формированию двух поддиапазонов энергетической характеристики фотоприемника. На рис. 1 приведены характеристики двух фотоприемников, отличия которых определяются материалом основного полупроводника, типом примеси и ее концентрацией.

Области «I» и «III» характеризуются высокой линейностью участков характеристики «a» и «b», с отклонением от линейной зависимости не более 10^{-3} , область «b» обуславливает расширение динамического диапазона преобразовательной функции, но область нелинейной зависимости «II» между значениями интенсивностей освещения J_L и J_H характеризуется существенной нелинейной зависимостью, и не может быть использована для решения метрологических задач.

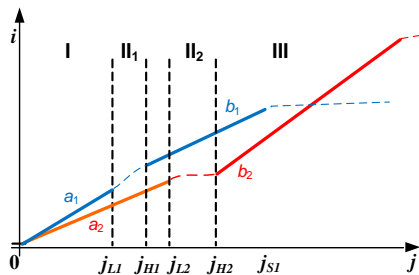


Рисунок 1 – Энергетические характеристики фотоприемников с многозарядными примесными центрами акцепторного типа

Для расширения динамического диапазона преобразовательной функции измерительного преобразователя с сохранением высокой линейности во всем диапазоне преобразования предлагается использовать два (или более) фотоприемника (ФП) с отсутствием перекрытия областей нелинейной зависимости «II» на энергетической характеристике. В измерительном преобразователе системы оптической диагностики сигнал с выхода одного из выбранных фотоприемников поступает на вход программно управляемого усилителя, и после усиления с коэффициентом, выбранным микроконтроллером МК в соответствии с моделью фотоприемника, подается на вход модуля АЦП. В результате выбора и «склейки» с требуемыми коэффициентами только линейных участков передаточных характеристик фотоприемника, например (рис. 2), участок характеристики a_{21} ФП 2 в диапазоне интенсивностей от 0 до J_{L2} , участок характеристики b_{12} ФП 1 в диапазоне интенсивностей $J_{L2}-J_{H2}$, участок характеристики b_{22} ФЭП 2 при интенсивности излучения более J_{P2} формируется результирующая характеристика измерительного преобразователя. Выбор участков исходных участков характеристик для «склейки» зависит от положения пороговых значений интенсивностей J_L, J_H для разных ФП, и может отличаться от приведенного. Результирующая преобразовательная характеристика имеет динамический диапазон чувствительности, определяемый максимальным значением этого параметра у всех используемых ФП, и линейный характер зависимости во всем диапазоне преобразования.

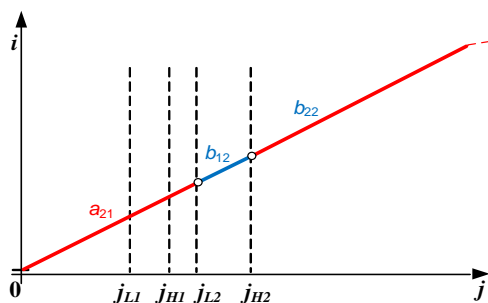


Рисунок 2 – Результирующая передаточная характеристика измерительного преобразователя

Из свойств характеристик ФП с широким динамическим диапазоном преобразования, способа формирования результирующей характеристики преобразования «склежкой» следует, что разрядность результата может до 2 раз превышать разрядность модуля АЦП. Необходимо учитывать, что для формирования характеристик чувствительности измерительного преобразователя с большим динамическим диапазоном используются механизмы перераспределения неравновесных носителей заряда по уровням рекомбинации и прилипания многозарядной примеси в процессе изменения ее зарядового состояния [4].

Это сопровождается изменением времен жизни и подвижности носителей заряда, что приводит и к изменению параметров быстродействия фотоприемников и, соответственно, измерительного преобразователя в целом.

Схема измерительного преобразователя (рис. 3) с высокой линейностью энергетической характеристики основана на применении нескольких, не менее двух, фотоэлектрических преобразователей с различающимися параметрами, в которой достижение линейности характеристик преобразования производится путем выбора и объединения перекрывающихся линейных участков характеристик разных фотоэлектрических преобразователей.

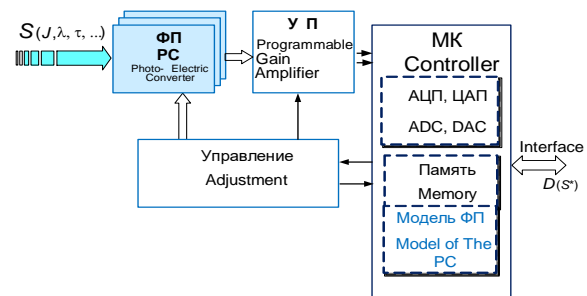


Рисунок 3 – Схема измерительного преобразователя

Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать измерительные преобразователи с результирующими характеристиками преобразования для заданных значений интенсивностей излучения.

Литература

1. Формозов, Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах / Б. Н. Формозов. – СПб.: СПбГУАП, 2002. – 120 с.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.] ; под общ ред. О. К. Гусева. – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et. al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.
4. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey, [et. al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 8. – P. 81–85.

УДК 621.383

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С УПРАВЛЯЕМОЙ
ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ**

**Борисенок С.В.¹, Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Свистун А.И.¹, Тьявловский А.К.¹, Тьявловский К.Л.¹,
Колтунович Т.Н.², Шадурская Л.И.¹**

¹*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

²*Люблинский технический университет
Люблин, Польша*

Аннотация. Предложена схема управления видом спектральной характеристики чувствительности фотоэлектрического преобразователя на основе полупроводникового фотоприемника с глубокой многозарядной примесью с использованием метода широтно-импульсной модуляции. Управление видом спектральной характеристики чувствительности для большинства комбинаций материалов полупроводника и глубокой многозарядной примеси осуществляется в диапазоне до 8 мкм.

Ключевые слова: измерительный фотоэлектрический преобразователь, спектральная характеристика чувствительности, управление характеристикой преобразования, широтно-импульсная модуляция.

**THE MEASURING PHOTO-ELECTRIC TRANSDUCER WITH THE MANAGED
CHARACTERISTIC OF SPECTRAL SENSITIVITY**

**Borisenok S.¹, Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Svistun A.¹, Tyavlovsky A.¹, Tyavlovsky K.¹,
Koltunowicz T.², Shadurskaya L.¹**

¹*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

²*Lublin University of Technology
Lublin, Poland*

Abstract. The control circuit by a type of a spectral characteristic of sensitivity photo-electric transformers on the basis of a semiconductor photodetector with deep multicharging impurity with use of a method of pulse-width modulation is offered. Management of a type of a spectral characteristic of sensitivity for the majority of combinations of materials of the semiconductor and deep multicharging impurity is carried out in the range up to 8 microns.

Key words: photo-electric transformer, spectral characteristic of sensitivity, management of the characteristic of conversion, pulse-width modulation.

*Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Системы оптической диагностики решают измерительные задачи, связанные с регистрацией параметров оптического излучения, изменения которых обусловлены взаимодействием тестирующего излучения с объектом контроля. Основными параметрами измерительного фотоэлектрического преобразователя (ИФЭП) являются его энергетическая и спектральная преобразовательные характеристики [1–4].

При этом, возможность фотоэлектрического преобразователя осуществлять измерения в нескольких поддиапазонах даже при преобразовании одного параметра придает качественно новые свойства всей измерительной системе. Эти свойства ИФЭП обеспечивает приборный ряд фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью [4], обеспечивающих комплекс новых качественных и количественных характеристик при относительной простоте приборных структур. Одним из ключевых свойств таких ФЭП является возможность получения переключа-

чаемой характеристики спектральной чувствительности, причем изменение значения красной границы спектральной чувствительности ФЭП может достигать нескольких микрометров [4, 5]. Однако, управление такой характеристикой между двумя возможными типами при подаче дополнительного электрического или оптического управляющего сигнала [5] реализуется в виде переключательной функции. Предлагаемая схема ИФЭП реализует способ непрерывного управления видом его спектральной чувствительности характеристики в некотором диапазоне. Это достигается при использовании одноэлементного ФЭП на основе полупроводника с собственной фотопроводимостью, слабо легированного глубокой многозарядной примесью. Энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра, причем в качестве активной выступает та или иная пара уровней в зависимости от заселенности уровней примесного центра. Последнее обстоятельство позволяет изменять вид энергетического спектра многоза-

рядного примесного центра, управляя заселенностью уровней путем электрической инжекции или дополнительной подсветкой [4, 5].

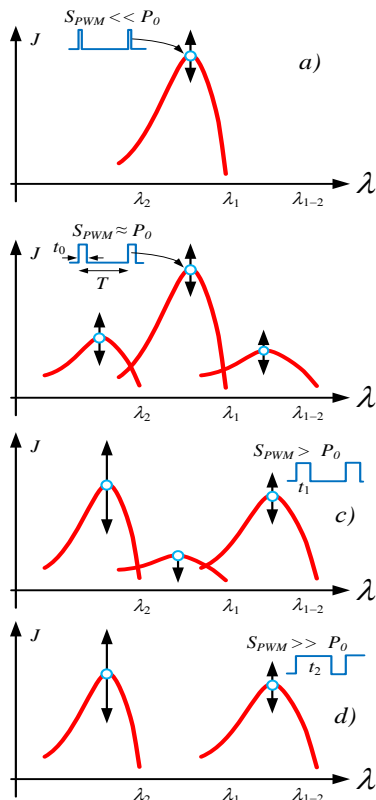


Рисунок 1 – Управление видом спектральной характеристики чувствительности

Переключение между видами энергетического спектра примесного центра происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда, и, в свою очередь, приводит к непрерывному изменению вида спектральной чувствительности фотоприемника с многозарядной примесью (рис. 1). В предлагаемой схеме (рис. 2) управление заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси производится методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

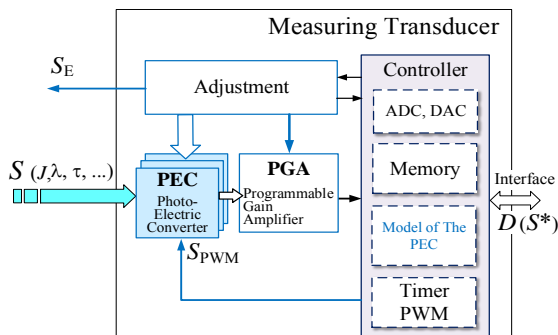
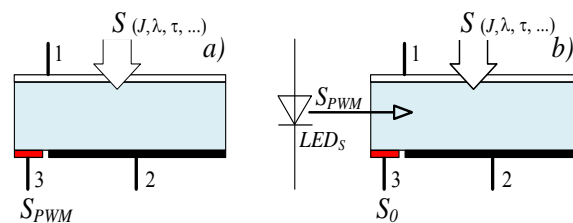


Рисунок 2 – Схема измерительного преобразователя на основе ФЭП с управляемыми характеристиками

При этом частота широтно-импульсной модуляции выбирается выше максимальной частоты изменения измеряемого оптического сигнала S , но меньше постоянной времени жизни неравновесных носителей заряда. Этим требованием определяется снижение быстродействия измерительного преобразователя при реализации данного режима.

В измерительный преобразователь ФЭП может быть подключен как по схеме с электрическим управлением (рис. 3, а), так и по схеме с оптическим (рис. 3, б, управляющий электрод 3 отсутствует) или комбинированном управлении. При комбинированном управлении на управляющий электрод 3 подается постоянный сигнал, определяющий начальное положение характеристики управления видом спектральной характеристики чувствительности ФЭП.



1 – прозрачный электрод, 2 – непрозрачный электрод, 3 – управляющий вывод барьера Шоттки

Рисунок 3 – Схема подключения ФЭП

Применение фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями и широтно-импульсной модуляции позволяет реализовать вид спектральной характеристики чувствительности фотоэлектрического измерительного преобразователя. Заданный диапазон чувствительности достигается выбором типа материала и примеси фотоприемника.

Литература

1. Лысенко, С. А. Методы оптической диагностики биологических объектов / С. А. Лысенко. – Минск : БГУ, 2014. – 231 с.
2. Филачев, А. М. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко / – М. : Физматкнига, 2016. – 104 с.
3. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О.К. Гусев [и др.] ; под общ ред. О. К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al] // Devices and Method of Measurements. – 2021. № 2. – P. 108–116.
5. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey, [et al] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 8. – P. 81–85.

УДК 620.179.142.6

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА

Булатов О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Методом конечных элементов оптимизированы толщины стенок стального цилиндрического корпуса преобразователя магнитодинамического прибора для толщинометрии никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм. Установлено, что преобразователь с корпусом, имеющим вертикальную стенку толщиной 3 мм, горизонтальную толщиной 1,5 мм и удаленным на расстояние не более 1 мм от поверхности покрытия, обеспечивает практически максимальную точность толщинометрии возле краев покрытия.

Ключевые слова: магнитодинамический преобразователь, никелевое покрытие, повышение точности.

OPTIMIZATION OF THE CASE SIZES OF THE TRANSDUCER OF THE MAGNETO-DYNAMIC THICKNESS GAUGE WITH THE PURPOSE OF EDGE EFFECT MINIMIZING

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The walls thicknesses of the transducer steel cylindrical case of the magneto-dynamic gauge for thickness measuring of nickel coatings in the range from 0 up to 700 micrometers are optimized by means of the finite element method. It is established that the transducer with the case, which has the vertical wall with thickness 3 mm, the horizontal wall with thickness 1.5 mm, and locates at a distance no more than 1 mm from the coating surface, provides practically maximal accuracy of thickness measurement near the coating edges.

Key words: magneto-dynamic transducer, nickel coating, improved accuracy.

*Адрес для переписки: Булатов О.В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iapb.bas-net.by*

Введение. В работе [1] исследовано влияние на краевой эффект толщины H вертикальной стенки стального (ферромагнитного) цилиндрического корпуса преобразователя магнитодинамического прибора, предназначенного для измерений толщины никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм, актуальном для камер жидкостных ракетных двигателей. Там же показано, что краевой эффект очень существенно снижается в том случае, когда значение указанной толщины оказывается в определенном диапазоне. В настоящей работе, являющейся продолжением указанной, завершена комплексная оптимизация размеров корпуса преобразователя, необходимая для минимизации краевого эффекта.

Так как внешние размеры корпуса регламентированы заданным диапазоном значений измеряемой толщины, для достижения минимального краевого эффекта необходимо оптимизировать три геометрических параметра корпуса: толщину H цилиндрической вертикальной и толщину S плоской горизонтальной стенок, а также воздушный зазор Z между нижним торцом корпуса и покрытием. Исходя из практических рекомендаций, изложенных в работе [1], в данном случае выбрана толщина $H = 3$ мм.

Методика и результаты исследования. В настоящей работе с помощью пакета прикладных программ FEMM по изложенной в [1] методике в первую очередь определено влияние радиуса R

никелевого диска (аналога покрытия) толщиной 700 мкм на магнитную индукцию в материале полюсного наконечника постоянного магнита преобразователя при разной толщине S . Так как информативный сигнал любого магнитодинамического преобразователя формируется изменением нормальной составляющей магнитной индукции [1], на рис. 1 приведены линии зависимостей $B_{n\text{ ср}}(R)$ и $B_{n\text{ ср}}(S)$, при этом каждое значение $B_{n\text{ ср}}$ вычислено для всего наконечника при зазоре $Z = 1$ мм. Линия, соответствующая толщине $S = 0$, относится к предельному случаю, когда у преобразователя отсутствует корпус.

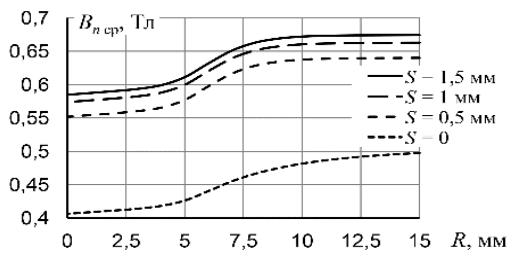
На рис. 2 показан график зависимости радиуса $R_{\text{из}}$ информативной зоны преобразователя от толщины S при зазоре $Z = 1$ мм.

На рис. 3, а показан график $B_{n\text{ ср}}(R)$ при различных значениях зазора Z между нижним торцом корпуса и диском. Линии зависимости $B_{n\text{ ср}}(Z)$, соответствующие различным значениям радиуса R , изображены на рис. 3, б.

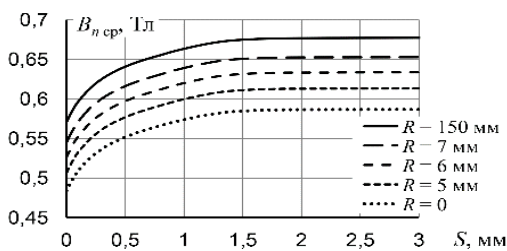
Влияние зазора Z на информативную зону преобразователя можно оценить по графику зависимости $R_{\text{из}}(Z)$, приведенному на рис. 4.

Анализ результатов. По графику на рис. 1, а видно, что ферромагнитный корпус существенно усиливает информативный сигнал преобразователя: даже при относительно тонкой ($S = 0,5$ мм) горизонтальной стенке величина $B_{n\text{ ср}}$ в среднем почти на 35 % больше, чем при отсутствии кор-

пуca. Наиболее интенсивный рост $B_{n\text{cp}}$ наблюдается на участке от $R \approx 5$ до $8,5$ мм, т. е. примерно от границы наконечника до середины вертикальной стенки.



a



б

Рисунок 1 – Зависимости $B_{n\text{cp}}$ от R (a) и от S (б) при $H = 3$ мм

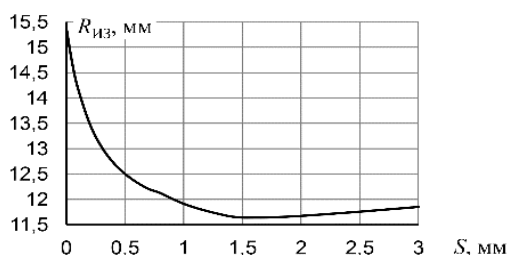
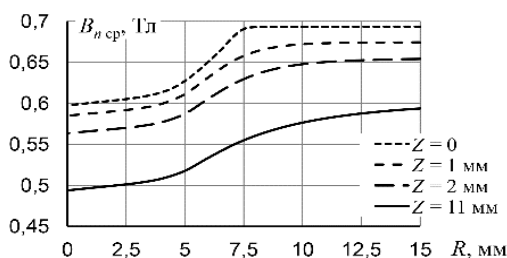
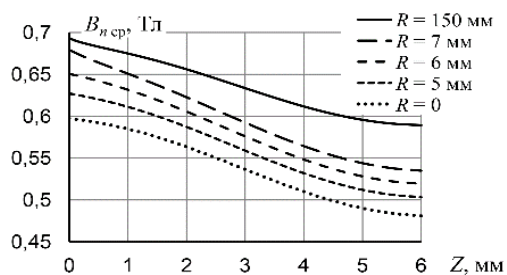


Рисунок 2 – Зависимость $R_{\text{из}}$ от S ($H = 3$ мм)



a



б

Рисунок 3 – Зависимости $B_{n\text{cp}}$ от R (a) и от Z (б) при $H = 3$ мм и $S = 1,5$ мм

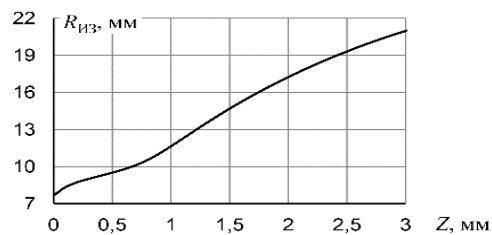


Рисунок 4 – Зависимость $R_{\text{из}}$ от Z ($H = 3$ мм, $S = 1,5$ мм)

Сильное смещение нижней линии на рис. 1, а обусловлено отсутствием горизонтальной стенки, увеличивающей концентрацию силовых линий магнитной индукции в материале наконечника. В целом по рис. 1 видно, что указанная концентрация возрастает при увеличении не только радиуса R , но и толщины S . Следовательно, правильный выбор этой толщины актуален не меньше оптимизации толщины H . Данный вывод подтверждается графиком зависимости $R_{\text{из}}(S)$, изображенным на рис. 2.

Из рис. 3, а следует, что увеличение зазора Z влечет за собой расширение вышеуказанного участка значений радиуса R . Например, в случае $Z = 2$ мм величина $B_{n\text{cp}}$ продолжает возрастать даже при $R = 10$ мм, тогда как при отсутствующем зазоре ($Z = 0$) рост $B_{n\text{cp}}$ полностью прекращается, как только радиус R становится больше 7,5 мм. В целом это свидетельствует о том, что уменьшение зазора Z приводит к снижению краевого эффекта.

Последний вывод подтверждается сопоставлением обоих рис. 1, б (один из них приведен выше, а другой – в работе [1]) с рис. 3, б. Видно, что $B_{n\text{cp}}$ увеличивается с ростом толщины S или H , но уменьшается по мере приближения торца корпуса к диску. Это объясняется тем, что утолщение любой стенки корпуса приводит к возрастанию концентрации силовых линий магнитной индукции в его материале (равно как и в материале наконечника магнита), влекущему за собой снижение краевого эффекта, а увеличение зазора Z – наоборот, к большему рассеиванию этих линий в воздухе.

По рис. 2 видно, что толщина S в начале диапазона ее значений сильно влияет на радиус $R_{\text{из}}$ информативной зоны преобразователя, однако в дальнейшем влияние данной толщины резко ослабевает. Значение $S \approx 1,5$ мм является оптимальным, так как при нем краевой эффект оказывается наименьшим. Из рис. 4 следует, что функция $R_{\text{из}} = f(Z)$ имеет минимум при $Z = 0$.

Заключение. В настоящей работе завершено исследование влияния размеров ферромагнитного корпуса магнитодинамического преобразователя на краевой эффект, зависящий от радиуса $R_{\text{из}}$. Показано, что на данный радиус сильно влияют толщины H вертикальной и S горизонтальной стенок корпуса, а также зазор Z между ниж-

ним торцом корпуса и покрытием. Учитывая результаты работы [1], можно утверждать, что краевой эффект будет минимальным при использовании корпуса, соответствующего условиям $H = 3$ мм и $S = 1,5$ мм. Для минимизации дополнительной погрешности, обусловленной неровностями или кривизной по-верхности покрытия, необходим зазор $Z = 1$ мм.

Литература

1. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.

УДК 620.179.142.6

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТОЛЩИНЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ТОЛЩИН СТЕНОК СТАЛЬНОГО КОРПУСА

Булатов О.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе методом конечных элементов впервые исследовано влияние толщин вертикальной и горизонтальной стенок стального корпуса магнитодинамического преобразователя на модуль намагниченности его информативной зоны и обеспечиваемую им чувствительность к никелевым покрытиям толщиной от 0 до 700 мкм. Установлено, что при толщинах стенок, сводящих краевой эффект к минимуму, минимизируется дополнительная погрешность, обусловленная вариацией внутренних напряжений никеля, а также обеспечивается очень высокая чувствительность даже в самом конце указанного диапазона.

Ключевые слова: магнитодинамический преобразователь, никелевое покрытие, модуль намагниченности, толщина покрытия, чувствительность.

DEPENDENCE OF THE MAGNETIZATION MODULUS OF THE INFORMATIVE AREA OF THE MAGNETO-DYNAMIC TRANSDUCER AND ITS SENSITIVITY TO THE THICKNESS OF NICKEL COATINGS ON THICKNESSES OF THE STEEL CASE WALLS

Bulatov O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. In the paper the effect of the thicknesses of steel case vertical and horizontal walls of the magneto-dynamic transducer on the magnetization modulus of its informative area and providing by it sensitivity to nickel coatings with thickness from 0 up to 700 micrometers is for the first time investigated by means of the finite element method. It is established that with the walls thicknesses minimizing the edge effect, the additional error conditioned by the variation of nickel internal stresses is minimized, and also very high sensitivity is provided even at the very end of the mentioned range.

Key words: magneto-dynamic transducer, nickel coating, magnetization modulus, coating thickness, sensitivity.

*Адрес для переписки: Булатов О.В., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

Введение. Необходимость отстройки от влияния вариации внутренних напряжений никелевых покрытий на точность их магнитодинамической толщинометрии подтверждена экспериментально еще в работе [1]. Там же показано, что эта отстройка достигается в случае сильного первичного поля, намагничивающего информативную зону преобразователя до состояния, достаточно близкого к техническому насыщению никеля. В настоящей работе методом конечных элементов исследована зависимость модуля намагниченности информативной зоны от толщин обеих стенок стального цилиндрического корпуса магнитодинамического преобразователя, предназначенного для толщинометрии

никелевых покрытий в диапазоне от 0 до 700 мкм. Кроме того, установлено влияние указанных толщин на чувствительность преобразователя к толщине покрытий.

Методика и результаты исследования. Модуль $I_{Лиз}$ вычислен во всем объеме информативной зоны вышеуказанного преобразователя, ограниченной ее радиусом $R_{из}$, зависящим от толщин H вертикальной и S горизонтальной стенок корпуса, и толщиной b никелевого покрытия. Зависимости $I_{Лиз}(H)$ и $I_{Лиз}(S)$, построенные при оптимизированных толщинах S и H [2] соответственно, представлены на рис. 1 и 2, при этом верхние графики приведены для малого значения толщины b , а нижние – для максимального.

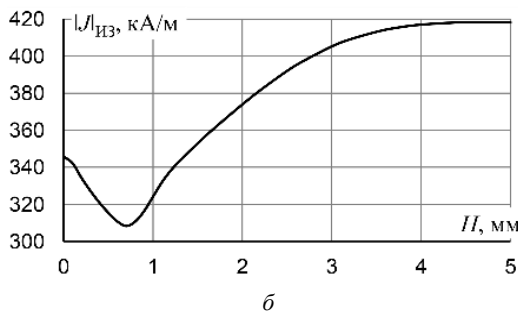
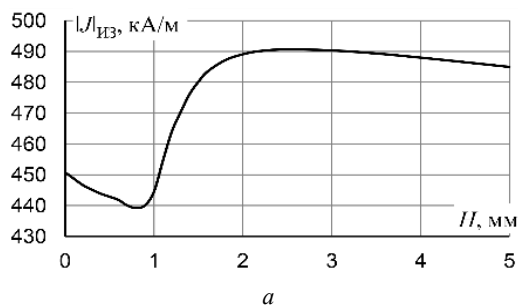


Рисунок 1 – Зависимость модуля $|J|_{из}$ намагниченности информативной зоны в никелевом покрытии толщиной 100 мкм (а) или 700 мкм (б) от толщины H ($S = 1,5$ мм)

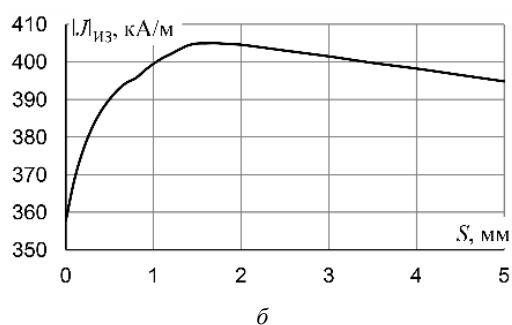
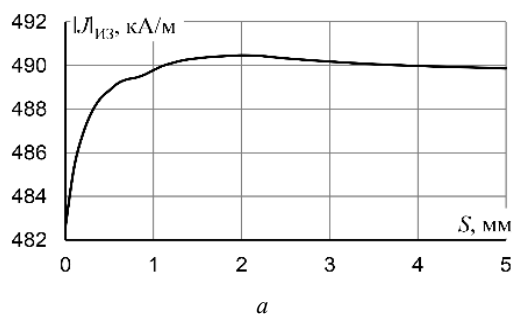


Рисунок 2 – Зависимость модуля $|J|_{из}$ намагниченности информативной зоны в никелевом покрытии толщиной 100 мкм (а) или 700 мкм (б) от толщины S ($H = 3$ мм)

Чувствительность преобразователя к толщине b вычислена как отношение изменения $\Delta\Phi$ его информативного сигнала к достаточно малому приращению верхнего предела рассматриваемого диапазона (т. е. к значению $\Delta b = 1$ мкм, на которое возрастала максимальная толщина $b_{max} = 700$ мкм). Графики зависимостей $\Delta\Phi/\Delta b(H)$ и $\Delta\Phi/\Delta b(S)$ изображены на рис. 3.

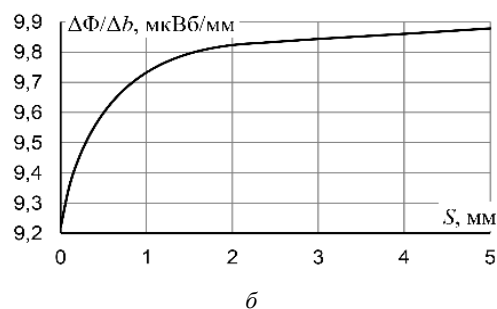
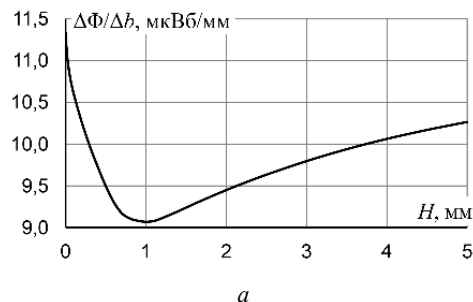


Рисунок 3 – Зависимость чувствительности $\Delta\Phi/\Delta b$ преобразователя от толщины H при $S = 1,5$ мм (а) или от толщины S при $H = 3$ мм (б), соответствующая верхнему пределу диапазона толщины b

Анализ результатов. Увеличение толщины H при фиксированной толщине S сначала приводит не только к очень существенному уменьшению радиуса $R_{из}$ [2], но и к резкому повышению концентрации силовых линий магнитной индукции, рассеянных в своем большинстве в воздухе при отсутствии корпуса, в его вертикальной стенке. В итоге модуль $|J|_{из}$ заметно уменьшается, что видно по обоим графикам на рис. 1. Так как при дальнейшем увеличении H магнитное взаимодействие корпуса с покрытием значительно усиливается, $|J|_{из}$, наоборот, стремительно возрастает, что особенно заметно при малых значениях b .

Из рис. 1 и 2 следует, что модуль $|J|_{из}$, убывая по мере возрастания толщины b , не опускается ниже 300 кА/м, т. е. при любом ее значении превышает половину модуля $|J|_s$ намагниченности насыщения никеля. Так как при оптимальных толщинах H и S первый из этих модулей составляет более двух третей второго, можно утверждать, что в данном случае преобразователь обеспечивает достаточную отстройку от вариации внутренних напряжений никелевых покрытий.

Сопоставление расчетных данных с результатами многочисленных экспериментов свидетельствует о том, что минимально допустимая чувствительность любого магнитодинамического преобразователя составляет примерно 1 мкВб/мм. Исходя из этого, оба графика на рис. 3 свидетельствуют о достаточно высокой чувствительности $\Delta\Phi/\Delta b$ даже в конце диапазона толщины b . В его начале $\Delta\Phi/\Delta b$ максимальна: расчеты показывают, что при $S = 1,5$ мм она в зависимости от H состав-

ляет от 15,6 до 13,3 мкВб/мм, а при $H = 3$ мм и разной S – от 13,1 до 13,8 мкВб/мм, при этом характер обеих зависимостей не изменяется. Минимум функции $\Delta\Phi/\Delta b = f(H)$ при $H \approx 1$ мм, представленный на рис. 3, а, объясняется наличием минимума на обоих графиках рис. 1.

Выводы. В настоящей работе установлено, что стальной корпус с вертикальной стенкой толщиной 3 мм и горизонтальной толщиной 1,5 мм обеспечивает рассмотренному преобразователю наибольшую отстройку от вариации внутренних напряжений никелевых покрытий и очень высокую чувствительность даже к их максимальной толщине, достигающей 700 мкм.

УДК 621.382

АППАРАТУРА И МЕТОД АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов и метод, позволяющие на основе переходных электрических процессов анализировать внутреннюю структуру тепловых сопротивлений мощных полупроводниковых приборов и представлять ее в виде спектра тепловых сопротивлений, соответствующих элементам их конструкций. Разработан метод получения профилей распределения теплового потока по элементам структуры приборов.

Ключевые слова: мощные полупроводниковые приборы, тепловые параметры, тепловая релаксационная дифференциальная спектроскопия, тепловое сопротивление, аппаратура контроля электротепловых процессов в приборах.

EQUIPMENT AND METHOD OF ANALYSIS OF TRANSIENT ELECTRICAL PROCESSES IN STUDIES OF THERMAL PARAMETERS OF HIGH-POWER SEMICONDUCTOR DEVICES

Bumai Yu., Vaskov O., Niss V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. An impedance spectrometer of thermal processes and a method have been developed, which allow analyzing the internal structure of thermal resistances of high-power semiconductor devices on the basis of transient electrical processes and presenting it in the form of a spectrum of thermal resistances corresponding to the elements of their designs. A method for obtaining heat flow distribution profiles for the elements of the device structure has been developed.

Keywords: high-power semiconductor devices, thermal parameters, thermal relaxation differential spectroscopy, thermal resistance, equipment for monitoring electrothermal processes in devices.

*Адрес для переписки: Бумай Ю.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: yuabumai@bntu.by*

Способность отводить тепло от кристаллов мощных полупроводниковых приборов относится к одному из основных сдерживающих факторов силовой электроники, так как перегрев кристалла приводит к быстрой деградации, резкому снижению времени работы или отказу приборов. Это приводит к необходимости анализа структуры внутреннего теплового сопротивления для таких приборов. В связи с этим в БНТУ разработан импеданс-спектрометр тепловых процессов,

Литература

1. Лухвич, А. А. Возможности магнитодинамического метода контроля толщины покрытий с неоднородными свойствами (эксперимент) / А. А. Лухвич, О. В. Булатов, А. Л. Лукьянов // Дефектоскопия. – 2009. – № 11. – С. 46–53.
2. Булатов, О. В. Влияние толщины стенки стального корпуса преобразователя магнитодинамического толщиномера на краевой эффект / О. В. Булатов // Приборостроение – 2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., Минск, 18–20 ноября 2020 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 21–22.

диодных излучателях, и других изделиях силовой электроники при циклическом изменении температуры окружающей среды.

Разработанная аппаратура предназначена для неразрушающего диагностического контроля тепловых параметров полупроводниковых приборов различного типа с использованием переходных электрических процессов, обусловленных разогревом полупроводниковых приборов проходящими через них импульсными токами. С помощью импеданс-спектрометра получают временные зависимости изменения напряжения на $p-n$ -переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры. На измеряемый образец подаются импульсы тока в виде ступенек. В каждый момент времени из изменения напряжения на $p-n$ -переходе с использованием K -фактора, представляющего собой изменение напряжения на переходе при изменении температуры на 1 К на фиксированном токе, рассчитывается температура перегрева активной области прибора. Значения K -фактора получаются на основе анализа импульсных вольтамперных характеристик (ВАХ), для температурного интервала 20–85 °С. Импульсные ВАХ измеряются с использованием импульсов напряжения прямоугольной формы длительностью от 1 до 100 мкс с частотой следования 1 кГц.

Для повышения чувствительности аппаратуры и расширения динамического диапазона, с целью измерения малых изменений тепловых параметров полупроводниковых приборов, использовался быстродействующий, высокочувствительный АЦП, позволяющий производить 24-х разрядную дискретизацию входных сигналов.

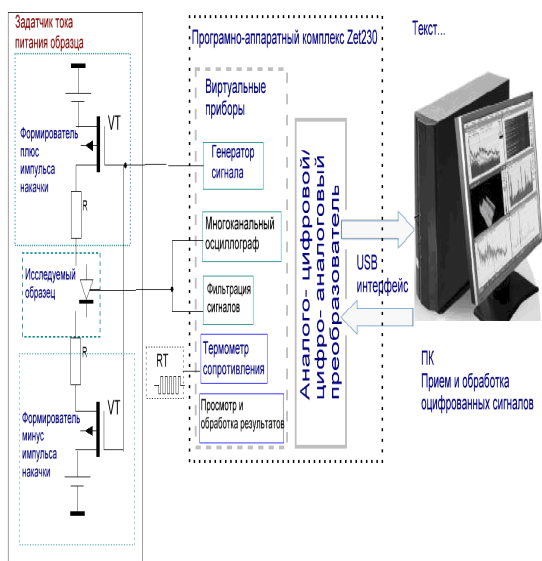


Рисунок 1 – Структурная схема аппаратуры для исследования малых изменений тепловых параметров мощных полупроводниковых приборов

Спектральные измерения связаны с обработкой и регистрацией большого объема аналоговых и цифровых данных. Исследования электротепловых спектров в мощных полупроводниковых приборах выполнялось на базе программно-аппаратного комплекса ZETLab (<http://www.zetms.ru/zetlab>), предоставляющего собой виртуальную лабораторию с мощными средствами для визуализации, спектрального анализа, измерения электрических параметров, генерации, записи и воспроизведения сигналов. Основу измерительной системы составляет блок преобразования данных в состав которого входит 24-разрядный модуль АЦП-ЦАП, с разрешением 10^{-6} в / 10^{-5} с. В такой системе роль измерительного устройства сводится к оцифровке сигналов, а их обработка и вывод результатов на экран осуществляется программными средствами, а сами приборы являются виртуальными. Виртуальные приборы, представляющие собой программы, для решения задач измерения и управления, из состава ZET LAB обрабатывают сигналы, поступающие на входные каналы системы для исследования электротепловых спектров. Программы АЦП (модуль Zet230) выполняют преобразование в цифровую форму входных данных и согласуют интерфейс связи с компьютером.

Программа многоканальный осциллограф предназначена для оценки формы нескольких сигналов и измерения мгновенных значений и позволяет регистрировать быстропротекающие процессы с временным разрешением 10 мкс.

Программа генератор сигналов предназначена для формирования сигналов различной формы, амплитуды и частоты на выходных каналах устройств ZET. В программе генератор сигналов реализована возможность получения на выходе сложных сигналов различной формы и длительности при генерации сигналов из файлов. Файл может быть, как двоичным (записанные ранее реализации сигналов), так и текстовым.

Программа фильтрации создает дополнительные виртуальные каналы, в которых и производится обработка сигналов. Все сигналы реальные и виртуальные имеют внутреннюю синхронизацию, что позволяет проводить их совместную обработку. Программа просмотра и обработки результатов позволяет: загружать одновременно несколько файлов данных, полученных с помощью ZETLab; копировать и вставлять данные из программ ZETLab выполняющихся в реальном времени; просматривать данные в графическом виде; редактировать данные в табличном виде; объединять графики с пересчетом масштабов по частоте и времени; проводить различные операции со столбцами данных – суммировать, вычитать, сглаживать, выполнять различные математические операции, рассчитывать различные параметры.

Результаты выводятся на экран компьютера в виде 12-звенной электротепловой RC-модели (Кауера и Фостера), где R – тепловое сопротивление, C – теплоемкость.

Метод и аппаратура применимы при разработке и освоении новых изделий, на стадии совершенствования технологических процессов монтажа кристаллов полупроводниковых приборов и повышения их надежности при термоиспытаниях для анализа структуры теплового сопротивления многослойных полупроводниковых приборов, исследования изменения тепловых параметров МОП транзисторов при термоиспытаниях, анализа качества слоя посадки кристаллов мощных силовых приборов. Данный метод обладает рядом преимуществ перед другими ме-

тодами измерения тепловых характеристик приборов:

- является экспрессным и неразрушающим;
- позволяет определить внутреннее и внешнее тепловое сопротивление приборов, а также их структуру, зависящую путей прохождения теплового потока по элементам как самого устройства, так и внешнего теплоотвода и представить в виде спектра, подобно оптическому;
- позволяет оценить сечение теплового потока в разных областях устройства и внешнего теплоотвода;
- использование больших импульсных токов (в режимах близких к предельно допустимым) позволяет обнаружить области шнурования тока и выявить потенциально ненадежные приборы.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА ПОЛЕВЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧЕКАТАННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ

Бурак В.А.¹, Короткевич З.М.¹, Коровицкий В.А.²

¹ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано изменение таких полевых магнитных величин как коэрцитивная сила, напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости, и величины напряженностей поля, при которых петля магнитного гистерезиса имеет наибольшую ширину, с ростом содержания углерода в горячекатаных среднеуглеродистых конструкционных сталях. Установлено, что коэрцитивная сила и напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости, могут применяться для выявления изделий, отличающихся по материалу изготовления, при условии, что контролируемые изделия не были подвергнуты термической обработке, значительно изменяющей структурное состояние.

Ключевые слова: магнитный неразрушающий контроль, импульсное намагничивание, коэрцитивная сила, конструкционная сталь.

INFLUENCE OF CARBON QUANTITY ON MAGNETIC FIELD STRENGTH CHARACTERISTICS OF HOT-ROLLED MEDIUM CARBON CONSTRUCTION STEEL

Burak V.¹, Korotkevich Z.¹, Korovitskiy V.²

¹Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus

²Belorussian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The changes in the coercive force, the magnetic field strength corresponding to the magnetic permeability maximum value and the field strengths of the magnetic hysteresis loop largest width with increasing the carbon content in hot-rolled medium-carbon structural steels were investigated. It is defined that the coercive force and the magnetic field strength corresponding to the magnetic permeability maximum value can be used to identify articles that have different material of manufacture if the testing articles were not under heat treatment which leads to significant changes in the structural state.

Key words: magnetic non-destructive testing, pulse magnetization, coercive force, construction steel.

Адрес для переписки: Короткевич З.М., ул. Академическая, 16, г Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: kzm@iapf.bas-net.by

Изучение влияния содержания углерода и легирующих элементов на механические и магнитные характеристики различных марок сталей расширяет возможности магнитного контроля для решения задач по определению их химического состава и соответствующей марки.

Конструкционные среднеуглеродистые стали являются одними из наиболее популярных материалов для изготовления деталей различного назначения. Так как для этих марок сталей характерно содержание легирующих элементов в количествах, не оказывающих значительного

влияния на формирование кристаллической решетки, то различие в структурном состоянии и механических характеристиках определяется в основном содержанием углерода.

Намагничивание образцов и измерение магнитных характеристик осуществлялось в разомкнутой магнитной цепи проходного преобразователя измерителя магнитной индукции импульсного ИМИ-И [1]. Намагничивание и перемагничивание заранее размагниченных образцов осуществлялось несимметричными импульсами разной полярности, амплитуды которых составляли 15 и 4 кА/м. Исследуемые образцы были изготовлены из листовой горячекатаной стали марок 35, 40, 45 и 50 и имели форму пластин размерами 200x20x3 мм³. Для дальнейшего анализа принималось, что содержание углерода в них соответствует номинальному по ГОСТ–1080. Образцы были подвергнуты отжигу при разных температурах, для дальнейшего представления результатов были взяты образцы без отжига, отожженные при 530 °С (средний отжиг) и 800 °С (высокий отжиг), что обеспечивает различные структурные состояния для рассматриваемых марок сталей.

Как известно, одним из самых востребованных информативных параметров для магнитного неразрушающего контроля является коэрцитивная сила H_c , которая широко исследовалась для разных марок сталей. Рассмотрим эту магнитную величину и ряд полевых характеристик, взятых на петле магнитного гистерезиса, полученной при намагничивании стальных горячекатаных образцов в проходном датчике в разомкнутой магнитной цепи.

Коэрцитивная сила H_c для образцов горячекатаной среднеуглеродистой конструкторской стали, не подвергнутых отжигу, монотонно увеличивается с ростом содержания углерода (рис. 1), также себя ведет эта характеристика и для отожженных при 530 °С образцов. С дальнейшим увеличением температуры отжига меняется ход зависимости коэрцитивной силы H_c . Для образцов, отожженных при $T_{отж} = 800$ °С она практически не меняется для сталей 40 и 45, для стали 35 значение коэрцитивной силы ниже на 65 %, чем для стали 40 и 45, а для стали 50 ниже на 45 % чем для сталей с меньшим содержанием углерода.

Полевой характеристикой, которую можно определить по петле магнитного гистерезиса, является напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости $H_{ум}$, зависимость которой для рассматриваемых марок сталей от содержания углерода представлена на рис. 2.

Изменение значений этой характеристики с увеличением содержания углерода в исследуемых образцах подобно изменению коэрцитивной силы для всех рассматриваемых температур отжига.

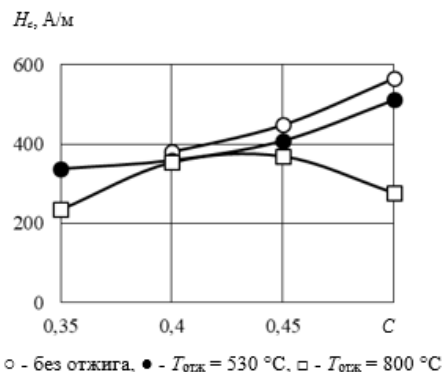


Рисунок 1 – Зависимость величины H_c от содержания углерода

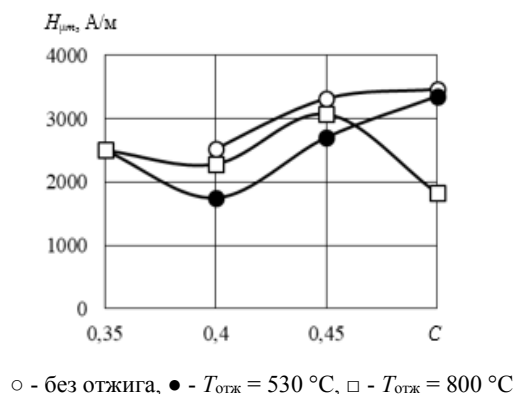


Рисунок 2 – Зависимость величины $H_{ум}$ от содержания углерода

Для значений напряженностей, взятых по возрастающей $H_{\delta m1}$ и ниспадающей $H_{\delta m2}$ ветвях при максимальной ширине петли магнитного гистерезиса, характерны одинаковые законы изменения с увеличением содержания углерода, не зависящие от режима термообработки (рис. 3).

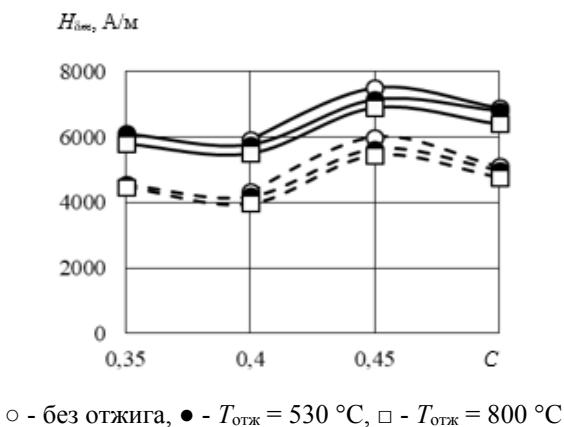


Рисунок 3 – Зависимость величин $H_{\delta m1}$ (сплошная) и $H_{\delta m2}$ (пунктирная) от содержания углерода

В ходе изучения изменения характеристик, взятых по петле магнитного гистерезиса, полученной при намагничивании в проходном датчике в разомкнутой цепи несимметричным импуль-

сним магнитным полем, было установлено, что разбавку сталей по маркам в зависимости от количества углерода можно надежно проводить по таким полевым характеристикам как коэрцитивная сила H_c и напряженность магнитного поля, соответствующая максимальному значению магнитной проницаемости $H_{\text{пр}}$, для образцов, термическая обработка которых не вызывает значительных изменений в структурном состоянии горячекатаной среднеуглеродистой стали, так как с увеличением температуры отжига эти характеристики неоднозначно зависят от содержания углерода. Для полевых магнитных харак-

теристик, связанных с максимальной шириной петли магнитного гистерезиса, температура термообработки не оказывает влияния на ход зависимостей от содержания углерода в материале образцов.

Литература

1. Короткевич, З. М. Многопараметровая модель для контроля качества закалки инструментальной углеродистой стали У8А с использованием прибора ИМИ-И / З. М. Короткевич, А. А. Осипов, В. А. Бурак // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2021. – № 2. – С. 38–45.

УДК 620.179.14/15

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ШУМА ПРИ ИЗУЧЕНИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ

Бусько В.Н.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены схемы, конструкции и внешний вид предложенных и созданных устройств и механизмов для исследования усталостной прочности образцов порошковой стали 09Г2С, полученных с помощью аддитивной технологии – методом селективного лазерного спекания (сплавления). Показаны преимущества устройств для повышения эффективности измерений магнитного шума при исследовании, контроле и диагностике физических и механических свойств стальных образцов. Приведен пример измерения магнитного шума в образцах с помощью созданных устройств в комплекте с прибором и преобразователем Баркгаузена.

Ключевые слова: магнитный шум, механические испытания на изгиб, усталостная прочность, аддитивные технологии и материалы.

INCREASING THE EFFICIENCY OF MEASURING MAGNETIC NOISE IN STUDYING THE FATIGUE STRENGTH STEEL SAMPLES

Busko V.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The schemes, designs and appearance of the proposed and created devices and mechanisms for studying the fatigue strength of 09G2S powder steel samples obtained using the additive technology - the method of selective laser sintering (fusion) are presented. The advantages of devices for increasing the efficiency of measurements of magnetic noise in the study, control and diagnostics of the physical and mechanical properties of steel samples are shown. An example of measuring magnetic noise in samples using the created devices complete with a Barkhausen instrument and transducer is given.

Key words: magnetic noise, mechanical bending tests, fatigue strength, additive technologies and materials.

*Адрес для переписки: Бусько В.Н., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Исследование циклической усталостной прочности (УП), или долговечности, материалов и изделий относится к приоритетным задачам. Появление новых материалов, получение которых основано на использовании аддитивных технологий (АТ), актуализировало необходимость и интенсивность изучения физико-механических свойств (ФМС), особенно прочностных, данного класса материалов. В настоящее время во многих отраслях наметился резкий рост (промышленность, авиация и космонавтика, медицина и автомобилестроение) применения изделий, полученных с помощью АТ [1–3].

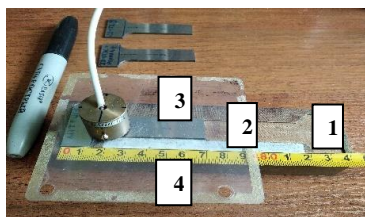
В ближайшем будущем полученные с помощью АТ изделия будут конкурировать с полученными традиционными способами.

Прочность и жесткость конструкций, в основном, определяются возможностью сопротивления металла деформации, обусловленной циклической усталостью. Поэтому целью работы являлось создание устройств, позволяющих повысить достоверность и повторяемость измерений интенсивности магнитного шума (МШ) при изучении УП образцов стали 09Г2С, полученных с помощью селективного лазерного спекания.

Необходимыми этапами изучения УП АТ-образцов является измерение МШ до их циклирования; затем – проведение мало- и многоцикловых механических испытаний при разных амплитудах и количествах циклов нагружения, коэффициенте симметрии цикла, видов постобработок образцов после изготовления, времени и условий эксплуатации.

В качестве метода оценки ФМС и УП до и после циклирования применялся магнитный метод эффекта Баркгаузена (МЭБ) [4]. Учитывая универсальность и высокую чувствительность его параметров к неоднородности, анизотропии, шероховатости, остаточным напряжениям, дефектам, усталостной деградации, пористости, для повышения эффективности и достоверности измерений МШ предложено использовать ряд устройств и приспособлений.

На рис. 1 показан внешний вид приспособления с углублением в форме образца длиной 140 мм. Оно позволяет надежно фиксировать образец в статичном положении и проводить измерение МШ путем сканирования преобразователем Баркгаузена (ПБ) изготовленных по ГОСТ [4] протяженных образцов в виде балки длиной до 140, и длиной 70 мм при циклических испытаниях при изгибе.

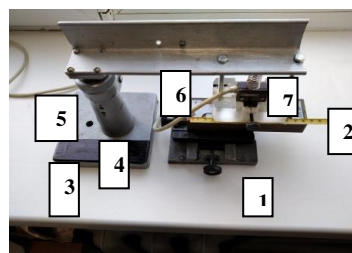


1 – приспособление с углублением по форме образца, 2 – испытываемый образец, 3 – преобразователь Баркгаузена, 4 – изолирующая прокладка

Рисунок 1 – Вид устройства для установки и фиксации плоского образца с преобразователем Баркгаузена (ПБ) с подмагничиванием и подкладкой для обеспечения постоянного зазора и скольжения ПБ по поверхности

Предложено использовать два устройства, объединенных в единое целое (рис. 2). Первое состоит из двухкоординатника, в котором закреплено приспособление с установленным и зафиксированным в нем образцом, позволяющим с высокой точностью перемещать его независимо по осям X и Y. Второе устройство содержит станину, в которой установлена штанга с возможностью перемещения ее по вертикали с помощью вращения кольца с резьбой. На штанге закреплен кронштейн с установленным на нем ПБ, который с помощью винтовой пружины обеспечивает постоянный прижим к поверхности испытываемого образца. Оба устройства обеспечивают прецизионное перемещение ПБ вдоль длины и поперек ширины образца с помощью

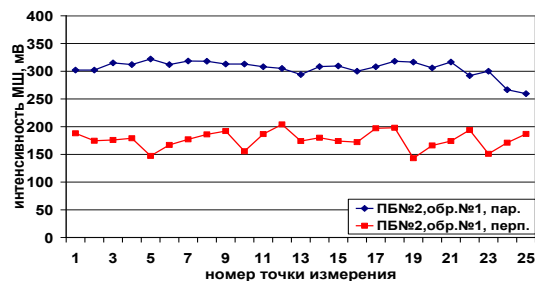
двухкоординатника, а по вертикали с помощью подпружиниваемого датчика.



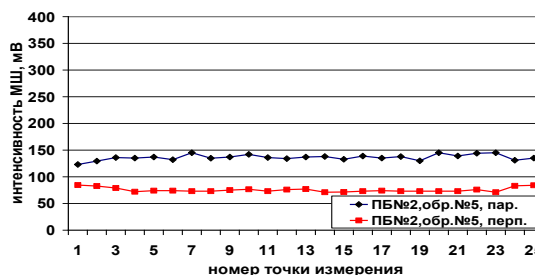
1 – двухкоординатное устройство, 2 – приспособление с зафиксированным образцом, 3 – станина, 4 – штанга, 5 – вращающееся кольцо на резьбе, 6 – кронштейн, 7 – ПБ

Рисунок 2 – Двухкоординатное устройство для перемещения ПБ вдоль и поперек образца и устройство для перемещения ПБ по вертикали

На рис. 3 как пример применения устройств показаны экспериментальные результаты измерения интенсивности МШ прибором типа ИМШ путем сканирования при ортогональных положениях ПБ по длине АТ-образца (рис. 3, а) и литого (рис. 3, б) до циклирования. Измерения уровня МШ проводились в 25 точках по поверхности образца с шагом через 5 мм. По поведению изменения МШ по длине образцов оценивалась неоднородность, анизотропия, наличие дефектности, остаточных напряжений, качество механической и термической постобработок.



а



б

Рисунок 3 – Распределение уровня МШ по длине АТ-образца (а) и литого (б)

Видно, что МШ сильно зависит от способа изготовления образцов, а для АТ-образцов, и от вида термической обработки после изготовления.

Заметно различие между образцами по степени неоднородности и магнитной анизотропии.

Созданные устройства позволяют повысить эффективность, достоверность и повторяемость измерения магнитного шума при исследовании ФМС и УП стальных материалов на примере образцов стали 09Г2С, полученных с помощью аддитивных технологий.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместного проекта БРФФИ и РФФИ, грант № Т20Р – 119.

Литература

1. Дресвянников, В. А. Аддитивные технологии как технологическая инновация: понятие, содержание,

анализ развития / В. А. Дресвянников, Е. П. Страхов // Экономика и менеджмент инновационных технологий. – 2018. – № 1.

2. Сацкая, З. Экспансия аддитивных технологий в медицину / З. Сацкая // Аддитивные технологии – 2020. – № 4. – С. 6–8.

3. Особенности циклической усталостной прочности образцов, полученных селективным лазерным спеканием, из стали 09Г2С / В. Н. Бусько [и др.] // Неразрушающий контроль и техническая диагностика. – 2020. – № 4. – С. 16–25.

4. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов : ГОСТ 18353-79. – М., 1980. – 11 с.

5. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов (с измен.) : ГОСТ 25.502-79. – М., 1981. – 26 с.

УДК 621

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОПАРЫ ПРИ РАЗНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРОДОВ Владимиров М.Ю., Ключко Т.Р.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина*

Аннотация. Изложена методика и приведены результаты экспериментов по определению температуры медной ленты при прокатке с помощью естественной термопары. Приведена схема экспериментального оборудования.

Ключевые слова: температура, экспериментальная установка, естественная термопара, расчетная формула.

RESEARCH OF THE THERMOCOUPLE'S INDICATIONS AT VARIOUS VALUES OF THE THERMOELECTRODES' TEMPERATURE Vladimirov M., Klotchko T.

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine*

Abstract. The technique is described and the results of experiments to determine the temperature of a copper strip during rolling using a natural thermocouple are presented. The diagram of the experimental equipment is shown.

Key words: temperature, experimental setup, natural thermocouple, calculation formula.

Введение. Для обеспечения оптимальных механических параметров цветных металлов при холодной прокатке является поддержание на определенном уровне температуры ленты. Анализ методов измерения температуры показывает, что наиболее целесообразным в этом случае является использование термопар, в частности естественных. При этом возможно, что величины температуры двух термоэлектродов оказываются разными, что недостаточно исследовано и представляет интерес для создания приборов контроля.

Экспериментальное оборудование, разработанное для проведения исследования. Методик экспериментов предусматривала определение термоэдс [1], возникающей в месте контакта двух термоэлектродов, медного и константанового, имеющих разную температуру, что можно наблюдать при холодной прокатке

медной ленты на прокатном стане и измерении температуры ленты с помощью естественной термопары, у которой одним электродом является сама лента [2], а второй выполнен из константана, например, в форме ролика. При этом необходимо учитывать, что воздушная среда в зоне контакта датчика и объекта содержит химические компоненты, влияющие на качество контакта [3, 4].

Для проведения экспериментов была сконструирована и изготовлена экспериментальная установка, схема которой приведена на рис. 1. Установка выполнена следующим образом. К корпусу 1 из текстолита болтами 16 прикреплен медный диск 6. Внутрь цилиндрической расточки корпуса 1 помещена вставка 3. С помощью шайбы 4 и винтов 15 к вставке крепится константановый термоэлектрод 5. Внутренняя полость

вставки 3 герметизируется с помощью фланца 2, к которому подпаиваются две медные трубки.

Вставка 3 прижимается к диску 6 с помощью пружины 10 и прижима 7. Корпус 1 цилиндрическим фланцем свободно устанавливается на крышку водяной бани 11.

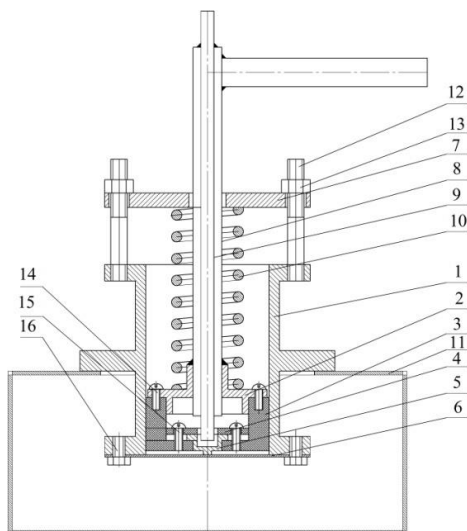


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

Водяная баня, заполненная водой, вместе с корпусом в сборе, устанавливается на электрический нагреватель. Из бака с помощью центробежного насоса вода по патрубку подается к медной трубе 9 и по ней в полость вставки 3, откуда она отводится по трубе, расположенной concentрично с первой, в тот же бак.

При включении электрического нагревателя нагревается вода в водяной бане, а вместе с ней и медный диск 6, выполняющий функцию положительного термоэлектрода контактной термопары. Вторым термоэлектродом является константанный электрод 5, который охлаждается проточной водой. Этим достигается поддержание термоэлектродов при разных температурах.

В процессе проведения экспериментов измеряли следующие температуры:

- истинные температуры медного диска и константанового электрода;
- температуру, соответствующую показаниям контактной термопары.

Результаты экспериментов и их анализ. В связи с тем, что некоторые участки электрических цепей были общими для разных замеров, была применена следующая методика определения температур. Включался электронагреватель. Вода в водяной бане нагревалась, а вместе с ней и медный диск с вмонтированной термопарой. Включался насос, и прокачиваемая вода охлаждала константанный электрод. После этого включался секундомер, и через каждые 30 секунд последовательно записывались показания каждой из трех термопар.

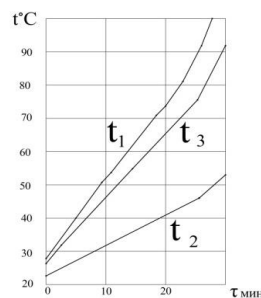


Рисунок 2 – Графики изменения показаний термопар во времени

На рис. 2. представлены графики изменения показаний термопар во времени, полученные при проведении одного из экспериментов, где t_1 – температура медного диска; t_2 – температура константанового электрода; t_3 – температура, соответствующая показаниям контактной термопары.

Обработка полученных результатов проводилась следующим образом. По построенным графикам определяли значения температур t_1 , t_2 и t_3 в одинаковые моменты времени.

Температура t_1 может быть выражена через t_2 и t_3 в виде

$$t_1 = t_3 + \frac{t_3 - t_2}{k}$$

Подсчитывали значение k при различных значениях t_1 .

Выводы. Обработка экспериментальных данных показала, что величина коэффициента k слабо зависит от температуры контролируемого объекта t_1 и колеблется около среднего значения $k = 2,7$.

Эксперименты дали следующие результаты:

- обнаружена связь между показаниями контактной термопары и температурами термоэлектродов;

- предложена формула для определения температуры контролируемого объекта по показаниям контактной термопары и температуре второго термоэлектрода;

- установлено, что значение коэффициента k в формуле (1) в широком диапазоне усилий прижатия термоэлектродов лежит в пределах от 2,7 до 3.

Перспективами дальнейших исследований могут быть автоматизированные устройства измерений в технологических процессах обработки металлов.

Литература

1. Відчутники контрольно-вимірювальних систем: монографія / Г. С. Тимчик [и др.] // К. : НТУУ «КПІ», 2008. – 240 с.
2. Большая Энциклопедия Нефти и Газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ngpedia.ru/id510431p1.html>. – Дата доступа: 24.09.2021.
3. Skytsiouk, V. Specifics of influence of the chemical composition of abstract object's presence zone on accuracy of determination of surface's coordinates /

V. Skytsiouk, T. Klotchko, M. Bulyk // Bulletin KPI. Series Instrument Making. – 2019. – Vol. 57, № 1. – P. 62–71.

4. Скицюк, В. І. Визначення координати у явно-реальній поверхні межової панданної зони об'єкта /

В. І. Скицюк, Ключко, Т. Р. // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування. – 2017. – Т. 53, № 1. – С.49–56.

УДК 621.383

ФОТОПРИЕМНИК С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Полупроводниковые приборные структуры с глубокой многозарядной примесью позволяют создавать фотоприемники для систем оптической диагностики с переключаемым видом спектральной характеристики чувствительности. Реализуемая спектральная характеристика чувствительности определяется заселенностью энергетических уровней многозарядной примеси. Набор спектральных характеристик, между которыми осуществляется переключение, определяется комбинацией материалов полупроводника и глубокой многозарядной примеси.

Ключевые слова: измерительный фотоприемник, полупроводник, многозарядная примесь, спектральная характеристика чувствительности, управление характеристикой чувствительности.

PHOTODETECTOR WITH THE SWITCHED CHARACTERISTIC OF SPECTRAL RESPONSE

Vorobey R., Gusev O., Svistun A., Tyavlovsky A., Tyavlovsky K., Shadurskaya L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Semi-conductor structures with deep multicharge impurity allow to create photodetectors for systems of optical diagnostic with a switched aspect of spectral characteristics of sensitivity. The implemented spectral characteristics of sensitivity are defined by population of power levels многозарядной impurity. The set of spectral characteristics between which switching is carried out, is defined by a combination of materials of the semi-conductor and deep multicharge impurity.

Key words: photodetector, the semiconductor, multicharge impurity, sensitivity spectral characteristics, control of the sensitivity characteristic.

*Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

Наибольший интерес, с точки зрения применения в измерительных фотоэлектрических преобразователях систем оптической диагностики, представляют фотоприемники (ФП), способные осуществлять одновременное измерение нескольких параметров оптического излучения: абсолютной и относительной интенсивностей спектральных линий, полуширины, формы контуров спектральных линий и др. [1–4]. Физическую основу работы фотоприемника, построенного на базе полупроводника с собственной фотопроводимостью [2–4], составляет интеграция процессов внутри объема чувствительной области, связанных с последовательной перезарядкой нескольких энергетических уровней различных зарядовых состояний глубокой примеси. Расширение функциональности ФП возможно благодаря использованию механизма управления зарядовым состоянием многозарядных примесных центров. Такой фотоприемник выполняется в одном объеме полупроводника с собственной фотопроводимостью, легированного глубокой примесью, образующей два и более энергетиче-

ских уровня для разных зарядовых состояний [3]. Многозарядный примесный M -центр может содержать от 0 до M электронов и соответственно, находиться в $(M + 1)$ различных зарядовых состояниях. Схема полупроводника для $M = 3$ приведена на рис. 1.

При пустом центре для электрона существует основное вакантное состояние, описываемое локальным уровнем энергии E_1 . При заполнении уровня E_1 для электронов «возникает» новое квантовое состояние с энергией E_2 , которое может быть занято вторым захваченным электроном. Причем уровня энергии E_2 не существует, пока уровень E_1 не занят хотя бы одним электроном. Это обстоятельство составляет основное отличие энергетического спектра многозарядных центров от системы уровней, формируемых несколькими простыми центрами разных типов. В случае нескольких однозарядных центров разных типов вся совокупность локальных уровней всегда существует полностью, независимо от степени заполнения отдельных уровней. Для многозарядной примеси нейтральному состоянию при-

местного центра соответствует нижний уровень E_1 , занятый электроном и свободный уровень E_2 . При захвате электронов вышележащим уровнем, энергия нижележащего уровня уже не может проявиться из-за сильного взаимодействия между двумя электронами центра и их неразличимости. Само существование активного уровня и энергетический спектр многозарядной примеси определяется занятостью уровней центра и не может быть представлено набором независимых уровней. В зависимости от точного положения уровня Ферми в глубине запрещенной зоны в качестве активной выступает та или иная пара уровней.

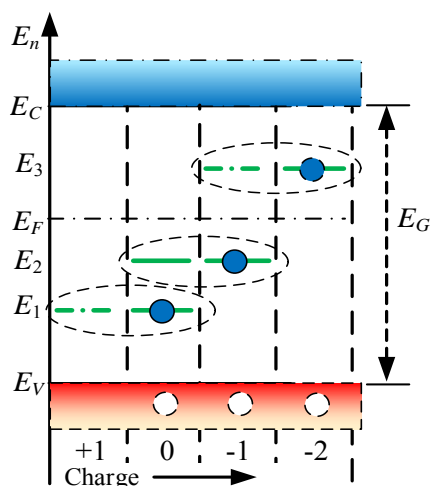


Рисунок 1 – Энергетическая диаграмма полупроводника для примесного центра с четырьмя зарядовыми состояниями

Последнее обстоятельство позволяет изменять вид энергетического спектра примесного центра, управляя заселенностью уровней путем электрической инжекции или дополнительной подсветкой [3, 4]. Переключение между видами энергетического спектра примесного центра происходит за время, равное времени жизни неравновесных носителей заряда, и, в свою очередь, приводит к изменению вида спектральной чувствительности ФП. Длинноволновая граница примесной фотопроводимости

$$\lambda_i = \frac{hc}{E_i}, \quad (1)$$

где E_i – энергии ионизации примеси.

При этом, реализуется механизм прыжковой проводимости при переходе между уровнями E_1 и E_2 . Однако в отличие от действительно прыжковой проводимости в случае простых центров разных типов [5], для многозарядной примеси длина прыжка равна нулю, так как оба уровня формируются одним тем же атомом, и значение проводимости при таком переходе сравнимо с проводимостью при переходе из валентной зоны

на уровни E_1 или E_2 . И длинноволновая граница спектральной чувствительности при реализации «прыжковой» проводимости для многозарядной примеси

$$\lambda_{12} = \frac{hc}{E_2 - E_1}, \quad (2)$$

и, т. к. разница энергий между уровнями ($E_2 - E_1$) часто меньше разности между этими уровнями и краем валентной зоны, то и значение λ_{12} часто оказывается существенно больше λ_1 и λ_2 [3, 5].

Для таких полупроводников, как германий и кремний, существует достаточно большой набор примесей, формирующих многозарядные центры [6], и в фоторезистивных структурах на их основе реализуется переключение между спектральными характеристиками чувствительности в ближнем и среднем ИК-диапазоне с переключением между положением «красной» границы чувствительности (1, 2) до 8 мкм [3]. Например, в табл. 1 представлены энергии ионизации некоторых примесей в Ge и Si, а также соответствующие значения длинноволновой границы [6–7].

Таблица 1. Энергия ионизации E_i и длинноволновая граница примесной фотопроводимости λ в Ge и Si

Полупроводник: примесь	E_i , эВ	λ , мкм
Ge:Au	0,15	8,3
Ge:Hg	0,09	14
Ge:Cd	0,06	21
Ge:Cu	0,041	30
Si:In	0,155	8
Si:Ga	0,0723	17
Si:P	0,045	28
Si:As	0,0537	23

Применение фотоприемников на основе полупроводников с глубокими многозарядными примесями позволяет реализовать управление видом спектральной характеристики чувствительности преобразователя.

Выбор материала полупроводника, типа глубокой примеси и ее концентрации позволяют создавать фотоприемники для заданного спектрального диапазона.

Литература

1. Филачев А. М. Фотоприемники в оптико-электронных приборах и системах / А. М. Филачев, И. И. Таубкин, М. А. Трищенко – М. : Физматкнига, 2016. – 104 с.
2. Методология и средства измерений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев, [и др.] ; под общ. ред. О. К. Гусева. – Минск : БНТУ, 2010. – 582 с.
3. Controlling the characteristics of photovoltaic cells based on their own semiconductors / R. Vorobey [et al.] // Przegląd Elektrotechniczny. – 2015. – № 8. – P. 81–85.
4. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R. I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

5. Поклонский, Н. А. Ионизационное равновесие и прыжковая электропроводность в легированных полупроводниках / Н. А. Поклонский. – Минск : БГУ, 2004. – 195 с.

6. Lauwaert, J. Majority carrier capture rates for transition metal impurities in germanium / J. Lauwaert, P.

Clauws // Thin solid films, 2010. – Vol. 518, № 9. – P. 2330–2333.

7. Никитина, А.Г., Зуев, В.В.. Бистабильные амфотерные центры в полупроводнике // Физика и техника полупроводников, 2008, т. 42, вып. 2, – С. 141–146.

УДК 621.382.33

СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТТЕРИРУЮЩЕГО СКРЫТОГО СЛОЯ Воробей Р.И.¹, Гусев О.К.¹, Тявловский К.Л.¹, Шадурская Л.И.¹, Пилипенко В.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен способ формирования геттерирующего слоя в составе транзисторной структуры интегральной схемы. Для введения вольфрама в качестве геттерирующей примеси предлагается использовать метод газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда или интенсификацию процесса методом лазерного распыления материала мишени.

Ключевые слова: биполярный транзистор, эпитаксия, скрытый слой, геттерирование, легирование.

METHOD OF FORMATION OF THE GETTERING LATENT LAYER

Vorobey R.¹, Gusev O.¹, Tyavlovsky K.¹, Shadurskaya L.¹, Pilipenko V.²

¹Belarusian National Technical University

²JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company

Minsk, Belarus

Abstract. The method of formation of a gettering layer as a part of transistor structure of the integrated circuit is considered. For introduction of tungsten as a gettering impurity it is offered to use a method of gas-discharge alloying in a mode of decaying discharge or an intensification of process by a method of a laser pulverization of a material of a target.

Key words: bipolar transistor, the epitaxy, the latent layer, gettering, alloying.

Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by

Наряду с интегральными схемами, созданными по передовым технологиям с технологическими нормами менее 10 нм, востребованы и электронная промышленностью производятся и приборы с использованием «традиционной» технологии (<https://integral.by/ru/products/>) с проектными нормами до 10 мкм. Для изготовления интегральных схем малой и средней степени интеграции хорошо освоенным и наиболее употребительным является планарно-эпитаксиальный процесс [1, 2].

Основным схемным элементом биполярных ИС является биполярный n - p - n транзистор. Упрощенная классическая планарная структура биполярного n^+ - p - n транзистора интегральной схемы со скрытым подколлекторным слоем приведена на рис. 1.

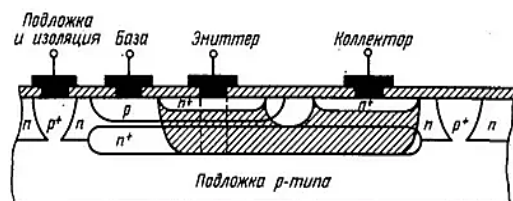


Рисунок 1 – Структура биполярного транзистора

Так как вывод коллектора интегрального транзистора расположен на поверхности прибора (рис. 1), то это приводит к увеличению сопротивления тела коллектора и, как следствие, к ухудшению частотных и переключательных характеристик транзистора [1]. Увеличение степени легирования всего объема коллекторной области снижает ее удельное сопротивление, но одновременно приводит к уменьшению напряжения пробоя перехода коллектор – база и увеличению емкости этого перехода. Компромиссным решением проблемы является создание скрытого высоколегированного n^+ -слоя на границе коллектора и подложки [1, 2]. Этот слой обеспечивает низкоомный путь току (заштриховано на рис. 1) от активной коллекторной зоны к коллекторному контакту без снижения пробивного напряжения перехода коллектор – база. Происходит уменьшение сопротивления тела коллектора в несколько, до десяти, раз. Скрытый слой также уменьшает коэффициент передачи дырок в подложку, так как инжектированные слоем базы дырки рекомбинируют с электронами n^+ скрытого слоя и ток замыкается по цепи база-коллектор.

Вследствие того, что скрытый слой формируется на подложке перед нанесением эпитаксиального n -слоя, то n^+ скрытый слой выполняет

также функции геттера для дефектов эпитаксиального слоя, в котором формируются активные области транзистора. Таким образом, параметры скрытого слоя оказывают существенное влияние на параметры готовых транзисторных структур.

Для формирования эпитаксиальных слоев используются различные технологии [2, 3]. Одним из перспективных технологических процессов является применение способа локальной эпитаксии. В этом случае эпитаксиальные слои формируются только на заданной части поверхности пластины.

Введение в состав эпитаксиального n -Si слоя примеси вольфрама на начальной стадии выращивания эпитаксиального слоя придает ему геттерирующие свойства. В процессе геттерирования происходит связывание подвижных, нежелательных примесей и дефектов в нейтральные ассоциации. При этом время жизни неравновесных носителей заряда в слое увеличивается до 5 раз [4, 5]. Однако традиционно используемый при эпитаксии кремния газофазный метод легирования не позволяет вводить тугоплавкие элементы в состав растущего эпитаксиального слоя.

Для улучшения свойств эпитаксиального слоя со скрытым n^+ карманом предлагается наращивать эпитаксиальный слой n -Si, легированный в начале процедуры эпитаксиального наращивания W (рис. 2), используя метод газоразрядного легирования в режиме тлеющего разряда [3–5]. Аналогично для геттерирования может быть использован и лазерный метод, когда материал мишени с примесью испаряется лазерным лучом. Концентрацию примеси в эпитаксиальном слое можно изменять, регулируя параметры тлеющего газового разряда или интенсивность лазерного излучения.

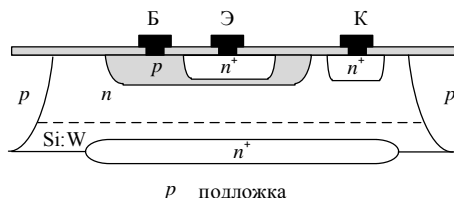


Рисунок 2 – Структура биполярного транзистора с геттерирующим слоем

Толщина слоя, легированного W , выбирается сравнимой с толщиной переходного слоя подложка – эпитаксиальный слой, и определяется временем интенсификации процесса [5] при подаче высокого напряжения на W -мишень (газоразрядное легирование в тлеющем разряде) или лазерного облучения мишени на начальной стадии выращивания эпитаксиального слоя. После этого эпитаксиальный слой доращивается традиционным методом.

Геттерирующее действие дополнительного $Si:W$ слоя совместно со скрытым слоем на гра-

нице раздела подложка-эпитаксиальный слой значительно увеличивается. А так как легирование промежуточного слоя вольфрамом (или другим тугоплавким металлом) проводится во время эпитаксиального наращивания, то длительность технологического цикла и его трудоемкость не увеличиваются.

Также технология контролируемого введения примеси тугоплавких металлов, металлов платиновой группы, редкоземельных металлов, формирующих глубокие примесные центры в эпитаксиальных слоях позволяет производить приборные структуры фотоэлектрических преобразователей [5, 6]. Такие преобразователи [6] могут использоваться в измерительных преобразователях систем оптической диагностики с расширенными функциональными возможностями и увеличенными диапазонами преобразовательных характеристик.

Кроме того такой способ формирования легированных эпитаксиальных слоев может применяться в технологии изготовления приборных структур с гетеропереходами, в некремниевых технологиях, или при изготовлении структур полупроводник, в том числе разнородные материалы, на изоляторе, например, совмещенные в различных комбинациях кремний, германий, A_3B_5 на сапфире.

Во всех случаях применения эта технология позволяет формировать эпитаксиальные слои с неограниченным перечнем легирующих примесей в широком диапазоне концентраций. Отметим также, что контроль концентрации примеси достигается удобными методами: изменением напряжения и тока газового разряда, интенсивностью лазерного излучения (изменением скважности лазерных импульсов).

Литература

1. Ткаченко, Ф. А. Электронные приборы и устройства / Ф. А. Ткаченко. – М. : Инфра-М, 2018. – 156 с.
2. Емельянов, В. А. Эпитаксиальные слои кремния и германия для интегральных микросхем / В. А. Емельянов, А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко. – Минск : Интегралполиграф, 2008. – 288 с.
3. Интенсификация процессов формирования твердотельных структур концентрированными потоками энергии / под общ. ред. А. П. Достанко и Н. К. Толочко. – Минск : Бестпринт, 2005. – 682 с.
4. Методы и механизмы геттерирования кремниевых структур в производстве интегральных микросхем / В. А. Пилипенко [и др.] // Технология и конструирование в производстве интегральных схем. – 2013. – № 2–3. – С. 43–57.
5. Геттерирование эпитаксиальных структур редкоземельными элементами. / Р.И. Воробей [и др.] // Приборостроение–2017 : материалы 10 международной науч.-техн. конф. – Мн. : БНТУ, 2017. – С. 73–74.
6. Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity / R.I. Vorobey [et al.] // Devices and Method of Measurements. – 2021. – № 2. – P. 108–116.

УДК 629.7.08

МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО PORTABLE DATA LOADER (PDL)

Воронин В.В.¹, Зотин Н.А.²

¹ФГАОУВО «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Санкт-Петербург, Российская Федерация

²ФГАОУВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Самара, Российская Федерация

Аннотация. Семейство самолетов Airbus A320 является наряду с линейкой Boeing 737 одним из самых популярных решений на рынке узкофюзеляжной авиационной техники. Философия fly-by-wire поместила на борт множество компьютеров, управляющих полетом. Их программное обеспечение должно поддерживаться в актуальном состоянии, однако, несмотря на широкое распространение твердотельных накопителей и беспроводных технологий, процесс обновления ПО на A320 остался на уровне 2000-х. В данной статье рассматривается текущий алгоритм процесса обновления и выдвигаются требования по его модернизации.

Ключевые слова: эксплуатация, авиационная техника, узкофюзеляжный самолёт, поддержание лётной годности.

MODERNIZATION OF UNIVERSAL PORTABLE DATA LOADER (PDL)

Voronin V.¹, Zotin N.²

¹ITMO University

Saint-Petersburg, Russia

²Samara National Research University

Samara, Russia

Abstract. The Airbus A320 family, along with the Boeing 737 range, is one of the most popular solutions in the narrow-body aircraft market. Stable demand on the market for many decades now speaks of a stable and efficient system of production, marketing, engineering support and after-sales service of Airbus aircraft. At the same time, the aircraft of this family are also good from the point of view of maintenance: ease of access, clearly spelled out maintenance process, etc. Despite this, the aircraft of the A320 family still have some.

Key words: maintenance, aviation, narrow airplane, maintaining airworthiness.

Адрес для переписки: Воронин В.В., пр. Новоизмайловский, 16, к. 10, 196128, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: vvoronin@niuitmo.ru

Введение. Множество бортовых компьютеров имеют собственные прошивки, а некоторым из них для нормального функционирования требуется периодическое обновление баз данных.

Примерами обновляемых данных может служить нижеследующее:

– *навигационные базы данных для FMGC.* Содержат в себе координаты пунктов поворота маршрута (ППМ/waypoints), ключевых точки аэропорта (navaids, данные ВПП), на всех маршрутах, которые предполагаются для полётов данного борта. Объём памяти компьютера системы управления полётом (FMGC) ограничен 15 Мб, что хватает примерно на 4–5 маршрутов типа «Москва-Самара». Данные базы данных должны обновляться каждые 28 дней. Допускаются полёты с просроченной базой данных не более 10 дней. В дальнейшем, самолёт становится невыелетным;

– *базы данных системы GPWS.* Содержат в себе координаты возвышений рельефа

Помимо навигационных баз данных, нижеследующие блоки требуют прошивки:

– Centralized fault display interface unit (CFDIU);
– ATSU (обновления прошивки, базы данных);
– Elevator and Aileron Computer (ELAC) (прошивка); TCAS (алгоритмы развода самолётов,

реконфигурация портов ввода-вывода компьютера TCAS);

– Flight Data Interface Management Unit (FDIMU) (прошивки для блоков DFDRS и AIDS);

– Display management computer (DMC) («драйверы видеокарты»);

– Bleed-Air Monitoring Computers (BMC) (алгоритмы управления пневматической системой).

Обновление баз данных имеет своей целью, внесение изменений произошедших за время с момента предыдущего обновления и помогает бортовым компьютерам обеспечить безопасное выполнение полёта.

MDDU. Внутри MDDU (см. рис. 1, 2) расположено:

– плата питания (Power supply board);

– плата ввода-вывод (I/O board);

– CPU/FDDC board. Плата разделена на две части: Central processing unit и Floppy disk drive control;

– материнская плата.

Процедура обновления начинается с того, что оператор вставляет дискету в привод MDDU. После чего при помощи Data Loader Selector выбирает целевой компьютер. Сигнал от DLS поступает в DLRB, которая отправляет дискретный

сигнал начала процедуры обновления в целевой компьютер, переводя его тем самым в режим обновления.

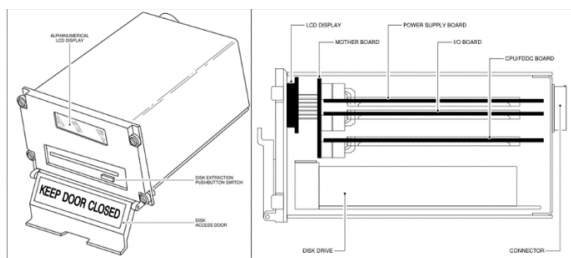


Рисунок 1 — Внешний вид MDDU

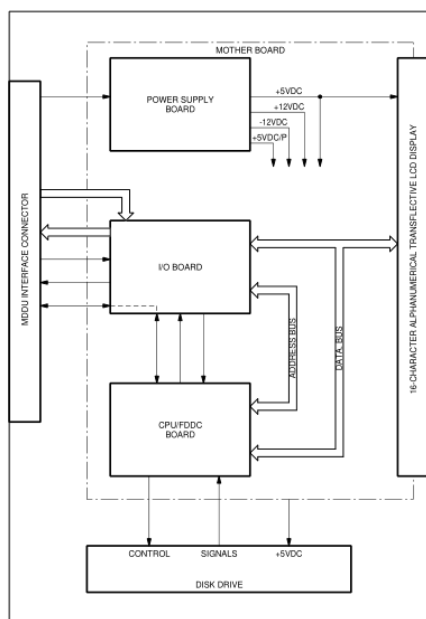


Рисунок 2 — Структурная схема MDDU

MDDU анализирует установленную дискету и пытается найти файл конфигурации:

– *дискета не форматирована и отсутствует файл конфигурации.* MDDU форматирует диск и запускает процедуру загрузки.

– *дискета форматирована и имеется файл конфигурации.* MDDU выполняет поиск файлов указанных в файле конфигурации. При наличии файла на накопителе запускается процедура обновления выбранного оператором соответствующего компьютера. При отсутствии запускается процедура записи, при которой вставленный накопитель форматируется и на него записываются файлы прошивки выбранного оператором

компьютера. Накопитель становится своего рода «загрузочной флешкой» и помещается на хранение в специальный отсек в кабине пилотов для целей последующего ТО. Данный вариант не сильно распространен на практике, разве что для целей резервного копирования, но и это редкость.

Из вышеприведенных данных о конструкции и протекающих при обновлении процессах, можно установить следующие недостатки существующих систем:

– использование в качестве носителя баз данных серии дискет влечет к следующему. Низкая скорость чтения/записи: навигационная база данных FMGC 13 дискет (каждая дискета ~10 минут). Общее время обновления ~2 часа. При возникновении сбоя одной из серии дискет процесс начинается с нуля;

– в случае с PDL необходимо использование кабелей подключения – дополнительного оборудования, которое не является обязательным с использованием MDDU.

Заключение. На основе анализа недостатков существующих решений предлагается разработать модуль который:

– интегрирован по аналогии с MDDU в центральный пьедестал кабины пилотов. Размеры предполагается взять с уже существующего блока MDDU;

– использует в качестве носителя данных твердотельные накопители и имеет соответствующий интерфейс для работы с ним;

– рассмотреть вариант применения беспроводных интерфейсов, например, Wi-Fi, для загрузки баз данных «по воздуху».

Предполагается разместить твердотельный накопитель внутри блока для хранения прошивок локально. Достаточный объем – 1 Гб.

Литература

1. Aircraft Maintenance Manual Rev#66 Nov 01/2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.airbus.com>. – Дата доступа: 05.09.2021.
2. Aircraft Wiring Manual Rev#66 Nov 01/2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.airbus.com>. – Дата доступа: 05.09.2021.
3. Aircraft Schematic Manual Rev#66 Nov 01/2019 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://w3.airbus.com>. – Дата доступа: 05.09.2021.
4. Byra Reddy, G. ARINC 615A and 665-3 based Data Loader for Aircrafts / G. Byra Reddy, K. Ashwani // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2016. – Vol. 37, № 5. – P. 260–264.

УДК 628.74

ДЫМОУДАЛЕНИЕ В ЗАКРЫТЫХ ГАРАЖАХ-СТОЯНКАХ Галузо В.Е., Калита Е.В., Мельничук В.В., Пинаев А.И.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен подход к проектированию противодымной вентиляции пристроенных подземных гаражей-стоянок. Приведен расчет параметров системы.

Ключевые слова: противодымная вентиляция, закрытые гаражи-стоянки, проектирование.

SMOKE EXHAUST IN CLOSED PARKING GARAGE

Haluzo V., Kalita E., Melnichuk V., Pinaev A.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. An approach to the design of smoke control ventilation of attached underground parking garages is considered. The calculation of the parameters of the system is presented.

Key words: smoke ventilation, closed parking garages, design.

*Адрес для переписки: Галузо В.Е., ул.П.Бровки,6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: valga51@yandex.ru*

Согласно [1] в гаражах-стоянках закрытого типа следует предусматривать для удаления продуктов горения системы вытяжной противодымной вентиляции. Удаление дыма в многоэтажных гаражах-стоянках закрытого типа предусматривается, как правило, через дымовые шахты с искусственным побуждением тяги. При сработке системы пожарной сигнализации в многоэтажных гаражах-стоянках въезды в них перекрываются противопожарными дверями, чтобы предотвратить распространения пожара на другие этажи.

Согласно [2] пути считают эвакуационными, если они ведут из помещений любого надземного, подвального или цокольного этажа непосредственно наружу, коридор или лестничную клетку. При работе системы противодымной вентиляции перепад давления на закрытых дверях эвакуационных выходов не должен превышать 150 Па [1]. Это требование касается и путей эвакуации из гаражей-стоянок. Однако, при проведении аэродинамических испытаний систем противодымной вентиляции часто выясняется, что это требование не обеспечивается, что существенно усложняет эвакуацию, делая ее иногда практически невозможной.

Согласно [1] при проектировании приточно-вытяжной противодымной вентиляции в гаражах-стоянках, следует учитывать, что двери эвакуационных выходов открыты с этажа пожара до наружных выходов, что необходимо для обеспечения циркуляции воздуха через клапаны дымоудаления. Но при сработке системы пожарной сигнализации и запуске противодымной вентиляции эти двери сами не открываются, их комуто надо открыть и держать открытыми, что не всегда удается из-за большого перепада давления на этих дверях.

Очевидно, что при отсутствии притока свежего воздуха в объем замкнутого пространства га-

ража-стоянки, горение через некоторое время прекратится при том, что в это же время будет происходить водяное тушение. Водяное тушение как обязательный атрибут системы пожарной безопасности гаражей-стоянок [3] призвано предотвратить распространение пожара от его очага. При тушении из-за большой теплоемкости воды температура пара и дыма в очаге пожара не превышает 110 °С [4].

В то же время, при эвакуации из помещения хранения автомобилей закрытых надземных и подземных гаражей-стоянок через выходы, соединяющиеся лестничными клетками с пристроенными частями здания, эти лестничные клетки следует делать незадымляемыми [1], выгораживая перед входами в них тамбур-шлюзы. В эти тамбур-шлюзы обеспечивается принудительный приток наружного воздуха.

Применение таких тамбур-шлюзов на путях эвакуации неэффективно без систем дымоудаления, которые совместно с системой приточной вентиляции должны обеспечить движение воздуха через открытый дверной проем из тамбур-шлюза в помещение гаражей-стоянок со скоростью v не менее 1,3 м/с [1] не пуская дым в лестничную клетку. А это означает, что расход воздуха через клапан дымоудаления должен соответствовать расходу воздуха, подаваемого в тамбур-шлюз.

Приток в пространство гаража-стоянки относительно холодного (не более 30 °С) наружного воздуха, который будет смешиваться с смесью пара и дыма, также будет способствовать снижению ее температуры.

В помещениях гаражей-стоянок должно быть не менее двух эвакуационных выходов [2]. А значит таких тамбур-шлюзов также может быть два. Объемный расход воздуха, подаваемого в тамбур-шлюз, может быть рассчитан по

формуле $L = v \cdot H \cdot W \cdot 3600$ м³/ч, где: H и W – размеры дверного проема.

При стандартных размерах дверного полотна 0,9х2,0 м расход $L = 8500$ м³/ч. В случае двух тамбур-шлюзов $L = 17000$ м³/ч. В тоже время, согласно [1] максимальный весовой расход дыма, удаляемого системой дымоудаления из помещения гаража-стоянки составляет $G = 23000$ кг/ч. При плотности смеси газа и дыма (соответствующей ранее указанной температуре 110 °С) равной 0,92 кг/м³ объемный расход удаляемого из помещения гаража-стоянки дыма составит $L = 25000$ м³/ч. Подсос воздуха через неплотности по краям двух кабин лифтов и двух закрытых въездных ворот согласно [1] составит $L = 6000$ м³/ч. Из чего следует, что через две открытые двери тамбур-шлюзов система дымоудаления будет «протягивать» $L = 25000 - 6000 = 19000$ м³/ч, что обеспечит незадымляемость тамбур-шлюзов. Практика показывает, что при таких значениях объемного расхода удаляемого из гаража-стоянки дыма перепад давления на закрытых дверях путей эвакуации не превышает нормируемое значение 150 Па.

Чтобы циркуляция воздуха через открытую дверь тамбур-шлюза не способствовала горению, клапан дымоудаления следует располагать в непосредственной близости к тамбур-шлюзу. В тоже время, в случае эвакуации из помещения гаража-стоянки непосредственно наружу дымоудаление не нужно, а его применение небезопасно.

В этом случае дымоудаление из помещения гаража-стоянки необходимо не для обеспечения

эвакуации, а для последующей работы пожарных расчетов и запускаться оно может не автоматически, а вручную, как это делается для удаления огнетушащего вещества после газового тушения.

При проведении аэродинамических испытаний системы приточно-вытяжной противодымной вентиляции помещений гаражей-стоянок, зачастую имеют место проблемы, связанные с превышением допустимого значения перепада давления на закрытых дверях путей эвакуации. Предлагается проектировать систему противодымной вентиляции исходя из условия обеспечения незадымляемости лестничных клеток. Приведен расчет параметров системы. Предлагается не применять систему приточно-вытяжной противодымной вентиляции помещений гаражей-стоянок, для целей эвакуации в том случае, если выходы из помещений гаражей-стоянок ведут непосредственно наружу.

Литература

1. Противодымная защита зданий и сооружений при пожаре. Системы вентиляции : СН 2.02.07-2020. Строительные нормы Республики Беларусь.
2. Пожарная безопасность зданий и сооружений : СН 2.02.05-2020. Строительные нормы Республики Беларусь.
3. Пожарная автоматика зданий и сооружений : СН 2.02.03-2019. Строительные нормы Республики Беларусь.
4. Эффективность электронных систем пожарной безопасности в зоне горения автомобилей для подземных гаражей-стоянок жилых зданий / Хорошко В.В. [и др.] // Доклады БГУИР. – 2020. – Т. 18, № 7.

УДК 004.056

ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА БЕЗОПАСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Глинская Е.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Рассмотрены основные техническими характеристиками качества транспортных услуг защищенной сети, а именно – производительность (быстродействие), надежность, стоимость.

Ключевые слова: телекоммуникационная сеть нового поколения, производительность, быстродействие, надежность, эталонная модель.

QUALITY INDICATORS OF SECURE TELECOMMUNICATION NETWORKS OF THE NEXT GENERATION

Glinskaya E.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. The main technical characteristics of the quality of transport services of a protected network are considered, namely, performance (speed), reliability, price.

Key words: new generation telecommunication network, performance, speed, reliability, reference model, optimal price.

*Адрес для переписки: Глинская Е.В., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: Glinskaya@bmtu.ru*

В настоящее время во всем мире решаются проблемы создания глобального информационного общества. В России принята федеральная программа, предусматривающая широкое внедрение информационных технологий в рамках государственных проектов, что является необходимым условием реализации национальной стратегии перехода к ускоренному экономическому развитию и решению ряда социальных задач. Реализация программы требует организации и поддержания эффективного информационного взаимодействия территориально распределенных средств и структур.

Со стороны потребителей к информационному обмену предъявляется ряд требований, основными из которых являются [5, 11]:

- обеспечение передачи заданного объема информации;
- доставка сообщений по заданному адресу;
- своевременность доставки сообщений;
- обеспечение заданной достоверности доставки информации;
- сохранение конфиденциальности информации;
- технико-экономическая эффективность;
- соблюдение установленной дисциплины обслуживания абонентов.

В настоящее время разнообразие способов реализации ТКС обуславливает актуальность задач как выбора их архитектуры и технологии построения с одной стороны, так и оценки их эффективности как меры (степени) соответствия предъявляемым требованиям – с другой.

Для объективной оценки качества сервисов, предоставляемых сетью, пользователи и поставщики услуг используются характеристики качества сетевых услуг, позволяющие оценить тот или иной аспект качества. Все множество технических характеристик качества транспортных услуг сети, как правило, относят к одной из следующих групп:

- производительность (быстродействие);
- надежность;
- безопасность.

Вместе с тем важнейшими показателями эффективности ТКС являются технико-экономические показатели.

Анализ показывает, что все показатели являются взаимосвязанными.

Среди технологий реализации ТКС в настоящее время лидирует MPLS. Изначально задумывавшаяся как средство для упрощения сопряжения сетей IP и ATM, а также для снижения нагрузки на маршрутизаторы, MPLS достигла высокой популярности, благодаря реализованным на ее основе приложениям, таким как инжиниринг трафика TE (Traffic Engineering), виртуальные частные сети (VPN), Fast ReRoute (FRR),

обеспечение качества обслуживания QoS (Quality of Service). Более того, именно реализация QoS, возможности MPLS VPN и TE вывели ее на лидирующие позиции.

MPLS-сети обеспечивают поддержку видео- и аудио-коммуникаций в режиме прямой трансляции между произвольно удаленными абонентами сети. Технологию MPLS в VPN отличает хорошая масштабируемость и естественная интеграция с сервисами протокола IP. Коммутация MPLS является усовершенствованным методом передачи трафика по сети с использованием информации, содержащейся в метках, присоединяемых к IP-пакетам. В случае использования технологий основанных на передаче фреймов, метки внедряются между заголовками третьего и второго уровней. В случае применения технологий, основанных на передаче ячеек (ATM), метки содержатся в полях идентификатора виртуального маршрута и идентификатора виртуального канала.

Одним из основных методов исследования ТКС на основе MPLS-технологии является метод аналитического моделирования, который сводится к построению аналитической модели, отражающей физические свойства исследуемой сети в виде математических объектов и отношений между ними.

В основу управления такой сетью положена эталонная модель взаимодействия открытых систем (ЭМОС). Согласно этой модели все управление разбивается на 7 уровней управления: физический, канальный, сетевой, транспортный, сеансовый, представления данных и прикладной.

Для анализа процесса функционирования MPLS-сети задают следующие группы исходных параметров: технические, структурные, нагрузочные и стоимостные.

К техническим параметрам $\{T\}$ относятся: длина такта – h , скорость распространения сигнала по каналам связи – v .

Структурными параметрами $\{S\}$ MPLS-сети являются:

- число абонентных станций и узлов сети, топология;
- множество рассматриваемых методов доступа – R ;
- интенсивности отказов узлов сети и абонентских станций (АС) и каналов связи (КС);
- интенсивности восстановления АС и КС;
- показатели живучести;
- число приоритетов сообщений;
- число дополнительных шин для передачи сообщений;
- емкости выходных и входных буферных накопителей каждой АС.

К нагрузочным параметрам $\{H\}$ относятся закон поступления (интенсивности) сообщений в

АС, функции распределения длины передаваемых сообщений и функции распределения вероятностей, относящиеся к используемым методам доступа.

Стоимостными параметрами $\{C\}$ являются стоимость АС – $C_{АС}$, стоимость КС – $C_{КС}$, стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации метода доступа – $C_{дос.}$, стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для реализации системы приоритетов – $C_{сис.пр.}$, стоимость аппаратных и программных средств, необходимых для передачи сообщений по дополнительным шинам – $C_{доп. шины}$.

MPLS-сеть является сложной системой, функционирующей в условиях воздействия различных случайных факторов. Для нее характерно наличие большого числа взаимосвязанных элементов, сложность структуры и выполняемых функций. Для объективной оценки качества сервисов, предоставляемых сетью, пользователи и поставщики услуг используются формализованные характеристики качества сетевых услуг, позволяющие оценить тот или иной аспект качества.

Все множество технических характеристик качества транспортных услуг сети как правило относят к одной из следующих групп:

- производительность;
- надежность.

В качестве показателей надежности и быстродействия MPLS-сети принимаются:

- вероятность успешной передачи информации по каналам (каналу) связи E ;
- пропускную способность каналов (канала) связи Π ;
- среднее время доставки сообщений $T_{дос.}$;
- среднее время доставки сообщений i -того приоритета $T_{дос.}^i$, где $i = 1, m$, где m – число приоритетов.

Пропускная способность каналов (канала) связи связана с вероятностью успешной передачи информации по каналам (каналу) связи следующим соотношением:

$$\Pi = jEb, \quad (1)$$

где j – число каналов связи,

$$b = 1 / M(L), \quad (2)$$

где L – длина сообщений.

Нетрудно показать, что среднее время доставки сообщений зависит от пропускной способности каналов (канала) связи следующим образом:

$$T_{дос} = (1 - P_0) / \Pi, \quad (3)$$

где P_0 – вероятность события, заключающегося в отсутствии сообщений в ЛВС.

Таким образом, среднее время доставки сообщений зависит от вероятности успешной передачи информации по каналам (каналу) связи (E) и пропускной способности каналов (канала) связи. В качестве обобщенного показателя, характеризующего эффективность сети целесообразно взять произведение основных показателей эффективности, т.к. пользователи ЛВС заинтересованы в их минимальных значениях, а показатели надежности и быстродействия являются взаимосвязанными.

Литература

1. Спотак, М. «Компьютерные сети и сетевые технологии» / М. Спотак. – Киев: ООО «ТИД ДС», 2012. – 650 с.
2. Романов, А. И. «Основы теории телекоммуникационных сетей» / А. И. Романов. – Киев, 2014. – 152 с.
3. Башлы П. Н. Современные сетевые технологии / П. Н. Башлы. – М. Горячая линия – Телеком, 2016. – 334 с.
4. Олифер, В. Г. «Компьютерные сети» / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – С.-Петербург, 2020. – 958 с.

УДК 539.1.074.3

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.

Университет гражданской защиты МЧС Беларуси
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведен анализ методов измерения и конструкций датчиков поглощенной дозы ионизирующего излучения на основе оптических волноводных структур. Рассмотрены различные физические эффекты, лежащие в основе методов. Показано, что с точки зрения чувствительности перспективными являются датчики на основе микрокольцевых резонаторов на базе кремниевых волноводов, покрытых этилен-пропиленовым полимером.

Ключевые слова: оптический волновод, ионизирующее излучение, доза излучения, сцинтиллятор.

APPLICATION OF OPTICAL WAVEGUIDE STRUCTURES FOR MEASUREMENT OF ABSORBED DOSE OF IONIZING RADIATION

Goncharenko I., Il'yushonok A., Reabtsev V.

University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The measurement methods and structures of the sensor of absorbed dose of ionizing radiation on the base of optical waveguide structures are analysed. The physical effects underlying the methods are considered. It's shown that the sensors comprising microring resonators on the base of silicon waveguides coated with ethylene propylene polymer are the most prospective due to the higher sensitivity.

Key words: optical waveguide, ionizing radiation, radiation dose, scintillator.

Адрес для переписки: Рябцев В.Н., ул. Машиностроителей, 25, г. Минск 220118, Республика Беларусь
e-mail: v.reabtsev@ucp.by

Измерения доз ионизирующего излучения находят широкое применение в атомной энергетике (контроль обстановки в реакторном зале атомных электростанций, в технологических каналах ядерных реакторов), радиационной безопасности (контроль радиационной обстановки), медицине (при радиотерапии онкологических больных, рентгеноскопическом обследовании), в радиологических исследованиях. При этом дозиметры на основе оптических волноводных структур имеют ряд существенных преимуществ перед традиционными устройствами. Они обладают высокой надежностью поскольку устойчивы к электромагнитным, химическим и механическим воздействиям, а также малым весом и поперечными размерами. Для работы оптических волноводных дозиметров не требуется электрического питания чувствительного элемента, поэтому полностью устраняется возможность искрения и возгорания. Такие дозиметры позволяют проводить измерения в режиме реального времени, при этом оператор может находиться на значительном удалении от контролируемого объекта.

К настоящему времени предложен ряд дозиметров с использованием сцинтилляционных материалов, закрепленных на торце оптического волокна. Сцинтилляционный материал подвергается воздействию ионизирующего излучения, в результате чего возникает оптический сигнал люминесценции. Оптический сигнал передается по волокну на приемное устройство, расположенное удаленно от зоны воздействия радиации. Основным недостатком таких устройств являются дополнительные потери оптического излучения при вводе в волокно. Для повышения эффективности оптического соединения сцинтилляционного материала с волокном используются специальные устройства.

В работе [1] в качестве сцинтилляционного материала использован легированный тербием оксисульфид гадолия ($Gd_2O_2S:Tb$), излучающий под воздействием ионизирующего излучения на длине волны 545 нм. Мощность дозы падающего на сцинтилляционный материал ионизирующего излучения анализируется на основе

интенсивности оптического сигнала поступающего через волокно на многопиксельный счетчик фотонов. Для увеличения отношения сигнал/шум сцинтилляционный материал расположен в отверстии в торце волокна.

На похожем принципе основывается дозиметр, описанный в работе [2]. В качестве материала сцинтиллятора также использован оксисульфид гадолия, но легированный эрбием ($Gd_2O_2S:Eu$), излучающий на длине волны порядка 625 нм. Контроль поглощенной дозы осуществляется с помощью однопиксельного счетчика фотонов. Для уменьшения потерь на рассеяние оптического излучения между волокном и сцинтиллятором авторы предложили использовать специальный наконечник, работающий по принципу оптической антенны вытекающих волн.

В работе [3] в качестве материала сцинтиллятора использован кристалл иттрий-алюминиевого граната легированный одновременно церием и тербием ($Ce/Tb:YAG$). Сцинтиллятор связан с передающим волокном через конусообразный отрезок волокна. Использование двух легирующих материалов позволяет достичь высокой эффективности радиолуминесценции. Оптическое излучение фиксируется однофотонной детектирующей системой, состоящей из фотоумножителя и счетчика фотонов.

Высокой эффективностью обладают волоконно-оптические дозиметры, где в качестве чувствительного элемента используется одно или несколько сцинтилляционных волокон, легированных соответствующими примесями, соединенных с фотоприемным устройством транспортным оптическим волокном [4]. При этом сцинтилляционные волокна могут быть распределены в трехмерном пространстве и их продольные оси могут быть сориентированы в разных направлениях относительно оси падающего излучения.

В работе [5] описана конструкция волоконно-оптического дозиметра на основе волокна, легированного элементами, которые под действием ионизирующего излучения образуют долгоживущие центры окраски. Это приводит к ослаблению оптического сигнала в радиационно-чувст-

вительном волокне. Величина ослабления пропорциональна поглощенной дозе. В устройство входит оптический рефлектометр, который строит распределение величины затухания оптического сигнала вдоль радиационно-чувствительного волокна, что позволяет определить пространственное распределение дозы ионизирующего излучения.

В работах [6–9] исследуется влияние ионизирующего излучения на оптические свойства волноводов. В работе [6] рассмотрено воздействие ионизирующего излучения на наборный оптический волновод на основе кремния с подложкой из двуокиси кремния. Вблизи и на границе раздела волновод / подложка под воздействием ионизирующего излучения накапливаются свободные носители заряда, что сопровождается генерацией свободных состояний. В результате увеличиваются потери оптического сигнала в волноводе.

В работах [7–9] показано, что под воздействием ионизирующего излучения увеличивается показатель преломления материала волновода в составе микрокольцевого резонатора. Это приводит к смещению резонансной длины волны резонатора пропорционально поглощенной дозе. Наибольшее смещение достигается в резонаторах на основе кремниевых волноводов с покрытием из этилен-пропиленового полимера. Данный эффект может быть использован в качестве основы для волноводных оптических дозиметров с высокой чувствительностью.

Литература

1. Embedded structure fiber-optic radiation dosimeter for radiotherapy applications / Q. Zhuang [et al.] // Optics Express. – 2016. – Vol. 24, № 5. – P. 5172–5185.
2. Miniaturized fiber dosimeter of medical ionizing radiations on a narrow optical fiber / M.A. Suarez [et al.] // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, № 24. – P. 35588–35599.
3. Tapered fiber radiation sensor based on Ce/Tb:YAG crystals for remote γ -ray dosimetry / M. Jia [et al.] // Optics Express. – 2021. – Vol. 29, № 2. – P. 1210–1220.
4. Новиков, С. Г. Оптоволоконная дозиметрическая система на базе сцинтилляционного оптического волокна / С. Г. Новиков, А. А. Черторийский, А. В. Беринцев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т. 15, № 4. – С. 1017–1023.
5. Томашук, А. Л. Волоконно-оптические дозиметры / А. Л. Томашук // Фотон-Экспресс. – 2005. – № 7. – С. 53–55.
6. Boynton, N. Gamma radiation effects on passive silicon photonic waveguides using phase sensitive methods / N. Boynton [et al.] // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, № 23. – P. 35192–35201.
7. Total ionizing dose effects on silicon ring resonators / S. Bhandaru [et al.] // IEEE Transactions on nuclear science. – 2015. – Vol. 62, № 1. – P. 323–328.
8. Gamma radiation effects on silicon photonic waveguides / S. Grillanda [et al.] // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41, № 13. – P. 3053–3056.
9. Gamma radiation effects in amorphous silicon and silicon nitride photonic devices / Q. Du [et al.] // Optics Letters. – 2017. – Vol. 42, № 3. – P. 587–590.

УДК 004.021

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛА

Горин А.В.

*ФГБОУ «Тульский государственный университет»
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. В статье рассматривается комплексирование информации от нескольких источников, у которых неодинаковы дисперсии и качество информации, также приводится оценка эффективности предлагаемого метода. Предлагается для повышения точности измерения производить комплексирование в два этапа: на первом этапе обрабатывать информацию с помощью нечеткой логики для подавления зашумленных источников, на втором этапе непосредственно комплексировать сигналы с помощью квази-оптимального алгоритма. В качестве тестовых сигналов использованы гармонические сигналы, представляющие аддитивную смесь полезного сигнала и белого шума.

Ключевые слова: комплексирование, нечеткая логика, точность, помехозащищенность.

SEVERAL SOURCES INFORMATION FUSION BASED ON FUZZY LOGIC FOR INCREASE IN ACCURACE AND NOISE IMMUNITY OF A SIGNAL

Gorin A.

Tula State University
Tula, Russia

Abstract. The article discusses several sources signals information fusion, which have different variances and quality of information, and also provides an assessment of the effectiveness of the proposed method. It is proposed to perform the fusion in two stages to improve the measurement accuracy: at the first stage, process information using fuzzy logic to suppress noisy sources, at the second stage, directly combine the signals using a quasi-optimal algorithm. Harmonic signals representing an additive mixture of the useful signal and white noise were used as test signals.

Key words: integration, fuzzy logic, accuracy, noise immunity.

Адрес для переписки: Горин А.В., пр. Ленина, 95, г. Тула, 300012, Российская Федерация
e-mail: tongornani@mail.ru

В технических системах все чаще находят применение использование нескольких измерительных устройств (ИУ), частично или полностью дублирующих свои функции. Одновременно повышаются требования к качеству поучаемой информации. Поскольку использование более точных ИУ сопряжено с большими финансовыми затратами, имеет смысл искать решение задачи повышения точности в уже существующей структурной избыточности системы [1, 2]. В работе рассматривается повышение точности и помехозащищенности за счет комплексирования сигналов ИУ на основе нечеткой логики.

Общая постановка задачи: ИУ_{*i*} (*i* = $\overline{2, N}$) измеряют параметр или функционально связанные параметры объекта/параметра интереса. Сигналы от ИУ представляют собой смесь полезного сигнала и белого шума:

$$s_i = S + N(\sigma_i, M_i), \quad (1)$$

где *s_i* – сигнал от *i*-го ИУ, *S* – истинный сигнал, *N*(σ_i, M_i) – белый шум.

Обозначим чем через *V* множество сигналов *s_i*, тогда в наиболее общем виде задача формулируется следующим образом: необходимо найти такое преобразование:

$$P = F(V), \quad (2)$$

которое находило бы экстремум функционала *F*(*V*).

Т.к. повышение точности соответствует уменьшению шумовой составляющей в итоговом сигнале, (2) сводится к

$$M[(P - V)^2] \rightarrow \min, \quad (3)$$

где *M* – оператор математического ожидания.

Комплексирование сигналов ИУ основано на интерпретации операции вычисления центра тяжести агрегированного нечеткого множества (рис. 1): по оси абсцисс откладывается параметр, по которому определяется качество сигнала ИУ (например, СКО ошибки), по оси ординат весовой коэффициент, который используется для

подавления сигнала от ИУ в зависимости от шумленности. Значения параметров по обеим осям нормированы: сумма весовых коэффициентов равна единице, что обеспечивает отсутствие динамической составляющей ошибки. Комплексированный сигнал запишем в виде

$$S = \sum w_i s_i, \quad (4)$$

где *w_i* – весовой коэффициент сигнала *i*-го ИУ.

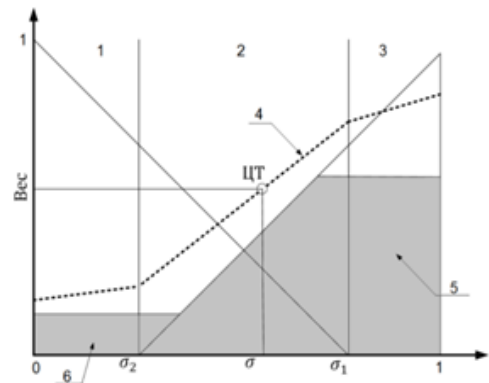


Рисунок 1 – Интерпретация вычисления центра тяжести

На рис. 1 введены следующие обозначения: ЦТ – центр тяжести агрегированного множества; 1, 2 и 3 – режимы работы; 4 – траектория ЦТ; 5 и 6 – площади нечетких множеств перед вычислением ЦТ.

Рассмотрим функционирование алгоритма на примере двух сигналов. Обозначим через σ_1 СКО сигнала 1-го ИУ, через σ_2 – второго ИУ. Нормированное значение можно вычислить как $\sigma = \frac{\sigma_1}{\sigma_1 + \sigma_2}$. Если $\sigma_1 \gg \sigma_2$, то $w_1 \ll w_2$ и наоборот. Если СКО сигналов сопоставимы будет производится их комплексирование в соответствии с (4).

Если в результате взвешивания остается два или более сигналов, можно на втором этапе применить квазиоптимальное комплексирование для этих сигналов при предположении наличия в сигналах белого шума. На втором этапе также решается задача минимизации функционала

$F(V)$, но уже рассматриваемого как сумма линейных форм:

$$F(V) = \sum_{i=1}^N \omega_i (s_i - \sum_{j=1}^N k_{ij} V)^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

где k_{ij} – некоторые коэффициенты в линейной форме.

Решение (5) в матричной форме имеет вид:

$$F(V) = \mathcal{A}^T \mathbb{W} \mathcal{A}, \quad (6)$$

где $\mathcal{A} = \mathcal{S} - \mathcal{K}V$ – вектор невязок; \mathbb{W} – матрица случайных векторов; \mathcal{K} – матрица, составленная из коэффициентов линейных форм; \mathbb{W} – диагональная матрица весов.

Оценку эффективности рассмотрим на примере 2-х гармонических зашумленных сигналов $\sigma_i = A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) + N(\sigma_i, M_i)$ сначала для каждого из этапов по отдельности, затем суммарный выигрыш после двух последовательных обработок.

Пусть амплитуды, СКО и фазы полезного сигнала от 1-го ИУ и от 2-го ИУ равны, математические ожидания шумов равны нулю, а $\sigma_1 = 1, \sigma_2 = 2$.

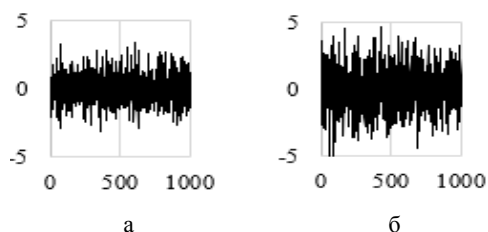


Рисунок 2 – Исходные сигналы при моделировании:
а – сигнал от 1-го ИУ, б – сигнал от 2-го ИУ

Результаты моделирования представлены на рис. 3, а (комплексирование на первом этапе), б (на втором этапе) и в (после двух этапов).

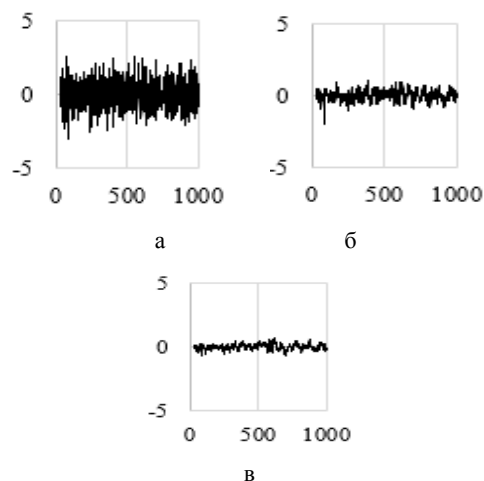


Рисунок 3 – Моделирование комплексирования трех сигналов

Результаты моделирования сведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты моделирования*

Сигнал	ИУ ₁	ИУ ₂	Э ₁	Э ₂	Э ₁ +Э ₂
Уровень	1,00	2,00	0,82	0,36	0,21
СКО					

ИУ_i – сигнал от ИУ, Э_i – сигнал после этапа обработки

Литература

- Горин, А. В. Комплексирование координатной информации на основе алгоритмов нечеткой логики / А. В. Горин // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов: материалы 16 Всероссийской науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. – Тула : Изд-во ТулГУ, 2017. – 345 с.
- Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление. – Изд. 2-е / А. Пегат. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.

УДК 535-3, 535.314

ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ 2D-КАМЕРЫ

Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Субач А.А.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены особенности применения 2D-рентгеновских камер для реализации методов проекционной микроскопии, контактной микроскопии и стереорентгенографии.

Ключевые слова: Рентгеновское излучение, рентгеновская микроскопия, стереорентгенография.

X-RAY IMAGING OF OBJECTS USING A DIGITAL 2D-CAMERA

Dudchik Yu., Khilko G., Subach A.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus

Abstract. The features of the use of 2-D X-ray cameras for the implementation of the methods of projection microscopy, contact microscopy and stereoradiography are considered.

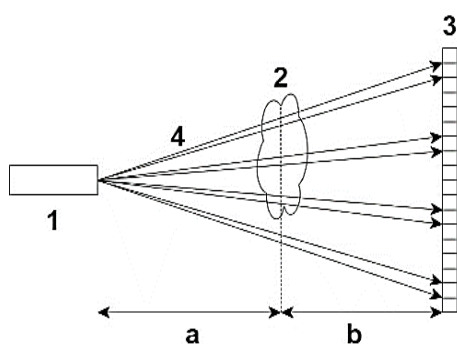
Key words: X-ray radiation, X-ray microscopy, stereoradiography.

Адрес для переписки: Дудчик Ю.И., Курчатова 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: dudchik@bsu.by

Развитие цифровой техники и появление цифровых камер для видимого излучения открыло новые перспективы и для рентгеновской техники. В настоящее время для визуализации рентгеновского излучения используются устройства, содержащие сцинтиллирующий экран, объектив и цифровую видеокамеру. Для визуализации рентгеновских лучей с энергией фотонов 1–8 кэВ также используются ПЗС или МОП-матрицы с прямым детектированием рентгеновских лучей без применения сцинтиллятора.

В работе рассмотрены особенности применения 2-D рентгеновских камер для реализации метода проекционной микроскопии с использованием квазиточечного источника излучения, метода контактной микроскопии и метода стереорентнографии.

На рис. 1 показана схема реализованного проекционного рентгеновского микроскопа. В качестве источника рентгеновских лучей использовался микрофокусный рентгеновский аппарат РЕЙС-25И, содержащий микрофокусную рентгеновскую трубку с прострельным медным анодом. Размер фокусного пятна источника равен 50 мкм. Напряжение на аноде – 25 кВ, ток – 0,1 мА. Для регистрации изображений объектов использовалась 2-D рентгеновская камера Photonic Science. Блок детектирования камеры содержит ПЗС-матрицу, к которой присоединена волоконно-оптическая шайба с нанесенным слоем сцинтиллятора. Размер рабочей области рентгеновской камеры составляет 18x12 мм, число пикселей равно 4008x2670. Пространственная разрешающая способность микроскопа зависит от размера источника излучения, разрешающей способности камеры, а также от расстояния, на котором объект располагается по отношению к камере и источнику.



1 – рентгеновская трубка; 2 – объект; 3 – 2D-детектор;
4 – рентгеновские лучи

Рисунок 1 – схема получения изображения объектов с использованием рентгеновской камеры

Если объект располагается на расстоянии a от источника и на расстоянии b до камеры, то данный случай соответствует методу проекционной микроскопии с увеличением, равным $(a + b)/a$. В этом

случае разрешение метода практически совпадает с размером источника. Если объект располагается вплотную к рабочему экрану рентгеновской камеры, то пространственное разрешение устройства совпадает с пространственным разрешением камеры. Рассматриваемый случай соответствует методу контактной микроскопии.

На рис. 2 показаны изображения металлической сетки в рентгеновских лучах: толщина проволоки сетки – 150 мкм. Расстояние $(a+b)$ от источника излучения до камеры – 220 мм.

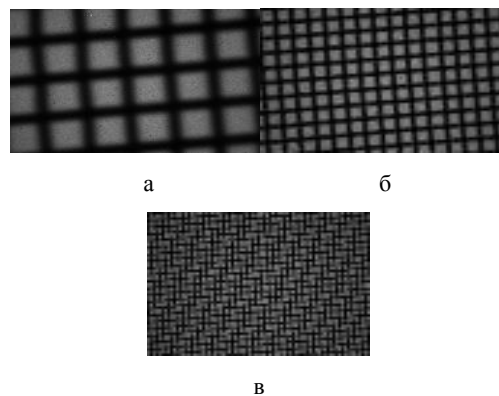
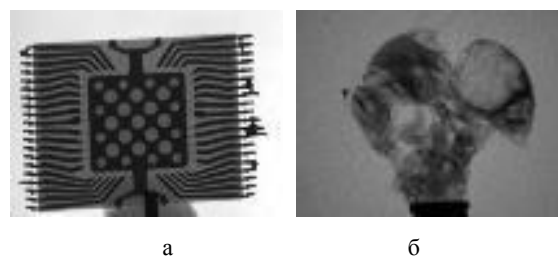


Рисунок 2 – Изображение сетки в рентгеновских лучах на различных расстояниях a до сетки:
а) $a = 30$ мм; б) $a = 90$ мм; в) $a = 200$ мм

Разрешающая способность в методе проекционной микроскопии определяется размером источника излучения, который в данном случае равен 50 мкм. Для получения изображения объектов с лучшим пространственным разрешением имеет смысл располагать объект вплотную к рентгеновской камере. Проведенные нами ранее исследования показали, что пространственная разрешающая способность использованной Photonic Science камеры, определенная методом ножа, составляет около 20 мкм. На рис. 3 показаны изображения объектов, полученные методом контактной микроскопии. Типичные условия съемки: расстояние a от источника до объекта – 500 мм, расстояние b от объекта до камеры – 5 мм. В качестве источника излучения использовалась рентгеновская трубка БСВ-17 с медным анодом



а – изображение микросхемы; б – изображение пчелы

Рисунок 3 – Изображения объектов в рентгеновских лучах

Методы рентгеновской проекционной и контактной микроскопии имеют свои ограничения, связанные с особенностями взаимодействия рентгеновских лучей с материалом объекта: для получения контрастного изображения объекта необходимо, чтобы его различные участки по-разному поглощали излучение. Это условие, как правило, не выполняется для материалов с небольшим порядковым номером – полимеров, пластиков, полимерных композитов, которые слабо поглощают рентгеновские лучи. Поэтому получение изображения объектов, выполненных из материалов с малым порядковым номером, и которые слабо поглощают рентгеновские лучи, является актуальной задачей. Нами разрабатывается стереофотографический метод получения изображения слабопоглощающих рентгеновское излучение объектов [1]. В рамках разрабатываемого метода съемка объекта производится при двух положениях источника излучения, смещенных перпендикулярно относительно оптической оси системы. В исследованиях рентгеновская трубка БСВ-17 располагалась на расстоянии 400 мм до объекта, объект – на расстоянии 20 мм до камеры. Два полученных изображения объекта в рентгеновских лучах обрабатывались с использованием компьютерной программы StereoPhoto Maker, которая специально предназначена для построения стереоизображений.

На рис. 4 показаны рентгеновские изображения зерен риса, стеклянных микрокапилляров и их стереоизображения.

Из рис. 4 видно, что использование метода стереофотографии в рентгеновском диапазоне длин волн позволило существенно увеличить контраст изображения: на стереоизображениях объектов по-

являются детали, которые отсутствуют в исходных изображениях.

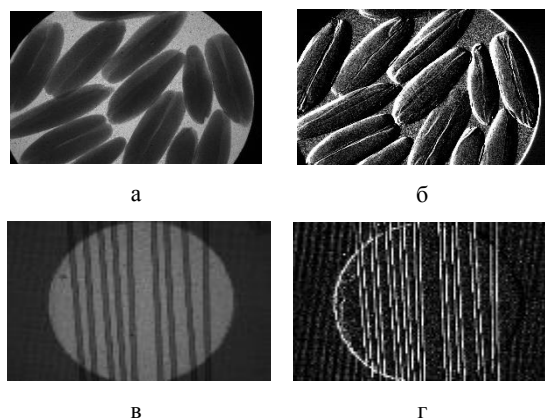


Рисунок 4 – Изображения различных объектов в рентгеновских лучах и их стереоизображения: а) изображение зерен риса в рентгеновских лучах; б) стереоизображение зерен риса; в) изображение стеклянных капилляров в рентгеновских лучах; г) стереоизображение стеклянных капилляров

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.07 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

Литература

1. Дудчик, Ю. И. Получение изображения объектов в рентгеновских лучах методом стереофотографии / Ю. И. Дудчик // Приборостроение–2019 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2019 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 19–20.

УДК 621.382

МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ТЕСТИРОВАНИЯ МОЩНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР

Ефименко С.А., Кособуцкая Н.В.

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Тестирование – это измерение электрических параметров микросхем и полупроводниковых приборов и проведение функционального контроля микросхем. Поскольку мощные микросхемы и полупроводниковые приборы являются тепловыделяющими, их тестирование должно проводиться с учетом перегрева кристалла. В работе рассмотрены возможные способы их тестирования, в том числе учитывающие перегрев кристалла.

Ключевые слова: измерение, тестирование, тепловыделяющие микросхемы и полупроводниковые приборы.

MODERNIZATION OF THE METHOD OF TESTING A POWERFUL INTEGRATED CIRCUIT OR SEMICONDUCTOR DEVICE IN THE TEMPERATURE RANGE

Efimenko S., Kosobutskaya N.

JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company
Minsk, Belarus

Annotation. Testing is the measurement of electrical parameters of microcircuits and semiconductor devices and carrying out functional control of microcircuits. Since high-power chips and semiconductor devices are heat-generating, their testing should be carried out taking into account the overheating of the crystal. The paper considers possible ways of testing them, including taking into account the overheating of the crystal.

Keywords: measurement, testing, heat-generating chips and semiconductor devices.

Адрес для переписки: Ефименко С.А., ул. Казинца И.П., 121А, г. Минск, 220108, Республика Беларусь
e-mail: SEfimenko@integral.by

Интегральная микросхема или полупроводниковый прибор должны быть работоспособными в диапазоне температур среды: минус 10–70 °С при использовании в бытовой аппаратуре, минус 45–85 °С – в промышленной аппаратуре, минус 45–125 °С – в автомобильной аппаратуре, минус 60–125 °С – в аппаратуре специального и двойного назначения.

Электрические параметры микросхемы или полупроводникового прибора измеряют с использованием автоматизированных измерительных систем (АИС). Возможно проводить тестирование тремя способами:

- только в нормальных условиях при комнатной температуре 25 ± 10 °С [1],
- при повышенной температуре после разогрева кристалла выделяемым теплом при прохождении через его элементы электрического тока [2],
- в диапазоне температур путем помещения приборов в камеру задания температуры [1].

Качество теплоотвода обычно выражается величиной теплового сопротивления. Тепловое сопротивление R_T определяется по формуле [3]:

$$R_T = (T_{кр} - T_{ср})/P \quad (1)$$

где $T_{кр}$ – температура кристалла; $T_{ср}$ – температура среды; P – рассеиваемая мощность.

Тепловой баланс в системе прибор – окружающая среда устанавливается через некоторое время после подачи напряжения.

Для различных участков прибора время установления постоянной температуры различно и зависит от конструктивных особенностей участков и теплоемкости материала. Так, тепловая постоянная переходного процесса τ_T составляет для кристалла 15–20 мс, для прибора 4–8 с, для прибора с радиатором 100–200 с. Время тестирования всех параметров обычно составляет 0,5–5 с. Это означает то, что во время тестирования кристалл может перегреться и его температура выйти за допустимые пределы. При проведении тестирования на повышенной температуре, температуру кристалла определяют в соответствии с формулой (1).

Тестирование тепловыделяющих микросхем и полупроводниковых приборов указанными выше методами имеет ряд недостатков.

Тестирование только при комнатной температуре не может полностью гарантировать работоспособность мощной интегральной микросхемы или полупроводникового прибора в диапазоне температур.

Тестирование на повышенной температуре после разогрева кристалла выделяемым теплом при прохождении через его элементы электриче-

ского тока не учитывает разброс значений теплового сопротивления R_T , которое может значительно отличаться от прибора к прибору. Так для микросхемы стабилизатора напряжения в корпусе ТО-220 $R_{Ткр-ср}$ может принимать значения от 50 до 75 °С/Вт. Следовательно, разброс значений $T_{кр}$ при $T_{ср} = 25$ °С из-за разброса значений $R_{Ткр-ср}$ при $P = 1,6$ Вт может составлять от 105 до 145 °С, что выходит за требуемые пределы 125 ± 5 °С для автомобильной аппаратуры и аппаратуры специального и двойного назначения.

Поскольку требуется время для специального нагревания кристалла проходящим через элементы схемы током, время тестирования одного прибора увеличивается.

Тестирование микросхем или полупроводниковых приборов проводится на трех температурах – пониженной, комнатной и повышенной в устройстве задания температуры. В качестве такого устройства могут использоваться проходные камеры типа ПКВ-1, ПКВ-2, ПКВ-5, устройство термостатирующие УИК.ИМ или ThermoJet, Хендлеры.

Поскольку при тестировании кристалл нагревается, его электрические параметры изменяются. На пониженной температуре для приборов аппаратуры специального и двойного назначения температура кристалла поднимется выше диапазона минус 60 ± 3 °С, а при на повышенной температуре выше диапазона 125 ± 5 °С.

Бракованный прибор может не забраковаться при тестировании и быть признан годным. Снижается процент выхода и ухудшается качество интегральных микросхем и полупроводниковых приборов из-за засоренности приборами, не соответствующими конструкторской документации.

Кроме того, поскольку температура кристалла не контролируется, в выпускаемых партиях приборов будут присутствовать приборы с завышенными значениями теплового сопротивления $R_{Ткр-кор}$. Это будет приводить к повышенному разогреву кристалла микросхемы или полупроводникового прибора при эксплуатации и к снижению надежности.

Для исключения этих недостатков предложен модифицированный алгоритм проведения тестирования, приведенный на рис. 1. Микросхему или полупроводниковый прибор помещают в камеру задания температуры при тестировании на повышенной и пониженной температурах среды, задают требуемую температуру. Затем проводят тестирование: измерение электрических параметров в т.ч. параметров, приводящих к повышенному разогреву кристалла интегральной микросхемы или полупроводникового прибора и функциональный контроль. Измерение термочувствительного параметра $U_{до}$ проводят первый раз перед

началом тестирования, второй раз – после проведения тестирования. По разнице показаний термочувствительного параметра определяют относительный перегрев и температуру кристалла. В качестве термочувствительного параметра может выступать прямое напряжение диода $U_{д0}$. Диод является одним из элементов микросхемы или полу-проводникового прибора. $U_{д0}$ уменьшается на величину $\alpha = 1,5-2,2$ мВ/°С при повышении температуры на 1 °С. В зависимости от значения относительного перегрева и температуры кристалла производят одно из следующие действий:

- признают интегральную микросхему или полупроводниковый прибор годными,
- проводят оптимизацию времени измерения,
- уточняют методики измерения параметров,
- понижают температуру среды (в камере),
- проводят бракование прибора из-за завышенного значения теплового сопротивления R_t .

Поскольку разница между температурой среды и температурой кристалла уменьшена, значение последней устанавливается более точно. Поскольку температура кристалла не выходит за допустимые рамки, исключается пропуск брака и бракование годного прибора на пониженной и повышенной температурах среды.



Рисунок 1 – Алгоритм проведения тестирования

Литература

1. Козырь, И. Я. Качество и надежность интегральных микросхем / И. Я. Козырь. – М. : «Высшая школа», 1987. – 144 с.
2. Патент Японии JP2003279617, МПК G01R31/26; (IPC1-7): G01R31/26, 02.10.2003.
3. Основы силовой электроники / А. И. Белоус [и др.]. – Москва: «Техносфера», 2019. – 424 с.

УДК 371.693.4.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ С БЕССТУПЕНЧАТЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАГРУЗКИ Жуков И.И., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Ковель С.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены устройство и методика физической реабилитации спортсменов после травм. В качестве основы устройства использован кросс-велотренажер. Обоснован выбор механизма редуктора с бесступенчатым изменением передачи, что позволяет гибко изменять параметры нагрузки в процессе реабилитации.

Ключевые слова: реабилитация, кросс-тренажер, нагрузка, ременной привод.

THE DEVICE FOR PHYSICAL REHABILITATION OF SPORTSMEN WITH NONSTEP LOADING CHANGE

Zhukov I., Svistun A., Tyavlovsky K., Kovel S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The device and technique of physical rehabilitation of sportsmen after traumas are considered. As a device basis cross-country-velosimulator is used. The choice of the mechanism of a reducer with nonstep transfer change that allows to change flexibly parameters loadings in the course of rehabilitation is proved.

Key words: rehabilitation, cross-country-training apparatus, loading, belt drive.

*Адрес для переписки: Жуков И.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: i.zhukov@bntu.by*

Ходьба, в том числе северная, и бег являются наиболее доступными средствами оздоровления, приемлемыми для людей всех возрастов и групп здоровья [1]. Кроме того, они часто применяются и

при реабилитации спортсменов после травм, полученных в ходе тренировок и соревнований. Кросс-тренажеры [2] обеспечивают возможность заниматься ходьбой и бегом как в спортивных

залах, так и в домашних условиях и благодаря этому широко применяются при решении задач, связанных с повседневными тренировками и восстановлением утраченных функций. Их применение благотворно сказывается на состоянии сердечно-сосудистой и мышечной систем организма человека, его органов дыхания и обмене веществ, снижается уровень холестерина в крови и происходит улучшение функционирования организма в целом.

Кросс-тренажер предоставляет возможность заниматься ходьбой и бегом в помещении, вне зависимости от погодных условий. Работа тренажера основана на имитации движений человека при ходьбе и при беге, позволяет моделировать различные виды нагрузки, их интенсивность и продолжительность, осуществлять контроль за занимающимся. Наиболее эффективно достижение целей тренировки или реабилитации обеспечивается на кросс-тренажерах с бесступенчатым изменением нагрузки и его оснащении датчиками состояния человека и самого тренажера.

Обычно кросс-тренажеры обеспечивают контроль скорости, времени тренировки, пройденной дистанции и расход энергии. Дополнительно можно программировать виды тренировок, учитывая возраст и физическое состояние пользователя, автоматически регулировать нагрузку в зависимости от частоты пульса и дыхания, помогая достичь конкретных целей тренировки или реабилитации.

Конструкцию разработанного устройства (рис. 1) можно разделить на три части: пульт управления, размещенный внутри консольной стойки и оснащенный жидкокристаллическим дисплеем с сенсорной клавиатурой; педально-рычажный привод, объединяющий редуктор с возможностью раздельного управления педалями и механизм управления нагрузкой (рис. 2); и механизм регулировки положения сиденья.



Рисунок 1 – Общий вид педального кросс-тренажера

Основу педально-рычажного привода (рис. 2) составляет конический зубчатый редуктор, управляющие шестерни которого, могут смещаться на валах, обеспечивая бесступенчатое изменение нагрузки, и в соответствии с выбранной программой, входят в зацепление с ведущим колесом при помощи толкателей электромагнита. Переход шестерен в нерабочее положение

выполняется возвратными пружинами. Использование ременной передачи [3] обеспечивает бесшумность при работе и передачу вращения на большие расстояния при пониженных требованиях к точности выполнения механизма.

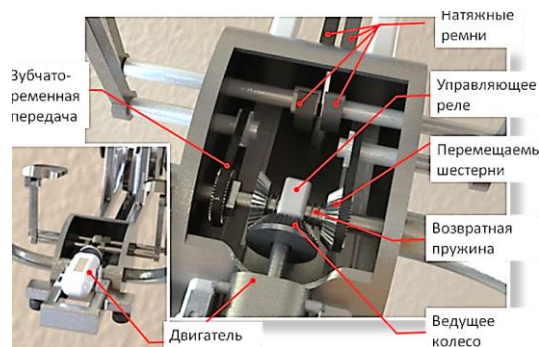


Рисунок 2 – Конструкция редуктора

Педали установлены на отдельных валах и могут двигаться независимо друг от друга. Вращение от управляющих шестерен редуктора на валы педелей передается с помощью зубчато-ременной передачи. Ко второй паре валов педалей присоединены натяжные ремни, которые через цилиндрические шестерни передают вращение на маховое колесо, а с него, с помощью клиноременной передачи, вращение передается на нагрузочный диск. Управляемая электромагнитным реле тормозная колодка обеспечивает выбранный режим нагрузки.

Устройство может работать в двух режимах:

- режим тренировки, при котором управляющие шестерни не входят в зацепление, а движение на нагрузочный диск передается от ног занимающегося;
- режим реабилитации, при котором тормозная колодка отключена, управляющие шестерни поочередно вводятся в зацепление и вызывают принудительное перемещение педалей.

Для измерения нагрузочных характеристик используются два энкодера серии РФ701/V–20 производства ООО Рифтэк (РБ), установленные соосно с осями вращения приводного механизма и задней опоры ременной передачи. Микроконтроллер пульта управления преобразует сигналы энкодеров в скорость движения и нагрузку реабилитируемого спортсмена [4].

Методика реабилитации предусматривает три этапа: подготовительная часть, основная и заключительная. В соответствии с методикой тренировки, которая индивидуально корректируется врачом-реабилитологом, занятия начинаются не раньше, чем через час после еды или приема лекарств. Также нежелательно начинать занятия позже, чем за 2 часа до сна.

Распределение нагрузок на каждом этапе неоднородно. Начинать работу необходимо на небольших скоростях, постепенно увеличивая темп. По окончании занятия темп наоборот

необходимо снижать, чтобы привести в норму частоту дыхания и ритм сердца.

Между двумя тренировками должен быть один день без тренировки. Например, для первой недели реабилитации устанавливается следующий режим:

- тренировка 2 минуты, перерыв 1 минута для гимнастики;
- тренировка 2 минуты, перерыв 1 минута для гимнастики;
- тренировка 2 минуты.

В дальнейшем каждую неделю производится увеличение нагрузки и длительности тренировок на 1 минуту.

Состояние спортсмена контролируется по частоте сердечных сокращений. Допустимое значение ЧСС рассчитывается по схеме: 180 ударов в минуту минус возраст. Например, у 40-летнего занимающегося пульс не должен превышать 140 ударов в минуту.

Пульс контролируется на трех этапах каждой тренировки:

- перед началом тренировки – пульс покоя;
- во время тренировки тренировки – пульс нагрузки или стрессовый пульс;
- через 1 минуту по окончании тренировки – пульс восстановления.

Автоматизированная система управления тренажером обеспечивает высокий крутящий момент при низких оборотах двигателя во всем диапазоне скоростей тренажера, что в свою очередь обеспечивает медленный и плавный пуск с нуля и тихую работу тренажера. Программное изменение всех режимов тренажера и контроль состояния спортсмена во время тренировок обеспечивают возможность оперативного изменения программы реабилитации врачом реабилитологом для каждого спортсмена. Применение кросс-тренажеров с плавным изменением нагрузки позволяет сократить время реабилитации и повысить ее эффективность.

Литература

1. Фохтин В. Г. Атлетизм дома. Упражнения без снарядов. Выпуск 3. / В. Г. Фохтин / – М.: «Советский спорт». – 1990. – 30 с.
2. Кросс-тренажеры [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.sport-sklad.ru>. – Дата доступа: 25.03.2018.
3. Справочник конструктора-приборостроителя. Детали и механизмы приборов / Соломахо А. Л. [и др.]. – Минск: Высш. шк., 1990. – 440 с.
4. Методология и средства изменений параметров объектов с неопределенными состояниями / О. К. Гусев [и др.]; под общ. ред. О. К. Гусева – Минск: БНТУ, 2010. – 582 с.

УДК 621.3.049.77; 681.586

ЦИФРОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены цифровые функциональные электронные модули для контроля содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде.

Ключевые слова: функциональный электронный модуль, контроль газового состава среды.

DIGITAL FUNCTIONAL ELECTRONIC MODULES FOR ENVIRONMENTAL GAS CONTROL

Zdorovtsev S., Kushnerov D., Sushko V.

JSC «MNIPI»

Minsk, Belarus

Annotation. Digital functional electronic modules for monitoring oxygen and carbon dioxide content in air are considered. The parameters of the modules are given.

Keywords: functional electronic module, control of the gas composition of the medium

Адрес для переписки: Здоровцев С.В., ул. Якуба Коласа 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ieic@mail.ru

В работе представлены результаты разработки и исследования цифровых функциональных электронных модулей (ФЭМ) контроля содержания кислорода и углекислого газа в воздушной среде.

Разработанные ФЭМ используются для работы в составе информационно-измерительной системы (ИИС), в которой в качестве регистратора данных может быть использован либо пер-

сональный компьютер (ПК) либо планшетный компьютер или смартфон [1, 2].

На рис. 1, 2 представлен внешний вид разработанных ФЭМ.

В качестве сенсорного элемента ФЭМ контроля содержания кислорода в воздушной среде был выбран датчик ME2-O2-Ф20 [3].

Датчик ME2-O2-Ф20 представляет собой электрохимический сенсор, который измеряет

концентрацию газа в процессе электрохимического окисления целевого газа на рабочем электроде внутри электролитической ячейки. Величина тока, возникающего в электролитической ячейке в процессе электрохимической реакции, пропорциональна концентрации газа, вступившего в реакцию.



Рисунок 1 – ФЭМ контроля содержания кислорода в воздухе



Рисунок 2 – ФЭМ контроля содержания углекислого газа в воздухе

Отличительные особенности ME2-O2-Phi20: низкое энергопотребление, высокая точность измерения, высокая чувствительность, широкий линейный диапазон, хорошая повторяемость и стабильность, хорошая помехоустойчивость.

В качестве сенсорного элемента ФЭМ контроля содержания углекислого газа в воздушной среде был выбран датчик MQ-135 [4].

Датчик MQ-135 относится к полупроводниковым приборам. Принцип работы датчика основан на изменении сопротивления тонкопленочного слоя диоксида олова SnO₂ при контакте с молекулами определяемого газа. Чувствительный элемент датчика состоит из керамической трубки с покрытием Al₂O₃ и нанесенного на нее чувствительного слоя диоксида олова. Внутри трубки проходит нагревательный элемент, который нагревает чувствительный слой до температуры, при которой он начинает реагировать на определяемый газ. Чувствительность датчика достигается варьированием состава примесей в чувствительном слое.

Отличительные особенности MQ-135: быстрая реакция и восстановление, регулируемая чувствительность, индикация входного сигнала.

В табл. 1, 2 приведены параметры датчиков кислорода и углекислого газа, используемых в ФЭМ.

Для предварительной обработки измерительной информации в ФЭМ были использованы

высокопроизводительные 32-разрядные микроконтроллеры STM32F103C8T6 с Cortex-M3 RISC процессором, максимальной тактовой частотой 72 МГц, 64 КБайт Flash, 20 КБайт ОЗУ.

Таблица 1. Параметры датчика ME2-O2-Phi20

Диапазон измерений	0 – 25 %
Время отклика	≤15 с
Точность	<2%
Напряжение питания	3,3 – 5 В
Спротивление нагрузки	10 ком

Таблица 2. Параметры датчика MQ-135

Диапазон измерений	10 – 200 ppm
Время отклика	≤10 с
Напряжение питания	3,3 – 5 В
Потребляемый ток	150 мА

Для функционирования ФЭМ в составе ИИС разработано специальное ПО "DIGITAL LABORATORY" на базе ОС Windows 10 и специальное ПО для ФЭМ "Digital Sensors" [5].

Результаты контроля газового состава окружающей среды отображаются в информационном окне регистратора данных в виде цифровых значений контролируемых параметров и графиков зависимости этих параметров от времени наблюдения.

На рис. 3, 4 представлены примеры информационных окон регистратора данных при контроле газового состава окружающей среды.

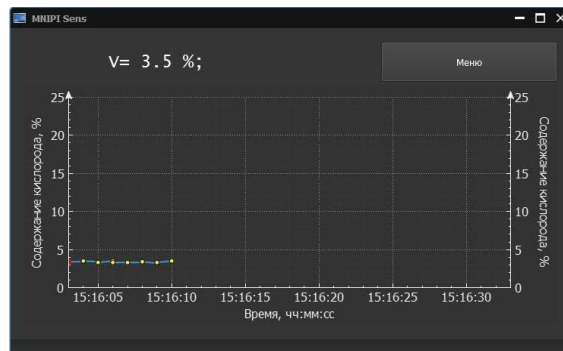


Рисунок 3 – Информационное окно регистратора данных при контроле содержания кислорода в воздухе

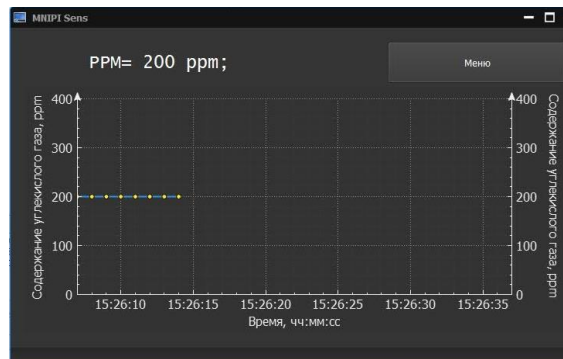


Рисунок 4 – Информационное окно регистратора данных при контроле содержания углекислого газа в воздухе

Разработанные ФЭМ используются в составе программно-аппаратного комплекса, предназначенного для выполнения демонстрационных лабораторных работ по химии и биологии в учреждениях образования. Рассмотренные ФЭМ могут также найти применение в химических и аналитических лабораториях НИИ и промпредприятий при выполнении экспериментальных исследований газового состава окружающей среды.

Литература

1. Здоровцев, С. В. Информационно-измерительная система на базе цифровых функциональных электронных модулей / С. В. Здоровцев, Д. П. Кушнеров, В. А. Сушко // Приборостроение–2020 : материалы 11 международной науч.-техн. конф., 14–16 ноября 2018 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018. – С. 17–19.

2. Здоровцев С. В. Беспроводная контроля параметров удаленных объектов / С. В. Здоровцев, Д. П. Кушнеров, В. А. Сушко // Приборостроение-2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 49–51.

3. ME2-O2-Ф20 Oxygen Sensor [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://www.winsen-sensor.com>. – Дата доступа: 01.10.2021.

4. MQ135 датчик углекислого газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://portal-pk.ru>. – Дата доступа: 01.10.2021.

5. Функциональный электронный модуль контроля линейных перемещений / С.В. Здоровцев, Д.П. Кушнеров, А.В. Паршков, В.А. Сушко // Приборостроение-2017 : материалы 11 международной науч.-техн. конф., 1–3 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 48–50.

УДК 621.391.63; 535.361

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВОЙ КОНТРАСТНОСТЬЮ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

*НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработана и исследована математическая модель метода повышения эффективности лазерно-локационного распознавания объектов с квазинулевым оптическим контрастом, основанного на одновременном получении информации не только об оптической, но и о рельефометрической сигнатуре объекта. Показаны преимущества метода по сравнению с обнаружением и распознаванием объектов по оптическому контрасту.

Ключевые слова: обнаружение, распознавание, объекты с малым оптическим контрастом.

METHOD FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF LAZER LOCATION RECOGNITION OF OBJECTS WITH QUASI-ZERO CONTRAST

Ivanov V., Ivanov N.

*Institute for nuclear problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. A mathematical model of a method for increasing the efficiency of lazer-location recognition of objects with quasi-zero optical contrast, based on the simultaneous receipt of information not only about the optical, but also about the reliefometric signature of the object, has been developed and investigated. The advantages of the method in comparison with the detection and recognition of objects by optical contrast are shown.

Key words: detection, recognition, object with low optical contrast.

*Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com*

Принцип работы лазерно-локационных систем видения (ЛЛСВ) основан на подсветке объекта наблюдения лазерными импульсами с последующей пространственной селекцией и двумерной визуализацией сигнала, отраженного от цели [1].

Под оптическим контрастом объекта k_0 понимается отношение коэффициента отражения K_1 (светимости, яркости) поверхности или ее элемента к коэффициенту отражения K_b (светимости, яркости) некоторой фоновой поверхности, например, в виде [2]

$$k_0 = \frac{K_1 - K_b}{K_b}. \quad (1)$$

С возрастанием оптической плотности атмосферы (гидросферы) интенсивность лазерного излучения $P(R)$ ослабляется в соответствии с законом Бугера

$$P(R) = P_0 e^{-\sigma R}, \quad (2)$$

где P_0 – мощность излучаемого лазерного импульса в начале трассы локации; σ – коэффициент ослабления лазерного излучения; R – расстояние до объекта.

Это приводит к уменьшению (ухудшению) контраста объекта на входе ЛЛСВ в соответствии с уравнением [3]

$$k = k_0 e^{-\sigma R}, \quad (3)$$

где k_0 – коэффициент оптической контрастности (контраст) объекта; k – коэффициент контрастности (контраст) объекта на входе системы.

Селекция (отсечка) сигналов обратного рассеяния позволяет более чем на порядок увеличить дальность видения объектов [1]. Однако распознавание малококонтрастных объектов становится невозможным при $k_0 \rightarrow 0$.

Отраженное световое поле $E(S) = \sum_k E_k(S)$ в плоскости изображения ЛЛСВ представляет собой совокупность k элементарных волн (парциальных пучков), отраженных от k точек поверхности объекта S , каждый из которых характеризуется интенсивностью E_k и временем запаздывания прихода τ_k парциальных пучков сигнала на многоэлементный фотодетектор системы.

В соответствии с предложенным методом получают два двумерных распределения энергии $B_1(S)$ и $B_2(S)$ путем интегрирования отраженного светового поля $E(S, t)$ в пространственно – временных стробах τ_{s1} и τ_{s2} разной длительности [4]. Причем распределение B_1 получают путем интегрирования отраженного сигнала в стробе длительностью $\tau_{s1} \cong 2\tau_p$ на интервале $(t_1, 2\tau_p)$, где t_1 – момент начала прихода переднего фронта отраженного сигнала по отношению к моменту излучения лазерного импульса t_0 длительностью τ_p , а B_2 – интегрированием сигнала в стробе длительностью $\tau_{s2} = \tau_p$ на интервале (t_1, τ_p) .

В упрощенном виде для некоторых точек поверхности (поверхности и фона) эти значения энергий определяются уравнениями

$$B_1 = P_1 K_1 \tau_p; \quad (4)$$

$$B_2 = P_1 K_2 (\tau_p - \tau_k), \quad (5)$$

где P_1 – мощность падающего на поверхность S лазерного излучения; K_1, K_2 – коэффициенты отражения; τ_k – время запаздывания прихода отраженного сигнала от k -той точки поверхности, которое определяется уравнением

$$\tau_k = 2\xi_k/c, \quad (6)$$

где ξ_k – глубина рельефа поверхности в k -той точке относительно точки поверхности, наиболее близкой к ЛЛСВ (точка $\xi = 0$); c – скорость света.

По аналогии с (1) на основании уравнений (4) и (5) уравнение контраста для предложенного метода определяется в виде

$$k' = \frac{B_1 - B_2}{B_2} = \frac{K_1 \tau_p - K_2 (\tau_p - \tau_k)}{K_2 (\tau_p - \tau_k)} = \frac{k \tau_p + \tau_k}{\tau_p - \tau_k}, \quad (7)$$

где $k = \frac{K_1 - K_2}{K_2}$ – оптический контраст объекта.

С учетом уравнения (6) уравнение (7) примет вид

$$k' = \frac{k \tau_p c + 2\xi_k}{\tau_p c - 2\xi_k}. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что при нулевом оптическом контрасте объекта, когда $K_1 \cong K_2$, т.е. при $k = 0$, контраст объекта k' на входе ЛЛСВ не равен нулю, а определяется величиной

$$k' = \frac{2\xi_k}{\tau_p c - 2\xi_k}. \quad (9)$$

На рис. 1 приведены графики зависимости k' (9), как функции возвышения объекта ξ_k над плоскостью фона при $k = 0$ для различных значений длительности лазерного импульса $\tau_p = 5, 10$ и 20 нс.

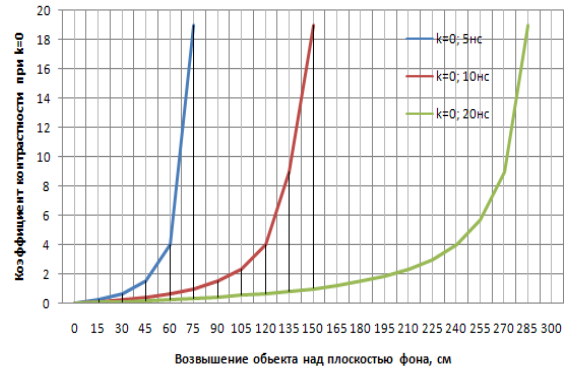


Рисунок 1 – Графики зависимости (9)

В соответствии с (9) величина контраста k' при $k = 0$ определяется глубиной рельефа поверхности ξ_k в k -той точке и может принимать весьма большие значения. Оценка данной зависимости определяется отношением контраста k' (8) к оптическому контрасту k в соответствии с уравнением

$$\Omega = \frac{k'}{k} = \frac{\tau_p c}{\tau_p c - 2\xi_k} + \frac{1}{k} \left(\frac{2\xi_k}{\tau_p c - 2\xi_k} \right). \quad (10)$$

Увеличение контраста k' на входе ЛЛСВ по сравнению с оптическим контрастом объекта пропорционально ξ_k и может быть $\gg 1$. Для объектов в виде плоскости (гипотетический случай) для которых $\xi_k = 0$, т.е. для объектов, лежащих в одной плоскости с фоновой поверхностью контраст k' определяется только оптическим контрастом объекта $k' = k$.

Повышение контраста объектов с $\xi_k > 0$ и малым оптическим контрастом позволяет примерно в Ω раз повысить детализацию объекта, обеспечить высокую обнаружительную способность и вероятность правильного распознавания малококонтрастных объектов.

Рассмотрим отношение коэффициента контрастности k' к пороговому (шумовому) контрасту ЛЛСВ k_N . Уравнение порогового контраста ЛЛСВ, по аналогии с (9), имеет вид

$$k_N = \frac{P_N}{P_S - P_N}, \quad (11)$$

где P_N – мощность порогового сигнала, который определяется чувствительностью (шумовыми характеристиками) системы; P_S – мощность сигнала.

Условием обнаружения объекта по оптическому контрасту является необходимость выполнения неравенства

$$\gamma = \frac{k}{k_N} > 1. \quad (12)$$

При $k \cong 0$ $\gamma = 0$, т.е. обнаружение объектов с квазиулевой контрастностью практически невозможно. Обнаружительная способность по предложенному методу равна

$$\gamma' = \frac{k'}{k_N} = \frac{k\tau_p c + 2\xi_k}{k_N(\tau_p c - 2\xi_k)}. \quad (13)$$

Рассмотрим отношение γ' к γ , определяемое уравнениями (13) и (12) соответственно

$$\Omega' = \frac{\gamma'}{\gamma} = \frac{\tau_p c}{\tau_p c - 2\xi_k} + \frac{1}{k} \left(\frac{2\xi_k}{\tau_p c - 2\xi_k} \right). \quad (14)$$

Данное уравнение совпадает с уравнением повышения контраста (10), $\Omega = \Omega'$, т.е. повышение обнаружительной способности малоконтрастных объектов тождественно увеличению коэффициента контрастности k' на входе системы. Обнаружительная способность γ' при $k = 0$ согласно (14) определяется величиной

$$\gamma' = \frac{2\xi_k}{k_N(\tau_p c - 2\xi_k)}. \quad (15)$$

Из (15) следует, что обнаружительная способность тем выше, чем больше глубина (высота) объекта ξ_k и чем меньше пороговый контраст k_N и длительность лазерного импульса τ_p . Минимальное (пороговое) значение $\xi_{k.min}$ объектов с квазиулевым оптическим контрастом, которые еще могут быть обнаружены ЛЛСВ с пороговым контрастом k_N , определяется из (9) при условии $k' = k_N$

$$\xi_{k.min} = \frac{k_N \tau_p c}{2(1 + k_N)}. \quad (16)$$

Так, например, при $k_N \approx 0,05$ и $\tau_p = 10$ нс, $\xi_{k.min} \cong 7$ см. Уменьшение порогового контраста системы k_N и длительности лазерных импульсов τ_p позволяет еще более минимизировать пороговое значение $\xi_{k.min}$.

Литература

1. Карасик, В. Е. Локационные лазерные системы видения / В. Е. Карасик, В. М. Орлов. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 478 с.
2. Зеге, Э. П., Перенос изображений в рассеивающей среде / Э. П. Зеге, А. П. Иванов, И. Л. Кацев. – Минск : Наука и техника, 1985. – 327 с.
3. Йеперс, П. Полупроводниковые формирователи сигналов изображения / П. Йеперс, Ф. Ван де Виле, М. Уайт, М. – М. : Мир, 1979. – 314 с.
4. Иванов В. И. Получение дальностных 3D изображений высокодинамичных объектов по отношению интенсивностей парциальных пучков отраженного лазерного излучения / В. И. Иванов, Н. И. Иванов // Квантовая электроника, 2018. – Т. 48, № 7. – С. 679–682.

УДК 551.501.816:551.501.793

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ЛИДАРНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХСЛАБЫХ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Иванов В.И., Иванов Н.И.

НИУ «Институт ядерных проблем» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана и исследована математическая модель корреляционного адаптивного алгоритма обнаружения оптических неоднородностей атмосферы в реальном масштабе времени. Показаны преимущества метода по сравнению с обнаружением по априорно заданным пороговым функциям.

Ключевые слова: лидар, атмосфера, гидросфера, оптическая неоднородность, турбулентность, обнаружение.

CORRELATION ALGORITHM FOR LIDAR DETECTION OF SUPERWEAK OPTICAL INHOMOGENEITY IN REAL TIME

Ivanov V., Ivanov N.

Institute for Nuclear Problems of BSU
Minsk, Belarus

Abstract. The mathematical model of adaptive correlation is developed and the algorithm for detecting optical inhomogeneities in the atmosphere in real time is investigated. The advantages of the method are shown compared with the discovery of a priori by predetermined threshold functions.

Key words: lidar, atmosphere, hydrosphere, optical inhomogeneity, turbulence, detection.

Адрес для переписки: Иванов В.И., ул. Голубева, д. 5, кв. 103, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: ivanov.inp@gmail.com

Лидарная диагностика атмосферы (гидросферы) во многих случаях требует оперативного обнаружения мелкомасштабных оптических неоднородностей с малой оптической плотностью и объектов с малыми значениями эффективной отражающей поверхности в реальном масштабе времени (РМВ) [1, 2]. Процедура обнаружения сводится к сравнению текущего значения сигнала обратного рассеяния (отражения) $S(r)$ с некоторой пороговой функцией $N_1(r)$. Вероятность правильного обнаружения D при заданной вероятности ложной тревоги F оцениваем по критерию Неймана – Пирсона [3].

Величина отраженного сигнала $S_1(r_0)$ от некоторой i – той оптической неоднородности среды (объекта) на расстоянии r_0 от лидара, определяется лидарным уравнением, например, [1].

$$S_1(r_0) = \frac{P_o K_A}{r_0^2} G_{от} \exp \left\{ -2 \int_0^{r_0} \mathcal{E}(r) dr \right\}, \quad (1)$$

где P_o – мощность излученного лазерного импульса; K_A – аппаратная константа; $G_{от}$ – коэффициент отражения оптической неоднородности; $\mathcal{E}(r)$ – объемный коэффициент ослабления среды по трассе зондирования.

Для определения порогового значения $N_1(r)$ введем следующую функцию

$$L_1(r) = \ell n \frac{S(r)}{N(r)}, \quad (2)$$

где $S(r)$ – сигнал обратного рассеяния. Условие обнаружения определяется выполнением неравенства $L_1(r) > 0$. Пороговую функцию $N_1(r)$ представим в следующем виде

$$N_1(r) = \frac{P_o K_A K_n(r)}{2r^2} \bar{G}_\pi C \tau_n e^{a_1} \exp \{ -2 \bar{\mathcal{E}} r \}, \quad (3)$$

где \bar{G}_π и $\bar{\mathcal{E}}$ – средние значения коэффициентов обратного объемного рассеяния $G_\pi(r)$ и ослабления $\mathcal{E}(r)$ среды, соответственно; $K_n(r)$ – некоторая функция, определяемая ниже; C – скорость света; τ_n – длительность лазерного импульса; $a_1 = \ln \bar{G}_\pi$.

В условии (2) входит сигнал обратного рассеяния $S(r)$, который сравнивается с пороговым сигналом $N_1(r)$.

$$S(r) = \frac{P_o K_A}{2r^2} C \tau_n G_\pi(r) \exp \{ -2 \int \mathcal{E}(r) dr \}. \quad (4)$$

С учетом выражения (4) условие обнаружения получим в следующем виде:

$$\ell n G_\pi(r) - a_1 - 2 \int_0^r (\mathcal{E}(r') - \bar{\mathcal{E}}) dr' > \ell n K_n(r). \quad (5)$$

Интеграл в левой части неравенства (5) представляет собой случайную величину с нулевым средним. Согласно центральной предельной теореме

распределение этого интеграла при $r \gg r_{2k}$, (r_{2k} – интервал корреляции процесса) $\mathcal{E}(r)$ стремится к нормальному распределению с нулевым средним и дисперсией $D_3 = 4D_2 r_{2k} r$,

где $D_2 = \overline{\mathcal{E}^2} - \bar{\mathcal{E}}^2 = e^{2a_2 + \sigma_2^2} (e^{\sigma_2^2} - 1)$; $a_2 = \overline{\ell n \mathcal{E}}$;

$$\sigma_2^2 = \overline{(\ell n \mathcal{E} - \overline{\ell n \mathcal{E}})^2}.$$

Интервал корреляции равен

$$r_{2k} = \frac{1}{D_2} \int_0^\infty (R_\mathcal{E}(\rho) - \bar{\mathcal{E}}^2) d\rho. \quad (6)$$

Левую часть неравенства (5) можно рассматривать как разность двух статистически независимых нормально распределенных случайных величин. Как известно, такая разность будет также распределена по нормальному закону с дисперсией D_4 , равной сумме дисперсий составляющих величин, т.е.

$$D_4 = \sigma_1^2 + D_3, \quad (7)$$

где $\sigma_1^2 = \overline{(\ell n G_\pi - \overline{\ell n G_\pi})^2}$; $a_1 = \overline{\ell n G_\pi}$.

Вероятность ложной тревоги F равна вероятности выполнения неравенства (5). Отсюда легко найти функцию $K(r)$ при заданном значении

$$K_n(r) = \exp \left\{ U_o \sqrt{\sigma_1^2 + 8D_2 r_{2k} r} \right\}, \quad (8)$$

где U_o – корень уравнения $1/2 - \Phi(U) = F_o$, а $\Phi_o(U)$ – интеграл вероятности

$$\Phi_o(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (9)$$

Для определения вероятности правильного обнаружения D необходимо найти вероятность выполнения неравенства $L_1(r) > 0$. При этом в выражении (2) функцию $S(r)$ следует заменить на функцию $S_1(r_0)$, определяемую выражением (1). В результате получаем

$$D = P \left(\ell n \frac{G_{от}}{e^{a_1} C \tau_n K_n(r)} > 2 \int_0^r (\mathcal{E}(r) - \bar{\mathcal{E}}) dr \right). \quad (10)$$

Учитывая нормальное распределение интеграла от $\mathcal{E}(r) - \bar{\mathcal{E}}$, равенство (10) можно записать в виде

$$D = \frac{1}{2} + \Phi_o(U_1),$$

$$U_1 = \frac{1}{\sqrt{D_3}} \ell n \frac{2G_{от}}{e^{a_1} C \tau_n K_n(r)}. \quad (11)$$

Формулы (8) и (11) позволяют определять характеристики алгоритма обнаружения $D = f(F)$, однако требуют априорных сведений о параметрах случайных процессов $G_\pi(r)$ и $\mathcal{E}(r)$.

Сущность предложенного корреляционного алгоритма обнаружения заключается в непрерывном сравнении текущего значения сигнала обратного рассеяния с адаптивной пороговой функцией $N_2(r)$, которая представляет собой копию сигнала обратного рассеяния, задержанного на величину Δr и умноженного на коэффициент K_{π}

$$N_2(r) = \frac{P_o K_A K_{\pi}}{2(r - \Delta r)^2} C \tau_n \times G_{\pi}(r - \Delta r) \exp\{-2 \int \varepsilon(r') dr'\}. \quad (12)$$

Величина задержки Δr в (12) выбирается малой по сравнению с r_{2k} и r ; $\Delta r \approx C \tau_n$. В данном случае условие корреляционного обнаружения получено в виде

$$L_2 = \ln \frac{s(r)}{N_2(r)} = -\ln K_{\pi} + \ln G_{\pi}(r) - \ln G_{\pi}(r - \Delta r) - 2 \int_{r-\Delta r}^r \varepsilon(r') dr' > 0. \quad (13)$$

Следовательно, вероятность ложной тревоги будет равна

$$F = P \left(\ln G_{\pi}(r) - \ln G_{\pi}(r - \Delta r) - 2 \int_{r-\Delta r}^r \varepsilon(r') dr' > \ln K_{\pi} \right). \quad (14)$$

Для вычисления вероятности F необходимо найти закон распределения случайной величины в левой части неравенства в выражении (14). Случайная величина $X = \ln G_{\pi}(r) - \ln G_{\pi}(r - \Delta r)$ в уравнении (14) представляет собой разность двух нормально распределенных величин с равными средними значениями и коэффициентом корреляции $\frac{1}{\sigma_1^2} R_1(\Delta r)$. Полная случайная величина X также имеет нормальное распределение с нулевым средним значением и дисперсией $2(\sigma_1^2 - R_1(\Delta r))$. Случайная величина $Y = 2 \int_{r-\Delta r}^r \varepsilon(r') dr'$ в (14) при Δr значительно меньше r_{2k} имеет логарифмически – нормальное распределение со средним значением $2\bar{\varepsilon}\Delta r$ и дисперсией равной $4D_2(\Delta r)^2$. Для упрощения расчетов в предположении стационарности процесса $\varepsilon(r)$ аппроксимируем логарифмически-нормальное распределение величины Y нормальным распределением с таким же средним значением и дисперсией. Тогда распределение величины $X - Y$ будет подчиняться нормальному распределению со средним значением $2\bar{\varepsilon}\Delta r$ и дисперсией $D_5 = 2(\sigma_1^2 - R_1(\Delta r)) + 4D_2(\Delta r)^2$. Соответственно имеем

$$K_{\pi} = \exp \left\{ 2\bar{\varepsilon}\Delta r + U_o \sqrt{2(\sigma_1^2 - R_1(\Delta r)) + 4D_2(\Delta r)^2} \right\}, \quad (15)$$

где U_o – корень уравнения (9).

Пороговый коэффициент K_{π} не зависит от r , а вероятность правильного обнаружения определяется выражением

$$D = P \left(\ln G_{\pi}(r_o - \Delta r) + 2 \int_{r_o - \Delta r}^{r_o} \varepsilon(r) dr \right) < \ln \frac{2G_o r}{C \tau_n K_{\pi}} \quad (16)$$

Случайная величина в левой части неравенства (16) также имеет нормальное распределение со средним значением $a_1 + 2\bar{\varepsilon}\Delta r$ и дисперсией $\sigma_1^2 + 4D_2(\Delta r)^2$. Значение вероятности правильного обнаружения для корреляционного алгоритма определяется выражением (11), где параметр U_1

$$U_1 = (\sigma_1^2 + 4D_2(\Delta r)^2)^{-\frac{1}{2}} \left(\ln \frac{2G_o r}{e^{a_1} C \tau_n K_{\pi}} - 2\bar{\varepsilon}\Delta r \right). \quad (17)$$

Для увеличения D необходимо увеличивать значение параметра U_1 . С целью выявления зависимости U_1 от Δr будем считать $G_{\pi}(r)$ дифференцируемой в среднеквадратичном. Автокорреляционную функцию такого процесса для малых Δr можно записать в виде

$$R_1(\Delta r) = \sigma_1^2 - \frac{W_{\pi}^2}{r} (\Delta r)^2, \quad (18)$$

где $W_{\pi}^2 = -R''(0)$ (штрихи означают производную по аргументу).

Равенство (15) с учетом (18) примет вид

$$K_{\pi} = \exp \left\{ (2\bar{\varepsilon} + U_o \sqrt{W_{\pi}^2 + 4D^2}) \Delta r \right\}. \quad (19)$$

Подставляя (19) в (17) получим оптимизированное значение параметра U_1 .

$$U_1 = (\sigma_1^2 + 4D_2(\Delta r)^2)^{-\frac{1}{2}} \times \left\{ \ln \frac{2G_o r}{e^{a_1} C \tau_n} - (2\bar{\varepsilon} + U_o \sqrt{W^2 + 4D^2}) \Delta r \right\}. \quad (20)$$

Сравнительные исследования выявили следующие преимущества корреляционного метода: увеличение в 10 и более раз чувствительности обнаружения ($\bar{G}_{\pi} \approx 0,005-0,01$)/км), отсутствие необходимости в априорных данных о параметрах атмосферы (гидросферы), независимость характеристик обнаружения от расстояния, работа в РМВ. При допустимом значении вероятности ложной тревоги $F < 10^{-3}$ достаточно надежное обнаружение с вероятностью $D > 0,9$ обеспечивается по всей длине трассы длиной до 10 км для неоднородностей s ($G_{\pi} \geq 0,01$)/км. Более того, уже при $W^2 < 5 \cdot 10^4$ (где W^2 – вторая производная автокорреляционной функции случайного процесса G_{π} в нуле) величина D практически не зависит от F для ($G_{\pi} > 5 \cdot 10^{-4}$).

Литература

1. Лазерный контроль атмосферы / Э. Д. Хинкли [и др.] ; под ред. Э. Д. Хинкли. – М., 1976. – 416 с.
2. Иванов, В. И. Многофункциональные лидарные системы / В. И. Иванов, И. А. Малевич, А. П. Чайковский. – Минск, 1986. – 286 с.
3. Фалькович, С. Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.

УДК 621.396.96

УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Ершениа Т.С., Черняк А.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Одной из наиболее актуальных проблем современной диагностики является максимально достоверное измерение временных параметров исследуемых сигналов в том числе в условиях нестабильности самих формируемых сигналов. С учетом современных технических возможностей погрешность от нестабильности некоторых исходных параметров существенно влияет на точность результата. По этому основной целью данной работы является разработка метода измерения временных интервалов исследуемых временных процессов, существенно уменьшающего погрешность, связанную с нестабильностью задающих частот.

Ключевые слова: прерывистая импульсная последовательность, время задержки импульсной последовательности, погрешность от нестабильности параметров.

INCREASING THE ACCURACY OF MEASURING TIME PARAMETERS WITH INSTABILITY OF THE PARAMETERS OF PULSE SIGNALS

Isaev A., Suchodolov U., Eroshenya T., Cherniak A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. One of the most pressing problems of modern diagnostics is the maximally reliable measurement of the time parameters of the signals under study, including under conditions of instability of the generated signals themselves. Taking into account modern technical capabilities, the error from the instability of some initial parameters significantly affects the accuracy of the result. Therefore, the main goal of this work is to develop a method for measuring the time intervals of the studied time processes, which significantly reduces the error associated with the instability of the driving frequencies.

Key words: discontinuous pulse train, pulse train delay time, error from parameter instability.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Одной из наиболее важных проблем современного диагностики является максимально достоверное измерение параметров исследуемых процессов. А с учетом возможностей современного мира, когда исследуемые параметры и характеристики минимизируются, это проблема становится все более актуальной. Не обошла эта проблема и измерения различных временных параметров. Так измерение малых временных интервалов требует не только высокой чувствительности фиксируемых параметров, но и минимальной погрешности от нестабильности самих формируемых сигналов. Однако, у наиболее широко распространенных на сегодняшний день способов есть основной недостаток – это существенная зависимость точности измерения временного интервала от технических параметров используемого оборудования и ограниченный учет влияния нестабильности входных параметров на получаемый конечный результат. Целью работы является разработка метода измерения временных интервалов исследуемых временных процессов, существенно уменьшающего погрешность, связанную с нестабильностью задающих частот.

Анализируя последовательности сигналов с различными параметрами было получено, что наиболее оптимальными для достижения цели является сложная последовательность, состоящая из двух двойных импульсных последовательностей прямоугольной формы (рис. 1).

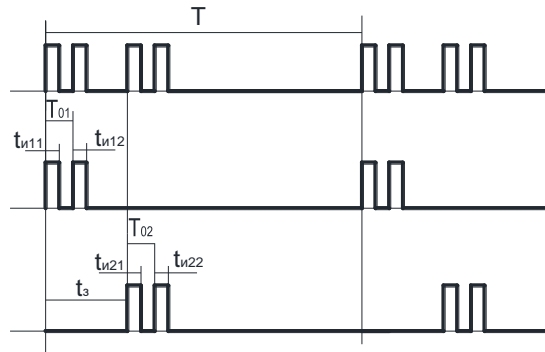


Рисунок 1 – Исследуемая импульсная последовательность

Учитывая, что: $t_{и11} = t_{и12} = t_{и21} = t_{и22} = t_{и}$ и $T_{01} = T_{02} = T_0$, комплексные амплитуды n-ой гармоники такой последовательности импульсов можно определить как:

Для первой прерывистой последовательности с импульсами 1 и 2.

Уравнение для первого импульса имеет вид

$$|U_1| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_{и}}). \quad (1)$$

Для второго

$$|U_2| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_{и}}) e^{-0jn\omega k T_0}, \quad (2)$$

учитывая, что

$$|U_{n1}| = |U_1| + |U_2|,$$

то

$$\begin{aligned} |U_{n1}| &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k T_0} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}), \end{aligned} \quad (3)$$

где E – амплитуда импульсов; T_0 – период импульсов в последовательности; t_n – длительность импульсов; n – номер гармоники; ω – циклическая частота.

Аналогично для второй прерывистой последовательности с импульсами 3 и 4.

Уравнение для третьего импульса имеет вид

$$|U_3| = \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3}, \quad (4)$$

где t_3 – время задержки второй импульсной последовательности.

И для четвертого:

$$\begin{aligned} |U_4| &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k (t_3 + T_0)} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} e^{-jn\omega k T_0}, \end{aligned} \quad (5)$$

следовательно,

$$\begin{aligned} |U_{n2}| &= |U_3| + |U_4| = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} e^{-jn\omega k T_0} = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} (1 + e^{-jn\omega k T_0}), \end{aligned} \quad (6)$$

где t_3 – время задержки второй импульсной последовательности.

Тогда, комплексная амплитуда n -ой гармоники представленной прерывистой последовательности импульсов определяется как сумма этих двух импульсных последовательностей:

$$\begin{aligned} |U| &= |U_{n1}| + |U_{n2}| = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}) + \\ &+ \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) e^{-jn\omega k t_3} (1 + e^{-jn\omega k T_0}) = \\ &= \frac{E}{\pi n j} (1 - e^{-jn\omega t_n}) (1 + e^{-jn\omega k T_0}) (1 + e^{-jn\omega k t_3}), \end{aligned} \quad (7)$$

или, с учетом преобразования в тригонометрической форме амплитуда n -ой спектральной составляющей имеет вид

$$|U_n| = \frac{4E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|. \quad (8)$$

Согласно выражению 8 можно сделать вывод, что в качестве основного информативного параметра при измерениях временных интервалов могут выступать длительность импульсов в последовательности t_n , период импульсов в последовательности T_0 и время задержки между двумя импульсными последовательностями t_3 . Однако чаще всего наибольшее информативным параметром будет выступать время задержки между двумя импульсными последовательностями. С помощью программного обеспечения Mathcad проанализируем изменение амплитудно-частотного спектра прерывистой импульсной последовательности в зависимости от изменения время задержки при равных остальных временных параметрах. В этом случае зависимости имеют следующий вид (рис. 2).

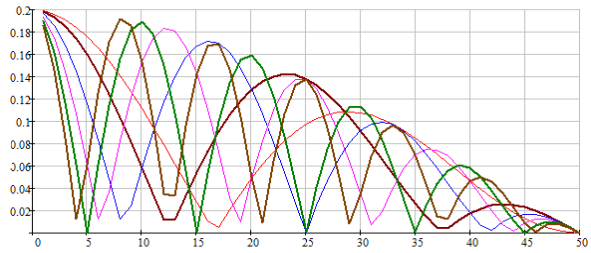


Рисунок 2 – Изменение амплитудно-частотного спектра прерывистой импульсной последовательности в зависимости от изменения время задержки при $T = 20$ мсек $T_0 = 0,2$ мсек, $t_n = 0,1$ мсек: 1) $t_3 = 2T_0$, 2) $t_3 = 4T_0$, 3) $t_3 = 6T_0$, 4) $t_3 = 8T_0$, 5) $t_3 = 10T_0$, 6) $t_3 = 12T_0$

Для анализа определим абсолютную погрешность, влияющую на формирование импульсной последовательности. Приращение амплитуды $|U_n|$, являющееся абсолютной погрешностью и образующееся в результате некорректированных изменений параметров E , ω , t_n и T_0 можно определить как

$$\begin{aligned} |\Delta U_{nE\omega t_n T_0}| &= \frac{\delta |U_n|}{\delta E} \Delta E + \frac{\delta |U_n|}{\delta \omega} \Delta \omega + \\ &+ \frac{\delta |U_n|}{\delta t_n} \Delta t_n + \frac{\delta |U_n|}{\delta T_0} \Delta T_0 + \frac{\delta |U_n|}{\delta t_3} \Delta t_3, \end{aligned}$$

где ΔE , $\Delta \omega$, Δt_n , ΔT_0 , и Δt_3 – соответственно изменения параметров E , ω , t_n , T_0 и t_3 .

При этом, первые четыре члена выражения являются абсолютной погрешностью при измерении Δt_3 .

Для определения минимальной чувствительности измерений на флуктуацию основных параметров импульсной последовательности определим частные производные и приравняем их к нулю.

$$\frac{\delta |U_n|}{\delta E} = \frac{4}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \cdot \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta |U_n|}{\delta t_n} &= \frac{2E\omega}{\pi} \operatorname{sign} \left(\sin \frac{n\omega t_n}{2} \right) \times \\ &\times \cos \frac{n\omega t_n}{2} \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|, \end{aligned} \quad (9)$$

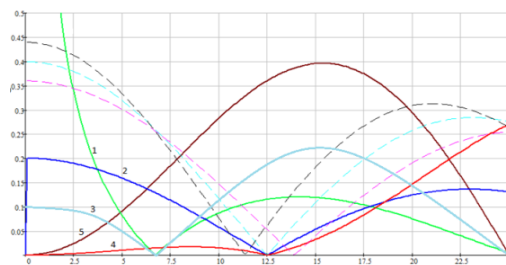
$$\frac{\delta|U_n|}{\delta T_0} = \frac{2E\omega}{\pi} \operatorname{sign}\left(\cos\frac{n\omega T_0}{2}\right) \times \sin\frac{n\omega T_0}{2} \left| \sin\frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos\frac{n\omega t_3}{2} \right|, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta|U_n|}{\delta\omega} = & \frac{2E}{\pi} \left(t_n \cos\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \times \right. \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - T_0 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \sin\frac{n\omega T_0}{2} \times \\ & \times \cos\frac{n\omega t_3}{2} - t_3 \sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \sin\frac{n\omega t_3}{2} \left. \right) \times \\ & \times \operatorname{sign}\left(\sin\frac{n\omega t_n}{2} \cos\frac{n\omega T_0}{2} \cos\frac{n\omega t_3}{2}\right). \end{aligned} \quad (11)$$

Анализ чувствительности проведенный с помощью ПО Mathcad представлен на рис. 3

Учитывая, что при формировании импульсов с помощью существующих микроконтроллерных средств, можно добиться неустойчивости по амплитуде до 0,01 %, а неустойчивость временных параметров менее 0,0001 %, что ниже неустойчивости опорной частоты анализируемых сигналов, которая может составлять до 10 %, то все дальнейшие действия будут направлены для снижения погрешности связанных с неустойчивости частоты сигнала. Так из уравнения (11) для достижения минимальной чувствительности к ω с допущением, что $T_0 = 2t_n$ (скважность импульсов в двойной импульсной последовательности равен двум), параметры последовательности импульсов определяются из зависимости:

$$t_w \operatorname{tg} \frac{n\omega t_w}{2} = \frac{T_0}{2 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{4}} - T_0 \operatorname{tg} \frac{n\omega T_0}{2}. \quad (12)$$



1 – к частоте следования импульсов ω ; 2 – к длительности импульсов t_n ; 3 – к амплитуде сформированных импульсов E ; 4 – к периоду импульсов в последовательности T_0 ; 5 – к времени задержки в импульсной последовательности t_3

Рисунок 3 – Кривые чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров импульсной последовательности

Литература

1. Чумаков, С. А. Определение начальных фаз высших гармонических составляющих тока нелинейной электромагнитной нагрузки / С. А. Чумаков, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин // Вестник военной академии РБ. – 2016. – Т. 50, № 1. – С. 144–152.
2. Способ определения времени задержки между двумя периодическими последовательностями импульсов: патент ВУ 19225С1 / Ю. В. Суходолов, О. И. Киш, Л. П. Крученко. – Опубл. 30.06.2015.
3. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – Изд. 6. – URSS. – 2018. – 240 с.

УДК 621.396.96

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТОКУ ХОЛОСТОГО ХОДА

Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Сушко А.С., Черняк А.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Одна из частых причин преждевременных отказов электрических машин это пробой межвитковой изоляции. Существующие методы выявления дефектов чаще всего основаны на измерении активного сопротивления между витками в обмотках. Такой подход в производственных условиях не всегда оптимальным. По этому в данной работе рассматривается задача построения измерительной системы для диагностики состояния обмоток электрических машин, который обеспечит возможность косвенного определения дефектов по спектру намагничивающего тока холостого хода, что позволит снизить трудоемкость диагностирования при сохранении высокой достоверности.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, погрешность от неустойчивости параметров, чувствительность к изменениям параметров, спектр намагничивающего тока холостого хода.

MEASURING SYSTEM FOR DIAGNOSTIC STATE OF WINDING OF ELECTRIC MACHINES BY IDLE CURRENT

Isaev A., Suchodolov U., Sushko A., Cherniak A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. One of the most common causes of premature failures of electrical machines is breakdown of interturn insulation. The existing methods for detecting defects are most often based on measuring the active resistance between the turns in the windings. This approach in a production environment is not always optimal. Therefore, in this work, the problem of constructing a measuring system for diagnosing the state of windings of electrical ma-

chines is considered, which will provide the possibility of indirect determination of defects by the spectrum of the magnetizing no-load current, which will reduce the complexity of diagnostics while maintaining high reliability.

Key words: diagnostics of windings of electrical machines, error from parameter instability, sensitivity to parameter changes, spectrum of no-load magnetizing current.

Адрес для переписки: Исаев А.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: isaev0302@gmail.com

Одной из задач диагностики является своевременное определение неисправностей в различного класса электрических машинах – трансформаторах, двигателях постоянного и переменного тока и др. Основной неисправностью, на долю которой может выпадать до девяносто процентов от всех дефектов, это межвитковое замыкание. В настоящее время присутствует большое количество методик по контролю состояния обмоток, но у них есть существенный недостаток – они требуют демонтаж контролируемой электрической машины из технологического оборудования, ее разборку и установка на специальные испытательные стенды [1]. А эта процедура, с одной стороны, не всегда выполнима существующими на предприятиях средствами (отсутствие материальной базы, специалистов), так и сопряжена с остановкой технологических процессов на достаточно длительное время.

Согласно последним результатам исследования одним из способов контроля состояния обмоток может является оценка активного сопротивления между витками в обмотках при работе трансформатора в режиме холостого хода, путем косвенного определения дефектов обмоток электрических машин, по параметрам спектральных составляющих намагничивающего тока.

Одна из проблем такого способа диагностики состояния электрических машин – большая зависимость точности показаний от стабильности параметров электрической сети. По этому при таком подходе получение максимальной точности контроля электромагнитных систем по соотношению временных интервалов между гармониками холостого хода, в основном связано с уменьшением погрешностей от нестабильности частоты промышленной сети. Это возможно путем формирования специальных сигналов, структура спектрального спектра которых позволяет произвести эту компенсацию. Для этого используем организацию прерывистых последовательностей импульсов прямоугольной формы позволяющих с большей эффективностью и с наименьшей погрешностью произвести их формирование. Будем формировать прерывистую последовательность импульсов, представляющие из себя набор из двух пар импульсов сформированных в точках перехода через ноль сигнала первой и высших гармоник.

Структурную схему системы измерения можно представить в следующем виде (рис. 1).

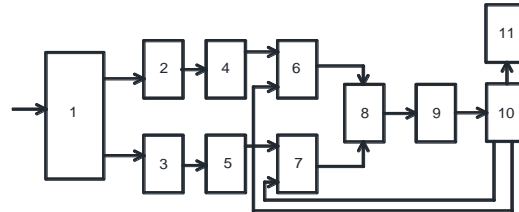


Рисунок 1 – Структура системы для измерения дефектов обмоток электрических машин

Измерительная система содержит регистрирующий прибор 1, фильтр низких 2 и высоких 3 частот, блоки компараторов 4 и 5, два блока формирователей импульсов 6 и 7, схему аналогового умножения (смеситель) 8, избирательное устройство 9, систему индикации и отображения результатов 11 и управляющее устройство 10.

Работа системы в виде диаграммы работы представлена на рис. 2 и выглядит следующим образом. Регистрирующий прибор 1 принимает сигнал (рис. 2, а), представляющий собой характерную кривую тока обмотки электрической машины и передает его на двухканальный блок фильтров 2 и 3, где по одному каналу выделяется спектр первой гармоники (рис. 2, б), а по второму суммарный спектр высших гармоник (рис. 2, в). Далее, с помощью блоков компараторов 4 и 5 выделяются характерные точки кривых спектра и эта информация передается на блоки формирователя импульсов 6 и 7, которые под управлением управляющего устройства 10, задающего основные временные параметры импульсов, формируют две независимые импульсные последовательности (рис. 2, г и 2, д). Затем эти импульсные последовательности посредством смесителя 8 сводятся в одну, которая представляет собой сложную комбинацию импульсов с заданными параметрами (рис. 2, е): T_0 – период импульсной последовательности; t_n – длительность импульсов; и t_3 – время задержки между импульсами в пачке. На избирательном устройстве 9 выделяется необходимая, максимально информативная гармоника (рис. 2, ж), по анализу которой можно судить о состоянии обмоток электрических машин. Вся текущая информация о проводимых измерениях, а так же о состоянии образцов выводится на систему индикации 11.

Оценим погрешность измерения временных параметров импульсной последовательности получаемой из анализа тока холостого хода обмотки трансформатора представленным методом.

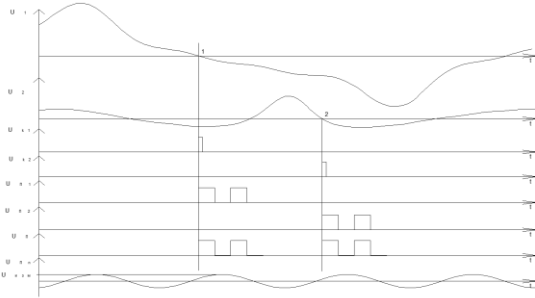
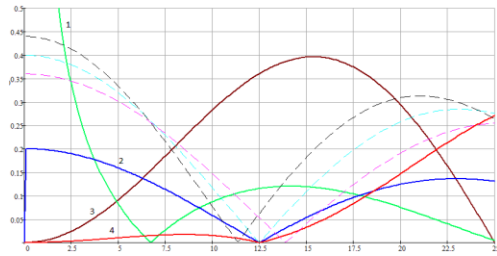


Рисунок 2 – Работа измерительной системы для измерения изменения временных параметров



1 – изменение несущей частоты ω ; 2 – изменение длительности импульсов t_n ; 3 – изменение периода импульсов в последовательности T_0 ; 4 – изменение времени задержки в импульсной последовательности t_3

Рисунок 3 – Кривые чувствительности амплитудно-частотного спектра к изменению параметров импульсной последовательности

Выбрав за ноль начало первой импульсной последовательности и согласно [2] определим, что амплитуда n -ой спектральной составляющей имеет вид

$$|U_n| = \frac{4E}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \times \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right|. \quad (1)$$

Следовательно, абсолютная погрешность, образующаяся в результате некорректированных изменений параметров E , ω , t_n и T_0 определяется по величине полного дифференциала:

$$\begin{aligned} |\Delta U_{nE\omega t_n T_0}| &= \frac{\delta|U_n|}{\delta E} \Delta E + \frac{\delta|U_n|}{\delta \omega} \Delta \omega + \\ &+ \frac{\delta|U_n|}{\delta t_n} \Delta t_n + \frac{\delta|U_n|}{\delta T_0} \Delta T_0 + \frac{\delta|U_n|}{\delta t_3} \Delta t_3, \end{aligned}$$

где ΔE , $\Delta \omega$, Δt_n и ΔT_0 – соответственно изменения параметров E , ω , t_n , T_0 , а Δt_3 изменения.

Чувствительность к изменениям параметров получили из выражения (1), проанализировав частные производные. Учтем, что с помощью цифровых средств, можно добиться нестациональности по амплитуде порядка 0,01 %, а нестациональность временных параметров может составлять менее 0,0001 %. При этом нестациональность задающей частоты (в данном случае частоты сети) может достигать 1 % и более.

Далее, согласно проведенных исследований и реальных возможностей было определено, что наиболее оптимально использовать период импульсов в последовательности равное в пределах 0,01 от периода входного сигнала и скважности этих импульсов равное двум. Отсюда получились основные параметры импульсной последовательности: частота питающей сети 50 Гц ($\omega = 314$), следовательно $T = 20$ мсек, $T_0 = 0,2$ мсек, $t_n = 0,1$ мсек, $E = 3,3$ В.

В соответствии с полученными параметрами был проведен анализ областей чувствительности (рис. 3) и определены гармоники, наименее чувствительные к флуктуации частоты полученной последовательности и при этом максимально чувствительную к изменению информационного параметра t_3 . Это седьмая гармоника ($n7$).

Из частных производных выражения (1) определим погрешности, связанные с флуктуацией неинформативных параметров $|\Delta U_{E\omega t_n T_0}|$, учитывая, что: $\Delta E = 0,001$; $\Delta \omega = 3,14$; $\Delta t_n = \Delta T_0 = 0,00001$, информативный параметр $t_3 = 4$, $T_0 = 0,8$ мсек.

Следовательно,

$$\begin{aligned} |\Delta U_{E\omega t_n T_0}| &= \frac{d|U_n|}{dE} \Delta E + \frac{d|U_n|}{d\omega} \Delta \omega + \frac{d|U_n|}{dt_n} \Delta t_n + \\ &+ \frac{d|U_n|}{dT_0} \Delta T_0 = \left(\frac{4}{\pi n} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \right) \times \\ &\times \left(\frac{2E}{\pi} \left(\begin{aligned} &\left(\begin{aligned} &t_n \cos \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \times \\ &\times \cos \frac{n\omega t_3}{2} - T_0 \sin \frac{n\omega t_n}{2} \times \\ &\times \sin \frac{n\omega T_0}{2} \cos \frac{n\omega t_3}{2} - \\ &- t_3 \sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \times \\ &\times \sin \frac{n\omega t_3}{2} \end{aligned} \right) \times \\ &\times \text{sign} \left(\sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega T_0}{2} \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right) \end{aligned} \right) \Delta \omega + \\ &+ \left(\frac{2E\omega}{\pi} \text{sign} \left(\sin \frac{n\omega t_n}{2} \cos \frac{n\omega t_n}{2} \left| \cos \frac{n\omega T_0}{2} \right| \times \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \right) \Delta t_n + \\ &+ \left(\frac{2E\omega}{\pi} \text{sign} \left(\cos \frac{n\omega T_0}{2} \right) \sin \frac{n\omega T_0}{2} \left| \sin \frac{n\omega t_n}{2} \right| \times \right) \times \\ &\quad \left. \times \left| \cos \frac{n\omega t_3}{2} \right| \right) \times \\ &\quad \times \Delta T_0 = 6,63710^{-5}. \end{aligned}$$

Т.е. погрешность измерения, в том числе связанная с флуктуацией основных параметров импульсной последовательности будет составлять около 0,005 %.

Литература

1. Беспалов, В. Я. Электрические машины / В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М. : Академия, 2008. – 320 с.
2. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. – Изд. 6. – URSS. – 2018. – 240 с.

УДК 681.2.083

РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДУЛЯ УСКОРИТЕЛЯ AN 2500 ДЛЯ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ АВТОФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ

Камышан А.С., Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Комплекс для измерения энергетических спектров Резерфордского обратного рассеяния ионов (РОР) и ионноиндуцированного характеристического излучения (ХРИ) модернизирован для изучения объектов с повышенным газовыделением в условиях дифференциальной откачки и с использованием выведенного в атмосферу пучка. С использованием автофокусировки на выходе стеклянного капилляра получены значения плотности ионного тока, на 3 порядка величины превышающие значения плотности ионного тока на входе капилляра при одновременном увеличении его локальности до 5 мкм.

Ключевые слова: энергетический спектр, ионноиндуцированное характеристическое излучение, локальный анализ, ионный пучок, автофокусировка.

POTENTIALITY EXPANSION OF AN-2500 ACCELERATOR HARDWARE-SOFTWARE MODULE FOR LOCALLY PRECISE MATERIAL COMPOSITION RESEARCH BY MEANS OF AUTOFOCUSED ION BEAM

Kamyshan A., Pilko V. (sr.), Pilko V.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. Facility for Rutherford Backscattering and Proton-Induced X-Ray Emission energetic spectra measurements was modified for excessive gas emission objects study in differential pumping conditions by means of beam guided to atmosphere. Using beam autofocusing effect three order of magnitude increment of ion beam density between entrance and exit of glass capillary were obtained with locality up to 5 μm.

Key words: energy spectrum, proton induced x-ray emission, local analysis, ion beam, autofocusing.

*Адрес для переписки: Пилько В.В., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220108, Республика Беларусь
e-mail: pilkow@mail.ru*

Развитие материаловедения показало, что в основе уникальности свойств материалов, как правило, лежит его специфический состав и характер распределения компонент как по глубине, так и по плоскости. Наряду с этим, чрезвычайно актуальной является задача исследования изменений, протекающих в материалах при внешних воздействиях. Этими факторами и обусловлена тенденция к повышению локальности анализа.

Как правило, локальность микроанализа материалов с помощью высокоэнергетических пучков зараженных частиц достигается за счет использования сложных и прецизионных фокусирующих устройств. Метод фокусировки заряженных частиц с использованием диэлектрических капилляров был разработан в течение двух последних десятилетий [1–3].

Методика и обсуждение результатов. На базе ионного ускорителя AN-2500 создан комплекс для измерения энергетических спектров Резерфордского обратного рассеяния ионов (РОР) и ионноиндуцированного характеристического излучения (ХРИ) объектов с повышенным газовыделением в условиях дифференциальной откачки и с использованием выведенного в атмосферу пучка. Общий вид комплекса приведен на рис. 1. Дифференциальная откачка форкамеры

осуществляется механическим вакуумным насосом, что позволяет получать вакуум в капиллярной системе на уровне 1 Па.



Рисунок 1 – Общий вид программно-аппаратного комплекса для высоколокального исследования состава материалов автофокусированным протонным пучком

Пучок протонов, монохроматизированный магнитом-сепаратором ускорителя ионов AN-2500, через ионопровод ускорителя и входной коллиматор щелевого прибора, подается на длиннофокусный инжектирующий канал форкамеры диаметром 1 мм и длиной 10 мм, находящийся под «плавающим» положительным потенциалом. Далее пучок протонов подается на вход стеклянного капилляра. Благодаря явлению автофокусировки на выходе стеклянного капил-

ляра можно получать весьма высокие значения плотности ионного тока. Исследования коэффициента пропускания протонов через конусные капилляры с диаметром входного отверстия 0,8 мм и выходным отверстием 5 мкм, проведенные с использованием цилиндра Фарадея, совмещенного с держателем капилляра показали, что прохождение протонного пучка через капилляр сопровождается образованием самоорганизующейся системы пучок-капилляр (ion-guiding – эффектом) внутри капилляра.

Максимальный коэффициент пропускания достигает 25 %, что соответствует увеличению плотности выходного тока в $1,8 \cdot 10^3$ раз. Это существенно сокращает время анализа при одновременном повышении его локальности. Характеристика пучка на выходе капилляра в случае вывода его в атмосферу иллюстрируется рис. 2. Проведенные измерения показали, что при плотности ионного тока на входе в капилляр 20 мкА/см² плотность тока на выходе из него достигает 2,5 мА/см². При этом средний выходной ионный ток составляет 0,5 нА. Эти значения выходного тока сохраняются при изменении энергии ионов на входе в капилляр от 0,5 до 1,5 МэВ. Конструкция модуля предусматривает возможность прецизионного поворота держателя образца с шагом, равным диаметру пучка и обеспечивает угловое сканирование. Программно-аппаратный комплект модуля включает программу управления шаговыми двигателями позиционирования SMD 2.0.

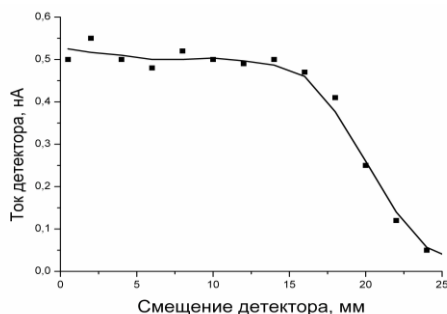


Рисунок 2 – Зависимость среднего выходного тока ионов водорода с энергией 1,4 МэВ от расстояния между выходным торцом капилляра и поверхностью цилиндра Фарадея

Достигнутые значения плотности тока анализирующего пучка позволяют с достаточной статистической достоверностью непрерывно регистрировать спектры РОР в процессе углового сканирования. Достигнута высокая степень автоматизации измерений, реализована программная обработка их результатов. Эти опции реализованы путем использования стандартных (Ortec

Maestro 32, WinPlot 32) и специально разработанных (Total Converter, ViewDifference, IonScat) сервисных программ. Один из типичных результатов измерений, проведенных на треках износа, сформированных с помощью трибометра [4] по методике [5] представлен на рис. 3. Методика позволила выявить область полного износа упрочняющего покрытия.

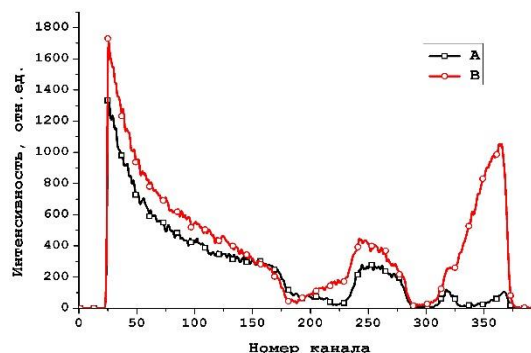


Рисунок 3 – Спектры РОР трека износа покрытия TiN на кремниевой подложке: А – в центре трека, В – со смещением на 0,1° от центра

К основным преимуществам разработки относятся низкая стоимость, простая форма исследуемого образца, экспрессность испытаний (порядка десяти минут), высокая локальность измерений по глубине слоя (10 нанометров), по плоскости образца (10 мкм либо 0,1°). Метод идеально подходит для исследования тонких образцов, содержащих малое количество исследуемого элемента, а также послойного анализа массивных объектов.

Литература

1. Nebiki, T. In-air PIXE analysis by means of glass capillary optics / T. Nebiki, M. HasnatKabir, T. Narusawa // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2006. – № 249. – P. 226–229.
2. Fujita, N. Development of two-dimensional mapping technique by in-air-PIXE with metal capillary / N. Fujita, K. Ishii, H. Ogawa // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. – 2010. – №3. – P. 321–327.
3. Комаров, Ф. Ф. Формирование ионных пучков микронных размеров с высокой пространственной плотностью частиц / Ф. Ф. Комаров, А. С. Камышан, П. А. Гришин // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2013. – Т. 57, №1. – С. 51–54.
4. Устройство для измерения коэффициента трения поверхностных слоев : пат ВУ 12676 / В. В. Пилько, В. В. Пилько. – Опубл. 30.08.2021.
5. Пилько, В. В. Программно-аппаратный комплект для исследования процессов трения и износа методом «диск на плоскости» / В. В. Пилько, В. Н. Кулешов, Ф. Ф. Комаров // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 3. – С. 279–285.

УДК 004.056

СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧКИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ (ВОЛС)

Карташова Ж.К.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Рассмотрены основные методы защиты от утечки информации, которая возможна в случае осуществления несанкционированного доступа к ВОЛС.

Ключевые слова: информационная безопасность волоконно-оптических линий связи, методы несанкционированного доступа, противодействие несанкционированному доступу.

SPECIAL METHODS OF PROTECTION AGAINST LEAKAGE IN FIBER OPTICAL COMMUNICATION LINES (FOCL)

Kartashova J.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. The main methods of protection against information leakage, which is possible in the event of unauthorized access to fiber-optic communication lines, are considered.

Key words: information security of fiber-optic communication lines, methods of unauthorized access, counteracting unauthorized access.

*Адрес для переписки: Карташова Ж.К., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: iu8-bmstu@yandex.ru*

В связи с наличием потенциальной угрозы несанкционированного съема информации во всем мире ведутся работы по защите ВОЛС. Работа посвящена следующим основным направлениям защиты ВОЛС:

– разработка технических средств защиты от несанкционированного доступа к информационным сигналам;

– разработка технических средств контроля несанкционированного доступа к информационному оптическому излучению.

Вследствие того, что датчики перехвата излучений из оптических волокон действующих ВОЛС отсутствуют как класс приборов, для выбора наиболее эффективного устройства направленного вывода пользуются технологиями изготовления направленных волоконных ответвителей. Проанализируем их подробнее с учетом эффективности технологии, малого времени изготовления и минимального количества и величин демаскирующих признаков.

Оптико-акустические **методы 1** требуют хорошего контакта на большой длине со звукопроводом и мощного направленного звукового потока вдоль волокна. Хотя вносимые оптические потери могут быть не большими $\sim 0,001 - 0,1$ дБ, из-за высокой спектральной селективности появляются побочные резонансы на спектрах пропускания и на гармониках. По этим демаскирующим признакам – постоянном звуке и спектрам пропускания можно зарегистрировать как факт установки датчика перехвата, так и его координату. В широком звуковом поле возникнут проблемы с эффективностью собирания ответвленного излучения. Метод практически продемонстрирован, но имеет явные демаскирующие признаки, которые хорошо себя проявляют. В месте ответвления

должны быть электронные звуковые устройства, которые сами по себе сильно излучают. **Метод 1** не пригоден в качестве эффективного.

Метод 2 – вывод длиннопериодными решетками. Требуется точной укладки двух волокон, чтобы они могли обмениваться излучением оболочечных мод, и записи одинаковых длиннопериодных волоконных решеток. Трудно воспроизводим на практике, требует использования мощных ультрафиолетовых лазеров и прецизионных оптических юстировок для записи длиннопериодных решеток. В качестве мощных демаскирующих признаков проявляются спектрально-селективные потери, которые можно легко обнаружить также по оптическим гармоникам. Метод пригоден в основном для лабораторных демонстраций.

Метод 3 – вывод дифракционной решеткой, прислоненной сбоку к шлифованному волокну. Для шлифования боковой поверхности волокна требуется длительный технологический процесс на изогнутом волокне ВОЛС. Абразивное воздействие приводит к высокой вероятности разрушения волокна. Демаскирующими признаками устройства вывода являются селективные потери, френелевское отражение от прислоненной гофрированной поверхности решетки и изменение состояния поляризации проходящего излучения. Нет возможности заранее спрогнозировать, какие получатся оптические потери на перехват. Высокая трудоемкость метода и непредсказуемость результата делают метод практически не пригодным для спектрально широкополосного перехвата излучения с ВОЛС.

Метод 4 – изготовление ответвителей путем шлифовки двух боковых поверхностей волокон. Высока вероятность разрушения, сильная спек-

тральная селективность, трудности окончательной юстировки. Положительным качеством метода является возможность при юстировке отвести для перехвата требуемое количество оптической мощности, которую можно контролировать на выходе отводящего оптического волокна. Сложная технологическая оснастка и длительный процесс шлифовки с контролем геометрии и глубины шлифования. Длительная шлифовка и юстировка могут быть обнаружены аппаратурой мониторинга ВОЛС, спектрометрами, рефлектометрами и приборами, регистрирующими изменение поляризации излучения.

Метод 5 – сплавление направленных ответвителей может быть приспособлен для подключения к магистральной волоконной линии отводящего оптического волокна с растяжением сплавленного участка и образования адиабатического оптического перехода с малыми вносимыми потерями. Подплавление отводящего волокна таким способом требует длительного воздействия нагревателем с температурой около 1500 градусов С на длине общего контакта волокон 1–2 см. Положительными факторами технологии являются возможность контролировать количество ответвленной оптической мощности. Демаскирующие признаки такие же, как и в предыдущем случае: спектрально-селективные потери, чувствительность к поляризации, температуре, механическим воздействиям. Метод не пригоден для оперативного подключения, так как требует прецизионного контроля и регулирования процесса сплавления волокон. Используется в лабораторных и производственных условиях для изготовления одномодовых и многомодовых направленных ответвителей.

Метод 6 – вывод на микроизгибах при зажиме волокна между двумя гофрированными или шероховатыми поверхностями может иметь спектральную селективность (демаскирующий признак) и диффузионное рассеяние выходящего излучения. Низкая эффективность сбора ответвленного излучения. Может давать мощное обратное отражение, которое обнаруживается оптическими рефлектометрами.

Метод 7 – вывод на регулярном изгибе волокна. Имеется возможность контролировать количество выведенной из волокна оптической мощности, но низкая эффективность сбора (потери 10–30 дБ) выведенного излучения в отводящее волокно. Механическое напряжение волокна на изгибе обнаруживается бриллюэновскими рефлектометрами и поляриметрами по изменению состояния поляризации. Достоинство метода – простота вывода с минимальными технологическими манипуляциями с волокном. На практике используется для вывода и инъекции лазерного излучения в устройствах подключения. Средние потери ~ дБ легко обнаруживаются системами мониторинга ВОЛС.

Метод 8 – вывод на локальном изгибе – требует минимального количества технологических манипуляций с волокном и может производиться

быстро за время ~ 1 мин. Можно рассчитать и спрогнозировать вносимые оптические потери на уровне 0,001–0,1 дБ. Недостаток – потери на изгибе существенно зависят от профиля показателя преломления волокна, радиуса изгиба и длины изогнутого участка. Механически изгиб приводит к двулучепреломлению и изменению состояния поляризации, по которым место изгиба волокна может быть определено бриллюэновским рефлектометром. Возможно проявление спектральной селективности изогнутого участка вывода из волокна. При короткой длине изогнутого участка 1–2 мм, можно добиться удовлетворительного собирания выведенного излучения в фотоприемник или в волокно для последующего оптического усиления. Механическое напряжение на локальном изгибе ограничивает срок службы устройства перехвата и волокно может разрушиться, обнаружив место установки датчика перехвата и прервав работу ВОЛС.

Метод вывода и перехвата на локальном изгибе 8, возможно, наиболее предпочтителен для практической реализации и допускает его дальнейшее усовершенствование с целью придания устройству перехвата оптической широкополосности, контролируемых вносимых оптических потерь, повышения эффективности собирания выведенного излучения в отводящее волокно при минимальном количестве других демаскирующих признаков. Уровень вносимых оптических потерь 0,001–0,1 дБ. С помощью миниатюрной электрической дуги можно изготовить локальный изгиб волокна на заданный угол φ с одновременным отжигом изогнутого локального участка волокна длиной меньше 1 мм за время меньше 1 секунды (после установки волокна в технологическую оснастку). Локальный изгиб фактически превращается локальный излом волокна на малый угол φ и для потерь на таком изломе работают не формулы для потерь на участке с радиусом кривизны R , а формулы для эффективности согласования полей мод HE₁₁ при наличии только углового несогласования φ . Одновременно вследствие отжига электрической дугой происходит снятие механического напряжения в зоне изгиба и увеличивается срок службы устройства перехвата. Это минимизирует количество демаскирующих признаков и не происходит прерывания штатного режима работы ВОЛС, так как тепловое воздействие дугой на волокно происходит сравнительно медленно (~ 0,1 сек) и столь низкочастотные сигналы не попадают в полосу пропускания электронных цепей скоростных ВОЛС.

Литература

1. Вишневский, В. М. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневский М. : Техносфера, 2015. – 592 с.
2. Ahson, S. WiMAX: technologies, performance analysis, and QoS / S. Ahson. – CRC Press, 2018. – 279 p.
3. Held, G. Network Design: Principles and Applications / G. Held. Auerbach Publications, 2020. – 852 p.

УДК 621.391

СИГНАТУРА БЛИЗКОЙ ЦВЕТОВОЙ ПАРЫ В СТЕГОАНАЛИЗЕ

Ковынёв Н.В.

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В данной статье рассматривается способ применения комбинированного метода обнаружения стегосообщений в изображениях.

Ключевые слова: стегоанализ, стеганография, изображение, сокрытие.

THE SIGNATURE OF A CLOSE COLOR PAIR IN STEGANALYSIS

Kovynov N.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. This article discusses about approach of applying method of detecting stego in images.

Keywords: steganalysis, steganography, image, concealment.

*Адрес для переписки: Ковынёв Н.В. 2я Бауманская улица, д.5 стр.1, 105005, Москва, Российская Федерация
e-mail: nvkovynov@bmstu.ru, n.kovynov@gmail.com*

Задача стеганографии – сокрытие факта передачи информации, которая встроена в любой мультимедийный контейнер (файл): изображение, аудиофайл, видеофайл. Особенностью скрытой передачи информации является факт сокрытия встраивания информации в мультимедийный файл. Стегоанализ же, напротив, имеет задачу обнаружения факта встраивания стегосообщений в мультимедийные контейнеры. Являясь противоположностями друг друга, данные направления находятся в непрерывном развитии, каждый в своем случае.

Во многих случаях стегоанализа используются универсальные методы, которые иногда называют слепыми. Особенность данных методов является эффективная работа при любых слепых схемах встраивания, иными словами: алгоритмы и схемы встраивания известны только автору стегосообщения.

В данной работе описан метод стегоанализа с использованием сигнатуры близкой цветовой пары. Данный метод стегоанализа работает на обнаружение встраиваний в мультимедийные файлы способом замены наименее значащих битов (Least Significant Bit, LSB). Данный метод наиболее распространен в электронной стеганографии. Он основан на ограниченных возможностях человеческих органов чувств, в силу которых люди не способны различать незначительные вариации цветов или звуков. Модификация метода LSB довольно популярна в стеганографии, особенно популярен данный способ с изображениями формата JPEG. Где сжатие происходит практически без потерь, потому что сокрытие происходит в младших разрядах коэффициентов, связанных с пользовательской информацией. В результате этого данные методы обладают некоторыми преимуществами, а именно: мультимедиа контейнеры не вызывают подозрений, можно спокойно пересылать изображения; младшие биты

оцифрованных изображений могут иметь различное распределение в зависимости от применявшихся параметров аналого-цифрового преобразования, от дополнительной обработки и от прочих факторов, что делает данный метод наиболее защищенным от обнаружения вложений; реализация не требует множества временных и мощностных ресурсов, так как сама идея довольно проста и эффективна.

Контейнером в случае сигнатуры близкой цветовой пары является цветное изображение высокой плотности, которое не сжато.

В данном методе в качестве сигнатуры используется соотношение близких цветовых пар и уникальных цветов. Метод базируется на подтвержденных гипотезах:

Соотношение близких цветовых пар и уникальных цветов исходного (без стегосообщения) несжатого изображения больше, чем у изображения, которое содержит в себе стегосообщение (встроенное сообщение).

После встраивания стегосообщения в изображение, уменьшается соотношение близких цветовых пар и уникальных цветов в данном изображении.

Если в изображении уже содержится стегосообщение (скрытое встроенное сообщение), то последующие встраивания значительно не изменят соотношение близких цветовых пар и уникальных цветов. Однако, данное утверждение на практике протестировано для малого процента стеговставок.

Эффективность метода измеряется при помощи частоты ложных тревог (False Alarm Rate, FAR) и частоты ложных обнаружений (False Discovery Rate, FDR). Если выбрать порог с фиксированным значением, классификация будет удовлетворительной по некоторым типам устойчивых изображений (земля, здания, объекты, люди), но присутствует высокая вероятность ошибочного обнаружения для клас-

сов других типов изображений (лица, небо и облака, животные).

При использовании переменного порога значений, который основан на статистике изображений, повышается эффективность данного метода, что можно увидеть в табл. 1 и 2.

Таблица 1. FDR при использовании переменного порога значений

Класс изображений	Частота ложных обнаружений (FDR)	
	Переменный порог	Переменный порог
Лицо	87	0
Небо и облака	37	0
Животные	0	4,5

Таблица 2. FAR при использовании переменного порога значений

Класс изображений	Частота ложных тревог (FAR)	
	Постоянный порог	Переменный порог
Лицо	5,5	5,5
Небо и облака	0	0
Животные	47	16

По результатам, представленным в таблицах 1 и 2, видно, что применение переменного порога позволяет исключить ложные обнаружения по следующим классам, а именно: лицо, небо и облака (или цветовые оттенки бежевого и синего). Также, следует отметить, что применение переменного порога снижает частоту ложных тревог в классе животные, что существенно повышает точность данного метода. Однако, следует заметить, что постоянный порог дает более высокие результаты по частоте ложных обнаружений при сравнении с переменным порогом значений.

В заключении стоит отметить, что повышение надежности данного способа стегоанализа можно достичь путем использования выбора порога на основе статистики первого и второго порядка, куда также будет включена плотность цвета и корреляция пикселей, что позволит наиболее эффективно проводить анализ наименее значащих битов в графических изображениях. Стоит отметить, что актуальность по разработке методов стегоанализа относительно методов наименее значащих битов сохранится в виду того, что данный метод стеганографии довольно прост и не требует много ресурсов при его реализации, что обуславливает его популярность. Несмотря на популярность алгоритмов стеганографии, основанных на методе LSB, не стоит забывать об алгоритмах, которые построены на основе глубокого обучения, которые реализуются применением сверточных нейронных сетей.

Литература

1. Вильховский, Д. Э. Обзор методов стеганографического анализа изображений в работах зарубежных авторов / Д. Э. Вильховский // Математические структуры и моделирование. – 2020. – С. 75–102.
2. Steganalysis of LSB encoding in uncompressed images by close colour pair analysis / S. Mitra [et al.] // IT Kanpur Hackers' Workshop 2004 (ИТК-НАСК04), 2004.
3. Бирюков А. Стеганография: реализация и предотвращение / А. Бирюков // Системный администратор. – 2015. – С. 24–27.
4. Кочергина, М. А. Стеганография. Метод замены наименее значащего бита / М. А. Кочергина, Н. В. Первов ; под редакцией Калмыкова Б. М. – Чебоксары : Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, – 2014. – С. 86–89.

УДК 535.39

КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Кольчевская М.Н., Парфимович И.Д., Комаров Ф.Ф.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработка широкополосных экранирующих композитных материалов на основе полимеров, наполненных углеродными наноструктурами, для защиты от электромагнитных излучений, обладающих: высокой износостойкостью, твердостью, селективностью коэффициентов отражения и поглощения электромагнитных излучений в широком спектральном диапазоне, а также снижающих массогабаритное соотношение.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, композитные материалы, антибликовые материалы, радиопоглощающие материалы, безэховые камеры.

COMPOSITE MATERIALS FOR ELECTROMAGNETIC RADIATION PROTECTION SYSTEMS

Kolchevskay M., Parfimovich I., Komarov F.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus

Abstract. development of broadband shielding composite materials based on polymers filled with carbon nanostructures for protection against electromagnetic radiation, possessing: high wear resistance, hardness, selectivity of reflection and absorption coefficients of electromagnetic radiation in a wide spectral range, as well as reducing the weight and size ratio.

Key words: carbon nanotubes, composite materials, anti-glare materials, radio-absorbing materials, echo-free chambers.

Адрес для переписки: Кольчевская М.Н., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevskaya.mary@gmail.com

Воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) различной природы на технические и биологические объекты является существенным фактором, влияющим на их функционирование. Поэтому разработка новых высокоэффективных широкополосных радиопоглощающих материалов становится весьма актуальной для решения проблемы уменьшения помех и электромагнитной совместимости устройств.

При создании широкополосных (ШП) поглощающих покрытий ключевой задачей является согласование поглощающей структуры с окружающей пространством, при котором эффект отражения минимален.

При разработке поглотителей электромагнитных волн используются различные материалы, обладающие способностью поглощать электромагнитные излучения в определенном диапазоне частот. Способность среды поглощать электромагнитное излучение определяется ее электрическими и магнитными свойствами, к которым относятся удельная электропроводность, диэлектрическая и магнитная проницаемости [1].

Такие материалы интересны для применения и в качестве защитного покрытия для экранирования уникальных электронных систем от электромагнитного излучения СВЧ-диапазона [2], включая системы на космических аппаратах. В настоящее время, существует большой интерес к исследованиям процессов поглощения и отражения ЭМИ полимеров с УНТ в широком диапазоне длин волн [3, 4]. Возрастание уровня микроволнового излучения и, так называемого, «электромагнитного загрязнения окружающей среды» объясняет интерес к разработке таких материалов. Кроме того, использование полимеров в качестве матрицы для углеродных нанотрубок позволит значительно улучшить такие физико-механические свойства экранирующих материалов как эластичность и устойчивость к внешним воздействиям, в достаточной мере сохранив экранирующие свойства по сравнению с материалом, состоящим непосредственно из УНТ [5].

Радиопоглощающие покрытия пирамидального (РПМ) типа широко используются на практике при построении высококачественных широкопо-

лосных безэховых камер [6]. Наиболее технологичным в производстве и эксплуатации радиопоглощающих материалов (РПМ) является пенополиуретан. Поглощение электромагнитного излучения в материале обеспечивается углеродосодержащей пропиткой, содержащей частицы углерода либо смесь частиц углерода и феррита. Конструктивно он представляет собой квадратные блоки с периодически профилированной поверхностью [7].

Для достижения требуемого уровня ослабления электромагнитных помех, необходимо большое количество наполнителя – не менее 60 вес.%, что сказывается на ухудшении механических характеристик материала и его долговечности. Использование многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) позволяет уменьшить концентрацию наполнителя для достижения эффективных поглощающих характеристик и, следовательно, позволит сохранить механические свойства исходной полимерной матрицы.

На рис. 1 продемонстрированы части пирамидальных РПМ в разрезе. Экспериментальным методом было определено, что степень окрашивания зависит от количества раствора и метода пропитки, а не от количества наполнителя. Для лучшего результата образец пирамидального РПМ необходимо полностью погружать в раствор композита с добавлением МУНТ и высушивать, периодически переворачивая пирамидками вниз. В противном же случае, раствор не успеет впитаться, и мы получаем или покрытие только на поверхностном слое или неравномерное окрашивание, что значительно ухудшает характеристики безэховости.



Рисунок 1 – Пирамидальные РПМ в разрезе, изготовленные различными методами

Разработанные пирамидальные РПМ непосредственно могут быть использованы в качестве

элементов для радиочастотных безэховых камер, обеспечивающих высокоточное тестирование работоспособности радиолокационных и телекоммуникационных систем, построения диаграмм эффективной площади рассеяния наземных, летательных и космических объектов, проведения испытаний на электромагнитную совместимость электронных устройств.



Рисунок 2 – Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров материалов на базе векторного анализатора цепей N5290A фирмы Keysight Technologies (США)

Исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с радиопоглощающими материалами проводилось в диапазоне от 14 ГГц до 50 ГГц с использованием векторного анализатора цепей (рис. 2). Для перекрытия частотной полосы был использован метод исследований с использованием антенной линии передач. Выходными параметрами выступали отношения амплитуд отраженной электромагнитной волны к падающей, а также прошедшей к падающей и выраженные в децибелах. В качестве объекта сравнения выступал промышленно выпускаемый РПМ. Демонстрируемый уровень безэховости не уступает существующим промышленным образцам, а низкая концентрация

добавки МУНТ незначительно увеличивает массу образцов, а также благоприятно сказывается на сохранении исходных эластичных свойств пенополиуретановой матрицы. За счет дополнительного использования пирамидальных поглотителей с увеличенными размерами, планируется расширение частотного диапазона до 1 ГГц и создание на основе комбинированных пирамидальных РПМ передвижной миниатюрной безэховой камеры.

Литература

1. Латыпова, А. Ф. Анализ перспективных поглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Воронежский государственный университет. – 2012. – С. 70–76.
2. Attenuation of electromagnetic waves by carbon nanotube composites / B. Hornbostel [et al.] // Physica E. – 2008. – Vol. 40, № 7. – P. 2425–2429.
3. Carbon nanotubes filled with ferromagnetic alloy nanowires: Lightweight and wide-band microwave absorber / L. V. Ruitao [et al.] // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 93, № 22. – P. 223105 (1–3).
4. Островский, О. С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О. С. Островский, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Физическая Инженерия Поверхности. – 2003. – Т 1, № 2. – С. 161–173.
5. Ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона бумагой из углеродных нанотрубок / Комаров Ф. Ф. [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 11. – С. 140–145.
6. Мицмахер, М. Ю. Безэховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмахер, Торганов В. А. – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.
7. Структурная оптимизация радиопоглощающих покрытий пирамидального типа / А. Г. Будай [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы междунар. науч.-практ. конф., 27–28 февраля 2013 г. – Минск: НИИ ПФП имени А. Н. Севченко, 2013. – С. 130–132.

УДК 538.915

МЕМРИСТОРНАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

Комаров Ф.Ф.¹, Романов И.А.², Власукова Л.А.², Пархоменко И.Н.², Моховиков М.А.¹,
Цивако А.А.³, Ковальчук Н.С.³

¹НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

²Белорусский государственный университет

³ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы электрофизические свойства и эффект резистивного переключения мемристорной структуры $\text{ITO}/\text{SiN}_x/\text{Si}$. Концентрация избыточных атомов кремния в пленке SiN_x , толщиной ~200 нм, увеличивалась от 16 до 77 % по мере продвижения вглубь образца. Обсуждаются эффект переключения сопротивления и механизмы проводимости в состояниях с высоким и низким сопротивлением. Для данной структуры также обнаружен эффект фотопереключения.

Ключевые слова: нитрид кремния, избыток кремния, мемристор, вольт-амперные характеристики, механизмы проводимости.

MEMRISTOR STRUCTURE BASED ON NONSTOICHIOMETRIC SILICON NITRIDE

Komarov F.¹, Romanov I.², Vlasukova L.², Parkhomenko I.², Mikhovikov M., Tsvako A.³, Kovalchuk N.³

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of BSU

²Belarusian State University

³JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company
Minsk, Belarus

Abstract. The electrophysical properties and the resistive switching effect of the ITO/SiN_x/Si memristor structure have been studied. Concentration of excess silicon atoms in the SiN_x film with a thickness of ~200 nm increases from 16 to 77 % when approaching the Si substrate. The resistive switching effect and conduction mechanism at high and low resistance states are discussed. The photo-switching effect was also found for that structure.

Key words: silicon nitride, silicon excess, memristor, current-voltage characteristics, conduction mechanisms.

Адрес для переписки: Комаров Ф.Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: komarovf@bsu.by

Введение. В связи с повышением требований вычислительных систем к характеристикам запоминающих устройств в настоящее время активно разрабатывается новый тип полупроводниковой энергонезависимой памяти – мемристоры, принцип работы которых основан на использовании двух устойчивых состояний материала: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС). В качестве активного слоя мемристора обычно используют диэлектрики на основе оксидов таких, как TiO₂, HfO₂, TaO_x, SiO₂. Однако в последнее время особый интерес привлекают пленки нитрида кремния с избытком кремния, преимуществом которых является полная совместимость с традиционной кремниевой микроэлектронной технологией [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических свойств структур на основе пленки нитрида кремния SiN_x, с неоднородным по глубине стехиометрическим составом. Обсуждаются возможные механизмы переноса носителей заряда в структурах ITO/SiN_x/Si в состояниях с низким и высоким сопротивлением.

Материалы и методы исследования. Пленка SiN_x (200 нм) наносилась методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе пониженного давления из смеси азота и моносилана при температуре Si подложки (КДБ-10) 800 °С. Для получения неоднородного состава по глубине соотношение реагирующих газов SiH₄/N₂ варьировалось в процессе осаждения. Далее образцы проходили быстрый термический отжиг (1200 °С, 3 мин) в Ar. Пленки ITO с поверхностным сопротивлением 60 Ом/□ наносились в качестве верхнего контакта методом реактивного магнетронного распыления. Фотолитографией на образцах были сформированы квадратные площадки 300×300 мкм из ITO. На обратную сторону тестовых структур наносилась алюминий-галлиевая паста.

Для структурного и элементного анализа использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Измерение вольт-амперных

характеристик (ВАХ) проводилось на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 при комнатной температуре.

Результаты и обсуждение. Методом РОР и РЭМ показано, пленка SiN_x характеризуется градиентом стехиометрического состава по глубине: в приповерхностном слое нитрида уровень обогащения кремнием в сравнении со стехиометрией существенно ниже в сравнении со слоем, прилегающим к границе «нитрид/кремний». Толщина каждого из этих слоев, составила ~100 нм. Усредненная концентрация избыточных атомов кремния, определенная методом РОР, в верхнем и нижнем нитридных слоях составила 19 % и 58 % соответственно.

На рис. 1, а представлены вольт-амперные характеристики элемента памяти ITO/SiN_x/Si. Весь цикл измерения ВАХ показан стрелками. Прямой ветви ВАХ соответствует положительное смещение верхнего электрода ITO относительно Si подложки. В начальный момент времени структура находилась в СВС. Увеличение напряжения на верхнем электроде до ~20 В приводит к переключению в СНС (стрелка 1) (проводимость увеличивается на 2–3 порядка). Переключение в СВС наблюдается при изменении полярности приложенного к структуре напряжения (стрелка 2) в результате разрушения токопроводящего канала. Анализ ВАХ показал, что механизм проводимости в СВС определяется свойствами пленки SiN_x и описывается моделью Пула-Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками. Переключение в СНС, по видимому, вызвано миграцией ионов In или Sn из контакта ITO в слой SiN_x с последующим образованием металлического филамента. Омический характер проводимости в СНС подтверждает это предположение.

На рис. 1, б представлена зависимость напряжения переключения из одного устойчивого состояния в другое для 84-х циклов. Разброс значений напряжения переключения для перехода СВС→СНС составляет 12 В, для перехода СНС→СВС – 8 В. Отклонение напряжения пере-

ключения от среднего значения может достигать 35 %. Такое большое отклонение параметров, по-видимому, обусловлено большой неравномерностью распределения электрического поля в слое SiN_x , вызванное его неравномерной толщиной и неоднородным составом, а также изменениями структуры нитрида после переключений.

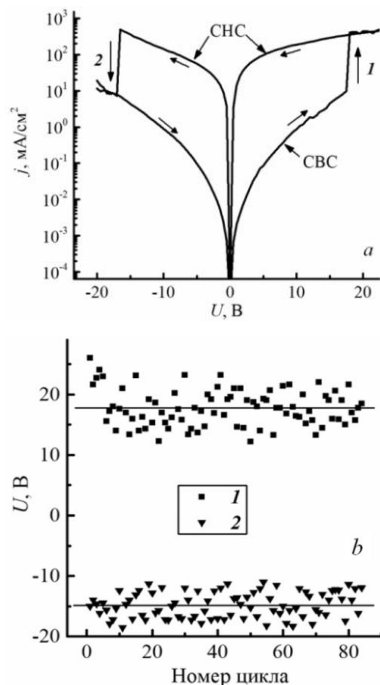


Рисунок 1 – ВАХ (a) и зависимость напряжения переключения от номера эксперимента для элемента памяти ITO/SiN_x/Si-p (b)

Установлено, что засветка структуры Si/SiN_x/ITO галогенной лампой приводит к увеличению тока прямой ветви ВАХ как в состоянии с высоким, так и в состоянии с низким сопротивлением. В режиме обогащения (положительный потенциал на Si) засветка не влияет на изменение тока.

Заключение. Обнаружен и исследован эффект резистивного переключения в структуре ITO/SiN_x/Si-p, в которой «запоминающий» слой представляет собой пленку SiN_x с градиентом соотношения Si/N по глубине. В CBC механизм проводимости описывается моделью Пула-Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками в SiN_x, тогда как CHC, по-видимому, обусловлено миграцией ионов In или Sn из контакта ITO в слой SiN_x – формированием металлического филамента. Для структуры ITO/SiN_x/Si также обнаружен эффект фотопереключения, который в сочетании с резистивным переключением может послужить началом разработки элементов ПЗУ, перепрограммируемых световым импульсом в структурах на основе нитрида кремния.

Литература

1. Charge transport mechanism in SiN_x-based memristor / A. A. Gismatulin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 115, № 25. – P. 253502.
2. Yen, T.J. High performance all nonmetal SiN_x resistive random access memory with strong process dependence / T. J. Yen, A. Chin, V. Gritsenko // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 1–9.

УДК 621.317

ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Коробко Ю.С., Кравченко А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования металлических болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров в целях расширения общего диапазона измерения температур и повышения точности измерений. Предложены методы измерений температуры. Даны рекомендации по проведению калибровки болометрических термометров и организации рабочего места калибровщика.

Ключевые слова: температура, измерение, терморезистор, болометр, диапазон измерения, метод измерения, погрешность измерения.

APPLICATION OF BOLOMETERS FOR ACCURATE TEMPERATURE MEASUREMENT WIDE RANGE

Korobko Yu., Kravchenko A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The issues of using metal bolometers as sensitive elements of thermistor thermometers in order to expand the overall temperature measurement range and increase the measurement accuracy are considered. Methods for measuring temperature are proposed. Recommendations for the calibration of bolometric thermometers and the organization of the workplace of the calibrator are given.

Key words: temperature, measurement, thermistor, bolometer, measurement range, measurement method, measurement error.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Термометрия возникла, развивалась, и будет развиваться по мере развития естествознания и необходимости измерений такой физической величины, как температура. Сегодня термометрия глубоко вошла во все сферы деятельности человека – начиная от элементарных бытовых вопросов измерения температуры до необходимости астрономических измерений. Нет ни одной области деятельности, где бы ни стоял вопрос ее измерения. Современные требования как к средствам измерения температуры, так и к точности ее измерения также высоки: диапазон измерения варьируется от сверхнизких температур (0–4,2 К), до сверхвысоких (выше 5000 К), а погрешность измерения может составлять сотые и тысячные доли градуса.

Широкий диапазон подлежащих измерению температур, разнообразие условий и объектов исследования обусловили многочисленность методов и средств измерения температуры.

В докладе анализируются возможные методы применения металлических болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров, а также преимущества их использования для точных измерений в широком диапазоне температур.

Известно, болометр – это устройство для обнаружения электромагнитного излучения, действие которого основано на изменении его электрического сопротивления при нагревании в результате поглощения энергии излучения [1, 3]. Болометр чувствителен ко всему спектру излучения, в том числе и инфокрасному (ИК). Наибольшее применение он нашел в астрономии, когда источником теплового излучения является, например, свет звезд [2]. Также болометры широко применяются в первичных преобразователях ваттметров диапазонов ВЧ и СВЧ. Однако свойство болометров изменять свое электрическое сопротивление при изменении собственной температуры и высокая чувствительность процесса позволяет использовать его в терморезисторных термометрах для точных измерений температур в довольно широком диапазоне.

По конструкции болометры бывают металлическими и полупроводниковыми [2, 3]. Металлический болометр представляет собой линейный отрезок проводника малого диаметра и длины. Проводник запаивают в стеклянный баллон, который, обычно, заполняют инертным газом. Часто болометры выполняются из тонкой пленки металла, нанесенной на подложку из стекла или слюды.

Электрическое сопротивление металлов зависит от их температуры и определяется соотношением

$$R_t = R_0[1 + \chi(t - t_0)],$$

где R_0 – сопротивление металла при температуре t_0 ; R_t – сопротивление металла при температуре t ; χ – температурный коэффициент сопротивления (ТКС):

$$\chi = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta t}.$$

Металлические болометры характеризуются простотой конструкции, высокой чувствительностью (можно фиксировать изменение температур до 10^{-7} градуса), низким уровнем шумов, невысокими производственными затратами. Характеристики металлических болометров определяются свойствами используемого металла (платина, золото, никель и др.) и его размером. Их активные элементы имеют высокие физико-химические свойства, обладают стабильностью параметров и способны работать в широком диапазоне температур (от -260 °С до $+860$ °С для платины), обеспечивая при этом высокую точность. Быстродействие болометров может составлять единицы наносекунд. Недостатками металлических болометров являются зависимость их чувствительности от длины проводника активного элемента и относительная дороговизна (стоимость активного элемента – платины, золота и др.).

Использование полупроводниковых болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров не рассматривалось. Несмотря на их большую разновидность и относительно дешевизну их применение ограничено небольшими температурными диапазонами применения, что затрудняет реализацию широкодиапазонного термометра.

В докладе проведен анализ возможных методов применения металлических болометров для точных измерений температур и даны рекомендации по их применению. Наиболее приемлемыми методами, обеспечивающими высокую точность измерения температур, являются мостовые методы. При использовании мостов постоянного тока наилучшим методом с точки зрения точности, несмотря на некоторую трудоемкость, является метод измерения с помощью «балансного (уравновешенного) моста». С точки зрения быстродействия наиболее приемлемым является метод измерения с помощью «разбалансного (неуравно-

вешенного) моста». Данные методы измерений широко описаны в литературе, например в [4].

Кроме того, в докладе даны рекомендации по организации и проведению работ связанных с калибровкой средств измерений температуры, использующих в качестве чувствительных элементов металлические болометры. Рекомендации могут быть использованы для описания методик (методов) калибровки, организации рабочих мест для проведения калибровки, а также для подготовки нормативно-технической документации по калибровке указанных средств измерения температуры.

УДК 620.179.142

ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ

Крень А.П., Гнутенко Е.В., Кутепов А.Ю., Протасеня Т.А.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Обоснована возможность применения магнитного пондеромоторного метода для оценки качества нанесения толстослойных никелевых покрытий на детали и сборочные единицы космической техники. Основными определяемыми показателями качества выступают толщина покрытия и равномерность распределения внутренних напряжений.

Ключевые слова: внутреннее напряжение, контроль, никелевые покрытия, магнитный пондеромоторный метод.

ESTIMATION OF THICKNESS AND INTERNAL STRESS IN NICKEL COATINGS

Kren A., Hnutzenka Y., Kutsepau A., Pratasenia T.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The possibility of using the magnetic ponderomotive method for assessing the quality of deposition of thick-layer nickel coatings on parts and assembly units of space technology has been substantiated. The main determinable indicators of quality are the thickness of the coating and the uniformity of the distribution of internal stresses.

Key words: internal stress, control, nickel plating, magnetic ponderomotive method.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск, 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

В настоящее время нанесение различных функциональных покрытий на поверхность деталей и сборочных единиц космической техники с целью придания им требуемых свойств является одной из важнейших операций для обеспечения их надежной работы. Одними из основных показателей качества покрытий являются такие характеристики, как толщина (непосредственно влияет на массогабаритные характеристики) и наличие внутренних напряжений (которые могут привести к разрушению покрытия). В этой связи разработка современной аппаратуры и технологии контроля толщины и оценки распределения напряжений в таких специальных покрытиях, как толстослойные никелевые, обладающих улучшенными коррозионными, теплозащитными и износостойкими свойствами, представляется весьма актуальной задачей.

Литература

1. Волков, Ю. В. Датчики для измерений при производстве электрической и тепловой энергии: учебное пособие / Ю. В. Волков. – СПб : ВШТЭ СПбГУПТД, 2019. – 89 с.
2. Датчики: справочное пособие / В. М. Шарапов [и др.]. – Москва : Техносфера, 2012. – 624 с.
3. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин : учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : Издательство ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
4. Измерительная техника. Электрорадиоизмерения : учебное пособие / Заневский, Д.В. [и др.]. – Минск : ВА РБ, 2013. – 159 с.

Создание таких полей намагничивающими катушками является нецелесообразным вследствие их значительных габаритов, а также невозможности использования в портативной измерительной аппаратуре. В качестве источника больших полей можно использовать постоянные магниты, созданные на основе редкоземельных материалов и имеющие коэрцитивную силу порядка нескольких сотен А/м, а при определенном удалении магнита от объекта контроля или изменении его полюсного расстояния можно получить слабые поля. Реализовать схему контроля, основанную на данных положениях, можно с использованием пондеромоторного метода, информативным параметром для которого становится сила отрыва (притяжения) магнита от никелевого покрытия.

Для получения соотношений, связывающих отрывную силу магнита с толщиной и магнитными характеристиками никелевого слоя, будем считать магнит стержнем, в котором магнитные заряды сосредоточены у полюсов. Его межполюсное расстояние во много раз превышает толщину измеряемых покрытий, следовательно, взаимодействием удаленного полюса с покрытием можно пренебречь. В этом случае сила взаимодействия F (нормальная к поверхности составляющая силы взаимодействия) будет пропорциональна (с коэффициентом c) полю в точке расположения ближнего полюса магнита от индуцированных магнитных зарядов на поверхностях никелевого слоя (рис. 1).

$$F = cH_z \quad (1)$$

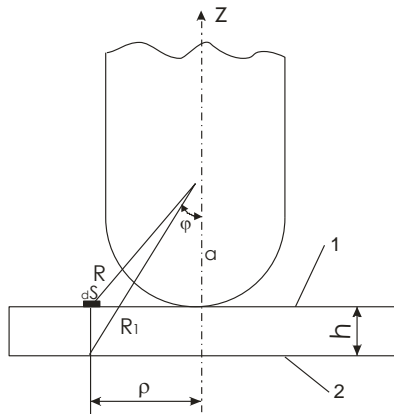


Рисунок 1 – Схема к выводу отрывной силы магнита

Поле H_z равно векторной сумме полей H_1 и H_2 , создаваемых противоположно заряженными поверхностями 1 и 2 никелевого покрытия. Принимая, что элементарные магнитные заряды $I dS$ (I – намагниченность) на поверхностях 1 и 2 для одинаковых ρ равны по величине и противоположны по знаку для $h \ll R$ получим исходя из (1):

$$F = c \left[\int_{S_1} \frac{aI}{R^3} dS - \int_{S_2} \frac{(a+h)I}{(R+h \cos\varphi)^3} dS \right], \quad (2)$$

где первое слагаемое соответствует полю от поверхности 1, а второе – от поверхности 2. Обозначения в уравнении (2) приведены на рис. 1.

Используя положения [1] и ряд допущений можно получить, что в первом приближении:

$$F = ck_T h \int_S \frac{H_e(3a^2 - R^2)}{R^5} dS, \quad (3)$$

или

$$F = c_1 k_T h. \quad (4)$$

Магнитная восприимчивость тела k_T в уравнении (4) связана с магнитной восприимчивостью материала k соотношением [1]:

$$k_T = \frac{k}{1 + Nk}. \quad (5)$$

Из (4) следует, что отрывная сила определяется двумя факторами: толщиной покрытия и магнитной восприимчивостью материала покрытия (размагничивающий фактор N связан только с толщиной покрытия). Поэтому судить по отрывной силе однозначно о толщине покрытия можно только при $k = const$. При этом известно [2, 3], что для гальванических покрытий, в частности никелевых, характерны макро- и микронапряжения, величина которых сильно зависит от условий осаждения, небольшие изменения в которых могут изменять даже знак напряжений [4]. Для оценки влияния макронапряжений σ и микронапряжений σ_i на магнитную восприимчивость можно воспользоваться формулой [4]

$$k = \frac{2 \mu_0 I^2}{9 \lambda_S \sigma_i} \left[1 - \frac{1}{5} \frac{\sigma}{\sigma_i} \right], \quad (6)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, λ_S – коэффициент магнитоstriction.

Формулы (4) и (6) справедливы, если исследуемый материал находится не в состоянии магнитного насыщения. Об этом можно судить по величине внутреннего поля, которая может быть определена по известной формуле

$$H_i = H_e \left(1 - \frac{Nk}{1 + Nk} \right). \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что внутреннее поле H_i растет при заданном внешнем H_e с уменьшением Nk .

Размагничивающий фактор N тонкой магнитной пленки в сильно неоднородном внешнем магнитном поле постоянного магнита определить практически невозможно, но из общих соображений ясно, что он должен быть близок к единице [5]. Подставляя (6) в (4), получим:

$$F = \frac{c_1 h}{\frac{9\lambda_s \bar{\sigma}_l}{2\mu_0 I_s^2 \left(1 - \frac{\sigma}{5\bar{\sigma}_l}\right)} + N} \quad (8)$$

Полученные результаты показывают, что при использовании магнитного пондеромоторного метода существует возможность, как точного измерения толщины гальванических никелевых покрытий, так и оценки наличия внутренних напряжений. Если сопоставлять магнитный пондеромоторный метод с другими методами, то его преимущество заключается в том, что информацию о толщине и напряжениях дает в основном участок покрытия, непосредственно прилегающий к точке контакта магнита с изделием. На практике это обуславливает высокую локальность контроля при сохранении высокой точности измерений. Данные теоретические положения позволили разработать соот-

ветствующую технологию контроля и измерительную аппаратуру.

Литература

1. Аркадьев, В. К. Электромагнитные процессы в металлах / В. К. Аркадьев. – М. : ОНТИ, 1935. – 230 с.
2. Исследование химического состава плазменных покрытий из никель-керамической порошковой смеси / В. В. Иванцовский [и др.] // Актуальные проблемы в машиностроении, 2017. – Т. 4, № 2. – С. 35–39.
3. Интенсификация процессов получения функциональных покрытий медь, никель-фосфор в условиях нестационарного тока / К. А. Сагдеев [и др.] // Совершенствование технологии гальванических покрытий. – Киров, 1989. – С.13–14.
4. Вонсовский, С. В. Ферромагнетизм / С. В. Вонсовский, Я. С. Шур. – М. : ОГИЗ, 1948. – 816 с.
5. Вонсовский, С. В. Магнетизм / С. В. Вонсовский. – М. : «Наука», 1971. – 1032 с.

УДК 519.2:006

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Кулуев Р.Р.

*Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова
Ташкент, Республика Узбекистан*

Аннотация. Проанализирована современная технология выпечки хлебобулочных изделий и анализ способов (методов) проведения выпечки хлеба. Установлены достоинства и недостатки методов выпечки, в результате которого установлено, что для проведения измерения влажности по известным методам затрачивается более 45 минут и лишняя электроэнергия и др. Разработано устройство для измерения влажности хлеба в потоке. Предложенный метод и устройство позволяет провести измерения влажности хлеба в течение не более 2–3 минуты и облегчает труд операторов, а также экономит электрическую энергию, повысить точность и чувствительность.

Ключевые слова: влажность, измерение, сыпучие материалы, зерно, контроль.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A DEVICE FOR CONTINUOUS CONTROL OF MOISTURE IN BULK MATERIALS

Kuluyev R.

*Tashkent State Technical University named after I.A. Karimov
Tashkent, Uzbekistan*

Abstract. The modern technology of baking bakery products and the analysis of methods (methods) of carrying out bread baking are analyzed. The advantages and disadvantages of baking methods have been established, as a result of which it has been established that it takes more than 45 minutes to measure moisture according to known methods and extra electricity, etc. A device has been developed for measuring the moisture content of bread in a stream. The proposed method and device makes it possible to measure the moisture content of bread for no more than 2-3 minutes and facilitates the work of operators, as well as to save electrical energy, improve accuracy and sensitivity.

Key words: moisture, measurement, bulk materials, grain, control.

*Адрес для переписки: Кулуев Р.Р., г. Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: ruslan-kuluyev@mail.ru*

Анализ известных работ по контролю влажности зернопродуктов показал, что имеется много разработок по контролю влажности зерна и других сыпучих материалов.[1–3] Изучение выпечки зернопродуктов показали, что все они вы-

пекаются в стационарных условиях. После выпечки, кроме хлеба, все остальные хлебобулочные изделия снимаются вместе с посудами и после охлаждения упаковываются в коробки, а хлеб, после выпечки в горячем виде поставляется на прод-

вигающий транспортер конвейера рис. 1, продвигающиеся со скоростью 60 см/с.



Рисунок 1 – Общий вид поточной транспортной системы хлеба

В заводских условиях влажность выпеченного хлеба контролируется выборочно, в стационарных условиях применением специализированного сушильного шкафа. Метод заключается в высушивании навески, измельченного мякиша помещают в предельно нагретый сушильный шкаф и сушат в течении 40 мин при температуре 130 °С [4].

Массовую долю влаги (W) в процентах вычисляют по формуле:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m} 100 \%, \quad (1)$$

где m_1 – масса чашечки с навеской до высушивания, г; m_2 – масса чашечки с навеской после высушивания, г; m – масса навески изделия, г.

Однако контроль влажности приведенным методом имеет недостатки: контроль влажности хлеба после выпечки более 500–1000 хлеба может привести к браку огромного количества хлеба убыткам, из-за возможной погрешности автомата или субъективности оператора вовремя добавления воды или другого сырья. При колебании температуры за установленного предела изменяется влажность высушиваемого продукта, который приведет к уменьшению качества выпускаемого продукта и т.д. Приведенные недостатки требуют проведения увеличения частоты контроля влажности выпеченного хлеба в потоке, приводящий к уменьшению убытки и увеличению качества выпускаемых зернопродуктов.

Для решения поставленных задач в рамках данной работы была разработана структурная схема и конструкция устройства поточного контроля влажности хлебобулочных изделий. Общий вид конструкции и размещения элементов и блоков обработки информации на разработанный каркас измерительной установки приведена на рис. 2

Конструкция каркаса размещения и установки блоков устройства измерения влажности хлеба в потоке состоит и яруса для установки измерительного устройства, на правителя хлеба в изме-

рительную линию, держателей обкладок конденсатора (кювета). Обкладки конденсатора и каркас установки выполняется из пищевых металлов.

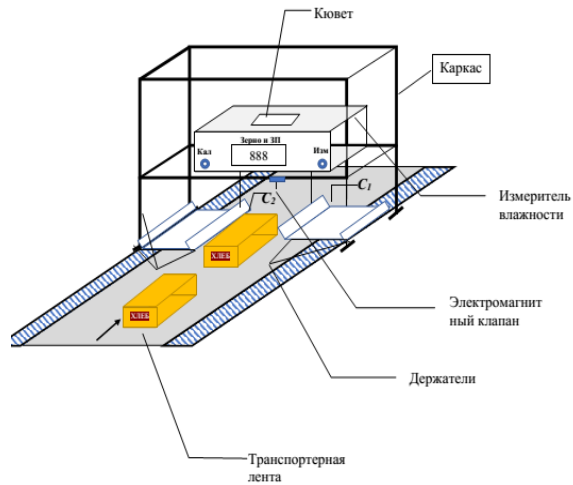


Рисунок 2 – Общий вид конструкции устройства для поточного контроля влажности хлебобулочных изделий

Принцип построения структурной схемы устройство контроля влажности хлеба с автоматическим управлением процесса измерения влажности в потоке приведена на рис. 3.

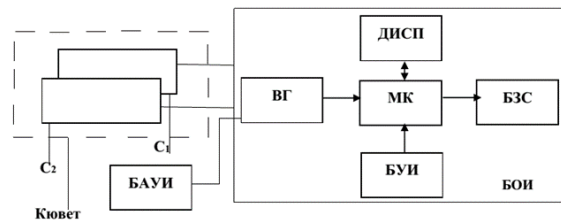


Рисунок 3 – Структурная схема устройство контроля влажности хлеба

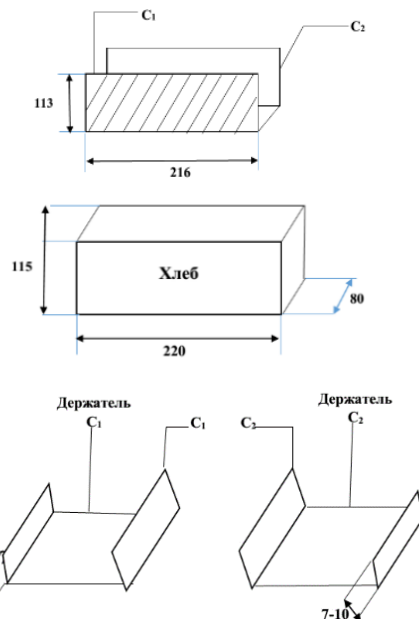


Рисунок 4 – Размеры обкладок конденсатора (кювета)

Устройство состоит из блока автоматического контроля продвижения хлеба и управления процессом измерения его влажности (БАКУПИ), кювета (К), блока генератора (БГ), блока обработки информации (БОИ), дисплея (ДИС) и блока звуковой сигнализации (БЗС), а также блока стабилизированного источника питания (БСИП).

Блок автоматического контроля продвижения хлеба и управления процессом измерения его влажности (БАКУПИ) состоит из таймера, фотоэлектрического датчика, логического элемента, усилителя мощности, выполненный на базе полевого транзистора и электромагнитного клапана с подвижным сердечником. Фотоэлектрический датчик предназначен для обнаружения хлеба до точки проведения контроля влажности и формирования управляющего сигнала для запуск таймера и электромагнитного клапана. Выходной сигнал фотоэлектрического датчика одновременно служит запускающим сигналом таймера и электромагнитного клапана. Электромагнитный клапан предназначен для автоматического удержания (на 1–2 с)-останова хлеба, с целью проведения измерения его влажности в этом интервале времени. Таймер предназначен для управления работой электромагнитного клапана (ЭМК), управляющий продвижением или остановом хлеба, а также поступления выделенной серии

импульсов (частоты) на вход микропроцессорного блока обработки информации.

Блок обработки информации проводит обработку поступающей серии частот (импульсов), соответствующей влажности хлеба и выдача обработанных данных на дисплей в удобном виде оператору. После проведение измерения влажности хлеба таймер выдает управляющий сигнал электромагнитному клапану о продолжении продвижении остановленного хлеба по транспортной ленте. Размеры обкладок конденсатора (кюветы) приведены на рис. 4.

Литература

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
2. Пономарев С. В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений: монография. В 2 кн. / С. В. Пономарев, С. В. Мищенко, А. Г. Дивин. – Тамбов : Тамб. гос. техн. ун-т, 2006. – Кн. 1. – 204 с.
3. Афонин, В. С. Разработка прибора контроля влажности зерновой продукции на основе многоэлектродных емкостных преобразователей : дис. ... на соискание ученой степени канд. техн. наук / В. С. Афонин. – Барнаул, 2007. – 134 с.
4. ГОСТ 21094-75 Хлеб и хлебобулочные изделия. Метод определения влажности.

УДК 519.7

ЗАЩИТНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БИРЖЕВЫХ ТОРГОВ

Лебедев А.Н., Завадская Т.Е.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Предложен новый метод защиты от манипулирования ценами в ходе электронных биржевых торгов. Алгоритмическая база метода построена на современных алгоритмах защиты данных и аутентификации трейдеров. Предложенный метод может быть реализован в виде множества конкретных опций, в зависимости от конкретных алгоритмов, составляющих его основу. Описана общая идеология построения конкретных реализаций и приведены их конкретные примеры. Дальнейшее развитие этого метода значительно расширит сферу его возможного применения.

Ключевые слова: биржевые спекуляции, манипуляции ценами, защитное кодирование, однонаправленные функции, электронная подпись, хэширование, аутентификация.

PROTECTIVE DATA ENCODING FOR ELECTRONIC EXCHANGE TRADING

Lebedev A., Zavadskaya T.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. A new method of protection against price manipulation during electronic exchange trading is proposed. The algorithm base of the method consists of the modern algorithms for data protection and authentication of traders. The proposed method can be implemented in the form of many specific options, depending on the specific algorithms that make up its basis. The general ideology of constructing specific implementations is described and their specific examples are given. Further development of this method will significantly expand the scope of its possible application.

Key words: stock speculation, price manipulation, protective data encoding, one-way functions, electronic digital signature, hashing, authentication.

*Адрес для переписки: Лебедев А.Н., 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, г. Москва 105005, Российская Федерация
lebedevan@bmstu.ru*

Введение. Мы начнем с краткого описания современной техники биржевых торгов.

Спекулятивная составляющая. Спекуляции можно разделить на два основных вида – информационные и технические.

Информационные спекуляции возможны когда у кого-то из участников торгов есть информация, которой нет у других.

Математическая постановка задачи. Пусть $A = \{a_i, |i = 1, \dots, N\}$ – множество из N участников торгов на бирже, каждому соответствует идентификатор a_i . Пусть $T = \{0, 1, 2, 3, 4\}$ – множество типов биржевых ордеров.

Участник может выставить ордер в виде сообщения вида $M_i = (a_i, t, p, E(v, K))$, где a_i – перс. идентификатор участника; $t \in T$ – тип ордера; $p \in P = \{Step * n | n \in \mathbb{N}\}$ – цена сделки, которая зависит от спецификации финансового инструмента. Цена имеет Step – дискретный шаг изменения, минимальное значение, на которое может изменяться цена; $E(v, K)$ – значение однонаправленной функции, которая вычисляется от объема заявки v с использованием ключа K : $v < MAX$ макс. объем заявки.

Ордера, прошедшему проверку на корректность, присваивается номер $n \in I = \{1, \dots, N\} \subset \mathbb{N}$, строго в порядке поступления заявки на Биржу.

Ордер типа (Sell Limit)/(Buy Limit) помещается в очередь с параметром Limit ценового уровня. Значению цены $p \in P$ соответствует массив номеров $a \left[\frac{p}{Step} \right] [n] \in I, n < N_i \in I$, где N_i – количество ордеров на указанном уровне цены $\frac{p}{Step}$.

В результате формируется «стакан цен».

Ордер типа (Sell Market)/(Buy Market) также помещается в очередь на исполнение. Как только очередь оказывается не пустой, происходит исполнение заявки из стакана цен с соответствующими параметрами для сделки.

Множество сделок $D = \{d_i, |i = \overline{0, \dots, M}\}$, при наличии полной истории сделок, экспертной оценкой можно разделить множество на два подмножества: D_0 – сделки спекулятивного характера, D_1 – сделки не спекулятивного характера.

Первый вакиант кодированных торгов.

Вид любого асимметричного защитного кодирования данных заявки подходит для этой цели. Владелец только открытого ключа может только закодировать сообщение, а владелец закрытого ключа пары «открытый ключ – закрытый ключ» – единственный может декодировать сообщения, закодированные открытым ключом.

Участник генерирует пары «закрытый ключ – открытый ключ» для кодирующего преобразования, может отправить закодированную заявку на биржу, а закрытый ключ для ее раскрытия отправить по защищенному каналу в некоторый доверенный орган (удостоверяющий центр). УЦ хранит закрытые ключи всех ордеров всех участников торгов, но он не знает сами ордера [1–4].

До совершения сделки информация об объеме сделки и ключ, с помощью которого объем заявки может быть декодирован, будут в разных местах. Только в ходе исполнения заявки биржа будет отправлять в УЦ заявки, которые надо свести, а в ответ будет получать подтверждение сделки с точным указанием исполненного объема и новый закодированный ордер с не исполненным объемом. Тикет частично исполненного ордера можно не менять. Рассмотрим формирование стакана цен и процедуру сведения заявок в рамках данного способа.

Стакан цен Crypto Darkpool. Объемы заявок храним в закодированном виде с помощью асимметричного алгоритма [1]. Этот алгоритм обозначим E . Рассмотрим обмен информацией в данном случае. Когда A хочет зарегистрироваться как участник, он формирует две пары ключей («закрытый ключ – открытый ключ») системы защиты данных с открытым ключом. По защищенному каналу отправляет по закрытому ключу каждой пары на биржу и в УЦ.,

Участник A_i соединяется с сервером биржи и сервером УЦ. После его аутентификации на УЦ, УЦ генерирует пару открытый ключ – закрытый ключ (e_i, d_i) и отправляет открытый ключ e_i участнику A_i . На выданном открытом ключе будет происходить кодирование объема заявки.

Участник A_i формирует ордер O_{ij} с номером Ord_{ij} .

Кодируется объем заявки: $Sh(V_{ij}) = E(V_{ij}, e_i)$.

A_i отправляет ордер O_{ij} объема $Sh(V_{ij})$ и идентификатором Ord_{ij} на биржу. Отправляет идентификатор Ord_{ij} в УЦ.

Бирже передается заявка $(Sh(V_{ij}), Ord_{ij})$, а в УЦ передается идентификатор ордера. Ордер проходит проверку биржей, помещается в очередь. A_i получает ответ «ордер принят» и биржевой тикет $Ticket(O_{ij})$. УЦ получает от биржи пару $(Ticket(O_{ij}), Ord_{ij})$. На бирже хранятся ордера O_{ij} с закодированным объемом заявок и двумя идентификаторами $(Ticket(O_{ij}), Ord_{ij})$, а в УЦ пара $(Ticket(O_{ij}), Ord_{ij})$ ставится в соответствие пара открытый/закрытый ключ, чтобы УЦ мог раскрыть соответствующий ордер или закодировать его снова и отправить на биржу с тем же уникальным идентификатором Ord_{ij} , новым тикетом $Ticket(OS_{ij})$, который отправляется участнику A_i .

Безопасность обмена данными. Участник формирует пару открытый/закрытый ключ, открытый ключ отправляет на биржу с надежным подтверждением его подлинности. Например, по технологии аутентификации FIDO [8]. При помощи защитного кодирования с открытым ключом можно от биржи передавать клиентам создаваемые сервером биржи ключи кодирования при помощи любого стойкого симметричного алгоритма защитного кодирования данных [1, 4, 6, 7].

Обмен информацией клиентов с УЦ может быть защищен также с помощью симметричного алгоритма защитного кодирования.

Формирование сеансовых ключей – по протоколу Диффи-Хеллмана (DH, ECDH) [1, 5] или его современным обобщениям DHL, DHFL [3, 4, 6, 7].

Литература

1. Шнайер, Б. Прикладная криптография. – Изд. 3-е / Б. Шнайер. – Москва: «Триумф», 2018. – 610 с.
2. Лебедев, Г. А. Новые однонаправленные функции / Г.А. Лебедев // Флеровские чтения : сборник тезисов четвертой школы-конференции молодых исследователей. – ОИЯИ, Дубна, 2011. – С. 5–7,
3. Лебедев Г. А. Применение знаково-цифровых систем счисления для вычисления однонаправленных функций / Г. А. Лебедев // Тезисы «XI Школьные Харитоновские чтения». – РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 2011. – С. 16–18.

4. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Куроша. – М.: Издательство МГУ, 2018. – С. 123–127.

5. Diffie, W. New Directions in Cryptography / W. Diffie, M. E. Hellman // IEEE Trans. Inform. Theory, 1976. – Vol. IT-22, №. 6. – P. 644–654.

6. Лебедев А. Н. Новая арифметика конечного коммутативного кольца и ее использование в аутентификации / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 49–63.

7. Лебедев А.Н. Обобщение протокола Диффи-Хеллмана с использованием дробно-линейного преобразования / А. Н. Лебедев, А. О. Кокорин // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 64–71.

8. FIDO Alliance, Fast IDentification Online [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://fidoalliance.org>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 519.7

ЛЕГКОВЕСНЫЙ АЛГОРИТМ ЗАЩИТНОГО КОДИРОВАНИЯ – NASH

Лебедев А.Н., Карондеев А.М., Козлов А.А.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация

Аннотация. В работе описывается новый легковесный блочный алгоритм защитного кодирования NASH, названный в память выдающегося математика Джона Нэша (John Nash), который кроме работы по экономике, удостоенной нобелевской премии, и работ по чистой математике, удостоенных премии Абеля, занимался также и проблемами защиты информации. Алгоритм NASH при высоком уровне стойкости защитного кодирования показывает также и высокий уровень эффективности при реализации на современных микроконтроллерах.

Ключевые слова. защитное кодирование, блочный алгоритм защитного кодирования, легковесный блочный алгоритм защитного кодирования.

LIGHTWEIGHT SECURE ENCODING ALGORITHM – NASH

Lebedev A., Karondeev A, Kozlov A.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The paper describes a new lightweight block secure encoding algorithm NASH, which is named in memory of the outstanding mathematician John Nash, who, in addition to his work on economics, awarded the Nobel Prize, and works on pure mathematics, awarded the Abel Prize, was also engaged in the information security. The algorithm NASH having a high security is also a very adaptive to contemporary microcontrollers.

Key words: secure encoding, block secure encoding, lightweight secure encoding, lightweight block secure encoding algorithm.

Адрес для переписки: Лебедев А.Н., 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, г. Москва 105005, Российская Федерация lebedevan@bmstu.ru

Введение. Термин «кодирование» или «кодирование информации» имеет в современных энциклопедиях, технических словарях и специальных монографиях очень широкую трактовку.

Математическая Энциклопедия, изданная в СССР в 1977–1985 гг. определяет его следующим образом: «Кодирование – процесс представления информации в определенной стандартной форме и обратный процесс восстановле-

ния информации по ее такому представлению. В математической литературе кодированием называется отображение произвольного множества A в множество конечных последовательностей (слов) в некотором алфавите B , а декодированием – обратное отображение» [1].

Из этого общего определения кодирования естественно следует представление, что среди всех возможных кодов (понимаемых как алгорит-

мы кодирования информации) можно выделить отдельные их классы в зависимости от целей использования конкретного процесса кодирования. Так, для передачи информации по теле или радиоканалам применяются коды высокочастотной модуляции, для передачи информации в виде текстов применяется кодирование информации в виде слов как отдельных последовательностей букв алфавита, для передачи информации голосом применяются алгоритмы кодирования с помощью фонем языка, для передачи информации по каналам электросвязи невысокого качества применяются специальные математические коды исправляющие возможные ошибки в канале и т.д.

Среди всех таких классов кодов естественным образом выделяется класс кодов, применяемых именно с целью защиты кодируемой информации от всех, кроме тех, кому она предназначена. Это так называемые защитные коды, среди которых можно выделить более узкий подкласс – шифры. Точные границы класса шифров в классе всех защитных кодов выделить довольно сложно, и мы такой цели в настоящей работе не ставим. Обычно конкретные шифры задаются просто их детальным описанием [2–4].

Структура алгоритма.

Алгоритм защитного кодирования NASH реализует сеть Файстеля [2], в которой последовательно выполняется определенное количество одинаковых по сути преобразований (раундов алгоритма) и на каждом раунде преобразования блока данных изменяется только одна его половина.

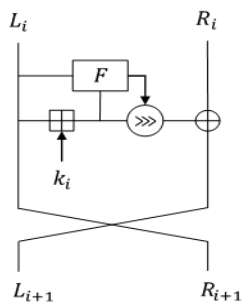


Рисунок 1 – Схема раунда i алгоритма NASH

Символами L_i и R_i обозначены левая и правая половинки блока данных, символом k_i обозначен раундовый ключ.

Формулы преобразования блока данных:

$$R_{i+1} = L_i$$

$$L_{i+1} = (L_i \boxplus k_i \ggg F(L_i, L_i \boxplus k_i)) \oplus R_i$$

В последнем раунде половинки выходного блока L_{i+1} , R_{i+1} не меняются местами, то есть:

$$L_{i+1} = L_i$$

$$R_{i+1} = (L_i \boxplus k_i \ggg F(L_i, L_i \boxplus k_i)) \oplus R_i$$

Символом \boxplus обозначается операция сложения двух целых чисел в двоичной записи с забыванием переполнения регистра сумматора, имеющего ту же длину, что и каждый из операндов;

символом \oplus обозначается операция XOR; символом $\text{REG} \ggg m$ обозначается циклический сдвиг регистра REG на m шагов вправо ($\text{REG} \lll m$ обозначает циклический сдвиг влево).

Размер блока данных: размер половины блока равен 2^n бит, $n = 4, 5$ или 6 , т.е. 16, 32 или 64 бита; размер блока – 32, 64 или 128 бит.

Смешивание данных с раундовым ключом.

Реализуется операция \boxplus – сложение целых чисел из n бит с приведением результата по модулю 2^n .

Управляемый циклический сдвиг: для блока из 32 бит сдвиг вправо на 5, 8, 6 или 7 бит; для блока из 64 бит сдвиг вправо на 11, 14, 10 или 19 бит; для блока из 128 бит сдвиг вправо на 37, 34, 38 или 29 бит. Значения выбраны на основании проведенного экспериментального анализа.

Функция F управления сдвигами. Интерпретируем содержимое левой половины блока данных L_i как вектор значений булевой функции от n переменных, и *первый выходной бит функции F* получается как значение данной булевой функции на наборе бит двоичного представления числа

$$L_i \boxplus k_i \text{ вида } 2^i - 1, \text{ где } i = 1, \dots, n,$$

то есть как значение

$$L_i((L_i \boxplus k_i)[2^1 - 1, \dots, 2^n - 1]).$$

Нумерация бит половины блока производится от 0 до $2^n - 1$.

Для размера блока равного 64 битам (половина блока – 32 бита) набор значений величины циклического сдвига следующим образом определяется парами значений булевой функции F : 00 – 11; 01 – 14; 10 – 10; 11 – 19.

Число раундов r алгоритма NASH. Число раундов алгоритма защитного кодирования NASH: для блока равного 64 битам $r = 24$; для блока равного 128 битам $r = 28$.

Размер исходного ключа алгоритма. Размер исходного ключа алгоритма NASH: 128, 192 или 256 бит. Исходный ключ может быть получен по любому из алгоритмов работ [3–6]

Проект был реализован в ходе выполнения данным коллективом разработчиков инициативной НИР кафедры ИУ8 (Информационная безопасность) МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва) в течение 2016–2020 гг.

Литература

1. Математическая Энциклопедия / И. М. Виноградов (глав редактор) [и др.]. – М. : Советская Энциклопедия, 1979. – Т. 2. – 552 с.
2. Шнайер, Б. Прикладная криптография: Протоколы, алгоритмы, исходные тексты на языке Си. – Изд. 3-е / Б. Шнайер // М. : Триумф, 2018. – С. 610.
3. Diffie, W. New Directions in Cryptography / W. Diffie, M. E. Hellman // IEEE Trans. Inform. Theory, 1976. – Vol. IT-22, № 6. – P. 644–654.

4. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Куроша. – М.: МГУ, 2018. – С. 123–127.

5. Лебедев, А.Н. Новая арифметика конечного коммутативного кольца и ее использование в крипто-

графии / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 49–63.

6. Лебедев, А. Н. Обобщение протокола Диффи-Хеллмана с использованием дробно-линейного преобразования / А. Н. Лебедев, А. О. Кокорин // Электронные информационные системы, 2021. – № 3 (30).– С. 64–71.

УДК 519.7

НОВЫЙ ПРОТОКОЛ ВЫРАБОТКИ ОБЩЕГО СЕКРЕТА – DHFL

Лебедев А.Н., Кокорин А.О.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Предложены новые однонаправленные функции для обобщения протокола Диффи-Хеллмана. В качестве базового элемента для новых функций использовано дробно-линейное преобразование, для того, чтобы подстановка была определена на всем конечном поле, рассмотрен отдельный случай: ноль в знаменателе. Показано, что протокол на основе введенных однонаправленных функций корректен. Построены обобщения протокола со строгой аутентификацией сторон.

Ключевые слова: новые однонаправленные функции, обобщенный протокол Диффи-Хеллмана, аутентификация, новые арифметические операции, дробно линейные преобразования.

NEW PROTOCOL FOR COMMON SECRET GENERATION - DHFL

Lebedev A., Kokorin A.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. We have proposed some new one way functions for generalization of the Diffie-Hellman protocol. To do this we use any representative of the class of all invertible fractional linear transformations as a basic constructive element for the new functions. In order for the transformation to be defined over the entire finite field, a special case is considered: zero in denominator. We have shown that the protocol based on the constructed one way functions is correct. Generalizations of the protocol with strong authentication of the participants are constructed.

Key words: new one-way functions, generalized Diffie-Hellman protocol, authentication, new arithmetic operations, fractional linear transformations.

Адрес для переписки: Лебедев А.Н., 2-я Бауманская ул. 5, стр. 1, г. Москва 105005, Российская Федерация
lebedevan@bmstu.ru

Введение. Оригинальный протокол Диффи-Хеллмана и его модификации [1, 2], что применяются для формирования общего секрета (ключа взаимной аутентификации) парой пользователей информационной системы (например, сети интернет), использующих для обмена сообщениями общедоступный канал передачи данных, состоят в следующем:

– Пользователи, обозначаемые как *Алиса* и *Боб*, умеют вычислять значения конечных однонаправленных функций $f(x)$, $g(x, y)$;

– функция $f(x)$ определена на некотором конечном множестве X большой мощности и принимает значения из большого конечного множества Y , то есть $f(x): X \rightarrow Y$,

– функция $g(x, y)$ определена на декартовом произведении этих множеств $X \times Y$ и принимает значения из третьего большого конечного множества Z , то есть $g(x, y): X \times Y \rightarrow Z$,

– стороны независимо выбирают случайные элементы x_1, x_2 множества X , вычисляют значения $f(x_1), f(x_2)$ и обмениваются ими по доступ-

ному им каналу связи, например, по сети интернет, то есть передают $f(x_1) \leftrightarrow f(x_2)$,

– затем они вычисляют общий секрет (ключ, аутентификатор) пары (*Алиса*, *Боб*) по формулам $K = g(x_1, f(x_2)) = g(x_2, f(x_1))$.

– основными, примерами однонаправленных функций $f(x)$ и $g(x, y)$, являются следующие:

– дискретная экспонента по модулю большого простого числа p , то есть при некотором целом числе a , $1 < a < p-1$, функция $f(x)$ вида

$$f: \mathbb{Z}_{p-1} \rightarrow \mathbb{Z}_p; \quad f(x) = a^x \pmod{p},$$

и функция $g(x, y)$

$$g(x, y): \mathbb{Z}_{p-1} \times \mathbb{Z}_p \rightarrow \mathbb{Z}_p; \quad g(x, y) = y^x \pmod{p}.$$

В этом случае общий секрет данной пары пользователей (ключ, аутентификатор) вычисляется по формуле $K = g(x_1, f(x_2)) = f(x_2)^{x_1} \pmod{p} = g(x_2, f(x_1)) = f(x_1)^{x_2} \pmod{p}$;

$$K = a^{x_1 x_2 \pmod{p-1}} \pmod{p} = a^{x_2 x_1 \pmod{p-1}} \pmod{p},$$

и представляется элементом мультипликативной группы \mathbb{Z}_p^* большого простого поля \mathbb{Z}_p . Такой протокол обычно обозначается как DH [1].

– Во-вторых, это вычисление кратной точки некоторой эллиптической кривой над большим конечным полем \mathbb{F}

$$E_{a,b}(p) = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{F}, y^2 = x^3 + ax + b (\mathbb{F})\}.$$

Пусть $P = (x, y) \in E_{a,b}(\mathbb{F})$ – точка большого порядка кривой $E_{a,b}(\mathbb{F})$, тогда функции $f(n)$ и $g(n, Q)$ определяются как $f(n): \mathbb{Z}_q \rightarrow E_{a,b}(\mathbb{F})$, где $q = |\langle P \rangle|$ – порядок циклической подгруппы, порожденной точкой P в группе $E_{a,b}(\mathbb{F})$, функция $g(n, Q): \mathbb{Z}_q \times E_{a,b}(\mathbb{F}) \rightarrow E_{a,b}(\mathbb{F})$, такова, что значениями обеих функций $f(x)$ и $g(x, y)$ будут точки кривой $E_{a,b}(\mathbb{F})$ $f(n) = nP = P + P + \dots + P$; $g(n, f(m)) = n(mP) = mP + mP + \dots + mP = (mn)P$, и общий секрет пары также будет точкой $E_{a,b}(\mathbb{F})$ и вычисляется по формуле $K = g(n, f(m)) = n(mP) = g(m, f(n)) = m(nP) = (mn)P$.

Этот общий секрет представляется элементом циклической подгруппы $\langle P \rangle$ группы точек кривой $E_{a,b}(\mathbb{F})$ над полем \mathbb{F} , порожденной точкой P , выбираемой так, что порядок группы $|\langle P \rangle| = q$ – также большое простое число. Такой протокол обозначается как ECDH [4, 5]. Главный недостаток оригинального протокола Диффи-Хеллмана (DH) и его модификации ECDH, – отсутствие аутентификации сторон [3–5]. Поэтому за 45 лет предложено несколько вариантов усложнения этого протокола для получения протокола выработки общего секрета (ключа, аутентификатора) с взаимной аутентификацией сторон [4, 6–10].

В работах [1, 2] предложен новый общий метод формирования общего секрета (ключа, кода, аутентификатора) парой пользователей информационной системы (в частности, сети интернет), радикально расширяющий известные варианты протокола Диффи-Хеллмана и его обобщений, как его оригинального варианта, так и его модификаций с взаимной аутентификацией сторон или с аутентификацией только одной из них.

В данной работе мы реализуем один из вариантов этого метода, основанный на использовании новых арифметических операций в кольце показателей дискретной экспоненты или кольце кратностей выделенной точки эллиптической кривой над большим конечным полем, базирующихся на использовании одного конкретного класса легко

реализуемых подстановок – класса взаимно однозначных дробно-линейных преобразований.

Предлагаются функции $f(x)$, $g(x, y)$ построенные на взаимно однозначном дробно-линейном преобразовании в показателях дискретной экспоненты над большим простым полем \mathbb{Z}_p , или взаимно однозначном дробно-линейном преобразовании в показателе кратности некоторой заданной заранее точки $P \in E_{a,b}(\mathbb{F})$ в группе точек эллиптической кривой над большим конечным полем \mathbb{F} , $E_{a,b}(p) = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{F}, y^2 = x^3 + ax + b (\mathbb{F})\}$.

Идея использования дробно-линейного взаимно однозначного преобразования именно для этой цели была впервые высказана в работах первого из авторов настоящей статьи [1, 2].

Протокол DHFL.

Поскольку новая операция умножения \otimes ассоциативна, то возможна перестановка скобок, а перестановкой скобок доказывается равенство:

$$K = K1 = Q2 \otimes Q2 \otimes \otimes Q2 = K2 = Q1 \otimes Q1 \otimes \otimes Q1$$

Таким образом, получившийся алгоритм корректен.

Таблица 1.

Шаг	Информация Алисы	Информация Боба
1	Случайно выбирает $x1$ $x1 \in X$	Случайно выбирает $x2$ $x2 \in X$
2	Вычисляет элемент $Q1 = g \otimes g \otimes \otimes g$ «умножая его» $x1$ раз	Вычисляет элемент $Q2 = g \otimes g \otimes \otimes g$ «умножая его» $x2$ раз
3	Получает от партнера $Q2 = g \otimes g \otimes \otimes g$ «умноженный» $x2$ раз	Получает от партнера $Q1 = g \otimes g \otimes \otimes g$ «умноженный» $x1$ раз
4	Вычисляет элемент $K1 = Q2 \otimes Q2 \otimes \otimes Q2$ «умножая его» $x1$ раз	Вычисляет элемент $K2 = Q1 \otimes Q1 \otimes \otimes Q1$ «умножая его» $x2$ раз

Литература

1. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Куроша. – М.: МГУ, 2018. – С. 123–127.
2. Лебедев, А.Н. Новая арифметика конечного коммутативного кольца и ее использование в криптографии / А. Н. Лебедев // Электронные информационные системы. – 2021. – Т. 30, № 3. – С. 49–63.

УДК 621.317.7

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ

Левко И.А.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен один из подходов к формированию опорных сигналов синусоидальной формы с использованием импульсных сигналов и пассивных ФНЧ. Показано, что реализация ФНЧ на практике требует не только проведения расчета с использованием специальных таблиц, но и применения программ моделирования электронных схем.

Ключевые слова: опорный синусоидальный сигнал, ФНЧ, нормированный фильтр, программа моделирования электронных схем.

SOME ASPECTS OF PASSIVE FILTERS APPLICATION FOR REFERENCE SIGNAL GENERATION

Levko I.

Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. One of the approaches to the sinusoidal reference signals generation using pulsed signals and passive low-pass filters is considered. It is shown that the implementation of a low-pass filter requires not only special design tables, but also the use of software electronic circuits simulator.

Key words: reference sinusoidal signal, LPF, normalized filter, electronic circuits simulator.

Адрес для переписки: Левко И.А., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: bsu@bsu.by

Опорные сигналы заданной формы, имеющие стабильную частоту, используются при решении ряда задач в измерительной технике и системах связи. Для формирования таких сигналов применяются специализированные аналоговые генераторы, а также цифро-аналоговые преобразователи, работающие в составе цифровых систем, решающих указанные задачи. В последнем случае для устранения высокочастотных компонент сигнала, появление которых обусловлено частотой дискретизации и ее гармониками, используются фильтры низкой частоты (ФНЧ), обеспечивающие сглаживание формы опорного сигнала.

Существует ряд задач, в которых применяются гармонические сигналы с фиксированной амплитудой и частотой, например, при квадратурной модуляции/демодуляции, синхронном детектировании и т.п. В этом случае высокая частотная стабильность может быть обеспечена за счет преобразования импульсного периодического сигнала в синусоидальный с помощью ФНЧ. Частотная стабильность 10^{-6} и выше здесь достигается при использовании генератора на основе кварцевого резонатора для формирования тактовой частоты.

Импульсный периодический сигнал содержит бесконечный ряд гармоник, кратных основной частоте, который может быть представлен в виде [1, с. 151]:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k \omega_1 t, \quad (1)$$

где

$$a_k = 2U_0 \frac{T_0 \sin \pi \tau k \tau T_0/T}{\pi \tau k \tau T_0/T}, \quad (2)$$

U_0 – размах импульсного сигнала по напряжению; T_0 – длительность сигнала; T – период сигнала; $\omega_1 = 2\pi / T$ – базовая круговая частота или круговая частота первой гармоники. Для получения синусоидального сигнала из импульсного нужно обеспечить выполнение неравенства

$$a_1 \gg a_n (n = 2, 3, \dots), \quad (3)$$

т.е. амплитуда первой гармоники должна намного превосходить амплитуды высших гармоник. Этого можно добиться, используя ФНЧ. В случае

произвольного соотношения между периодом T и длительностью T_0 импульсного сигнала процедуру фильтрации усложняет тот факт, что амплитуды высших гармоник, начиная со второй a_2 , отличны от нуля.

Однако при выборе коэффициента заполнения $1/2$, т.е. когда $T = 2T_0$, выражение (2) можно привести к виду

$$a_k = U_0 \frac{2}{\pi \tau k \tau}, k = 1, 3, 5, \dots \quad (4)$$

Такой сигнал носит название меандр и обладает очень важным для решения поставленной задачи свойством: амплитуды гармоник с четными номерами у данного сигнала равны нулю, что существенно упрощает фильтрацию высших гармоник. Следует отметить также, что меандр достаточно просто получить в цифровых системах на практике.

Устройства аналоговой фильтрации можно разделить на два класса: пассивные и активные. Пассивные фильтры не позволяют усиливать сигнал, но обладают способностью работать с сигналами в диапазонах высоких и сверхвысоких частот. Активные фильтры строятся на усилительных элементах и поэтому могут усиливать сигнал, но имеют ограниченную полосу пропускания и, соответственно, работают в достаточно узком диапазоне частот.

Порядок фильтра определяется числом используемых реактивных элементов [2, с. 448]. Чем выше порядок фильтра, тем уже ширина полосы задерживания для получения нужной величины затухания A_s [3, с. 10].

Для различных типов фильтров частотные характеристики затухания могут отличаться как более, так и менее крутыми скатами.

Существует много схемотехнических решений фильтров ФНЧ. Среди них широкое распространение получили пассивные фильтры лестничного типа, содержащие емкостные и индуктивные реактивные элементы. При этом фильтр любого порядка, начиная со 2-го, формируется путем сочетания Г-, П- и Т-образных LC-секций [3, с. 35].

Для упрощения проектирования фильтров, рассчитанных на различные частотные диапазо-

ны, но имеющих одну и ту же схемотехнику, применяется нормирование реактивных элементов фильтра для круговой граничной частоты 1 рад/с при активном сопротивлении нагрузки по входу и выходу 1 Ом.

Для решения задачи получения опорного сигнала определенный интерес представляют фильтры Баттерворта, благодаря линейности их фазовой характеристики. Следующим этапом после выбора типа фильтра, является определение его порядка. Для получения синусоидального сигнала очевидным критерием может служить соответствие заданному коэффициенту нелинейных искажений, который при использовании исходного сигнала типа меандр может быть описан приближительной формулой:

$$k_{н.и.} \approx \frac{a_3}{a_1} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

где a_1 и a_3 – амплитуды соответственно базовой и третьей гармоник в генерируемом сигнале. Для достижения $k_{н.и.} = 2 \%$ отношение гармоник должно составлять 0,02 или –34 дБ. Согласно формуле (4) отношение указанных гармоник в исходном сигнале меандр составляет около –10 дБ. Отсюда затухание 3-ей гармоники за счет воздействия фильтра ФНЧ должно быть равно –24 дБ. Этому критерию соответствует фильтр Баттерворта 3-го порядка [3, с. 92]. В данном случае фильтр может состоять из одной секции как П-, так и Т-образного типа. Единственным преимуществом схемы Т-образного типа (рис. 1) является вдвое меньший номинал катушки индуктивности, что обеспечивает несколько меньшие габариты, хотя это преимущество нивелируется необходимостью использования большего числа катушек индуктивности.

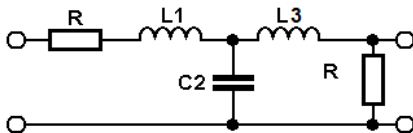


Рисунок 1 – Принципиальная схема Т-образного ФНЧ 3-го порядка

Нормированный фильтр-прототип имеет следующие значения элементов: $L_1 = L_3 = 1$, $C_2 = 2$. Для граничной частоты 500 кГц и активного сопротивления нагрузки 1,24 кОм действительные

значения элементов оказываются равными $L_1 = L_3 = 395$ мкГн, $C_2 = 510$ пФ. АЧХ фильтра с данными значениями элементов приведена на графике №1 рис. 2.

Однако, на практике очень часто возникает несоответствие расчетных значений конденсаторов и индуктивностей и номиналов, доступных для использования. Это приводит к необходимости проверки того, насколько изменятся характеристики фильтра при отклонении номиналов элементов от расчетных.

Табличный подход, к сожалению, не позволяет производить обратный расчет, например, граничной частоты по имеющимся в наличии номиналам компонентов.

Выходом из данной ситуации может служить применение программ моделирования электронных схем. Так использование пакета программ LTSpice компании Analog Devices Inc., находящийся в свободном доступе, позволило получить АЧХ фильтра, приведенного на рисунке 1, для различных значений элементов.

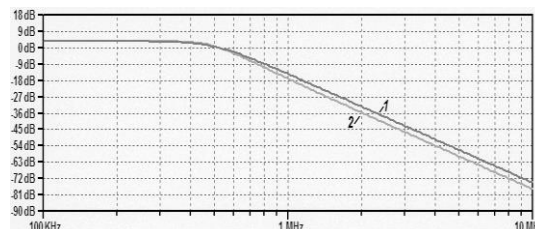


Рисунок 2 – АЧХ фильтра 3-го порядка для 2-х вариантов значений элементов

Так при сопротивлении нагрузки 910 Ом и значении элементов $L_1 = L_3 = 390$ мкГн, $C_2 = 560$ пФ АЧХ фильтра, приведенная на графике №2 рисунка 2, изменяется незначительно и имеет более крутой скат, что является приемлемым

Литература

1. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.
2. Белецкий, А. Ф. Теория линейных электрических цепей / А. Ф. Белецкий. – СПб. : Лань, 2017. – 544 с.
3. Ханзел, Г. Е. Справочник по расчету фильтров / Г. Е. Ханзел ; под ред. А. Е. Знаменского. – М. : Сов. радио, 1974. – 288 с.

УДК 004

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ФАКТОРАМИ АУТЕНТИФИКАЦИИ, И НЕОБХОДИМОСТЬ ВЫРАБОТКИ НОВЫХ ФАКТОРОВ АУТЕНТИФИКАЦИИ

Лемешко Д.В.

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Актуальность данной статьи заключается в том, что на протяжении долгого времени продолжают использовать три фактора аутентификации: фактор знания, фактор владения и фактор свойства (биометрические особенности индивида). Тем самым, эти три фактора начинают утрачивать свою уникальность и оригинальность, что негативно сказывается на состоянии защищенности информационных систем. Поэтому, крайне важно выработать новые факторы аутентификации.

Ключевые слова: аутентификация, факторы аутентификации, угрозы и риски.

SOME ISSUES CONNECTED WITH AUTHENTICATION FACTORS AND THE NECESSITY TO DEVELOP NEW AUTHENTICATION FACTORS

Lemeshko D.

Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

Abstract. The relevance of this article is about the fact that for a long time we continue to use three authentication factors: the knowledge factor, the possession factor and the characteristic factor (biometric features of the individual). Thus, these three factors begin to lose their uniqueness and originality, which negatively affects the state of security of information systems. Therefore, it is crucial to develop new authentication factors.

Key words: authentication, authentication factors, threats and risks.

Адрес для переписки: Лемешко Д.В., 2-я Бауманская ул., 5, стр.1, г. Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: lemeshkodiana@yandex.ru

Введение. В наши дни безопасная передача данных должна быть продумана до мелочей. Пользователи должны быть уверены в том, что полученная информация не была модифицирована, осталась конфиденциальной и обеспечивается гарантия доступа авторизованным пользователям. Соответственно, чтобы стать авторизованным пользователем, необходимо пройти процедуру аутентификации. Здесь могут возникнуть риски и угрозы, связанные с основными факторами аутентификации, такими как: фактор знания, фактор владения и фактор свойства.

Возникающие угрозы и риски. Фактор знания: субъект доступа должен знать определенную информацию [1]. Значит, субъект доступа должен знать, например, пин-код или пароль. При этом могут возникать следующие угрозы и риски (табл. 1).

Таблица 1. Возникающие угрозы и риски

Угроза	Риск
1) непреднамеренное разглашение пароля	Риск пропуска злоумышленника далее в систему (в случае 2FA/MFA) или возможность прочтения злоумышленником конфиденциальных данных (в случае однофакторной аутентификации)
2) хищение пароля	
3) подбор пароля	
4) push-уведомления	

Фактор владения: субъект доступа должен обладать определенным предметом, содержащим аутентификационную информацию [1]. Значит, субъект доступа должен владеть, например, смарт-картой или USB-токеном. Отсюда возникают некоторые угрозы и риски (табл. 2).

Биометрический фактор: субъекту доступа должен быть свойственен определенный признак

(характеристика), информация о котором (которой) используется при аутентификации [1]. Аутентифицироваться возможно при помощи отпечатков пальцев, радужной оболочки глаза, голоса и т.д. При биометрической аутентификации возникают следующие угрозы и риски (табл. 3).

Таблица 2. Возникающие угрозы и риски владения физическим устройством

Угроза	Риск
1) потеря физического устройства	1) не будет возможности аутентифицироваться, когда будет нужно; необходимо будет заявить об утере физического устройства и оформить новое (риск новых затрат, риск покупки несертифицированного устройства)
2) кража физического устройства	2) злоумышленники могут попытаться ввести стандартный пин-код от производителя, чтобы вернуть доступ к физическому устройству; либо, посредством получения прав администратора, злоумышленники, зная пин-код администратора, смогут разблокировать физическое устройство

Таблица 3. Возникающие угрозы и риски биометрической аутентификации

Угроза	Риск
1) злоумышленник может обладать схожими биометрическими характеристиками с легальным пользователем	1) в систему проникнет нелегальный пользователь
2) возможность утери биометрических характеристик легальным пользователем	2) невозможность аутентификации и проведения последующих операций в системе

Тем самым, видно, что три фактора не являются надежными на 100%, так как присутствуют некоторые угрозы и риски. В процессе аутентификации может и повезти – пользователь может и не столкнуться ни с какими угрозами. Однако, всегда нужно продумывать любые сценарии развития событий.

Выработка новых факторов аутентификации. Действительно, многие пользователи и злоумышленники уже адаптировались к трем приведенным выше факторам аутентификации. Эти факторы не являются уже чем-то новым, рынок перенасыщен, обход этих факторов возможен.

Одним из таких новейших факторов мог бы стать фактор выбора. Гипотетически, фактор выбора должен обеспечить пользователя возможностью пройти аутентификацию любым удобным для него способом. Одним из преимуществ может быть то, что злоумышленник не будет знать заранее, что же выберет легальный пользователь в качестве аутентификационного фактора. Тем самым, минимизируются риски и устраняются угрозы, связанные с процессом аутентификации.

Еще одним из факторов мог бы стать фактор, основанный на анонимных блокчейн-протоколах. Анонимные блокчейн-протоколы должны позволить легальному пользователю скрыть процесс аутентификации для того, чтобы злоумышленник не был осведомлен о действиях легального лица. По итогу, угрозы и риски сводятся на нет.

Соответственно, выработка новых аутентификационных факторов поспособствует усилению состояния защищенности передаваемых данных, также легальный пользователь будет знать, что он будет защищен от различных нападков, пользователь сможет выбрать любой из факторов, через который он захочет провести аутентификацию, и, наконец, снизятся риски и устранятся угрозы.

Литература

1. Защита информации. Идентификация и аутентификация. Общие положения : ГОСТ Р 58833-2020
2. Digital Identity Guidelines. Authentication and Lifecycle Management : NIST SP 800-63B, 2017.
3. Information Technology – Security Techniques – Entity Authentication Assurance Framework : ISO/IEC 29115-2:2018, 2018.

УДК 534.87

АКУСТИКА И ЗВУК. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МИКРОФОНЫ КАК ЧАСТЬ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ Линкевич О.С.¹, Гуревич В.Л.²

¹РУП «Белорусский государственный институт метрологии»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Понимать что такое акустика, уровень звукового давления и как работают звуковые волны очень важно. Шумовое загрязнение окружающей среды – одна из актуальнейших научно-технических проблем акустической экологии и является мировой проблемой. Решением этой проблемы является контроль шумовых характеристик воздушной акустики, электроакустических параметров звукопроизводящих устройств и прочее. Одним из средств этого контроля являются измерительные микрофоны в составе шумомера.

Ключевые слова: звук, уровень звукового давления, реверберация, измерительные микрофоны.

ACOUSTICS AND SOUND. MEASURING MICROPHONES AS A PART OF THE SOUND PRESSURE LEVEL MEASUREMENT SYSTEM Linkevich O.¹, Hurevich V.²

¹Belarusian State Institute of Metrology

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. It is very important to understand what acoustics and sound pressure levels are, and how sound waves work. Noise pollution of the environment is one of the most pressing scientific and technical problems of acoustic ecology and this problem is global. The solution to this problem is controlling the noise characteristics of acoustic ecology, electro-acoustic parameters of sound-emitting devices, etc. One of the means of this control are measuring microphones as part of a sound level meter.

Key words: sound, sound pressure level, reverberation, measurement microphones.

Адрес для переписки: Линкевич О.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oleg.linkevich99@yandex.ru

Звук и звуковое давление. Изучением звука занимается акустика. Акустика описывает генерацию, распространение и отражение звука, а также механические основы этих явлений.

Звук – это колебания, или механическое возмущение, в упругих средах. Магнитуду этих колебаний называют уровнем звукового давления, а колебания, которые воспринимаются ухом, –

звуком. Он может распространяться во всех упругих средах, включая воздух, текучую среду и костную ткань. Следует отметить, что звук не может распространяться в вакууме, так как в вакууме не содержится молекул, способных пропускать звуковую энергию.

Самое низкое звуковое давление, которое может услышать ухо человека, равно 20 мПа, когда звук представлен чистым тоном с частотой около 2000 Гц. Звуковое давление крайне высокого звука равно 20 000 000 мПа, что в миллион раз больше давления самого тихого, едва слышимого звука. Огромные различия в колебаниях звукового давления осложняют описание разных уровней через микро-паскали. Именно поэтому было решено ввести в употребление шкалу в децибелах.

С развитием телефонной сети потребовалась единица для измерения звукового давления. Была введена логарифмическая шкала. Ее единицы были названы децибелы (дБ), в честь изобретателя телефона Александра Грэма Белла. Единица в децибелах показывает относительную разность между двумя величинами звукового давления. Абсолютное же звуковое давление обозначается как уровень звукового давления в децибелах (дБ УЗД). За эталонный уровень звукового давления принимается минимальный порог слуховой способности человека.

Распространение, отражение и дифракция звука. В свободном поле звуковые волны спокойно расходятся во всех направлениях. Чем больше расстояние от источника звука, тем больше площадь, в которой распространяется звуковая энергия и тем меньше звуковое давление.

Величина звукового давления уменьшается на пятьдесят процентов, когда расстояние от источника звука удваивается, что соответствует затуханию в 6 дБ. Это явление принято называть законом обратных квадратов.

Звуковые волны редко распространяются свободно в пространстве, так как существует много объектов, которые препятствуют этому распространению. Когда звуковая волна сталкивается с объектом, например, со стеной, часть звуковой энергии отбрасывается обратно от стены. Это явление называется отражением. Степень отражения зависит от материала поверхности. Твердая стена отражает существенную часть энергии звуковой волны, в то время как шерстяной ковер на стене поглощает часть звуковой энергии, тем самым уменьшая отражение. Небольшая часть энергии даже может передаваться через стену. Типичным примером отражения является эхо от слов, произнесенных в большом помещении. Сразу после того, как было произнесено слово, его отражения отталкиваются от стен. Когда отражения следуют друг за другом через небольшие интервалы, звук становится продолжительным, а потом медленно затухает.

Этот феномен получил название – реверберация. Временем реверберации называют время с момента отключения источника звука, в течение которого уровень звукового давления уменьшается на 60 дБ. Время реверберации зависит от степени поглощения энергии звуковой волны и от того, находятся ли в помещении люди и другие объекты, способные уменьшить отражение.

Звук способен огибать препятствия или изменять направление звуковых волн при прохождении через узкое отверстие. Это явление называется дифракцией. Дифракция происходит в результате того, что молекулы воздуха обладают способностью «толкать» друг друга. Когда звуковая волна оказывает давление на группу молекул воздуха, соседние молекулы тоже начинают двигаться, причем не только в направлении распространяющейся волны, но и во всех смежных направлениях. Степень дифракции зависит от соотношения между длиной волны и размером препятствия. Если размеры препятствия меньше длины волны, то звук после прохождения препятствия останется практически неискаженным. Если же размеры препятствия больше – звук отражается, а позади препятствия формируется зона звуковой тени.

Измерительные микрофоны. Уровни звукового давления измеряются с помощью шумомера. В состав шумомера входит предусилитель и измерительный микрофон, который измеряет колебания давления в распространяющейся звуковой волне.

Измерительные микрофоны в составе шумомера предназначены для решения целого ряда задач: измерение шумовых характеристик мест нахождения людей и источников шума, звукопоглощения и звукоизоляции строительных материалов и конструкций, определение электроакустических параметров звуко-воспроизводящих устройств, решение задач физиологической акустики и прочие. Важным является и контроль «неслышимого» звука: ультразвука и инфразвука. Требования к «неслышимому» звуку закреплены ТНПА и Санитарными Правилами и Нормами.

Одним из важнейших параметров динамика является его частотная характеристика - зависимости уровня звукового давления в децибелах от частоты при неизменном уровне подводимого электрического сигнала. Чем шире рабочий диапазон частот головки или громкоговорителя и чем меньше разница в уровнях звукового давления на различных участках этого диапазона, тем лучше этот электроакустический преобразователь.

В настоящее время, время стремительного развития цифровых технологий, измерять АЧХ звукового давления головки динамической не представляет трудности, даже без применения специального оборудования. Для этого необходимо иметь персональный компьютер, усилитель

НЧ для возбуждения испытуемой головки (компьютерную аудиосистему), микрофон и соответствующее программное обеспечение.

При измерениях АЧХ громкоговорителя особые требования предъявляются к микрофону. Он должен иметь широкий частотный диапазон, не уже 30–18000 Гц, «гладкую» АЧХ, небольшие размеры мембраны.

В основе каждого микрофона лежит преобразователь – просто механизм, преобразующий одну форму энергии в другую. Источником (входом) энергии является звуковой сигнал, а выходом – электрический. Форма полученного электрического сигнала повторяет акустический входной сигнал с минимально возможными искажениями. Все направленные микрофоны должны (по определению) до некоторой степени изменять воспринимаемый звук. Невозможно изменить характеристики направленности, не изменяя при этом характер воспринимаемого

звука. Это не обязательно «плохо», просто звук становится другим.

Самые высокие электроакустические параметры имеют конденсаторные микрофоны, и в этом их основное преимущество по сравнению с другими разновидностями микрофонов. Частотная характеристика конденсаторного микрофона отличается своей равномерностью. В диапазоне до резонанса мембраны неравномерность может быть очень малой, выше резонанса она несколько увеличивается. Вследствие малой неравномерности характеристики конденсаторные микрофоны используют как измерительные. Измерительные микрофоны изготавливают на диапазон частот от 20–30 Гц до 30–40 кГц с неравномерностью 1 дБ до частоты 10 кГц и не более 6 дБ свыше 10 кГц. Размеры капсулы такого микрофона берут в пределах 6–15 мм, из-за этого он практически не направлен до частоты 20–40 кГц. Чувствительность его не превышает – 60 дБ.

УДК 534.64

АКУСТИКА И ЗВУК. АУДИОМЕТРИЯ КАК ЧАСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ Линкевич О.С.¹, Гуревич В.Л.²

¹РУП «Белорусский государственный институт метрологии»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Измерения остроты слуха с целью его исследования, диагностики, сохранения и восстановления обуславливают широкую применимость аудиометров. Аудиометрия представляет собой абсолютно безболезненную процедуру, необходимую для точного определения порогов слышимости. Данный метод диагностики уже долгое время активно используется во многих странах мира, так как он практически не имеет каких-то существенных недостатков.

Ключевые слова: акустика, аудиометр, тональная аудиометрия.

ACOUSTICS AND SOUND. AUDIOMETRY AS A PART OF PHYSIOLOGICAL ACOUSTICS Linkevich O.¹, Hurevich V.²

Belarusian State Institute of Metrology

*²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Measurements of hearing acuity for the purpose of its research, diagnosis, preservation and restoration determine the wide applicability of audiometers. Audiometry is a completely pain-free procedure necessary to accurately determine the hearing thresholds. This diagnostic method has been actively used for a long time in many countries of the world, since it practically does not have any significant drawbacks.

Key words: acoustics, audiometer, tone audiometry.

*Адрес для переписки: Линкевич О.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oleg.linkevich99@yandex.ru*

Акустика. Акустика – наука о звуке, изучающая физическую природу звука и проблемы, связанные с его возникновением, распространением, восприятием и воздействием. Акустика является одним из направлений физики (механики), исследующих упругие колебания и волны от самых низких (условно от 0 Гц) до высоких частот. Акустика описывает генерацию, распространение и отражение звука, а также математи-

ческие основы этих явлений. При математическом описании чистого тона на определенной высоте часто используется синусоидальная функция, чтобы показать колебания звукового давления в какой-то момент, например, в момент достижения барабанной перепонки. Синусоида показывает, что звуковую волну можно описать исходя из четырех характеристик: длина волны, частота, амплитуда и фаза.

Основные параметры и характеристики аудиометрии. Диагностика слуха и состояния среднего уха может быть субъективной (аудиометрия) и объективной (импедансометрия). Субъективные методы реализуются при взаимодействии врача и пациента, в процессе исследования регистрируется реакция на разные звуки. В основе субъективной диагностики лежит прослушивание тональных сигналов. Объективные же методы не зависят от его условной реакции.

Импедансометрия – метод оценки функционального состояния среднего уха. Во время процедуры ухо пациента закрывается датчиком, через который подаются звуковые сигналы. Когда звуковая волна достигает барабанной перепонки, часть ее отражается и может быть измерена. По результатам полученных данных можно выявить дисфункцию слуховой трубы, наличие жидкости в среднем ухе (признак воспалительного процесса), наличие перфорации или рубцовые изменения барабанной перепонки.

Аудиометрия – измерение остроты слуха, определение слуховой чувствительности к звуковым волнам различной частоты. Исследование проводит врач-сурдолог. В ходе исследования оценивается способность воспринимать звуковые стимулы на разных частотах, с различной интенсивностью. Точное исследование проводят с помощью аудиометра, но иногда может проводиться проверка с применением камертонов. Аудиометрия позволяет исследовать как костную, так и воздушную проводимость. Результатом тестов является аудиограмма, по которой отоларинголог может диагностировать потерю слуха и различные болезни уха. Регулярное исследование позволяет выявить начало потери слуха.

Субъективная аудиометрия бывает:

- тональная;
- речевая.

Тональная аудиометрия – исследование, позволяющее оценить порог слышимости (в децибелах) типовых частот. Тестирование проводится на типовых частотах в диапазоне (125–8000 Гц). Для полной проверки слуха во всем диапазоне частот применяется тестирование в расширенном частотном диапазоне (125–20 000 Гц).

Речевая аудиометрия проводится для выявления качества распознавания человеческой речи на различных уровнях звукового давления (в децибелах).

Помимо уровня звукового давления, существуют другие характеристики, которые могут быть использованы вместе со шкалой в децибелах для аудиологических и аудиометрических измерений.

В аудиометрии шкала децибел уровня звукового давления для обозначения порога слышимости не используется. Вместо нее слуховые поро-

ги слышимости измеряются в децибелах уровня слышимости (дБ HL – decibels hearing level). Эта шкала соотносится с кривой, соответствующей нормальным слуховым порогам. Показатель в 0 дБ HL будет соответствовать среднему нормальному порогу слуха на различных аудиометрических тестовых частотах.

Чтобы определить тип тугоухости, в аудиологии используют возможность передачи сигнала на улитку двумя способами: использование воздушной и костной проводимости.

Воздушная проводимость – передача звука в улитку через слуховой проход и среднее ухо.

Костная проводимость – передача звука в улитку в результате вибрации черепа.

Воздушная проводимость измеряется с помощью подачи тестового сигнала тестируемому через головные телефоны. Также используются телефоны с ушными вкладышами, состоящие из маленьких трубочек.

Для измерения порогов по костной звукопроводимости используется костный вибратор. Вибратор помещается на височную кость или за ухом.

Виды аудиометров. Аудиометр – электроакустический прибор для точного измерения остроты слуха. По характеру сигнала, которым измеряется слух, аудиометры разделяются на тональные и речевые. Часто они совмещаются в одном аппарате. При измерении тональным аудиометром острота слуха определяется по порогам слышимости чистых (то есть синусоидальных) тонов; при измерении речевым аудиометром – либо по порогам слышимости, либо по порогам разборчивости речи, то есть по минимальным интенсивностям звука, при которых обеспечивается удовлетворительный процент разборчивости речевого сигнала.

Аудиометрический метод используется для определения потери слуха на основе измерения психофизического параметра порога физиологического ощущения. Данный параметр измеряется посредством изменения частоты звука и его громкости.

С помощью аудиометра проводятся исследования остроты слуха и диагностируются нарушения, выполняется оценка чувствительности слухового аппарата к звуковым колебаниям.

Современные аудиометры классифицируются на три вида:

- клинические;
- поликлинические (диагностические);
- скрининговые.

Назначение скрининговых аудиометров – тональная диагностика по воздушной звукопроводимости. Как правило, у скрининговых аудиометров костная проводимость не предполагается. Когда подается условный сигнал, происходит анализ порогов слышимости.

Клинические аудиометры представляют собой автоматизированные двухканальные приборы, благодаря которым оценивается состояние и качество слуха по костному и воздушному звукопроводению. Клинический аудиометр дает возможность обнаруживать пороги слышимости и проводить дифференциальную диагностику в свободном поле. Если использовать такой аппарат, можно выявить нарушения уже на раннем этапе.

Одна из основных отличительных особенностей поликлинических аудиометров, которые также называются диагностическими, – это расширенные

возможности диагностики. Устройство используется не только для анализа слуха по костной и воздушной проводимости за счет измерения порогов слышимости, но и для оценки качества речи, ее разборчивости. Посредством поликлинических аудиометров проводится анализ параметров (индекс чувствительности к приростам интенсивности, порог восприятия силы звука).

В основе принципа действия тонального аудиометра лежит подача звукового тестового тонального сигнала с известными параметрами (частота, уровень звукового давления) в наружный слуховой проход исследуемого уха.

УДК 621.317.799:621.382

МАТРИЧНЫЙ МОДУЛЬ КОММУТАЦИИ

Лисенков Б.Н., Гришковец И.А.

ОАО «МНИПИ»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрена конструкция матричного модуля коммутации. Приведены достигнутые метрологические параметры модуля.

Ключевые слова: матричный коммутатор, модуль коммутации, метрологические параметры.

THE MATRIX SWITCHING MODULE

Lisenkov B., Grishkovets I.

MNIP

Minsk, Belarus

Annotation. The design of the switching matrix module is considered. Metrological parameters of the switch are achieved and given.

Keywords: the matrix switcher, the switching module, metrological parameters.

*Адрес для переписки: Лисенков Б.Н., ул. Якуба Коласа 73, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lisenkovmnipi@tut.by*

Модуль коммутации выполнен на герконных реле, включающих основной и вспомогательный герконы. Реле установлены на печатной плате в узлах матрицы коммутации объемом 4×12 на пересечениях линий (А, В, С, D) и колонок (1–12) матрицы. Для повышения технологичности и снижения затрат, выходные порты модуля, связанные с колонками матрицы, выполнены на клеммниках разъемных (вилка на плату). Предусмотрена возможность расширения объема матрицы коммутации путем объединения нескольких модулей.

Для уменьшения паразитных наводок, каждая линия матрицы содержит дополнительное реле, которое служит для отключения остальных реле этой линии, при условии, что ни один из ее узлов не должен быть замкнут.

Дальнейшее снижение паразитных наводок и утечек в цепи коммутируемого сигнала достигнуто за счет топологии платы коммутации. Практически вся цепь, по которой распространяется коммутируемый сигнал на плате коммутации, охвачена «охранной» поверхностью, являющейся эквипотенциальной по

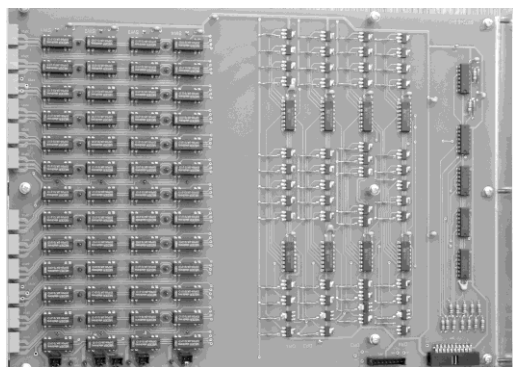
отношению к коммутируемому сигналу. Источником эквипотенциального сигнала служит измеритель ВАХ, подключенный к линиям (входам) матрицы [1].

Кроме того, линии и колонки матрицы экранированы с помощью «охранной» поверхности соответствующей конфигурации, расположенной по обе стороны платы коммутации на экранирующих платах.

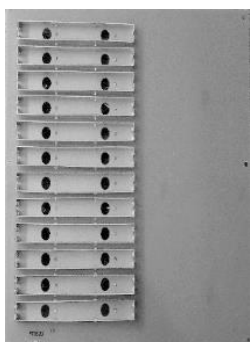
На рис. 1, а показано расположение элементов на плате коммутации, содержащей матрицу коммутации и драйверы для управления этой матрицей. На рис. 1, б и 1, в показана конфигурация и конструктивное исполнение «охранной» поверхности на платах, экранирующих матрицу со стороны колонок и со стороны линий, соответственно.

Проводящие полоски на экранирующих платах подключают к проводнику «охранной» поверхности на плате коммутации в нескольких точках с помощью одноштырьковых разъемов.

Эквипотенциальный сигнал «охраны» коммутируют в узлах матрицы одновременно с основным сигналом с помощью вспомогательного геркона.



а



б



в

Рисунок 1 – Плата коммутации (а) и платы, экранирующие матрицу со стороны колонок (б) и со стороны линий (в)

На рис. 2 представлен сборочный чертеж модуля коммутации в составе платы коммутации, двух экранирующих плат и кронштейна для крепления модуля в базовом блоке.

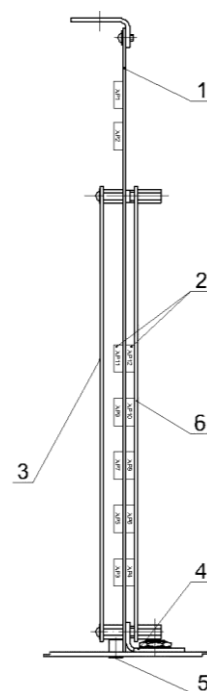
В результате экспериментальных исследований установлено, что искажение коммутируемого сигнала зависит от конфигурации замкнутых узлов в матрице коммутации. Чем больше номер подключенного порта, то есть номер колонки, замкнутой с соответствующей линией в матрице коммутации, – тем больше длина пути сигнала от входа модуля по этой линии до подключенного выходного порта и тем сильнее сказывается влияние паразитных факторов.

Исследования статических параметров модуля были проведены в автоматическом режиме с помощью четырехканального измерителя ВАХ [1, 2].

Исследования динамических параметров выполнены вручную с помощью соответствующих генераторов испытательного сигнала и осциллографа с временем нарастания ПХ 0,35 нс.

Экспериментальные исследования функциональных возможностей матрицы коммутации (объемом 4×48) при измерении емкости проведены с помощью измерителя иммитанса Е7-30. Показана возможность измерения емкостей в

диапазоне от 10 пФ до 1000 пФ по схеме 2Т и по схеме 4Т независимо от конфигурации матрицы.



1 – плата коммутации, 2 – разъемы расширения матрицы коммутации, 3, 6 – платы экранирующие, 4 – кронштейн, 5 – выходные порты (клеммники разъемные)

Рисунок 2 – Внешний вид модуля коммутации

На частотах 1 и 10 кГц длина соединительного кабеля практически не оказывает влияния на результат измерения емкости.

На частоте 100 кГц погрешность измерения емкости 10 пФ составляет 0,1 пФ (1 %) при длине кабеля 3 м, 0,08 пФ (0,8 %) при длине кабеля 2 м и 0,05 пФ (0,5 %) при длине кабеля 1 м.

Найденные значения метрологических параметров коммутатора представлены в табл. 1.

Таблица 1. Метрологические параметры разработанного матричного коммутатора

Ток смещения	$\leq 10 \text{ pA}$ ($\leq 10^{12} \text{ A}$)
Сопротивление изоляции	$\geq 1 \text{ ГОм}$ ($\geq 10^{12} \text{ Ом}$)
Сопротивление замкнутого канала (в начале срока эксплуатации)	$\leq 0,4 \text{ Ом}$
Напряжение смещения (через 3 минуты после замыкания геркона)	$\leq 0,05 \text{ мВ}$
Полоса пропускания (Коэффициент передачи на частоте 10 МГц не менее 0,8)	$> 10 \text{ МГц}$
Время нарастания ПХ (нагрузка 50 Ом)	$\leq 30 \text{ нс}$
Погрешность измерения емкости 10 пФ измерителем Е7-30 через коммутатор в диапазоне частот от 1 кГц до 100 кГц	1 %

Из табл. следует, что численные значения верхней граничной частоты полосы пропускания АЧХ f_B и времени нарастания ПХ τ_n , найденные экспериментально, согласуются друг с другом согласно известному соотношению ($f_B \approx 350/\tau_n$, где частота f_B выражена в мегагерцах, а время τ_n – в наносекундах). Измерение емкости с применением матричного коммутатора целесообразно вести на частотах до 100 кГц.

Представленный матричный модуль коммутации разработан для автоматизированного измерительного комплекса в рамках ГНТП «Эталоны и научные приборы» [1].

Литература

1. Лисенков, Б. Н. Измерительный комплекс на основе матричного коммутатора / Б. Н. Лисенков, Н. В. Грицев // Приборостроение-2019 : материалы 12 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2019 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 46–47.

2. Лисенков, Б. Н. Проверка метрологических характеристик матричного коммутатора / Б. Н. Лисенков, Н. В. Грицев, А. А. Бруск // Опто-, микро- и СВЧ-электроника – 2018 : сборник научных статей Первой международной науч.-техн. конф. – Минск, 2018. – С. 82–85.

УДК 004.056.5

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЕННОГО АЛГОРИТМА ОБМЕНА КЛЮЧАМИ В СРЕДСТВАХ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

Марченков С.Д., Лебедев А.Н.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Представлен расширенный алгоритм обмена ключами со строгой аутентификацией сторон на основе алгоритма Диффи–Хеллмана с заменой операций в конечном коммутативном кольце. Основное внимание уделяется введенной арифметической операции и методу доставки ключевых параметров взаимодействующим сторонам. Рассмотрено возможное применение алгоритма в информационных системах, использующих открытый канал связи и средства криптографической защиты информации.

Ключевые слова: конечное поле, конечное коммутативное кольцо, криптография, протокол Диффи–Хеллмана, рассылка защищенных данных, аутентификация.

PERSPECTIVES OF EXTENDED KEY EXCHANGE ALGORITHM IN CRYPTOGRAPHIC SECURITY TOOLS

Marchenkov S., Lebedev A.

*Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. The extended key exchange algorithm with strong side authentication based on the Diffie-Hellman algorithm with replacement of operations in a finite commutative ring is presented. Arithmetic operation and the way of passing key parameters to the interacting parties are analyzed. The possibilities of using the algorithm in information systems using an open communication channel and cryptographic tools for information protection are considered.

Key words: finite field, finite ring, cryptography, Diffie-Hellman protocol, authentication, secured data distribution.

*Адрес для переписки: Марченков С.Д., Россия, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, г. Москва 105005, Россия
e-mail: marchenkovsd@student.bmstu.ru*

Чтобы гарантировать целостность и конфиденциальность информации при обмене данными между двумя абонентами сети используются гибридные системы, в которых применяются алгоритмы асимметричного шифрования для выработки секретного ключа и последующего симметричного шифрования непосредственно конфиденциальных данных. Протоколы такого типа используют алгоритмы обмена ключами для установления безопасного канала передачи данных. Для обмена ключами и проверки их подлинности в настоящее время используются комбинации

алгоритмов, основанные на модификации классического алгоритма Диффи–Хеллмана [1].

Протокол. В статье [2] была предложена модель передачи зашифрованных данных с доступом легитимного пользователя в определенный период времени. При этом ключевые параметры необходимо хранить на защищенных аппаратных носителях информации.

Предполагается использование схемы протокола, приведенного далее, где S – сервер, U – клиент, M – открытый текст, C – шифртекст, E – операция шифрования, D – операция расшифрования.

Подготовительный этап. Сторона S выбирает основание p , по модулю которого будут производиться операции, выбирает m и k , причем $m, k \in \{1, 2 \dots p-1\}$.

$$Ks_{priv} = Ks_{rand} + \frac{k}{m} = Ks_{rand} + (km^{-1}), \quad (1)$$

где Ks_{rand} – случайное число, 2048 бит [3].

Также необходимо, чтобы $\text{НОД}(m, p) = 1$. Числа m, k записываются в защищенную память обоих абонентов заранее.

Этап выработки ключей. Защищенный файл на носителе информации передан получателю, с этого момента сторона U может сгенерировать свой секретный ключ.

$$Ku_{priv} = Ku_{rand} + \frac{k}{m} = Ku_{rand} + (km^{-1}). \quad (2)$$

U обращается к S через TCP соединение. S посылает U данные g и p , тем самым обозначая, что он активен и готов к обмену.

$$\begin{aligned} S \rightarrow U: Ku_{pub} &= g^{Ku_{priv}} \bmod p = \\ &= g^{Ku_{rand} + (km^{-1})} \bmod p. \end{aligned} \quad (3)$$

U вырабатывает открытый ключ.

$$\begin{aligned} S \leftarrow U: Ku_{pub} &= g^{Ku_{priv}} \bmod p = \\ &= g^{Ku_{rand} + (km^{-1})} \bmod p. \end{aligned} \quad (4)$$

S вырабатывает сессионный ключ.

$$S: K_{sess} = (Ku_{pub})^{Ks_{priv}} = (g^{Ku_{priv}})^{Ks_{priv}}. \quad (5)$$

$$\begin{aligned} K_{sess} &= \frac{(Ku_{pub})^{mKs_{priv}}}{g^{km^{-1}}} \bmod p = \\ &= \frac{g^{m[Ku_{rand} + (km^{-1})][Ks_{rand} + (km^{-1})]}}{g^{km^{-1}}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Этап шифрования. S шифрует сообщение на сессионном ключе K_{sess} и отправляет получателю U .

$$S \rightarrow U: C = E_{K_{sess}}(M). \quad (7)$$

При наступлении определенного условия, например, определенного времени, происходит следующий обмен:

$$S \rightarrow U: Ks_{pub} = g^{Ks_{priv}}. \quad (8)$$

$$U: K_{sess} = (g^{Ku_{priv}})^{Ks_{priv}}. \quad (9)$$

$$U: M = D_{K_{sess}}(C). \quad (10)$$

Введенные операции. Описанная схема имеет смысл, если введенные операции (11) и (12), предложенные в [4, 5], удовлетворяют аксиомам поля:

$$x \oplus y = (x + k/m) + (y + k/m) - k/m, \quad (11)$$

$$x \otimes y = m(x + k/m)(y + k/m) - k/m. \quad (12)$$

Доказательство коммутативности аддитивной операций приведено на формуле (13):

$$x \oplus y = x + y + k/m = y + x + k/m = y \oplus x. \quad (13)$$

Коммутативность мультипликативной операций в соответствии с формулой (14):

$$\begin{aligned} x \otimes y &= m(x + k/m)(y + k/m) - k/m = \\ &= m(y + k/m)(x + k/m) - k/m = y \otimes x. \end{aligned} \quad (14)$$

Для доказательства ассоциативности аддитивной операции необходимо рассмотреть левую (15) и правую (16) части равенства:

$$\begin{aligned} (x \oplus y) \oplus z &= (x + y + k/m) \oplus z = \\ &= (x + y + k/m + z + k/m) = x + y + z + 2k/m, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} x \oplus (y \oplus z) &= x \oplus (y + z + k/m) = \\ &= (x + y + z + k/m + k/m) = x + y + z + 2k/m. \end{aligned} \quad (16)$$

Ассоциативности мультипликативной операции проверяется равенством (17, 18):

$$\begin{aligned} (x \otimes y) \otimes z &= [m(x + k/m)(y + k/m) - k/m] \otimes z = \\ &= m^2(x + k/m)(y + k/m)(z + k/m) - k/m. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} x \otimes (y \otimes z) &= x \otimes [m(y + k/m)(z + k/m) - k/m] = \\ &= m(x + k/m)m(y + k/m)(z + k/m) - k/m. \end{aligned} \quad (18)$$

Дистрибутивность проверяется равенством уравнения $x \otimes (y \oplus z) = x \otimes y \oplus x \otimes z$:

$$\begin{aligned} x \otimes (y \oplus z) &= x \otimes (y + z + k/m) = \\ &= m(x + k/m)(y + z + 2k/m) - k/m. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} x \otimes y \oplus x \otimes z &= [m(x + k/m)(y + k/m) - k/m] \oplus \\ &\oplus [m(x + k/m)(z + k/m) - k/m] = \\ &= m(x + k/m)(y + z + 2k/m) - k/m. \end{aligned} \quad (20)$$

Нейтральным элементом относительно аддитивной операции: $(-k/m)$, обратный элемент: $(-x - 2k/m)$.

Для мультипликативной операции нейтральный элемент $(1 - k/m)$, нулевой элемент $(-k/m)$, обратный элемент $(1 - k^2 - kmx) / [m^2(x + k/m)]$ при условии $x \neq -k/m$.

Практическое применение. Приведенный алгоритм может быть использован в средствах криптографической защиты информации предназначенных для хранения закрытых ключей в защищенной памяти устройства, такими устройствами на данный момент являются токены выполненные в форм-факторе флеш-накопителей и взаимодействующих с программным обеспечением.

Примером такого токена является JaCarta PKI, который имеет удобный SDK для использования в сторонних проектах, носитель содержит энергонезависимую память, разделенную на несколько отдельных областей, в которых находится информация с различной степенью защиты.

Приведем некоторые примеры, для которых может подойти данное программно-аппаратное средство:

1. Экзаминация обучающихся для передачи отдельных пакетов данных с материалами для прохождения аттестации с расшифрованием данных в назначенное время.

2. Обновление лицензии программного обеспечения без необходимости пересылки идентификатора лицензии в открытом виде или трудоемкой повторной доставке данной информации.

Данные варианты подразумевают пересылку по открытому каналу передачи данных определенного количества файлов соответствующего количеству ключей, хранящихся на токене, для последующего последовательного их расшифрования.

Вывод. За счет предварительного распространения ключевых параметров m , k обеих сторон обеспечивается аутентификация ключей, случайный выбор x и y гарантирует, что обе стороны могут быть уверены в создании нового сессионного ключа в каждом сеансе протокола [6].

Реализация протокола с применением криптографических токенов является наглядной и понятной схемой для конечного пользователя.

Литература

1. Diffie, W. New Directions in Cryptography / W. Diffie, M. Hellman // IEEE Transactions on Information Theory. – 1976. – Vol. 22, № 6. – P. 644–654.
2. Лебедев, А. Н. Способ рассылки защищенных данных с регулированием доступа к отдельным их разделам / А. Н. Лебедев // Вопросы кибербезопасности. – 2015. – Т. 13, № 5. – С. 70–72.
3. Recommendation for Pair-Wise Key Establishment Schemes Using Discrete Logarithm Cryptography. NIST. – [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nvlpubs.nist.gov>. – Дата доступа: 21.04.2021.
4. Лебедев, А. Н. Обобщенный протокол Диффи-Хеллмана с аутентификацией сторон / А. Н. Лебедев // Международная алгебраическая конференция, посвященная 110-летию со дня рождения профессора А. Г. Куроша. – М.: МГУ, 2018. – С. 123–127.
5. Лебедев, А. Н. Новые арифметические операции конечного коммутативного кольца и их использование в криптографии / А. Н. Лебедев // Безопасные информационные технологии: сборник трудов IX Всероссийской научно-технической конференции. – Москва, 2018. – 8 с.
6. Matsumoto, T. On seeking smart publickey-distribution systems / T. Matsumoto, Y. Takashima, H. Imai // Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Jpn. Sect. E. – 1986. – Vol. 69, № 2. – P. 99–106.

УДК 004.056

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА БАЗЕ ОТКРЫТОЙ СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ Медведев Н.В.

*Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана
Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Предлагаются принципы построения защищенного комплекса управления гражданского воздушного судна, основанные на трех информационных доменах и открытой сетевой структуре.

Ключевые слова: гражданское воздушное судно, информационный домен, защищенный сервер, единая информационно-вычислительная платформа, комплекс.

CONSTRUCTION PRINCIPLES OF A CIVIL AIRCRAFT COMPLEX BASED ON OPEN NETWORK ARCHITECTURE Medvedev N.

*Bauman State Technical University
Moscow, Russia*

Abstract. The principles of building a secure civil aircraft control complex based on three information domains and an open network structure are proposed.

Key words: civil aircraft, information domain, secure server, unified information and computing platform, complex.

*Адрес для переписки: Медведев Н.В., ул. Вторая Бауманская, 5, г. Москва 105005, Российская Федерация
e-mail: medvedevnick54@yandex.ru*

Современные распределенный и интегрированный принципы построения комплекса бортового оборудования гражданского воздушного судна (БО ГВС) на базе открытой сетевой архитектуры и единой информационно-вычислительной платформы обусловили повышение степени внутренней информационной связности ГВС [1]. Это существенно повысило степень внешней

информационной связности ГВС и привело к появлению концепции информационного связанного (E-enabled) ВС с поддержкой внешних сервисов, как показано на рис. 1 [2].

Связанным воздушным судам необходимо быть самостоятельными узлами в Авиационных самоорганизующихся сетях (AANET), повсеместно общаясь с наземной инфраструктурой и други-

ми бортами. Увеличение информационных потоков от самолетов к земле, от земли к самолетам, между самолетами при помощи AANET позволит повысить безопасность полетов, точность расписания, эффективность обслуживания, уровень обслуживания пассажиров, как показано на рис. 2.

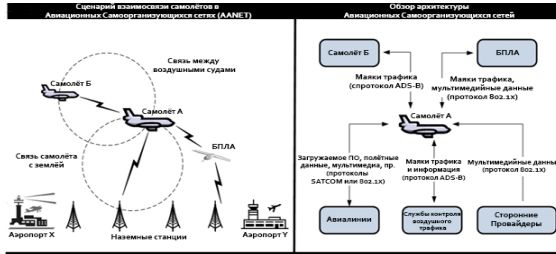


Рисунок 1 – Связанные воздушные суда

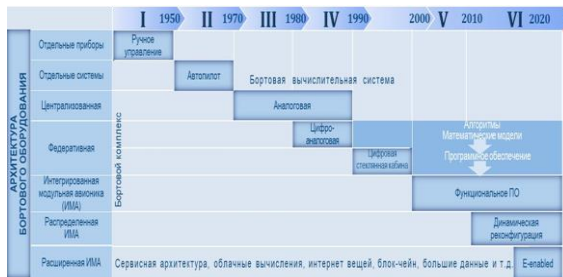


Рисунок 2 – Открытая сетевая архитектура

В соответствии с международными стандартами ARINC 811, ARINC 664 единая информационно-вычислительная платформа ВС разделяется на информационные домены с разной степенью защищенности [1] (рис. 3):

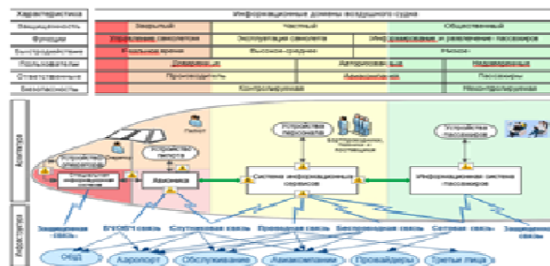


Рисунок 3 – Доменная структура управления ГВС

Домен информационных сервисов предоставляет информацию для обслуживающего и технического персонала и обеспечивает безопасное соединение между независимыми доменами ГВС: авионики, системы развлечения пассажиров и любыми внешними сетями. Включает в себя домен обслуживания ВС, предоставляющий оперативную и административную информацию для экипажа ГВС (обслуживающего и технического), а также домен поддержки пассажиров, предоставляющий информацию в информационную систему пассажиров.

Домен бортовой развлекательно-информационной системы предоставляет развлекательные услуги и информацию о полете пассажирам.

Включает в себя два домена: домен информационной системы пассажиров и домен пассажирских устройств. Для разделения информационно-вычислительной платформы по уровням доверия на безопасные контролируемые домены между ними внедряются дополнительные аппаратные средства защиты: бортовой защищенный шлюз и бортовые защищенные сервера.

Одно из главных требований в гражданской авиации – обеспечение международной interoperability с учетом реальной оснащённости воздушных судов, наземной инфраструктуры. А это серьезно ограничивает использование технологий обеспечения информационной безопасности. Для защиты предполагается применение криптографических средств, включая открытое распределение ключей. Некриптографические методы, как показывает анализ сложившейся ситуации, зачастую оставляют заметные уязвимости в системе безопасности.

Важнейшим моментом является гармонизация подходов под эгидой ИКАО. В 2019 году на кибер-саммите ИКАО получила подтверждение необходимости криптозащиты цифровых и голосовых сообщений в системе управления воздушным движением. Исходя из взаимодействия беспилотных воздушных судов (БВС) с пилотом дистанционно-пилотируемых авиационных систем (ДПАС) и системой УВД и с учетом требований по кибербезопасности, эти факторы определяют структуру и технические характеристики средств интеграции ДПАС в общее воздушное пространство.

Использование беспроводных технологий подразумевает доступ к радиосвязи. Например, на борту планируется использовать мобильные телефоны, ноутбуки, RFID-тэги, повышающие угрозу несанкционированного доступа к беспроводным узлам «связанного» самолета.

Общей целью «врага» может считаться получение привилегированного доступа к операциям «связанного» самолета путем атаки информационных активов. Враг для сети может быть внешним и внутренним. Он может использовать пассивные атаки (анализ сетевого трафика) и активные атаки (создавать ложный узел, компрометировать информацию от сенсоров). Предполагается, что злоумышленник может глушить беспроводные каналы.

Для того чтобы в процессе разработки комплекса БО ГВС была заложена защита от угроз кибербезопасности, необходимо руководствоваться помимо указанных международных стандартов также стандартами в области защиты информации. Главным стандартом в данной области является стандарт ГОСТ Р ИСО/МЭК 15408, состоящий из трех частей и регламентирующий стадии и содержание разработки требований к проектированию ПО. Комплекс БО ГВС представляет собой

интеллектуальную защищенную автоматизированную систему, обеспечивающее хранение всей информации из внешней среды, доступ к которой может получить каждый из доменов.

Комплекс призван выполнять следующие функции:

- сервер информационных приложений;
- управление двунаправленным потоком данных между доменом авионики и другими доменами;
- безопасная фильтрация трафика из доменов связи, пилота, оператора и пассажиров;
- безопасные сетевые возможности для приложений и членов экипажа.

В состав комплекса входят: защищенный коммуникационный модуль; сервер информации; серверы приложений.

Сервер информации и серверы приложений обеспечивают хранение всей информации из внешней среды, доступ к которой может получить каждый из доменов, а также реализацию внешних сервисов, предоставляемыми диспетчерскими службами, авиакомпаниями, производителями и третьими лицами.

Защищенный коммуникационный модуль включает в свой состав универсальный интеграционный шлюз и универсальный шлюз безопасности. Шлюз безопасности предназначен для решения большинства вопросов кибербезопасности, связанных с поддержкой информационно-вычислительной платформы внешних сервисов.

Литература

1. Концепция обеспечения информационной безопасности бортового оборудования воздушного судна / В.В. Косьянчук [и др.] // Вопросы кибербезопасности. – 2018. – Т. 28, № 4. – С. 9–20.
2. Документы ИКАО – Библиотека – Авиационный портал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://airspot.ru/library/dokumenty-ikao> – Дата доступа: 01.10.2021.
3. Управление инспекции по безопасности полетов РФ/Анализ состояния безопасности полетов в гражданской авиации в 2018 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dvmtu-favt.ru>. – Дата доступа: 20.08.2021.
4. Воздушный кодекс РФ от 19.03.1997 N 60-ФЗ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://consultant.ru>. – Дата доступа: 25.07.2021.

УДК 53.082

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗОНДОВЫМ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследованы процессы деградации лакокрасочного покрытия на металлической подложке при воздействии раствора соли. Анализ поверхности выполнен зондовым зарядочувствительным методом. Получены карты распределения потенциала поверхности. Выявлена корреляция между потенциалом поверхности и типом дефекта лакокрасочного покрытия.

Ключевые слова: потенциал поверхности, лакокрасочное покрытие, деградация покрытия.

STUDY OF THE PROCESSES OF DEGRADATION OF PAINT COATINGS BY THE PROBE CHARGING SENSITIVE METHOD

Mikitsevich U., Pantsialeu K., Zharin A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The processes of degradation of a paint coating on a metal substrate after exposure to a salt solution have been investigated. The analysis of the surface was carried out using a charge-sensitive probe method. The maps of the surface potential distribution are obtained. A correlation was found between the surface potential and the type of paintwork defect.

Key words: surface potential, paint coating, coating degradation.

*Адрес для переписки: Микитевич В.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mikitevichva@bntu.by*

Введение. Широкое применение лакокрасочных покрытий требует проведение исследования качества покрытий. Стандартные методы испытания основаны на исследовании длительного воздействия неблагоприятных факторов с последующей визуальной оценкой по бальной шкале.

В настоящее время зондовые зарядочувствительные методы измерения находят все более широкое применение. Зондовые методы применяются не только для исследования поверхностей металлов и полупроводников [1], но для исследования полимеров [2, 3]. Особенность

зондовых зарядочувствительных методов – высокая чувствительность к изменениям механических напряжений, химическому составу, адсорбционным процессам и др. При этом метод измерения не оказывает разрушающего воздействия на исследуемую поверхность.

Цель. Выявить закономерности деградации лакокрасочного покрытия при воздействии раствора хлорида натрия.

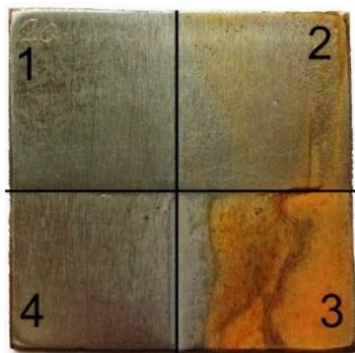
Материалы и методы. В качестве подложки использовалась стальная пластина марки 08ПС размерами 40х40мм и толщиной 1мм. Предварительная обработка поверхности – на шлифовальном станке, а затем наждачной бумагой Р1500.

Для покрытия поверхности образцов использован акриловый однокомпонентный атмосферостойкий лак KUDO KU-9010. Лак наносился путем распыления в течение 5 секунд. Сушка лака осуществлялась в течение 2 суток при комнатной температуре.

Раствор соли приготовлен путем растворения каменной соли первого сорта с массовой долей хлористого натрия 97,5 % в дистиллированной воде (рН = 5,4; удельная электрическая проводимость 0,0005 См/м при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Концентрация раствора соли составляла 50 г/дм³.

Сканирование потенциала поверхности (для лака) и контактной разности потенциалов (для металла) проводились на измерительной установке СКАН-2019[4].

Исследование проводилось следующим образом: металлическая подложка была на половину покрыта лаком. Затем, после сушки помещена в раствор соли таким образом, как показано на рис. 1.



1 – область, покрытая лаком, находилась над поверхностью раствора; 2 – область, покрытая лаком, находилась в растворе; 3 – область без лака находилась над поверхностью раствора; 4 – область, без лака, находилась в растворе

Рисунок 1 – Подложка после коррозии

Выдержка в растворе составляла 2 суток при комнатной температуре. После извлечения из раствора, выполнялась промывка в дистиллированной воде и сушка в течение суток при комнатной температуре. На каждом этапе выполнялось сканирование поверхности.

Результаты исследования. Распределение потенциала поверхности подложки, покрытой лаком, представлено на рис. 2. Потенциал поверхности (0–40) мВ соответствует области подложки, покрытой лаком, а потенциал поверхности (-40–0) мВ соответствует области подложки, непокрытой лаком. Распределение потенциала поверхности после воздействия раствора соли представлено на рис. 3.

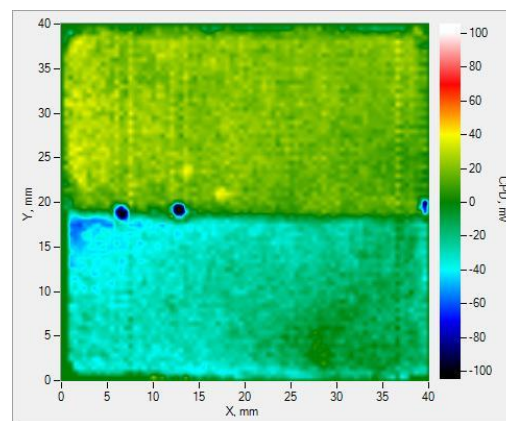


Рисунок 2 – Распределение потенциала поверхности подложки, покрытой лаком

Как видно из рис. 3, потенциал поверхности имеет ярко выраженную неоднородность. Области 1 и 4 соответствуют коррозии металла при воздействии влаги, испаряющейся из раствора, а области 2 и 3 – коррозии в растворе соли. Причем в области 3 контакт металла с раствором осуществился непосредственно, а в области 2 – через трещины в лаке.

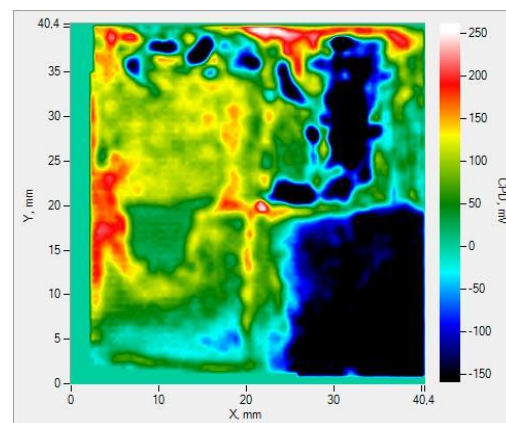


Рисунок 3 – Распределение потенциала поверхности подложки, после процесса коррозии

Дальнейшие исследования поверхности лака оптическим микроскопом позволили выявить корреляцию между значением потенциала поверхности и типом дефекта лакокрасочного покрытия. Например, в секторе 2 в области потенциала поверхности менее 150 мВ заметны короткие трещины, расположены по 3 трещины, сходящиеся в одной точке. Длина трещин не

превышает 200 мкм. Количество трещин – около 25 на 1 мм² (рис. 4).

На рис. 4 вертикальные полосы соответствуют следам на поверхности металла после механической обработки. Темные хаотические полосы соответствуют микротрещинам лакокрасочного покрытия.



Рисунок 4 – Фотоснимок поверхности с координатами (35; 35) мм

Заключение. Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод о возможности применения зондового зарядочувствительного метода для анализа процессов деградации лакокрасочных покрытий. При этом возможно получение не только качественной, но и количественной оценки состояния исследуемой поверхности.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Гранта Министерства образования Республики Беларусь (рег. № 20211270).

Литература

1. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface / K. Pantisaleyeu [et al.] // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2, iss. 5, art. 2.
2. Пантелеев, К. В. Исследование деформационных процессов в полимерах зарядочувствительным методом / К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. РНТК мол. уч., 9–11 ноября 2020 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол. : И. Н. Ковалева (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 115–117.
3. Микитевич, В. А. Цифровой зонд кельвина для исследования электрофизических свойств поверхности полимеров / В. А. Микитевич, К. В. Пантелеев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. Респуб. науч.-техн. конф. мол. уч., 9–11 ноября 2020 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол. : И.Н. Ковалева (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2020. – С. 110–111.
4. Scanning photostimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters / A. Tyavlovsky [et al.] // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2, iss. 4, art. 11.

УДК 614.842

ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ

Мисюкевич Н.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Описана последовательность использования формул, приведенных в технических нормативных правовых актах, для расчета параметров безопасной эвакуации людей при пожаре. Даны пояснения по использованию некоторых параметров расчета, которые отличаются неоднозначностью восприятия, особенно при первом использовании регламентированной методики расчета. Приведены формулы, отсутствующие в стандартной методике. Обоснована допустимость упрощений расчета и условия при которых они применяются.

Ключевые слова: расчет, методика, безопасность, эвакуация, пожар.

DESCRIPTION OF THE FEATURES OF THE ALGORITHM FOR CALCULATION OF THE PARAMETERS OF SAFE EVACUATION OF PEOPLE IN THE FIRE

Misiukevich M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The sequence of using the formulas given in the technical normative legal acts for calculating the parameters of safe evacuation of people in case of fire is described. Explanations are given on the use of some calculation parameters, which differ in ambiguity of perception, especially during the first use of the regulated calculation method. Formulas that are absent in the standard method are given. The admissibility of calculation simplifications and the conditions under which they are applied are substantiated.

Key words: calculation, technique, safety, evacuation, fire.

*Адрес для переписки: Мисюкевич Н.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Misiukevitsch@mail.ru*

Методика расчета параметров безопасной эвакуации людей при пожаре приведена в приложении 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1]. В тоже время,

ряд необходимых параметров расчета отсутствует, а сама методика трудно применима для непосредственного ввиду непоследовательности изло-

жения для практического применения и отсутствия логических пояснений.

Критерием безопасности эвакуации является наблюдения соотношения

$$t_p \leq t_n - t_c, \quad (1)$$

где t_p – расчетное время эвакуации; t_n – необходимое время эвакуации; t_c – время свободного развития пожара до начала эвакуации.

При защите помещений системами пожарной сигнализации (СПС), а именно СПС формируют командный импульс на включение систем оповещения и управления эвакуацией людей при пожаре (СОУЭ), время свободного развития пожара до начала эвакуации принимается равным нулю, и сравнению подлежат только две величины: необходимое время эвакуации и расчетное время эвакуации.

Расчет целесообразнее начать с определения необходимого времени эвакуации из помещений, в которых находятся люди и общих путей их движения к выходам из здания. В дальнейшем определение расчетного времени эвакуации и сравнение его с необходимым позволит незамедлительно формировать предложения по изменениям архитектурно-строительной части здания для соблюдения условий безопасности, то есть фактически будет проведена проверка соответствия условиям безопасности путей эвакуации как по выполнению обязательных для соблюдения требований технических нормативных правовых актов (ТНПА), так и в результате расчетного моделирования движения людских потоков.

Расчет ведем по опасным факторам пожара (ОФП), исходя из преобладающей пожарной нагрузки. Другая пожарная нагрузка не учитывается. Синергизм (возможное совместное негативное действие) ОФП не учитывается. Критическую продолжительность пожара определяем по формулам 25–28 приложения 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1], а необходимое время эвакуации по формуле (32).

При расчете критической продолжительности пожара следует учитывать, что при неизвестном объеме, который занимает оборудование, свободный объем можно определить исходя из геометрического объема помещения, который уменьшается на 20 %. Параметры «z» и «Z», указанные в приложении 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1] – это не два разных параметра, а один и тот же параметр, по разному обозначенный в формулах стандарта. Он определяется при высоте помещения не более шести метров. При большей высоте помещений формула неприменима. По условиям безопасности расчет таких помещений с введением в формулу не реальной высоты, а значения высоты в шесть метров дает меньшее время и создает более требовательные условия для обеспечения без-

опасности. Такое упрощение допустимо, так как соответствует критериям безопасности.

Коэффициент полноты горения в стандарте [1] указан только для помещений, в которых расположен очаг пожара и коридоров, отсутствует для холлов, лифтохоллов, фойе, лестничных клеток и других подобных помещений без пожарной нагрузки. Учитывая, что в ранее перечисленных помещениях, как и в коридорах, отсутствует пожарная нагрузка и происходит процесс догорания газов и паров, образовавшихся в помещениях, коэффициент полноты горения в них принимается таким же, как для коридоров.

При определении перпендикулярного к направлению движения ОФП размера зоны горения в коридоре необходимо руководствоваться шириной коридора.

Определение расчетного времени пожара начинаем с формулы 8 приложения 2 ГОСТ 12.1.004-91 [1].

Плотность потока D , отражающая количество людей на участке эвакуации, по ГОСТ 12.1.004-91 [1], измеряется в $\text{м}^2/\text{м}^2$. Такое изложение вызывает справедливую критику, так как показатель оказывается безразмерным, и его следует назвать коэффициентом плотности. При этом становится логичным изложение и размерность других величин для расчета движения людского потока: и скорость v , и интенсивность движения q измеряются в $\text{м}/\text{мин}$. Взаимозависимость указанных величин можно выразить равенством

$$q = Dv. \quad (2)$$

Учитывая что коэффициент плотности D апосредованно отражает количество людей N , интенсивность q может быть представлена количеством людей N пересекающих сечение эвакуационного пути в единицу времени. При известной скорости потока v количество эвакуированных определяется соотношением

$$N = \frac{v\delta t}{f}, \quad (3)$$

где δ – ширина пути эвакуации, м ; t – время эвакуации, мин ; f – площадь горизонтальной проекции человека, м^2 .

Плотность потока D определяется только для начальных участков. По таблице 2 приложения 2 [1] для них определяются методом линейной интерполяции значения скорости и интенсивности движения. Все изменения в дальнейшем движении отслеживаются по изменяющейся интенсивности движения потока, которая не может превышать предельных величин в зависимости от вида пути эвакуации. Используем формулы 9, 10 и 12 прил. 2 [1].

Если помещения небольшие и положение проходов неизвестно, смоделировать движение можно исходя из наиболее неблагоприятной

ситуации: путь движения к выходу параллельно стенам наиболее длинный, ширина пути эвакуации минимальная (один метр). Все люди в помещении равномерно распределены на пути эвакуации. Это позволяет определить плотность потока D , интенсивность q и скорость движения v . Время выхода последнего человека определяется по формуле 10 прил. 2 [1]. Время выхода первого человека равно нулю. Для случая нахождения в помещении одного человека это будет означать возможность его нахождения как в начале, так и в конце пути эвакуации. При графическом отображении следует учитывать, что длина пути определяется по центру пути эвакуации. Поэтому движение из помещения отображается стрелкой, которая оканчивается у дверного проема, а следующий участок отображается стрелкой, начинающейся в середине коридора. Путь движения к середине коридора не отображается и не рассчитывается.

Следует отметить, что существующие ТНПА никак не определяют допустимость задержки эвакуации. Анализ и натурные наблюдения показывают, что задержка эвакуации допустима лишь в помещениях, откуда люди начинают движение при эвакуации. Задержка эвакуации на последующих общих путях эвакуации недопустима и может приводить к трагическим последствиям: падению людей (эффект «домино»), затаптыванию, раздавливанию. Печальный пример этому – трагедия в подземном переходе станции метро «Немига» в Минске в 1999 году.

В помещениях с массовым пребыванием людей на путях эвакуации, как правило, возникает превышение максимально возможной плотности потока: коэффициент плотности при расчете получается 0,9 и более. Возникает задержка эвакуации при движении по общим проходам или/и в дверях. Однако, приложение 2 [1] не содержит формулы для расчета параметров эвакуации в такой ситуации. Учитывая, что движение возможно при коэффициенте плотности не выше 0,9, время

задержки эвакуации t_3 можно определить, используя значение интенсивности движения при максимальной возможной плотности по формуле

$$t_3 = \frac{N_3 f}{0,9 q_i \delta_i} \quad (4)$$

где N_3 – количество людей, не успевающих пройти без задержки, чел; q_i – интенсивность движения на участке, м/мин; δ_i – ширина участка пути эвакуации, м.

Для помещений с массовым пребыванием людей общее время эвакуации будет состоять из суммарного времени движения и времени задержки движения. Целесообразно сразу определить наиболее критичное место задержки эвакуации. Это будут проходы между рядами или эвакуационные выходы. Поэтому начав расчет от наиболее удаленного местоположения и получив превышение плотности потока на общих проходах в помещении, следующим участком следует рассмотреть движение потока на докритической плотности от ближайшего к выходу места до выхода. Если в эвакуационном выходе расчет покажет задержку эвакуации, то следует уменьшить количество людей в потоке, движущихся по общему проходу и добиться возможности их расчетного движения через эвакуационный выход без задержки. Время задержки движения определяется в дверном проеме исходя из оставшегося количества людей. Если в эвакуационном выходе задержки движения потока не происходит, то время задержки эвакуации определяется в проходе, исходя из количества людей, которые не могут двигаться без задержки эвакуации.

Литература

1. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования : ГОСТ 12.1.004-91. – Введ. 01.07.1992. – Минск: Госстандарт, 2008. – 65 с.

УДК 681.2.08

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НОРМИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ ТЕРМОПАР

Мороз А.С., Тявловский А.К.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данном докладе рассмотрены схмотехнические возможности повышения точности и надежности нормирующего преобразователя сигналов термодатчиков. Повышение точности достигается за счет: применения специального АЦП, дополнительных датчиков температуры «холодных спаев», аналогового коммутатора входных сигналов что позволяет увеличить количество измерительных входов и включение датчиков в дифференциальном режиме. Повышение надежности обуславливается: добавлением гальванической изоляции в измерительный блок, разделением земель на аналоговую и цифровую, установкой суперсеров по измерительным входам.

Ключевые слова: термодатчик, АЦП, преобразователь, датчик.

IMPROVING THE ACCURACY AND RELIABILITY OF THE NORMALIZING THERMOCOUPLE SIGNAL CONVERTER

Moroz A., Tyavlovsky A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. In this report, the circuit engineering possibilities of improving the accuracy and reliability of the normalizing converter of thermocouple signals are considered. The increase in accuracy is achieved due to: the use of a special ADC, additional "cold junction" temperature sensors, an analog input signal switch that allows you to increase the number of measuring inputs and the inclusion of sensors in differential mode. The increase in reliability is due to: the addition of galvanic isolation to the measuring unit, the division of the earth into analog and digital, the installation of tvs diode at the measuring inputs..

Key words: thermocouple, ADC, converter, sensor.

Адрес для переписки: Мороз А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: artur.moroz.97@mail.ru

Термопары являются простым и надежным датчиком температуры, предназначенного для осуществления точных измерений в довольно широких температурных диапазонах, при этом обладая низкой инерциальностью, высокой коррозионной стойкостью, отсутствие саморазогрева измерительного спаев. Номинальные статические характеристики преобразования термопар приведены в ГОСТ Р 8.585-2001.

Повышение точности нормирующего преобразователя сигналов термопар:

– применен высоко разрядный аналогово цифровой преобразователь (АЦП) (MAX31856) с интегрированными функциями диагностики входных сигналов и входным операционным усилителем, внутренним датчиком температуры «холодных спаев», а также автоматическая линеаризация значений измерения величины ЭДС термопарного датчика [1];

– добавлением нескольких внешних полупроводниковых датчиков температуры TMP112A [2] расположенных вблизи клемм подключения термопарных датчиков для более точной оценки температуры «холодных спаев», с погрешностью измерения температуры $\pm 0,5$ °C. В случае установки более 2-х датчиков возможно введение специальных алгоритмов усреднения показаний датчиков для достижения меньшей погрешности измерения температуры а также введения статистики измерений позволит опираться на доверенное значение погрешности;

– использование аналогового коммутатора для увеличения количества измерительных каналов. Позволяет реализовать: дублирование измерений или дифференциальное измерение температуры. Также при использовании одного тракта измерения (один входной операционный усилитель и АЦП) и мультиплексировании этого канала погрешность измерительной части устройства является константой что увеличивает дифференциальную точность измерения между двумя и более термопарами (погрешность возможно только от их непосредственных характеристик; чистоты

спла-вов/металлов проводов термопары, отсутствию примеси других веществ в измерительном сплаве, длины и емкости проводов). При одинаковой температуре измерительных спаев возможна их калибровка в 0 относительно друг друга, программным методом;

– питание измерительного блока реализовано через линейные стабилизаторы с высокой характеристикой ослабления входного шума по питанию и низким выходным шумом;

– одним из источников погрешностей аналоговой части является помеха, создаваемая цифровой частью системы. Для исключения прохождения помех через цепи заземления цифровой и аналоговой земли соединенных вместе только в одной общей точке [3].

Повышение надежности нормирующего преобразователя сигналов термопар, достигается за счет дополнительных элементов защиты:

– гальваническая развязка измерительного блока (схематехника представлена на рис. 1), позволяет решить следующие проблемы:

а) исключает появление паразитных токов по земле, уравнивающих потенциалы, и снижает индуктивные наводки, вызванные этими токами;

б) уменьшает практически до нуля напряжение синфазной помехи на входе дифференциального приемника аналогового сигнала. пример на рис. 2 за счет емкости между проводами линии питания и термопары в каждом из проводов термопары создается сигнал переменного тока примерно равной амплитуды. у измерительного блока без гальванической изоляции имеется некоторая емкость между его «минусовым» входом землей. токи, протекающие через эту емкость и через выводы термопары, создают сигнал синфазной помехи, который проявляется в виде погрешности измерения.) [4];

в) защищает от пробоя . например, синфазное напряжение на термопаре относительно земли может быть каким угодно большим, если оно не превышает напряжение пробоя изоляции гальванической изоляции;

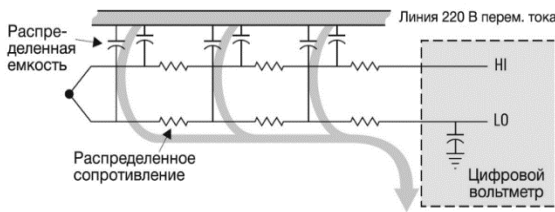


Рисунок 2 – Протекание синфазной помехи

– супрессоры с высоким значением пикового напряжения, защищают чувствительные к статике измерительные входы. Выбрана однокристалльная сборка чтобы исключить неравномерно нагретые переходы «спаи» в термодатных цепях;
– использование аналогового коммутатора позволяет применять нескольких датчиков в одной точке измерения температуры для дополнительного резервирования системы;

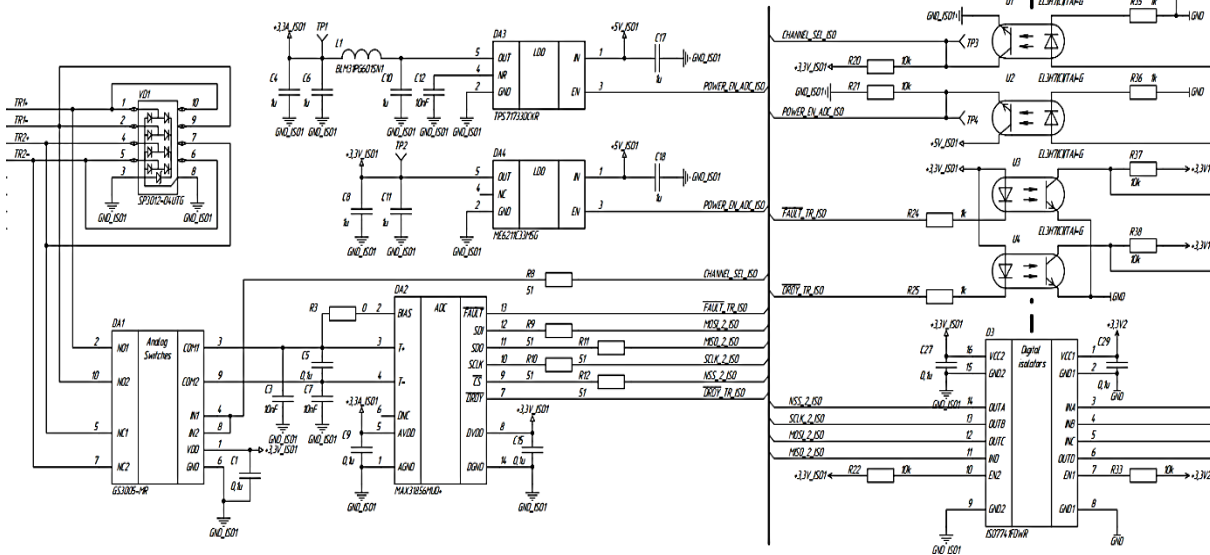


Рисунок 1 – Гальванически изолированный измерительный блок

– программная реализация алгоритмов фильтрации полученных данных для выявления деградирования термопар и отслеживания изменения их температурных кривых.

Нормирующий преобразователь сигналов термопар позволяет без применения внешних дорогостоящих приборов получать возможность измерять дифференциальные значения температуры с минимальными возможными значениями погрешности, инерциальностью измерения, задержками измерения и высокой разрядностью для данных датчиков и измерительного блока системы. Дополнительно принятые меры защиты измерительного блока позволяют увеличить устойчивость к внешним воздействиям и расширить сферу применения нормирующего преобразователя.

Литература

1. MAX31856: Datasheet. – Электронные данные [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31856.pdf>. – Дата доступа: 05.10.2021.
2. TMP112AIDRLR: Datasheet. – Электронные данные [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp112.pdf>. – Дата доступа: 05.10.2021.
3. Пат Барнс, Д. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами / Д. Пат Барнс. – М. : Мир, 1990. – 239с.
4. Keysight Technologies Практические советы по измерению температуры. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://etk-komplekt.ru>. – Дата доступа: 05.10.2021.

УДК 628.74

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ОГРАЖДЕНИЯХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ

Невдах В.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. С помощью программы FDS выполнено моделирование пожаров в ограждениях с естественной вентиляцией. Получено, что параметры реакций горения материалов, из которых сделаны предметы мебели, находящиеся в ограждениях, определяют динамику их выгорания.

Ключевые слова: Компьютерное моделирование, динамика пожара, пожар в ограждениях, естественная вентиляция.

COMPUTER SIMULATION OF FIRE DYNAMICS IN COMPARTMENTS WITH NATURAL VENTILATION

Nevdakh V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. FDS was used to simulate fires in compartments with natural ventilation. It was found that the parameters of the combustion reactions of the materials from which the pieces of furniture are made, which are in the enclosures, determine the dynamics of their burnout.

Key words: computer simulation, fire dynamics, compartment, natural ventilation.

Адрес для переписки: Невдах В.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by

Разработка эффективных систем противопожарной безопасности различных объектов, а также способов и методов тушения пожаров требует знания динамики развития пожаров в ограждениях. Пожар в ограждениях может развиваться по различным сценариям, зависящим от геометрии ограждений, типом горючих материалов их количеством, расположением, площадью поверхности и вентиляции [1]. На разных этапах пожаров меняется их характер с пожара, контролируемого горючими материалами, когда кислорода достаточно для горения, на пожар, контролируемый вентиляцией, когда кислорода не достаточно для горения всех материалов [2].

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование динамики пожара в ограждениях с естественной вентиляцией, содержащих предметы мебели из горючих материалов, сгорающих с разными скоростями. Исследовалось влияние параметров реакций горения материалов мебели на динамику ее выгорания.

Моделирование выполнялось с использованием программы FDS (Fire Dynamics Simulator) [3, 4]. С помощью графического интерфейса PyroSim в расчетной сетке, состоящей из кубических ячеек с ребром 0,1 м, была создана модель ограждений – помещения с размерами 4,4×4,9×2,7 м, в котором находятся диван, кресло, два ковра на полу, стол, две тумбы (рис. 1). В ограждении осуществлялась естественная вентиляция через проем размером 4,2×2,2 м в стене напротив дивана. Пожар инициировался источником с тепловыделением 10 кВт и размерами 0,1×0,1 м, помещаемым на сидение дивана. Горение горючих материалов моделировалось реакциями, аналогичными реакции горения полиуретана – материала, часто используемого в мягкой мебели. Моделировались первые 1500 секунд пожаров. Скорость развития пожаров определяется параметрами реакций горения материалов, из которых сделана мебель.

На рис. 2 представлена динамика тепловыделения быстрого, тепловыделение 1000 кВт достигается за время ~ 100 секунд, и медленного, тепловыделение 1000 кВт достигается за время ~ 900 секунд, пожаров [2].

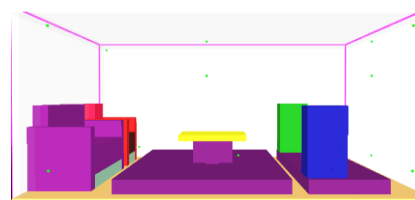


Рисунок 1 – Вид помещения с мебелью

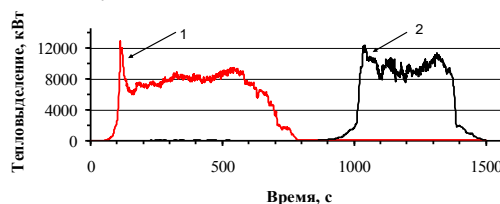


Рисунок 2 – Зависимости тепловыделения от времени быстрого (1) и медленного (2) пожаров

При пожаре в ограждениях с естественной вентиляцией повышается температура воздуха и уменьшается его давление (рис. 3), что увеличивает интенсивность газообмена и поступление свежего воздуха, влияя на характер пожара.

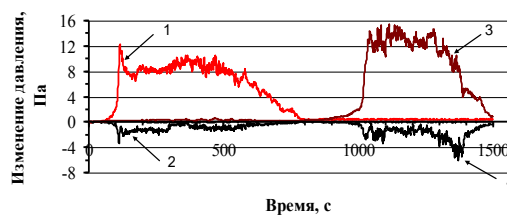


Рисунок 3 – Динамика изменения давления воздуха в центре помещения на высоте 2,3 (1, 3) и 0,3 м (2, 4) при быстром (1, 2) и медленном (3, 4) пожарах

Рис. 4, а–к иллюстрируют изменение расположения областей пламенного горения в течение быстрого пожара. Видно, что после стадии полного охвата помещения пламенем пламенное горение смещается от дивана к вентиляционному проему. В области дивана в это время происходит только пиролиз горючих материалов. Затем пламенное горение смещается обратно к дивану, приводя к полному выгоранию материалов на своем пути. При медленном пожаре, после наступления стадии полного охвата пламенем,

пламенное горение происходит по всей глубине ограждений. Расположение горючих материалов,

их параметры и газодинамические процессы определяют динамику выгорания помещения.

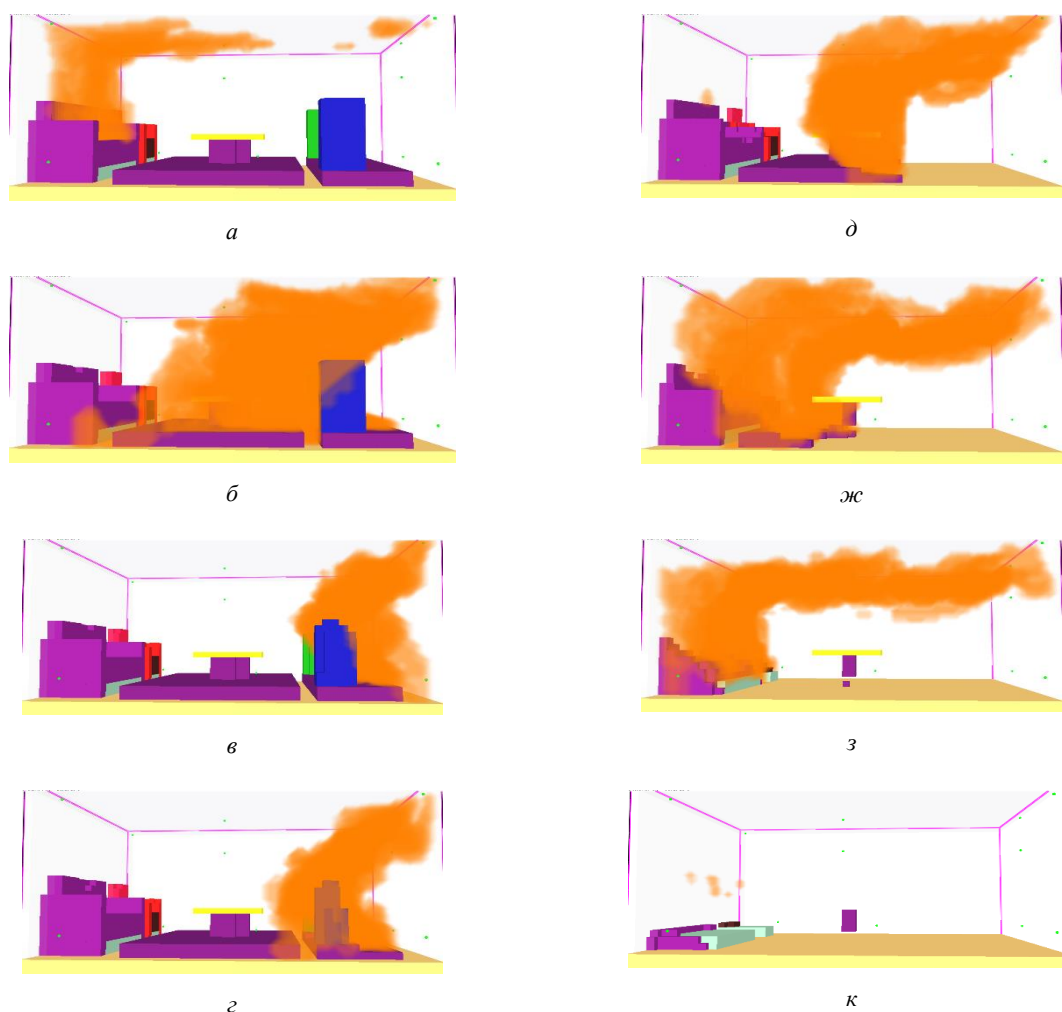


Рисунок 4 – Картины расположения пламенного горения на 99 (а), 117 (б), 150 (в), 186 (г), 363 (д), 489 (ж), 585 (з), 786 (к) секундах быстрого пожара

Литература

1. Karlsson, B. Enclosure fire dynamics / B. Karlsson, J. G. Quintiere. – CRC Press LLC, 2000. – 317 p.
2. Drysdale, D. Fire introduction for fire dynamics / D. Drysdale. – Third edition : Wiley, 2011. – 551 p.

3. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – MA : Gaithersburg, 2009. – 94 p.

4. Fire Dynamics Simulator (Version 5). User's Guide, NIST Special Publication 1019-5 / K. McGrattan [et al.]. – MA : Gaithersburg, 2009. – 176 p.

УДК 004.31, 004.4

ПОРТАТИВНЫЙ ЗАЩИЩЕННЫЙ КОММУНИКАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ

Ращенья Н.А., Астапенко Г.Ф., Кучинский П.В., Новик М.И.

НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена базовая архитектура и аппаратно-программное обеспечение портативного защищенного коммуникационного модуля (ПЗКМ). Модуль позволяет взаимодействовать с другими ПЗКМ посредством беспроводного интерфейса WiFi-Direct в распределенной P2P сети, а также реализовать взаимодействие с персональным коммуникатором удаленной связи (например, смартфоном) для организации защищенных сессий в виртуальной частной (выделенной) сети. Базовая архитектура ПЗКМ представляет собой модифицируемый и масштабируемый набор функциональных модулей, обеспечива-

ющих безопасное формирование, обработку и передачу мультимедийных данных. Программные компоненты ПЗКМ организованы в иерархическую структуру взаимодействия от верхнего прикладного уровня до уровня встроенной операционной системы.

Ключевые слова: информационная безопасность, криптографическая защита, защищенный коммуникационный модуль.

PORTABLE PROTECTED COMMUNICATION MODULE

Rashchenia N., Astapenko G., Kuchynski P., Novik M.

A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Belarus

Abstract. The basic architecture, hardware and software of the portable protected communication module (PPCM) are presented. The module interacts with the same modules via a WiFi-Direct wireless interface in a distributed P2P network, interacts with a personal remote communicator (for example, a smartphone) to organize secure sessions in a virtual private network. The basic architecture of the PPCM is a modifiable and scalable set of functional modules that ensure the safe formation, processing and transmission of multimedia data. The software components of the PPCM are organized in a hierarchical structure of interaction from the upper level of application software to the level of the embedded operating system.

Key words: information security, cryptographic protection, protected communication module.

Адрес для переписки: Ращенья Н.А., ул. Академика Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: rashchenia@bsu.by

Архитектура портативного защищенного коммуникационного модуля (ПЗКМ). ПЗКМ представляет собой компактное устройство, которое в одном из прикладных применений может служить надежным, безопасным ассистентом пользователя при формировании, передаче и приеме конфиденциальной информации. На рис. 1 представлен функциональный состав основных компонентов ПЗКМ.

Ядром модуля является процессор TIAM4378 [1] на основе ARM архитектуры. Он содержит блоки обработки данных, их хранения, а также периферийный узел, осуществляющий интерфейс связи с внешними источниками и приемниками потоков данных и сигналов.

Несмотря на то, что внутри процессора находится встроенный криптомодуль, для повышения надежности и безопасности ПЗКМ содержит дополнительные аппаратные модули криптоускорителя и физического генератора случайных числовых последовательностей (ГСЧП). Модуль криптоускорителя реализует арифметические и алгебраические функции обработки больших чисел, а также операции над точками эллиптической кривой. Блок контроля доступа к критической информации дополнен устройством кнопочного набора ПИН-кода.

Для реализации беспроводного интерфейса на основе технологии WLAN используется комбинированный (WiFi/Bluetooth) чип TI – WL1835 MODCOM8B [2], а для реализации беспроводной связи ближнего поля (в пределах 10 см) (NFC) – чип TITRF7970A [3].

Для обеспечения средствами мультимедийной обработки данных ПЗКМ содержит встроенные модули: аудио кодек, видео камера, LCD панель и сенсорный экран.

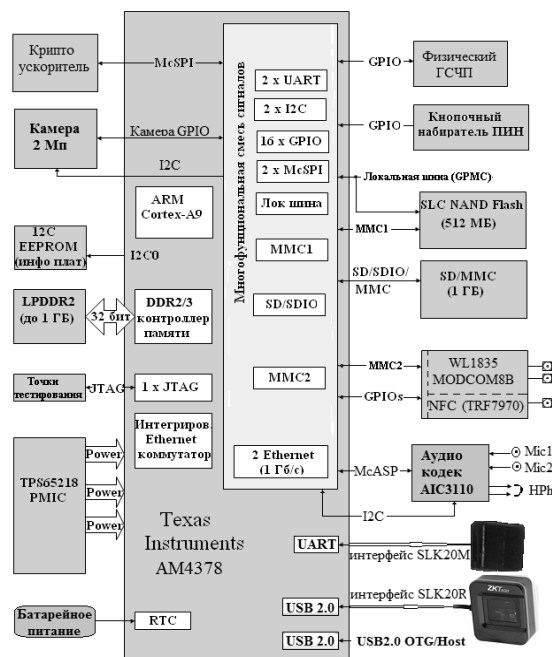


Рисунок 1 – Функциональные компоненты ПЗКМ

Для реализации сервиса безопасности процедур локальной и удаленной аутентификации ПЗКМ дополнен встроенным компонентом сканирования и обработки отпечатков пальцев SLK20M/SLK20R фирмы ZKTeco, взаимодействие с которым на аппаратном уровне осуществляется через последовательный интерфейс UART (115200 бит/с) – для SLK20M, или через интерфейс USB 2.0/1.1 – для SLK20R. Основными критериями выбора данных модулей среди других подобных моделей от различных производителей, являются: высокие технические характеристики; обеспечение программным инструментарием

(SDK) и соответствующей документацией; поддержка защиты от подделок отпечатков.

Алгоритмическое и программное обеспечение защищенной передачи данных. Для решения задач обработки и защищенного обмена мультимедийными данными разработано алгоритмическое и программное обеспечение (АПО).

Основой построения АПО является многоуровневый модульный принцип. На рис. 2 представлена иерархия уровней и состав АПО.



Рисунок 2 – Состав АПО

Верхний уровень – модули приложений, затем уровень модулей сценариев и конфигураций, третий уровень – специализированные прикладные библиотечные модули, четвертый – системное программное обеспечение (на основе TIAM437EVMSDK [4]), пятый уровень – встроенные аппаратно-программные компоненты.

ПЗКМ и отдельные модули АПО могут быть использованы, как базовые компоненты, при построении следующих законченных приложений:

Ethernet туннели. Создание и поддержка виртуальных защищенных туннелей передачи конфиденциальных данных между удаленными абонентами, используя открытую Internet-сеть.

VoIP. Поддержка обмена голосовыми сообщениями между удаленными абонентами, при этом генерация и хранение критической (ключевой) информации осуществляется в ПЗКМ.

IoT. Возможность поддержки и подключения к сети Интернет вещей для применения в различных прикладных сферах. При этом реализуется адаптация к уже существующей инфраструктуре и протоколам.

Сенсорный мониторинг. Аппаратно-программная поддержка беспроводных сенсорных сетей для сбора, агрегации и передачи данных.

Мультимедиа обмен. Реализация поддержки защищенного канала обмена мультимедийными данными, возможно в реальном времени.

WBAN (Wireless Body Area Network). Беспроводная передвижная портативная сеть может быть развернута на основе компонентов ПЗКМ для реализации, например, непрерывного мониторинга за состоянием здоровья человека (через соответствующие встроенные датчики).

Сценарии (реализуемые посредством командного языка bash) предназначены для:

- настройки и инициализации соответствующих приложению переменных среды исполнения;

- последовательного запуска цепочки модулей реализации требуемых задач для конкретного приложения.

Конфигурационные компоненты используются для статической предварительной настройки библиотечных модулей и сценариев для конкретного развертываемого приложения.

Специализированные прикладные библиотеки, как правило, представляющие собой отдельный законченный проект, обеспечивают прикладной интерфейс с приложениями и утилитой конфигурации, а также связь с соответствующими драйверами и утилитами системного программного обеспечения.

Литература

1. AM437x ARM Cortex-A9 processors – Technical Reference Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ti.com>. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. WL18xxMOD WiLink™ 8 Single-Band Combo Module – Wi-Fi®, Bluetooth®, and Bluetooth Low Energy (LE) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ti.com>. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. TRF7970A Multiprotocol Fully Integrated 13.56-MHz RFID and Near Field Communication (NFC) Transceiver IC [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ti.com>. – Дата доступа: 01.10.2021.
4. Processor SDK for AM437x Sitara Processors - Linux and TI-RTOS support, Version: 06.03.00.106 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: ti.com. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 615.841:621.317.4

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МАГНИТОТЕРАПИИ С ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ

Рогожников Р.А., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Украина, Киев*

Аннотация. Рассматривается новая структура построения автоматизированной системы магнитотерапии (АСМ), с возможностью индивидуального контроля, что позволит оперировать процессом проведения магнитотерапии с обратной связью и возможностью управления параметрами магнитного поля (градиента температуры, частоты, формы импульса). На основе экспериментальных и теоретических исследований предложена структурная схема с зависимостью от температурного градиента и показателей пациента. Что позволит безопасную, эффективную и надежную работу автоматизированной системы магнитотерапии, а так же работу устройства с частичным участием оператора. Сейчас на всемирном рынке находится не достаточно систем магнитотерапии, особенно с автоматизированным персональным заданием режимов работы для каждого пациента через систему смарт-карт.

Ключевые слова: автоматизированная система магнитотерапии, мультизадачность, индивидуальный контроль.

AUTOMATED MAGNETOTHERAPY SYSTEM WITH PERSONAL CONTROL

Rohozhnikov R., Tereshchenko N.

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine*

Abstract. A new structure for constructing an automated magnetic therapy system (AFM) is considered, with the possibility of individual control, which will allow operating the process of conducting magnetotherapy with feedback and the ability to control the parameters of the magnetic field (temperature gradient, frequency, pulse shape). On the basis of experimental and theoretical studies, a structural diagram with a dependence on the temperature gradient and patient indicators is proposed. This will allow safe, efficient and reliable operation of the automated magnetotherapy system, as well as the operation of the device with partial participation of the operator. Currently, there are not enough magnetotherapy systems on the world market, especially with automated personal assignment of operating modes for each patient through a smart card system.

Key words: automated system of magnetotherapy, multitasking, individual control.

*Адрес для переписки: Рогожников Р.А., Киевская обл., Белая Церковь, ран. 50-летие Победы 86, 09104
e-mail: agfarkpi@i.ua*

Актуальность. Коронавирусное заболевания (COVID-19) является глобальной проблемой во всем мире. Сейчас вирус распространяется с большой скоростью, а так как он имеет воздушно-капельный механизм передачи, одним из путей борьбы с вирусным заболеванием есть минимальный контакт с другими людьми. Поэтому была использована функция персонального задания и индивидуального контроля. Она уменьшила возможность передачи инфекций и вирусов, кроме этого рационализировала прием пациентов врачом через систему смарт-карт и увеличила удобство обслуживания в предоставлении процедур и мониторинга прохождения их пациентом.

Разработка структуры. Основной задачей является разработка структуры построения автоматизированной системы магнитотерапии (АСМ) с персональным контролем через систему смарт-карт и непосредственно с биотропной обратной связью, что расширило функциональные возможности устройства, а именно добавило контроль режимов работы (ручной и автоматизированный), мониторинга биотропных параметров и

состояния пациента, что гарантирует безопасную, эффективную и надежную работу АСМ.

Были проведены исследования в ходе которого разработано систему АСМ с обратной связью, что базируется на персональном задании режимов работы для каждого пациента через систему смарт-карт и диагностике градиента температуры в зоне действия магнитного поля на поверхности биологической зоны. Для этого в структуре аппарата используется блок датчиков градиента температур и датчиков температуры тела, что обеспечивает полную автоматизацию и синхронизацию с параметрами действия магнитного поля и температурной реакцией пациента. Так же используются датчики температуры индуктора, что контролируют его температурные характеристики, гарантируя безопасную работу индуктора.

Основные принципы работы. Принцип работы АСМ заключается в контроле воздействия разными видами магнитным полем на пациента через замеры значений магнитной индукции на участке тела пациента в зоне действия поля и

значений временного и поверхностного градиентов температуры.

Персональный и индивидуальный контроль заключается в использовании данных, что заранее были внесены на персональную специальную карту (Смарт-карта) пациента медицинским персоналом. Данные с карты имеют встроенный набор функций (диагноз пациента, режим работы системы АСМ, время процедуры, значения индукции магнитного поля, тип магнитного поля), что позволяет без дальнейшего участия персонала физиотерапевтических отделений, быстро и безопасно проводить сеансы магнитотерапии.

Структура построения системы. Спроектированная структурная схема автоматизированной системы магнитотерапии с персональным и индивидуальным контролем представлено на рис. 1, работает в ручном и в автоматизированных режимах.

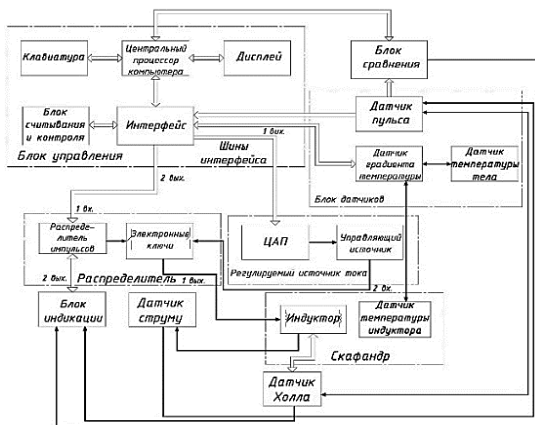


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы магнитотерапии

В качестве блока управления используется персональный компьютер (ПК). В свою очередь, ПК содержит центральный процессор, интерфейс, клавиатуру, дисплей и блок считывания и контроля, а также шину интерфейса, регулируемый источник тока, состоящий из цифро-аналогового преобразователя и управляющего источника. В состав автоматизированной системы магнитотерапии может входить скафандр, содержащий индукторы, датчик тока, блок датчиков реакции пациента, содержащий датчик пульса и блок индикации. Блок сравнения подключен к блоку управления. Датчики Холла размещены на поверхности секций соленоида, прилегающих к телу пациента и подключены к блоку индикаторов. Блок датчиков градиента температур, датчики температуры индуктора которые размещены в зоне индуктора и датчики температуры тела, расположенных на теле пациента в зоне действия магнитного поля, а датчики температуры индуктора, и датчики температуры тела присоединены к датчикам градиента температур, и соединены с блоком управления через интерфейс.

Индуктор, представляет собой цилиндрические секционированные соленоиды. При этом протекание магнитного поля вдоль тела пациента обеспечивается за счет питания каждой секции соленоида индуктора сдвинутыми во времени импульсами тока длительностью:

$$t_n = \frac{\tau}{k \cdot n}, \quad (1)$$

где τ – продолжительность систолы, k – количество периодов магнитного поля, n – количество секций соленоида.

Датчик тока служит для измерения значения тока, протекающего через секции соленоидов индуктора при настройке или контроле.

Блок считывания и контроля необходим для считывания информации со смарт-карты, так она передает хранящийся код в центральный процессор компьютера, где обрабатывается и совершает настройку системы магнитотерапии под пациента и в зависимости от индивидуальных настроек системы. Тип карточки и образец картридера для считывания показано на рис. 2.



Рисунок 2 – Схема функционирования системы специальных карточек

Результаты работы. В итоге исследований было разработана усовершенствованная автоматизированная система магнитотерапии с системой задания режимов и учета Смарт-карт пациентов и использованием индивидуального контроля при воздействии магнитного поля на биологические ткани, что гарантирует безопасность процедур пациента, уменьшении не желательных контактов персонала и пациентов, надежную эксплуатацию.

Литература

1. Tymchik, G. S. The temperature method of control in a mag-netotherapy / G. S. Tymchik, M. F. Tereshchenko, V. U. Rudyk // XIV PhD Workshop OWD. – 2012. – P. 318–324.
2. Рудик, В. Ю. Спосіб адаптивної магніто-терапії / В. Ю. Рудик, М. Ф. Терещенко, Т. О. Рудик // Вісник НТТУ «КПІ». Серія: Приладобудування. – 2016. – Вип. 51. – С. 139–144.
3. Тимчик, Г. С. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора / Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко, А. М. Матвієнко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – № 4. – С. 121–130.
4. Терещенко, М. Ф. Автоматизовані магніто-терапевтичні апарати: монографія / М. Ф. Терещенко [и др.]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2020. – 274 с.

УДК 615. 471.03

АНАЛИЗ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ МОНИТОРИНГА

Рудой А.Д., Терещенко Н.Ф.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина

Аннотация. Наиболее достоверным и используемым методом диагностики внутренних органов и систем является рентгенодиагностика. Основными плюсами данного метода является достаточно короткое время диагностики, доступность, минимальная вероятность допустить принятие врачом ложного диагноза. За последнее десятилетие, а особенно за время пандемии, средняя доза облучения увеличилась минимум в два раза, по сведениям ВОЗ. Важным аспектом является то, что медицинские учреждения перешли на более совершенные, малодозируемые, автоматизированные аппараты диагностики с использованием цифровых детектор-приемников, но средние дозы только увеличиваются. В работе рассмотрены современные принципы мониторинга уровня облучения. Используя результаты мониторинга доз в разных местах рентгенкабинета, смоделировано и проведено сравнение с полученными результатами эффективной дозы с ионизационной камеры.

Ключевые слова: дозиметрия, рентгенодиагностика, мониторинг доз облучения.

ANALYSIS OF X-RAY RADIATION DOSES WITH DIFFERENT MONITORING METHODS

Rudoy A., Tereshchenko M.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kiev, Ukraine

Abstract. The most reliable and used method for diagnosing internal organs and systems is X-ray diagnostics. The main advantages of this method are a fairly short time of diagnosis, availability, and the minimum probability of allowing the doctor to make a false diagnosis. Over the past decade, and especially during a pandemic, the average radiation dose has increased at least twice, according to the WHO [1]. An important aspect is that medical institutions have switched to more advanced, low-dose, automated diagnostic devices using digital detector-receivers, but the average doses are only increasing. The paper discusses the modern principles of monitoring the level of exposure. Using the results of monitoring doses in different places of the X-ray room, the authors simulated and compared them with the results of the effective dose from the ionization chamber.

Key words: dosimetry, X-ray diagnostics, monitoring of radiation doses.

Адрес для переписки: Рудой А.Д. ул.Елены Телиги 31/1 кв.36, г. Киев 04060, Украина
e-mail: alexeyrudoy1998@gmail.com

При проведении диагностических либо терапевтических процедур с использованием рентгенаппаратуры необходимо учитывать и строго фиксировать дозу облучения как пациента так и персонала. Так как гамма лучи направлены во все стороны, а не только по направлению светового пучка коллематора, то необходимо точно оценить уровень облучения, для создания эффективной защиты рентгенлаборантов [2]. В современных рентгенаппаратах используются ионизационные камеры которые измеряют эффективную дозу облучения. Но мы не можем определить в каком направлении и какой флюэнс был создан рентгеновской трубкой. Для определения уровня облучения в местах нахождения лаборанта а также по плоскости деки рентгеновского стола были установлены гамма-чувствительные детекторы (рис. 1).

Для настройки излучательной системы было выбрано автоматическую настройку параметров для диагностики правого предплечья, а именно напряжение трубки 55 кВ, ток трубки – 63 мА, время экспозиции 100 мс. Шторки коллиматора

были полностью открыты, высота трубки над цифровым детектором составляла 100 см.

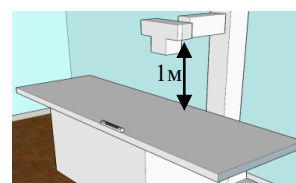


Рисунок 1 – Принцип расположения детекторов

После проведения ряда экспериментов была получена карта доз облучения по поверхности деки рентгенодиагностического стола (рис. 2).



Рисунок 2 – Карта доз облучения

При расчете значений эффективной дозы каждого органа было получено путем произведения полученной дозы на тканевый взвешивающий коэффициент определенного органа[4].

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R \cdot \bar{D}_{T,R}, \quad (1)$$

где, E – эффективная доза для всего организма, W_T – тканевый взвешивающий коэффициент, H_T – эквивалентная доза, полученная органом или тканью, W_R – взвешивающий коэффициент излучения.

В итоге расчета полученных доз облучения некоторых органов были получены такие результаты: головной мозг 14,33 мГр, хрусталик 13,22 мГр, щитовидная железа 19,57 мГр, легкие 15,53 мГр, печень 15,68 мГр, почки 12,04 мГр, двенадцатиперстная кишка 14,56 мГр, гонады (яички 15,62 мГр, яичники 14,26 мГр), кожа сосков 13,97 мГр и кожа пуповины 19,44 мГр. Полученные данные были представлены в виде круговой диаграммы (рис. 3).

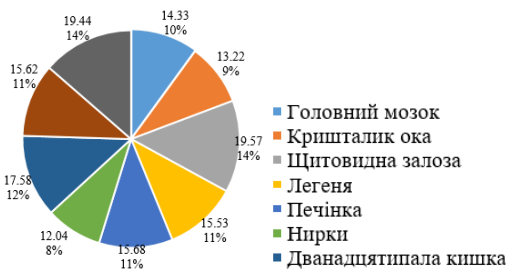


Рисунок 3 – Среднее значение полученной дозы на отдельные органы

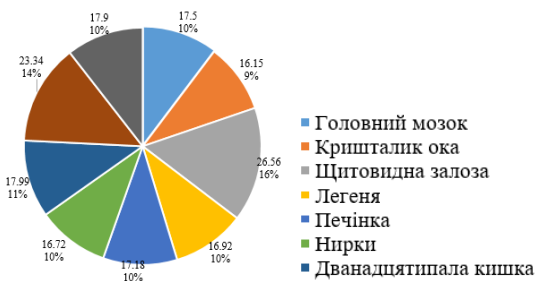


Рисунок 4 – Среднее значение полученной дозы на отдельные органы

Также зная выходные характеристики аппарата, можно рассчитать теоретические поглощенные дозы D_n облучения некоторых органов с помощью формул

$$D_n = W/(V \cdot m), \quad (2)$$

где W – поглощенная энергия излучения в V – объеме с массой m .

Но для практической оценки уровня облучения и подальшего сравнения с дозами полученными экспериментальным путем используем эквивалентную дозу:

$$D_{\text{екв}} = D_n \cdot K_T, \quad (3)$$

где K_T – коэффициент качества излучения и определенной биологической ткани.

Проведя расчет получили базу теоретических данных уровня облучения и построили диаграмму (рис. 4).

Исходя из полученных данных было установлено что смоделированные дозы на отдельные органы при рентгенснимке выше чем экспериментальные значения доз. Однако медицинские учреждения не учитывают облучение от рассеивающих рентгеновских лучей, которые так же имеют свойство накапливаться и вскоре привести к нежелательным последствиям.

Входе исследования распространения рентгеновских лучей по плоскости деки рентгенстола было проведено моделирование эффективных доз облучения и всего организма в целом. Выявлено, что при обследовании определенной части тела пациента остальные органы получают пассивное облучение ионизирующим излучением. Если пренебрегать защитой не обследуемых органов то в будущем возможно возникновение не доброкачественных образований, которые могут привести к летальным последствиям.

Литература

1. Рудий, О. Д. Оцінка ефективності моніторингу доз опромінення людини при комп'ютерній томографії / О. Д. Рудий, М. Ф. Терещенко // Вісник КПІ. Серія: приладобудування. – 2021. – Вип. 61, № 1. – С. 85–90.
2. Рудий, О. Д. Принципи моніторингу рівня експозиційної дози в рентгендіагностиці / О. Д. Рудий, М. Ф. Терещенко // Збірник праць XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених “Погляд у майбутнє приладобудування”, 13–14 травня 2020 р. – К. : ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – С. 228–232.
3. Direct measurement of radiation exposure dose to individual organs during diagnostic computed tomography examination // Scientific Reports. – Vol. 8. – № 1.
4. Спосіб моніторингу при діагностиці та терапії захворювання молочної залози : пат. 143438 Україна / Терещенко М. Ф., Рудий О. Д., Яковенко І. О. – Опубл. 27.07.2020.

УДК 535.3

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ-АНАЛИЗАТОРА РИСКА АККРЕДИТОВАННОЙ ЛАБОРАТОРИИ
Савкова Е.Н.¹, Кудина А.В.², Чжан Ю.¹, Сипачев И.В.¹

¹*Белорусский национальный технический университет*

²*Белорусский государственный аграрный технический университет*
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлена программа, предназначенная для повышения эффективности управления рисками и возможностями аккредитованной лаборатории в контексте требований стандарта ГОСТ ISO 17025-2019, позволяющая осуществлять идентификацию, оценку, мониторинг и прогнозирование рисков, возникающих в деятельности лаборатории.

Ключевые слова: риск, событие, опасность, ущерб, реестр риска, требование, неопределенность, вероятность.

DEVELOPMENT OF A RISK ANALYZER PROGRAM OF AN ACCREDITED LABORATORY

Saukova Y.¹, Kudzina A.², Zhang Y.¹, Baranau P.¹

¹*Belarusian National Technical University*

²*Belarusian State agricultural University*
Minsk, Belarus

Abstract. A program designed to improve the effectiveness of risk management and the capabilities of an accredited laboratory in the context of the requirements of GOST ISO 17025-2019, which allows for the identification, assessment, monitoring and forecasting of risks arising in the activities of the laboratory is presented.

Key words: risk, event, danger, damage, risk register, requirement, uncertainty, probability.

Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by

На базе НИЛ ОЭП БНТУ в рамках задания «Метрологическое моделирование, сопровождение и подтверждение оптических методов исследований в дискретных системах с произвольным количеством входных и выходных величин» ГПНИ 6 «Фотоника и электроника для инноваций» (подпрограмма «Фотоника и ее применения») осуществляются исследования факторов, последствий и способов снижения рисков в испытательных лабораториях, и как один из результатов, разработаны рекомендации по созданию и ведению реестра риска, который представляет собой электронный документ, управляемый автоматизированной системой для анализа, прогнозирования и моделирования.

Для описания рисков авторы использовали информативные параметры: «Требование», «Неопределенность», «Состояние», «Вероятность». Анализ и систематизацию рисков удобно осуществлять исходя из модели контекста организации и уровней управления процессами лаборатории. Согласно ГОСТ ИСО 900-2015 среда организации – сочетание внутренних и внешних факторов, которые могут воздействовать на подход организации к постановке и достижению ее целей. Согласно данной модели можно определить организацию как открытую систему, характеризующуюся набором внутренних переменных, взаимодействующую с факторами внешней среды «дальнего» и «ближнего» окружения – внешними переменными, как предлагается в [1].

В то же время ГОСТ Р 51897-2011/Руководство ИСО 73:200 использует аналогичные понятия внешней и внутренней областей применения, а также причастных сторон.

Все переменные являются потенциальными угрозами и одновременно возможностями достижения устойчивого успеха, возникающими в деятельности любой организации, и могут быть разделены на три категории: 1) внутренние, контролируемые организацией, представляющие ее внутреннюю среду; 2) внешние, частично контролируемые организацией, характеризующие «ближнее» окружение; 3) внешние, неконтролируемые организацией, характеризующие «дальнее» окружение.

Применяя пессимистический подход, можно выделить потенциальные опасности и объекты их воздействия для процессов стратегического, тактического и оперативного уровней управления со стороны факторов дальнего окружения, воспользовавшись рекомендациями ГОСТ Р 51901.22-2012. Механизм взаимодействия опасностей и объектов является комбинаторной задачей: одна опасность может воздействовать в разной степени на один, несколько или все объекты, и в то же время на один объект могут воздействовать в разной степени одна, несколько или все опасности. При составлении классификации возможных последствий и ущерба и авторы выделили 14 категорий: «материальные затраты», «экономические потери», «трудоза-

траты», «приостановление либо отмена действия аттестата аккредитации», «потеря заказчика» и др. и кодифицировали их. В соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 51901.22-2012 на начальном этапе по отношению к каждому объекту воздействия («Люди», «Окружающая среда», «Экономика», «Управление», «Социальная среда») были прописаны опасные события с расшифровкой факторов. Далее была выполнена кодификация одиннадцати классов опасностей согласно ГОСТ Р 51901.22-2012, например, «Природные», «Биолого-социальные» и др., в пределах каждого из которых идентифицированы виды опасностей.

При установлении этапа жизненного цикла продукции (услуги), на котором может возникнуть опасное событие в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р 58771-2019 процессы лаборатории были разделены на стратегические, тактические и оперативные. Каждый процесс был разбит на этапы, каждый из которых рассматривался как источник рисков и одновременно возможностей во времени и пространстве. Были установлены взаимосвязи между процессами различных уровней, опасными событиями, их причинами и возможными последствиями.

Анализ осуществлялся путем автоматизированного подсчета событий. На рис. 1 приведена диаграмма значимости факторов риска по числу повторений.

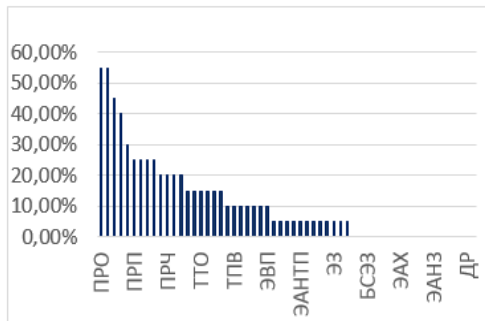


Рисунок 1 – Диаграмма значимости факторов опасного события

Анализ показал, что наиболее часто встречаются субъективные факторы – «ответственность» (ПРО), «знания нормативных документов» (ПРЗД), «профессиональная честность» и др.) и информационные – «доступность» (ИД), «конфиденциальность» (ИК). Также был выполнен анализ видов ущерба, результат которого показан на рис. 2. Установлено, что наиболее часто встречающимся являются факторы «Затраты времени», «Приостановление или прекращение лабораторной деятельности», «Экономические потери», «Потеря доверия заказчика», «Приостановление либо отмена действия аттестата аккредитации».

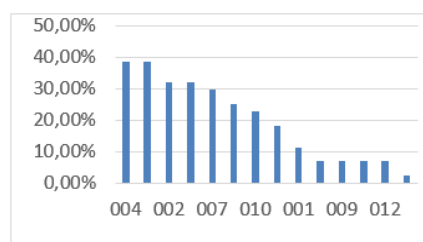


Рисунок 2 – Диаграмма значимости факторов возможного ущерба и последствий

Анализ показал, что неблагоприятные события, связанные с некорректными действиями и решениями в процессе испытаний и калибровок, возникающие на оперативном уровне, могут повлечь возникновение угроз на более высоких – тактическом и стратегическом уровнях управления лаборатории. Оценка последствий (ущерба) при реализации опасного события (в днях простоя, в стоимостном выражении или в других единицах измерения) лаборатория может оценить в каждом конкретном случае. Вероятность (собственно) возникновения опасного события авторы предлагают осуществлять путем использования автоматизированной экспертной системы, представляющей собой базу знаний лаборатории.

Высокая степень неопределенности, а, следовательно, и повышенный уровень риска будет наблюдаться на начальном этапе создания лаборатории и развития ее деятельности. С наступлением этапа «зрелости» неопределенность будет снижаться. На данном этапе удобно применять технологию стандарта ГОСТ Р 58771-2019 LOPA «анализ контролей» на трех уровнях деятельности лаборатории, фактически реализует принцип управления в цикле через обратную связь в зависимости от переменных внешней и внутренней среды. Это достижимо при создании реестра рисков как динамичной автоматизированной системы, осуществляющей мониторинг комбинаций внутренних и внешних факторов рисков. Например, моделируя деятельность лаборатории в виде сценариев, можно прогнозировать риски и возможности, последствия и ущерб.

Программа представляет собой гибкую модульную систему, включающую базы данных взаимосвязанных процессов лаборатории, опасных событий, их последствий, ущерба и вероятностей возникновения с функциями комплексирования и документирования.

Литература

1. Чевертон, П. Теория и практика современного маркетинга: полный набор стратегий, инструментов и техник / П. Чевертон. – Пер. с англ. В.Н. Егорова. – М. : ФАИР-ПРЕСС, 2002. – 608 с.
2. Управление рисками и возможностями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kpms.ru> – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 535.3

ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ
Савкова Е.Н., Чжан Ю., Баранов П.О.*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь***Аннотация.** Сделан краткий обзор состояния вопроса в области определения фотобиологических величин, фотобиологических единиц и путей и перспектив обеспечения их метрологической прослеживаемости.**Ключевые слова:** фотобиологическая величина, единица, эквивалент, весовая функция, метрологическая прослеживаемость.**PHOTOBIOLOGICAL UNITS AND THEIR METROLOGICAL TRACEABILITY****Saukova Y., Zhang Yun, Baranau P.***Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus***Abstract.** A brief overview of the state of the issue in the field of determining photobiological quantities, photobiological units and ways and prospects for ensuring their metrological traceability is made.**Key words:** photobiological value, unit, equivalent, weight function, metrological traceability.*Адрес для переписки: Савкова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: savkova@bntu.by*

Три единицы SI – кандела, люмен, люкс, относят к фотобиологическим, поскольку они содержат физиологические весовые коэффициенты, связанные с особенностями человеческого зрения [1]. Так как ионизирующее излучение передает энергию облучаемому веществу, для описания таких величин используют понятие поглощенной дозы D – отношения переданной энергии к массе. По решению МКМВ в 2002 г. величина эквивалентной дозы представляет собой произведение поглощенной дозы D и числового коэффициента Q , который учитывает биологическую эффективность излучения и зависит от энергии и типа излучения [2]:

$$H = Q D. \quad (1)$$

Например, для расчета эритемной освещенности, E_{er} , от источника ультрафиолетового излучения, которая получается путем взвешивания спектральной освещенности на длине волны λ по эффективности излучения на этой длине волны, вызывающего эритему, и суммирования по всем длинам волн, присутствующим в спектре источника, во всем диапазоне длин волн спектра действия [2]:

$$E_{er} = \int E_{\lambda}(\lambda) s_{er}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

где $E_{\lambda}(\lambda)$ – спектральная интенсивность излучения на длине волны λ (обычно указывается в единице SI Вт·м⁻²·нм⁻¹); $s_{er}(\lambda)$ – спектральная весовая функция эритемы, выраженная в спектральной радиометрической системе и нормированная на 1 при ее максимальном спектральном значении.

Эритемная освещенность E_{er} , определенная таким образом, прослеживается к единице SI Вт·м⁻². Фотохимические и фотобиологические

величины могут быть определены с использованием либо спектральной радиометрической системы, либо спектральной фотонной системы, что требует применения определенных весовых функций. Таким образом, по аналогии с уравнением (2), эритема, вызванная источником ультрафиолетового излучения, может быть охарактеризована в единицах спектральной системы распределения фотонов с использованием интенсивности излучения эритемных фотонов [2]:

$$E_{p,er} = \int E_{p,\lambda}(\lambda) s_{p,er}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $E_{p,\lambda}(\lambda)$ – спектральный поток фотонов на единицу площади при длине волны λ (обычно указывается в единице измерения с⁻¹·м⁻²·нм⁻¹); $s_{p,er}(\lambda)$ – спектральная весовая функция эритемы, выраженная в системе распределения спектральных фотонов и нормированная на 1 при ее максимальном спектральном значении.

Интенсивность излучения эритемных фотонов, $E_{p,er}$, определенная таким образом, обычно указывается в с⁻¹·м⁻², поскольку количество фотонов безразмерно. Из уравнений (2) и (3) следует, что соотношение между выражениями для спектральной взвешенной величины в двух системах зависит как от спектральной формы $E_{\lambda}(\lambda)$, так и от спектра действия. Однако для общего процесса отклика A взаимосвязь между формами двух спектральных весовых функций $s_{p,A}(\lambda)$ и $s_{e,A}(\lambda)$ (в фотонной системе и радиометрической системе соответственно), которые могут быть использованы для описания эффекта, определяется [2]:

$$s_{p,A}(\lambda) = \gamma_A \cdot \frac{hc}{\lambda \cdot n_a(\lambda)} \cdot s_{e,A}(\lambda), \quad (4)$$

где γ_A – постоянная (указанная в единицах J⁻¹), не зависящая от спектральной освещенности $E_{\lambda}(\lambda)$,

которая удовлетворяет требованию установления максимального значения $s_{p,A}(\lambda)$ до 1; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; $n_a(\lambda)$ – показатель преломления в воздухе на данной длине волны λ .

Спектры действия определяются с точки зрения величины эффекта в зависимости от длины волны. Длина волны излучения зависит от показателя преломления среды, что означает, что значение спектра действия на любой указанной длине волны будет варьироваться в зависимости от среды, для которой определена эта длина волны. В общем случае рассматриваемой средой является воздух, и упомянутые выше спектры действия CIE применимы для длин волн, измеренных в воздухе. Спектральные весовые функции $s_{p,A}(\lambda)$ и $s_{e,A}(\lambda)$, описывающие один и тот же эффект, различны по форме, и пиковая длина волны эффекта различна, когда выражается в количествах фотонов или радиометрических величинах.

Метрологическая прослеживаемость в биологических стандартных образцах. В работе [3] применительно к исследованиям гормона роста человека с учетом рекомендаций ISO 17511:2020 предложена концепция референтной системы, включающей референтный стандартный образец референтный метод и референтную лабораторию. Практическая реализация системы предполагает присвоение числового значения референтному образцу (например, биологического материала человека) через его калибровку путем определение «реальных» значений с использованием эталонного метода (GC-MS) или измерение клинических образцов радиоиммунологическим (перекрестные ссылки обеспечивают коммутативность). При этом производительность референтного метода «должна быть полностью определяемым письменным стандартом, способным измерять в абсолютных величинах уровни анализируемого вещества в клинических образцах» [3]. Метрологическая прослеживаемость значений количеств в образцах человека согласно ISO 17511:2020 распространяется на самый высокий доступный компонент системы отчета, в идеале на RMP и сертифицированные эталонные материалы (CRM).

Однако стандарт ISO 17511:2020 не распространяется на свойства, указанные в виде номинальных и порядковых шкал, где величина не задана. По мнению автора [3], предположение, что где это возможно, для калибровки эталонных препаратов следует использовать процедуры, сообщающие единицы SI, может быть ошибочным. В области медицинской диагностики и терапии для количественной оценки биологической активности определенных веществ также используется класс единиц, которые пока еще не

могут быть выражены в единицах SI. Это объясняется тем, что механизм специфического биологического действия этих веществ еще недостаточно изучен, чтобы его можно было измерить с точки зрения физико-химических параметров. В виду их важности для охраны здоровья и безопасности, Всемирная организация здравоохранения – ВОЗ (WHO) взяла на себя ответственность по определению Международных единиц ВОЗ – WHO IU – для биологической активности таких веществ.

Многие биологические вещества существуют как в активном, так и в неактивном состоянии в плазме, где активность отражает клиническую ситуацию пациента. Калибровка в менее точных биологических единицах была бы более подходящей, чем калибровка в более точных, клинически не относящихся к делу единицах SI. Единицу SI не следует считать метрологически превосходящей в силу ее большей точности [3].

Для решения этой проблемы на 24-м заседании (19–20 сентября 2019 г.) Консультативного комитета по фотометрии и радиометрии МБМВ была отмечена необходимость привлечения к сотрудничеству других организаций в области освещения, химии и биологии, в частности, Международной комиссии по освещению (МКО), которая опубликовала пять функций широкополосной чувствительности фоторецепторов сетчатки глаза человека (S, L, M, ipRGC и палочек) α -оптической спектральной эффективности $N_\alpha(\lambda)$ α -оптической эквивалентной освещенности: цианоптического E_{sc} , хлоропного E_{mc} , эритропозитинового E_{lc} , меланопатийного E_z , родопического E_r излучений [4]. Соответственно предложены фотобиологические единицы данных величин – эквиваленты люкса: 1) цианоптический sc-lx, 2) хлоропный mc-lx, 3) эритропозитиновый lc-lx, 4) меланопатийный z-lx, 5) родопический r-lx, которые прослеживаются к единицам SI посредством коэффициента невидимой спектральной эффективности $K_N \approx 73\,000 \alpha\text{-лм}\cdot\text{Вт}^{-1}$.

Литература

1. Международная система единиц (SI) : издание 9-е / 2019 г. – Федеральное Агентство по техническому регулированию и метрологии. – Москва: Росстандарт. – 100 с.
2. SI Brochure – 9-th edition (2020) – Appendix 3 v1.02. Appendix 3. Units for photochemical and photobiological quantities. – 2021.
3. Units and traceability in biological reference materials [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.bipm.org/en/cc/JCTLM>. – Дата доступа: 01.10.2021.
4. Report on the First International Workshop on Circadian and Neurophysiological Photometry : CIE TN 003:2015. – 2013. – 35 p.

УДК 621.382

ФОТОЕМКОСТНОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСЕЙ И ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Сопряков В.И., Головня К.Ч.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложен фотоемкостной метод, позволяющий контролировать параметры ловушек неосновных и основных носителей заряда в полупроводниковых структурах с малым временем жизни (1–30 нс). Метод основан на перезарядке глубоких уровней импульсным фототоком и измерении кривых релаксации высокочастотной емкости.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры, глубокие примеси, фототок, высокочастотная емкость.

PHOTOCAPACITIVE METHOD FOR MONITORING THE PARAMETERS OF IMPURITIES AND DEFECTS IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES

Soprykov V., Golovnia K.

Belarusian national technical university
Minsk, Belarus

Abstract. A photocapacitive method is proposed that makes it possible to control the parameters of traps of minority and major charge carriers in semiconductor structures with a short lifetime (1–30 ns). The method is based on recharging deep levels by a pulsed photocurrent and measuring the relaxation curves of high-frequency capacitance.

Key words: semiconductor structures, deep impurities, photocurrent, high-frequency capacitance

Адрес для переписки: Сопряков В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vitavits@mail.ru

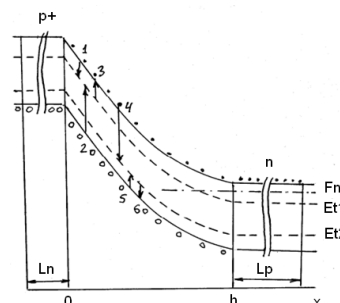
Контроль электрически активных примесей и дефектов в полупроводниковых структурах и определение их параметров играет важную роль, так как с их наличием связана величина времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ), а также процессы, приводящие к деградации приборов. Глубокие энергетические уровни примесей и дефектов могут быть локализованы, как в верхней, так и в нижней половине запрещенной зоны. При этом они, как правило, захватывают носители заряда из ближайшей энергетической зоны разрешенных состояний. Поэтому методом релаксационной спектроскопии после переключения напряжения на р⁺-n-переходе из прямого в обратное легко контролировать ловушки основных носителей заряда (ОНЗ).

Для контроля ловушек ННЗ применяется переключение из состояния с прямым током к обратному напряжению. При этом неравновесное заполнение глубоких центров, возникающее в базовой области при прямом смещении, изменяется в области пространственного заряда (ОПЗ) вследствие термической эмиссии ННЗ. Данный метод применим к изучению полупроводниковых материалов с относительно низкими концентрациями мелких примесей (10^{14} см⁻³) и высокими временами жизни ННЗ.

В материалах с концентрацией мелких примесей в диапазоне $3 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{17}$ см⁻³, содержащих глубокие центры (ГЦ), время жизни ННЗ может быть весьма малым (1–30 нс), что приводит к тому, что неравновесное состояние, возникающее

при прямом смещении, за время переключения исчезает. В работе предложен метод контроля полного спектра ловушек основных и неосновных носителей заряда при условии объемного фотовозбуждения электронно-дырочных пар.

Рассмотрим схему электронных переходов, возникающих при освещении обратно-смещенного р⁺-n-перехода с глубокими уровнями белым светом (рис. 1). При таком освещении слабо поглощаемая компонента «собственного» света в ближней инфракрасной области создает объемное возбуждение и стационарные потоки электронов и дырок $\Delta n(x) = j_n(x)/e$ и $\Delta p(x) = j_p(x)/e$, где j_n и j_p – плотности электронного и дырочного фототоков.



1, 4 – процессы захвата электронов; 2, 5 – процессы захвата дырок; 3, 6 – процессы термической эмиссии соответственно электронов и дырок

Рисунок 1 – Схема электронных переходов в обратно-смещенном р⁺-n переходе с глубокими уровнями при освещении белым светом

В результате процессов захвата электронов и дырок на глубокие уровни (рис. 1) возникает их неравновесное заполнение. В первый момент после выключения освещения это неравновесное заполнение сохраняется, так как условие обеднения в ОПЗ устанавливается с «максвелловским» временем (10^{-12} с), значительно меньшим времени жизни ННЗ. В дальнейшем состояние заселенности глубоких уровней изменяется вследствие термической эмиссии носителей заряда (рис. 1, процессы 3, 6). Таким образом, энергетическое положение глубоких уровней E_{n1} и E_{n2} , а также сечение захвата носителей заряда могут быть раздельно определены методом изотермической релаксации емкости.

Значение фототока определяется генерацией электронно-дырочных пар в слоях с шириной, равной диффузионным длинам ННЗ в областях электронейтральности (L_p, L_n), а также в области пространственного заряда (h)

$$j = j_n(x) + j_p(x) = e\Delta n(x) + e\Delta p(x),$$

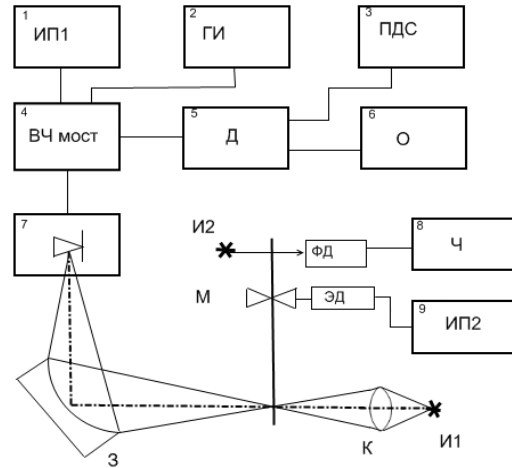
где $\Delta n(x) = G(L_n + x)$, $\Delta p(x) = G(L_p + h - x)$, G – скорость генерации электронно-дырочных пар. В общем случае фототок зависит от координаты, однако можно показать, что неоднородность заполнения глубокого уровня незначительна, и для оценок можно использовать среднее значение фототока, определяемое из опыта.

В результате решения уравнения непрерывности получены аналитические выражения для концентрации электронов и дырок на глубоких центрах, которые могут быть использованы для оценки их концентрации.

Для наблюдения и регистрации кривых релаксации емкости при постоянной температуре после перезарядки глубоких центров электрическим смещением или фотовозбуждением был собран макет измерительной установки (рис. 2).

Задание электрических режимов образца осуществляется источником постоянного обратного напряжения в диапазоне 0–50 В (1) и генератором импульсов для переключения смещения от нулевого к обратному (2). Сигнал разбаланса моста представляет последовательность радиоимпульсов с несущей частотой 1МГц и огибающей, представляющей кривую релаксации емкости. Образец помещался в криостат с регулируемой температурой в диапазоне 77–273 °К. Для контроля параметров ловушек ННЗ необходимо, чтобы световые импульсы могли подаваться на образец с различной частотой. Для этого используется модулятор света, состо-

ящий из диска с вырезами (М), вращаемого электродвигателем постоянного тока (ЭД). Частота световых импульсов могла регулироваться в диапазоне 10–1000 Гц и выбиралась из соотношений оптимального заполнения импульса переходным процессом.



- 1 – источник постоянного смещения образца;
- 2 – генератор импульсов; 3 – потенциометр двухкоординатный самопишущий;
- 4 – высокочастотный мост полных проводимостей;
- 5 – детектор; 6 – осциллограф; 7 – криостат;
- 8 – частотомер; 9 – регулируемый источник постоянного тока. ЭД – электродвигатель постоянного тока; М – модулятор света (диск с вырезами); ФД – фотодиод (источник опорного напряжения); И1, И2 – источники света (лампы накаливания); К – конденсор; З – сферическое зеркало

Рисунок 2 – Функциональная схема установки для измерения релаксации емкости при фотовозбуждении

Образцы p^+n - и n^+p -переходов представляли квадратные или прямоугольные пластинки толщиной 300 мкм и площадью 1–10 мм² со сколотыми боковыми гранями. Оценка фототока на образцах различной формы при подсветке грани показала, что длина поглощения «собственного» света составляла 0,6 см, что обеспечивало условия равномерной генерации в объеме. В результате контроля n^+p -переходов на базе кремния р-типа ($p = 1,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³), облученных электронами с энергией 3,7 МэВ, найдены пять глубоких центров: $E_v + 0,18$ эВ; $E_v + 0,35$ эВ; $E_c - 40$ эВ; $E_c - 22$ эВ; $E_c - 0,17$ эВ, из которых только один ($E_v + 0,18$ эВ) не перезаряжался под действием света, что указывает на асимметрию сечений захвата электронов и дырок $\sigma_p \ll \sigma_n$.

УДК 621.383.92

ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИИ В КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ

Тимофеев А.М., Злобина Ю.В., Чупина А.Л.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Применительно к квантово-криптографическому каналу связи, содержащему в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем, получено выражение для оценки энтропии потерь информации. По результатам математического моделирования установлена зависимость условной энтропии на выходе канала связи от средней скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0», что позволило обосновать выбор скоростей счета, обеспечивающих наименьшие потери передаваемой информации.

Ключевые слова: канал связи, счетчик фотонов, мертвое время.

LOSS OF INFORMATION IN THE QUANTUM CRYPTOGRAPHIC COMMUNICATION CHANNEL

Timofeev A., Zlobina Yu., Chupina A.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Minsk, Belarus*

Abstract. A quantum cryptographic communication channel with a receiving module based on a dead time photon counter was investigated. For this communication channel, an expression is obtained to estimate the entropy of information loss. The dependence of the conditional entropy at the output of the communication channel on the average count rate of signal pulses at the output of the photon counter during the transmission of symbols «0» was obtained using mathematical modeling of the communication channel. This made it possible to substantiate the choice of pulse count rates that ensure the least loss of transmitted information.

Key words: communication channel, photon counter, dead time.

*Адрес для переписки: Тимофеев А.М., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: tamvks@mail.ru*

Существующие системы квантово-криптографической связи характеризуются достаточно высоким уровнем информационной безопасности [1]. Это становится возможным благодаря использованию квантово-механического ресурса при кодировании передаваемых данных (поляризации, частоты и фазы передаваемых фотонов). Регистрация таких данных требует наличия высокочувствительных приемных модулей – счетчиков фотонов [1, 2]. Однако счетчики фотонов ввиду неидеальности своих технико-эксплуатационных характеристик могут приводить к ошибкам при приеме информации, что снижает уровень информационной безопасности указанных систем связи. Одной из причин таких ошибок может являться ненулевое мертвое время счетчика фотонов, определяемое как длительность времени, в течение которого счетчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [1–4]. В этой связи **целью данной работы** являлось определить влияние мертвого времени счетчика фотонов на потери передаваемой информации в квантово-криптографическом канале связи. **Объект исследования** – асинхронный двоичный несимметричный однородный однофотонный квантово-криптографический канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен

тем, что его использование не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приема синхрои импульсов [3, 4]. Мертвым временем продлевающегося типа характеризуются счетчики фотонов на базе лавинных фотоприемников, включенных по схеме пассивного гашения лавины [2].

Выражение для оценки потерь информации. Для оценки потерь информации воспользуемся формулой условной энтропии, которая применительно к квантово-криптографическому каналу связи, содержащему в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа, будет выглядеть следующим образом [4]:

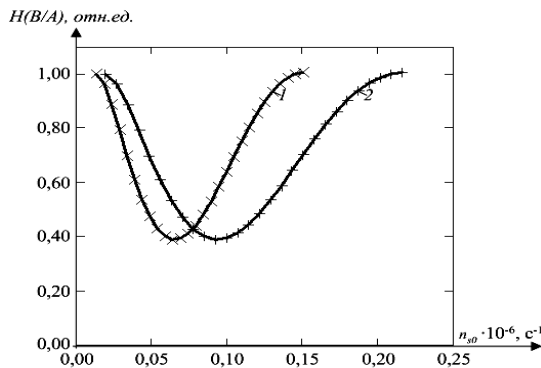
$$\begin{aligned}
 H(B/A) = & -0,5 \left\{ \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right\} \times \\
 & \times \log_2 \left[\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] + \\
 & + \left[1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \times \\
 & \times \log_2 \left[1 - \sum_{N=0}^{N_2} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] + \\
 & + \left[\sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \times \\
 & \times \log_2 \left[\sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_1 + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \Big\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -0,5 \left\{ \sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right\} \times \\
 & \times \log_2 \left[\sum_{N=N_1}^{N_2} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] + \\
 & + \left[1 - \sum_{N=0}^{N_1} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \times \\
 & \times \log_2 \left[1 - \sum_{N=0}^{N_1} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] + \\
 & + \left[\sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \times \\
 & \times \log_2 \left[\sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s1})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} \right] \Big\}.
 \end{aligned}$$

В выражении (1) N_1 и N_2 – нижний и верхний пороговые уровни регистрации соответственно, n_t – средняя скорость счета темновых импульсов на выходе счетчика фотонов, n_{s0} и n_{s1} – средние скорости счета сигнальных импульсов на выходе счетчика фотонов при передаче символов «0» и «1» соответственно, Δt – среднее время однофотонной передачи, τ_d – средняя длительность мертвого времени продлевающегося типа.

Результаты исследования и их обсуждение.

На рис. 1 представлены зависимости энтропии потерь от средней скорости счета сигнальных импульсов при передаче символов «0» как при наличии мертвого времени продлевающегося типа, так и при его отсутствии.



$N_1 = 1, N_2 = 7, n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}, \Delta t = 50 \text{ мкс};$
 средняя длительность мертвого времени:
 $1 - \times \tau_d = 0; 2 - + \tau_d = 15 \text{ мкс}$

Рисунок 1 – Зависимость энтропии потерь от средней скорости счета сигнальных импульсов при передаче символов «0»

Расчет проводился для одинаковых значений нижнего и верхнего пороговых уровней регистрации $N_1 = 1$ и $N_2 = 7$, средней скорости счета темновых импульсов $n_t = 10^3 \text{ c}^{-1}$ и среднего времени однофотонной передачи $\Delta t = 50 \text{ мкс}$. Все графики нормированы на максимальное значение условной энтропии, полученное для соответствующей средней длительности мертвого времени продлевающегося типа. При построении

зависимостей $H(B/A)$ от n_{s0} диапазоны изменений n_{s0} и значения n_{s1} выбирались по методике [3].

Из рис. 1 видно, что рост средней длительности мертвого времени продлевающегося типа приводит к увеличению средней скорости счета сигнальных импульсов, при которой достигаются наименьшие значения условной энтропии. Так, например, наименьшие значения $H(B/A)$ достигаются при $n_{s0} = 66,6 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ и $n_{s0} = 95,6 \times 10^3 \text{ c}^{-1}$ соответственно для $\tau_d = 0$ и $\tau_d = 15 \text{ мкс}$. Причем с ростом n_{s0} вначале наблюдается спад зависимости $H(B/A)$ от n_{s0} вплоть до наименьшего значения, после чего эта зависимость растет. Такое поведение зависимости $H(B/A)$ от n_{s0} проявляется как при наличии мертвого времени продлевающегося типа, так и при его отсутствии, и объясняется следующим. При прочих равных параметрах приема с ростом скорости счета n_{s0} вероятность ошибочной регистрации символов «0» уменьшается вплоть до своего наименьшего значения, что соответственно снижает $H(B/A)$. Это обусловлено смещением статистических распределений смеси числа темновых и сигнальных импульсов при передаче символов «0», достаточно подробно исследованное в работах [3, 4]. Однако дальнейшее смещение указанных статистических распределений при увеличении n_{s0} приводит к росту вероятности ошибочной регистрации символов «0». В результате этого зависимость $H(B/A)$ от n_{s0} после достижения своего наименьшего значения растет.

Заключение. Таким образом, в данной работе проведено математическое моделирование квантово-криптографического канала связи, содержащего в качестве приемного модуля счетчик фотонов с мертвым временем продлевающегося типа. Выполненные исследования показали, что рост средней длительности мертвого времени продлевающегося типа приводит к увеличению средней скорости счета сигнальных импульсов при передаче символов «0», при которой достигаются минимальные потери информации.

Литература

1. Килин, С. Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С. Я. Килин ; под ред. С. Я. Килин и др. – Минск : Беларус. наука, 2007. – 391 с.
2. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем: монография / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск : УО ВГКС, 2012. – 276 с.
3. Тимофеев, А. М. Оценка влияния интенсивности оптического сигнала на вероятность ошибочной регистрации данных в однофотонном канале связи / А. М. Тимофеев // Информатика, 2021. – Т. 18, № 2. – С. 72–82.
4. Тимофеев, А. М. Оценка влияния продлевающегося мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник связи, 2018. – Т. 147, № 1. – С. 56–62.

УДК 621 384 3

ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ MEMS ДАТЧИКИ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА Таратын И.А.¹, Кернасковский Ю.М.², Филатов С.А.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт радиоматериалов НАН Беларуси»

³ГНУ «Институт тепло-и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложены новые решения позволяющие увеличить чувствительность и оптимизировать спектральный диапазон термоэлектрических многоэлементных МЭМС датчиков оптического излучения.
Ключевые слова: МЭМС, MEMS, сенсоры.

P WIDE RANGE HEAT FLOW MEMS SENSORS

Taratyn I.¹, Kernasovsky Y.², Filatov S.³

¹Belarusian National Technical University

²Institute of Radio Materials of the NAS of Belarus

³A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. New solutions are proposed that allow increasing the sensitivity and optimizing the spectral range of thermoelectric multielement MEMS sensors of optical radiation. Abstract up to 100 words.

Key words: MEMS, sensor, termopile.

Адрес для переписки: Филатов С.А., Минск, П.Бровки, 15, Республика Беларусь
e-mail: fil@hmti.ac.by

В системах регистрации оптического и тергерцового излучения эффективно используются многоэлементные датчики выполненные по МЭМС технологии, с чувствительными элементами в виде многоэлементных планарных термопар, обеспечивающей высокое временное разрешение при низком уровне шумов [1–3]. Успехи в развитии этого направления обусловлены результатами разработок технологических процессов формирования микро- и наноразмерных мембран на кремниевой подложке с использованием процессов анизотропного травления кремния, рис. 1.

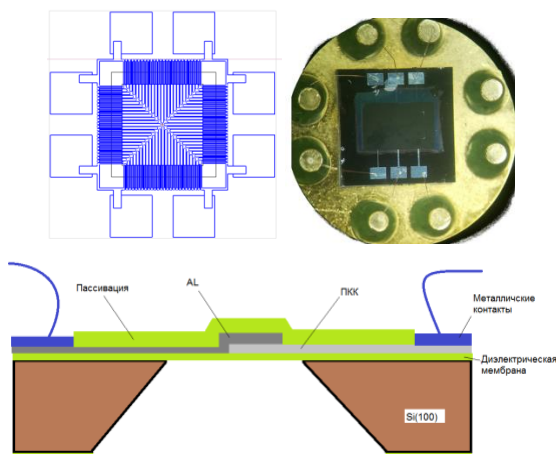


Рисунок 1 – Базовая топология и конструкция МЭМС датчика на основе термоэлектрической пары алюминий-поликристаллический кремний (ПКС) на поддерживающей диэлектрической мембране из нитрида кремния толщиной менее 1 мкм

Оптимизация конструкции датчика выполнена на основе результатов численного моделирования

теплообмена в элементах датчика с использованием пакета ELCUT (ООО «Тор», РФ), рис. 3.

Как показывают результаты экспериментов и численного моделирования, вследствие малой толщины рабочих слоев и диэлектрической мембраны сама конструкция чувствительных элементов практически не поглощает оптическое излучение в видимом, ИК и УФ диапазоне, рис. 4, что требует применения специальных поглощающих слоев (абсорбера) для увеличения чувствительности датчика. Кроме того увеличение коэффициента поглощения оптического абсорбера снижает рассеяние и пропускание излучения конструкцией датчика, что позволяет снизить уровень отраженного излучения в конструкции датчика и увеличить его чувствительность и воспроизводимость измерений.

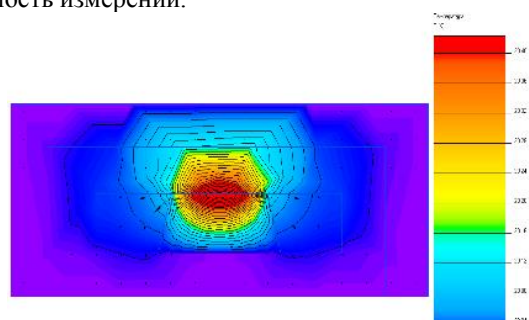


Рисунок 2 – Фрагмент расчетной сетки и результаты расчета при моделировании нестационарного теплообмена кристалла МЭМС датчика с абсорбером в программном комплексе ELCUT

Для проведения испытаний использовался специализированный стенд для измерения характеристик датчика теплового потока. При прове-

дении испытаний поток оптического излучения составил $4,0 \pm 0,1$ кВт/м², контроль потока оптического излучения в диапазоне 0,1–14,0 мкм осуществлялся с помощью балансомера Пеленг СФ-06, контроль теплового потока осуществлялся с помощью измерителя плотности теплового потока и температуры ИТП-МГ4.03/5 «Поток». Оптические характеристики наноструктурированных покрытий и элементов датчика были определены с помощью ИК Фурье спектрометра Nicolet Nexus 670 (компания Thermo, США), рис. 3.

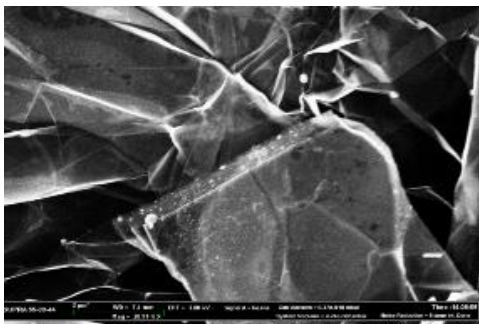


Рисунок 3 – Характерный вид топологии наноструктурированного диэлектрического покрытия

Для увеличения коэффициента поглощения оптического абсорбера в видимой и ближней ИК области спектра было предложено использовать структуры из неупорядоченных углеродных нанотрубок на поверхности чувствительных элементов и неструктурированный графен, дефектные структуры в котором обеспечивают множественные дискретные графен-плазмонные резонансы с большим относительным частотным интервалом. Терагерцовые устройства привлекают все большее внимание благодаря уникальным свойствам излучения в диапазоне 0,1–10 ТГц, которые имеют сходство как с микроволновым, так и с дальним инфракрасным диапазоном. Традиционно в этой области, металлические метаматериалы

являются ключевыми компонентами большинства конструкций абсорберов оптического излучения, как селективных, так и двухдиапазонных и широкополосных. Выбор графена в качестве базового материала абсорберов терагерцового диапазона связан с высокой подвижностью носителей заряда в графене. Кроме того возможна реализация абсорберов на основе графена в виде метаматериалов (например, типа такие как трехслойных структур металл-диэлектрик-графен [4, 5] и метаповерхностей типа многослойного графена на диэлектрике [6, 7] на поддерживающем диэлектрическом слое.

Предложенные решения позволяют увеличить чувствительность и оптимизировать спектральный диапазон термоэлектрических многоэлементных МЭМС датчиков оптического излучения.

Литература

1. Геращенко, О. А. Основы теплотрии / О. А. Геращенко. – Киев: Наукова думка, 1971. – 191 с.
2. Rogalski, A. Infrared Detectors / A. Rogalski. – New York : Gordon and Breach Science Publishers, 2000.
3. Review of micromachined thermopiles for infrared detection / A. Graf, [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2007. – Т. 18, № 7. – P. R59–R753.
4. Amin, M. An ultra-broadband multilayered graphene absorber / M. Amin, M. Farhat, H. Bağcı // Optics Express. – 2013. – № 21. – P. 29938–29948.
5. Wang, Z. Ultra-multiband absorption enhancement of graphene in a metal-dielectric-graphene sandwich structure covering terahertz to mid-infrared regime / Z. Wang, Y. Hou // Optics Express. – 2017. – № 25. – P. 19185–19194.
6. Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz / B. Wu [et al.] // Scientific Reports. – 2014. – №4.
7. A perfect absorber made of a graphene micro-ribbon metamaterial / R. Alaei [et al.] // Optics Express. – 2012. – № 20. – P. 28017–28024.

УДК 621.382.33

МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ЗОНД-ОБРАЗЕЦ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЗОНДА КЕЛЬВИНА

Тявловский А.К.¹, Жарин А.Л.¹, Пантелеев К.В.¹, Свистун А.И.¹, Самарина А.В.¹,
Петлицкий Н.Н.², Мухуров Н.И.³

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Определение величины зазора зонд-образец в измерительной системе на основе зонда Кельвина может осуществляться оптическими методами с использованием независимого волоконно-оптического датчика либо электрическими методами на основе анализа особенностей самого измерительного сигнала. Основным преимуществом электрических методов контроля зазора зонд-образец является независимость результатов измерений от оптических свойств контролируемой поверхности.

Ключевые слова: контактная разность потенциалов, зонд Кельвина, стабилизация зазора.

METHODS OF AUTOMATIC DEFINITION AND STABILIZATION OF PROBE-TO-SAMPLE GAP IN A KELVIN PROBE MEASUREMENT SYSTEM

Tyavlovsky A.¹, Zharin A.¹, Pantsialeuy K.¹, Svistun A.¹, Samarina A.¹, Pyatlitski A.², Mukhurov M.³

¹Belarusian National Technical University

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company

³SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”

Minsk, Belarus

Abstract. The probe-to-sample gap in a Kelvin probe-based measurement system could be determined either by optical methods using an independent fiber-optic sensor or by electrical methods based on an analysis of the peculiarities of the measuring signal itself. The main advantage of electrical methods is that the measurement signal is independent of the sample’s surface optical properties.

Key words: Contact Potential Difference, Kelvin Probe, Gap Stabilization.

Адрес для переписки: Тявловский А.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

При измерениях контактной разности потенциалов (КРП) или относительных значений работы выхода электрона (РВЭ) по методу Кельвина-Зисмана чувствительный элемент измерительного преобразователя (зонд Кельвина) располагается на некотором расстоянии d от поверхности исследуемого объекта. Измеряемая величина КРП V_{CPD} соответствует выражению

$$V_{CPD} = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{e}, \quad (1)$$

где Φ_1, Φ_2 – значения РВЭ зонда Кельвина и исследуемой поверхности, соответственно; e – элементарный заряд (заряд электрона).

В случае электрофизически однородной поверхности, как следует из выражения (1), результат измерения не будет зависеть от величины зазора зонд-образец d . В то же время, для неоднородной поверхности, содержащей участки с различными значениями РВЭ, измеряемые значения КРП будут изменяться с изменением величины зазора вследствие проявления краевых эффектов (рис. 1). Это объясняется известным свойством зонда Кельвина усреднять значения КРП в пределах области чувствительности зонда, размеры которой изменяются при изменении зазора, что приводит к изменению доли площади, занимаемой участками с различными значениями РВЭ, в пределах этой области. Отсюда следует необходимость контроля и поддержания на некотором постоянном уровне величины зазора зонд-образец, причем для повышения пространственной разрешающей способности измерений величина зазора должна быть минимальной, предпочтительно менее поперечных размеров (диаметра) чувствительного элемента [1].

Контроль величины указанного зазора может осуществляться оптическими либо электрическими методами. Учитывая малую величину контролируемого зазора (порядка 0,1–0,3 мм), контроль оптическими методами может осуществляться с использованием волоконно-оптических датчиков приближения. Принцип действия таких датчиков основан на освещении

поверхности образца через один (передающий) волоконно-оптический световод и регистрации освещенности поверхности в области чувствительности второго (приемного) волоконно-оптического световода. Вследствие того, что световой пучок на выходе волоконно-оптического световода распространяется в виде конуса, площадь освещенного участка в области чувствительности приемного световода будет изменяться при изменении величины зазора датчик-поверхность (рис. 2).

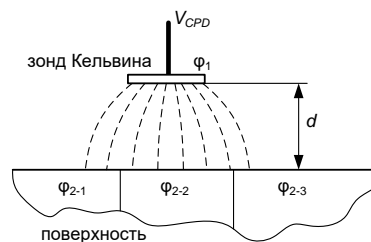


Рисунок 1 – Формирование измерительного сигнала зонда Кельвина в случае электрофизически неоднородной поверхности

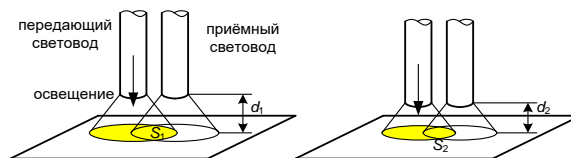


Рисунок 2 – Принцип действия волоконно-оптического датчика приближения

Волоконно-оптические датчики характеризуются высокой чувствительностью и разрешающей способностью; в частности, серийно выпускаемый датчик МП125Н обеспечивает разрешающую способность до 0,25 мкм. В то же время диапазон измерения волоконно-оптических датчиков ограничен небольшой величиной (0–2 мм для МП125Н), причем за пределами данного диапазона характеристика чувствительности датчика инвертируется, что приводит к формированию ложных показаний. Уровень выходного сигнала зависит от оптических свойств (коэффициентов отражения и рассеяния) контролируемой поверхности, что требует калибровки датчика в соответ-

ствии с особенностями конкретного объекта исследования. Также использование оптических методов контроля зазора зонд-образец затруднено или невозможно при наличии на исследуемой поверхности оптически прозрачных покрытий.

Электрические методы контроля основаны на использовании для определения величины зазора зонд-образец дополнительных параметров выходного сигнала самого зонда Кельвина, рассматриваемого в данном случае как многопараметрический сигнал. Комплексно-гармонический анализ выходного сигнала вибрирующего зонда Кельвина показывает, что в случае гармонического закона модуляции зазора зонд-образец отношение амплитуд первой и второй гармоник результирующего измерительного сигнала находится в прямой зависимости от коэффициента модуляции зазора m [2], что при известном значении амплитуды вибрации d_m позволяет определять среднюю величину зазора d_0 на основании анализа амплитудного спектра сигнала. Такой анализ должен выполняться в реальном масштабе времени что может быть реализовано на основе цифровых методов обработки сигналов с использованием быстродействующих алгоритмов. В настоящее время в НИЛ полупроводниковой техники БНТУ осуществляется разработка и отладка цифрового измерительного преобразователя на основе динамического конденсатора, использующего для определения гармонического состава сигнала алгоритма быстрого преобразования Фурье. Результаты исследований демонстрируют возможность определения амплитуд первой и второй гармоник сигнала с достаточной для определения и стабилизации зазора зонд-образец точностью на основании дискретизированных отсчетов 4 периодов измерительного сигнала при частоте дискретизации не менее 250 ksps. С учетом отсутствия необходимости определения фазового спектра сигнала, указанные амплитуды могут определяться также по методу быстрого преобразования Хартли [3], обеспечивающего более высокую производительность вычислений.

Помимо анализа гармонического состава сигнала, автоматическое определение и стабилизация зазора зонд-образец может осуществляться

на основе анализа угла наклона компенсационной зависимости цифрового зонда Кельвина, работающего в режиме большого сигнала [4]. Данный метод требует минимум двукратных измерений сигнала при двух различных значениях напряжения компенсации, что увеличивает время выполнения измерений, и потому не может быть рекомендован для применения в быстродействующих сканирующих системах. В то же время, такой метод контроля требует значительно меньшего объема вычислений и может быть реализован с использованием сравнительно маломощного сигнального процессора.

Основным преимуществом электрических методов контроля зазора зонд-образец является независимость результатов измерений от оптических свойств контролируемой поверхности, что является необходимым условием при создании универсальных средств неразрушающего контроля, пригодных для исследования поверхностей различной физической природы.

Литература

1. Тявловский, А. К. Математическое моделирование дистанционной зависимости разрешающей способности сканирующего зонда Кельвина / А. К. Тявловский, // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1. – С. 30–36.
2. Tyavlovsky, A. Complex-harmonic analysis of electric circuit containing a vibrating-plate capacitor / A. Tyavlovsky, A. Zharin // Informatyka, Automatyka, Pomiaru w gospodarce i ochronie srodowiska. – 2012. – № 1. – P. 32–35.
3. Цифровая обработка сигнала сканирующего зонда Кельвина на основе быстрого преобразования Хартли // А.К. Тявловский [и др.] / Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. Седьмой междунар. науч.-техн. конф. ; редкол. : М. Е. Лустенков (гл. ред.) [и др.]. – Могилев : Беларус.-Рос. ун-т, 2020. – С. 219–223.
4. Метод управления процедурой приближения и слежения за изменением зазора отсчетного электрода цифрового зонда Кельвина / К.В. Пантелеев [и др.] // Актуальні проблеми автоматики та приладобудування : матеріали міжнарод. наук.-техн. конф., 07–08 грудня 2017 р. / Є.І. Сокол (голова оргком.) – Х. : ФОП Мезіна В., 2017. – С. 180–181.

УДК 004.384

ОСНАЩЕНИЕ УМНОЙ АУДИТОРИИ

Тявловский К.Л., Свистун А.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Микитевич В.А.,
Пантелеев К.В., Тявловский А.К.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен пример оснащения учебной аудитории программными и аппаратными средствами с целью повышения эффективности образовательного процесса и формирования новых функциональных возможностей. Использование цифровых технологий в оснащении умных аудиторий обеспечивает непрерывность образовательного процесса и организацию дистанционного обучения, интеграцию образовательного процесса с другими учебными заведениями.

Ключевые слова: умная аудитория, цифровые технологии, образование, обучение.

EQUIPMENT OF SMART AUDIENCE

Tyavlovsky K., Svistun A., Vorobey R.I., Gusev O.K., Zharin A., Mikitsevich U., Pantsialeyeu K., Tyavlovsky A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. An example of equipment of educational audience program and hardware for the purpose of increase of efficiency of educational process and forming of new functional capabilities is reviewed. Use of digital technologies in equipment of smart audiences provides a continuity of educational process and the organization of distance training, integration of educational process with other educational institutions.

Key words: smart audience, digital technologies, education, training.

*Адрес для переписки: Гусев О.К., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: ktyavlovsky@bntu.by*

В настоящее время под определением «Умная аудитория» обычно понимают структуру, основанную на взаимодействии информационных и коммуникативных технологий и интернета вещей (IoT), предназначенную для обеспечения устойчивого роста качества преподавания, повышения эффективности образовательных процессов, сокращения непроизводительных затрат времени на действия, не связанные с процессом обучения, создания благоприятных комфортных условий для преподавателя и обучающихся, и повышения эффективности государственных расходов за счет использования цифровых технологий.

Основными задачами, решаемыми при комплексном использовании информационных технологий [1] являются создание единой образовательной среды и интеграция с другими ВУЗами на внутреннем и международном образовательном и научном пространстве. В современных условиях применение средств умных аудиторий обеспечивает непрерывность образовательного процесса и организацию дистанционного обучения на высоком уровне.

Одними из основных принципов организации умной аудитории являются гибкость и адаптивность. Использование распределенных систем управления на базе микроконтроллеров, связанных с управляющим сервером аудитории (рис. 1), обеспечивает управление электропитанием, искусственным и естественным освещением по сценариям (например, при запуске сценария «лекция» система управления включит все необходимое оборудование, опустит экраны проектора, включит освещение, выставит необходимую предустановленную температуру кондиционера, задвинет шторы, направит камеру на лектора). При этом использование солнечной станции электропитания даже небольшой мощности позволяет существенно снизить расходы энергии, потребляемой от электросети 230 В. Контроллеры с индивидуальными датчиками и исполнительными устройствами, связанные локальной сетью, обеспечивают автоматическое поддержание рекомендованного санитарными нормами уровня освещения, за счет регулирования естественного (шторы) и искусственного

(светильники) освещения в аудитории, воздухообмена и других параметров микроклимата. Параметры внутреннего микроклимата контролируются внутренней метеостанцией, а внешние – наружной, с дополнением недостающих данных информацией, полученных из глобальной сети Интернет. В качестве периферийных устройств контроллеров могут, например, использоваться:

- источники общего и локального освещения, включая местное освещение с зональной регулировкой цветности,
- устройства климат-контроля (температура, воздухообмен и т.д.);
- общее и локальное звуковое сопровождение и т.д.

Система телевизионного наблюдения умной аудитории образована несколькими группами камер. Для видеотрансляции изображения лектора в центре кадра независимо от его положения в аудитории и его перемещений, например, к одному из рабочих мест учащихся, используется поворотная PTZ-камера со слежением за положением лектора в аудитории. Демонстрацию предметов, документа или опыта на все доступные в аудитории экраны с целью ознакомления всех обучающихся с редкими и недоступными для непосредственного наблюдения объектами, обеспечивает документкамер, совмещенная с видеокамерой-микроскопом. Видеокамера лектора и документкамера используются для создания аудио-видео архива проведенных занятий и мероприятий, например, конференций. Одна или несколько видеокамер с функцией распознавания и идентификации лиц из базы изображений (<https://avant.by/catalog/>) обеспечивают автоматическую идентификацию обучающихся, входящих в аудиторию, ведение журнала посещаемости, распределение учащихся по рабочим местам, распределение и учета индивидуальных заданий, учет успеваемости. Отметим, что алгоритмы видеоаналитики распознают людей как по лицу в целом, так и по отдельным его участкам. При этом фильтруются такие объекты, как очки, медицинские маски, головные уборы.

Внутренняя система видеонаблюдения может быть подключена к системе охранного телевиде-

ния, обеспечивая безопасность учащихся и работников ВУЗа. Система видеомониторинга, включающая специализированное программное обеспечение, например, Kirod, помимо распознавания лиц умеет фиксировать задымление, делать ситуационную аналитику (фиксировать

неадекватное поведение учащихся, оставленные без присмотра предметы). Модификация программного обеспечения видеоаналитики позволит также осуществлять мониторинг физического состояния, внимания, усталости учащихся.

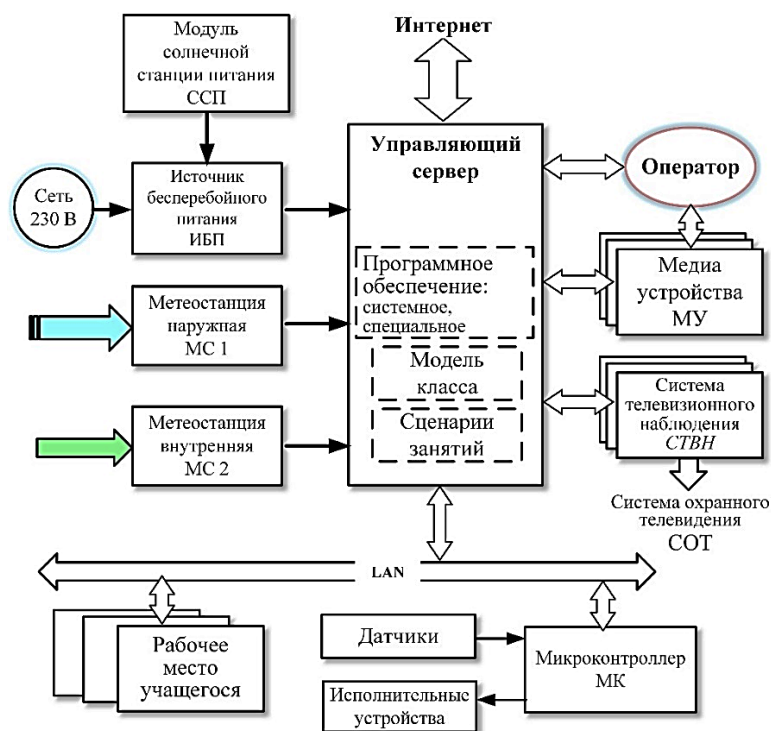


Рисунок 1 – Схема оснащения умной аудитории

Программное обеспечение умной аудитории частично использует технологии нейронных сетей. При этом нейронная сеть обучается каждый день, а наборы данных формируются из всех возможных источников: личного архива, видео из архива аудитории и учебного заведения, из интернета.

Мультимедийное оборудование рабочих мест лектора (докладчика) и обучающихся используется для усиления речи преподавателя и звукового сопровождения мультимедийных учебных материалов. Расширение функциональности медиасредств обеспечивается программным модулем системы синхронного перевода, что дает возможность проведения лекционных занятий с иностранными преподавателями (иностранными студентами). Также медиа устройства предоставляют возможность публичного выступления учащихся. Реализация учащимися собственных проектов «Умная аудитория» делает процесс обучения интерактивным, увлекательным занятием, приводящим к углублению полученных знаний.

Аппаратно-программное оснащение умной аудитории помимо перевода качества образовательного процесса на новый уровень также автоматически обеспечивает контроль использования аудитории и качества оказываемых образовательных услуг, способствует повышению статуса учебного заведения. При любом уровне оснащения и функциональности оборудования умной аудитории это всего лишь инструмент для организации учебного процесса, и без живого общения в аудитории даже используя весь арсенал технических инноваций невозможно достичь максимальной эффективности образовательного, и воспитательного, процесса.

Литература

1. Концепция «Умный город»: научно-практические аспекты : монография / О. С. Голубова [и др.] ; под общ. ред. А. В. Губерта. – Ижевск : УИР ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, 2021. – 224 с.

УДК 621.311

ОСНОВНЫЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЗАДАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

Цедик В.А., Шахлевич Г.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены параметры преобразователей с задающим генератором в импульсных источниках питания. Представлены основные схемотехнические решения, применяющиеся в преобразователях для высоковольтных источников питания.

Ключевые слова: импульсные источники питания, преобразователи с задающим генератором, схемы преобразователей.

BASIC SWITCHING CIRCUITS SOLUTIONS OF CONVERTERS WITH MASTER OSCILLATORS

Tsedik V., Shahlevich G.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus

Abstract. The parameters of converters with a master oscillator in switching power supplies are considered. The main circuitry solutions used in converters for high-voltage power supplies are presented.

Key words: switching power supplies, converters with a master oscillator, converter circuits.

Адрес для переписки: Цедик В.А., ул. Симново, д.15, кв. 206, г. Могилев 212036, Республика Беларусь
e-mail: valeri.tsedik@yandex.ru

Импульсные источники питания представляют собой системы с временной дискретизацией, в которых управления выходным напряжением используются прямоугольные управляющие сигналы [1]. Для управления переключением преобразователей чаще всего используют специальные устройства: задающие генераторы. Задающие генераторы вырабатывают импульсы малой мощности, поступающие на цепи управления ключевыми компонентами, изменяют параметры импульсов в соответствии с сигналами от датчиков и регулирующих органов. Основные достоинства задающих генераторов – это простота и гибкость управления преобразователем. Функции, выполняемые задающими генераторами, могут быть строго фиксированы (реализованы аппаратно), но возможно также и программирование откликов на возмущающие воздействия сигналов с датчиков (заданы программно) [2].

Задающие генераторы могут быть реализованы полностью на дискретных компонентах, на дискретных компонентах и контроллерах (или специализированных микропроцессорах) или только на контроллерах без дополнительных цепей обвязки.

Контроллеры импульсных источников питания почти всегда позволяют реализовать стабилизацию напряжения, приложенного к нагрузке, для чего в них встроены источники опорного напряжения и усилители напряжения ошибки. В некоторых контроллерах предусмотрено дополнительная возможность стабилизации тока, протекающего через нагрузку. Обычно в контроллерах предусмотрен вывод, при подаче на который сигнала от датчика тока будет инициирован запрет на

генерацию импульсов, чем будет обеспечено реализация системы защиты от перегрузки по току.

Общими для всех видов преобразователей являются пять элементов:

- 1) источник питания,
- 2) ключевой коммутирующий элемент,
- 3) индуктивный накопитель энергии (катушка индуктивности, дроссель),
- 4) блокировочный диод,
- 5) конденсатор фильтра, включенный параллельно сопротивлению нагрузки.

Включение этих пяти элементов в различных сочетаниях позволяет реализовать любой из трех типов импульсных преобразователей.

Понижающий (buck) преобразователь (рис. 1) относится к разряду прямоходовых схем. Он позволяет получать выходную мощность в несколько киловатт. Предназначен для использования в тех случаях, когда не нужна изоляция между первичной и вторичной сторонами.

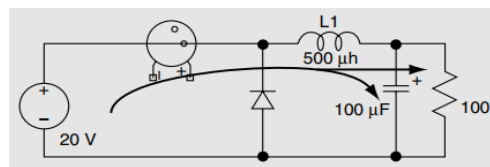


Рисунок 1 – Схема понижающего (buck) преобразователя

Повышающий (Boost) преобразователь (рис. 2) относится к типу обратноходовых схем. Его особенность – выходное напряжение всегда больше входного. Выходная мощность может составлять сотни ватт в прерывистом режиме и до нескольких киловатт в непрерывном режиме.

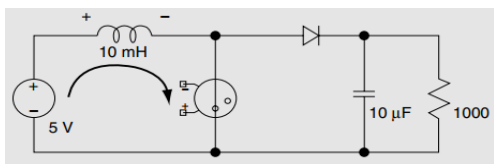


Рисунок 2 – Схема повышающего (Boost) преобразователя

Инвертирующий (Buck-Boost) преобразователь (рис. 3) также относится к обратным схемам. Его особенность: выходное напряжение преобразователя имеет отрицательную полярность относительно земли.

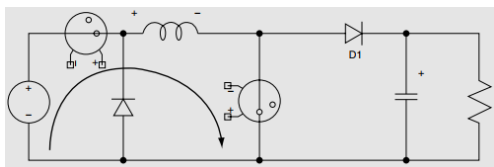


Рисунок 3 – Схема инвертирующего (Buck-Boost) преобразователя

Обратноходовой (Flyback) преобразователь (рис. 4) по принципу работы аналогичен повышающему преобразователю.

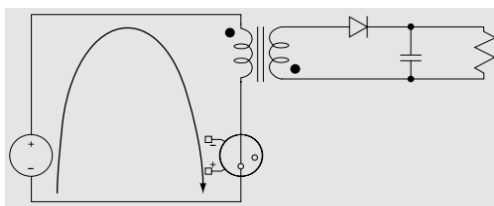


Рисунок 4 – Схема обратноходового (Flyback) преобразователя

В трансформаторе прямоходового (Forward) преобразователя (рис. 5), в отличие от обратноходовой схемы, энергия не запасается.

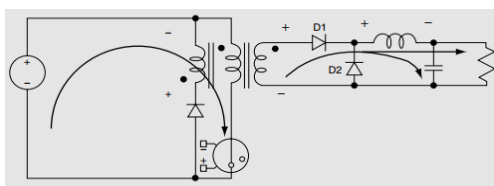


Рисунок 5 – Схема прямоходового (Forward) преобразователя

Полумостовой (Half-Bridge) преобразователь (рис. 6) относится к двухтактным схемам. Энергия передается в нагрузку в течение двух полуциклов цикла.

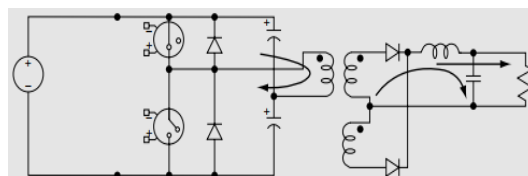


Рисунок 6 – Схема полумостового (Half-Bridge) преобразователя

Мостовой (Full-Bridge) преобразователь (рис. 7) также представляет собой двухтактную схему. В отличие от полумостовой схемы здесь используются четыре транзистора. Мостовой преобразователь применяется в мощных схемах от единиц до десятков киловатт, что позволяет снизить токи в первичной цепи в два раза по сравнению с полумостовой схемой.

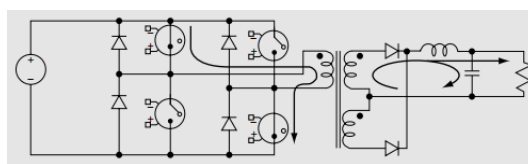


Рисунок 7 – Схема полумостового (Full-Bridge) преобразователя

Обратноходовые источники питания, благодаря своей простоте, нашли широкое применение в AC / DC, DC / DC-источниках. Однако, они имеют не очень высокие показатели удельной мощности. Infineon выпускает контроллеры для управления AC/DC-источником, а также серию Coolset со встроенным ключом. CoolSet позволяет строить простые обратноходовые источники с минимальной «обвеской» мощностью до 240 Вт. Прямоходовые схемы имеют энергетические показатели на порядок более высокие, чем обратноходовой схемы. Однотранзисторная схема часто применяется в DC/DC-модулях, но не нашла широкого применения в сетевых AC/DC-источниках из-за ее собственных ей высоких перенапряжений на ключе. В сетевых AC/DC-источниках повсеместно применяется двухтранзисторная схема.

Литература

1. Mack, R.A. Demystifying switching power supplies/ R.A. Mack.- Elsevier Inc., 2005, 323p.
2. Москатов, Е.А. Источники питания / Е.А. Москатов – Киев: МК-Пресс, Санкт-Петербург: КОРОНА-ВЕК, 2011. – 208 с.
3. Семенов, Б.Ю. Силовая электроника для любителей и профессионалов/ Б.Ю. Семенов – Москва: Соломон-Р, 2001. – 327с.

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ
И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

УДК 658.512

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССНОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДОВ
К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА РАЗЛИЧНЫХ
ЭТАПАХ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Астапович А.А., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье обосновывается идея синхронизации процессного и функционального подходов к созданию системы менеджмента качества. Определен комплекс моделей, каждая из которых представляет соответствующую функциональную управленческую подсистему, на каждом этапе жизненного цикла системы менеджмента качества.

Ключевые слова: процессный подход, функциональный подход, система менеджмента качества.

SYNCHRONIZATION OF THE PROCESS AND FUNCTIONAL APPROACHES
TO THE DEVELOPING A QUALITY MANAGEMENT SYSTEM AT DIFFERENT STAGES
OF ITS LIFE CYCLE

Astapovich A., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. This article substantiates the idea of the synchronization of the process and functional approaches to the developing of a quality management system. It has been defined a set of models, each of which represents a corresponding functional management subsystem at each stage of the quality management system life cycle.

Key words: process approach, functional approach, quality management system.

Традиционно система менеджмента качества (далее СМК) представляется как совокупность процессов деятельности, организационной структуры, трудовых, материальных и финансовых ресурсов, методик, документации и т.д. Все эти составляющие объединены и взаимодействуют между собой для достижения целей организации. Однако не любая система является результативной, эффективной, адекватной и приемлемой. Создание СМК, отвечающей этим требованиям, сформулированным в СТБ ISO 9001, является комплексной, многофакторной задачей со множеством ограничений.

Одним из ключевых инструментов повышения эффективности управления является применение процессного подхода. Однако, у процессного подхода есть недостатки. Проблема заключается в том, что процессный подход в практике деятельности организаций самого различного профиля реализуется, как правило, в качестве тривиальной регламентации деятельности организации в виде карт процессов, представленных как графическое или текстовое описание последовательности выполнения работ. При этом разрабатываемые карты процессов не имеют практической ценности для персонала (владельцев, ответственных исполнителей, работников) и используются, как правило, в представительских целях, например, для демонстрации второй или третьей стороне соответствия требованиям СТБ ISO 9001.

На практике установлено, что процессный подход рассматривается в паре с так называемым функциональным подходом как два основных альтернативных подхода к созданию СМК. Причем практический менеджмент качества склоняется в большей мере к функциональному подходу, который традиционно применяется как инструмент оперативного менеджмента качества на этапе применения СМК в организации. Когда как процессный подход рассматривается как чисто теоретический, ему отведена роль демонстрации соответствия СМК организации требованиям СТБ ISO 9001 [1].

Процессный подход в существующей интерпретации предполагает управление через иерархично выстроенную структуру бизнес-процесса, включающую процессы разных категорий. Основной идеей процессного подхода к управлению является следующая парадигма: качество продукции эквивалентно качеству бизнес-процесса, выходом которого продукция является; в свою очередь, качество бизнес-процесса эквивалентно качеству дочерних процессов, входящих в структуру последнего. Таким образом осуществляя менеджмент качества каждого дочернего процесса и бизнес-процесса в целом, организация обеспечивает стабильно высокое качество продукции и удовлетворенность потребителей.

Функциональный подход в существующей интерпретации предполагает управление через

ролевые функции или через организационную структуру. Основной идеей функционального подхода к управлению является закрепление за определенным структурным подразделением комплекса функций, на которых оно специализируется (разделение труда) и выполняет независимо от других.

В системном менеджменте качества признано, что ключевой для целей общего руководства качеством является представление СМК организации в виде сети процессов, определяющих его миссию. Именно представление объекта в виде процессов (идентификации состава функций и ресурсов, их взаимодействия и взаимосвязей) определяет все остальные его представления или «проекции». Например, организационная структура является специфической формой представления процессов с позиций ролевых функций – ответственности, полномочий, взаимоотношений, обязанностей.

Вопрос лишь в том, когда и в каких случаях применять то или иное представление процесса. На наш взгляд, наиболее обоснованным основанием классификации ситуаций применения различных представлений процесса является жизненный цикл СМК, представленный тремя основными этапами:

1. Разработка и проектирование СМК (процессный подход).

2. Внедрение и применение СМК (функциональный подход).

3. Анализ и совершенствование СМК (процессный подход).

Таким образом процессный подход используется в ходе реализации 1-го и 3-го этапов жизненного цикла СМК. Действительно, прежде всего, организация должна определить процессы, необходимые СМК, и их применение внутри организации, что предполагает:

– определить требуемые входы и ожидаемые выходы процессов;

– определить последовательность и взаимодействие процессов;

– определить и применять критерии и методы, необходимые для обеспечения результативного функционирования этих процессов и управления ими;

– определить ресурсы, необходимые для этих процессов, и обеспечить их наличие;

– назначить обязанности и предоставить полномочия в отношении этих процессов;

– рассмотреть риски и возможности;

– оценивать эти процессы и внедрять любые изменения, необходимые для обеспечения того, чтобы эти процессы достигали своих намеченных результатов;

– улучшать процессы и систему менеджмента качества.

Функциональный подход удобен для оперативного управления качеством в организации на этапе применения СМК. Эффективность применения функционального подхода на втором этапе жизненного цикла СМК определяется тем, что все управленческие функции строятся на основе иерархической организационной структуры, как специфической формы представления процессов с позиций ролевых функций (ответственности, полномочий, взаимоотношений, обязанностей).

Приведенное выше соответствие различных реализаций процессного и функционального подходов этапам жизненного цикла СМК абсолютно адекватно технологии реинжиниринга, как методологии кардинальной перестройки бизнес-процессов организации с целью достижения кардинальных улучшений критических показателей эффективности [2].

На каждом этапе жизненного цикла СМК, не смотря на различие решаемых задач, представление инженерной составляющей СМК в обязательном порядке должно включать комплекс моделей, каждая из которых представляет соответствующую функциональную управленческую подсистему (табл. 1).

Таблица 1. Комплекс моделей представления СМК на различных этапах ее жизненного цикла

Этапы	Комплекс моделей	Типы моделей
Разработка СМК	Сети процессов	Функциональная
	Системы целеполаганий	Распределение целей по процессам
	Системы сбора и анализа данных	Оценки результативности
	Системы поддержки принятия управленческих решений	Контрольные точки и ответственность за принятие решений по каждой из них
Применение СМК	Сети процессов	Ролевых отношений (органиграмма) и потоков работ в рамках каждого структурного подразделения
	Системы целеполаганий	Распределение целей по структурным подразделениям
	Системы сбора и анализа данных	– контроль и мониторинг продукции и процессов; – оценка результативности
	Системы поддержки принятия управленческих решений	Принятия решений в структурных подразделениях
Анализ и совершенствование СМК	Сети процессов	Функциональная
	Системы целеполаганий	Распределение целей по процессам
	Системы сбора и анализа данных	Анализ результативности и эффективности
	Системы поддержки принятия управленческих решений	Анализ поддержки принятия решений

Естественно, что модели, представляющие одну и ту же систему из комплекса (см. табл. 1) на различных этапах жизненного цикла СМК, могут и должны отличаться по виду и содержанию в силу того, что решают различные задачи, но при этом должны выполняться условия:

– на каждом этапе жизненного цикла СМК комплекс функциональных систем и их моделей неизменен и соответствует табл.1;

– модели, представляющие одну и ту же функциональную систему из комплекса (см. табл.1) на различных этапах жизненного цикла СМК должны быть согласованы между собой [3].

Литература

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Процессный подход / П. С. Серенков. – Минск : Новое издание ; М. : Инфра-М., 2014. – 441 с.
2. Серенков, П. С. Тотальное применение комплексного процессного подхода / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015.
3. Репин, В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.

УДК 620.11.05.089.68:531.717-022.532 (476)

СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАМЕТРОВ НАНОЧАСТИЦ

Багдюн А.А.¹, Ивашенко Д.В.¹, Соломахо В.Л.²

¹Белорусский государственный институт метрологии

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для обеспечения прослеживаемости измерений параметров дисперсных сред применяются стандартные образцы диаметра наночастиц. Данные стандартные образцы служат расходным материалом при калибровке счетчиков аэрозольных частиц, нефелометрических анализаторов пыли и анализаторов размера наночастиц. В данной работе описана стратегия создания стандартных образцов диаметра наночастиц на территории Республики Беларусь. Описаны методы оценки стандартных образцов. В результате планируется получить стандартные образцы диаметра наночастиц с измеренным значением методом обеспечивающим прослеживаемость измерений к единице длины – метру, методом позволяющим оценить диаметр наночастиц в аэрозолях и методом определяющим диаметр наночастиц в жидкости.

Ключевые слова: наночастица, наноизмерительная машина, электрическая подвижность, гидродинамический диаметр.

STANDARD REFERENCE MATERIALS AS A BASIS FOR PROVIDING TRACEABILITY OF MEASUREMENTS OF NANOPARTICLE DIAMETERS

Bagdun A.¹, Ivashenko D.¹, Solomakho V.²

¹Belarusian State Institute of Metrology

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. To ensure traceability of measurements of the parameters of dispersed media, standard reference materials of the diameter of nanoparticles are used. These standards reference materials serve as consumables for calibrating aerosol particle counters, nephelometric dust analyzers and nanoparticle size analyzers. This paper describes a strategy for creating standard reference materials of nanoparticle diameter in the territory of the Republic of Belarus. Methods for assessing standard reference materials are described. As a result, it is planned to obtain standard reference materials of the diameter of nanoparticles with a measured value by a method that ensures traceability of measurements to a unit of length – a meter, a method that allows one to estimate the diameter of nanoparticles in aerosols and a method that determines the diameter of nanoparticles in a liquid.

Key words: nanoparticle, nanomeasuring machine, electrical mobility, hydrodynamic diameter.

Адрес для переписки: Багдюн А.А., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: bagdun@gmail.com

В Республике Беларусь в рамках подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Эталоны и научные приборы» создается эталонный комплекс метрологического контроля средств измерений параметров дисперсных сред. Основными

средствами измерений (далее – СИ) параметров дисперсных сред являются счетчики аэрозольных частиц, анализаторы пыли и анализаторы размеров частиц. Параметрами же дисперсных сред в данном случае являются счетная концен-

трация аэрозольных частиц, массовая концентрация аэрозольных частиц и диаметр частиц в жидкости соответственно.

Несмотря на то, что первые два параметра – это концентрации, они тесно привязаны к диаметру частиц, так счетчики частиц определяют счетную концентрацию в определенных размерных каналах, а анализаторы пыли – массовую концентрацию различных размерных фракций аэрозольных частиц.

Таким образом, можно сказать, что основой обеспечения прослеживаемости измерений СИ параметров дисперсных сред являются стандартные образцы (далее – СО) диаметра частиц.

В данный момент в БелГИМ используются СО диаметра частиц производства Thermo Fischer Scientific (США), обеспечивающих прослеживаемость измерений к эталону единицы длины NIST. Однако они являются весьма дорогостоящими. Иные же коммерчески доступные СО имеют ряд недостатков, основным из которых является метод измерения СО.

Поэтому в БелГИМ было принято решение о создании своей линейки СО диаметра частиц.

В [1, 2] было установлено, что для обеспечения метрологической прослеживаемости измерений размеров наночастиц к единицам международной системы СИ, необходимо использовать стандартные образцы сферической формы с нормальным распределением частиц по размерам (например частицы полистирольного латекса). В связи с этим были начаты работы по разработке метода получения СО из полистирольного латекса.

Наиболее распространенным методом получения полистирольных латексов заданного унимодалного размера является эмульсионная полимеризация. Данный метод характеризуется простой исполнению, но в тоже время частицы, получаемые таким методом, отличаются высокой степенью монодисперности. Для проведения эмульсионной полимеризации, как правило, необходимы следующие реагенты: дисперсионная среда, поверхностно-активное вещество (ПАВ), мономер и инициатор радикальной полимеризации. Изменение соотношения реагентов позволяет контролировать размер частиц, а также их физические свойства.

Для обеспечения прослеживаемости измерений к эталону единицы длины, СО должны быть измерены неким универсальным СИ, которое имело бы прослеживаемость к метру. Наиболее подходящим была определена наноизмерительная машина NMM с атомно-силовым микроскопом в качестве сенсора. Схематическое изображение данного СИ представлено на рис. 1.

Применение NMM для измерений наночастиц обеспечивает метрологическую прослеживаемость к международным эталонам единицы дли-

ны и определению единицы длины-метра, как основной единице Международной системы единиц (СИ). Метрологическая прослеживаемость измерений к международным эталонам единицы длины обеспечивается тремя оптическими интерферометрами с источниками излучений – стабилизированными по частоте HE-NE лазерами, установленными на трех координатных осях X, Y, Z .

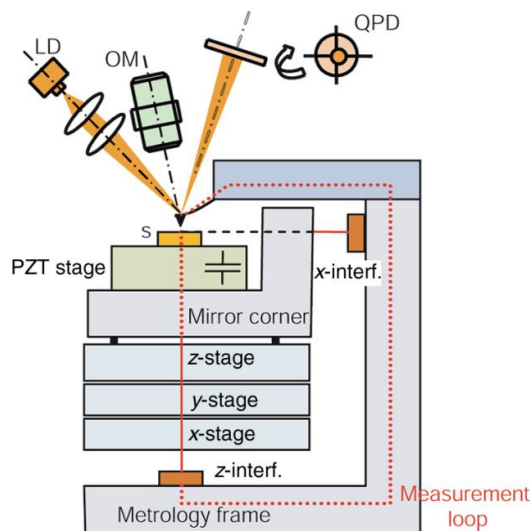


Рисунок 1 – Схематическое изображение NMM

Результатом измерений будет среднее арифметическое, расширенная неопределенность измерений и стандартное отклонение среднего арифметического.

Однако, ввиду того, что частицы пребывают в различных дисперсных средах, а СИ, для которых необходимы СО измеряют эквивалентный диаметр, было принято решение проводить аттестацию не только с помощью микроскопии, но и иными методами, позволяющими проводить измерения в различных дисперсных средах (аэрозольные частицы в воздухе и взвеси частиц в жидкости).

Стандартом ISO/AWI 15900 измерение дисперсного состава газовых сред (аэрозолей) осуществляется с помощью анализатора дифференциальной подвижности (DMA). Данный метод основан на физическом принципе анализа дифференциальной электрической подвижности, который разделяет частицы аэрозоля на основе зависимости их электрической подвижности от размера частиц. Схематично DMA можно представить следующим образом (рис. 2)

В комбинации с конденсационным счетчиком частиц DMA позволяет сканировать аэрозоль и строить функцию распределения частиц по размерам. Пример приведен на рис. 3.

Ввиду того, что данный метод является косвенным и подвержен влиянию артефактов связанных с генерированием аэрозоля, то для атте-

станции СО размера наночастиц мы считаем целесообразным применять моду распределения частиц как значение диаметра СО.

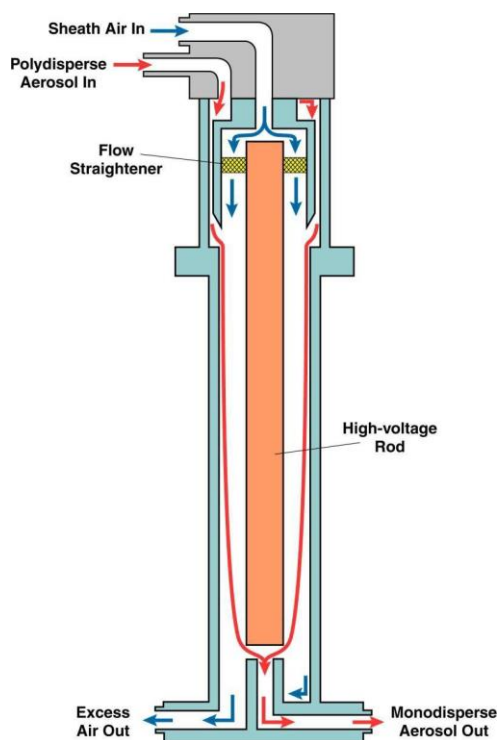


Рисунок 2 – Схематическое изображение DMA

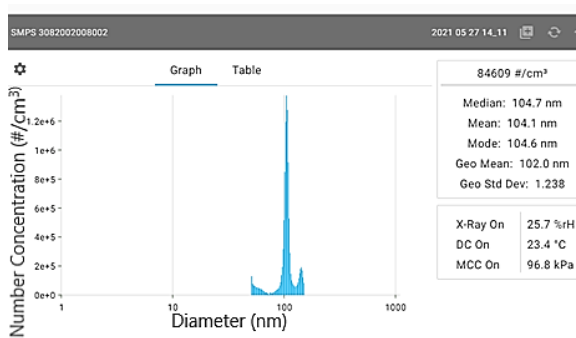
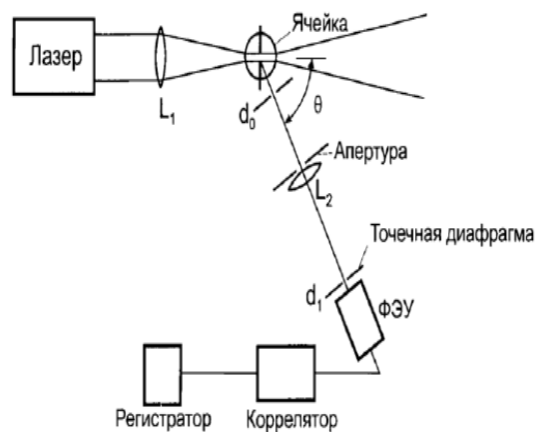


Рисунок 3 – Пример протокола результата измерений наночастиц номинальным диаметром 100 нм

Стандартом ISO 22412 предусмотрено измерение размеров частиц методом динамического рассеяния света (Dynamic light scattering – DLS). Иногда этот метод называется как спектроскопия корреляции фотонов или квазиупругое рассеяние света. Этот метод определен, как первичный метод измерения размера частиц.

Метод DLS позволяет определить коэффициент диффузии дисперсных частиц в жидкости путем анализа характерного времени флуктуаций интенсивности рассеянного света. Далее, из коэффициента диффузии рассчитывается гидродинамический радиус частиц [2].

На рис. 4 представлена принципиальная схема спектрометра динамического рассеяния света.



L_1, L_2 – линзы; d_0, d_1 – диафрагмы

Рисунок 4 – Принципиальная схема прибора

Таким образом, для обеспечения прослеживаемости измерений диаметров наночастиц и оптимизации затрат на их производство и проведение метрологических процедур необходимо создать собственные СО с аттестацией значений тремя методами, основным из которых является микроскопия, обеспечивающая прослеживаемость измерений к эталону единицы длины, а также методами позволяющими измерять частицы в виде аэрозоля и взвеси.

Литература

- 1 Соломахо, В. Л. Современные подходы к определению размера наночастиц / В. Л. Соломахо, А. А. Багдюн // Технология-оборудование-инструмент-качество : материалы МНТК, Минск : БНТУ, 2021. – С. 107–109.
- 2 Rawle, A. Основные принципы анализа размеров частиц / Техническая аннотация MRK0034R-01, Malvern [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.rusnanonet.ru>. – Дата доступа: 01.10.2021.
- 2 Berne, B.J. Dynamic light scattering with applications to chemistry, biology, and physics / B.J. Berne, R. Pecora – New York: Wiley, 1976. (Reprinted by Dover, 2001, Mineola, New York).

УДК 338.23

ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В СИСТЕМЕ ГОССТАНДАРТА. ОТ АВТОМАТИЗАЦИИ К ЦИФРОВИЗАЦИИ

Белова Е.А.¹, Скуратов А.Г.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В настоящее время цифровизация является одним из основных векторов в поддержку четвертой промышленной революции. В статье рассмотрен процесс цифровизации деятельности Госстандарта в свете утверждения государственной программы «Цифровое развитие Беларуси», а также проанализированы принципы и подходы к его реализации.

Ключевые слова: цифровизация, цифровая трансформация, цифровые технологии, стандартизация, информатизация.

DIGITAL TRANSFORMATION IN THE STATE COMMITTEE FOR STANDARDIZATION SYSTEM. FROM AUTOMATION TO DIGITALIZATION

Belova E.¹, Skuratov A.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Institute of Standardization and Certification
Minsk, Belarus

Abstract. Currently, digitalization is one of the main vectors in support of the fourth industrial revolution. The article examines the process of digital implementation of the Gosstandart activities in the light of the approval of the state program “Digital Development of Belarus”, and also analyzes the principles and approaches to its implementation.

Key words: digitalization, digital transformation, digital technologies, standardization, informatization.

*Адрес для переписки: Белова Е.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: katu_shok@mail.ru*

Республика Беларусь определила цифровую трансформацию отраслей экономики одним из приоритетных направлений национального развития. Это свое отражение в программе социально-экономического развития республики на 2021–2025 годы. Цифровизация экономики предусматривает повсеместное применение информационных технологий, сбор, обработку и анализ большого объема данных.

Успешный полноценный переход предприятий реального сектора экономики на «цифру» требует наличия современных технических требований, стандартизованных протоколов обмена данных, максимальное количество машиночитаемых данных для их последующей обработки в системах проектирования и производства продукции.

С учетом широкого набора регулируемых сфер Госстандарт видит свое место в цифровых процессах в двух основных направлениях, во-первых, это информатизация собственных направлений регулирования, и второе, создание условий для развития цифры в стране путем формирования современных требований в стандартах.

Комплексная информатизация собственной деятельности Госстандарта осуществляется путем создания и развития комплексных информационных платформ по направлениям регулирования. Это – Система комплексного информационного обеспечения в области технического нормирования и стандартизации, Государственный информационный фонд по обеспечению

единства измерений, информационная система «Аккредитация», информационные технологии Госнадзора, Главстройэкспертизы, совокупность реестров по оценке соответствия и другие информационные продукты.

В условиях цифровой трансформации изменяются подходы к государственным стандартам. Одним из ключевых вопросов в этом направлении является сокращение сроков разработки.

В течение 2021–2025 годов Госстандартом запланированы работы по развитию цифровой платформы «Стандартизация» в составе Системы комплексного информационного обеспечения. В рамках которой будет полностью оцифрован процесс разработки стандартов от планирования до утверждения, автоматизированы процедуры рассмотрения проектов, сбора отзывов, проверки актуальности требований. Планируется в процессах стандартизации полностью исключить бумажный документооборот.

Особое место в развитии стандартизации имеет переход на машиночитаемые стандарты. Подобные проекты сегодня активно прорабатываются как на корпоративном уровне, путем создания систем управления требованиями, так и на уровне национальных органов по стандартизации.

Сегодня нужен не просто стандарт в электронном виде. Современной промышленности требуются стандарты, которые не только может прочитать специалист – это должны быть наборы

данных, из которых на уровне информационных систем могут извлекаться требования к продукции, а в отдельных случаях стандарты должны представлять собой программный код.

Также необходимо отметить тесно связанный проект – «создание цифрового профиля продукции». Это описание продукции на основе шаблонов международного универсального классификатора ECLASS. Особенность данного проекта заключается в том, что ECLASS, как способ описания продукции, объединяет требования, которые включены в международные стандарты. А международные стандарты на цифровые фабрики, проектирование продукции, электронную торговлю в свою очередь содержат ссылки именно на этот классификатор. В перспективе описанная на основе такого профиля продукция будет пониматься информационными системами проектирования, логистики, продаж во всем мире.

Основой платформы в направлении обеспечения единства измерений является Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений. В составе фонда входит ряд взаимосвязанных ресурсов – Государственный реестр национальных эталонов единиц величин, Государственный реестр средств измерений и стандартных образцов, Стандартные справочные данные, Реестр поверенных средств измерений и др.

Еще одной задачей, решаемой в рамках системы Госстандарта в настоящий момент, является цифровизация процесса аккредитации на национальном уровне.

Платформой для цифровизации аккредитации является информационная система «Аккредитация», которая предназначена для комплексной автоматизации как собственной деятельности центра аккредитации, так и непосредственно процесса аккредитации и взаимодействия с аккредитованными субъектами и техническими экспертами через систему личных кабинетов.

Надзорная деятельность Госстандарта обеспечивается комплексом информационных технологий на портале «КАЧЕСТВО.БЕЛ», где публикуется Реестр опасной продукции, запрещенной к ввозу или обращению на территории Республики Беларусь. Непосредственно реестр сформирован в формате открытых данных.

Также необходимо отметить, что результаты надзорной деятельности транслируются в официальный телеграмм-канал Госстандарта «Безопасность и качество», у которого на сегодня более 3 тыс. подписчиков и более 7 тыс. просмотров в день.

Важно отметить влияние цифровых процессов на экспертизу проектной документации. Сегодня в мире все более широкое распространение

получает информационное моделирование зданий (BIM-технологии).

С использованием инструментов BIM-технологий эксперт может комплексно рассматривать проектные решения по объекту строительства, быстрее и точнее проверить объемы работ и материалов, а соответственно и стоимость строительства, выявить коллизии строительных конструкций, сопоставить проектные решения в плоскостных чертежах и на модели, оценить отдельные элементы модели.

Что касается вопросов цифровизации оценки соответствия, то основные ресурсы в этой сфере – это реестры документов. Здесь важно отметить направления развития – во-первых, это планируемое создание реестра протоколов, испытаний, которые станут частью сертификата или декларации. Что исключит необоснованную выдачу или принятие документов. И второе, это переход на так называемую «реестровую модель», когда процедуры оценки соответствия будут заканчиваться внесением результатов в реестр, а документы на бумаге перестанут применяться. Общая координация таких работ в соответствии с подходами, которые вырабатываются на площадке ЕЭК.

Несколько слов о роли стандартизации в процессе цифровой трансформации. Здесь стоит отметить так называемый круговорот взаимодействия, когда с одной стороны стандарты стимулируют переход промышленности на «цифру», а промышленность в свою очередь требует от стандартизации перехода на оцифрованные технологии. Стандартизация для содействия цифровизации является комплексным инструментом, который создает и основополагающую техническую базу, и требования, учитывающие специфику отдельных отраслей.

Для системного проведения работ по стандартизации в цифровой сфере в июле 2018 года в республике был создан национальный технический комитет по стандартизации «Цифровая трансформация» (ТК ВУ 38) на базе НИРУП «Институт прикладных программных систем», в рамках которого в настоящее время разработаны два терминологических стандарта в сфере цифровизации.

Цифровая трансформация сфер регулирования Госстандарта направлена на создание принципиально новой модели формирования и управления техническими требованиями и оценки соответствия, обеспечение единого подхода к цифровизации технического регулирования в рамках ЕАЭС. Будут созданы условия для применения в реальном секторе экономики технических требований в виде цифровых моделей, интегрируемых в системы проектирования и управления производством, а также для обеспечения условий для применения принципиально новых инструментов цифрового контроля качества и проведения испытаний.

УДК 658.511.1

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ ПРОЦЕССОВ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА

Бережных Е.В.¹, Лось А.А.², Серенков П.С.²

¹ГП «Белорусский государственный центр аккредитации»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье обосновывается применение методологии комплексного моделирования системы менеджмента качества на этапах разработки и проектирования. Определены ключевые моменты алгоритма построения функциональной модели сети процессов системы менеджмента качества.

Ключевые слова: функциональная модель, сеть процессов, система менеджмента качества.

FUNCTIONAL MODEL OF THE PROCESS NETWORK AT THE STAGE OF DEVELOPMENT AND DESIGN OF THE QUALITY MANAGEMENT SYSTEM

Berezhnykh E.¹, Los A.², Serenkov P.²

¹Belarusian state centre for accreditation

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. This article substantiates application of the methodology of complex modeling of the quality management system at the stages of development and design. The key points of the algorithm for constructing a functional model of the network of processes of the quality management system are determined.

Key words: functional model, network of processes, quality management system.

В системном менеджменте качества признано, что ключевой для целей общего руководства качеством является представление СМК организации в виде сети процессов, определяющих его миссию. В такой интерпретации процессный и функциональный подходы суть части единого целого – комплексного процессного подхода. Наиболее обоснованным основанием классификации ситуаций применения различных представлений процесса является жизненный цикл СМК.

Базовые принципы комплексного процессного подхода позволяют предположить, что на каждом этапе жизненного цикла СМК, не смотря на различие решаемых задач, представление инженерной составляющей СМК в обязательном порядке должно включать комплекс моделей, каждая из которых представляет соответствующую функциональную управленческую подсистему.

Создание СМК, отвечающей целям в области качества, возможно путем реализации комплекса организационно – технических методов и средств (организационно – технической составляющей системы) [1].

В основе предлагаемого подхода положена методология комплексного моделирования СМК базирующийся, с одной стороны, на основополагающих принципах менеджмента качества, с другой, на принципах организационного проектирования сложных систем.

В основе алгоритма лежат четыре взаимосвязанных, последовательно создаваемых модели: функциональная модель сети процессов, модель целеполагания, модель данных о качестве, модель поддержки принятия решений.

Обеспечение универсальности и воспроизводимости предлагаемого подхода в отношении реально функционирующих СМК возможно за счет применения для всех моделей модульного подхода. Модульный подход предполагает, что каждая из моделей может быть построена как взаимоувязанный комплекс типовых модулей, в основе которых в соответствии с принципом процессного подхода лежат группы определенным образом логически взаимосвязанных и взаимодействующих процессов, образующие как минимум цикл управления «P-D-C-A».

Рассмотрим функциональную модель сети процессов на этапе разработки и проектирования СМК.

Ключевой для целей общего руководства является представление объекта в виде сети процессов, определяющих его миссию. Обеспечение «процессного управления качеством» относится к категории задач, решение которых на системном уровне предполагает разработку методологии моделирования процессов СМК. Методология включает комплекс средств: от понятийных схем, описывающих базовые подходы проектирования, до подробных описаний, руководств и т.п.

Для целей менеджмента качества, т. е. целей планирования, обеспечения, управления и улучшения процессов жизненного цикла организации с точки зрения качества, а также с учетом определенных ранее критериев корректности описания, можно считать, что основной моделью процессов СМК является функциональная модель, описывающая структуру, взаимосвязи и взаимодействия процессов [2].

Корректная модель процессов СМК в виде функциональной модели кроме основного предназначения – обеспечения прозрачности структуры деятельности в области качества – должна обеспечивать методическую, организационную и информационную основу для реализации полного цикла менеджмента качества: планирования, обеспечения, управления и улучшения как в отношении отдельного процесса, так и в отношении групп процессов и всей сети процессов. Полезность корректной модели проявляется в частности в том, что она должна обеспечивать успешное решение как внешних, так и внутренних задач организации в отношении качества, в том числе, оценку и анализ результативности и эффективности СМК, создание эффективных механизмов корректирующих и предупреждающих действий, ее постоянного улучшения.

Исследования соответствия более тридцати различных языков представления процессов сформулированным требованиям и условиям позволили в качестве концептуальной основы принять язык и методологию IDEF0[XX]. Синтаксис и семантика языка IDEF0 поддерживают ключевые требования, предъявляемые к разрабатываемому языку описания процессов для целей менеджмента качества.

Язык IDEF0, являясь техническим средством описания процессов, обеспечивает только «форму» функциональной модели. Полноценность функциональной модели (единство формы и содержания) обеспечивается методологией, которая определяет технологии и процедуры создания и интерпретации моделей. В их числе – инструменты сбора информации, создания диаграмм, процедуры анализа, циклической корректировки моделей и документирования языка IDEF0 является основной методологии функционального моделирования.

Ключевым моментом алгоритма построения функциональной модели сети процессов СМК является правило циклического чередования модулей в функциональной модели, определяющее порядок следования диаграмм – модулей в процессе их декомпозиции [2, 3]. В процессе построения модели сети процессов СМК декомпозиция функций реализуется в виде циклов чередования диаграмм-модулей (рис. 1).

Построение функциональной модели СМК представляет таким образом строгий алгоритм, что очень важно с практической точки зрения. Чередующиеся определенным образом диаграммы – модули представляют собой типовые «заготовки» карт процессов соответствующего уровня иерархии, которые должны быть доработаны в соответствии с областью деятельности организации, общей стратегической линией руководства, спецификой выпускаемой продукции, производственной культурой и т. п.

Практической реализацией описанного выше алгоритма построения функциональной модели выступает графический макет функциональной модели сети процессов инженерной составляющей СМК организации, включающий упорядоченный набор заготовок типовых карт процессов. Графический макет функциональной модели сети процессов СМК организации любого профиля, размеров, сложности деятельности может быть представлен как иерархически выстроенная конструкция циклически чередующихся типовых диаграмм.

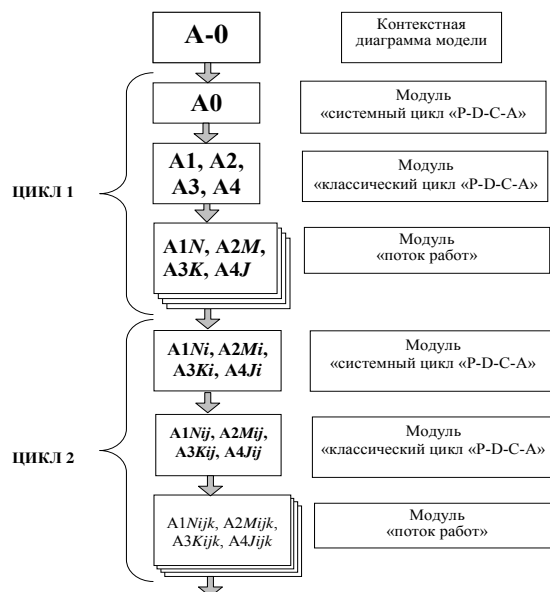


Рисунок 1 – Циклы чередования диаграмм-модулей в модели сети процессов СМК

С одной стороны, алгоритм построения и графический макет функциональной модели сети процессов значительно облегчает работу по формированию модели сети процессов СМК, отвечающей требованиям СТБ ISO 9001, т.е. позволяет гарантированно определить и увязать с процессами и ресурсами все требования к СМК, обеспечив тем самым минимизацию системных рисков, связанных с несовершенством структуры сети процессов, необходимых СМК

С другой стороны, позволяет гарантировать, что в результате будет создан комплект документов, предоставляющий объективные свидетельства того, что:

- процессы СМК идентифицированы, определены, классифицированы, корректно увязаны между собой в цикл P-D-C-A;
- определены ответственность и полномочия руководителей процессов (ответственных исполнителей) на всех уровнях иерархии;

С другой стороны, функциональная модель сети процессов, построенная в соответствии с предложенным алгоритмом, кроме того, что ре-

шает задачу определения и структурирования процессов, необходимых СМК, обладает свойством полезности для решения комплекса задач менеджмента качества в организации.

В совокупности разработку функциональной модели сети процессов СМК и трех функциональных подсистем можно представить как типовую программу реализации полного цикла менеджмента качества (организационно – технической (инженерной) деятельности в области качества).

Литература

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Процессный подход / П. С. Серенков. – Минск : Новое издание. – М. : Инфра-М., 2014. – 441 с.
2. Репин В. В. Процессный подход к управлению. Моделирование бизнес-процессов / В. В. Репин, В. Г. Елиферов. – М. : РИА «Стандарты и качество», 2004. – 408 с.
3. Серенков, П. С. Тотальное применение комплексного процессного подхода / П. С. Серенков, В. В. Назаренко, О. И. Ромбальская // Методы менеджмента качества. – 2015.

УДК 539.172.12

РАДИОНУКЛИДЫ В СМЕННЫХ ДЕТАЛЯХ КОММЕРЧЕСКИХ ЦИКЛОТРОНОВ

Бринкевич Д.И.¹, Бумай Ю.А.², Киевицкая А.И.³, Кийко А.Н.⁴

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

³«Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова» БГУ

⁴Белорусский государственный институт метрологии

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано накопление радионуклидов (РН) во входном окне водной мишени и стриппере «медицинского» 18-МэВ циклотрона Cyclone 18/9 НС для минимизации дозовых нагрузок персонала и определения условий хранения РАО. Доминирующими РН являются ⁵⁷Ni, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn и ⁵¹Cr с периодом полураспада от 1 до 312 суток. Наибольшую активность (до 6 мЗв) имела Havar фольга входного окна мишени.

Ключевые слова: циклотрон, ниобиевая мишень, стриппер, активация, радионуклиды.

RADIONUCLIDES IN REPLACEMENT PARTS OF COMMERCIAL CYCLOTRONS

Brinkevich D.¹, Bumai Y.², Kiyavitskaya H.³, Kiyko A.⁴

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

³International Sakharov Environmental Institute of BSU

⁴Belarusian State Institute of Metrology

Minsk, Belarus

Abstract. The accumulation of radionuclides (RN) in the entrance window of the water target and the stripper of the “medical” 18-MeV Cyclone 18/9 НС cyclotron was investigated to minimize the dose load of personnel and determine the conditions for storage of radioactive waste. The dominant PHs are ⁵⁷Ni, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁵⁴Mn and ⁵¹Cr with a half-life from 1 to 312 days. The Havar foil of the target entrance window had the highest activity (up to 6 mSv).

Key words: cyclotron, niobium target, stripper, activation, radionuclides.

Адрес для переписки: Бринкевич Д.И., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: brinkevich@bsu.by

В настоящее время коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ широко используются для производства медицинских и промышленных изотопов [1]. Медицинские изотопы применяются в различных отраслях медицины (нейрологии, кардиологии, онкологии т.д.) для диагностики ряда заболеваний, а также для терапии злокачественных новообразований [2].

Одна из наиболее важных проблем использования «медицинских» циклотронов связана с высокой активностью, индуцированной в компонентах циклотрона. Перечень радионуклидов (РН), образующихся в различных частях цикло-

трона, в основном определяется взаимодействием протонного пучка или вторичных нейтронов, образующихся в мишени. Эта проблема важна и связана с радиационной защитой операторов при обслуживании циклотрона, замене мишени или ее компонентов. В процессе производства технического обслуживание циклотрона с заменой его компонентов (стриппера, деталей мишени и т.д.) приходится проводить не реже 1–2 раз в год. Перед закладкой на хранение необходимо знание величин остаточной активности наиболее важных РН, присутствующих в извлеченном компоненте. Определение номенклатуры и активности

индуцированных РН важно для оценки степени облучения персонала при техническом обслуживании и для проектирования новых производств с целью обеспечения радиационной безопасности и надлежащего хранения РАО.

Активность и состав определяются условиями конкретного производства (тип циклотрона, материал входного окна и тела мишени, интенсивность и длительность облучения и т.д.). В последние годы были выполнены исследования накопления РН на различных «медицинских» циклотронах с разными типами мишеней (серебряными, титановыми и танталовыми) [3]. Однако по циклотрону Cyclone 18/9 НС ощущается недостаток информации.

Цель настоящей работы – определение активности и идентификация радионуклидов в сменных компонентах 18-МэВ циклотрона ИВА Cyclone 18/9 с помощью спектрометрии гамма-излучения высокого разрешения с детекторами HPGe для минимизации дозовых нагрузок производственного персонала и определения надлежащих условий хранения РАО.

Материалы и методы измерений. В настоящей работе исследовалось накопление РН- во входном окне водной мишени из фольги Наваг и титановой фольги, а также выводном стриппере (вилки съёмника и углеродная фольга) циклотрона Cyclone 18/9 НС. Эти детали находятся на пути протонного пучка и обычно заменяются каждые полгода, а по мере необходимости и чаще. Облучение водной ниобиевой мишени Nirta Fluog объемом 3,2 мл осуществлялось протонами с энергий 18 МэВ при ионном токе на мишени – 75–80 мкА. Время облучения мишени за один производственный цикл составляло 100–130 минут.

Идентификацию γ -излучающих радионуклидов и определение их активности выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5 – 2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал. Из-за высокой активности измерения проводили не менее, чем через двое суток после последнего облучения.

Эксперимент. Стриппер в циклотронах медицинского назначения представляет собой тонкую пленку пиролитического графита, используемую в устройствах вывода протонного пучка. В них отрицательно заряженные ионы Н⁺ теряют электроны и трансформируются в протоны вследствие чего изменяется на противоположное направление отклонения ионного пучка в магнитном поле и ионный пучок может быть легко выведен на облучаемую мишень.

После облучения величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера через 2 дня после замены была около 50 мкЗв ч⁻¹. В γ -спектрах облученного стриппера наблюдались линии радио-

нуклидов никеля ⁵⁷Ni, кобальта ⁵⁵Co, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, марганца ⁵⁴Mn и хрома ⁵¹Cr (табл.1) и низкоактивного ⁶⁵Zn. Доминирующим радионуклидом является ⁵¹Cr с периодом полураспада 27,7 суток. Указанные радионуклиды образуются в результате ядерных реакций с протонами стабильных изотопов железа (⁵⁶Fe, ⁵⁷Fe, ⁵⁸Fe), хрома (⁵²Cr, ⁵³Cr, ⁵⁴Cr) и никеля (⁵⁸Ni) [28]. Это указывает на присутствие указанных изотопов в качестве примесей в пиролитическом графите либо на попадание указанных элементов на поверхность стриппера в результате испарения из других деталей циклотрона. Радионуклидов, обусловленных взаимодействием протонов со стабильными изотопами углерода, не обнаружено, что обусловлено коротким периодом полураспада ($t_{1/2}$ до нескольких минут) указанных РН.

Отметим, что полученные нами результаты хорошо коррелируют с данными [4]. Единственное исключение составляют более низкие, чем в нашем случае значения активности ⁵¹Cr и ⁵⁷Co, что может быть обусловлено отличием в условиях облучения (мишень 2,2 мл, средний ток 32 мкА) и применением при измерении коллимационного устройства с целью сокращения мертвого времени.

Таблица 1. Активности радионуклидов в фольге стриппера через 7 дней после облучения A_n и после хранения в течение полугода A_k

РН	$t_{1/2}$, дней	A_n , кБк	A_k , кБк	Реакции
⁵¹ Cr	27,7	23	1	⁵² Cr (p,pn) ⁵¹ Cr
⁵⁴ Mn	312,3	1,2	–	⁵³ Cr (p, γ) ⁵⁴ Mn ⁵² Cr (p,n) ⁵⁴ Mn
⁵⁵ Co	0,73	1,5	–	⁵⁴ Fe (p, γ) ⁵⁵ Co ⁵⁸ Ni (p,d) ⁵⁵ Co
⁵⁶ Co	77,7	8	–	⁵⁶ Fe (p,n) ⁵⁶ Co ⁵⁷ Fe (p,2n) ⁵⁶ Co
⁵⁷ Co	271,8	3	3	⁵⁶ Fe (p, γ) ⁵⁷ Co ⁵⁷ Fe (p,n) ⁵⁷ Co
⁵⁸ Co	70,9	2,8	–	⁵⁷ Fe (p, γ) ⁵⁸ Co ⁵⁸ Fe (p,n) ⁵⁸ Co
⁵⁷ Ni	1,48	3,4	–	⁵⁸ Ni (p,pn) ⁵⁷ Ni

После хранения в течение полугода величина мощности дозы на расстоянии 10 см от стриппера снижается до значений < 1 мкЗв ч⁻¹ и он может выведен из состава РАО. При этом в γ -спектрах наблюдались линии ⁵⁷Co, ⁵¹Cr и ⁶⁵Zn с активностью близкой к пределу детектирования.

Свежеоблученные детали входного окна мишени (Наваг-фольга и титановое окно) имеют высокую удельную активность. Так по данным [4] значение мощности дозы, измеренное ионизационной камерой TOL/F, на расстоянии 10 см от фольги Наваг составляла около 6 мЗв /ч примерно через 25 дней после последнего облучения (41 мкЗв / ч на расстоянии 1 м).

Наибольший вклад в активность вносят радионуклиды с периодом полураспада около 70 дней. Это означает, что через ~ 2 года (10 периодов полураспада), общая активность будет снижена до значений близких к 1 мкЗв ч^{-1} и может быть рассмотрен вопрос вывода указанных компонент мишени из состава РАО.

Литература

1. Папаш, А. И. Коммерческие циклотроны Ч. 1: Коммерческие циклотроны в диапазоне энергий от 10 до 30 МэВ для производства изотопов. / А.И.Папаш, Ю.Г.Аленицкий // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2008. – Т. 39, № 4. – С. 1150–1214.

2. Позитронно-эмиссионная томография Ч. 1: Характеристика метода. Получение радиофармпрепаратов / С. Д. Бринкевич [и др.] // Медико-биологические проблемы жизнедеятельности. – 2013. – № 2. – С. 129–137.

3. Brinkevich, S. D. Activation Radionuclides in the Process of Irradiation of a Niobium Target at the Cyclone 18/9 HC Cyclotron / S. D. Brinkevich, D. I. Brinkevich, A. N. Kiyko // Physics of Atomic Nuclei. – 2020. – Vol. 83, № 12. – P. 1732–1737.

4. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron / P. Guarino [et al.] // Cyclotrons and Their Applications–2007 : 18-th Int. Conf. Giardini Naxos, Italy. – P. 295–297.

УДК 535.241

КАЛИБРОВКА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ КОМПАРАТОРОМ SOLAR M150 Бручковский И.И., Гуляева С.И., Литвинович Г.С.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена методика калибровки фотометрической сферы компаратором SOLAR M150, позволяющая скорректировать неточность установки длины волны компаратором, путем регистрации спектров линейчатого источника в каждом положении дифракционной решетки.

Ключевые слова: фотометрическая сфера, калибровка, SOLAR M150.

SPECTRAL RADIANCE CALIBRATION OF PHOTOMETRIC SPHERE WITH THE SOLAR M150 COMPARATOR

Bruchkouski I., Guliaeva S., Litvinovich H.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents a procedure of photometric sphere calibration with a SOLAR M150 comparator, which allows to correct the inaccuracy of setting the wavelength by the comparator by registering line spectrum at each position of the diffraction grating.

Key words: photometric sphere, calibration, SOLAR M150.

Адрес для переписки: Литвинович Г.С., НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220045, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: litvinovichgs@yandex.by

Фотометрическая сфера (ФС) [1] предназначена для создания диффузного излучения сплошного спектра в диапазоне длин волн от 0,35 до 2,5 мкм. Источником излучения выступают шесть галогенных ламп накаливания мощностью 250 Вт.

Для калибровки ФС по СПЭЯ применяются:

- Рабочий эталон (РЭ) – фотометрическая сфера с известным СПЭЯ;
- Компаратор SOLAR M150;
- Поворотная платформа Standa 8MR190-90-59;
- Газоразрядные лампы Oriel (#6033, #6030, #6035, #6031) [4] и диффузный отражатель.

Компаратор одновременно регистрирует спектральный диапазон шириной от 120 до 250 нм в зависимости от выбранной решетки.

Поскольку компаратор SOLAR M150 содержит в своем составе подвижную турель с дифракционными решетками, то для исключения ошибки установки длины волны, связанной с неточностью позиционирования турели, необхо-

димо в ходе каждого измерения контролировать правильность калибровки по длинам волн и при необходимости корректировать. Для обеспечения заполнения апертуры компаратора излучением линейчатого спектра, применяемые газоразрядные лампы (Hg, Ar, Na, Kr) устанавливаются в диффузный отражатель. Применение такого подхода позволяет значительно снизить ошибку определения калибруемой длины волны. Схема установки представлена на рис. 1.

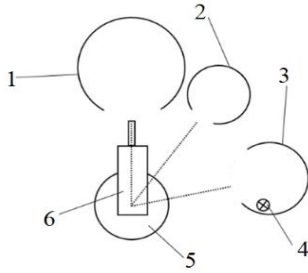
Компаратор имеет встроенную шторку для перекрытия светового пучка, что позволяет снимать темновой сигнал автоматически.

Упрощенно схему измерений можно представить следующим образом:

1. Измерение темнового $\bar{V}(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{ТЕМН}}$ и полезного $V(\lambda)_{\text{ФС}}^{\text{СИГН}}$ сигналов от ФС.

2. Измерение темнового $\bar{V}(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{ТЕМН}}$ и полезного $V(\lambda)_{\text{РЭ}}^{\text{СИГН}}$ сигналов от РЭ.

3. Регистрация спектра излучения линейчатого источника. Источник подбирается в зависимости от регистрируемого диапазона.



1 – ФС; 2 – РЭ СПЭЯ; 3 – диффузный отражатель; 4 – лампа линейчатого спектра; 5 – поворотная платформа; 6 – компаратор

Рисунок 1 – Схема компарирования излучения от ФС и РЭ при помощи поворотной платформы

После регистрации всех спектров при заданном положении турели, производится калибровка каждого состояния компаратора по длинам волн, т.е. ставится в соответствие номер канала длине волны. При этом используется линейная аппроксимация зависимости для остальных каналов. Для повышения точности привязки компаратора по длинам волн желательно зарегистрировать не менее 3 линий излучения для каждого положения дифракционной решетки компаратора.

Итоговая СПЭЯ фотометрической сферы рассчитывается по формуле

$$L^{\Phi C}(\lambda) = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (1)$$

где $L^{PЭ}(\lambda)$ – известные значения СПЭЯ РЭ.

Квадрат стандартной неопределенности искомой величины равен

$$u_c^2(L^{\Phi C}, \lambda) = C_1^2 \cdot u_1^2 + C_2^2 \cdot (u_2^2 + u_6^2) + C_3^2 \cdot (u_3^2 + u_6^2) + C_4^2 \cdot (u_4^2 + u_6^2) + C_5^2 \cdot (u_5^2 + u_6^2), \quad (2)$$

где $u_1 = u(L^{PЭ}(\lambda))$ – стандартная неопределенность СПЭЯ РЭ комплекса на длине волны λ , Вт/(м³·ср); $u_2 = u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})$ – стандартная неопределенность значений сигнала, регистрируемого компаратором от ФС, единица АЦП; $u_3 = u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})$ – стандартная неопределенность значений сигнала, регистрируемого компаратором, от РЭ, единица АЦП; $u_4 = u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})$ – стандартная неопределенность значений темного сигнала, регистрируемого компаратором от ФС, единица АЦП; $u_5 = u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})$ – стандартная неопределенность значений темного сигнала, регистрируемого компаратором от РЭ, единица АЦП; u_6 – стандартная неопределенность оцифровки регистрируемого сигнала; n – количество измерений; C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 – коэф-

фициенты чувствительности (частные производные в (1)) рассчитываются следующим образом:

$$C_1 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(L^{PЭ}(\lambda))} = \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (3)$$

$$C_2 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})} = \frac{L^{PЭ}(\lambda)}{V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}}, \quad (4)$$

$$C_3 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})} = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН} - V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН}}{(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}, \quad (5)$$

$$C_4 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})} = \frac{L^{PЭ}(\lambda)}{\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{СИГН}}, \quad (6)$$

$$C_5 = \frac{\partial(L^{\Phi C}(\lambda))}{\partial(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})} = L^{PЭ}(\lambda) \cdot \frac{V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}}{(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}. \quad (7)$$

Стандартные неопределенности регистрируемых сигналов рассчитываются по формулам:

$$u_2 = u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{\Phi C}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})^2}, \quad (8)$$

$$u_3 = u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{PЭ}^{СИГН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})^2}, \quad (9)$$

$$u_4 = u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{\Phi C}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})^2}, \quad (10)$$

$$u_5 = u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (V(\lambda, i)_{PЭ}^{ТЕМН} - \bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})^2}, \quad (11)$$

$$u_6 = 0,29. \quad (12)$$

Вклад каждого слагаемого формулы (2) в суммарную стандартную неопределенность представлен в табл. 2.

Таблица 2. Бюджет неопределенностей калибровки ФС для третьей градации яркости

λ , нм		350	950	2000
Стандартная неопределенности, %	$u_c(L^{\Phi C}, \lambda)$	3,00	1,25	3,89
Процентный вклад в стандартную неопределенность, %	$u(L^{PЭ}(\lambda))$	99,69	99,54	26,40
	$u(V(\lambda)_{\Phi C}^{СИГН})$	0,17	0,36	4,05
	$u(V(\lambda)_{PЭ}^{СИГН})$	0,10	0,09	0,28
	$u(\bar{V}(\lambda)_{\Phi C}^{ТЕМН})$	0,02	0,01	34,64
	$u(\bar{V}(\lambda)_{PЭ}^{ТЕМН})$	0,02	0,01	34,64

Из табл. 2 видно, что наибольший вклад в стандартную неопределенность в области до 1000 нм вносит неопределенность СПЭЯ рабочего эталона, а собственный шум компаратора составляет лишь малую часть. В то же время в ИК области (1000–2500 нм) шум детектора начинает превалировать, что указывает на неоптимальный режим работы.

Представленные данные показывают, что точность измерительного оборудования в видимой области спектра выше точности используемого эталона. Однако даже первичные эталоны [3] имеют расширенную неопределенность порядка 1 %, что делает невозможным удовлетворение требований метрологического обеспечения о более высокой точности эталона.

Предложенная методика позволяет уменьшить неопределенность измерений СПЭЯ, вызванную особенностями конструкции компаратора и его неточной привязкой по длинам волн, лишь незначительно увеличивая объем измерений.

Литература

1. Метрологический комплекс для аттестации спектрометрической и видеоспектральной аппаратуры «Камелия-М» / Беляев Б. И. [и др.] // Приборы для научных исследований : каталог приборов, комплексов, установок, разработанных по ГКНТ «Приборы для научных исследований» ; под. ред. акад. В. С. Буракова. – Минск, 2006. – С. 13–16.

2. Калибровочные лампы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.newport.com/f/pencil-style-calibration-lamps/>. – Дата доступа: 01.10.2021.

3. Государственный первичный эталон единиц радиометрических и спектрометрических величин в диапазоне длин волн от 0,2 до 25,0 мкм (ГЭТ 86-2017) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.vniiofi.ru/depart/m4/get86-2017.html>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 621.317.7; 51-74; 519.816

ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА МОДУЛЬНОМ ПРИНЦИПЕ

Воронова Т.С.¹, Серенков П.С.¹, Ермак А.О.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены проблемы проектирования и разработки технологии изготовления сложных электронных устройств, предложен алгоритм выбора компонентов на стадии проектирования, основанный на использовании методов экспертного оценивания. Обоснована необходимость создания сложной специализированной экспертной системы с интегрированной базой готовых конструктивных решений компонентов.

Ключевые слова: микроэлектроника, проектирование, экспертная система, экспертные методы, метод альтернатив.

EXPERT EVALUATION AS A TOOL FOR SUPPORTING DECISION-MAKING IN THE PROCESS OF DESIGNING COMPLEX ELECTRONIC SYSTEMS BASED ON A MODULAR PRINCIPLE

Voronova T.¹, Serenkov P.¹, Ermak A.²

¹Belarusian National Technical University

²United Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The problems of designing and developing the technology for manufacturing complex electronic devices are considered, an algorithm of selecting components at the design stage, based on the use of expert evaluation methods, is proposed. The necessity of creating a complex specialized expert system with an integrated base of ready-made design solutions for components has been substantiated.

Key words: microelectronics, design, expert system, expert methods, method of alternatives.

Адрес для переписки: Воронова Т.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: voronovats@bntu.by

Процесс проектирования и разработки технологии изготовления сложных электронных устройств представляет собой емкую многоэтапную задачу, результат которой во многом определяется решениями, принятыми на различных стадиях реализации. Часть таких решений принимается разработчиком в условиях полной неопределенности, и часто основано лишь на субъективном опыте разработчика и его компетентности в определенной

области, что не позволяет судить о рациональности и эффективности принятого решения.

Задачей данного исследования являлось повышение качества процесса проектирования и разработки сложных электронных устройств с помощью применения экспертных методов оценки для поддержки решений, принимаемых на различных этапах процесса, а также снижение нагрузки по принятию решений на проектиров-

щика за счет применения специализированной экспертной системы.

В данной работе рассмотрен этап решения задачи, включающий в себя обоснованный выбор составляющих компонентов технически сложных устройств.

Было предложено решение задачи проектирования и разработки разбить на несколько последовательных этапов в предположении, что тип и целевое назначение устройства изначально определены:

– этап 1, заключающийся в установлении рациональной совокупности целевых свойств, которые характеризуют конечное изделие и их ранжирование по степени значимости в отношении решаемой задачи;

– этап 2, заключающийся в членении конструкции устройства на отдельные конструкционные модули;

– этап 3, заключающийся в определении комплекса показателей, в достаточной мере характеризующих заданный модуль, установлении допустимых диапазонов численных характеристик показателей относительно выявленным на этапе 1 свойствам;

– этап 4, заключающийся в выборе подходящего конструкционного решения модуля из множества существующих готовых вариантов исполнения, либо принятие решения о необходимости разработки оригинальной конструкции.

Этап 1. На начальной стадии разработки сложного устройства имеющаяся информация часто ограничивается лишь типом изделия и его целевым назначением, поэтому первой задачей, требующей решения, является выделение рациональной совокупности целевых свойств, характеризующих готовое устройство. Эта задача в своем решении имеет две подзадачи: выявление максимально полной совокупности целевых свойств и выделение из выявленной этой совокупности подмножества наиболее значимых (влияющих). Для решения обеих выявленных подзадач авторы предлагают использовать оригинальные экспертные методы оценивания [1–3].

Мировой опыт управления качеством предлагает большой набор специальных технологий экспертного оценивания для задачи по установлению множества свойств, определяющих изделие [4–6]. Очевидно, что результативность действий исследовательской группы при решении первой подзадачи зависит, прежде всего, от уровня квалификации и опыта экспертов. Это наиболее «слабое звено» предлагаемой стратегии в силу абсолютно субъективного характера экспертных оценок (мнений).

Процедура определения необходимого и достаточного комплекса свойств, в свою очередь, требует реализации алгоритма ранжирования выявленных свойств и оценивания их приори-

тетности. Учитывая высокие риски некорректного решения в данной ситуации, авторами предложено применить для решения второй подзадачи оригинальный «метод альтернатив» [3, 4].

Этап 2 представляет собой решение тривиальной конструкторской задачи, результат которой напрямую зависит от квалификации разработчика и его опыта в данной сфере. Если у специалиста возникают сложности с выбором глубины членения изделия на отдельные элементы – модули, или в случае иной необходимости, на данном этапе возможно подключение к работе группы разработчиков, либо использование мнения экспертов-консультантов в смежных областях.

Этап 3 также представляет собой решение комплексной задачи – для каждого выделенного единичного конструкционного модуля необходимо определить комплекс показателей, в достаточной мере его характеризующих, после чего требуется установить допустимые диапазоны числовых характеристик показателей, либо установить иные критерии, если выявленное свойство не является количественным.

Предлагаемый авторами алгоритм решения первой части задачи аналогичен описанному для этапа 1 – группой экспертов производится выявление некоторого множества показателей, которые традиционно или применительно к решаемой задаче характеризуют отдельный конструкционный модуль, после чего, с использованием «метода альтернатив», происходит ранжирование и количественная оценка показателей с последующим выделением подмножества наиболее значимых.

Вторая часть решаемой задачи на этапе 3, заключающаяся в установлении количественных и качественных характеристик определенного комплекса свойств, должна решаться с учетом целевых свойств готового изделия, определенных на первом этапе. Существует множество способов решения данной задачи, выбор которых обусловлен и сложностью исследуемой характеристики, и возможной корреляционной зависимостью между некоторыми характеристиками комплекса.

Этап 4 представляет собой задачу выбора подходящего конструкционного решения единичного модуля, опираясь на определенный на предыдущем этапе комплекс свойств и их количественных и качественных характеристик. В первую очередь поиск подходящего варианта, удовлетворяющего комплексу показателей, производится среди готовых существующих решений, что позволяет повысить унификацию и ремонтпригодность готового изделия и снизить временные и материальные затраты на его изготовление. Если подходящего готового решения не найдено – принимается решение о создании уникальной конструкции рассматриваемого модуля с установленным комплексом свойств, либо частичная модернизация существующего готового решения.

Безусловно, результативность поиска существующего готового решения напрямую зависит от квалификации, осведомленности и практического опыта разработчика. Для снижения влияния субъективной составляющей на поиск решения авторами предлагается создание постоянно обновляемой единой международной базы готовых конструктивных решений модулей и интегрирование ее в специализированную экспертную систему.

Литература

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации / П. С. Серенков [и др.]. – Минск, 2012. – 243 с.

2. Подиновский, В. В. О некорректности метода анализа иерархий / В. В. Подиновский, О. В. Подиновская // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – С. 8–13.
 3. Серенков, П. С. Системный подход к качеству физкультурно-оздоровительных услуг / П. С. Серенков, А. С. Хорлоогийн // Стандарты и качество. – 2017. – № 10. – С. 98–101.
 4. Методы менеджмента качества. Методология управления риском стандартизации / П.С. Серенков [и др.]. –Минск, 2012. – 243 с.
 5. Окрепилов, В.В. Менеджмент качества / В.В. Окрепилов. – СПб.: Наука, 2003. – 992 с.
 6. Альтшуллер, Г. С. Найти идею. Введение в теорию решения изобретательских задач. – Изд. 3-е, дополненное / Г. С. Альтшуллер. – Петрозаводск : Скандинавия, 2003. – 240 с.

УДК 621

ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКЕ

Гавриленкова Е.В.

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Изменить образ мышления для существования в экономике замкнутого цикла. После истечения срока пользования товарами мы можем принять культуру возврата и обновления, в которой продукты и компоненты предназначены для разборки и восстановления.

Ключевые слова: замкнутый, цикл, переработка, ремонт.

PROVIDING A SYSTEMS APPROACH IN A CIRCULAR ECONOMY

Gavrilenkova E.

*Belarusian National Technical University
 Minsk, Belarus*

Annotation. Change the way of thinking to exist in a circular economy. After expiration, we can adopt a return and product culture in which products are designed to be disassembled and refurbished.

Key words: closed, cycle, processing, repair.

В настоящее время общество склонно к линейному подходу в экономике: мы добываем, создаем и выбрасываем.

Только изменив образ мышления можно существовать в экономике замкнутого цикла. В этом случае после истечения срока пользования товарами мы можем принять культуру возврата и обновления, в которой продукты и компоненты предназначены для разборки и восстановления.

Понятие циркулярной экономики относится ко всему жизненному циклу продукции, компонентов и материалов. Центральную роль здесь играет система обращения с отходами, поскольку в циркулярной экономике отходов следует избегать.

Для того, чтобы наглядно представить выводы о текущей ситуации в Беларуси я воспользуюсь инструментом менеджмента SWOT-анализом.

Кратко опишу переработку пластмасс.

Термопласты – это пластичный полимер, который становится мягким при нагревании и

твердым при охлаждении, повторять такой процесс можно не один раз.

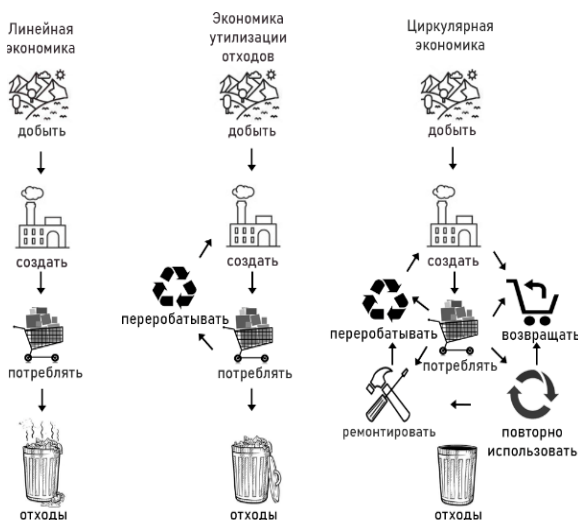


Рисунок 1 – Концепции

Таблица 1. SWOT-анализ

Сильные стороны
Возможности
1. Улучшение качества и технического уровня продукции
2. улучшение качества жизни
3. Уменьшение затрат на добычу новых природных ресурсов
4. Уменьшение количества полигонов
5. Продление жизненного цикла продукции
Преимущества
1. Создание новых рабочих мест для работников как с низким, так и с высоким уровнем квалификации
2. Ужесточение требований к продукции
2. Наличие складских помещений
3. Конкуренция с привычной продукцией
4. Таможенные барьеры
Слабые стороны
Угрозы
1. Рыночный барьер
2. Скептицизм общества
3. Нет созданных замкнутых циклов
4. Не решен вопрос с упаковкой продукции
5. Нет учета отходов по виду и сфере происхождения
6. Первоначальные затраты
Недостатки
1. Недостаточно знаний и опыта
2. Нет нормы по длительности срока службы и ремонтпригодности
3. Нет общего пути внедрения

Термопласты делятся на дополнительные подкатегории в зависимости от их структуры и свойств, и их можно узнать по названию или номеру, который обычно должен быть напечатан или тиснен на изделиях.



Рисунок 2 – Маркировка ПЭТ



Рисунок 3 – Маркировка полиэтилена высокой плотности

ПЭТ – это очень прочный пластик, который легко узнать по его прозрачному виду – из ПЭТ изготавливаются все бутылки для воды и газировки. В последнее время из ПЭТ производят пряжу и одежду.

Свойства: легкий, ударопрочный, жесткий / полужесткий.

Плюсы: прочный и жесткий, водоокисный барьер, хорошие электрические свойства.

Минусы: высокая усадка формы, тепловая деградация, вредные испарения.

Безопасность: средняя.

HDPE часто используется для изготовления контейнеров для еды и напитков, бутылок для шампуня.

Свойство: инертный, термостойкий, прочный и с высокой прочностью на разрыв.

Плюсы: дешево, высокая химическая стойкость, электрические свойства, восковое покрытие, хорошее трение.

Минусы: менее жесткий, чем полипропилен, легко сжигается, плохая стойкость к ультрафиолетовому излучению, высокая усадка формы.

Безопасность: хорошая.



Рисунок 4 – Маркировка полипропилена

PP имеет множество применений.

Свойства: прочный, выдерживает высокие температуры.

Плюсы: прочный, высокая температура плавления и меньшая плотность.

Минусы: высокая стоимость, хрупкость при температуре ниже 0 °C, высокая газопроницаемость, плохая устойчивость к топливу, плохая стойкость к ультрафиолетовому излучению, не горит.

Безопасность: хорошая. Пластик можно переработать не один раз и стружка, образованная после обработки изделия, может использоваться повторно.

Литература

- [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://target99.by/info.php>. – Дата доступа: 01.10.2021.
- Бельская, Е. Н. Методика расчета экологических рисков / Е. Н. Бельская, О. В. Бразговка, Е. В. Сугак // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6.
- [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15755>. – Дата доступа: 01.10.2021.
- [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belta.by/society/view/chislo-mini-poligonov-dlja-tko-v-belarusi-za-pjat-let-umenshilos-bolee-chem-v-25-raza-415212-2020>. – Дата доступа: 01.10.2021.
- [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/v-belarusi-v-2020-godu-sbor-vmr-uvlechilsja-na-32-435177-2021>. – Дата доступа: 01.10.2021.
- [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://ibb-d.by/wp-content/uploads/2020/02/SWOT-analys_ce.pdf. – Дата доступа: 01.10.2021.
- Müller, A. Bestandsaufnahme für die erfolgreiche Planung und Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft in Belarus. Eine Analyse von Stärken und Schwächen sowie von Chancen und Risiken im Gebiet Brest. Angefertigt vom Wuppertal Institut im Auftrag der Deutschen Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). – Berlin, 2019.

УДК 658.5

ВНЕДРЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ

Гавриленкова Е.В., Ленкевич О.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Применение концепции бережливого производства позволяет снизить производственные затраты организации в несколько раз, при этом переход на концепцию и внедрение принципов бережливого производства не требует серьезных материальных вложений. С другой стороны, реализация требований к системе экологического менеджмента согласно СТБ ISO 14001 порой являются ограничением по внедрению бережливого производства. Для решения выявленных противоречий необходим разумный компромисс. В статье предлагается рассматривать рециклинг как часть систем бережливого производства и экологического менеджмента и компромисс между системами.

Ключевые слова: бережливое производство, экологический менеджмент, рециклинг, циркуляционная экономика.

INTRODUCTION OF THE CONCEPT OF LEAN PRODUCTION TAKING INTO ACCOUNT ENVIRONMENTAL ASPECTS

Gavrilenkova E., Lenkevich O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The application of the lean production concept allows to reduce the production costs of the organization several times, while the transition to the concept and implementation of the principles of lean production does not require serious material investments. On the other hand, the implementation of requirements to the environmental management system according to STB ISO 14001 is sometimes a limitation on the introduction of lean manufacturing. A reasonable compromise is needed to resolve the identified contradictions. The article proposes to consider recycling as part of lean manufacturing and environmental management systems and a compromise between the systems.

Key words: lean manufacturing, environmental management, recycling, circulation economy.

Управление организацией на основе принципов бережливого производства (lean production) заключается не просто в улучшении сложившихся стилей управления и организации бизнес-процессов, а во внедрении и развитии иной культуры организации, принципиально другого стиля менеджмента, нового мышления не только среди руководителей, но и работников предприятия. Концепция бережливого производства базируется на понятии «муда» (японское слово) – потери, отходы. Примерами муды могут быть – выполнение лишних действий, простой производства, не рациональное движение объектов, перепроизводство, выпуск продукции, не отвечающей требованиям потребителей. Фактически концепция направлена на снижение затрат и повышение конкурентоспособности предприятия. Несмотря на то, что на сегодняшний день в Республике Беларусь отсутствуют рекомендации по комплексному подходу к внедрению принципов lean production, существует ряд предприятий, успешно использующих концепцию в своей практической деятельности. Например, такие гиганты как БелАЗ, «Белкомунмаш», Минский моторный завод, «Радиоволна» (производство комплектующих для автотракторной техники), предприятия малого и среднего бизнеса [1].

В тоже время перед мировым сообществом все острее стоят вопросы экологической безопасности. В настоящее время производители склоняются к линейному подходу в производстве, даже и применяя концепцию lean production: мы добываем, создаем и выбрасываем. Для обеспечения устойчивого развития предприятия необходимо такое достижение удовлетворенности потребителей, которое при дальнейшем развитии своего бизнеса не оказывает негативного влияния на возможность будущего поколения удовлетворять свои потребности. Производителю важно помнить о охране окружающей среды, о минимизации экологических рисков. Экологический риск – вероятность возникновения отрицательных изменений в окружающей среде или отдаленных неблагоприятных последствий этих изменений, возникающих вследствие негативного воздействия на окружающую среду [2]. Эти риски могут быть вызваны чрезвычайными ситуациями природного, антропогенного и техногенного характера. Даже, если производство не относится к вредным всегда существует риск косвенного экологического ущерба, например, выбросы приводят к нарушению климатического баланса, ухудшению качества природных ресурсов, гибели и уменьшению численности зверей и птиц. А тонны отходов

после употребления продукции приводит к загрязнению мест отдыха, возникновению полигонов с мусором. Захоронение мусора также несет опасность для окружающей среды и здоровья. Отходы выделяют токсичные вещества, которые попадают в почву, в грунтовую воду. Все это потом мы вдыхаем и употребляем с пищей. Только изменив образ мышления, «прочувствовав» необходимость переработки и утилизации отходов можно существовать в экономике будущего – экономике замкнутого цикла. В этом случае после истечения срока пользования товарами мы можем принять культуру рециклинга, в которой продукты и компоненты могут быть после употребления разобраны, переработаны и восстановлены для повторного использования.

Предприятия использующие у себя принципы бережливого производства и принимающие подходы для защиты окружающей среды должны в своей деятельности не забывать о требованиях к экологическому менеджменту согласно СТБ ISO 14001 [3]. Иногда система экологического менеджмента является ограничением по внедрению концепции бережливого производства. Ведь стремление смягчить неблагоприятные воздействия от вредных выбросов, желание использования экологически чистого материала, обязательства по защите окружающей среды порой наоборот приводит к увеличению затрат на производство.

Внедряя требования системы экологического менеджмента в свои бизнес-процессы, например, маркетинг, проектирование, закупки, организация должны учитывать свои финансовые, технологические, культурные, социальные возможности и оценивать возможность использования «разумного» рециклинга.

Система экологического менеджмента и рециклинг приветствует переделку списанной мебели, например, в оригинальные полки или скамейки. А бережливое производство будет нацелено на то, чтобы заменить стеклянные стаканы в столовой на пластиковые, что приведет к меньшему бою, отпадает необходимости дезинфицировать посуду. Набирающие обороты производства и эксплуатации электромобилей во всем мире, с одной стороны, заботится о экологии, о уменьшении вредных выбросов в атмосферу, а с другой стороны, остро стоит вопрос утилизации и переработки аккумуляторных батарей.

Для определения масштабов проблемы мы воспользовались SWOT анализом. Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. SWOT-анализ

	Возможности	Угрозы
Внешняя среда	Улучшение качества и технического уровня продукции. Улучшение качества жизни. Уменьшение затрат на добычу новых природных ресурсов. Уменьшение количества полигонов. Продление жизненного цикла продукции	Рыночный барьер Скептицизм общества. Нет созданных замкнутых циклов Не решен вопрос с упаковкой продукции. Нет учета отходов по виду и сфере происхождения. Первоначальные затраты
	Преимущества	Недостатки
Внутренняя среда	Создание новых рабочих мест для работников с разным уровнем квалификации. Ужесточение требований к продукции Наличие складских помещений. Конкуренция с привычной продукцией. Таможенные барьеры	Недостаточно знаний и опыта. Нет нормы по длительности срока службы и ремонтпригодности. Нет общего пути внедрения

Выход из сложившейся ситуации видится нам в системном подходе при реализации подходов бережливого производства и систем экологического менеджмента, который может быть применен на конкретном предприятии.

Благодарности. Работа выполняется в рамках исследований по дипломному проекту специальности 1 – 54 01 01 - 01 «Метрология, стандартизация и сертификация» (машиностроение и приборостроение).

Литература

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.belta.by/society/view/chislo-mini-poligonov-dlja-tko-v-belarusi-za-pjat-let-umenshilos-bolee-chem-v-25-raza-415212-2020>. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Экологический_риск. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. Системы управления (менеджмента) окружающей среды. Требования и руководство по применению : СТБ ISO 14001-2017. – 2017.

УДК 532.135; 537.622; 546.05

ФЕРРИМАГНИТНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
Гайдук Ю.С.¹, Коробко Е.В.², Журавский Н.А.², Усенко А.Е.¹, Свито И.А.¹, Паньков В.В.¹¹Белорусский государственный университет
²ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Синтезирован ряд ферритов со структурой шпинели и магнетоплюмита. Порошки исследованы методами рентгенофазового анализа, сканирующей электронной микроскопии, ИК-спектроскопии и магнитометрии. Исследованные материалы обладают высоким напряжением сдвига в суспензиях (~2500–3500 Па при 600 мТл), и могут быть использованы в качестве функционального наполнителя магнитореологических материалов.

Ключевые слова: феррит кобальта, феррит кобальта-цинка, магнитореологические материалы.

FERRIMAGNETIC FILLERS FOR MAGNETORHEOLOGICAL MATERIALSHaiduk Y.¹, Korobko E.², Kotsikau D.¹, Svito I.¹,
Usenka A.¹, Pankov V.¹¹Belarusian State University
²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. A number of spinel and magnetoplumite ferrites have been synthesized. The powders were investigated by X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, IR spectroscopy, and magnetometry. The investigated materials have a high shear stress in suspensions (~2500–3500 Pa at 600 mT), and can be used as a functional filler of magnetorheological materials.

Key words: cobalt ferrite, cobalt-zinc ferrite, magnetorheological materials.

Адрес для переписки: Гайдук Ю.С., ул. Ленинградская, 14-414, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: HaidukYS@bsu.by

Дисперсные ферримагнитные материалы широко применяются для создания управляемых магнитореологических жидкостей (МРЖ) как в качестве основного наполнителя, так и в дополнительном использовании различных функциональных добавок. Магнитные свойства порошков, которые могут быть компонентами таких жидкотекучих композиций, определяются химическим составом, типом кристаллической решетки, степенью ее дефектности, размером и формой частиц, морфологией, взаимодействием частиц между собой и с окружающей жидкостью [1, 2].

Методика эксперимента. Методом соосаждения с последующим обжигом на воздухе при 740 °С (8 ч) синтезированы образцы CoFe_2O_4 (1) и $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2). Образец 3 ($\text{Mn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{Fe}_2\text{O}_4$) получен методом соосаждения с последующим обжигом в аргоне (740 °С, 8 ч). Образец 4 ($\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$) получен соосаждением с последующим обжигом на воздухе при 960 °С (3 ч), образец 5 ($\text{BaFe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$) – цитратным золь-гель методом с последующим обжигом на воздухе при 1000 °С (3 ч). Рентгенографические исследования проводили на дифрактометре ДРОН-3 ($\text{CoK}\alpha_1$ -излучение, $\lambda = 0,179026$ нм). Микроструктуру образцов изучали при помощи сканирующего электронного микроскопа LEO 1420. Магнитные измерения проводились на установке Cryogen Free Measurement System Cryogenic Ltd.

Зависимость напряжения сдвига (τ) суспензий (связующее Mobil 22) от величины магнитной индукции приложенного магнитного поля измеряли в режиме скоростей сдвига $\dot{\gamma} = 2, 8, 33 \text{ c}^{-1}$ при температуре $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обсуждение результатов. В таблице 1 приведены средние размеры частиц, оцененные по данным электронной микроскопии, и магнитные характеристики порошков. Данные РФА-анализа подтверждают формирование шпинельной структуры ферритов (пространственная группа $\text{Fd}\bar{3}m$) для образцов 1–3 и гексагональной структуры типа магнетоплюмита для образцов 4, 5. Образцы 1, 2 однофазные, в образцах 3–5 имелись рефлексы посторонних фаз.

Таблица 1. Размер и магнитные характеристики исследованных образцов, D – размер частиц, M_s – удельная намагниченность насыщения, H_c – коэрцитивная сила

Образец	Форма частиц	D , мкм	M_s , Ам ² кг ⁻¹ , 300 К	H_c , кОе, 300 К
(1)	неправильная	0,08–8,0	73,2	0,27
(2)	неправильная	0,25–20,0	97,9	0,4
(3)	неправильная	0,15–21,0	74,26	0,16
(4)	неправильная	0,15–3,0	42,4	4,4
(5)	пластинчатая	0,3–3,0	20,4	5,0

С целью эффективного использования комплекса компонентов в составе МРЖ обычно ставится задача получения частиц наполнителя с наиболее высокой намагниченностью насыще-

ния и небольшим значением коэрцитивной силы. Величина намагниченности насыщения зависит от размера частиц, и для наночастиц имеет меньшие значения, чем для микронных частиц. Величина сопротивления сдвигу суспензии при заданном магнитном поле тем выше, чем выше намагниченность и фактор формы (анизотропность) частиц. Увеличение среднего размера частиц образцов 2 и 3 (см. таблицу), по сравнению с ранее исследованными порошками того же состава, но меньшим размером частиц [2], приводят к снижению вклада приповерхностного слоя в величину удельной намагниченности. В результате, намагниченность частиц образцов 2 и 3 оказывается выше, и, как следствие, наблюдаются более высокие значения сопротивления сдвигу. На рис. 1 представлено СЭМ-изображение порошка образца 5, частицы которого имеют пластинчатую форму.

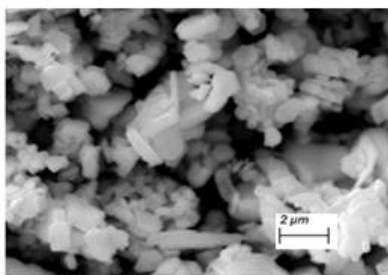


Рисунок 1 – СЭМ-изображение $\text{BaFe}_{10}\text{Al}_2\text{O}_{19}$ (образец 5)

Из рис. 2 видно, что напряжение сдвига магнитореологической суспензии, изготовленной на основе CoFe_2O_4 при $B = 625$ мТл (1), составляет ~ 2200 Па, суспензии, изготовленной на основе порошка $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2) – ~ 2660 Па, а суспензии, изготовленной на основе порошка $\text{Mn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{O}_4$ (3) – ~ 3500 Па. При этом напряжение сдвига суспензии на основе порошка $\text{Mn}_{0,3}\text{Fe}_{2,7}\text{O}_4$ со средним размером частиц $0,1 - 50$ мкм, полученного методом соосаждения без последующей термообработки, составило всего ~ 300 Па, при удельной намагниченности $M_s = 63 \text{ Ам}^2\text{кг}^{-1}$ [2]. Аналогично для порошка $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$ (2, рис. 2) величина напряжения сдвига составила более 2500 Па. Это значение превышает напряжение сопротивления сдвига суспензии, полученной на основе порошка $\text{Co}_{0,65}\text{Zn}_{0,35}\text{Fe}_2\text{O}_4$, с $M_s = 45 \text{ Ам}^2\text{кг}^{-1}$, и размером частиц $\sim 0,05$ мкм, полученного методом распылительной сушки ($\tau \sim 1000$ Па) с последующим обжигом на воздухе в среде хлорида натрия [2]. Такое увеличение напряжения сдвига может быть связано с увеличением среднего размера частиц, происходящего в процессе высокотемпературного обжига в отсутствие инертной матрицы хлорида натрия.

Высокотемпературный обжиг ведет к большому увеличению размера частиц, степени кристалличности, изменению формы частиц от округлой к ограненной. При этом, возможно, увеличивается плотность и маслосъемность частиц. Такие морфологические изменения влияют на реологическое поведение порошков в суспензии, приводя к увеличению значений величины напряжения сдвига.

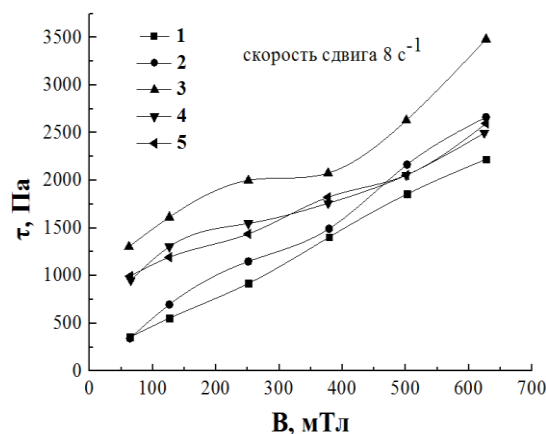


Рисунок 2 – Зависимость напряжения сдвига МРЖ, содержащей 20 мас. % наполнителя на основе порошков 1–5 в Mobil 22, от индукции магнитного поля

Обобщая результаты, относящиеся ко всем исследованным образцам, 1–5, следует также отметить, что размер и морфология частиц вносят, по-видимому, значительно более существенный вклад в величину напряжения сдвига по сравнению с удельной намагниченностью порошка, поскольку образцы 2–4, несмотря на большое различие в величине M_s , от 20,4 до 97,9 $\text{Ам}^2\text{кг}^{-1}$, показали очень близкие и весьма высокие напряжения сдвига ($2000 - 2500$ Па при $B = 625$ мТ).

Выводы. Высокое значение напряжения сдвига ($2500 - 3500$ Па) при сравнительно невысокой индукции магнитного поля (600 мТл) позволяет считать полученные и исследованные ферриты перспективными материалами для применения в качестве функционального наполнителя жидкотекучих магнитных материалов.

Литература

1. Modeling of Strain Kinetics of Damping Viscoelastic Magnetically Controlled Materials in Creep Mode/ E.V. Korobko [et al.] // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. – 2020. – Vol. 31, № 2. – P. 243–252.
2. Synthesis, structure and magnetic properties of cobalt-zinc nanoferrite for magnetorheological liquids / Yu.S. Haiduk [et al.] // Kondensirovannye sredy i mezhfaznye granitsy (Condensed Matter and Interphases). – 2020. – Vol. 22, №2. – P. 28–38.

УДК 535.421; 681.785.554

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОТКЛИКА СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ДИФРАКЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены детали расчета параметров отклика широкодиапазонного спектрометра, необходимые для работы алгоритма коррекции дифракции второго порядка.

Ключевые слова: коррекция дифракции второго порядка.

SPECTROMETER RESPONSE PARAMETERS CALCULATION DETAILS FOR THE SECOND-ORDER DIFFRACTION CORRECTION ALGORITHM

Guliaeva S., Litvinovich H., Bruchkouski I.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems
Minsk, Belarus*

Abstract. The details of calculating the response parameters of a wide-range spectrometer as input parameters for the operation of the second-order diffraction correction algorithm have been presented.

Key words: second-order diffraction correction.

*Адрес для переписки: Гуляева С.И., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ms.bruchkovskaya@yandex.ru*

В широкодиапазонных спектрометрах с дифракционной решеткой имеет место наложение спектров, формируемых в различных порядках дифракции, что приводит к искажению регистрируемых спектров в красной области. Ранее нами был предложен и обоснован аналитический метод коррекции дифракции второго порядка [1]. В основе метода лежит суперпозиция регистрируемого спектра в виде суммы функций Гаусса, параметры которых определяются экспериментально для конкретного спектрометра, и последующий расчет параметров гауссиан для спектра во втором порядке (образ). Было показано, что метод позволяет значительно улучшить качество спектральных данных путем математического исключения из спектра сигнала второго порядка в тех случаях, когда использование отрезающего фильтра затруднительно или невозможно.

Для лабораторного эксперимента в качестве источника излучения применяется монохроматический протяженный источник [2] (рис. 1) – фотометрическая сфера, освещаемая излучением полупроводниковых лазеров и ртутно-аргоновой лампы низкого давления [3]. Протяженный источник обеспечивает полное заполнение апертуры спектрометра, моделируя тем самым условия освещения, аналогичные таковым при регистрации спектров природных объектов.

Суть эксперимента состоит в том, чтобы зарегистрировать при помощи спектрометра монохроматические линии с известными длинами волн λ_i , так что максимальная интенсивность образа монохроматической линии имеет длину волны $2\lambda_i$. Зарегистрированный набор линий аппроксимируется функцией Гаусса методом наименьших квадратов, в результате чего опре-

деляется ширина на полувысоте и интенсивность линии. Форма образа линии во втором порядке дифракции, как правило, имеет асимметричную форму, поэтому для ее параметризации применяется функция вида:

$$y = \begin{cases} H \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_c}{w_1}\right)^2}, & \text{если } (\lambda < \lambda_c) \\ H \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{\lambda - \lambda_c}{w_2}\right)^2}, & \text{если } (\lambda \geq \lambda_c) \end{cases}$$

где y – значение параметризующей функции, λ – длина волны; H , λ_c – амплитуда и центральная длина волны спектральной линии, w_1 , w_2 – ширины на полувысоте линии слева и справа от ее центра.

Таким образом, характерными параметрами, описывающими процесс формирования сигнала во втором порядке, являются: отношение интенсивности линии второго порядка к ее интенсивности в первом R , ширина на полувысоте линии первого порядка F , а также ширины на полувысоте линии слева и справа от ее центра w_1 и w_2 для линий во втором порядке. Для корректной работы алгоритма необходимо провести интерполяцию данных параметров на калибровочную сетку рабочего диапазона длин волн с использованием параметризующих функций. Параметризующие функции могут быть сформированы при помощи ртутно-аргоновых линий (365,1, 404,3, 435,9, 490,7 нм) и линий полупроводниковых лазеров (405,9, 445,2 нм).

На рис. 2 приведены примеры аппроксимации параметров w_2 и R экспоненциальной функцией вида $y = \exp(a + b\lambda + c\lambda^2)$, ширина на полувысоте линии первого порядка F аппроксимируется аналогичной функцией, w_1 ввиду

его незначительного изменения аппроксимируется своим средним значением.

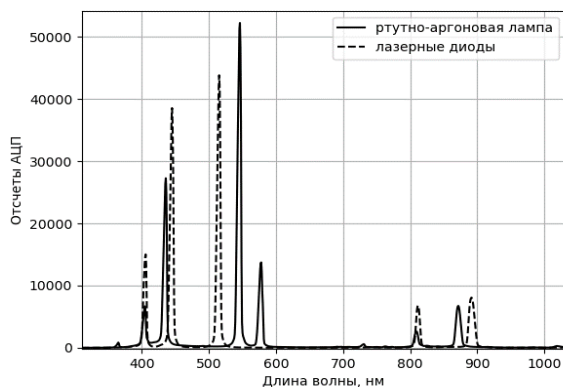


Рисунок 1 – Регистрируемые с помощью монохроматического протяженного источника излучения спектры ртутно-аргоновой лампы и полупроводниковых лазеров в первом и втором порядках дифракции

Проверка корректности выбора параметризующих функций может быть выполнена путем сравнения откорректированного спектра природного объекта со спектром того же объекта, зарегистрированного через фильтр, не пропускающий излучение первого порядка (например, КС-10).

Таким образом, особенности регистрации и расчета параметров отклика для возможности применения алгоритма коррекции второго порядка состоят в следующем:

- при использовании полупроводникового лазера в качестве монохроматического источника, необходима температурная стабилизация лазерного кристалла и питающего тока;

- одновременная регистрация линий протяженного монохроматического излучателя с длинами волн λ_i в первом и втором порядках дифракции, имеющая целью определение параметров асимметрии линий во втором порядке и параметров R и F . При этом, параметры асимметрии рассчитываются от величины, определяемой расположением длины волны $2\lambda_i$.

- для проверки корректности работы метода рекомендуется применять опорный спектр, заведомо не содержащий в себе высших порядков.

Практическое применение метода на данных нескольких спектрометров с вогнутой дифракционной решеткой показало, что параметры R , F , w_1 и w_2 имеют одностепенную функциональную зависимость от длины волны.

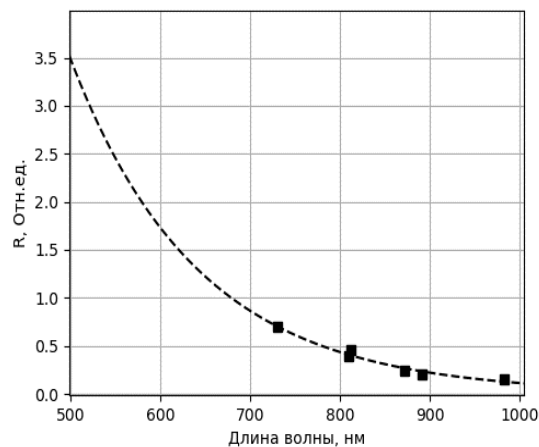
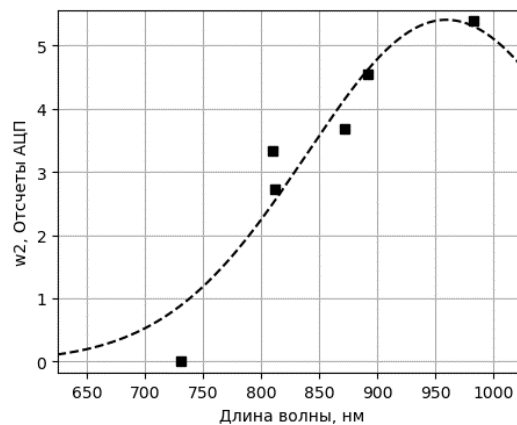


Рисунок 2 – Аппроксимации параметров w_2 и R

Учет уровня рассеянного излучения, неопределенности калибровки по длинам волн и нелинейности отклика детектора по уровню сигнала представляется логичным продолжением данной работы и планируется в будущем.

Литература

1. Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой / С.И. Бручковская [и др.] // Журн. приклад. спектроскопии. – 2019. – Т. 86, № 4. – С. 620–627.
2. Монохроматический протяженный источник для алгоритма математической коррекции дифракции второго порядка / С.И. Бручковская [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : сборник тезисов докладов 16 Всероссийской отк. конф. : конференции. – Москва, ИКИ РАН, 2018.
3. Калибровочные лампы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.newport.com/f/pencil-style-calibration-lamps>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 006.063:681.2.089.68 (476)

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ О СООТВЕТСТВИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Гуревич В.Л., Ефремова Н.Ю.

*РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Как в соответствии с международными требованиями, так и по национальному законодательству Республики Беларусь аккредитованные калибровочные лаборатории должны уметь делать заключение о соответствии средств измерений по результатам их калибровок на основании заранее установленного правила принятия решения. Существуют как общие рекомендации по разработке такого правила, так и те, которые уже строго оговорены для конкретных типов средств измерений в существующих документах. В зависимости от уровня риска принятия неверных решений о соответствии калибруемых средств измерений авторами данной работы предлагается для использования в любых калибровочных лабораториях два правила принятия решения: простая и защищенная приемка.

Ключевые слова: калибровка средств измерений, оценка соответствия, правило принятия решения, уровень риска, неопределенность измерений.

DECISIONS OF CONFORMITY WHEN PERFORMING CALIBRATION OF MEASURING INSTRUMENTS

Hurevich V., Efremova N.

*Belarusian State Institute of Metrology
Minsk, Belarus*

Abstract. The accredited calibration laboratories should be able to provide a statement of conformity for measuring instruments based on their calibration results in accordance with a decision rule, which was earlier clearly defined. This requirement is included in international standards as well as in the national legislation of the Republic of Belarus. There are general guidelines for the development of such a rule as well as those that are already strictly specified in existing documents for specific types of measuring instruments. The authors of this paper propose two decision rules for use in any calibration laboratories: simple acceptance and protected acceptance. The choice of the type of acceptance depends on the level of risk of an incorrect decision about the conformity of calibrated measuring instruments.

Key words: calibration of measuring instruments, statement of conformity, decision rule, level of risk, uncertainty of measurement.

*Адрес для переписки: Ефремова Н. Ю., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: efremova@belgim.by*

В настоящее время оценка соответствия представляет собой важную задачу, решаемую при выполнении таких видов деятельности, как испытание продукции, инспектирование услуг, поверка и калибровка средств измерений, с целью установления соответствия проверяемых объектов требованиям, установленным в законодательстве, технических регламентах, стандартах и других документах с целью обеспечения безопасности, здоровья и качества жизни людей.

На международном уровне требования к представлению аккредитованными калибровочными лабораториями заключений о соответствии по результатам калибровки при наличии запроса от заказчика содержатся в ISO/IEC 17025 [1]. На национальном уровне Республики Беларусь в соответствии с действующим в области обеспечения единства измерений законодательством (Закон “Об обеспечении единства измерений”, Постановление Государственного комитета по стандартизации № 42) калибровка рассматрива-

ется как обязательная процедура, без прохождения которой, с учетом полученного положительного заключения о соответствии, средства измерений, предназначенные для применения в сфере законодательной метрологии, не могут применяться в аккредитованных испытательных лабораториях (центрах). При этом калибровка проводится согласно методике калибровке, позволяющей определить соответствие калибруемого средства измерений в первую очередь обязательным метрологическим требованиям, а заключение о соответствии средства измерений по результатам калибровки принимают уполномоченные юридические лица на калибровку и указывают в свидетельстве или сертификате калибровки. Несмотря на установленные требования к проведению оценки соответствия при калибровке средств измерений как на международном, так и на национальном уровне, единые правила по выполнению этой задачи на сегодняшний день отсутствуют, а ее решение, требующее определенных знаний и опыта, ложится

на плечи калибровочных лабораторий, о чем напрямую говорится в [1].

Для того, чтобы принять решение о соответствии средства измерений заданным требованиям следует определить: а) спецификацию с установленными в ней предельными допускаемыми значениями для измеряемых при калибровке метрологических характеристик, включая максимально допускаемые погрешности (МРЕ); б) неопределенность измерений; в) правило, описывающее с учетом неопределенности измерений и принятого уровня риска (вероятности) принятия неверных (ложноположительных или ложноотрицательных) решений способ установления соответствия оговоренным требованиям. Такое правило называется

ся *правилом принятия решения*, а его разработка является ключевым вопросом при оценке соответствия средств измерений при выполнении их калибровки. Обзор применяемых на сегодняшний день в мировой метрологической практике правил принятия решений содержится в [2]. Белорусские калибровочные лаборатории имеют возможность воспользоваться общими международными рекомендациями по данному вопросу в соответствии с [3]. Для некоторых видов измерений или даже конкретных типов средств измерений правила принятия решения уже могут содержаться в соответствующем стандарте, спецификации или методике калибровки. Примерами таких документов являются [4–6].

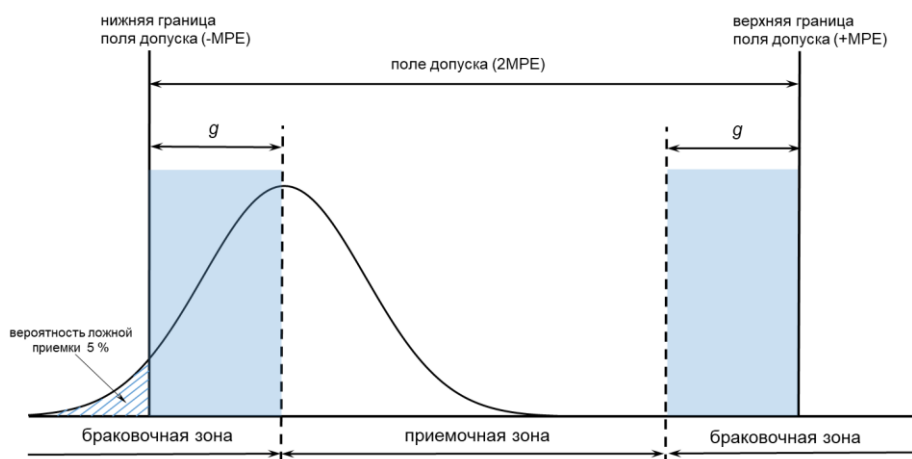


Рисунок 1 – Графическое изображение правила принятия решения, основанного на защищенной приемке

В общем и целом, правило принятия решения представляет собой задокументированный метод, устанавливающий для заданной вероятности принятия неверного решения *приемочные* и *браковочные области*, при попадании в которые полученного при калибровке значения можно сделать однозначный вывод о соответствии или несоответствии проверяемой метрологической характеристики установленным требованиям (рис. 1).

В соответствии с [1] правило принятия решения должно быть четко определено и документировано; если оно отсутствует в спецификации или стандарте, то его следует сообщить заказчику для согласования, а в соответствии с национальными требованиями оно должно содержаться в методике калибровки.

На основании [2–5] можно выделить следующие два наиболее распространенных правила принятия решения для применения их калибровочными лабораториями.

1) **Простая приемка.** В качестве приемочной области используется все *поле допуска* (интервал допустимых значений), установленное для проверяемой при калибровке характеристике. Если измеренное значение E , скажем, например, погрешности показаний калибруемого прибора, попадает в область, ограниченную максимальными допус-

каемыми погрешностями (от $-MPE$ до $+MPE$), включая ее граничные значения, то прибор рассматривается как соответствующий установленным к нему требованиям по погрешности. При попадании E за пределы этой области, т. е. в браковочную область, по результатам калибровки делают вывод о несоответствии. Данное правило рекомендуется использовать при выполнении калибровок средств измерений, используемых для тривиальных и не требующих принятия важных решений измерительных задач, так как при получении измеренных значений вблизи границ поля допуска вероятность принятия ложноположительного решения (несоответствующее требованиям средство измерений признается соответствующим) может достигать 50 %. С целью нивелирования этого недостатка при использовании простой приемки налагается ограничение на величину расширенной неопределенности измерений $U(E)$, обеспечиваемую при калибровке. Как правило удовлетворительным считается критерий, ограничивающий $U(E)$ значением, равным $MPE/3$, т.е. $U(E) \leq MPE/3$. Выполнение соблюдения этого условия будет означать, что при совпадении измеренного значения с MPE истинное значение измеряемой характеристики может с вероятностью 50 % лежать за пределами поля допуска в

интервале, например, от $+MPE$ до $(+MPE+MPE/3)$ при рассмотрении верхней границы поля допуска.

2) **Защищенная приемка.** В данном виде приемки риск принятия неверного (ложноположительного) решения для значений, расположенных достаточно близко к границам поля допуска, уменьшается за счет смещения границ приемочной области внутрь поля допуска на величину так называемой *защитной полосы* g (см. рисунок). И такой подход является оправданным для средств измерений, по результатам измерения с помощью которых принимаются важные решения, например, в торговле, в области охраны окружающей среды, в медицине и т. п. Вывод о соответствии/несоответствии делается на основании попадания значения E в приемочную или браковочную область. Величина g определяется разностью между границей поля допуска и соответствующей приемочной границей и вычисляется на основании умножения величины стандартной неопределенности $u(E)$ на коэффициент r , определяемый на основании вероятности принятия неверного решения, как правило составляющей 5 %, а также функции плотности вероятности, связанной с измеренным значением и обычно рассматриваемой, как подчиняющуюся нормальному закону. Если стандартная неопределенность $u(E)$ существенно меньше величины поля допуска ($2MPE/u(E) \geq 6$), то для обеспечения вероятности ложной приемки, равной 5 %, r

в соответствии с [4] принимается равным 1,65, т.е. $g = 1,65u(E)$.

Таким образом, на сегодняшний день в соответствии как с международными, так и с национальными требованиями оценка соответствия калибруемых средств измерений стала одной из важнейших задач, входящих в сферу ответственности аккредитованной калибровочной лаборатории и требующей от ее сотрудников определенных знаний в области теории вероятностей и теоретической метрологии.

Литература

1. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories : ISO/IEC 17025:2017.
2. Guidelines on decision rules and statements of conformity : ILAC-G8:09/2019.
3. Неопределенность измерений. Часть 4. Роль неопределенности измерений при оценке соответствия : СТБ ISO/IEC Guide 98-4:2019.
4. Технические требования к геометрическим параметрам продукции (GPS). Контроль посредством измерений деталей и измерительного оборудования. Часть 1. Правила принятия решений для проверки соответствия или несоответствия техническим требованиям : СТБ ISO 14253-1-2020.
5. Использование неопределенности измерений при осуществлении деятельности по оценке соответствия в области электротехники : СТБ IEC Guide 115:2019.
6. Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов точности E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} и M_3 . Часть 1. Метрологические и технические требования : ГОСТ OIML R 111-1-2009.

УДК 621.317.39.084.2

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИКАТОРА КАЧЕСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАСЛА

Джежора А.А., Завацкий Ю.А., Коваленко А.В., Рубаник О.Е.

*Витебский государственный технологический университет
Витебск, Республика Беларусь*

Аннотация. Точное измерение относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r промышленных масел с использованием диэлектрометрических датчиков (IDS) является сложной задачей из-за паразитной емкости, вызванной пространственной структурой IDS. Структура IDS состоит из подложки, изолирующего слоя под электродами и маски припоя над электродами, имеющей периодичность r , экрана Фарадея. Эта структура была смоделирована для определения влияния на ожидаемые значения емкости C , чувствительности S и отклонения D (точности) для типичных значений ϵ_r для промышленных масел.

Ключевые слова: диэлектрометрический датчик (IDS), экран Фарадея, диэлектрическая проницаемость, гидравлическое масло.

MATHEMATICAL MODEL OF THE INDICATOR OF THE QUALITY OF LIQUID PETROLEUM PRODUCTS

Jezhora A., Zavatski Y., Kovalenko A., Rubanik O.

*Vitebsk State Technological University
Vitebsk, Belarus*

Abstract. An accurate measurement of the relative permittivity ϵ_r , of industrial oils using interdigitated dielectric sensors (IDS) is challenging due to the parasitic capacitance caused by the IDS spatial structure. IDS structure consists of a substrate, an insulating layer below the electrodes and a solder mask above the electrodes having a periodicity of r . This structure was simulated to determine the influence on the expected values of capacitance C , sensitivity S , and deviation D (accuracy) for typical values of ϵ_r for industrial oils.

Key words: dielectric sensor (IDS), Faraday shield, dielectric constant, hydraulic oil.

Адрес для переписки: Джежора А.А, Московский пр-т, 72, г. Витебск 210038, Беларусь
e-mail: jezhora@mail.ru

Цель работы: построение математической модели сенсора, расчет параметров и оптимизация его конструкции.

Конструкция сенсора охвачена щитом Фарадея и показана на рис. 1.

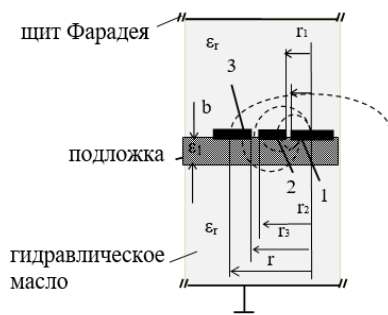


Рисунок 1 – Вид поперечного сечения секции IDS сенсора для математического моделирования

Параметры расчета включали в себя геометрические размеры высокопотенциального электрода 1, электрода охраны 2, низко потенциального чувствительного электрода 3, подложку толщиной b , толщину электродов d , а также диэлектрические характеристики контролируемого масла, окружающей среды и самой подложки.

Электрическое поле создается высокопотенциальным электродом 1 ($V_1 = 1$ В), замыкается на низко потенциальный электрод 3, электрод охраны 2 и заземленные экраны 4 щита Фарадея. Электроды охраны 2 имеют потенциал $V_2 = 0$ В. При этом потенциал земли 0 В, и земля электрически не связана с чувствительными электродами 3 и электродами охраны 2.

Для измерения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r , контролируемого жидкого диэлектрика необходимо выбрать такие размеры конструкции сенсора, которые бы позволили проводить расчеты относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta_r$ с помощью классических выражений (1), (2) (с методической погрешностью не выше $\pm 0,03\%$).

$$\epsilon_r = C_1 / C_0, \text{ когда } \epsilon_0 = 1, \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta_r = \text{tg}\delta_1 - \text{tg}\delta_0 C_0 / C_1, \quad (2)$$

где $C_0, \text{tg}\delta_0$ – соответственно емкость и тангенс угла диэлектрических потерь сенсора с воздухом;

$C_1, \text{tg}\delta_1$ – соответственно емкость и тангенс угла диэлектрических потерь сенсора, заполненного контролируемым диэлектриком.

Для построения математической модели сенсора использовался метод зеркально-симметричных схем чувствительных элементов преобразо-

вателей [1]. Расчеты проводились с позиций электростатики.

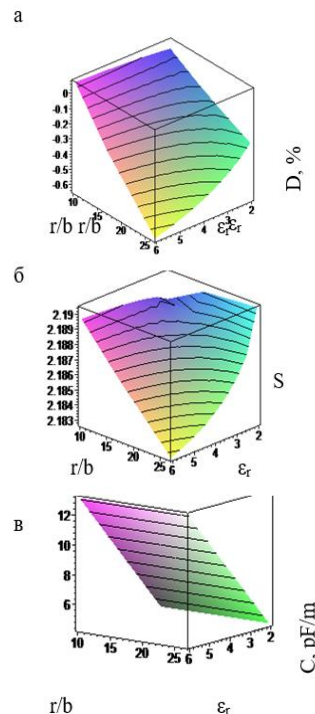


Рисунок 2 – Ожидаемые значения отклонения диэлектрической проницаемости D в %, чувствительности S и емкости C (пФ/м) на единицу длины электродов от ϵ_r для металлизации сенсоров, при различных размерах секции r (8 мм, 5 мм и 3 мм) при равных зазорах $r_1-r_0 = r_3-r_2$ и электродах $r-r_3 = r_0$, когда $b = 0,3$ мм

Поверхностная плотность зарядов $\sigma_{\theta_i}(t)$ на электродах обозначалась двумя индексами. Первый индекс соответствовал номеру электрода на рис. 1, а второй стороне поверхности: 1 – соответствует поверхностной плотности заряда, на стороне электрода обращенной к контролируемому материалу, 2 – на стороне электрода обращенной к подложке.

Наведенные на границе раздела слоев связанные заряды учитывались с помощью метода зеркальных отображений. Они заменялись сосредоточенными зарядами, отраженными от границы раздела двух слоев с коэффициентами пропускания β_{12}, β_{21} и коэффициентами отражения $\lambda_{12}, \lambda_{21}$ [1].

Частичная межэлектродная рабочая емкость определялась выражением

$$C_{12} = \frac{L}{(V_1 - V_2)} \left(\sum_{i=n_1+1}^{n_1+n_2} \sigma_{21}(x_i) l_i + \sum_{i=n_4+\dots+n_4+1}^{n_4+\dots+n_5} \sigma_{22}(x_i) l_i \right),$$

где $l_i = \beta_j - \alpha_j$.

Программы для моделирования полей сенсора были написаны с использованием системы компьютерной математики MAPLE.

В имитационных расчетах диэлектрическая проницаемость ϵ_r варьировались от 2 до 5, что соответствует стандартным типичным маслам. Результаты моделирования сенсора изображены в виде 3D-рисунков (рис. 2).

На рис. 2, а представлено отклонения относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r с уменьшением относительного размера секции r/b . Из рисунка видно, что отклонение D линейно уменьшается с уменьшением относительного размера секции r/b и остается практически равными нулю при $r/b=10$ в диапазоне изменений диэлектрической проницаемости ϵ_r от 2 до 5. Это крайне важно для минимизации размеров сенсора. В это время чувствительность сенсора S линейно возрастает с уменьшением размера секции r/b (рис. 2, б). Емкость сенсора C линейно уменьшается с уменьшением диэлектрической проницаемости ϵ_r и практически остается постоянной во всем диапазоне изменений относительного размера секции r/b (рис. 2, в).

Сенсоры IDS обладают рядом достоинств [2, 3]. Во-первых, позволяют определять ϵ_r согласно классическому выражению для плоского конденсатора Maxwell, во вторых, за счет охранных электродов и щита Фарадея снизить соотношение сигнал-шум, убрать паразитные емкости, в третьих, минимизировать размеры индикаторов качества масел и осуществлять их удаленный мониторинг.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ, ООО «Дом АВТО», № ГР 20211061 подпрограммы «Техническая диагностика».

Литература

1. Математическая модель сенсора с открытой областью пространства / А. А. Джебора [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2020. – № 11. – С. 22–32.
2. A 3D Faraday shield for interdigitated dielectrometry sensors and its effect on capacitance: a review / A. Risos [et al.] // Sensors. – 2017. – Vol. 17, iss. 1. – P. 77.
3. Risos, A. Interdigitated Sensors: The Next Generation “Sensing Permittivity and Conductivity of Oils-Unaffected by Temperature”: a review / A. Risos // IEEE Sensors Journal. – 2018. – Vol. 18, iss. 9. – P. 3661–3669.

УДК 681.785

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

Длугунович В.А., Жумарь А.Ю., Механиков А.В.

*ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В рамках КОOMET в области «Фотометрия и радиометрия» проходят дополнительные сличения эталонов единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне. В международных сличениях принимают участие национальные эталоны поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне Российской Федерации и Республики Беларусь.

Ключевые слова: дополнительные сличения, мощность лазерного излучения, Национальный эталон.

INTERNATIONAL COMPARISONS OF NATIONAL STANDARDS OF THE UNIT OF POLARIZATION MODE DISPERSION IN OPTICAL FIBER

Dlugunovich V., Zhumar A., Mekhanikov A.

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Within the framework of COOMET in the field of the «Photometry and Radiometry» the supplementary comparisons of the standards of the unit of polarization mode dispersion in optical fiber are underway. National standards of polarization mode dispersion in optical fiber of the Russian Federation and the Republic of Belarus take part in international comparisons.

Key words: supplementary comparison, polarization mode dispersion in optical fiber, National Standard.

*Адрес для переписки: Механиков А.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.mekhanikov@ifanbel.bas-net.by*

В 2019 г. Институтом физики НАН Беларуси был создан и введен в эксплуатацию Национальный эталон единиц поляризационной модовой дисперсии (ПМД) в оптическом волокне (ОВ).

Диапазоны воспроизведения и передачи единицы ПМД эталонам низшего звена, калибровочным (поверочным) установкам и рабочим средствам измерений (СИ) ПМД в ОВ размера

единицы на фиксированных длинах волн оптического излучения 1310 и 1550 нм поляриметрическим и интерферометрическим методами составляют от 0,05 до 0,5 пс и от 0,5 до 120,0 пс, соответственно [1–3].

Постановлением Госстандарта эталон внесен в Государственный реестр национальных и исходных эталонов Республики Беларусь за № НЭ РБ 54-19.

В соответствии с планом работ технического комитета «PR-Фотометрия и радиометрия» Организации сотрудничества государственных метрологических учреждений стран Центральной и Восточной Европы (КООМЕТ) в рамках реализации «Договоренности о взаимном признании национальных эталонов, сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами» осуществляется проект 801/ВУ/20 «Дополнительные сличения эталонов единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне». Целью данного проекта является установление соотношения между результатами измерений при воспроизведении и передаче единицы ПМД в ОВ национальными эталонами Республики Беларусь и Российской Федерации.

От Республики Беларусь в сличениях участвуют Белорусский государственный институт метрологии как Национальный метрологический институт и Институт физики НАН Беларуси как организация, эксплуатирующая эталон НЭ РБ 54-19, от Российской Федерации – Всероссийский научно-исследовательский институт оптических и физических измерений (ВНИИОФИ). Лабораторией-пилотом выступает БелГИМ. Сличения планируется закончить в 2022 г.

В качестве эталона сравнения (артефакта) используются меры ПМД в ОВ (мера CS-DGD-0314 на основе кристаллического кварца, производства фирмы General Photonics, США и компаратор-имитатор) из состава НЭ РБ 54-19. Компаратор-имитатор представляет собой набор мер ПМД в ОВ на основе образцов оптического волокна с характеристиками, соответствующими эталонным мерам ПМД в ОВ согласно межгосударственной поверочной схеме ГОСТ 8.607-2012 [4]. Для изготовления данных мер использовалось специально отобранное одномодовое ОВ с сохранением состояния поляризации типа PANDA (PM-волокно).

Сличения проводятся в форме одностороннего сравнения. институт физики НАН Беларуси калибрует артефакт и отправляет его во ВНИИОФИ, который также производит калибровку этого артефакта и возвращает его в Институт физики НАН Беларуси, где осуществляется повторная калибровка артефакта.

Основные метрологические характеристики эталона НЭ РБ 54-19 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные метрологические характеристики НЭ РБ 56-19

Метрологическая характеристика	Значение
1. Диапазон воспроизведения и передачи размера единицы ПМД	поляриметрическим методом, от 0,05 до 0,5 пс; интерферометрическим методом от 0,5 до 120,0 пс
2. Фиксированные длины волн излучения при воспроизведении и передаче размера единицы ПМД в ОВ	поляриметрическим методом – 1550 нм; интерферометрическим методом – 1310 и 1550 нм
3. Расширенная стандартная неопределенность воспроизведения единицы ПМД в ОВ на фиксированных длинах волн ($k = 2$, $P = 95 \%$), пс	поляриметрическим методом не превышает 0,008 пс для значения ПМД в ОВ 0,5 пс; интерферометрическим методом не превышает 0,006 пс для значения ПМД в ОВ 0,5 пс и 0,8 для значения ПМД в ОВ 120,0 пс

Сличения проводились в Институте физики НАН Беларуси. В помещении поддерживалась температура $(23 \pm 0,2)^\circ\text{C}$. Каждое независимое измерение ПМД в ОВ осуществлялось переподключением и перезапуском цикла измерений.

Измерения проводили в следующей последовательности: 1) устанавливали артефакт в НЭ РБ 54-19 на место калибруемого СИ; 2) в зависимости от номинального значения единицы ПМД в ОВ подключали поляриметрический или интерферометрический блок НЭ РБ 54-19; 3) проводились циклы измерений для выбранного номинального значения ПМД в ОВ.

В каждом случае определяли измеренное значение ПМД в ОВ по следующей формуле:

$$\overline{\Delta\tau_{\Sigma}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta\tau_{\Sigma, i}}{n}, \quad (1)$$

где $\overline{\Delta\tau_{\Sigma}}$ – значение измеренное на НЭ РБ 54-19; n – количество циклов измерений ($n \geq 10$). $\Delta\tau_{\Sigma, i}$ – показания НЭ РБ 54-19 для i -го цикла измерений.

Литература

1. Руководство по эксплуатации. Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне : УАКМ 252.00.000 РЭ.
2. Длугунович В. А. Национальный эталон единицы поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне / В. А. Длугунович, А. Ю. Жумарь, А. В. Механиков // Метрология-2019 : тезисы докладов МНТК, Минск, 27–28 марта 2019 г. – Мн. : БелГИМ, 2019. – С. 191–195.
3. Методика калибровки средств измерений поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне : 02.МК.026-2020.
4. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений поляризационной модовой дисперсии в оптическом волокне : ГОСТ 8.607-2012. – Введ. 01.07.2015. – Минск: Госстандарт, 2015. – 8 с.

УДК 535.231.11

МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Длугунович В.А., Исаевич А.В., Круплевич Е.А.

ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В рамках КООМЕТ в области «Фотометрия и радиометрия» проходят дополнительные сличения чувствительности мощности лазерного излучения на длинах волн 0,532; 1,064 и 10,6 мкм. В международных сличениях принимают участие национальные эталоны единицы мощности лазерного излучения Российской Федерации, Республики Беларусь и Швейцарии.

Ключевые слова: дополнительные сличения, мощность лазерного излучения, Национальный эталон.

INTERNATIONAL COMPARISONS OF NATIONAL STANDARDS OF THE UNIT OF LASER POWER

Dlugunovich V., Isaevich A., Kruplevich E.

B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. Within the framework of COOMET in the field of the «Photometry and Radiometry» the supplementary comparisons of the laser power responsivity at wavelengths of 0.532, 1.064 and 10.6 μm are underway. National standards of the unit of laser power of the Russian Federation, the Republic of Belarus and Switzerland take part in international comparisons.

Key words: supplementary comparison, laser power, National Standard.

Адрес для переписки: Круплевич Е.А., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: e.kruplevich@dragon.bas-net.by

В 2019 г. Институтом физики НАН Беларуси был создан и введен в эксплуатацию Национальный эталон единицы средней мощности и энергии лазерного излучения. Эталон предназначен для воспроизведения и хранения в спектральном диапазоне от 0,3 до 10,6 мкм единицы средней мощности лазерного излучения (ЛИ) в диапазоне от 10^{-9} до 2 Вт и единицы энергии ЛИ в диапазоне от 10^{-7} до 1 Дж, а также передачи единицы средней мощности ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808; 1,064 и 10,6 мкм и единицы энергии ЛИ на длинах волн 0,532; 0,808 и 1,064 мкм эталонам низшего звена, калибровочным (поверочным) установкам и рабочим средствам измерений (СИ) энергетических характеристик ЛИ [1–3]. Постановлением Госстандарта эталон внесен в Государственный реестр национальных и исходных эталонов Республики Беларусь за № НЭ РБ 56-19.

В соответствии с планом работ технического комитета «PR-Фотометрия и радиометрия» Организации сотрудничества государственных метрологических учреждений стран Центральной и Восточной Европы (КООМЕТ) в рамках реализации «Договоренности о взаимном признании национальных эталонов, сертификатов калибровки и измерений, выдаваемых национальными метрологическими институтами» осуществляется проект 785/RU/19 «Дополнительные сличения чувствительности мощности ЛИ на длинах волн 0,532; 1,064 и 10,6 мкм». Целью данного проекта является установление соотношения между результатами измерений при воспроизведении и передаче единицы мощности ЛИ национальными

эталонами Республики Беларусь, Российской Федерации и Швейцарии.

От Республики Беларусь в сличениях участвуют Белорусский государственный институт метрологии (БелГИМ) как Национальный метрологический институт и Институт физики НАН Беларуси как организация, эксплуатирующая эталон НЭ РБ 56-19, от Российской Федерации – Всероссийский научно-исследовательский институт оптических и физических измерений (ВНИИОФИ), от Швейцарии – Федеральный институт метрологии (METAS). Лабораторией-пилотом выступает ВНИИОФИ. Сличения планируются закончить в 2022 г.

В качестве эталона сравнения (артефакта) используется детекторная головка для измерений мощности ЛИ Ophir 10A, которая оснащена кабелем с 15-контактным разъемом sub-D. Детекторная головка и соединительный кабель поставляются ВНИИОФИ.

Сличения проводятся в форме одностороннего сравнения. ВНИИОФИ калибрует артефакт и отправляет его в Институт физики НАН Беларуси, который также производит калибровку этого артефакта и возвращает его во ВНИИОФИ, где осуществляется повторная калибровка артефакта. Затем артефакт отправляется в METAS и указанная процедура повторяется. После завершения всех измерений участники сличений обмениваются результатами измерений чувствительности мощности ЛИ.

Основные метрологические характеристики эталона НЭ РБ 56-19 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Основные метрологические характеристики НЭ РБ 56-19

Метрологическая характеристика	Значение
1 Диапазон воспроизведения единицы средней мощности ЛИ в спектральном диапазоне от 0,3 до 10,6 мкм, Вт	от 10^{-9} до 2
2 Рабочие длины волн при воспроизведении единицы средней мощности ЛИ, нм	532; 808; 1064; 10600
3 Расширенная неопределенность воспроизведения единицы средней мощности ЛИ ($k = 2, P = 95 \%$), не более, %	0,04 в диапазоне от $5 \cdot 10^{-3}$ до 2 Вт; 0,15 в диапазоне от 10^{-9} до $5 \cdot 10^{-3}$ Вт
4 Расширенная неопределенность передачи единицы средней мощности ЛИ на фиксированных длинах волн ($k = 2, P = 95 \%$), %	532 нм: не более 0,07; 808 нм: не более 0,09; 1064 нм: не более 0,10; 10600 нм: не более 0,24

Эталон работает по методу замещения. Необходимая точность измерений мощности оптического излучения достигается путем замещения последней мощностью электрического тока, которая при калибровке эталонного измерительного преобразователя (ЭИП) измеряется с высокой точностью.

При электрической калибровке ЭИП происходит последовательное преобразование сначала выделяемой в его электрическом нагревателе мощности электрического тока в тепловой поток, а затем в его термобатарее в аналоговый выходной электрический сигнал, пропорциональный средней мощности образованного теплового потока. Отключив источник электрического тока, подадут в ЭИП оптическое излучение. В приемном элементе преобразователя излучение поглощается и преобразуется в тепловой поток, средняя мощность которого пропорциональна средней мощности излучения. В результате этого, как и при воздействии электрического тока, термобатарей ЭИП реагирует на тепловое воздействие и обеспечивает появление электрического сигнала, пропорционального мощности воздействия, а, следовательно, и средней мощности оптического излучения.

Сличения проводились в Институте физики НАН Беларуси. В помещении поддерживалась температура $(21,5 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Напряжение на артефакте измеряли высокоточным цифровым нановольтметром Keysight 34420A, к которому арте-

факт был подключен с помощью кабеля с 15-контактным разъемом sub-D.

Измерения проводили на длинах волн ЛИ 0,532; 1,064 и 10,6 мкм на уровне мощности 0,5 Вт, так чтобы на входе артефакта мощность ЛИ была $0,5 \text{ Вт} \pm 0,05 \text{ Вт}$, проводили по 10 измерений на каждой длине волны ЛИ. Каждое независимое измерение осуществлялось переподключением детекторной головки измерителя мощности ЛИ.

Измерения проводили в следующей последовательности: 1) устанавливали артефакт в НЭ РБ 56-19 на место калибруемого СИ; 2) с помощью измерительной системы НЭ РБ 56-19 измеряли мощность ЛИ $P_{ЭТ}$, которое подается на ЭИП, при этом приемник-свидетель регистрировал сигнал $V_{СВ1}$; 3) измеряли темновое напряжение на артефакте U_{10A0} (показания нановольтметра без подачи излучения); 4) подавали ЛИ мощностью $P_{ЭТ}$ на артефакт; 5) снимали показания нановольтметра U_{10A} , при этом приемником-свидетелем регистрировали сигнал $V_{СВ2}$.

Чувствительность мощности ЛИ определяли по следующей формуле:

$$R = \frac{(U_{10A} - U_{10A0})}{P_{ЭТ}} \cdot \frac{V_{СВ1}}{V_{СВ2}}, \quad (1)$$

где R – чувствительность артефакта; U_{10A} – показания нановольтметра при подаче ЛИ на артефакт; U_{10A0} – показания нановольтметра без подачи излучения на артефакт (темновое напряжение); $P_{ЭТ}$ – средняя мощность ЛИ, измеренная НЭ РБ 56-19; $V_{СВ1}$ – сигнал приемника-свидетеля при измерении средней мощности ЛИ эталоном $P_{ЭТ}$; $V_{СВ2}$ – сигнал приемника-свидетеля, в то время, когда снимались показания U_{10A} с нановольтметра.

Литература

1. Создание национального эталона единиц средней мощности и энергии лазерного излучения Республики Беларусь / В. А. Длугунович [и др.] // Украинский метрологический журнал. – 2018. – № 4. – С. 25–34.
2. Национальный эталон единиц средней мощности и энергии лазерного излучения / В. А. Длугунович [и др.] // Метрология–2019 : тезисы докладов междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 марта 2019 г. – Мн.: БелГИМ, 2019. – С. 40–44.
3. Эталонная база Системы обеспечения единства измерений лазерной и светодиодной техники Республики Беларусь / В. А. Длугунович [и др.] // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: сборник статей 12-го Белорусско-Российского семинара, 27–31 мая 2019 г. – Мн.: Ковчег, 2019. – С. 43–46.

УДК 542.07:543.554.2:631.415.1

**АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРА рН-МЕТРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АКТУАЛЬНОЙ
КИСЛОТНОСТИ ТОРФА И ТОРФЯНОГО СУБСТРАТА
ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Домасевич А.А.¹, Здитовецкая С.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный технологический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования прибора рН-метра для контроля за изменением актуальной кислотности в солевой вытяжке у торфов используемых для производства субстратов, субстратов производимых на основе верхового и низинного торфов, контроля качества произведенного торфяного субстрата, контроля изменения актуальной кислотности в процессе выращивания растений.

Ключевые слова: рН-метр, торфяной субстрат, актуальная кислотность, точность измерения, потенциометрический метод.

**ANALYSIS OF APPLICATION OF THE pH METER DEVICE IN DETERMINING THE ACTUAL
ACIDITY OF PEAT AND PEAT SUBSTRATE BY THE POTENTIOMETRIC METHOD**

Domasevich A.¹, Zditovetskaya S.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State Technological University

Minsk, Belarus

Abstract. The issues of using the pH meter device to control the change in the actual acidity in the salt extract in peats used for the production of substrates, substrates produced on the basis of high-moor and lowland peat, quality control of the produced peat substrate, control changes in the actual acidity in the process of growing plants.

Key words: pH meter, peat substrate, actual acidity, measurement accuracy, potentiometric method.

*Адрес для переписки: Домасевич А.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: domasevichaa@bntu.by*

Прибор рН-метр позволяет измерять водородный показатель (кислотность или щелочность) в различных растворах потенциометрическим методом. Точное измерение и регулирование рН является очень важным в производстве и сельском хозяйстве.

Все рН-метры можно разделить на: карманные, портативные, настольные. Представленные варианты могут быть как одноканальные, так и многоканальные (комбинированные) для измерения одновременно нескольких параметров.

Карманные рН-метры предназначены для измерения водородного показателя в веществах. Такие рН-метры рекомендуются производителями для измерения кислотности почвы в саду и огороде. Также данные приборы подходят для измерения рН воды (либо другой жидкости). Они активно используются в сфере сельского хозяйства, садоводстве, бассейнах.

Портативные рН-метры – эргономичные приборы, которые можно использовать в лаборатории и в полевых условиях. Показатели измеряемые портативными рН-метрами – рН, проводимость, растворенный кислород, концентрация ионов. В зависимости от потребности пользователей приборы могут одноканальные, многоканальные.

Настольные рН-метры являются стандартными лабораторными приборами. Измеряемые показатели для всех моделей – рН, проводимость,

растворенный кислород, концентрация ионов. Преимуществом лабораторных рН-метров является возможность проведения измерений с высокой точностью (например, $\pm 0,01$ ед. рН; $\pm 0,02$ ед. рН) [1].

Так как кислотность представляет собой наличие в структуре почвы или торфяного субстрата водородных ионов, то большее или меньшее их количество и определяет ее уровень. Обозначается она рН и имеет свою шкалу. Показатель 7,0 является серединой шкалы и означает, что почва или субстрат нейтрален. Значения, расположенные левее этой цифры свидетельствуют, что кислотность увеличивается с уменьшением чисел шкалы. И, наоборот, с их увеличением степень закисления переходит в щелочную.

По степени кислотности почвы подразделяются на группы:

I – очень сильнокислые (рН в КСl ниже 4,0);

II – сильнокислые (рН 4,1–4,5);

III – кислые (рН 4,6–5,2);

IV – слабокислые (рН 5,3–6,4);

V – близкие к нейтральным и нейтральные (рН 6,5–7,4);

VI – щелочные (рН более 7,5) [2].

При выращивании растения по разному требовательны к реакции почвенной среды. Голубике садовой при выращивании оптимально подходят почвы или субстраты с кислотностью в пределах рН 4,3–4,8. При выращивании посадочного

материала с закрытой корневой системой используют субстраты торфяно-перлитные с рН для ели европейской и сосны обыкновенной 4,0–6,0, дуба черешчатого – 5,5–6,5 [3].

Актуальная кислотность определяется в водной или солевой вытяжке. Обычно рН водной вытяжки выше рН солевой вытяжки. Величину рН первой чаще всего определяют для общей характеристики почвенной реакции [4].

Учитывая, что рН водной вытяжки – величина неустойчивая, сильно изменяющаяся в течение вегетационного периода, на практике широко проводится определение рН почвы в солевой вытяжке. Зная величину рН солевой вытяжки, можно установить дозу доломитовой муки или мела, необходимую для внесения в торфяной субстрат [2].

Существует несколько способов определения реакции почвенной среды: с помощью индикаторной бумаги, набора Н.И. Алямовского или измерение рН-метром.

При использовании индикаторной бумаги для измерения степени рН определение производится по шкале цвета. Путем соприкосновения индикаторной бумаги с хорошо влажной почвой или субстратом, бумага меняет окраску. После сравнения ее с представленной на упаковке градацией, можно узнать насколько почва или субстрат кислый, нейтральный или щелочной.

При использовании набора Н.И. Алямовского для анализа берется определенный объем почвы и метод основан на свойстве некоторых органических красящих веществ, называемых индикаторами, изменять свою окраску в зависимости от концентрации водородных ионов. Концентрация водородных ионов в полученной почвенной вытяжке определяется колориметрически, т. е. по изменению окраски в присутствии индикатора.

Вариант с использованием рН-метра – очень удобен, точен и практичен. Путем погружения в суспензию электродов прибора, можно с большой точностью определить рН.

Лабораторные методы определения кислотности торфяных субстратов требуют определенной приборной базы, которая работает от источника питания, оборудования (колбы, титровальные установки), химических растворов и обладают более высокой точностью.

Контроль за актуальной кислотностью торфов и торяных субстратов потенциометрическим методом проводится с использованием следующего оборудования и материалов: рН-метр с погрешностью измерения не более 0,02 рН, весы лабораторные с погрешностью взвешивания не более 0,01 г, сито с диаметром отверстий 1 мм, палочки стеклянные, шпатели или ложка, колбы

на 50 мл, мерный цилиндр на 25 мл, стандарт-титры для приготовления стандартных буферных растворов. Реактив необходимый для анализа: 1 н. раствор КСl [2].

Порядок выполнения анализа включает:

1. Отвесить на весах навеску торфа (субстрата), соответствующую 1 г сухого торфа (субстрата).

2. Поместить торф (субстрат) в колбу вместимостью 50 мл и добавить 25 мл 1 н. КСl. Кислотность каждой пробы определяют параллельно по двум навескам.

3. После тщательного перемешивания суспензии в течении 1–2 мин стакан с содержимым оставляют на сутки.

4. Перед измерением величины рН с помощью рН-метра прибор проверяют по стандартным буферным растворам 1,68; 3,56 и 6,88 рН. Электрод перед погружением в стандартный буферный раствор или суспензию необходимо тщательно промывать дистиллированной водой, а остатки воды с электрода удалять фильтровальной бумагой. В вымытый дистиллированной водой стакан вместимостью 50 мл заливают 25 мл стандартного буферного раствора, затем опускают в него электрод и производят измерение рН. Если показания прибора отличаются более чем на 0,04 рН от значения рН стандартных буферных растворов, необходима регулировка прибора.

5. При определении рН электрод опускают в торфяную суспензию. Значение кислотности фиксируют на приборе с точностью до 0,02 рН. Окончательные результаты испытания пробы округляют до десятых долей рН. За результат анализа принимают среднее арифметическое результатов двух определений.

Литература

1. Лабораторные и весовые системы: рН-метр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lvs.by/info/articles/kak-vybrat-ph-metr>. – Дата доступа: 27.09.2021.
2. Соколовский, И. В. Практикум по почвоведению с основами земледелия: учебно-методическое пособие для студентов специальностей 1-75 01 01 «Лесное хозяйство», 1-75 02 01 «Садово-парковое строительство» / И. В. Соколовский, А. А. Домасевич, А. В. Юрени. – Минск : БГТУ, 2016. – 184 с.
3. Материал лесной посадочный хвойных пород с закрытой корневой системой. Технические условия : ТУ ВУ 100061961.001-2015. – Введ. 2015. – Минск : МЛХ, 2015. – 6 с.
4. Торф и продукты его переработки для сельского хозяйства. Методы определения обменной и активной кислотности : ГОСТ 11623-89. – Введ. 1991-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 6 с.

УДК 621.762.4

ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСОЛЬНОЙ БАЛКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ТОРЦЕВ КОНСОЛИ

Дудяк А.И., Хвасько В.М., Сахнович А.Д.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрен вопрос напряженно-деформированного состояния консольной балки, состоящей из двух стержней и нагруженной сосредоточенной силой. В правой, подвижной по вертикали, части консольной балки концы прочно соединены между собой на небольшой длине. Установлено, что при таком способе закрепления концов консоли в зоне скрепления возникает сосредоточенный изгибающий момент. В результате этого уменьшаются максимальные нормальные напряжения в наиболее нагруженной части сечений стержней и уменьшаются прогибы сечений.

Ключевые слова: деформация, нормальное напряжение, поперечное сечение, изгибающий момент, упругая линия.

DEFORMATIONS AND STRESSES IN THE CANTILEVER BEAM DEPENDING ON THE METHOD OF ATTACHING BEAM ENDS

Dudjak A., Khvasko V., Sakhnovich A.

Belarussian national technical university
Minsk, Belarus

Annotation. The question of the stress-strain state of a cantilever beam consisting of two rods and loaded with a concentrated force is considered. In the right, vertically movable part of the cantilever beam, the ends are firmly connected to each other over a short length. It was found that with this method of fixing the ends of the cantilever, a concentrated bending moment occurs in the bonding zone. As a result, the maximum normal stresses in the most loaded part of the cross-sections of the rods decrease and the deflections of the cross-sections decrease.

Key words: deformation, normal stress, cross section, bending moment, elastic line.

Адрес для переписки: Дудяк А.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: smat@bntu.by, dudjak@mail.ru, hvasko.victoriya@gmail.com.

Рассмотрим деформацию и возникающие нормальные напряжения в поперечных сечениях консоли, состоящей из двух стержней прямоугольного сечения одинаковой высоты и ширины. Консоль состоит из двух стержней из одинакового материала, не связанных друг с другом какими-либо связями по длине. При деформации такой консоли каждый стержень изгибается самостоятельно под действием силы F (рис. 1). Внешняя сила, приходящаяся на один стержень, равна $F/2$ [1–2].

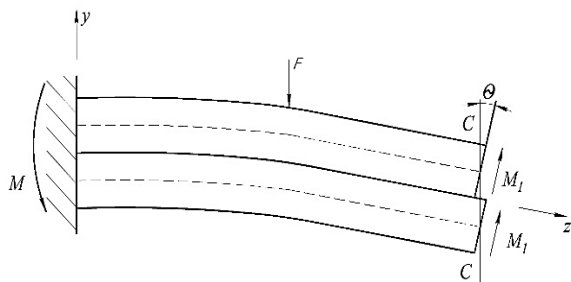


Рисунок 1 – Схема деформированной консоли

Максимальные нормальные напряжения в поперечных сечениях стержней будут равны:

$$\sigma_{max} = \frac{F \cdot l}{2W_x} = \frac{Fl}{4W_x}, \quad (1)$$

где $W_x = \frac{bh^2}{6}$ – момент сопротивления сечения одного стержня; b и h – соответственно ширина и высота прямоугольного сечения стержня.

Нейтральные слои стержней проходят через центры тяжести сечений и обозначены пунктирными линиями (рис. 1) на торцах консоли нейтральные слои будут находиться на одной вертикали $C-C$, а торцы консоли повернутся относительно нейтральных слоев на некоторый угол θ , который определяется методом начальных параметров [3]. Исходя из схемы действия сил (рис. 1) угол поворота θ определяется из выражения

$$E2J_x\theta = R \frac{l^2}{2} - M \cdot l - \frac{F(\frac{l}{2})^2}{2} = -\frac{Fl^2}{8}, \quad (2)$$

или

$$\frac{\theta}{2} = -\frac{Fl^2}{32EJ_x}. \quad (3)$$

Рассмотрим условия приведения торцев стержней в одну плоскость. Для этого необходимо на оба торца стержней воздействовать одинаковыми изгибающими моментами M_1 , которые повернут их на угол $\frac{\theta}{2}$. В результате на консоль из двух стержней будет действовать суммарный изгибающий момент $M_c = 2M_1$.

Рассмотрим методику определения изгибающего момента M_C в прочно соединенных стержнях в зоне A на конце консоли (рис. 2). В заделке будет возникать реактивный изгибающий момент M_B .

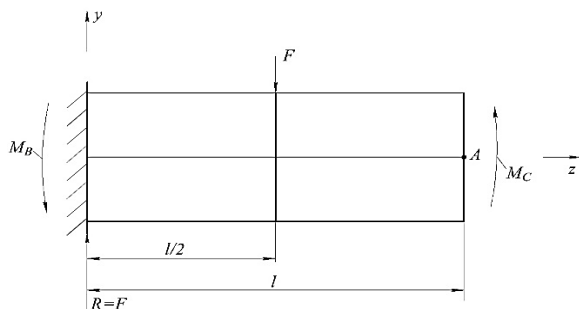


Рисунок 2 – Схема действия сил на консольную балку при прочном соединении стержней в зоне A

Статическое условие равновесия в заделке можно представить следующим уравнением

$$M_B + M_C - F \frac{l}{2} = 0. \quad (4)$$

При воздействии силы F плоскость торца сечения повернется на угол $\frac{\theta}{2}$, при таком закреплении стержней в зоне A , а торец будет представлять плоскость, образованную двумя торцами стержней. Методом начальных параметров угол поворота торца $\frac{\theta}{2}$ можно представить уравнением

$$E2J_x \frac{\theta}{2} = R \frac{l^2}{2} - M_B \cdot l - \frac{F(\frac{l}{2})^2}{2} = \left(\frac{3Fl^2}{8} - M_B l \right), \quad (5)$$

или

$$\frac{\theta}{2} = \frac{1}{2EJ_x} \left[\frac{3Fl^2}{8} - M_B l \right]. \quad (6)$$

Приравняв между собой правые части уравнений (3) и (6), будем иметь

$$\frac{1}{2EJ_x} \left[\frac{3Fl^2}{8} - M_B \cdot l \right] = - \frac{Fl^2}{32EJ_x}. \quad (7)$$

Решая уравнение (7) относительно изгибающего момента M_B получим

$$M_B = \frac{7Fl}{16}. \quad (8)$$

Рассматривая совместно полученное уравнение (8) и уравнение статического равновесия (4) будем иметь

$$M_C = \frac{Fl}{16}. \quad (9)$$

Максимальные нормальные напряжения в поперечных сечениях такой консоли будут возникать в окрестности заделки и равны

$$\sigma_{max} = \frac{M_B}{2W_x} = \frac{7Fl}{32W_x}. \quad (10)$$

Из сравнения напряжений в стержнях со свободными концами консоли (1) и с жестко закрепленными между собой концами такой же консоли (10) следует, что скрепление концов способствует снижению максимальных напряжений.

Литература

1. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – М. : Наука, 1972. – 541с.
2. Писаренко, Г. С. Сопротивление материалов / Г.С. Писаренко, А. Л. Квитка. – Киев: Техника, 1967. – 783 с.
3. Татур, Г. К. Общий курс сопротивления материалов / Г. К. Татур. – Минск : Высшэйшая школа, 1974. – 462 с.

УДК 615.837:615.47

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ИНГАЛЯЦИИ

Дупляк И.О., Терещенко Н.Ф.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина

Аннотация. Автоматизированные системы комплексной ингаляции (АСКИ), это системы ингаляторного типа с дезинфицирующими свойствами вдыхаемого воздуха, использующие различные методы воздействия на человеческий организм. Лучше всего исследованными, являются системы озонирования и создание синглетного кислорода. Лечебными признанные – сиглентний кислород и распыленные лекарственных средства в газовой смеси. Рассматривается новейший принцип построения систем ингаляции, воплощенный на практику, с улучшенной структурно-аппаратной частью и расширенными функциональными возможностями, относительно аналогов. Это достигается за счет введения различных воздействий на дыхательную систему, введение адаптивной системы воздействия и автоматизированного модуля, контролирующего параметры: температуры (градиентов температуры), дисперсности, количества и состав газовой смеси и лекарственных средств, после задания режима воздействия. Обзор рынка, экспериментальные и теоретические исследования показали необходимость и актуальность систем данного типа, использующих оптимальный комплекс воздействий.

Ключевые слова: озонирование, синглетний кислород, комплексное воздействие, автоматизированный модуль, карточка пациента.

AUTOMATED INTEGRATED INHALATION SYSTEM

Duplyak I., Tereshchenko N.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kiev, Ukraine

Abstract. Automated complex inhalation systems (ACIS) are inhalation-type systems with disinfecting properties of inhaled air, using various methods of exposure to the human body. The best researched are the ozonation systems and the creation of singlet oxygen. Recognized as medicinal: active oxygen and nebulized medicinal products in a gas mixture. The newest principle of construction of inhalation systems, implemented into practice, with an improved structural and hardware part and expanded functional capabilities, relative to analogs, is considered. This is achieved through the introduction of various effects on the respiratory system, the introduction of an adaptive exposure system and an automated module that controls the parameters: temperature (temperature gradients), dispersion, quantity and composition of the gas mixture and drugs, after setting the exposure mode. Market review, experimental and theoretical studies have shown the necessity and relevance of systems of this type, using the optimal complex of influences.

Key words: ozonation, singlet oxygen, complex action, automated module, patient card.

Адрес для переписки: Дупляк И.О., ул. Академика Янгеля, 7, г. Киев 03056, Украина
e-mail: agfarkpi@i.ua

Актуальность. В течение последних лет актуальной проблемой являются вирусные заболевания, а именно главной и наиболее шокирующей есть распространение вируса COVID-19. Для его локализации и нужен эффективный способ профилактики и лечения дыхательных путей человека, предварительно обеззаразив, тем самым подготовив их к дальнейшей процедуре. Именно для таких целей разрабатывается автоматизированная система комплексной ингаляции обогащенной озоном и лекарствами пароводяной синглетной смесью [1].

Основные принципы действия. Первоначальным воздействием являются озонирование – способ очистки и обеззараживания, основанный на использовании газа озона. Далее образуется синглетный кислород и его смеси (в том числе и с лекарственными препаратами), что является активированной формой обычного кислорода, который имеет доказанный положительный эффект [2]. Также не менее важную роль в функционировании системы играет автоматизация проведения данных процедур при помощи систем смарт-карт, что заключается в использовании введенных данных со специальных карточек пациента. Карточка на которой указаны настройки параметров (может использоваться для определенного количества процедур и пациентов), и датчиков, с помощью которых выполняется сбор показателей во время процедуры. В комплексе выполняется динамическая подстройка режима влияния под пациента [3].

Структура системы. Структурно система состоит с двух больших блоков: Электронный блок и камера активации.

В составе Электронного блока находится автоматизированный электронный блок управления, основной модуль управления системой, который передает управляющие импульсы всем ответственным блокам; оптический излучатель и

постоянный магнит – первоначальное создание синглетного кислорода; насос, нагреватель и распылитель – блоки транспортировки и контроля смеси. Также в электронный блок входит камера активации – электромагнит и ультрафиолетовый (уф) излучатель (поддержание синглетного кислорода); озонатор (обеззараживающее влияние). Эти три элемента соединены с кварцевой кюветой, в которой дополнительно поддерживается жизненный цикл активированного кислорода [4] (рис. 1).

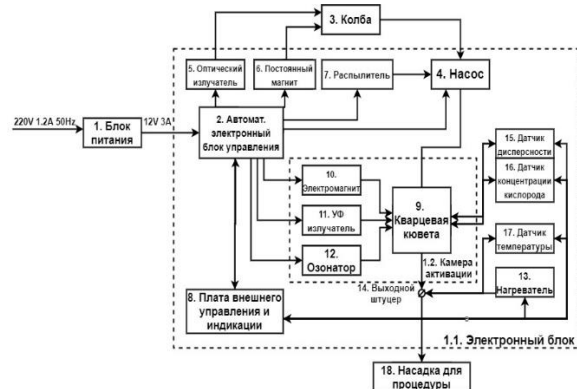


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированной системы комплексной ингаляции

С рис. 1 еще можно выделить блок датчиков: Датчики дисперсности, Датчики концентрации кислорода и Датчики температуры.

К внешним элементам относятся: Колба, плата внешнего управления и индикации, выходной штуцер (рис. 2) и насадка для процедуры. Блок питания является внешним элементом, но может быть изменен на другой (доступен), поэтому не представлен на рис. 2.

Принцип работы. После включения системы в сеть приводится в действие автоматизированный электронный блок управления, в зависимости от вставленной смарт-карты в плату внешнего

управления активируется оптический излучатель, распылитель, насос, электромагнит, УФ излучатель, озонатор и нагреватель, во время того как смесь движется по схеме: колба – насос – кварцевая колба – выходной штуцер – насадка для процедуры. Датчики измеряют параметры дисперсности, уровень кислорода, температуру, передают их на внешнюю плату контроля и в блок управления, и корректируют параметры процедуры при необходимости.

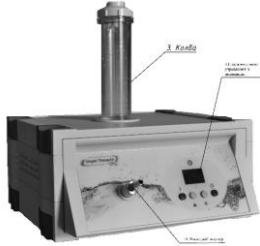


Рисунок 2 – Внешний вид экспериментальной модели автоматизированной системы комплексной ингаляции (без старт-карт системы)

Результаты работы. Была разработана автоматизированная система комплексной ингаляции, которая включает в себя несколько режимов. Режимы могут быть как полностью автоматизированными, так и динамично меняющимися. Система может использовать в комплексе один или несколько основных принципов действия, тем самым разносторонне влиять на дыхательную систему и воздушные пути.

УДК 537.86.029

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ АНТЕННЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ

Евсюк Е.А.¹, Гуревич В.Л.², Серенков П.С.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный институт метрологии
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В докладе дан комплексный анализ специфических особенностей применения измерительных антенн, их основных видов, характеристик. Предложен подход и методика выбора типа антенн для проведения аттестации полубезэховых камер.

Ключевые слова: измерительная антенна, калибровочная лаборатория, полубезэховая камера.

MEASURING ANTENNAS, THEIR CHARACTERISTICS AND APPLICATION

Evsuk E.¹, Hurevich V.², Serenkov P.¹

¹Belarusian national technical university

²Belarusian state institute of metrology
Minsk, Belarus

Abstract. The report gives a comprehensive analysis of the specific features of the use of measuring antennas, their main types, characteristics. An approach and a technique for choosing the type of antennas for the certification of semi-anechoic chambers are proposed.

Key words: measuring antenna, calibration laboratory, semi-anechoic chamber.

Адрес для переписки: Евсюк Е.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: evsyuk.evgenii@mail.ru

Литература

1. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія / М. Ф. Терещенко [и др.]. – Київ. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, «Політехніка», 2018. –184 с.
4. Тимчик, Г. С. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора / Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко, А. М. Матвиенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ», 2017. – № 4. – С. 121–130.
5. Матвиенко, А. Н. Исследование теплопроводности неоднородных биологических растворов методом прямого разогрева термистора / А. Н. Матвиенко, Н. Ф. Терещенко, С. Н. Матвиенко // Приборостроение–2017 : материалы 10 международной научно-технической конференции, 1–3 ноября 2017 года, Минск, Республика Беларусь / Белорусский национальный технический университет ; редкол. : О. К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2017. – С. 50–51.
6. Дупляк, І. О. Система інгаляції і очищення із збагаченою озоном та ліками пароводяною сумішшю / І. О. Дупляк, М. Ф. Терещенко, М. В. Чухраєв // Приладобудування: стан і перспективи : збірник матеріалів XX міжнародної науково-технічної конференції, ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 18–19 травня 2021 р., Київ, Україна, 2021. – С. 109–112
7. Копищик, В. В. Влияние ультразвуковых колебаний на функциональное состояние кожи / В. В. Копищик, Н. Ф. Терещенко // Новые направления развития приборостроения : материалы 12 международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 17–19 апреля 2019 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол. : О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 5–6.

В современном мире, антенны имеют важнейшую роль в организации связи, звукового и телевизионного вещания, в построении беспроводных сетей общего пользования, не говоря уже о специализированных системах связи, например, в авиации, военном применении. Также существуют измерительные антенны, используемые в калибровочных и поверочных лабораториях, также в испытательных лабораториях, например, для измерений параметров электромагнитной совместимости. С применением таких антенн осуществляется государственный надзор за электросвязью, дабы обеспечить охрану радиочастотного спектра и его эффективное использование. Актуально их применение и для измерения эффективности экранирования помещений, при аттестации измерительных площадок, в том числе полубезэховых и безэховых экранированных камер. На основании проанализированных данных в этой статье, будут сделаны выводы по выбору конкретного типа антенн для аттестации полубезэховых камер.

Измерительная антенна – антенна, основные технические характеристики которой регламентированы с определенными погрешностями. Измерительные антенны являются самостоятельными приборами широкого применения, позволяющими работать с различными измерителями и источниками сигналов.

В наше время в антенных измерениях чаще всего используют следующие типы измерительных антенн: штыревые, рамочные, дипольные, биконические, логопериодические, рупорные антенны. Каждые из них имеют свои характеристики, применяются в своих частотных диапазонах. Далее мы остановимся конкретно на каждом типе антенн.

Штыревые антенны представляют собой металлический вертикальный стержень, составленный из нескольких частей (колен) обычно длиной от 20 до 100 см. Обычно используется как в качестве приемной, так и излучающей антенны. Рабочий диапазон частот 9 кГц–300 МГц.

Рамочные антенны – направленные антенны, выполненные в виде одного или нескольких плоских витков провода, образующих рамку круглой, квадратной или прямоугольной формы. Периметр рамки в большинстве случаев весьма мал по сравнению с длиной рабочей волны, однако есть исключения, например при испытаниях на электромагнитную совместимость (ЭМС) светового оборудования используются трехкоординатные рамочные антенны диаметром 2 метра. Обычно используются в качестве приемной антенны. Рабочий диапазон частот рамочных антенн 9 кГц–400 МГц.

Дипольные антенны состоят из двух одинаковых проводников, проводов или стержней, обычно с двусторонней симметрией. Дипольные

элементы могут быть переменной длины (телекопические) или с фиксированной длиной, особенно на частотах выше 1 ГГц. Доступны в диапазоне частот от 30 МГц до 4 ГГц.

Биконические антенны обычно имеют форму песочных часов, состоят из двух частей, непосредственно самой антенны и съемных биконических элементов (балунов). Типичное применение такого типа антенн: измерение электромагнитного излучения от испытуемого образца (например, при испытаниях на ЭМС), устойчивости образца к электромагнитному полю, измерение эффективности экранирования помещений, аттестация измерительных площадок, в том числе полубезэховых камер. Рабочий диапазон частот биконических антенн 20 МГц–18 ГГц.

Логопериодические антенны тип широкополосных антенн, который способен принимать и передавать сигнал в широком диапазоне частот и характеризующийся независимостью электрических свойств от рабочей частоты. Такое название данный тип антенн получил благодаря структуре с логарифмической периодичностью. Существует множество вариантов конструкции логопериодических антенн: с симметричными и несимметричными вибраторами, с Г-образными вибраторами, с треугольными или закругленными зубцами. Такое многообразие вариантов логопериодической антенны обусловлено возможностями модификации при создании конструкции для достижения необходимых требований. Рабочий диапазон частот логопериодических антенн 20 МГц–20 ГГц.

Рупорные антенны. Существует несколько видов рупорных антенн самыми распространенными из них являются секторальные, пирамидальные и конические. Секторальные в свою очередь бывают Е-плоскостными и Н-плоскостными. Рупорная антенна применяется главным образом в тех случаях, когда не требуется острая диаграмма направленности и когда антенна должна быть достаточно диапазонной. Большая диапазонность рупорных антенн и простота конструкции являются существенными достоинствами этого типа антенн СВЧ, благодаря которым они находят широкое применение в технике антенных измерений и измерений характеристик электромагнитного поля. Рабочий диапазон частот рупорных антенн 200 МГц–40 ГГц.

Вывод. Исходя из ГОСТ CISPR 16-1-4-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения», а также из доступных измерительных антенн были выбраны следующие антенны: в диапазоне частот 30 МГц–200 МГц пара антенн VNBV 9124 с биконическими элемен-

тами ВВА 9106 производства Schwarzbeck, Германия; в диапазоне частот 200 МГц–1 ГГц пара логопериодических антенн VULP 9118А, так же производства Schwarzbeck, Германия; в диапазоне частот 1 ГГц–18 ГГц рупорная антенна ETS 3115 производства ETS-Lindgren, США.

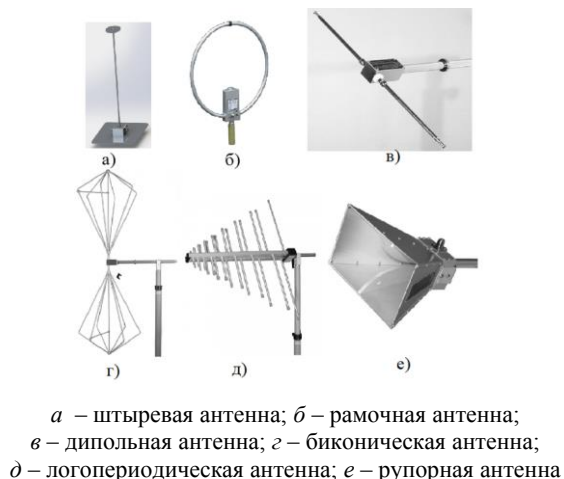


Рисунок 1 – Основные виды антенн

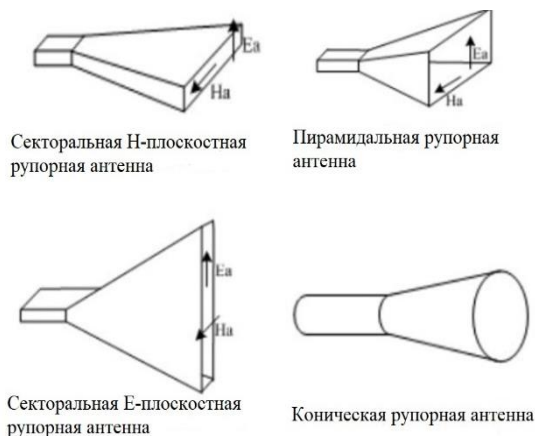


Рисунок 2 – Виды рупорных антенн

Литература

1. Совместимость технических средств электромагнитная. Требования к аппаратуре для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости и методы измерений. Часть 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. Антенны и испытательные площадки для измерения : ГОСТ CISPR 16-1-4-2013.

УДК 621.039

ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Коновалов И.А., Чесноков А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринов А.А., Зырянова Т.К.

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
Ниžний Новгород, Российская Федерация*

Аннотация. Работа посвящена изучению движения одиночного газового пузыря в жидкости с применением метода матричной кондуктометрии. Изложена методика обработки первичных экспериментальных данных, а также произведена оценка величины плотности межфазной поверхности, имеющей важное значение при численном моделировании многокомпонентных потоков. Результаты, полученные при помощи кондуктометрической измерительной системой хорошо согласуются со значениями альтернативных методов измерений.

Ключевые слова: кондуктометрия, пузырьковое течение, многокомпонентный поток.

INVESTIGATION OF MULTICOMPONENT FLOWS WITH APPLICATION OF CONDUCTOMETRY MEASUREMENT SYSTEM

Kononov I., Chesnikov A., Dmitriev S., Khrobostov A., Barinov A., Zyryanova T.

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev
Nizhny Novgorod, Russia*

Abstract. This report is about studying of motion of lonely gas bubble in liquid with application of matrix conductometry method. Methodology of processing the primary experimental data and estimation of interfacial area density, which is important in numerical simulation of multicomponent flows are shown. Results of a conductometry method is in good agreement with results of an alternative methods of measurements.

Key words: conductometry, bubble flow, multicomponent flow.

*Адрес для переписки: Коновалов И.А., ул. Минина, 24, г. Ниžний Новгород, 603950, Российская Федерация
e-mail: iliakonowaloff@yandex.ru*

Обеспечение надежности, безопасности и эффективности новых энергетических установок является важной задачей, стоящей перед совре-

менным атомным машиностроением, что, в свою очередь, требует проведения предварительного расчетного обоснования.

В судовых установках и некоторых российских проектах атомных станций малой и средней мощности применяется газовая система компенсации давления, что влечет за собой растворение газовой фазы в теплоносителе первого контура. При нормальных условиях работы установки концентрация растворенного газа в компенсаторе давления и теплоносителе приходят к некоторому стационарному распределению, однако, при маневрировании либо при аварийных режимах работы, связанных с изменением параметров теплоносителя, происходит выделение газовой фазы, вследствие смещения точки насыщения. Данный процесс выделения газовой фазы может приводить к различным нарушениям в работе оборудования первого контура, что требует при проведении расчетного обоснования дополнительных исследований, которые учитывают наличие двухкомпонентных течений.

Их исследования требуют решения обширного количества расчетных и экспериментальных задач, одной из которых является разработка и создание новых методов измерения межфазной поверхности, которая необходима при вычислениях потоков массы и энергии через границу раздела [1–2]. В тоже время, в исследовательской практике для изучения гидродинамических характеристик потоков широкое распространение получил метод матричной кондуктометрии [3], позволяющий получить хорошую временную и пространственную дискретизацию показаний по измерительному сечению в экспериментальной модели.

Таким образом, целью данной работы являлось изучение особенностей движения газового пузыря в жидкой среде, а также отработка методических особенностей применения матричных кондуктометрических систем для исследования газожидкостных потоков.

Экспериментальные исследования проводились с использованием двухслойного сетчатого датчика (СД), установленного в вертикальный канал квадратного сечения 50x50 мм и системы инъекции газовой фазы, которая позволяет создавать газовый пузырь диаметром порядка 4-х измерительных ячеек (20 мм) в поперечном сечении. Экспериментальные данные включали в себя реализации показаний удельных проводимостей (УЭП) среды в измерительных ячейках СД, результаты видеofиксации отрыва и всплытия пузыря, а также объем подведенной газовой фазы, в качестве которой использовался атмосферный воздух.

Анализ экспериментальных данных позволил выявить образование избыточной УЭП при прохождении газового пузыря, вызываемой нарушением симметрии электромагнитного поля измерительной ячейки вследствие значительной разности проводимостей жидкой и газовой фаз в момент, когда газовый пузырь занимает ячейку не полностью [4]. Используемый в ходе анализа экспериментальных данных метод перебалансировки проводимостей позволил снизить влияние указанного явления на вычисляемые значения газосодержания. Ввиду того, что формирование заброса проводимости в действительности вызвано влиянием сложной совокупности ячеек датчика, совершенствование методик, направленных на устранение этих забросов, представляет собой актуальную задачу для дальнейших исследований в этой области и может быть связано, в частности, с применением аппроксимационных алгоритмов на основе сверточных нейронных сетей, хорошо адаптированных к работе с данными в матричном виде.

В результате применения метода перебалансировки проводимостей к экспериментальным данным УЭП были получены значения истинного объемного газосодержания в измерительных ячейках двухслойного сетчатого датчика. Помимо этого, производилась оценка скорости всплытия одиночных пузырей по данным датчиков и видеокамеры, которые находят приемлемое согласие друг с другом.

Полученные величины были использованы для определения значения площади межфазной поверхности, а также объемов одиночных пузырей градиентным методом, что позволило произвести сравнение балансных значений расхода газа по показаниям сетчатых датчиков и штатных контрольно-измерительных приборов, по результатам которого получено хорошее соответствие.

Литература

1. Kataoka, I. Local formulation and measurements of interfacial area concentration in two-phase flow / I. Kataoka, M. Ishii, A. Serizawa // *International Journal of Multiphase Flow*. – 1986. – Vol. 12. – P. 505–529.
2. Hibiki, T. Two-group interfacial area transport equations at bubbly-to-slug flow transition / T. Hibiki, M. Ishii // *Nuclear Engineering and Design*. – 2000. – Vol. 202. – P. 39–76.
3. Экспериментальные исследования процессов турбулентного смешения в основном оборудовании ЯЭУ / С. М. Дмитриев [и др.] // ВАНТ. серия: Ядерно-реакторные константы. – 2018. – С. 3–11.
4. Prasser, H. M. Improvement of Topflow Void Fraction Data Using Potential Field Simulation of the Wire-Mesh Sensor / H. M. Prasser, B. Matthias, L. Dirk // *SWINTH-201*, 2019. – Vol. 35.

УДК 617.71

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ САТУРАЦИИ Кравцова В.С., Габец В.Л.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе представлены средства и методы измерения сатурации. Она показывает процентное содержание кислорода в крови. Одним из таких средств является пульсоксиметр. Данный прибор на сегодняшний день наиболее распространен. В статье рассмотрены разновидности устройств, описано как они работают, основные элементы пульсоксиметра и погрешности при измерении. Также приведены рекомендации по уменьшению погрешностей.

Ключевые слова: средства измерения, сатурация, гемоглобин, пульсоксиметр.

TECHNICAL MEANS FOR DETERMINING SATURATION Kravtsova V., Habets V.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The article presents the means and methods of measuring saturation. It shows the percentage of oxygen in the blood. One of these tools is a pulse oximeter. This device is by far the most common. The article discusses the types of devices, describes how they work, the main elements of the pulse oximeter and measurement errors. There are also recommendations for preventing errors.

Key words: measuring instruments, saturation, hemoglobin, pulse oximeter.

Адрес для переписки: Габец В.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vgabets@bntu.by

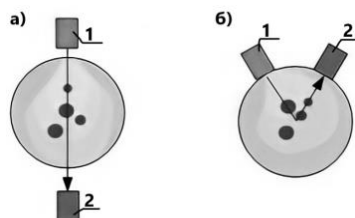
В настоящее время актуальной проблемой является выявление симптомов COVID-19 на ранней стадии его развития. Одним из таких способов является измерение сатурации.

Сатурация – это процент насыщения крови кислородом в момент измерения. В табл. 1 показаны степени кислородной недостаточности относительно показаний сатурации.

Таблица 1. Степени кислородной недостаточности

Степень	Сатурация, %
Норма	более или равно 95%
1 степень	90–94 %
2 степень	75–89 %
3 степень	менее 75 %
Гипоксимическая кома	менее 60 %

Наиболее распространенное средство измерения – пульсоксиметр. В клинической практике применяются трансмиссионные пульсоксиметры, которые работают на просвет ткани, и рефракционные, работающие на отражение света от ткани. Данные методы показаны на рис. 1.



а – трансмиссионный; б – рефракционный
1 – излучатель; 2 – детектор

Рисунок 1 – Разновидности пульсоксиметров

Еще широкое распространение нашел портативный компьютерный пульсоксиметр, показанный на рис. 2. Он может регистрировать сатурацию и пульс за длительный промежуток времени, а также хранить и обрабатывать сохраненные данные [1].



Рисунок 2 – Компьютерный пульсоксиметр

В смарт-часах измерение сатурации производится по такому же принципу, как и в пульсоксиметрах, но они проводят измерение на запястье и такой способ измерения является менее точным [2].

При измерении сатурации смартфоном следует учитывать, что используемые приложения, показывают недостоверные значения. Базовые мобильные технологии не способны точно определить уровень кислорода в крови [3].

Принцип работы пульсоксиметра основан на способности гемоглобина, связанного (HbO₂) и не связанного (Hb) с кислородом, поглощать свет различной длины волны. Данное явление показано на рис. 3 [1]. Связанный гемоглобин больше поглощает инфракрасный свет, а не связанный – красный свет.

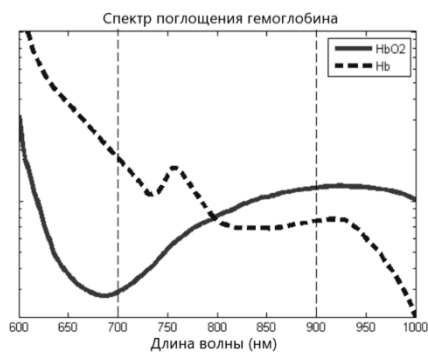


Рисунок 3 – Спектр поглощения связанного и не связанного гемоглобина

В пульсоксиметре установлены два светодиода, которые излучают красный и инфракрасный свет. На противоположной части датчика располагается фотодетектор, который определяет интенсивность подающего на него светового потока. На рис. 4 схематично показано расположение элементов пульсоксиметра.



Рисунок 4 – Устройство пульсоксиметра

Измеряя разницу между количеством света, абсорбируемого во время систолы и диастолы, пульсоксиметр определяет величину артериальной пульсации [4]. Сатурация рассчитывается как соотношение количества HbO_2 к общему количеству гемоглобина, выраженное в процентах:

$$\text{SpO}_2 = \left(\frac{\text{HbO}_2}{\text{HbO}_2 + \text{Hb}} \right) \times 100 \%$$

Разработан также метод измерения сатурации, который заключается в анализе светового потока, отраженного тканями [5]. Однако устройства, работающие по данному методу мало распространены.

Погрешности, которые могут возникнуть при измерении сатурации и частоты пульса можно разделить на две условные группы: погрешности, заложенные в самом принципе измерения, и погрешности в его технической реализации [5].

Рассмотрим основные факторы, которые могут оказать отрицательное влияние на определение сатурации.

Неправильное расположение датчика. При изменении положения датчика происходит резкое повышение сатурации. Этот эффект может быть связан с непостоянным кровотоком через пульсирующие кожные вены [1].

Наполнение пульса. Пульсоксиметр распознает только пульсирующий кровоток. При низком артериальном давлении из-за снижения сердечного выброса или аритмии пульс может быть очень слабым, и чувствительности прибора будет недостаточно [6].

Вазоконстрикция. Пульсоксиметр может не определить сигнал, если конечности холодные и присутствует сужение периферических сосудов [6].

Помимо вышеперечисленных факторов, отрицательное влияние также могут оказывать: яркий свет, движения, отравление угарным газом, красители, включая лак для ногтей. Однако следует отметить, что возраст, пол, желтуха и темный цвет кожи не влияют на работу пульсоксиметра [4].

Существует несколько рекомендаций для предотвращения возникновения погрешности:

1. Рука должна быть теплой и расслабленной;
2. Датчик пульсоксиметра должен находиться у основания ногтя;
3. Для более точных результатов следует стереть лак с ногтей или убрать накладные ногти;
4. Во время измерения не двигаться, неправильный угол падения света может повлиять на результат.

У парализованных больных пульсоксиметр-прищепка занижает сатурацию. Для них нужен пульсоксиметр с клеящимися электродами [7].

Литература

1. Лопухин, С. Л. Компьютерная пульсоксиметрия в диагностике нарушений дыхания во сне: уч. пособие / С.Л. Лопухин [и др.]. – Ижевск : ГБОУ ВПО «ИГМА», 2013. – 3 с.
2. Мурзина, Л. Измерение кислорода в крови умными часами: как это работает и можно ли доверять результатам [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.dgl.ru/articles/izmerenie-kisloroda-v-krovi-umnymi-chasami-kak-eto-rabotaet-i-mojno-li-doveryat-rezultatam_18425.html. – Дата доступа: 02.10.2020.
3. Гришанков, В. Измерение кислорода (SpO_2) в крови телефоном – что нужно знать? [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://androidlime.ru/measurement-of-blood-oxygen-by-telephone>. – Дата доступа: 17.05.2020.
4. Диагностические возможности неинвазивного мониторинга насыщения гемоглобина артериальной крови кислородом в клинике внутренних болезней: методические рекомендации / Д. В. Лапицкий [и др.]. – Минск : БГМУ, 2015. – 71 с.
5. Шурьгин, И. А. Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия / И. А. Шурьгин. – СПб : «Невский диалект», 2000. – 301 с.
6. Pulse oximetry: training material. – Geneva WHO, 2009. – P. 24.
7. Шабуцкая, Е. Как правильно измерять сатурацию пульсоксиметром [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://journal.tinkoff.ru/pulse-oximetry>. – Дата доступа: 15.09.2021.

УДК 621.31.36

ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Коробко Ю.С., Кравченко А.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены актуальные вопросы калибровки средств измерения температуры. Предложена квалиметрическая модель организации калибровки средств измерения температуры. На базе разработанной модели предложен вариант реализации оптимального рабочего места для проведения калибровок, проведено исследование и поддержание его на всех этапах жизненного цикла.

Ключевые слова: температура, измерение, калибровка, метод калибровки, рабочее место калибровщика.

OPTIMIZATION OF WORKSPACE OF TEMPERATURE MEASURING TOOLS CALIBRATION

Korobko Yu., Kravchenko A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Topical issues of calibration of temperature measuring instruments are considered. A qualimetric model for organizing the calibration of temperature measuring instruments is proposed. A variant of the implementation of an optimal workplace for carrying out calibrations on the basis of the developed model was proposed, a study was carried out and its maintenance at all stages of the life cycle.

Key words: temperature, measurement, calibration, calibration method, calibrator workplace.

Адрес для переписки: Коробко Ю.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: korobko.u@bntu.by

Такие понятия, как «температура», «измерение температуры», «термометры» прочно вошли в жизнь и деятельность современного человека. С этими понятиями мы сталкиваемся ежедневно: в быту, в медицинских учреждениях, на производстве, при проведении научных исследований, в измерительных лабораториях и т.п. При этом парк средств измерения температуры – термометров, очень огромен. Они отличаются как своим устройством, принципами работы и методами измерений, так и разнообразием диапазонов измерения температур и точностью измерений. Сегодня востребованный диапазон температур измерений находится в пределах от сверхнизких (0–4.2 К), до сверхвысоких (выше 5000 К), а требуемая точность измерения доходит до сотых и тысячных долей градуса. Для обслуживания такого многочисленного парка средств измерений температуры - проведения операций по их метрологической оценке, требуется наличие большого числа разнообразных специфических испытательных лабораторий со своим оборудованием и квалифицированным персоналом, аккредитованных для обслуживания конкретного типа приборов.

В докладе предлагается рациональное решение вопросов калибровки различного рода термометров на базе доступного лабораторного оборудования и квалифицированного персонала. При этом охватываемый парк обслуживаемых средств измерения температуры довольно широк. Предлагаемая квалиметрическая модель рабочего места калибровщика и возможные ме-

тоды калибровки позволяют разработать варианты рабочих мест и обеспечить их обслуживание на всех этапах жизненного цикла.

Вначале, для решения этой задачи, исследуются и предлагаются алгоритмы изучения конъюнктуры наиболее востребованных для применения средств измерения температуры различных типов и назначений, а также алгоритмы анализа требований современной нормативно-технической документации относительно организации и проведения их поверки и калибровки. Средства измерения температуры систематизируются по принципу действия, назначению и конструкции, определяются необходимое эталонное оборудование и методы калибровки, а также требования для персонала (калибровщиков). Исследуются диапазоны применения средств измерения температуры, их точностные характеристики, прогнозы на дальнейшее использование и т.п.

Исходя из этой и любой другой доступной информации разрабатываются и предлагаются квалиметрические модели организации калибровок, обосновываются требования к условиям и порядку их проведения, а также к обслуживающему персоналу. В результате анализа этих моделей, методов и средств измерений предлагаются варианты реализации оптимальных рабочих мест калибровщиков, разрабатываются методики калибровки, которые могут послужить основой для разработки нормативно-технической документации.

Должное внимание в уделено вопросам исследования жизненных циклов разработанных рабочих мест калибровщика средств измерения температуры.

На этапе планирования конкретного рабочего места была рассмотрена вся возможная совокупность параметров и требований, предъявляемых к его реализации при данных условиях применения, и выделенные ключевые (метрологические, эксплуатационные, технические, экономические и др.), определяющие его структуру.

Эти параметры легли в основу формирования следующего этапа жизненного цикла – разработки рабочего места, в результате чего было разработано его техническое описание с требуемыми характеристиками и материальное воплощение.

Важным этапом жизненного цикла предлагаемого рабочего места калибровщика является метрологическое подтверждение его пригодности к применению. При этом предлагаются модели подтверждения пригодности как методик калибровки, так и самого рабочего места.

Для поддержания рабочего места в рабочем состоянии в ходе эксплуатации необходимо осуществлять мониторинг его характеристик, что позволяет получать информацию о его текущем состоянии, в том числе информацию о потере заданных характеристик. В случае получения данных, показывающих ухудшение характеристик рабочего места и нарушении его нормального функционирования, следует провести анализ с целью выявления причин, приведших к несоответствию требованиям. В качестве инструмента анализа предлагается использовать дисперсионный анализ.

Решение рассмотренных вопросов позволит изменить подходы к методологии метрологиче-

ской оценки средств измерения температуры, поставить вопрос поверки и калибровки на более качественный уровень, обеспечить более эффективную работу калибровочных лабораторий, сэкономить затраты.

Литература

1. Дивин, А. Г. Средства измерения температуры, оптических и радиационных величин. Часть 3: учебное пособие / А. Г. Дивин, С. В. Пономарев. – Тамбов : ФБГОУ ВПО «ТГТУ», 2013. – 116 с.
2. Об утверждении Правил осуществления метрологической оценки в виде работ по калибровке средств измерений. Постановление государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 23 апреля 2021 г. № 42.
3. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Поверка средств измерений. Правила проведения работ : ТКП 8.003-2011 (03220).
4. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные положения и определения : СТБ ИСО 5725-1.
5. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-2.
6. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода : СТБ ИСО 5725-3.
7. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений : СТБ ИСО 5725-4.
8. Системы менеджмента. Менеджмент измерений. Анализ измерительных систем : СТБ 2450-16.
9. Государственная поверочная схема для средств измерений температуры : ГОСТ 8.558.
10. Система обеспечения единства измерений Республики Беларусь. Калибровка средств измерений. Организация и порядок проведения» : СТБ 8014.

УДК 539.533

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ

Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А., Хабарова А.В., Трухан Р.Э.

ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Описана методика определения вязкости разрушения для керамики, в том числе и для отдельных ее фаз, методом индентирования с визуализацией области деформации при помощи атомно-силового микроскопа. Обоснован выбор формул для расчета критического коэффициента интенсивности напряжений, характеризующего вязкость разрушения.

Ключевые слова: методика, вязкость разрушения, критический коэффициент интенсивности напряжений, керамика, атомно-силовая микроскопия, наноиндентирование.

METHOD FOR DETERMINING THE FRACTURE TOUGHNESS OF CERAMICS

Lapitskaya V., Kuznetsova T., Chizhik S., Habarova A., Trukhan R.

A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. A method for determining the fracture toughness for ceramics, including for its individual phases, by indentation with visualization of the deformation region using an atomic force microscope is described. The choice of formulas for calculating the critical stress intensity coefficient characterizing the fracture toughness is justified.

Key words: methodology, fracture toughness, critical stress intensity coefficient, ceramics, atomic force microscopy, nanoindentation.

Адрес для переписки: Лапцкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Одним из параметров, характеризующих предельное состояние любого твердого материала, является трещиностойкость или вязкость разрушения, т.е. способность сопротивляться развитию трещин [1–5]. Данный параметр чрезвычайно актуален для различных видов керамик (карбидной, оксидной, нитридной) и покрытий [6] на их основе, сочетающих в себе особые физико-механические, теплофизические, биоинертные, антиокислительные и износостойкие свойства [1–5]. Количественно вязкость разрушения характеризуется критическим коэффициентом интенсивности разрушения K_{IC} . Существует множество способов для количественного определения данной характеристики. Все они различаются методами и схемами приложения нагрузки: изгиб, кручение, индентирование и др. [1].

Одним из методов, который будет рассматриваться в данной работе, является метод индентирования. Проблема в ограничении применимости данного метода заключается в использовании больших нагрузок (от 1 Н и более), которые невозможно применять к отдельным фазам материала или к покрытиям. А при применении меньших нагрузок (меньше 1 Н) стоит задача точно визуализировать область деформации и формирующиеся трещины, чего не могут обеспечить оптическая и сканирующая электронная микроскопии. Предлагаемый в данной работе метод атомно-силовой микроскопии для визуализации области деформации с высокой точностью позволит существенно расширить возможности применения метода индентирования для определения вязкости разрушения, вплоть до отдельных фаз в материале и отдельных элементов МЭМС.

Целью работы являлось разработать методику определения вязкости разрушения для керамики, в том числе и для отдельных ее фаз, методом индентирования с визуализацией области деформации при помощи атомно-силового микроскопа.

Разработанная методика вязкости разрушения керамики основана на методе индентирования алмазной пирамидой Виккерса в поверхность образцов под заданной нагрузкой [7]. Отпечатки индентирования на образцах выполняются с по-

мощью микротвердомера. В качестве индентора используется алмазный наконечник типа Виккерс. Нагрузка на индентор может изменяться от 0,01 до 5,0 Н в зависимости от материала и размера образца. Расстояние между отпечатками должно составлять не менее четырех диагоналей отпечатка. При каждой нагрузке требуется выполнять не менее трех отпечатков по схеме «3 сек. внедрение индентора – далее 10 сек. выдержка под нагрузкой – затем 3 сек. разгрузка».

Визуализация области деформации (отпечатка индентирования) проводится с помощью атомно-силового микроскопа. По полученным АСМ-изображениям определяют следующие параметры, требуемые для расчета K_{IC} : диагонали отпечатка d , длину трещин из центра отпечатка c , длину трещины возле отпечатка l . Длина полудиагонали a определялась как $d/2$.

Выбор правильного подхода и формулы расчета K_{IC} зависит от вида формирующихся трещин возле отпечатка индентирования и отношения длины трещины c , измеренной из центра отпечатка индентирования, к длине полудиагонали отпечатка a . Также значение K_{IC} существенно зависит от формулы, по которой проводятся расчеты.

В работе [8] установлено, что наиболее точными значения получаются по формулам, в которые входят параметры, как и самого отпечатка индентирования (длина диагоналей d) и длина образованных трещин l и c , так и параметры, характеризующие материал (микротвердость H_V и модуль упругости E). Наиболее подходящими являются формулы, полученные Ниихара К. [9]:

$$K_{IC} = 0.048 \left(\frac{l}{a}\right)^{-\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{H_V}{E\Phi}\right)^{-\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{H_V a^2}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$K_{IC} = 0.129 \left(\frac{c}{a}\right)^{-\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{H_V}{E\Phi}\right)^{-\frac{2}{5}} \cdot \left(\frac{H_V a^2}{\Phi}\right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости, ГПа; H_V – твердость по Виккерсу, ГПа; P – нагрузка на индентор, Н; Φ – показатель реакции связи в кристаллической решетке ($\Phi \approx 3$); c – длина трещины из центра

отпечатка, м; l – длина трещины возле отпечатка, м; a – длина полудиagonали отпечатка, м.

Условие выбора формулы из приведенных выше зависит от отношения c/a : если $c/a < 2,5$, то в образце образуются трещины Палмквиста и расчет проводят по формуле (1), а если $c/a > 2,5$, то в образце образуются медианные трещины и расчет проводят по формулам (2) [9].

При определении величины K_{IC} наибольшую ошибку может внести погрешность при определении длины трещины. Неточность в длине трещины в 200 нм приводит к погрешности в K_{IC} на кремнии в 0,05–0,15 МПа·м^{1/2} (5–7 %). Если же пользоваться оптикой и не распознавать треть длины трещин при малых нагрузках, погрешность может составлять 30–35 % [6]. В данной работе критерием вершины трещины был профиль АСМ в ее окрестности. Началом трещины считалась точка на ее контуре, выявленном АСМ, в которой глубина профиля отличалась от профиля в недеформированной области.

Так как при индентировании Виккерсом в материале образуются трещины, то значения микротвердости по Виккерсу H_V (используемые для определения K_{IC}) не совсем верные. При индентировании часть энергии тратится на образование трещины и таким образом вносит погрешность в определении микротвердости по Виккерсу H_V . Следовательно, при расчетах K_{IC} нужно использовать значения H , полученные при помощи наноиндентора с алмазным наконечником типа Беркович и нагрузки не более 10 мН, при которых гарантированно не образуются трещины в материале. Такой подход представляется более корректным.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке и в рамках задания 2.3 ГПНИ «Энергетические и ядерные процессы и технологии» на 2021–2023 годы.

УДК 53.084

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ SO₂ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ВЫБРОСАХ

Литвинович Г.С., Бручковский И.И.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлена конструкция инструмента для полевых измерений SO₂ в вулканических выбросах.

Ключевые слова: ДОАС, УФ-спектрометр для полевых измерений, вулканические выбросы.

INSTRUMENT FOR SO₂ MEASUREMENTS IN VOLCANIC EMISSIONS

Litvinovich H., Bruchkouski I.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper is dedicated to the instrument design for field measurements of SO₂ in volcanic emissions.

Key words: DOAS, UV-spectrometer for field measurements, volcanic emissions.

*Адрес для переписки: Бручковский И.И., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: bruchkovsky2010@yandex.by*

Литература

1. Трещиностойкость и механические свойства конструкционных материалов технических систем / В. В. Москвичев [и др.]. – Новосибирск : Наука, 2002. – 334 с.
2. Третьяков, Ю. Д. Керамика в прошлом, настоящем и будущем / Ю. Д. Третьяков // Соровский образовательный журнал. – 1998. – № 6. – С. 53–59.
3. Карбид кремния: технологии, свойства, применение / Агеев О. А. [и др.]; под ред. А. Е. Беляева и Р. В. Конаковой. – Харьков : ИСМА, 2010. – 532 с.
4. Гринчук, П. С. Получение плотной реакционно-связанной керамики на основе карбида кремния / П. С. Гринчук [и др.] // Тепло- и массообмен – 2017 : сборник научных трудов. – Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: О. Г. Пенязьков. – Минск, 2017. – С. 56–68.
5. Башта, А. В. Определение твердости и трещиностойкости конструкций керамики методом индентирования / А. В. Башта // Вестник НТУ “ХПИ” ; редкол.: М. И. Рыщенко. – Харьков, 2010. – С. 106–113.
6. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217.
7. Определение трещиностойкости с использованием АСМ / Лапицкая В.А. [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии : сборник докладов 13 международной конференции, Минск, 16–19 окт. 2018 г. / Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси ; редкол.: С. А. Чижик – Минск, 2018. – С. 260–266.
8. Influence of polishing technique on crack resistance of quartz plates / V. A. Lapitskaya [et al.] // International Journal of Fracture – 2021. – Vol. 231. – P. 61–77.
9. Niihara, K. A fracture mechanics analysis of indentation-induced Palmqvist crack in ceramics / K. Niihara // J Mater Sci Lett. – 1983. – Vol. 2. – P. 221–223.

Одним из способов предсказаний извержений является анализ измерений газового состава вулканических выбросов [1]. В зависимости от геологических особенностей породы и близости магмы к поверхности земли, соотношение концентраций вулканических газов в выбросах (SO_2 , BrO и др.) может изменяться. Например, увеличение содержания SO_2 в выбросах свидетельствует о близости магмы к поверхности. Основной проблемой проведения измерений газового состава вулканических выбросов является относительно высокий риск здоровью исследователя, обусловленный, в том числе, высоким содержанием загрязнений воздуха вблизи объекта исследований. В этой связи, актуальность представляют инструменты, позволяющие проведение измерений газового состава вулканических выбросов дистанционным методом. Для решения данной задачи авторами был разработан портативный инструмент DEVI (Doas Expedition Volcanic Instrument), позволяющий определять содержание газов в вулканических выбросах дистанционным методом DOAS (дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия). Внешний вид инструмента DEVI представлен на рис. 1.

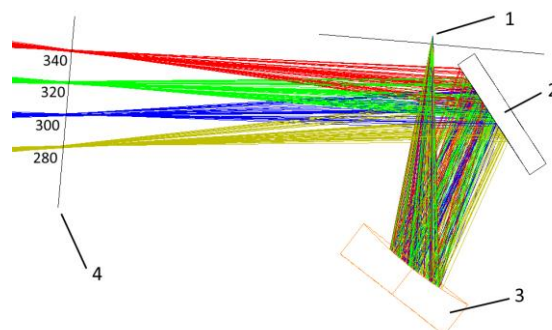
Корпус DEVI разработан таким образом, чтобы производить регистрацию спектров яркости атмосферы «с рук». Аккумуляторная батарея формата 18650 размещена в рукояти и обеспечивает непрерывную работу прибора около 3 ч. Корпус DEVI имеет кронштейн 4 типа ласточкин хвост для крепления к штативу, что позволяет проводить серию измерений при неизменном направлении визирования. Обзорная широкоугольная RGB видеочка служит для привязки области спектрометрирования к объекту и регистрации внешнего вида объекта измерений. DEVI имеет встроенный датчик GPS (C&Q 84), компас и инклинометр MPU9250, датчик температуры, влажности и давления воздуха BME280.



1 – порт для программирования; 2 – индикатор записи видео; 3 – регистрируемый спектр на экране; 4 – кронштейн крепления DEVI к штативу; 5 – расположение датчика атмосферных параметров

Рисунок 1 – Внешний вид DEVI

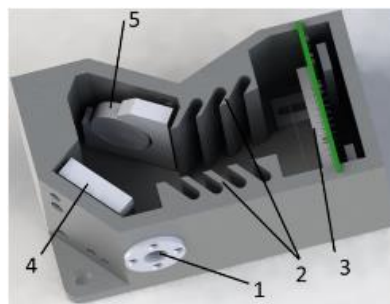
Главный оптический модуль DEVI – это спектрометр собственной разработки, спроектированный для вогнутой дифракционной решетки с ($R = 60$ мм, 2581 штр/мм) и детектора Toshiba TCD1304DG, оптическая схема спектрометра представлена на рис. 2. Спектрометр имеет систему освещения входной щели (объектив), которая обеспечивает поле зрения около 1° по углу возвышения (на схеме не показана). Оптическая схема спектрометра рассчитывалась в программной среде Zemax, для чего применялся непоследовательный режим, оптимизация параметров оптической схемы проводилась с целью минимизации ширины аппаратной функции для спектрального интервала 280–340 нм и входной щели 50×50 мкм. Расчетная величина ширины на полувысоте для монохроматической линии составила 0,7 нм.



1 – входная щель; 2 – плоское зеркало; 3 – вогнутая дифракционная решетка; 4 – детектор

Рисунок 2 – Оптическая схема спектрометра DEVI

На рис. 3 представлен вид модели спектрометра, которая использовалась при изготовлении готового изделия.



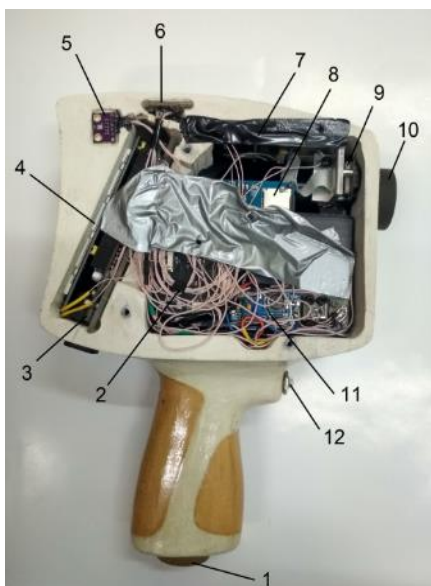
1 – узел входной щели; 2 – световые ловушки; 3 – детектор; 4 – плоское зеркало; 5 – дифракционная решетка

Рисунок 3 – Внешний вид модели спектрометра (без объектива, юстировочных винтов и светового замка)

Объектив представляет собой двояковыпуклую линзу с $f = 90$ мм из стекла марки КУ-1.

На рис. 4 представлен вид DEVI со снятой крышкой, где обозначены видимые элементы. В приборе реализовано два режима работы: ручной

и автоматический (для работы на треноге), для каждого из которых предусмотрен режим автоэкспозиции.



1 – крышка отсека элемента питания; 2 – плата АЦП детектора спектрометра; 3 – плата контроллера; 4 – экран; 5 – датчик ВМЕ280; 6 – GPS датчик; 7 – плата видеорегистратора; 8 – карта памяти; 9 – видеокамера; 10 – объектив спектрометра; 11 – DC-DC преобразователь; 12 – кнопка запуска режимов регистрации

Рисунок 4 – Внешний вид DEVI со снятой крышкой

Разработанный инструмент использовался в экспедиции на Курильские острова в период 31.07–13.08.2021, где одной из задач было получение данных о газовом составе вулканических

выбросов. На рис. 5 представлен один из первых результатов обработки спектра яркости небесной сферы, зарегистрированного 06.08.2021 вблизи вулкана на острове Чиринкотан с целью восстановления наклонной толщи SO_2 по методу DOAS.

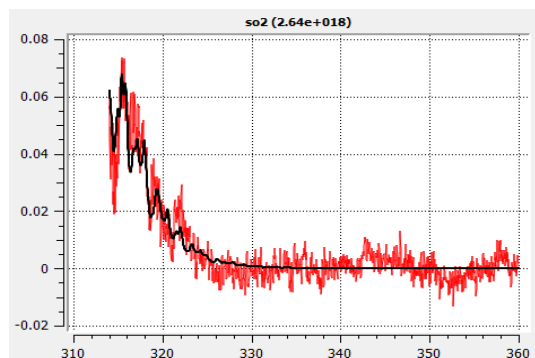


Рисунок 5 – Результат восстановления наклонной толщи SO_2 по методу DOAS

Таким образом, с помощью DEVI впервые получен массив данных in-situ, содержащий в себе информацию о газовом составе вулканических выбросов для вулканов, расположенных на четырех островах: Чиринкотан, Синарка, Уруп, Кунтаминар. Для корректной обработки полученных данных необходимо провести ряд калибровок и уточнений, однако предварительный результат позволяет надеяться на получение релевантных данных касательно содержания SO_2 в исследованных регионах.

Литература

1. Sparks R. S. J. Forecasting volcanic eruptions / R. S. J. Sparks // Earth and Planetary Science Letters. – 2003. – Vol. 210, iss. 1–2. – P. 1–15.

УДК 658.562.012.7

МЕТОДОЛОГИЯ «SIX SIGMA» КАК ИНСТРУМЕНТ АНТИКРИЗИСНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Михейчик А.В.¹, Серенков П.С.²

¹ИП ООО «Минавто»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. За последнее время произошли колоссальные изменения в мировой экономики, которые отразились негативно на многих отраслях промышленности. Хорошо известная методология повышения качества “Lean Six Sigma” может помочь подготовиться производственным предприятиям и иным организациям к глобальному кризису настоящего времени и не дойти до пика банкротства. Бережливая система и антикризисное управление были внедряются в различные сферы деятельности. На основе анализа представленной литературы, теоретических и практических примеров было установлено, что кризис, управляемый с помощью Lean Six Sigma в любой организации, дает реальные результаты и преобразует ситуацию в конкурентное преимущество, демонстрируя клиентам и заинтересованным сторонам хорошее деловое поведение, прозрачность, этическое отношение и минимальные затраты времени.

Ключевые слова: Lean Six Sigma, DMAIC, DMADV, качество, бережливая система, антикризисное управление.

«SIX SIGMA» METHODOLOGY AS A CRISIS MANAGEMENT TOOL

Mikheichyk A.¹, Serenkov P.²

¹IP ООО «Minavto»

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Recently, there have been great changes in the global economy, which have negatively affected on many industries. The well-known Lean Six Sigma quality improvement methodology can help prepare manufacturing enterprises and other organizations for the current global crisis and avoid the peak of bankruptcy. Lean system and crisis management have been implemented in various fields of activity. Based on the analysis of the presented literature, theoretical and practical examples, it was found that a crisis managed by Lean Six Sigma in any organization gives real results and transforms the situation into a competitive advantage, demonstrating to clients and stakeholders good business behavior, transparency, ethical attitude and minimum investment of time.
Key words: Lean Six Sigma, DMAIC, DMADV, Quality, Lean system, Crisis management.

Адрес для переписки: Михейчик А.В., ул.Калиновского 32, г. Жодино 220160, Республика Беларусь
e-mail: Alesya.sofia@yandex.by

Методология Lean Six Sigma – это творческий и гибкий подход, направленный на повышение качества и эффективности организационных процессов. Он представляет организациям инструменты повышения потенциала их бизнес процессов. Повышение эффективности и уменьшение отклонений в процессах помогает минимизировать ошибки и повысить прибыль, производительность труда сотрудников и качество продукции или услуг.

Методология Six Sigma была изначально разработана для улучшения производственных процессов в промышленности. Однако, на протяжении многих лет ее начали активно использовать в иных сферах деятельности, включая здравоохранения, а так же в финансовой и коммерческой отраслей.

Ключевыми элементами данной методологии является: удовлетворенность потребителей, определение процессов, их показателей и методы управления процессами, командная работа.

Six Sigma – это не просто метод управления качеством. Он отличается четко определенными методическими подходами к применению на этапе разработки жизненного цикла продукта, такие как DMAIC и DMADV.

DMAIC – «Проектирование-Измерение-Анализ-Улучшение-Контроль». Альтернативный метод DMADV означает «Проектирование-Измерение-Анализ-Проектирование-Верификация». Если задача стоит в совершенствовании существующего процесса, т.е. довести его до «состояния» Шести Сигм, то используется DMAIC. Если задача стоит в создании нового производственного процесса, чтобы тот обеспечивал производительность Шести Сигм, то в этом случае следует использовать DMADV.

За 2020 год мировая экономика сохранилась на 3 %. Импорт потребительских товаров США сократился до 15 %. Многие сферы деятельности прекращают свое существование на рынке труда.

Антикризисное управление требует тщательного и продуманного планирования на случай катастрофы, которая может оказаться непредсказуемой. Следует отметить, что кризис – это обычное явление, особенно в настоящее время в период пандемии.

Качество продукции является важнейшим атрибутом любой конкурирующей организации. Будь то промышленное предприятие, или компания, работающая в сфере услуг, или организация, осуществляющие деятельность в области информационных технологий, каждая из них разрабатывает определенный проект, который нацелен на предоставление потребителю качественного продукта или услуги.

Многие проекты в кризисное время становятся убыточными, по причине того, что цели проекта не были достигнуты. Причины могут быть разнообразны и варьироваться от закупки некачественного сырья, нестабильности работы оборудования, некорректности технологии производства до непрофессионализма и безответственности персонала.

Часто цель проекта была упущена до того, как руководители осознали необходимость антикризисного управления и реализации его.

Можно признать методологии. Шесть Сигм наиболее эффективным средством активации скрытых резервов организаций и нейтрализации негативных последствий экономического кризиса. Ядром Six Sigma является процесс DMAIC. Это 5-этапный процесс, содержащий следующие этапы:

Проектирование. Цель этого этапа – прояснить о какой проблеме идет речь. Необходимо определить требования клиентов. Процесс должен быть описан, а финансовые и плановые последствия должны быть оценены.

Измерение. Цель этого этапа – прояснить масштабы проблемы. Это включает в себя определение и выбор измеряемых переменных, про-

верку измерительной системы и представление измеренных данных.

Анализ. Здесь необходимо прояснить основные причины проблемы. Процессы, влияющие на проблему, должны быть подробно проанализированы, а также определены причины и основные последствия.

Улучшение. Творческие решения должны быть разработаны на основе предыдущих этапов процесса и оценены в контексте альтернативных решений. Наконец, необходимо выбрать и внедрить подход к решению.

Контроль. Изменения должны быть задокументированы и стандартизированы. Методики совершенствования должны быть разработаны и переданы внутри команды.

В период сложной экономической ситуации есть возможность сформировать приверженность клиентам. Чтобы продемонстрировать участие в интересах заинтересованных сторон, необходимо продемонстрировать лидерство в кризисных ситуациях. Поскольку во время кризиса давление внутри и снаружи организации велико, стороны, которые хорошо работают в условиях давления и неопределенности, являются лидерами.

Определить критические контрольные точки процесса компании – это правильный способ действовать перед конкурентами, применяя методологию Шесть Сигм. В периоды кризиса в компании появляются новые способы мышления или современные технологии, которые выступают в противоречие с неактуальными взглядами, моделями и идеологиями.

В процессе антикризисного управления от руководителей ожидают навыков прогнозирования, анализа и управления реальными рисками. Цель в долгосрочном периоде состоит в том, чтобы решить многочисленные проблемы, возникающие в ситуации острого конфликта или кризиса.

Выявленные риски не всегда могут быть полностью предотвращены. Методология Шесть Сигм «говорит» на статистическом языке, используя «вероятности» и «достоверности». Многие сотрудники неверно интерпретируют результаты статистических данных. Обычно считается, что риск слишком мал, чтобы обращать на него внимание. Тем не менее, это должно вызвать тревожный звонок. Более разумным для организации подходом было бы учесть, что в течение какого-то времени это по крайней мере один раз может произойти. Последствия для слабо подготовленных организаций во многих случаях катастрофичны. Чтобы свести к минимуму ресурсы, затрачиваемые на устранение кризисного инцидента, компания, которая серьезно относится к бережливому процессу и антикризисному управлению, позаботится о том, чтобы на регулярной основе проводился глубокий аудит уязвимости. Планы реализации в кризисных ситуациях, Планирование реагирования на чрезвычайные ситуации и обучение должны часто выполняться и осуществляться на добровольной основе в рамках организации.

Было установлено, что инвестировать в надлежащую программу антикризисного управления – это шаг в направлении к тому, чтобы быть наиболее инновационным и активным, чтобы превзойти ожидания потребителя и завоевать конкурентоспособную репутацию на рынке труда.

Литература

1. VDA 4. Quality Assurance in the Process Landscape – Process Models. Six Sigma, Design for Six Sigma (DFSS), Industrial Tolerance Process – Section 4.
2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://asq.org/quality-resources/six-sigma>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 658.51

PSCR-МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И СООТВЕТСТВИЕМ ПРОДУКЦИИ. ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОДУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Михейчик А.В.¹, Серенков П.С.²

¹ИП ООО «Минавто»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Обеспечение безопасности и соответствие продукции техническим требованиям является обязательным для каждой организации в автомобильной промышленности. С этой целью должны соблюдаться действующие законодательные акты о целостности, а так же должны быть достигнуты ожидания потребителя в отношении производства безопасной продукции. В том случае, если на рынке оказывается продукции несоответствующая требованиям законодательных актов и требованиям потребителя, уполномоченные ответственные лица должны принять необходимые действия. Чтобы знать и понимать требования, предъявляемые к представителю по безопасности продукции необходимы исчерпывающие знания и квалификации.

Ключевые слова: безопасность продукции, автомобильная промышленность, инструменты СМК, компетентность персонала, VDA QMS.

PRODUCT SAFETY AND CONFORMITY MANAGEMENT (PSCR) . THE TOOL OF PRODUCT INTEGRITY IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Mikheichyk A.¹, Serenkov P.²

¹IP ООО «Minavto»

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Ensuring product safety and product compliance is a must for every organization in the automotive industry. To this end, applicable integrity laws must be respected, and consumer expectations for the production of safe products must be met. In the event that the product on the market does not comply with the requirements of legal acts and the requirements of the consumer, the authorized responsible persons must take the necessary actions. Comprehensive knowledge and qualifications are required to know and understand the requirements for a product safety representative.

Key words: safety product, automotive industry, QMS tools, staff competence, VDA QMS.

*Адрес для переписки: Михейчик А.В., ул.Калиновского 32, г. Жодино 220160, Республика Беларусь
e-mail: Alesya.sofia@yandex.by*

В последнее время отслеживается большой прорыв технологического прогресса, что сулит высокому обеспечению безопасности. Это стало еще более важным аспектом автомобильной промышленности. Кроме того, IATF 16949 подчеркивает тему в главе «Безопасность продукции».

В новом томе VDA «Целостность продукта» эта тема получила широкую основу, следовательно, в автомобильной сфере для каждого промышленного предприятия в цепочке поставок обеспечение безопасности продукции и соответствие техническим требованиям является обязательным.

Развивается понимание роли представителя по вопросам безопасности и соответствия продукции (PSCR). Поэтому в соответствующих странах необходимо соблюдать целостность продукта и соответствовать ожиданиям потребителя в отношении безопасности. По этой причине многие организации назначают «Ответственного за безопасность продукции», другими словами данная функция становится «Представителя по безопасности и соответствию продукции, сокращенно PSCR».

Представитель по безопасности и соответствию продукции (PSCR) – это тот, кто обладает необходимой информацией и квалификацией для целенаправленного подхода к обеспечению соответствия целостности продукции местным и международным правовым нормам, а также оправдывает ожидания общественности в отношении безопасности.

При необходимости каждое производственное предприятие поставщика должно определить Представителя по безопасности и соответствию продукции внутри организации (PSCR). Как минимум, поставщики, поставляющие продукцию для производственных линий (например, Volkswagen Group) или производственных линий (например, BMW), должны идентифицировать и сертифицировать специалиста по безопасности и соответствию продукции (PSCR).

Для примера рассмотрим американскую компанию Lear. Все поставщики Lear, которым тре-

буется идентифицировать PSCR, должны требовать, чтобы каждый из их субпоставщиков идентифицировал и сертифицировал PSCR внутри своей организации. Поставщик несет ответственность за то, чтобы связаться с соответствующим покупателем Lear, чтобы определить, требуется ли представитель по безопасности и соответствию продукции.

Вся необходимая информация о данном представителе, а так же о поставщике должны быть добавлены в SQTS (справочный раздел «Система отслеживания качества поставщика (SQTS)»).

Целостность продукции должна соответствовать законодательным актам, в случае каких-либо отклонений, ответственное лицо может потерять деловую репутацию перед потребителями. Представитель по ведению безопасности продукции должен иметь полное представление о том, как поддерживать безопасность и соответствовать требованиям потребителя.

Вопрос заключается в том, какие организационные структуры и процессы должны быть разработаны в организации и как организация должна реагировать, если продукт оказывается «небезопасным» на рынке. Организация должна разработать методы и инструменты для поддержания процесса обеспечения безопасности.

Полномочия высшего руководства могут быть делегированы при условии, что соответствующее ответственное лицо тщательно выбрано и квалификация его подтверждена.

Представителем по безопасности продукции должен быть специалист, имеющий опыт в управлении качеством на производстве, особенно в области управления жалобами и рекламаций. Кроме того, специалист должен обладать квалификацией и опытом в оценке рисков продуктов и процессов (например фасилитатор FMEA или аудитор процессов, проектировщик/разработчик). PSCR специалист обладает необходимыми значениями и требованиями для достижения целостности продукта на различных стадиях его жизненного цикла.

Данная тема на сегодняшний день является актуальной и начитает свое развитие быстрыми темпами. Для обеспечения соответствующей компетентности и квалификации специалистов в отношении безопасности и соответствия продукции, большинство независимых компаний консультационных услуг по разработке и внедрению эффективных систем менеджмента организуют обучения на «Представителя по безопасности и соответствию продукции».

В рамках обучения специалист будет уметь проводить надлежащую проверку продукции от стадии исследования и разработки через производство, до контроля качества конечного продукта. Все стадии жизненного цикла продукта должны соответствовать стандартам безопасности и соответствия.

Основная производственная ответственность за приобретенную продукцию лежит на поставщике, а если применимо, то на его субподрядчике. Поэтому поставщик должен сделать все возможное, как с точки зрения организации, так и с точки зрения производства, для обеспечения безопасности продукции и, таким образом, минимизировать риски ответственности за продукцию. Для этого и требуется обучение на представителя по безопасности и соответствию продукции для каждого этапа цепочки поставок.

Основными качествами, которыми должен обладать представитель по безопасности и соответствию продукции являются следующие:

1. Знания целостности и этапов жизненного цикла продукции;
2. Отличные знания основных характеристик продукта методов его контроля. Умение определять контрольные точки;

3. Эспертные знания позволяющие избежать несоответствий в цикле производства;

4. Умение планировать и предпринимать меры предупреждающих и корректирующих действий;

5. Знание и умение использовать методы мониторинга и измерения основных бизнес-процессов систем менеджмента качества;

6. Способность принимать решения в случае получения рекламаций от потребителя;

7. Умение проводить сравнительный анализ несоответствий продукции аналогичным продуктам производимые конкурентами

8. Профессиональное развитие;

Каждый производитель обязан наблюдать за рынком. В автомобильной промышленности это дополнительно определяется требованиями заказчика. Поэтому некоторые компании назначают специалиста по безопасности продукции.

В соответствии со стандартами Немецкой Ассоциации автомобильной промышленности (VDA) для предприятий автомобильной промышленности требования к обучению на Представителя безопасности и соответствия продукции является обязательным для соблюдения.

Литература

1. Прилепин, М. Т. Оптические квантовые генераторы в геодезических измерениях / М. Т. Прилепин, А. Н. Голубев. – М. : Недра, 1998. – 340 с.

2. Требования к системе менеджмента качества предприятий, производящих автокомпоненты и автотранспортные средства : VDA 6.1.

3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.tuvsud.com/en-in/services/training/instructor-led-courses/vda/product-safety-and-conformity-representative>. – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 658.51

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМНОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ

Песляк И.Е., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложен системный подход разработки стратегии обеспечения приемлемости производственных процессов, в основу которого положены подходы теории решения некорректных задач. Признаки корректности математических задач по Ж. Адамару адаптированы к задачам обеспечения приемлемости производственных процессов (технологических и измерительных) в части идентификации свойств проявления некорректности и способов управления некорректностью.

Ключевые слова: менеджмент качества, теория некорректных задач, признаки некорректности задачи, приемлемость процессов.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF APPLYING THE PROVISIONS OF THE THEORY OF INCORRECT TASKS IN SYSTEMS MANAGEMENT

Pesliak I., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. A systematic approach to the development of the strategy to ensure the acceptability of production processes, which is based on the approaches of the theory of solution of incorrect problems, is proposed. The signs of correctness of mathematical problems according to J. Adamar are adapted to the problems of ensuring the acceptability of production processes (technological and measurement) in terms of identifying the properties of the manifestation of incorrectness and ways of managing incorrectness.

Key words: quality management, incorrect task theory, signs of incorrect task, acceptability of processes.

Адрес для переписки: Песляк И.Е., пр. Дзержинского, 84, 231, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: irina.peslyak.1864@gmail.com

Сегодня возникает все большая потребность в усовершенствованной и инновационной продукции, соответственно растет и скорость изменения требований потребителей к изделиям. Данное обстоятельство приводит к необходимости реализации требований с еще большей скоростью. В этих условиях развитие методологии обеспечения качества продукции с первого изделия становится достаточно актуальной. Особую роль в методологии обеспечения качества играет стадия проектирования, на которой формируется необходимая степень приемлемости процессов производства.

Понятие некорректных задач. Впервые понятие «корректно поставленная задача» было введено Ж. Адамаром в 1923 г. и относилось только к крайним задачам математической физики. Ж. Адамар полагал, что подавляющее большинство исследований приводит к формированию математической модели. Пусть модель будет представлена абстрактным уравнением первого рода:

$$y = a \cdot x, y \in Y, x \in X. \quad (1)$$

Корректность постановки задачи обеспечивается по Ж. Адамару выполнением трех условий (признаков корректности):

- 1) существование решения задачи – уравнение (1) разрешимо для всех $y \in Y$, т.е. оно существует,
- 2) решение задачи единственно,
- 3) решение задачи устойчиво, т.е. малым возмущениям правой части x соответствуют малые в метрике пространства Y возмущения решения y [1].

В математике долгое время считалось, что теория некорректных задач не имеет практического применения, но Тихонов ввел понятие условно-корректной задачи и впервые применил теоретические разработки в области корректности – некорректности для решения задач в области разведочной геофизики [1].

Теория некорректных задач в математике, по сути, отражает вид соотношения двух частей уравнения (1), которые можно ассоциировать с входом и выходом модели процесса. Применение положений Ж. Адамара к задаче обеспечения приемлемости производственных процессов (технологических и измерительных) можно сформулировать следующим образом:

– для технологических процессов некорректность задачи ассоциируется с соотношением выхода процесса (продукции) с входами (технологией, оборудованием, производственной средой, персоналом, и т.п.),

– для измерительных процессов некорректность задачи ассоциируется с соотношением выхода процесса (результата измерений) с входами (методом, измерительным оборудованием, условиями измерений, персоналом, и т.п.).

Применимость положений теории решения некорректных задач в математике к задачам обеспечения приемлемости производственных процессов проиллюстрирована на рис. 1.



Рисунок 1 – Аналогия моделей решения некорректных задач в математике и обеспечения приемлемости производственных процессов

Приемлемость процессов. Приемлемость процесса по своей сути проявляется через степень устойчивости выхода процесса при вариации параметров входа. В докладе приведены ре-

зультаты анализа применения основ теории решения некорректных задач по каждому из признаков для решения проблем обеспечения приемлемости процессов как измерительных, так и технологических.

При нарушении первого признака корректности требуемый выход процесса будет отсутствовать.

В задачах обеспечения приемлемости производственных процессов примерами проявления данного признака являются:

- для процессов измерения и контроля: имеющаяся в наличии система измерений линейных размеров с помощью штангенциркуля ШЦ-1 не позволяет обеспечить требования к контролю размеров свыше 200 мм и качественных точности 8 и менее;

- для технологических процессов производства существующая технология литья стальных заготовок в кокиль не позволяет обеспечить требования к точности размеров класса 11 и точнее и шероховатости Rz 5 и точнее.

Данная проблема в теории решения некорректных задач решается одним из следующих способов:

- формирование альтернативной модели, что меняет решение задачи кардинально;

- ввод новых уточняющих параметров модели;

- наложение ограничений на параметры модели.

Ярким примером применения этих способов решения для измерительных процессов является следующий. Некорректность как неприемлемость модели оценивания точности процессов измерений и контроля в области химии, фармацевтики, биологии и т.д. через погрешности устранена с помощью применения альтернативной модели оценивания точности через неопределенности результатов измерений.

Наличие второго признака некорректности задачи в процессе предполагает наличие множества вариантов осуществления процесса. Например, при проектировании технологического процесса литья с заданными требованиями к заготовкам и самому процессу существует множество вариантов его осуществления.

Определены пути устранения некорректности по данному признаку, наработанные в модельных задачах в области математики и механики:

- ввод новых уточняющих параметров модели;
- наложение ограничений на параметры модели.

Поиск оптимального варианта реализации исследуемого производственного процесса является одной из наиболее распространенных задач в технике, решаемых методом планирования эксперимента. Не стоит забывать о методах экспертного оценивания для определения наилучшего варианта из существующих.

При несоблюдении третьего признака корректности малые изменения в процессе будут приводить к большим изменениям на выходе. В задачах обеспечения приемлемости технологических процессов примером проявления третьего признака некорректности является «естественная» или намеренная вариация факторов, относящихся к инфраструктуре процесса, производственной среде, персоналу, материалам и комплектующим (вариация характеристик качества от одного поставщика к другому), вызывает в той или иной мере вариацию выхода.

Обоснован алгоритм решения задачи некорректности по данному признаку:

- фиксировать фактор, вызывающий наибольшую вариацию;

- уменьшить коэффициенты влияния такого фактора;

- ввести в модель новый параметр, перекрывающий влияние другого;

- принять вариацию приемлемой в соответствии с точностными параметрами выхода процесса.

Таким образом, для некорректных задач по каждому из признаков есть как общие, так и характерные для каждого отдельно пути решения. Однако, теория некорректности задач еще не применялась для решения проблем обеспечения приемлемости процессов, это, как видно из указанного выше, является упущением и требует дальнейшего рассмотрения, что в итоге приводит нас к необходимости определения стратегии обеспечения приемлемости процессов производства, основанной на положениях теории некорректных задач.

Литература

1. Сумин, М. И. Метод регуляризации А. Н. Тихонова для решения операторных уравнений первого рода: учеб.-метод. пособие / М. И. Сумин. – Нижний Новгород : Нижегородский госуниверситет, 2016. – 56 с.

УДК 621.317.32.089.68-027.542 (476)

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ, СБОРА, ПЕРЕДАЧИ, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕНИЯ – ВОЛЬТА

Попко В.В., Сентемова Д.В., Ярмолович М.А.

*РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены вопросы автоматизации калибровки эталонных средств измерений напряжения постоянного тока. Разработана, исследована и внедрена в производственный процесс автоматическая система калибровки, представляющая собой программно-аппаратный комплекс, состоящий из средств измерений из состава Национального эталона единицы напряжения – вольта и дополнительных модулей. Автоматическая система создана на основе современного языка программирования «Python» с привлечением опыта метрологов. Проведено исследование результатов калибровки эталонных мер напряжения постоянного тока. Полученные результаты калибровки (приписанное действительное значение с расширенной неопределенностью) проанализированы в автоматическом и ручном режимах, а также с помощью системы «supraVOLTcontrol», реализующей эффект Джозефсона. Автоматическая система применена при исследовании интегральной неустойчивости (нелинейности) цифрового вольтметра, при этом получена существенная минимизация трудозатрат. Разработанная автоматическая система калибровки позволяет сократить трудоемкость и продолжительность выполнения измерений, обеспечивает гибкость и способность к перестроению в зависимости от вопросов, возникающих при исследованиях.

Ключевые слова: автоматическая система калибровки, интегральная нелинейность, оптимизация, одноплатный компьютер Raspberry Pi, скрипты (программы) Python.

OPTIMIZATION OF THE PROCESS OF REPRODUCTION, COLLECTION, TRANSMISSION, PROCESSING AND DISPLAY OF MEASUREMENT RESULTS OF THE NATIONAL VOLTAGE UNIT STANDARD – VOLT

Popko V., Sentemova D., Yarmalovich M.

*Belarussian state institute of metrology
Minsk, Belarus*

Abstract. Considered options for automating the calibration. An automatic calibration system has been developed, investigated and introduced into the production process, which is a software and hardware complex consisting of measuring instruments from the composition of the National standard of voltage unit - volt and additional modules. The automatic system was created on the basis of the modern programming language “Python” with the involvement of the experience of metrologists. A study of the results of calibration of reference voltage measures was carried out: the obtained results of the calibration of the DC voltage (assigned real value with expanded uncertainty) were analyzed in automatic and manual modes and using the “supraVOLTcontrol” system, which implements the Josephson effect. The automatic system was used in the study of the integral instability (nonlinearity) of a digital voltmeter, while a significant minimization of labor costs was obtained. The developed automatic calibration system allows to reduce labor intensity and duration of measurements, provides flexibility and ability to rebuild depending on emerging issues during research.

Key words: automatic calibration system, integral nonlinearity, optimization, single-board computer Raspberry Pi, scripts (programs) Python.

*Адрес для переписки: Попко В.В., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: vadim.popko@belgim.by*

Введение. В настоящее время заметно возросло количество областей человеческой деятельности, в которых требуются достоверные измерения электрического напряжения. Создание новых и модернизация существующих производств, пересмотр существующих методов измерений, необходимость увеличения количества измерений и автоматизации обработки полученных результатов с отображением значимой для анализа информации о влияющих величинах требуют постоянного усовершенствования и оптимизации процесса измерений электрического напряжения. Для решения возникающих задач в Белорусском государственном институте мет-

рологии (БелГИМ) создан и успешно эксплуатируется Национальный эталон единицы напряжения – вольта (далее – НЭ). Основой НЭ является система supraVOLTcontrol (Suprascon, Германия), предназначенная для воспроизведения и измерения напряжения постоянного тока в диапазоне от –10 до 10 В. Принцип действия системы основан на квантовом эффекте Джозефсона. Также в состав НЭ входит комплект эталонного оборудования для расширения измерительных возможностей до 1000 В.

Цель работы – исследовать варианты автоматизации измерений, разработать и внедрить в производственный процесс автоматическую си-

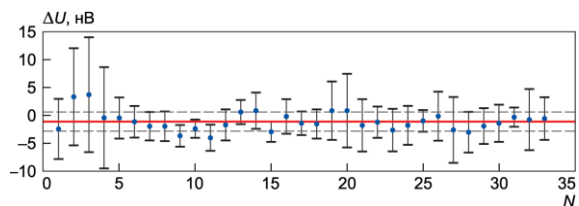
стему калибровки эталонного оборудования из состава НЭ и прецизионных средств измерений (СИ) напряжения постоянного тока.

Постановка задачи проекта. Передачу единицы можно условно разделить на четыре уровня. Для обеспечения качества передачи единицы на каждом из уровней применяются различные методы, технические решения и навыки, поэтому для получения достоверных результатов измерений и обработки данных необходима разная продолжительность времени.

Для реализации первого уровня передачи единицы вольта в рамках ключевого сличения ВРМ.ЕМ-К10.б проведены прямые сличения первичных эталонов Российской Федерации Государственного первичного эталона единицы электрического напряжения ГЭТ 13-01 и Международного бюро мер и весов (далее – эталон МБМВ). В результате сличений получено опорное значение единицы напряжения постоянного тока. На втором уровне через двухсторонние ключевые сличения СООМЕТ.ЕМ.ВРМ-К10.б (тема КООМЕТ 542/RU/11) установлена эквивалентность единицы напряжения постоянного тока, воспроизводимой ГЭТ 13-01 и Национальным эталоном. Сличения проходили в два этапа. На первом этапе предварительно исследованы два эталона для выявления и устранения помех, влияющих на качество и точность измерений, на втором этапе проведены основные исследования и последующая обработка результатов. В качестве опорного значения напряжения постоянного тока использовали значение эталона МБМВ, которое принимали неизменным во времени. В рамках данных сличений впервые в мировой метрологической практике успешно применены созданные во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева транспортируемые эталоны, реализующие эффект Джозефсона. Результаты ключевых сличений по уровню напряжения 10 В транспортируемого эталона представлены на рис. 1.

Так как реализующая эффект Джозефсона система является коммерческим продуктом фирмы Supracon (Германия), то в процессе организации и проведения измерений участники сличений столкнулись с рядом неудобств из-за закрытости исходного кода в программном обеспечении, что привело к невозможности подстройки определенных параметров при измерениях и их корректировки с учетом исследованных влияющих величин. Программное обеспечение Supracon создано на платформе LabView, что требует установки дополнительных тяжелых библиотек и драйверов, а это значительно снижает производительность компьютера и в результате создает неудобства для развертывания нового рабочего места. Кроме того, большое количество устанавливаемых библиотек приводит к проблемам совместимости различных версий про-

граммного обеспечения. В связи с указанными проблемами принято решение разработать собственное аппаратное и программное решение для измерений и последующей передачи и обработки результатов.



ΔU – разность напряжений; N – номер измерения

Рисунок 1 – Результаты ключевых сличений по уровню напряжения 10 В транспортируемого эталона ВНИИМ и эталона БелГИМ

Методы (теоретические основы) автоматизации. Основой решения описанной выше задачи стал компактный одноплатный компьютер Raspberry Pi (Raspberry Pi Foundation, Великобритания), к его достоинствам относятся низкая энергозатратность, малые габаритные размеры, бесшумная работа, автономность. Данный компьютер при внешнем питании 5 В позволяет подключать СИ напряжения постоянного тока с помощью одних из самых распространенных интерфейсов передачи данных – GPIB, LAN, USB и RS-232, а также подключать различные внешние датчики контроля температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха, атмосферного давления или напряжения и частоты питающей сети.

В качестве операционной системы авторы настоящей статьи использовали свободно распространяемое программное обеспечение Raspberry Pi OS на базе Linux-систем. Для связи с СИ напряжения постоянного тока дополнительно был установлен дистрибутив linux-gpib. Управление СИ осуществлялось с помощью интерпретируемого объектно-ориентированного языка программирования высокого уровня Python – одного из наиболее распространенных в крупных университетах, инженерных и научных центрах. Простота, легкость освоения синтаксиса и удобочитаемость программного кода в сочетании с большой универсальностью и широкими возможностями применения делает Python удобным и популярным языком программирования для автоматизации. Это позволяет людям, не имеющим практических навыков программирования, разрабатывать программные решения для автоматизации рутинных задач. Также преимущества Python не ограничиваются простотой использования. Скрипты (программы) Python можно запускать кроссплатформенно в любой операционной системе. Python также чрезвычайно мощный и широко используемый язык для анализа данных и сложных математических вычислений.

Согласно схеме метрологической прослеживаемости, начиная со второго уровня управление СИ напряжения постоянного тока осуществляется на базе компьютера, который обеспечивает круглосуточный доступ к СИ по цепочке интерфейсов Ethernet–GPIB. Реализованная схема подключения показана на рис. 2. Подключение к компьютеру производится через командную строку по IP-адресу и протоколу SSH на любом компьютере или смартфоне. Для этого необходимо ввести команду `ssh username@ip-address`, а затем ввести заранее установленный пароль, который служит защитой от несанкционированного доступа. Далее командой `python «имя_файла»` запускается заранее подготовленный скрипт для управления СИ.

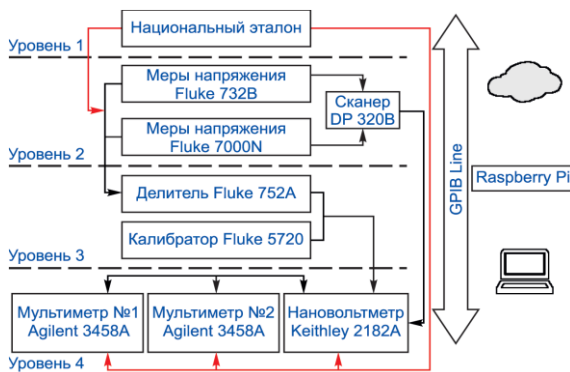


Рисунок 2 – Схема подключения средств измерений при воспроизведении и измерении единицы напряжения постоянного тока

Таким образом, на втором уровне метрологической прослеживаемости единица напряжения постоянного тока передается от НЭ вторичным эталонам – мерам напряжения Fluke 732B (Fluke Corporation, США) и Fluke 7000N (Fluke Corporation, США), которые ежедневно сличаются между собой с использованием сканнера DataProof 320B (DATA PROOF, США) с низкой термоэлектродвижущей силой (термоэдс) в качестве переключателя полярности и нановольтметра Keithley 2182A (Keithley Instruments, Inc., США) в качестве нуль-индикатора. Это позволяет отслеживать ежедневный дрейф данных мер напряжений. Реализованная процедура измерений приведена на рис. 3.

Подготовленный скрипт на Python проводит инициализацию СИ напряжения по номеру GPIB-порта, фиксирует параметры окружающей среды, проводит измерения, используя действительные значения мер напряжений, предварительно приспанные на основании результатов исследования с использованием системы Surgason.

Далее при заданных условиях по времени или количеству измерений коммутирует меры напряжения между собой и производит 100 измерений при положительной полярности, дает команду сканнеру о смене полярности и произ-

водит 100 измерений при отрицательной полярности, при этом все измеренные значения сохраняются в файл формата `csv` на сервере.

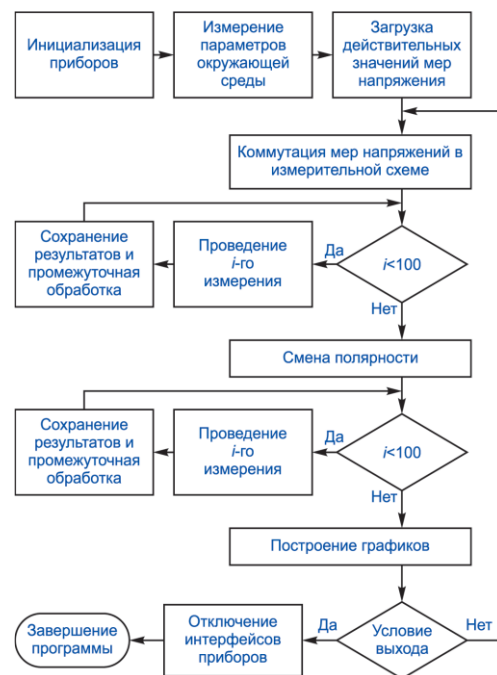


Рисунок 3 – Блок-схема работы программного модуля

Конечным итогом является обработка и визуализация результатов измерений путем построения графика (рис. 4). На графике (рис. 4) наблюдаются ярко выраженные выбросы в конкретный момент измерений одной из мер напряжения, что свидетельствует о нестабильности этой меры. Дополнительно программа строит график контроля условий проведения измерений.

На третьем уровне метрологической прослеживаемости единица передается от вторичных эталонов рабочим эталонам – от мер напряжения калибратору Fluke 5720A (Fluke Corporation, США) с использованием прецизионного делителя напряжения Fluke 752A (Fluke Corporation, США) и нановольтметра Keithley 2182A в качестве нуль-индикатора. На этом этапе измерения проводятся в полуавтоматическом режиме, так как в делителе Fluke 752A отсутствует возможность удаленного управления. Это учтено в программе, поэтому сначала указывается на необходимость подготовительных работ, таких как балансировка делителя и установка нуля нановольтметра, затем программа инициализирует СИ, имеющие интерфейс GPIB, и требует от пользователя переключить пределы на делителе и сменить полярность на мере напряжения. Все измерения также фиксируются в файле формата `csv`, здесь же рассчитывается действительное значение напряжения калибратора исходя из действительного значения меры и установленного коэффициента деления на делителе, который сохраняется на сервере.

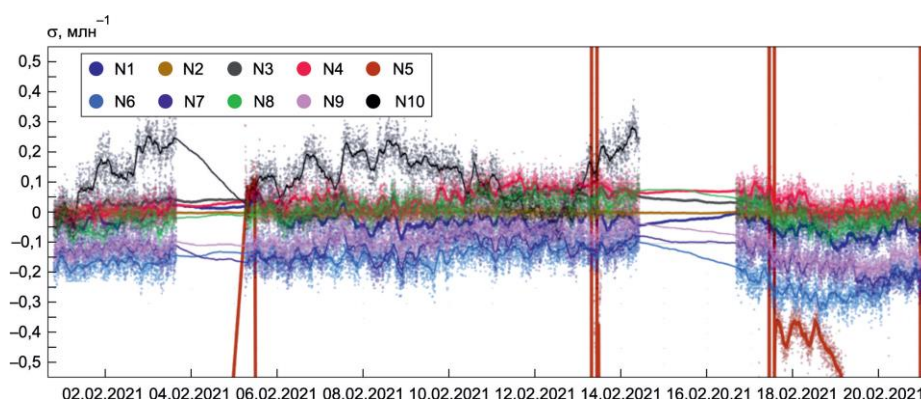


Рисунок 4 – График результатов измерения при исследовании стабильности десяти мер напряжения Fluke 732B (N1–N10) и контроля условий измерений

На четвертом уровне метрологической прослеживаемости единица напряжения методом непосредственной оценки передается от калибратора Fluke 5720A прецизионным мультиметрам Agilent 3458A (Agilent Technologies, Incorporated, США) и нановольтметру Keighley 2182A. Важным параметром этих мультиметров является исследование интегральной нестабильности (интегральной нелинейности – INL). В промышленности INL используется в качестве показателя эффективности в системах цифроаналогового (ЦАП) и аналого-цифрового преобразований (АЦП). В источниках ЦАП – это мера отклонения между идеальным выходным значением и фактическим измеренным выходным значением для определенного входного цифрового сигнала. В АЦП – это отклонение между идеальным пороговым значением входа и измеренным пороговым уровнем определенного выходного цифрового сигнала. Обычно передаточная функция с интегральной нелинейностью аппроксимируется прямой линией методом наименьших квадратов. Часто аппроксимирующей прямой просто соединяют наименьшее и наибольшее значения. Интегральную нелинейность определяют путем сравнения напряжений, при которых происходят кодовые переходы. Данные измерения выполняются после компенсации других основных составляющих суммарной погрешности, таких как смещение и усиление. Интегральная нелинейность является ключевым фактором, который определяет точность измерения неизвестного сигнала, после того как все другие составляющие суммарной погрешности учтены и исправлены. Обычно для исследования INL требуется большое количество измерений с заданными параметрами шага и диапазона, это трудоемкий и долгий процесс. Разработанная авторами настоящей статьи программа позволяет провести это исследование полностью в автоматическом режиме и отобразить результат на графике (Метрология и исследование [сайт]. URL: <http://www.xdevs.com>).

Таблица 1. Бюджет неопределенности результатов калибровки одной меры напряжением 10 В

Источник неопределенности	Тип u_c	Значения u_c в разных режимах калибровки, В	
		ручной	автом.
Неопределенность меры напряжения из сертификата калибровки	B	$0,062 \cdot 10^{-6}$	$0,062 \cdot 10^{-6}$
Нелинейность цифрового мультиметра	B	$0,058 \cdot 10^{-6}$	$0,058 \cdot 10^{-6}$
Термоэдс системы supraVOLTcontrol	B	$0,040 \cdot 10^{-6}$	$0,040 \cdot 10^{-6}$
Повторяемость результатов	A	$6,52 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$
Воспроизводимость результатов	A	$2,32 \cdot 10^{-7}$	$2,32 \cdot 10^{-7}$
Стандартная неопределенность, В		$2,59 \cdot 10^{-7}$	$2,59 \cdot 10^{-7}$
Расширенная неопределенность, В ($P = 95\%$, $k = 2$)		$5,17 \cdot 10^{-7}$	$5,17 \cdot 10^{-7}$

Таблица 2. Результаты калибровки мер напряжения Fluke 732B, полученные различными способами

№	Автоматический режим, В	Ручной режим, В	SupraVOLTcontrol, В
1	10,00000290 $\pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	10,00000272 $\pm 5,18 \cdot 10^{-7}$	10,000002911 $\pm 1,24 \cdot 10^{-7}$
2	9,999925114 $\pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	9,999924887 $\pm 5,17 \cdot 10^{-7}$	9,999925121 $\pm 1,31 \cdot 10^{-7}$
3	9,999928298 $\pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	9,999928206 $\pm 5,19 \cdot 10^{-7}$	9,999928326 $\pm 1,24 \cdot 10^{-7}$
4	9,999928409 $\pm 4,16 \cdot 10^{-7}$	9,999928315 $\pm 5,17 \cdot 10^{-7}$	9,999928414 $\pm 1,24 \cdot 10^{-7}$

Результаты. Разработанная автоматическая система настроена и использована для калибровки эталонного оборудования из состава НЭ, а также для калибровки вторичных и рабочих эталонов напряжения – СИ заказчиков. Проверка функциональности автоматической системы продемонстрировала, что автоматическая калибровка происходит быстрее, чем в ручном режиме, а также не требует присутствия оператора.

Верификация автоматической системы проведена при калибровке набора мер напряжения 10 В в идентичных условиях калибровки десятикратных наблюдений в течение десяти дней. Полученные результаты измерений и соответствующая оценка расширенной неопределенности сопоставлены с результатами ручной калибровки и калибровки с использованием системы supraVOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона. Проанализированы серии из 20 измерений, за оценку результата наблюдений (приписанное действительное значение меры напряжения) принято среднее арифметическое результатов измерений. При этом как при ручной, так и при автоматической калибровке использованы одни и те же сканер, цифровой мультиметр, соединительные кабели. В табл. 1 представлен расчет бюджета неопределенности результатов калибровки одной меры напряжения 10 В, выполненный в ручном и автоматическом режимах, где u_c – стандартная неопределенность; P – доверительная вероятность; k – коэффициент охвата.

В табл. 2 приведены полученные различными способами результаты (приписанные действительные значения с расширенной неопределенностью) калибровки набора мер напряжения 10 В (Fluke 732B), входящих в состав НЭ.

Из табл. 2 следует, что сопоставимы результаты калибровки, полученные в автоматическом и ручном режимах, а оценка расширенной неопределенности в автоматическом режиме меньше соответствующих оценок в ручном режиме. В результате достигнута совместимость и улучшена повторяемость результатов измерений в автоматическом режиме. В процессе верификации разработанной и внедренной автоматизированной системы подтверждены ее функциональные возможности и совместимость результатов измерений в автоматическом и ручном режимах, а также с использованием системы supra VOLTcontrol, реализующей эффект Джозефсона.

Заключение. Разработанный по итогам исследований проблемы автоматизации измерений программно-аппаратный комплекс позволяет проводить измерения на Национальном эталоне единицы напряжения – вольты в автоматическом режиме. Полученный массив результатов измерений подвергается дальнейшей обработке, отображается в графическом виде, хранится и передается пользователям, тем самым оптимизируются процессы воспроизведения и передачи единицы напряжения постоянного тока рабочим эталонам и СИ.

Литература

1. Катков, А. С. Сличение национальных эталонов вольты Российской Федерации и Республики Беларусь / А. С. Катков, П. А. Черняев // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 69–71.
2. Столлингс, В. Компьютерные системы передачи данных / В. Столлингс. – М. : Вильямс, 2002. – 928 с.
3. Воспроизведение вольты на основе переходов джозефсона СИС- и СНС-типа / А. С. Катков [и др.] // Измерительная техника. – 2017. – № 6. – С. 46–48.
4. Катков, А. С. Ключевые сличения эталонов вольты ВНИИМ и МБМВ / А. С. Катков, С. Солве // Измерительная техника. – 2011. – № 11. – С. 70–73.
5. Смирнов, Н. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н. В. Смирнов, И. В. Дунин-Барковский. – М. : Наука, 1969. – 512 с.
6. Миронов Э.Г. Метрология и технические измерения / Э. Г. Миронов, Н. П. Бессонов. – М. : КНО-РУС, 2015. – 422 с.
7. Муха, Ю. Л. Информационно-измерительные системы / Ю. Л. Муха, И. Ю. Королева. – Волгоград : Волгоградский ГТУ, 2015.
8. Behr, R. Technical Supplement / R. Behr, A. S. Katkov // Metrologia. – 2005. – Vol. 42. – P. 01005.
9. Behr R., Schulze H., Müller F., Kohlmann J., Niemeyer J. // IEEE Trans. Instrum. Meas., 1999. – Vol. 48, №. 2. – P. 270–273.
10. Метод контроля ошибок в устройствах хранения и передачи информации автоматизированных систем измерительной техники / А. А. Павлов [и др.] // Измерительная техника. – 2010. – № 11. – С. 21–25.

УДК 620.179.18

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО SLA-ТЕХНОЛОГИИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОТВЕРЖДАЕМОГО СЛОЯ Протасеня Т.А., Крень А.П., Мацулевич О.В.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На основе экспериментальных данных показана достаточная чувствительность метода динамического индентирования к изменению твердости (прочности) и модуля упругости образцов, изготовленных по SLA-технологии с высотой слоя 100, 50 и 25 мкм. В результате использования основных методик обработки регистрируемых параметров ударного нагружения установлено, что оптимальной является энергетическая расчетная модель, позволяющая получить максимально достоверные данные о свойствах исследуемых материалов и обеспечивающая наибольшую чувствительность метода динамического индентирования к изменению характеристик полимерных изделий.

Ключевые слова: твердость, модуль упругости, прочность, SLA-технология, индентирование.

**ESTIMATION OF THE SENSITIVITY OF THE DYNAMIC INDENTATION METHOD
TO CHANGING THE PROPERTIES OF POLYMER PRODUCTS OBTAINED
BY SLA-TECHNOLOGY WITH DIFFERENT CURING LAYER HEIGHT**

Pratasenia T., Kren A., Matsulevich O.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Based on the experimental data, the sufficient sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the hardness (strength) and elastic modulus of samples fabricated using the SLA-technology with a layer height of 100, 50, and 25 μm is shown. As a result of the use of the main methods of processing the recorded parameters of impact loading, it was found that the energy calculation model is optimal, which allows obtaining the most reliable data on the properties of the materials under study and providing the highest sensitivity of the dynamic indentation method to changes in the characteristics of polymer products.

Key words: hardness, elastic modulus, strength, SLA-technology, indentation.

*Адрес для переписки: Протасеня Т.А., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: 5657397@gmail.com*

В настоящее время получение готовых изделий из полимерных материалов общепринятыми методами: штамповки, прессования, литья и т.д. отходит на второй план, а лидирующие позиции занимают аддитивные технологии, и в частности лазерная стереолитография (SLA-технология). В процессе SLA-печати фотополимерная смола послойно отверждается под действием лазера. Вследствие аддитивной природы SLA-технологии толщина отверждаемого слоя определяет разрешение печати (т.е. способность создавать изделия с высокой точностью). Наиболее распространенной проблемой, связанной с точностью изготовления продукции по SLA-технологии, является так называемое «скручивание», т.е. деформация, вызванная усадкой фотополимерной смолы в процессе отверждения, и приводящая к изменению физико-механических характеристик материала. Эти обстоятельства и определяют необходимость контроля данных изделий на протяжении всего их жизненного цикла.

Единственными методами, применяемыми сейчас для численной оценки физико-механических характеристик изделий аддитивного синтеза, являются стандартные разрушающие испытания [1]. Но поскольку свойства образцов-свидетелей могут отличаться от свойств готового изделия (ввиду своей геометрии, масштабного фактора и т.д.), то объективность полученной с их помощью оценки свойств материала ставится под сомнение. В тоже время надежных методов неразрушающего контроля, которые могли бы с достаточной достоверностью дать численную оценку физико-механическим характеристикам, пока не существует.

По этой причине актуальной задачей контроля качества изделий, изготовленных по SLA-технологии, является развитие методов неразрушающего контроля. Наиболее часто применяемым методом неразрушающей оценки физико-механических характеристик материалов является метод индентирования. Однако в своем

классическом представлении (статического нагружения) метод индентирования не предназначен для проведения оперативного контроля, поскольку требует создания замкнутой силовой системы нагружения. В условиях производства для этих целей более пригоден метод динамического индентирования, позволяющий проводить контроль реальных изделий и своевременно выявлять отклонения их характеристик от номинальных значений.

Ранее нами были проведены исследования, направленные на адаптацию метода динамического индентирования для контроля ряда конструкционных материалов (углеполненных полимеров, углерод-углеродных композитов и т.д.). Научные работы по данной теме посвящены в том числе вопросам моделирования процесса упругопластического деформирования и содержат аналитические уравнения связи параметров диаграммы ударного нагружения с твердостью H_{IT} и приведенным модулем упругости E_{IT}^* материала (уравнения 1 и 2) [2].

$$H_{IT} = \frac{P_{hmax}}{\pi R_i (h_{max} + h_p)}, \quad (1)$$

$$E_{IT}^* = \frac{3P_{hmax}}{4\sqrt{R_i} (h_{max} - h_p)^{3/2}}, \quad (2)$$

где R_i – радиус индентора; h_{max} – максимальная глубина внедрения индентора; P_{hmax} – контактное усилие при максимальной глубине внедрения; h_p – глубина пластического отпечатка.

В настоящей же работе предлагается также использовать связь физико-механических характеристик контролируемого материала с энергетическими характеристиками ударного взаимодействия: энергией пластической и упругой деформации (уравнения 3 и 4) [3].

$$E_{ITW}^* = \frac{3\sqrt{2}}{5} \frac{P_{hmax}^2}{mv_{min}^2 \sqrt{2R_i (h_{max} + h_p)}}, \quad (3)$$

$$H_{ITW} = \frac{m(v_{max}^2 - v_{min}^2)}{\pi R_i h_p (h_{max} + h_p)}, \quad (4)$$

где m – масса индентора; v_{max} и v_{min} – предударная скорость и скорость отскока индентора.

Сравнение этих двух подходов к расчету основных физико-механических характеристик позволит выявить наиболее точную и информативную методику определения твердости и модуля упругости материалов полимерных изделий и оценить чувствительность метода динамического индентирования к изменению свойств аддитивного полимера в зависимости от толщины его отверждаемого слоя.

Для проведения исследования влияния толщины отверждаемого слоя при SLA-технологии аддитивного производства на физико-механические характеристики полимерных изделий были изготовлены образцы – лопатки типа A1 [4] из фотополимерной смолы Formlabs Black V4. Печать образцов осуществлялась на 3D-принтере Form2 (Formlabs Inc., США) при температуре смолы 31 °С, мощности лазера 250 кВт с пятном 140 мкм. Доотверждение материала образцов проводилось в сушильной камере Form Cure (Formlabs Inc., США) под действием УФ-излучения мощностью 39 Вт и температуры 60 °С. Для исследования было изготовлено 3 вида образцов с различной высотой отверждаемого слоя при печати: 100, 50 и 25 мкм (по 5 образцов каждого вида). Все образцы были предварительно испытаны на растяжение [4]. В результате разрушающих испытаний было установлено, что оптимальная высота отверждаемого слоя при указанных геометрических параметрах выращиваемого изделия составляет 50 мкм. При заданных параметрах SLA-печати модуль упругости увеличивается в среднем на 10 %, а предел прочности примерно на 9 %.

Индентирование образцов осуществлялось с предударной скоростью 3,0 м/с твердосплавным индентором массой 6,8 г с радиусом сферическо-

го наконечника 2,5 мм. Анализ данных ударного нагружения показал, что метод динамического индентирования на качественном уровне подтверждает результаты стандартных испытаний на растяжение. При этом наибольшее изменение динамической твердости и динамического модуля упругости наблюдается между образцами с высотой отверждаемого слоя в 100 и 50 мкм. При уменьшении высоты отверждаемого слоя фотополимерной смолы твердость H_{IT} увеличивается в среднем на 6%, а модуль упругости E_{IT}^* – на 5%. На ряду с этим наибольшую чувствительность к изменению свойств исследуемых полимерных изделий метод динамического индентирования показал при использовании энергетического подхода анализа регистрируемых данных нагружения материала.

В данном случае изменение динамической твердости H_{ITW} составило порядка 10 %, а модуль упругости E_{ITW}^* – 11 %.

Благодарность. Работа выполнена в рамках Национальной программы стипендий для молодых ученых при финансовой поддержке Всемирной федерации ученых (World Federation of Scientists National Scholarship Programme).

Литература

1. Mechanical characterization of 3D-printed polymers / John Ryan C. Dizon [et al.] // Additive Manufacturing. – 2017. – Vol. 20. – P. 44–67.
2. Complex of devices for determining the physical and mechanical properties of the carbon materials used in the rocket and space technology by the impact indentation method / A. P. Kren [et al.] // Mechanics of Composite Materials. – 2015. – Vol. 51, № 2. – P. 323–328.
3. Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования : СТБ 2495-2017. – Введ. 01.09.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 40 с.
4. Пластмассы. Метод испытания на растяжение : ГОСТ 11262 (ISO 527-2:2012). – Введ. 01.09.2019. – М. : Стандартинформ, 2019. – 24 с.

УДК 53.089

О НОВОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ (ТЕОРИЯ РЕЙТИНГОВ)

Романчук В.М.¹, Лаппо П.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Анализ литературы показывает, что актуальной является проблема количественного измерения качества продукции. Проблема измерения возникает и в теории принятия решений. Предлагается использовать метод рейтинга для измерения предпочтений в теории полезности и в теории принятия решений. Излагается аксиоматический подход к проблеме измерения. Сформулировано аксиоматическое и классическое определение рейтинга. Из аксиоматического определения следует классическое определение для специального множестве объектов. Классическое определение является конструктивным. Для проверки адекватности результатов измерений достаточно сопоставить рейтинги, полученные разными способами измерения (метод альтернатив). Метод рейтинга можно использовать при построении модели оценки качества продукции и в теории принятия решений.

Ключевые слова: теория измерений, рейтинг, функция полезности, квалиметрия.

ABOUT THE NEW MEASUREMENT THEORY (RATING THEORY)

Romanchak V.¹, Lappo P.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. An analysis of the literature shows that the problem of quantitative measurement of the quality of production is relevant. The problem of measurement also arises in the theory of decision-making. It is proposed to use the rating method to measure preferences in the theory of utility and in the theory of decision-making. An axiomatic approach to the measurement problem is presented. The axiomatic and classical definition of the rating is formulated. From the axiomatic definition follows the classical definition for a special set of objects. The classical definition is constructive. To verify the adequacy of the measurement results, it is sufficient to compare the ratings obtained by different measurement methods (the method of alternatives). The rating method can be used in the construction of a product quality assessment model and in the theory of decision-making.

Key words: measurement theory, rating, utility function, qualimetry.

*Адрес для переписки: Романчук В.М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Romanchak@bntu.by*

Задачей количественного измерения является эмпирическое определение количественной структуры [1]. Наиболее просто определить аддитивную количественную структуру [2]. Физические величины: масса, длина, время имеют аддитивную структуру. Аддитивность является естественным условием для проверки адекватности результатов измерений. Но даже не все физические величины аддитивны. Такие как температура или плотность не аддитивны. Полезность, измеряемая субъективно, не является аддитивной. Для измерения таких величин рассматривают репрезентативную теорию измерений.

В основе репрезентативной теории измерений лежит теория множеств (отношения множеств). В репрезентативной теории измерений предполагается существование для каждого свойства, подлежащего измерению, некоторой эмпирической системы с отношениями. Операции между элементами множества отдельно не рассматриваются, а считаются также отношениями.

Такая формулировка операции создала ряд трудностей, связанных с тем, что числовая система с некоторыми отношениям не всегда может быть сведена к полю действительных чисел, для элементов которого определены операции сложения, взятия противоположного знака, умножения и деления [3]. Кроме того, в репрезентативной теории измерений отсутствует встроенный механизм проверки адекватности. Поэтому существуют многочисленные примеры ошибочного применения алгебраических операций при построении математических моделей. Например Парето предполагал, что порядковые шкалы полезности достаточны для формулировки определения экономического равновесия. Тем не менее в теории Парето используют дифференцируемость функции полезности и операции вычитания. В шкале порядка возможны логические операции, но невозможны арифметические действия. Следовательно вычитание

является посторонней операцией в модели Парето. Опираясь на ошибку Парето, Хикс утверждал, что везде, где полезность появляется в экономической теории, она может быть заменена порядковой полезностью [4]. Это ложное утверждение повторяется в современной экономической литературе. Если результатом измерения является отношение порядка и определена шкала порядка, то арифметические действия неуместны [3].

Например, в методе анализа иерархий в результате измерения определены разности значений [5]. Но в методе анализа иерархий вместо операции вычитания необоснованно используют операцию деления, которая является посторонней арифметической операцией.

Если найдены отношения значений, то для значений величины определена шкала логарифмических интервалов. Тем не менее в теории важности критериев в этом случае ошибочно используют недопустимые арифметические операции (шкалу отношений), [6].

Предлагается применять новую математическую модель количественного измерения, в которой определены бинарные операции между элементами множества. Решение проблемы измерения состоит в определении условий, при которых операциям над числами соответствуют операции над эмпирическими величинами. Чтобы избежать ошибок моделирования разработан метод количественного измерения – теория рейтингов [7]. Можно считать, что рейтинг опирается не на теорию множеств, а на общую теорию функций (теорию категорий). В методе рейтинга числа присваиваются не объектам, а упорядоченным парам объектов. Областью определения рейтинга является множество упорядоченных пар объектов. На множестве упорядоченных пар определена композиция (операция сложения). Рейтинг – это отображение, которое сохраняет композицию упорядоченных пар.

Значения рейтинга находят на основании результатов измерения. Для проведения измерения выбирается алгебраическая операция. Теорию рейтинга можно рассматривать как дальнейшее развитие теории измерения Барзилая [3]. Наиболее важными элементами этой теории являются:

1. Классификация моделей измерений по математическим операциям;
2. Принцип отражения;
3. Условие однородности.

Сущность измерения заключается в построении математической системы, которая служит моделью для данной эмпирической системы. Цель этой конструкции – дать возможность применения математических операций для нахождения значений внутри математической системы. Шкалы, которые позволяют применять операции сложения и умножения, вычитания и деления называются сильными. Показано [3], что все модели классической теории измерения порождают *слабые шкалы*, к которым операции сложения и умножения неприменимы. Для действительных чисел можно выполнить операции сложения и умножения, но такие операции являются посторонними, поскольку они не отражают соответствующие эмпирические операции. Посторонние операции нельзя проводить на значениях шкалы – они неуместны и неприменимы; их применение к значениям шкалы является ошибкой моделирования.

Принцип отражения является существенным элементом моделирования, который не был признан в классической теории измерения [3]. Он утверждает, что операции внутри математической системы применимы тогда и только тогда, когда они отражают соответствующие операции внутри эмпирической системы. По принципу отражения необходимым условием применимости операции над значениями шкалы является

существование соответствующей эмпирической операции.

Для выполнения измерений удобно использовать определение рейтинга [7]. В результате сравнения пары объектов необходимо выяснить какой из объектов больше по величине, или на сколько больше, или во сколько раз больше. В первом случае арифметические операции для значений величины не определены. Во втором случае для значений величины определена только разность значений или только отношение значений. Поскольку значения являются действительными числами, то формально можно определить операции сложения и умножения. Но поскольку нет эмпирического обоснования таким операциям, то складывать и умножать значения нельзя.

Литература

1. Michell, J. Quantitative science and the definition of measurement in psychology / J. Michell // *British Journal of Psychology*. – 1997. – № 88. – P. 355–383.
2. Narens, L. Measurement: The theory of numerical assignments / L. Narens, R. D. Luce // *Psychological Bulletin*. – 1986. – № 99. – P. 166–180
3. Barzilai, J. Inapplicable Operations on Ordinal, Cardinal, and Expected Utility / J. Barzilai // *Real-World Economic Review*. – 2013. – № 63. – P. 98–103.
4. Hicks, J. R. Value and Capital. Second Edition / J. R. Hicks. – Oxford University Press, 1946. – 340 p.
5. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1989. – 278 с.
6. Подиновский, В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений / В. В. Подиновский. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 64 с.
7. Романчук, В. М. Измерение нефизической величины / В. М. Романчук // *Системный анализ и прикладная информатика*. – 2017. – № 4. – С. 39–44.

УДК 615.8-7

КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОСАНКИ В ПОЛОЖЕНИИ СИДЯ

Самохвал П.М., Василевская А.А., Нехаева М.А., Сапранкова А.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Здоровье и благополучие сотрудников – актуальная тема для работодателя в нашем быстро меняющемся мире. Работодатели теряют деньги, если их сотрудники страдают от различных проблем со здоровьем и не могут работать. Основная проблема – боли в пояснице и в области шеи, вызванная неправильным положением сидя. В этой статье описывается концепция реализации системы обнаружения нарушений осанки в положении сидя. Данная концепция реализована при помощи датчиков давления установленных на кресло. Узел Интернета вещей (IoT) на базе Arduino подключает эти датчики к системе. Система работает в реальном времени, определяет нарушения вызванные неправильной позой и уведомляет пользователей.

Ключевые слова: осанка, интернет вещей, здоровье, Arduino.

THE CONCEPT OF INTELLIGENT POSTURE MONITORING SYSTEM IN THE SITTING POSITION

Samokhval P., Vasilevskaya A., Nekhaeva M., Saprankova A.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Employee health and well-being is a hot topic for the employer in our rapidly changing world. Employers lose money if their employees suffer from various health problems and cannot work. The main problem is lower back and neck pain caused by improper sitting position. This article describes the implementation concept of a seated posture detection system. This concept is realized using pressure sensors mounted on the chair. An Arduino-based Internet of Things (IoT) node connects these sensors to the system. The system works in real time, detects violations caused by incorrect posture and notifies users.

Key words: posture, internet of things, health, Arduino.

Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.by

Развитие информатизации в настоящее время вызывает большие риски связанные с ухудшения здоровья. Люди гораздо меньше двигаются и чаще работают за компьютером, а длительное время в положении сидя – вредит позвоночнику и вызывает хронические проблемы, требующие длительного и дорогостоящего лечения.

Наша задача – помочь людям понять, что помимо работы необходимо уделять внимание своему здоровью и правильной осанке, ведь правильное положение сидя необходимо для поддержания хорошей осанки и здоровью позвоночника. Сидение с прямой спиной и плечами не только улучшит физическое здоровье человека, но и заставит его чувствовать себя более уверенно.

Таким образом, данная статья посвящена предложению системы обнаружения неправильных положений тела человека сидя.

В основе нашей концепции лежит идея создания практической интеллектуальной системы для определения положения осанки сидя в любом рабочем помещении. Основная цель – разработать систему, которую можно было бы легко внедрить в любом помещении. Рис. 1 иллюстрирует предложение концепции системы. Общая система состоит из переменного количества кресел, облачного сервера и клиентских станций – смартфонов. Каждое кресло имеет электронное устройство, внешний аккумулятор – источник питания и гибких датчиков давления.

Распорядок дня людей, работающих на местах, оснащенных данной системой, должен выглядеть следующим образом:

- пользователь приходит в офисе и садится. в этот момент оборудование выходит из спящего режима и подключается к облачному хранилищу;
- затем пользователь активирует мобильное приложение и подключается к системе датчиков. у каждой системы датчиков есть свой идентификационный номер для входа в систему;
- информация о положении сидя отображается в приложении смартфона;

– после завершения работы пользователь встает с кресла и выходит из системы. для получения статистики мы можем просматривать данные о позе человека, которые сохраняются в облаке.

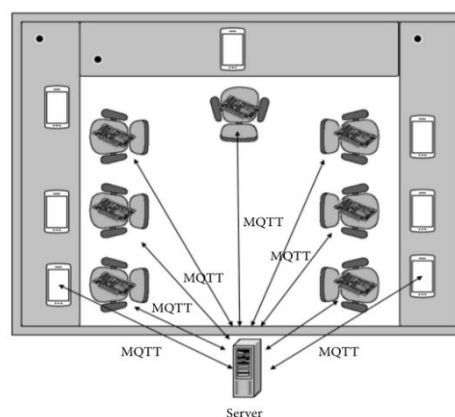


Рисунок 1 – Предполагаемая реализация нашей концепции

Реализация системы датчиков. Для измерения давления предлагается использовать шесть однозонных силовых резисторов: сопротивление датчиков уменьшается с увеличением давления. Измеренное сопротивление изменяется от десятков кОм до сотен Ом. Датчик не требует калибровки до или между измерениями. На сиденье предлагается устанавливать 4 датчика, а на спинка – 2 датчика. Соответствующие расположение датчиков определяется опытным путем.

Программное обеспечение. На рис. 2 показана блок-схема работы возможного программного обеспечения. Начало - определение переменных и их инициализация. Наиболее важными переменными являются имя сети Wi-Fi (SSID), пароль Wi-Fi, IP-адрес облачного сервера и учетные данные протокола MQTT. Затем инициализируются общие контакты ввода/вывода, последовательная связь и связь по Wi-Fi. Первое, что делает программа – это подключается к сети Wi-Fi. Если первоначальный вход в систему завершился не-

удачно, система ожидает 5 секунд, а затем повторяет операцию до успешного входа в систему.

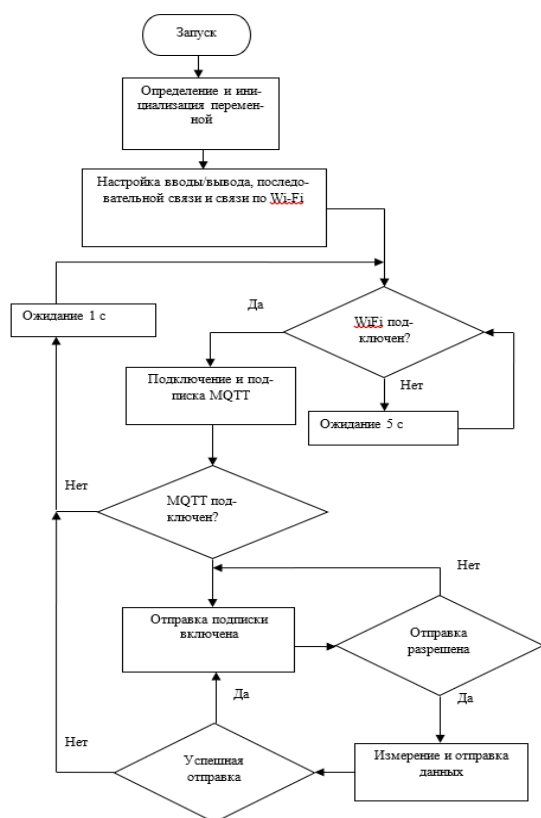


Рисунок 2 – Блок-схема работы программного обеспечения разрабатываемой системы

Мобильное приложение. Приложение для смартфона необходимо для обеспечения клиентского доступа к измерениям полученным с датчиков давления. На первом этапе пользователь должен подключиться к серверу и заполнить форму подключения, указав адрес сервера, порт

связи, логин, пароль и идентификационный системы датчиков.

После входа в приложение пользователь может наглядно оценить свою осанку в режиме реального времени, а также получить статистику за рабочий день. Пользователь может оценить правильность при помощи цветowych индикаторов, которые выглядят следующим образом.

Зеленый: клиент сидит в правильном положении с равномерно распределенной нагрузкой.

Оранжевый: участник сидит, но его вес распределяется неравномерно.

Красный: поза клиента неправильная, требуется ее коррекция. Это положение сигнализирует о чрезмерной нагрузке с одной стороны. Это состояние также может возникнуть, когда пользователь сидит непрерывно более часа.

В этой статье представлена концепция интеллектуальной системы контроля состояния осанки в положении сидя на основе датчиков давления и мобильного приложения. Шесть гибких датчиков давления, которые устанавливаются следующим образом: два на спинке и четыре на сиденье. Система датчиков давления собирает информацию и отправляет данные в облако по протоколу MQTT. Данные хранятся и оцениваются в облаке программного обеспечения. Пользователь может видеть информацию о осанке в положении сидя и другую подробную информацию в мобильном приложении. Наша цель состояла в том, чтобы создать концепцию мобильно-аппаратного комплекса для определения правильной сидячей позы при минимальных требованиях к вычислительной мощности. Использование таких систем может помочь с предотвращением травм связанных с поясничным и шейным отделом позвоночника. Что положительно скажется на общем здоровье офисных работников.

УДК 615.8-7

КОНЦЕПЦИЯ УСТРОЙСТВА МОНИТОРИНГА ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Самохвал П.М., Воронова Т.С., Кошель И. В., Пархомчук О.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Анализ осанки человека имеет множество применений в области спорта и медицины, включая наблюдение за пациентами, анализ образа жизни, уход за пожилыми людьми и т.д. Многие работы в этой области основаны на методах компьютерного зрения. Но данные методы ограничены в предоставлении решения в реальный момент времени, так как требуется время на обработку и инрепритацию. Нами предлагается концепция устройства, в виде корсета, для оценки поза людей с инвалидностью и без нее, вызванной заболеваниями опорно-двигательного аппарата.

Ключевые слова: осанка, здоровье, оценка позы, опорно-двигательный аппарат.

THE CONCEPT OF A DEVICE FOR MONITORING THE POSTURE OF A HUMAN WITH IMPAIRED MUSCULOSKELETAL SYSTEM

Samokhval P., Voronova T., Koshel I., Parkhomchuk O.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Posture analysis has many uses in sports and medicine, including patient observation, lifestyle analysis, elderly care, etc. Much work in this area is based on computer vision techniques. But these methods are limited in providing a solution in real time, since it takes time to process and interpret. We propose a concept of a device, in the form of a corset, for assessing the posture of people with and without disabilities caused by diseases of the musculoskeletal system.

Key words: posture, health, posture assessment, musculoskeletal system.

*Адрес для переписки: Самохвал П.М., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: p.samokhval@yandex.by*

Правильная осанка человека является одним из важнейших факторов его гармоничного развития и функционирования. В строгом научном понимании осанка – это способ построения биомеханической схемы тела человека в вертикальном положении. Это построение определяет конструкцию тела, в той или иной степени пригодную для сохранения вертикального положения и движения. В вертикальном положении сегменты тела (голова, грудь, торс, таз, ноги) выстраиваются относительно друг друга и относительно скелета, образуя устойчивую конструкцию, способную противостоять инерционным силам, действующим на тело [1]. При гармоничном построении (правильной осанке) мышцы тела не находятся в состоянии длительного напряжения – соблюдается мышечный баланс вертикальной позы, нет нагрузки на связочный аппарат, нагрузка костей происходит вдоль «оси прочности». Соответственно, перегрузка мышц, связок, костей при неправильном привычном выравнивании (неправильной осанке) с течением времени приводит к возникновению дискомфорта, более различного характера (мышечных, костных) и, как следствие, неврологических заболеваний и заболеваний скелета. При нарушении осанки снижаются амортизационные возможности позвоночного столба, повышается общий износ организма, проявляющийся в хронических болях спины, плечевого и поясничного поясов, заболеваний всех систем органов.

Анализу научной и статистической литературы показал, что большой процент случаев присвоения группы инвалидности связан именно с наличием у человека заболеваний, вызванных неправильной осанкой, – как врожденных, так и возникших в процессе онтогенеза [2–9]. Такие нарушения осанки, как правило, не поддаются коррекции и, как следствие, ведут к дисфункции опорно-двигательного аппарата. С людьми, имеющими инвалидность вследствие дисфункции опорно-двигательного аппарата, часто происходят падения или опрокидывания. В большинстве таких ситуаций упавший человек не может помочь себе самостоятельно и нуждается в помощи.

Однако, с учетом стремления человека к психологической и физической автономности, не всегда рядом с упавшим присутствуют те, кто может помочь подняться. Длительное же нахождение без посторонней помощи в неудобном положении или посттравматическом состоянии может быть фатальным. Следовательно, существует проблема необходимости мониторинга позы человека без ущемления его стремления к автономности.

На сегодняшний день существуют два способа оценки позы человека: инвазивный и неинвазивный методы. Инвазивный метод оценки предполагает имплантирование или крепление к коже исследуемого субъекта датчиков, позволяющих определить взаимное расположение частей тела человека в покое и в динамике и сигнализировать, если положение кардинальным образом изменилось. Данный метод обладает высокой точностью за счет прямого контакта чувствительных элементов с объектом, однако имеет определенные недостатки в реализации: процесс имплантации или крепления и ношения датчиков может доставлять дискомфорт и, как следствие, вынуждать человека менять привычную осанку, что может оказывать влияние на состояние здоровья человека.

Неинвазивный метод заключается в интеграции в обычную среду субъекта средств мониторинга за положением тела человека в пространстве – камер фиксации, акустических, ультразвуковых, датчиков давления и обработку полученной информации с помощью специализированной нейросети (построенной, например, на основе объемной триангуляции). Такой метод, безусловно, более комфортен для самого субъекта, но, тем не менее, имеет ряд существенных недостатков, связанных с чувствительностью самих датчиков, времени, затраченного на машинную обработку потокового видео, проблеме определения необходимого и достаточного времени интервалов передачи обработанных системой данных а также с тем, что данная система мониторинга привязана к конкретной локации и подходит лишь для случаев контроля перемещения субъекта в ограниченном пространстве.

Нами предлагается способ реализации инвазивного метода, заключающийся в создании специализированного корсета для людей с инвалидностью и без нее, вызванной заболеваниями опорно-двигательного аппарата. Корсет представляет собой систему эластичных тканевых перевязей, длина и положение которых относительно друг друга регулируется с помощью специализированной фурнитуры. В качестве системы датчиков выступает совокупность акселерометров, позволяющих оценивать ускорение и угловую скорость вдоль пространственных осей в точке в которой расположено устройство. Точки контроля на теле субъекта выбирают индивидуально, исходя из особенностей его состояния здоровья и способа перемещения в пространстве. Помимо акселерометра в систему мониторинга встроен электрогониометр, позволяющий оценить угол наклона и, как следствие, положение тела. Сигналы от датчиков передаются на устройство обработки, которым может являться смартфон, посредством беспроводной передачи данных. Устройство обработки оснащено функцией подачи тревожного сигнала, если информация от датчиков не соответствует нормальным для субъекта характеристикам положения. Затем эта информация может быть передана близким, медицинским работникам или в службу скорой помощи. Помимо всего прочего при помощи обратной связи лечащий врач может отслеживать необходимую информацию о пациенте.

Разработка описанных в данной статье устройств связана не только с людьми имеющими инвалидность связанную с опорно-двигательным аппаратом. При незначительных модификациях устройства устройства можно использовать для людей с нарушениями осанки, но без инвалидности, для мониторинга из осанки в течении дня. Полученная статистика помогла бы врачам связанным с реабилитацией корректировать программу индивидуально для каждого пациента.

Литература

1. Kendal, F. P. Testing and Function: with Posture and Pain / F. P. Kendal, E. K. McCreary, P. G. Provanca // Muscles, Publisher : Lippincott Williams & Wilkins, 2005.
2. Неинфекционные заболевания: Информационный бюллетень. Апрель 2017 // Всемирная организация здравоохранения [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.who.int/mediacentre/fact-sheets/fs355/ru/>. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. Кочоманов, В. Н. Нарушения осанки у детей младшего школьного возраста – как основная причина проблемы здоровья / В. Н. Кочоманов, Р. В. Калашникова // Материалы МНТК. – Иркутский государственный медицинский университет Минздрава России, 2016. – С. 100–103.
4. Богданова, Г. П. Формирование правильной осанки физическими упражнениями у детей дошкольного возраста / Г. П. Богданова, П. Ф. Шевлякова, Р. Ф. Богданова // Известия Тульского государственного университета. Физическая Культура. Спорт. – Тула : Тульский государственный университет, 2016. – С. 24–28.
5. «Сорокинские чтения» «Здоровье российского общества в XXI веке: социологические, психологические и медицинские аспекты»: сборник материалов 10 международной научной конференции. – Электронное издание. – М. : Московский университет, 2016. – 897 с.
6. Information and Support. The National Scoliosis Foundation. 2021 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.scoliosis.org/info.php>.
7. Chronic pain at ages 12 to 44 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.statcan.gc.ca/access_acces/archive.action?loc=/pub/82-003-x/2010004/article/11389-eng.pdf&archive=1.
8. Физическая реабилитация детей с нарушениями осанки и сколиозом: учеб.-метод. пособие / Л. А. Скиндер [и др.] ; под общ. ред. Л.А. Скиндер. – Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина. – Брест : БрГУ, 2012. – 210 с.
9. Can texting kill me? A look at Forward Head Posture. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://spcezyathletics.blogspot.ru/2013/09/can-texting-kill-me-look-at-forward.html>.

УДК 666.76

ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ-МОДИФИКАТОРОВ НА ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$

Сергиевич О.А.¹, Дятлова Е.М.¹, Колонтаева Т.В.², Попов Р.Ю.¹

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе исследовано влияние добавок типа RO_2 с разным кристаллохимическими характеристиками на процесс спекания и формирование структуры керамики на основе системы $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$.

Ключевые слова: тилит, фазовый состав, структура, спекание, температурный коэффициент линейного расширения.

**INFLUENCE OXIDES-MODIFIERS ON THE PROCESS SINTERING AND PROPERTIES
CERAMICS BASED ON THE SYSTEM $Al_2O_3-SiO_2-TiO_2$
Sergievich O.¹, Dyatlova E.¹, Kolontaeva T.², Popov R.¹**

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The work investigated the effect of RO₂-type additives with different crystal-chemical characteristics on the sintering process and the formation of the structure of ceramics based on the Al₂O₃–SiO₂–TiO₂ system.

Key words: thialite, phase composition, structure, sintering, temperature coefficient of linear expansion.

Адрес для переписки: Сергиевич О.А., ул. Свердлова, 13а, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: Topochka.83@mail.ru

Кристаллохимическими условиями ускорения спекания оксидной керамики являются образование гетеровалентных твердых растворов с вводимыми минерализаторами, при этом энергетическая константа (по Форсману) для катиона добавки должна быть выше по сравнению со спекаемым оксидом [1].

В качестве объекта исследования выбран материал со следующим химическим составом: Al₂O₃–30 %, SiO₂–35 %, TiO₂–35 %. Исходными сырьевыми компонентами являлась огнеупорная глина Веселовская, технический глинозем и диоксид титана.

На основе литературных данных минерализаторами выбраны следующие оксиды: ZrO₂, SnO₂, CeO₂ и MnO₂, которые вводились в состав исходной массы от 2,5 до 10 % в виде химических реактивов (оксидов марки «ХЧ»). Образцы изготавливались по традиционной технологии полусухого прессования при давлении 30–40 МПа и обжигались при 1300, 1350, 1375 °С с выдержкой при максимальной температуре 1ч.

Основные свойства опытных образцов в зависимости от вида и количества добавок, а также от температуры обжига представлены в табл. 1. С повышением температуры обжига активизируются все механизмы переноса вещества. Материал

спекается в основном по твердофазному механизму, доля жидкофазного спекания незначительна и, обусловлена наличием примесей (CaO, MgO, R₂O) в глинистом компоненте, которые при спекании образуют эвтектические расплавы. Перенос вещества осуществляется, главным образом, за счет диффузионных процессов, обусловленных градиентом дефектов кристаллической решетки [2]. При температурах свыше 1300 °С определенную роль в уплотненном материале играют силы поверхностного натяжения, которые вызывают пластическую деформацию по границам зерен спекаемой системы и частичное заполнение порового пространства. Оксиды ZrO₂, SnO₂, CeO₂ имеют высокую температуру плавления, в сочетании с исходной системой Al₂O₃–SiO₂–TiO₂ не образуют легкоплавкие эвтектики, но благодаря своим кристаллохимическим характеристикам они могут изменять параметры кристаллической решетки оксидов спекаемой системы, образовывать твердые растворы замещения (при близости ионных радиусов, или внедрения, если радиусы ионов отличаются). Ti⁴⁺ в кристаллической решетке титалита Al₂TiO₅ может быть замещен катионами Sn⁴⁺, Mn⁴⁺, в меньшей степени Zr⁴⁺ и мало вероятно катионами Ce⁴⁺, радиус которого значительно превышает параметры Ti⁴⁺ [2].

Таблица 1. Свойства опытных образцов

Вид и количество добавки, %	Т _{обж} – 1300 °С			Т _{обж} – 1350 °С			Т _{обж} – 1375 °С		
	В, %	ρ _{каж} , кг/м ³	ТКЛР, ·10 ⁻⁶ К ⁻¹	В, %	ρ _{каж} , кг/м ³	ТКЛР, ·10 ⁻⁶ К ⁻¹	В, %	ρ _{каж} , кг/м ³	ТКЛР, ·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Исходный	12,6	2420	4,06	10,7	2620	3,82	9,2	2640	2,02
ZrO ₂	2,5	12,4	–	10,8	–	–	6,8	–	–
	5	11,6	2500	4,21	10,2	2710	4,06	3130	3,02
	7,5	10,8	–	–	8,7	–	4,0	–	–
	10	10,2	2650	4,35	8,0	2820	4,39	3350	3,64
SnO ₂	2,5	6,9	–	5,3	–	–	3,8	–	–
	5	4,95	3220	4,52	1,7	3500	3,65	0,2	3670
	7,5	4,6	–	–	0,9	–	0,25	–	–
	10	4,0	3260	4,81	0,6	3620	3,91	0,4	3710
CeO ₂	2,5	8,95	–	5,7	–	–	4,8	–	–
	5	6,8	2960	4,35	3,4	3290	3,81	3,1	3295
	7,5	5,9	–	–	2,2	–	2,15	–	–
	10	5,6	3080	4,5	2,1	3360	4,16	1,86	3396
MnO ₂	2,5	7,4	–	5,2	–	–	4,8	–	–
	5	6,0	2860	4,58	3,1	2910	3,81	3,0	3015
	7,5	5,5	–	–	3,9	–	2,98	–	–
	10	7,5	2610	5,36	7,5	2680	4,95	6,2	2855

При повышении температуры обжига до 1375 °С минимальное водопоглощение характерно для образцов с 5 % SnO₂. Введение CeO₂ в количестве 7,5 и 10 % позволяет снизить водопоглощение до 2 %. ZrO₂ имеет самую высокую температуру плавления, ионный радиус Zr⁴⁺ на 35 % выше, чем Ti⁴⁺, поэтому его минерализирующее действие проявляется при 1375 °С.

MnO₂ ведет себя неоднозначно: при введении его до 5 % водопоглощение образцов снижается, а при увеличении до 7,5–10 % – значительно повышается. Наличие для MnO₂ окислительно-восстановительных процессов, повышенное газовыделение может являться причиной увеличения пористости при спекании материала. Самые высокие показатели кажущейся плотности для образцов, содержащих оксиды SnO₂ и CeO₂. Увеличение температуры обжига способствует снижению ТКЛР, процессы спекания и формирования тиалита при 1375 °С обеспечивают низкое терморасширение. Оксиды-минерализаторы способствуют увеличению ТКЛР, что можно объяснить образованием твердых растворов с меньшей степенью анизотропии кристаллической решетки, чем у Al₂TiO₅, а также выделением других кристаллических фаз с более высоким терморасширением. Наиболее высокие показатели ТКЛР характерны для образцов с добавками MnO₂, что вероятно, обусловлено наличием стеклофазы и марганецсодержащей кристаллической составляющей (табл. 1).

При введении добавок в количестве 2,5 и 5 % качественный фазовый состав изменяется незначительно, наблюдается снижение интенсивности дифракционных максимумов одних фаз при увеличении интенсивности других с выделением новых. В таблице 2 приведены результаты РФА опытных образцов исходного состава и с добавками RO₂ в количестве 7,5 % при температуре 1375 °С. Видно, что влияние на фазовый состав оказывают SnO₂ и CeO₂, которые вероятно замещают катион Ti⁴⁺ в структуре тиалита, при этом

остается непрореагировавший рутил, количество которого, судя по интенсивности основных дифракционных максимумов (0,325 и 0,168 нм) больше, чем в исходном.

Таблица 2. Фазовый состав опытных образцов

Добавка RO ₂ (7,5 %)	Основные кристаллические фазы	Вспомогательные кристаллические фазы
Исходный	Муллит, тиалит	Рутил, корунд
ZrO ₂	Муллит, рутил	Циркон, титанат алюминия, корунд
SnO ₂	Муллит, титанат алюминия, рутил	Корунд
CeO ₂	Муллит, рутил титанат алюминия	Корунд
MnO ₂	Муллит, рутил, корунд	α-кварц, алюмосиликаты марганца

Корундовая фаза является вспомогательной. Более значительно изменяет качественный фазовый состав добавка ZrO₂: основными фазами являются муллит и рутил, формируется новая кристаллическая составляющая циркон (ZrSiO₄). Титанат алюминия образуется в небольшом количестве. Введение в систему MnO₂ не способствует формированию малорасширяющейся фазы тиалита, рутил и корунд присутствуют в виде непрореагировавших основных фаз наряду с муллитом, интенсивность выделения которого при этом уменьшается. Дополнительными фазами является α-кварц MnO·SiO₂.

Таким образом, наиболее эффективно ускоряют процесс спекания керамики SnO₂ и CeO₂, не изменяя качественный фазовый состав синтезированных материалов.

Литература

1. Брон, В. А. О реакции образования в твердой фазе / В. А. Брон // ДАН СССР. – 1953. – Т. 91, № 4. – С. 825–827.
2. Новикова, С. И. Тепловое расширение твердых тел / С. И. Новикова. – М.: Наука, 1974. – 293 с.

УДК 621.3

АНАЛИЗ НОВЫХ ТРЕБОВАНИЙ В РАМКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ

Серенков П.С., Белов П.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассмотрены требования энергетической эффективности, которые предъявляются к бытовым посудомоечным машинам с точки зрения потребителя. Указаны моменты которые являются не совсем понятны для потребителя и анализ возможности ужесточения существующих требований.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, бытовая посудомоечная машина, энергетическая этикетка, потребление энергии, класс энергетической эффективности.

ANALYSIS OF NEW REQUIREMENTS WITHIN THE FRAMEWORK OF ENERGY EFFICIENCY FROM THE POINT OF VIEW OF THE CONSUMER

Serenkov P., Belov P.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. This article examines the energy efficiency requirements for household dishwashers from the point of view of the consumer. The points that are not entirely clear to the consumer and the analysis of the possibility of tightening the existing requirements are indicated.

Key words: energy efficiency, household dishwasher, energy label, energy consumption, energy efficiency class.

*Адрес для переписки: Белов П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

На посудомоечные машины на уровне стран ЕАЭС и ЕС распространяются как требования энергетической эффективности так и требования к энергетической маркировке. В настоящее время требования к посудомоечным машинам пересматриваются, с тем чтобы отразить в них весь существующий на рынке технологический прогресс.

В целом более крупные посудомоечные машины имеют неоправданное преимущество, формула индекса энергоэффективности EEI – которая используется для определения класса энергоэффективности посудомоечных машин различает небольшие (комплектов посуды ≤ 10) и большие (комплектов посуды ≥ 11) [1]. Это дает неоправданное преимущество большим посудомоечным машинам по сравнению с небольшими. Например, посудомоечная машина на 10 комплектов со средним потреблением энергии 0,85 кВт/час/цикл получает EEI = 53 (класс A++) по формуле для больших приборов, в то время как по формуле для небольших приборов EEI = 63 (текущий класс A+) [1, 2]. Такой подход не совсем является корректным, поскольку потребителей необходимо прозрачно информировать о том, что более крупные приборы потребляют больше.

Так же необходимо проинформировать потребителей в буклете инструкций о том, что автоматические посудомоечные машины потребляют меньше энергии и воды, чем при ручной мойке посуды. На первый взгляд, неясно, насколько потенциальная экономия воды и энергии, потраченная на этапе использования, может компенсировать покупную цену прибора и каков срок окупаемости, если таковой вообще существует. Хотя с точки зрения гигиены можно предположить, что посудомоечная машина работает лучше, чем ручная мойка, а для меньшего количества посуды ручная мойка будет более эффективной. С другой стороны, можно склонить потребителей к использованию посудомоечной машины только при большом количестве посуды.

С полученным опытом в рамках энергоэффективности введение требований ко времени

выполнения программы ECO для посудомоечных машин, а именно уменьшение, нет необходимости. Так как посудомоечные машины технически должны работать дольше, чтобы лучше использовать тепло, для более эффективной мойки и сушки посуды.

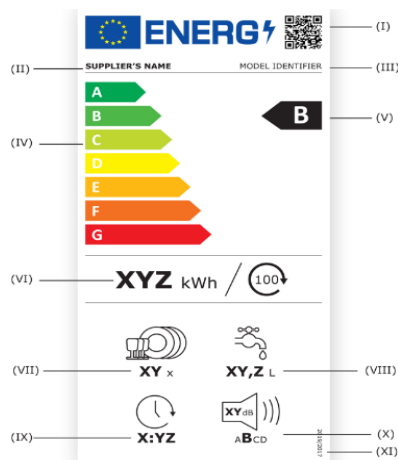
В новом Регламенте на посудомоечные машины присутствует требование к предоставляемой информации [3]. Положительным моментом является то, что требование включает в себя информацию по определенным параметрам, таким как время выполнения программы, потребление энергии и воды. Однако, эта информация должна быть предоставлена пользователям не только в буклете с инструкциями, но и в информационном листке о продукте, доступном для потребителей перед покупкой. Кроме того, эта информация должна быть дополнена данными об эффективности программ мойки и сушки, так как это очень важно для потребителей.

Согласно требованию Регламента к ресурсам, производители должны будут декларировать, как долго имеются в наличии запасные части (минимум на 7 лет) и должны будут поставить их в течение 3 недель [3]. Срок поставки максимум 3 недели не означает, что прибор будет отремонтирован в течение 3 недель. Многие пользователи, например, большие семьи, не хотели бы ждать так долго, прежде чем посудомоечная машина снова начнет работать. Кроме того, необходимо указать, на какие запасные части распространяется данное требование. И в случае нарушения данного требования, т.е. в случае непоставки запасных частей, потребители должны иметь возможность заявить о своих правах и получить компенсацию.

Гарантийный срок должен быть также указан на упаковке продукта. Эта гарантия должна быть четко доведена до сведения потребителей, например, в течение определенного количества времени. Мы опасаемся, что технические значения, подобные тем, которые в настоящее время указаны для осветительных приборов, т.е. номинальный срок службы лампы в часах, неясны для потребителей. Кроме того, такие указания, как

правило, не могут быть проверены потребителями и поэтому имеют ограниченное применение.

Поскольку посудомоечные машины становятся все более подключенными к глобальной компьютерной сети Интернет, важно, чтобы обновление программного обеспечения этих устройств было легко доступно для потребителей. По мере того, как потребители сталкиваются с отсутствием обновлений программного обеспечения, когда оно устаревает, продолжительность жизни их продуктов снижается. Хотя в настоящее время большинство случаев наблюдается с такими электронными устройствами, как мобильные телефоны, телевизоры и компьютеры, мы опасаемся, что они могут распространиться и на другие типы устройств, такие как посудомоечные машины.



- I – QR-код; II – торговая марка; III – идентификатор модели; IV – шкала классов энергоэффективности от А до G; V – класс энергоэффективности;
- VI – энергопотребление ЕСО программы в кВт/ч на 100 циклов; VII – номинальная вместимость посуды; VIII – потребление воды ЕСО программы в литрах за цикл; IX – продолжительность ЕСО программы в ч:мин; X – уровень акустического шума в воздухе, выраженная в дБ(А), и класс уровня акустического шума; XI – номер правил установленных на территории страны

Рисунок 1 – Энергетическая этикетка

В случае компьютеров и мобильных телефонов, обновления программного обеспечения, которые доступны, иногда плохо разработаны и приводят к недовольству потребителей после их установки, так как продукты могут стать медленными или ненадежными. Об этом также необходимо помнить и в области посудомоечных машин.

Продолжение нынешней системы, которая заключается в том, чтобы основывать расчет на классе энергетической эффективности только на программе ЕСО является не совсем корректным, так как потребители ожидают, что посудомоечная машина, показывающая хороший класс энергоэффективности, эффективна во всех программах. Это может привести к неверным решениям и неожиданным счетам за электроэнергию. Поэтому расчет EEI не должен основываться только на программе ЕСО, а на комбинации программ. Эти программы должны быть наиболее часто используемыми в быту.

На энергетической этикетке (рис. 1) теперь вместо средневзвешенного годового потребления энергии (кВт/ч/год) будет указано потребление энергии за цикл (кВт/ч/цикл) [4]. Эта информация, при ее отображении на этикетке, более понятна для пользователей согласно опросам потребителей. Также появилось разделение классов уровня акустического шума, поскольку существующий дисплей с децибелом не очень хорошо понятен для потребителя.

Литература

1. Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Требования : СТБ 2456-2016. – Введ. 01.04.17. – Минск: ОАО «БЕЛЛИС», 2017. – 8 с.
2. Машины посудомоечные бытовые. Энергетическая эффективность. Маркировка : СТБ 2455-2016. – Введ. 01.04.17. – Минск: ОАО «БЕЛЛИС», 2017. – 20 с.
3. Commission delegated regulation (EU) 2019/2017 // Official Journal of the European Union. – 2019. – P. 134–154.
4. Commission delegated regulation (EU) 2019/2022 // Official Journal of the European Union. – 2019. – P. 267–284.

УДК 519.8

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Серенков П.С., Воронова Т.С., Рутковский С.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены методы принятия решений на основе множества критериев, представлены примеры их применения в различных областях. Рассмотрены организации занимающиеся исследованиями в области многокритериального принятия решений. Представлена классификация методов многокритериального принятия решений на прямые и косвенные.

Ключевые слова: многокритериальное принятие решений.

MULTI-CRITERIAL DECISION-MAKING

Serenkov P., Voronova T., Rutkovskiy S.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Methods of decision-making based on multiple-criteria are considered, their applications in various fields are presented. Organizations engaged in research in the field of multiple-criteria decision-making are considered. The classification of methods of multi-criteria decision-making into direct and indirect is presented.

Key words: multi-criteria decision-making.

Адрес для переписки: Серенков П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: pavelserenkov@bntu.by;

Рутковский С.В., ул. Кульман, 33, г. Минск 220100, Республика Беларусь

email: wuxtiz@gmail.com

При принятии решений типична ситуация, когда имеется ряд противоречивых критериев. В повседневной жизни люди обычно неявно взвешивают несколько критериев и принимают решение на основании интуиции, но бывают ситуации, когда ставки достаточно высоки и появляется необходимость принимать решения по нескольким критериям явно и структурированно.

Для решения таких ситуаций были разработаны методы многокритериального принятия решений.

Активные исследования в области многокритериального принятия решений начались еще в 1970 году и продолжают до сих пор.

Эта область является одной из наиболее важных и быстрорастущих подобластей науки управления и исследования операций. За последние несколько лет было разработано множество методологий и парадигм в области многокритериального принятия решений, которые находят все более широкое применение в различных областях.

В настоящее время исследованиями в области многокритериального принятия решений занимается множество организаций. Среди них можно выделить Международное общество по многокритериальному принятию решений (International Society on Multiple Criteria Decision Making), рабочую группу EURO по содействию принятию многокритериальных решений (Euro Working Group on MCDA) и секцию INFORMS по многокритериальному принятию решений (INFORMS Section on MCDM).

Важную роль в исследованиях в области многокритериального принятия решений играет Международное общество по многокритериальному принятию решений.

Общество было основано в 1979 году и изначально называлось Специальной группой по интересам в области многокритериального принятия решений (Special Interest Group on MCDM). В 1998 году на конференции в Шарлоттсвилле, штат Вирджиния был принят устав и Специальная группа по интересам в области многокритериального принятия решений официально стала Международным обществом по многокритериальному принятию решений.

Целями Международного общества по многокритериальному принятию решений являются:

- разработка методологий решения проблем принятия решений по множеству критериев;
- тестирование методологий решения проблем принятия решений по множеству критериев;
- оценка методологий решения проблем принятия решений по множеству критериев;
- содействие взаимодействию и исследованиям в области многокритериального принятия решений.

Рабочая группа EURO по содействию принятию многокритериальных решений это одна из групп Ассоциации европейских обществ операционных исследований. Данная группа была основана в 1975 году во время Первой Европейской конференции по вопросам операционных исследований (EURO I) в Брюсселе, Бельгия. В настоящее время в данную группу входят примерно 400 членов. В 1975 году группа состояла из 29 членов из 5 разных стран. 42 из нынешних членов уже были членами в 1980 году. Каждое собрание приносит от 5 до 20 новых членов. В настоящее время в Группе представлены около 40 стран.

Целями рабочей группы EURO по содействию принятию многокритериальных решений являются:

- способствование продвижению оригинальных исследований в области многокритериального принятия решений на европейском уровне;
- предоставление каждому члену группы возможности представить другим методологические, теоретические или прикладные результаты своей работы и мысли на критическое обсуждение группы, а также способствовать сотрудничеству;
- развивать многокритериальную помощь в принятии решений, способствовать контактам между всеми лицами, заинтересованными в этой теме и стимулировать прогресс в работе в данной области;
- поддерживать группу активной и открытой путем проведения раз в два года конференций для обмена мнениями и образования новых идей.

Именно Рабочей группе EURO приписывается в основном развитие Европейской школы помощи при принятии решений по множеству критериев.

Европейская школа направляет свое исследование на методологии, в которых личные предпочтения лиц, принимающих решения, имеют меньшее влияние на выбранную альтернативу.

Примером методов европейской школы являются метод ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) и метод организации ранжирования предпочтений для оценки обогащения (Preference ranking organization method for enrichment evaluation).

Методы многокритериального принятия решений позволяют явно оценивать несколько критериев при принятии решений и приводят к более последовательным решениям.

Они могут использоваться как в повседневной жизни (например, при выборе нового дома или автомобиля), так и в бизнесе (например, при составлении списка кандидатов на вакансию, выборе новых проектов для инвестиций), строительстве (например, при выборе места для строительства торгового центра) и в других областях.

Общим для всех выше приведенных примеров является то, что в каждом из них имеется несколько альтернатив, которые необходимо ранжировать, установить приоритеты, а затем выбрать одну из альтернатив на основании нескольких критериев рассматриваемых в совокупности.

В докладе рассмотрены различные методы многокритериального принятия решений, продвигаемые рабочей группой EURO.

Методы многокритериального принятия решений, в зависимости от способа сравнения между собой альтернатив и/или критериев, можно классифицировать на две группы – на прямые и косвенные методы.

Прямые методы предполагают, что при сравнении между собой альтернатив и/или критериев, лицо, принимающее решение, прямо выражает свое суждение об относительном превосходстве одной альтернативы по сравнению с другими альтернативами (например, критерий оценивается по десятибалльной шкале).

К прямым методам многокритериального принятия решений можно отнести например простую методику оценки по нескольким критериям (Simple Multi-Attribute Rating Technique) и

аналитический процесс иерархий (Analytic hierarchy process).

Косвенные методы в свою очередь предполагают, что лицо принимающее решение будет выражать свои предпочтения путем ранжирования альтернатив и последующего выбора между двумя или более альтернативами.

К косвенным методам многокритериального принятия решений можно отнести например метод PAPRIKA (Potentially All Pairwise Rankings of all possible Alternatives).

Рассмотрены плюсы и минусы методов принятия решений. К общим проблемам всех рассмотренных методов можно отнести:

– субъективность оценки (например, одно лицо принимающее решение может считать что критерий А важнее чем критерий В, а другое наоборот);

– трудность выделения достаточного числа критериев в некоторых случаях

– невозможность применения методов многокритериального принятия решений для учета индивидуальных предпочтений большого числа лиц.

Также стоит отметить, что поскольку выбор метода зависит от конкретной ситуации и предпочтений лица принимающего решение, то выбор «лучшего» метода многокритериального принятия решений сам по себе так же является проблемой многокритериального принятия решений.

Литература

1. European Working Group on Multiple Criteria Decision Aiding. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://en.wikipedia.org/wiki/EuropeanWorkingGrouponMultipleCriteriaDecisionAiding>. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. Multiple-criteria decision analysis. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Multiple-criteria_decision_analysis. – Дата доступа: 01.10.2021.
3. Multiple Criteria Decision Making | International Society on MCDM. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mcdmsociety.org> – Дата доступа: 01.10.2021.

УДК 621.791

ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАО «АЛТИМЕД»

Серенков П.С., Герасимчик Е.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье описывается опыт построения модели сети процессов.

Ключевые слова: менеджмент измерений, жизненный цикл, качество, PDCA.

FORMATION OF AN EFFECTIVE MEASUREMENT MANAGEMENT SYSTEM At CJSC “ALTIMED”

Serenkov P., Gerasimchik E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The article describes the experience of building a model of a network of processes.

Key words: measurement management, life cycle, quality, PDCA.

Адрес для переписки: Герасимчик Е.Е., ул. Черняховского, 70, кв. 91, г. Осиповичи 213711, Республика Беларусь, e-mail: qwertiqq@gmail.com

Большинство предприятий на территории республики Беларусь пока не реализует в полной мере современные комплексные, корректные с точки зрения классического менеджмента подходы к управления качеством процессов, включая измерительные. Отчасти потому, что они носят, как правило рекомендательный характер. Это закрывает предприятиям пути выхода на рынки развитых стран, где в соответствии с законами запрещен ввоз товаров и оказание услуг предприятиями, не прошедшими сертификацию по всем этапам жизни продукта в соответствии с международными стандартами серии ISO.

Компания ЗАО «АЛТИМЕД» планирует поставлять свою продукцию на рынки Европы. В связи с этим продукция, выпускаемая на предприятии, должна соответствовать высокому уровню качества продукции. С учетом этого в компании разработана и в настоящее время внедряется система менеджмента измерений (далее – СМИ) как части общей системы менеджмента качества (далее – СМК).

Исходными данными для построения эффективной СМИ является комплекс показателей качества, предполагающих метрологический контроль и испытания. С точки зрения полноты и избыточности комплекс может быть сформирован только через анализ сети процессов, необходимых СМК[1].

С этой целью руководством компании в рамках пилотного проекта была поставлена задача разработать в соответствии с требованиями СТБ ISO 9001-2015 модель СМК комплексного процесса «Жизненный цикл эндопротеза». Для каждого процесса организации (любого уровня иерархии и любой категории), а также для сети процессов в целом должен быть реализован цикл «P D C A». Реализация этого правила в рамках функциональной модели предполагает «погружение» каждого процесса сети процессов в цикл «P D C A» [2].

Целью моделирования является описание и анализ структуры бизнес-процесса или отдельного комплексного процесса с позиций системного подхода к его организации и управлению для выявления узких мест и постоянного улучшения, в связи с этим необходимо построение функциональной модели.

Обоснован тип модели - функциональная модель сети процессов, которая должна описать структуру сети процессов управление жизненным циклом эндопротеза в соответствии с требованиями СТБ ISO 9001-2015.

В компании процесс изготовления эндопротеза реализуется, как правило, на основании договоров на изготовление продукции, ресурсов, организации, сырья и материалов.

«Выходами» процесса являются: «Готовая продукция», «Удостоверение о качестве», «Материальный отчет». Функциональная модель осуществления детальности по изготовлению эндопротезов приведена в докладе, результаты анализа процесса соответствия требованиям СТБ ISO 9001-2015 представлены в докладе.

Классический цикл «P D C A» демонстрирует, что организация обеспечивает управляемые условия процессов жизненного цикла. Иерархическая модель бизнес-процесса «Осуществление деятельности по изготовлению эндопротезов» включает комплект соподчиненных диаграмм:

Диаграмма A0 – модуль, обеспечивающий один из основных принципов менеджмента качества – принцип системного управления. Предметом моделирования в рамках данной диаграммы – модуля является СМК основного процесса.

диаграммы A5 – Блок «Осуществить производство продукции» декомпозируется на 4 характерных блока, представляющих собой классический цикл «PDCA»:

– функция 51 «Планировать выпуск продукции»;

– функция 52 «Выполнять работы по выпуску продукции»;

– функция 53 «Осуществлять контроль соответствия»;

– функция 54 «Управлять несоответствиями».

Диаграммы A52 – Блок 52 «Выполнять работы по выпуску продукции» декомпозируется в поток работ, состоящий из 3 блоков:

– функция 521 «Изготовить продукцию»;

– функция 522 «Маркировать продукцию»;

– функция 523 «Осуществить отгрузку готовой продукции».

Блок 54 «Управлять несоответствиями (проводить корректирующие действия)» является отдельным процессом, поскольку имеет модель управления несоответствиями.

Анализ модели сети процессов в состоянии «как есть» включал следующие этапы:

1) выявление несоблюдения требований стандарта к языку описания IDEF0:

а) требований к синтаксису IDEF0;

б) требований к семантике IDEF0.

2) Выявление нарушений общих правил моделирования процессов СМК:

а) правил моделирования бизнес-процессов:

– определение границ процессов;

– определения общих правил декомпозиции функций бизнес-процесса;

– определения состава и документирования функциональной модели;

б) правила логики построения диаграмм процессов:

– инвариантные процессы;

- варианты процессы;
 - 3) Выявление нарушений специальных правил моделирования СМК:
 - а) процессы, отвечающие целям и задачам;
 - б) полное соответствие модели требованиям стандарта СТБ ISO 9001;
 - в) погружение процессов в цикл «P–D–C–A»;
- В результате проведенного анализа были выявлены ряд недостатков, которые обобщены и представлены в докладе.

Таким образом, при анализе функциональной модели процесса «Осуществлять деятельность по производству эндопротезов» в состоянии «как есть» было выявлено значительное количество существенных несоответствий. Большинство несоответствий связаны с отсутствием документированной информации о процессе, а также с некорректно функционирующей системой локальной и глобальной обратной связи. Все выявленные несоответствия будут учтены и по возможности устранены при построении функциональной модели процесса «как надо»

Построение функциональной модели в состоянии «как надо» предполагает создание модели, корректной по формальным признакам и пригодной для целей менеджмента качества. Корректность модели заключается в полном соответствии требованиям СТБ ISO 9001-2015 [3].

Для построения модели сети процессов «как надо» были учтены несоответствия, выявленные в процессе анализа модели сети процессов «как есть».

Диаграмма А0 включает шесть комплексных процесса:

- А1 «Реализовывать ответственность руководства»;
- А2 «Осуществлять менеджмент финансовых ресурсов»;

- А3 «Осуществлять менеджмент персонала»;
- А4 «Осуществлять менеджмент оборудования для мониторинга и измерения»;
- А5 «Осуществить производство продукции»;
- А6 «Осуществлять анализ и оценку результатов деятельности».

Диаграмма А5.

Диаграмма А5 состоит из следующих функций:

- функция 51 «Планировать выпуск продукции»;
- функция 52 «Выполнять работы по выпуску продукции»;
- функция 53 «Осуществлять контроль соответствия»;
- функция 54 «Управлять несоответствиями».

Диаграмма А52 представлена как поток работ:

- функция А521 «Изготовить продукцию»;
- функции А522 «Маркировать продукцию»;
- функции А523 «Осуществить отгрузку готовой продукции»

В ходе доклада показывается опыт построения модели сети процессов в состоянии «Как есть» и модели сети процессов в состоянии «Как надо» в соответствии с требованиями СТБ ISO 9001.

Литература

1. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Методология организационного проектирования инженерной составляющей системы менеджмента качества / П. С. Серенков. – Минск : Новое знание; ИНФРА-М, 2011. – 491 с.
2. Серенков, П. С. Методы менеджмента качества. Процессный подход / П. С. Серенков, А. Г. Курьян, В. П. Волонтей. – Минск : Новое знание; ИНФРА-М, 2014. – 441 с.
3. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001–20015.

УДК 621.791

СОПРОВОЖДЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТОВ

Серенков П.С., Герасимчик Е.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье описывается опыт построения модели сети процессов.

Ключевые слова: менеджмент измерений, жизненный цикл, качество, PDCA.

SUPPORT OF THE LIFE CYCLE OF THE SYSTEM FOR MEASURING THE ROUGHNESS OF RESPONSIBLE SURFACES OF MEDICAL IMPLANTS

Serenkov P., Gerasimchik E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The article describes the experience of building a model of a network of processes.

Key words: measurement management, life cycle, quality, PDCA.

Адрес для переписки: Герасимчик Е.Е., ул. Черняховского, 70, кв. 91, г. Осиповичи 213711, Республика Беларусь, e-mail: qwertiqq@gmail.com

При производстве медицинских имплантов выпуск некачественной, бракованной продукции не допустим. Ведь установка некачественно изготовленного импланта может привести к нежелательным пост операционным последствиям.

С целью исключения попадания несоответствующей продукции потребителю, изготавливаемые импланты на предприятии ЗАО «АЛТИМЕД» проходят проверку качества на всех этапах производственного процесса – от входного контроля качества закупаемого сырья в собственных лабораториях отдела технического контроля, до проверки готовых изделий в работе на испытательных установках.

Стабильность качества в значительной мере зависит от выбранного вида и метода контроля. На предприятии применяется сплошной контроль качества изготавливаемой продукции – проверка каждого изделия в изготовленной партии, осуществляется после операций, имеющих решающее значение для качества готовых изделий. Применении сплошного контроля требует больших трудозатрат, также формирование достаточного большого фонда средств измерения, а в связи с специфичностью производства изготовления дополнительной вспомогательной оснастки.

С целью оптимизации измерения физических величин, а также снижения трудозатрат, сокращения фонда средств измерения, подтверждения полученных результатов измерений и испытаний на предприятии ЗАО «АЛТИМЕД» ведется постоянный мониторинг, оптимизация и усовершенствование измерительных систем.

СТБ 2450 и руководство MSA рассматривают систему измерений (далее СИ) на всех основных этапах ее жизненного цикла (далее – ЖЦ) (системный подход). В общем случае СИ имеет следующий ЖЦ (рис. 1): планирование, разработка, метрологическое подтверждение пригодности, мониторинг, полный анализ, совершенствование [1].

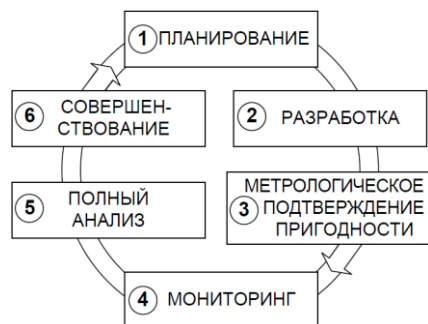


Рисунок 1 – Структура ЖЦ СИ

Ключевым моментов внедрения системы менеджмента измерений является погружение каждой системы измерений в полный жизненный цикл в соответствии с рис. 1. В качестве примера

в докладе рассмотрен жизненный цикл СИ контроля шероховатости поверхности головки эндопротеза тазобедренного сустава изготавливаемого на предприятии ЗАО «АЛТИМЕД». Головка эндопротеза представляет собой сферическое тело, изготовленное из металла или керамики с полированной рабочей поверхностью (рис. 2). Шероховатость головки эндопротеза является одним из ключевых параметров. Отклонение от установленного значения шероховатости рабочей поверхности головки может привести к быстрому износу пары трения что может значительно снизить срок службы изделия, а это не допустимо.

На этапе 1 планирования СИ на основании исходных данных нами была сформирована система ограничений и концепция системы, которая представляет собой совокупность ключевых параметров и требований, которые необходимо учесть на этапе планирования системы измерений. Данные ограничения касательно рассматриваемой системы измерений шероховатости головки эндопротеза: измерение параметра шероховатости с заданной точностью, измерение шероховатости по сфере, минимизация трудозатрат, мобильность средства измерения, возможность сохранения результатов измерения в автоматическом режиме (электронный или бумажный вариант).



Рисунок 2 – Головка эндопротеза тазобедренного сустава

Этап 2 – разработка. Является ключевым этапом ЖЦ СИ. На входе этапа разработки мы получили несколько конкурирующих концепций СИ, из которых в дальнейшем планируем выбрать наилучшую или наиболее подходящую, а на выходе получаем техническое описание конкретной СИ с заявляемыми точностными характеристиками, а также ее материальное воплощение. В ходе этапа разработки нами было произведено приблизительное оценивание точности СИ, для обеспечения уверенности в том, что СИ успешно пройдет метрологическое подтверждение пригодности (далее – МПП). Также определено средство измерения – Taylor Hobson Form Talysurf plus. Преимущество данного средства измерения в компактности, что позволяет экономить рабочее пространство оператора. Также данное средство измерения позволяет проводить измерения с необходимой точностью. Средство измерения поставляется в комплекте с калибро-

вочными сферами, что позволит проводить самостоятельную калибровку. Также к средству измерения подключается принтер, что позволяет оперативно распечатать результаты измерений.

Этап 3 – метрологическое подтверждение пригодности. В ходе данного этапа происходит проверка СИ с целью определения соответствия требованиям, а также подтверждаются заявляемые характеристики точности. Нами выделены наиболее важные составляющие СИ, метрологическая пригодность которых должна быть подтверждена, в частности: средство измерений, методика выполнения измерений, эталоны, вспомогательные средства. Средство измерения внесено в государственный реестр средств измерений, что позволит проводить поверку и калибровку средства измерения в пределах нашей страны. Также разработаны методика выполнения измерений и калибровки. Проведена валидация методики измерений. В качестве эталона шероховатости отобран эталон из уже изготовленной продукции, поскольку образец изготовлен из керамики то он способен сохранять свои физические свойства на протяжении длительного времени без ухудшения своих физических показателей [2].

Четвертый этап – мониторинг. Для поддержания СИ в рабочем состоянии в ходе ее рутинной эксплуатации необходимо осуществлять мониторинг ее характеристик. Мониторинг СИ позволяет получить информацию о ее текущем состоянии, в том числе информацию о потере СИ заданных характеристик. Мониторинг СИ на предприятии осуществляется с помощью применения контрольных карт. Контрольная карта – это графическое средство, использующее статистические подходы, важность которых для управления производственными процессами была впервые показана доктором У. Шухартом в 1924 г. [3]. Поскольку измерения несут разрушающий характер и их можно провести достаточно большое количество измерений, на предприятии для контроля по качественному

признаку применяются карты средних значений и карты размахов.

Этап 5 – полный анализ СИ. В случае получения по результатам мониторинга данных, сигнализирующих об ухудшении характеристик СИ и нарушении ее нормального функционирования, на предприятии должен быть проведен полный анализ системы с целью выявления причин, из-за которых СИ по той или иной характеристике перестала соответствовать требованиям. В качестве инструмента полного анализа выбраны техники планирования эксперимента и дисперсионный анализ.

Этап 6 – совершенствование. Рассматривая СИ, как единичный объект управления СМИ, становится очевидным важность ее совершенствования в ходе ЖЦ. Для совершенствования существующей СИ проводится исследования с использованием методов семантического, статистического анализа и управления процессами. Результаты исследования должны быть использованы для разработки новой концепции измерения и оценки состояния процессов. Также постоянно поддерживается обратная связь с потребителями, что в свою очередь позволяет быстро реагировать на изменения в потребностях потребителя.

В этом докладе представлены результаты метрологических изысканий организационного, методического, технического плана для обеспечения необходимого уровня контроля качества продукции и сопровождения жизненного цикла системы измерений.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001-2015.
2. Системы управления измерениями. Требования к процессам измерений и измерительному оборудованию : СТБ ИСО 10012-2004.
3. Шухарт У. А. Экономический контроль качества произведенного продукта / У. А. Шухарт. – Вэн Ноустренд К., Нью-Йорк, 1931. – 50 с.

УДК 658.512.4

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РОБАСТНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ

Серенков П.С., Песляк И.Е.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В докладе доказана гипотеза о том, что в основу системного подхода к оцениванию и управлению потерями робастности производственных процессов в смысле их неприемлемости могут быть положены наработанные подходы и техники теории некорректных задач. Представлена классификация ситуаций потерь робастности производственных процессов в соответствии с классификацией признаков некорректности задач. Предложен двухшаговый алгоритм обеспечения робастности производственных процессов.

Ключевые слова: робастность, теория некорректных задач, процессы производственные, процессы измерительные, процессы технологические.

ALGORITHM TO CONTROL THE ROBUSTITY OF PROCESSES USING THE PROVISIONS OF THE THEORY OF INCORRECT PROBLEMS

Serenkov P., Pesliak I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The report proves the hypothesis that the system approach to the evaluation and management of losses of robustness of production processes in the sense of their unacceptability can be based on the developed approaches and techniques of the theory of incorrect tasks. The classification of situations of losses of robustness of production processes in accordance with the classification of signs of incorrect tasks is presented. A two-step algorithm for ensuring the robustness of production processes is proposed.

Key words: robustness, incorrect problem theory, production processes, measurement processes, technological processes.

*Адрес для переписки: Песляк И.Е., пр. Дзержинского, 84, 231, г. Минск 220116, Республика Беларусь
e-mail: irina.peslyak.1864@gmail.com*

В условиях новой промышленной революции «Индустрия 4.0» начинает доминировать индивидуализация производимой продукции и услуг, динамично изменяется спрос на инновационную продукцию. В связи с этим изменяются и требования потребителей к изделиям, а также к самим поставщикам и производителям. Как уже не раз доказывал практический опыт, производители, не удовлетворяющие требования потребителей, очень быстро теряют свои позиции на рынке. И мало того, что требования меняются чуть ли не ежедневно, необходимо обеспечивать их получение с первого изделия. Это приводит нас к необходимости обеспечения приемлемости, стабильности и устойчивости (робастности) процессов производства еще на стадии их проектирования.

Приемлемость процесса и некорректность.

Понятие «корректно поставленная задача» было введено Ж. Адамаром. Он полагал, что подавляющее большинство исследований приводит к формированию математической модели. Теория некорректных задач выражает вид соотношения между правой и левой частями уравнения модели, которые при наложении на процесс будут соответствовать входам и выходам модели процесса. Некорректность математической задачи по своей сути будет ее неустойчивостью, как и потеря робастности для процесса является также свойством неустойчивости [1].

Ж. Адамар сформулировал три основных признака некорректности задачи в математике. Идентификация в производственном процессе любого из трех признаков некорректности приводит к неопределенности результата (выхода процесса):

- при наличии первого признака приемлемый результат процесса отсутствует;
- при наличии второго признака приемлемость результата неопределенна в силу многообразия альтернативных решений;
- при наличии третьего признака приемлемость результата процесса непредсказуема в силу большой вариации выхода.

Наличие первых двух признаков призывает к необходимости бескомпромиссного выполнения каких-либо действий по их полному устранению. Процесс должен быть лишен этих признаков некорректности, т.е. робастен по отношению к их проявлению.

Особенностью третьего признака некорректности является тот факт, что модель приемлемости производственного процесса некорректна всегда. Факторы входа – величины случайные, т.е. имеют естественную вариацию, что очевидно приводит к неизбежной вариации выхода – результата процесса.

Предлагается потери робастности производственного процесса в зависимости от допустимой степени вариации выхода разделить на два типа:

- потеря робастности I рода: вариацию выхода процесса можно считать допустимой (она соответствует заданной технологической точности, допустимой неопределенности (погрешности);
- потеря робастности II рода: вариацию выхода процесса необходимо снизить, поскольку она превышает допустимые значения.

В соответствии с этим мы получаем классификацию потерь робастности процессов, представленную на рис. 1.



Рисунок 1 – Классификация ситуаций потерь робастности производственных процессов как их неприемлемости в соответствии с классификацией признаков некорректности задач

По своей сути получаем, что степень некорректности задачи есть аналог степени потерь робастности. Соответственно значимость фактора потерь робастности можно определять, установив пороговое значение, например, через коэффициент K :

$$K = \Delta_{\text{вых}} / \Delta_{\text{вх}},$$

где $\Delta_{\text{вых}}$ – вариация «выхода» процесса; $\Delta_{\text{вх}}$ – вариация «входа» процесса.

Если коэффициент K превышает некоторое, заранее установленное пороговое значение, задача обеспечения приемлемости процесса становится некорректной и можно считать анализируемый фактор «входа» процесса фактором потерь робастности и рассматривать его как объект управления.

Нами разработан системный подход к обеспечению робастности производственных процессов, предполагающий двухшаговый алгоритм, включающий:

- идентификацию источников потерь робастности и соответствующих факторов входа, вариация которых вызывает вариацию выхода процесса;
- управление факторами входа, вызывающих существенную вариацию фактора выхода процесса.

Шаг 1. Рассмотрим идентификацию источников потерь робастности для технологических и измерительных процессов. Для процессов измерений характерны два комплексных источника потенциальных факторов потерь робастности [2]:

- объект измерений;
- собственно процесс измерений.

Собственно технологический процесс по образу и подобию может «давать» факторы потерь робастности, относящиеся к:

- параметрам технологического процесса;
- параметрам процесса сбора, обработки и анализа данных.

Особенностью потерь робастности для измерительных и технологических процессов яв-

ляется ее скрытый характер в силу неполноты информации о модели процесса.

Шаг 2. Для осуществления поиска наилучшего пути управления робастностью процесса воспользуемся классификацией, представленной на рис. 1, и в соответствии с ней разделим шаг на два этапа:

– первый этап – нейтрализовать появление потерь робастности типов 1, 2 и 3.2 в соответствии с рис. 1;

– второй этап – верифицировать процесс по критерию соответствия оценки суммарной неопределенности выхода заданным требованиям.

Для реализации первого этапа предлагается использовать методы, наработанные практикой решения некорректных задач по каждому из трех признаков некорректности.

Второй этап реализуется в предположении того, что первый успешно выполнен. В этом случае верификация процесса производится по критерию соответствия оценки суммарной неопределенности выхода заданным требованиям. Реализация второго этапа сводится к оцениванию результирующей вариации выхода производственного процесса как результата совокупного воздействия факторов входа, признанных на первом этапе мало влияющими, и констатации того факта, что она не превышает значений, заданных в технических требованиях. В этом случае процесс считается приемлемым.

Положения подхода к обеспечению робастности универсальны, его применение не ограничивается спецификой процесса и может применяться в любой области деятельности.

Литература

1. Сумин, М. И. Метод регуляризации А.Н. Тихонова для решения операторных уравнений первого рода: учеб.-метод. пособие / М. И. Сумин. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. – 56 с.
2. Серенков, П. С. Комплексный подход к обеспечению робастности методов измерений / П. С. Серенков, В. Л. Гуревич, Е. Э. Фельдштейн // Измерительная техника. – 2018. – № 12. – С. 72.

УДК 371.315

ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Серенков П.С., Чурак Н.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Достижение целей, связанных с совершенствованием и улучшением качества процесса обучения, в наибольшей степени зависит от умения правильно выделить более результативные методы обучения и всевозможные информационные технологии для дальнейшего использования их в качестве основы создания эффективного механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения.

Ключевые слова: системный менеджмент, компетентность, процесс обучения, информационные технологии, дистанционное обучение.

DISTANCE LEARNING AS A TOOL FOR INCREASING THE COMPETENCE OF PERSONNEL ON ISSUES OF SYSTEM MANAGEMENT

Serenkov P., Churak N.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Achieving goals related to improving and improving the quality of the learning process depends to the greatest extent on the ability to correctly identify more effective teaching methods and all kinds of information technologies for their further use as the basis for creating an effective learning mechanism on systems management with the possibility of distance learning.

Key words: system management, competence, learning process, information technology, distance learning.

*Адрес для переписки: Серенков П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by;*

Чурак Н.В., ул. Макаенка, 12Б, г. Минск 220114, Республика Беларусь, e-mail: nadia.chyrak@gmail.com

На данный момент, вопросам, связанным с компетентностью персонала, уделяется большое внимание. Рассмотрим аспекты обучения персонала по вопросам системного менеджмента.

Все существующие стандарты, устанавливающие модели систем менеджмента, в своей основе содержат требования к обеспечению компетентности и осведомленности персонала. При этом в 2020 году разработана первая редакция проекта государственного стандарта СТБ ISO 30401 «Системы менеджмента знаний. Требования», назначением которого является осуществление поддержки организации для продвижения и обеспечения возможности создания ценности посредством знаний.

Так же требования к компетентности экспертов-аудиторов отражены в следующих документах:

Закон Республики Беларусь от 24.10.2016 № 437-3 «Об оценке соответствия техническим требованиям и аккредитации органов по оценке соответствия»;

Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь от 21.12.2017 № 91 «Об утверждении Положения о требованиях к профессиональной компетентности экспертов-аудиторов и удостоверении соответствия этим требованиям»;

ГОСТ ISO 19011-2013 «Руководящие указания по аудиту систем менеджмента»;

СТБ 2266-2012 «Эксперты-аудиторы. Требования к профессиональной компетентности»;

ГОСТ ISO/IEC 17021-1-2020 «Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента. Часть 1. Требования»;

СТБ ISO/IEC 17021-2-2018 «Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента. Часть 2. Требования к компетентности для проведения аудита и сертификации систем менеджмента окружающей среды»;

СТБ ISO/IEC 17021-3-2020 «Оценка соответствия. Требования к органам, проводящим аудит

и сертификацию систем менеджмента. Часть 3. Требования к компетентности для проведения аудита и сертификации систем менеджмента качества»;

СТБ ISO/TS 22003-2015 «Система менеджмента безопасности пищевой продукции. Требования к органам, проводящим аудит и сертификацию систем менеджмента безопасности пищевой продукции»;

другие документы.

Исходя из предъявляемых требований к компетентности возникает необходимость в высококвалифицированном персонале, экспертах-аудиторах, аудиторах и других специалистах.

Уровень компетентности специалистов прежде всего зависит от качества обучения, пройденного данными специалистами.

Оценка удовлетворенности обучаемых, рассмотрение и анализ существующих способов и форм обучения персонала по вопросам системного менеджмента показали, что результативность используемых способов и форм обучения не высока.

В связи с вышесказанным возникла необходимость в повышении результативности и эффективности применяемых для обучения способов, методов и форм.

В ходе проведения исследований данного вопроса, с целью повышения удовлетворенности обучаемых, для достижения высших уровней усвоения материала была разработана обучающая методика – игра «ГУРУ МЕНЕДЖМЕНТА» (предназначена для повышения осведомленности и компетентности по вопросам системного менеджмента). Данная методика позволила повысить результативность и эффективность процесса обучения по вопросам системного менеджмента.

Но в настоящее время, многие факторы, влияющие на качество процесса обучения, в том числе и распространение коронавирусной инфекции (COVID-19), показали необходимость изменения и совершенствования форм обучения.

Одной из движущих сил научно-технического прогресса являются информационные технологии. Сложно назвать человека, который не сталкивался

с необходимостью использования информационных технологий для достижения различного рода необходимых для него целей. Даже исходя из такого аспекта, как саморазвитие, необходимо иметь достаточное представление о существующих информационных технологиях, использовать и уметь успешно применять знания, относительно возможностей информационных технологий, при решении различных производственных задач, а также задач повседневной жизни.

Согласно [1] информационные технологии (ИТ) можно представить совокупностью трех основных способов преобразования информации:

- хранения;
- обработки;
- передачи.

Свободный доступ к информации составляет основу демократического общества, а современные технологические достижения обеспечивают условия информационного взаимодействия между людьми. Информационные технологии предоставляют неизвестные ранее возможности [1]:

- дистанционного обучения;
- медицинского обслуживания;
- финансовых расчетов;
- работы на дому, обеспечивая качественно новый образ жизни;
- электронной и телевизионной торговли и др.

Рассмотрим понятие дистанционного обучения.

Дистанционное обучение – самостоятельная форма обучения, при которой взаимодействие учителя и учащихся, учащихся между собой осуществляется на расстоянии и отражает все присущие учебному процессу компоненты (цели, содержание, методы, организационные форма, средства обучения), реализуемые специфичными средствами интернет-технологий или других интерактивных технологий [2].

Преимущества дистанционного обучения:

- позволяет снизить себестоимость проведения обучения (сокращение расходов, связанных с обеспечением всевозможными условиями и ресурсами для обучения);

- предоставляет возможность проведения обучения с большим количеством обучающихся, что в свою очередь так же снижает определенные виды затрат, присутствующих в варианте очного обучения;

- позволяет уменьшить время на организацию и проведение обучения;

- предоставляет возможности использования всевозможных информационных технологий, средств, электронных баз данных, мультимедийных устройств и др., что в свою очередь повышает усвояемость материала и качество процесса обучения;

- делает обучение возможным для людей, которые не могут присутствовать на обучении в обучающем заведении по таким причинам как: неважное состояние здоровья, ограниченные физические возможности, недопустимость отсутствия на рабочем месте и др.;

- многие другие преимущества.

Естественно использование дистанционного обучения имеет также недостатки, связанные как с проведением самого дистанционного обучения, так и с проведением контроля знаний посредством дистанционного обучения (например, неполадки связи, недостаточная оснащенность обучаемых и обучающихся аппаратно-программными средствами, риск недобросовестных действий обучаемых в ходе контроля знаний), поэтому в данной ситуации большую роль играют меры, которые можно предпринять для предвидения и исключения нежелательных последствий и предпосылок проведения дистанционного обучения.

Литература

1. Информационные технологии : учебник / Ю. Ю. Громов [и др.]. – Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 260 с.
2. Вайндорф-Сысоева, М.Е. Методика дистанционного обучения : учебное пособие для вузов / М. Е. Вайндорф-Сысоева, Т. С. Грязнова, В. А. Шитова. – М. : Юрайт, 2017. – 194 с.

УДК 371.315

ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА

Серенков П.С., Чурак Н.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. На сегодняшний день, с учетом инновационного развития, технологии дистанционного проведения процесса обучения набирают высокую популярность. В настоящее время, а тем более в связи с мерами, принимаемыми для предотвращения распространения коронавирусной инфекции (COVID-19), нахождение в обучающем заведении является нежелательным фактором как для самого обучаемого, так и для самого обучающего. Вопрос перехода на дистанционную форму обучения, а также создание необходимых для этого средств, является весьма актуальным.

Ключевые слова: дистанционное обучение, системный менеджмент, язык программирования, редактор исходного кода, квалиметрическая модель.

BACKGROUND OF CREATING AN EFFECTIVE DISTANCE LEARNING ENVIRONMENT ON ISSUES OF SYSTEM MANAGEMENT

Serenkov P., Churak N.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Today, taking into account innovative development, remote control technologies for the learning process are gaining popularity. Currently, and even more so in connection with the measures taken to prevent the spread of coronavirus infection (COVID-19), being in an educational institution is an undesirable factor for both the student and the teacher himself. The issue of transition to distance learning, as well as the creation of the necessary tools for this, is very relevant.

Key words: distance learning, systems management, programming language, source code editor, qualimetric model.

*Адрес для переписки: Серенков П.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: pavelserenkov@bntu.by;*

Чурак Н.В., ул. Макаенка, 12Б, г. Минск 220114, Республика Беларусь, e-mail: nadia.chyrak@gmail.com

Дистанционное обучение – самостоятельная форма обучения, при которой взаимодействие учителя и учащихся, учащихся между собой осуществляется на расстоянии и отражает все присущие учебному процессу компоненты (цели, содержание, методы, организационные форма, средства обучения), реализуемые специфичными средствами интернет-технологий или других интерактивных технологий [1].

Для создания механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения необходимо детально рассмотреть и проанализировать технологии, которые лягут в основу разработки данного механизма обучения. При этом необходимо учитывать такие критерии как:

- использование всевозможных благ, достоинств и преимуществ научно-технического прогресса;
- рассмотрение, анализ, компиляция и дальнейшее использование различных информационных технологий;
- творческий подход к созданию нового механизма обучения;
- рассмотрение и учет практики перехода на дистанционные формы обучения.

Рассмотрим основные инструменты для создания механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения.

Немаловажными факторами для создания данного механизма обучения являются выбор языка программирования и редактора исходного кода.

Языки программирования – это формализованные языки, предназначенные для описания программ и алгоритмов решения задач на электронно-вычислительной машине [2].

Редактор исходного кода – текстовый редактор для создания и редактирования исходного кода программ. Он может быть отдельным приложением или встроен в интегрированную среду разработки (IDE) [3].

Квалиметрия – область науки, предметом которой являются количественные методы оценки качества продукции [4].

Для выбора языка программирования можно составить квалиметрическую модель выбора языка программирования. Для составления данной квалиметрической модели изначально необходимо выбрать несколько языков программирования, для их последующего сравнения и выбора наиболее предпочтительного.

Вторым этапом для составления квалиметрической модели будет являться выделение экспертной группой свойств, по которым будет проводится сравнение языков программирования. Примерами таких свойств могут быть: простота языка, расширенные возможности и др.

Третьим этапом для составления квалиметрической модели будет присвоение экспертной группой свойствам, выделенным во втором этапе составления квалиметрической модели, коэффициентов весомости.

Четвертым этапом составления квалиметрической модели будет являться проведение расчета с учетом коэффициентов весомости для последующего выбора наиболее предпочтительного языка программирования.

Таким образом составление данной квалиметрической модели покажет, какой язык программирования будет наиболее предпочтительным для последующего создания с его помощью механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения.

Для выбора редактора исходного кода можно составить квалиметрическую модель выбора редактора кода аналогичную квалиметрической модели выбора языка программирования.

Таким образом составление данной квалиметрической модели покажет, какой редактор исходного кода будет наиболее предпочтительным для последующего создания с его помощью механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения.

Рассмотрим использование дистанционного обучения с последующей оценкой знаний для повышения квалификации персонала.

В основном одним из элементов оценки знаний студентов университета, либо персонала, повышающего квалификацию по своей специализации, является проведение экзамена. Как и в случае проведения самого обучения, так и в случае проведения экзамена, необходимо создание и обеспечение определенными условиями и ресурсами, такими как:

- предоставление помещения;
- обеспечение освещением;
- обеспечение различными энергоресурсами;
- обеспечение всевозможными канцелярскими приспособлениями;
- обязательность явки на проведение обучения и экзамена и др.

Вышеприведенное подразумевает определенные экономические и временные затраты, а обязательность явки на проведение обучения и экзамена является иногда неприемлемым, а во время распространения коронавирусной инфекции (COVID-19), и нежелательным фактором.

Так же, помимо коронавирусной инфекции (COVID-19), например, для персонала, нуждающегося в прохождении повышения квалификации по своей специализации, часто не представляется возможным посещение обучающего заведения по таким причинам как:

- недопустимость отсутствия на рабочем месте;
- нежелание тратить большое количество времени и финансов на путь следования к месторасположению обучающего заведения;
- состояние здоровья, не позволяющее прибыть к месторасположению обучающего заведения;
- отказ начальства в предоставлении отпуска на обучение и др.

Дистанционное обучение позволяет в некоторых случаях частично, а в некоторых и полностью исключить вышеприведенные неблагоприятные факторы организации и проведения процесса обучения, возникающие при очной форме

обучения. Поэтому рассмотрение возможности проведения дистанционного обучения – является фактором, влияющим не только на качество процесса обучения, а также и на востребованность в данном виде обучения.

Проведение дистанционного обучения предполагает следующие выгоды от его использования: уменьшение затрачиваемых ресурсов, удобство и быстрота организации и проведения обучения и контроля знаний, общение и обсуждение вопросов в режиме онлайн, возможность электронного обмена информацией и др.

При создании механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения необходимо принять во внимание следующие недостатки дистанционного обучения:

- возникновение проблем со связью;
- недостаточный контроль за действиями экзаменуемого (риск использования экзаменуемым дополнительных источников информации при проведении дистанционного контроля знаний).

Построение квалиметрических моделей для последующего выбора языка программирования и редактора исходного кода, рассмотрение, анализ и учет преимуществ, недостатков, а также и опыта практической реализации дистанционного обучения может послужить фундаментальной основой создания механизма обучения по вопросам системного менеджмента с возможностью дистанционного обучения.

Литература

1. Вайндорф-Сысоева М. Е. Методика дистанционного обучения : учебное пособие для вузов / М. Е. Вайндорф-Сысоева, Т. С. Грязнова, В. А. Шитова. – М. : Юрайт, 2017. – 194 с.
2. Информационные технологии: учебник / Ю. Ю. Громов [и др.]. – Тамбов : ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 260 с.
3. Википедия [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>. – Дата доступа: 02.09.2021.
4. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения : ГОСТ 15467-79. – Введ. 01.07.1979. – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 28 с.

УДК 006.9:004.415.2(047)(476)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ГРАББСА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫБОРОК СОСТАВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ

Сернов С.П.¹, Балохонов Д.В.¹, Колонтаева Т.В.¹,
Тадэуш Н.Н.¹, Коничева Л.М.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «РУДЕНСК»

Руденск, Республика Беларусь

Аннотация. Предлагается способ использования критерия Граббса для исключения выбросов в выборке результатов измерений координат цветности при выполнении межлабораторных сличений и внутрилабораторного контроля в сфере сертификации светотехнического оборудования транспортных средств, отличающийся тем, что для упрощения вычислений используется физическая связь между отдельными координатами цветности.

Ключевые слова: межлабораторные сличения, внутрилабораторный контроль, статистический анализ результатов измерений, координаты цветности.

USING GRABBS CRITERION TO DETECT OUTLIERS IN COMPOUND MEASUREMENT RESULT SAMPLE ANALYSIS DURING INTERLABORATORY COMPARISON

Sernov S.¹, Balokhonov D.¹, Kolontaeva T.¹, Tadeush N.¹, Konicheva L.²

¹Belarusian national technical university

Minsk, Belarus

JSC "Rudensk"

Rudensk, Belarus

Abstract. A method allowing to use Grabbs criterion to eliminate outliers in color coordinate measurement sample during inter- and intralaboratory comparison in automotive lighting devices certification laboratories is proposed, said method using physical relationships between separate color coordinates.

Key words: interlaboratory comparison, intralaboratory comparison, measurement statistics, color coordinates.

Адрес для переписки: Д.В. Балохонов, пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by

При проведении межлабораторного сличения (МЛС) и внутрилабораторного контроля (ВЛК) в аккредитованных лабораториях необходимо проводить статистическую оценку результатов испытаний на выбросы, чтобы исключить попадание некорректных случайных данных в выборку и с заданной доверительной вероятностью определить «проблемные» лаборатории, которые не соответствуют заявленным критериям.

В случае скалярных (одномерных) физических величин, например, концентрации определяемых вещества, процедура статистического анализа отработана до мелочей и способна обеспечить требуемую точность результатов контролируемой выборки [1]. Применяя критерии Кохрена и Граббса можно определить выбросы и исключить их даже из большой выборки данных по множеству (около 20) лабораторий, участвующих в сличениях.

Вместе с тем, на практике в качестве результатов измерений фигурируют массивы случайных чисел, т.е. результат измерений может быть многомерной физической величиной (т.наз. *составной результат измерений*). Это происходит, например, при фотометрических испытаниях светотехнического оборудования транспортных

средств: измеряются колориметрические характеристики, когда каждый результат измерений представляет три связанных между собой числа - координаты цветности (x , y , z) и двумерное пространственное распределение силы света, т.е. каждый результат измерения зависит от двух угловых координат. При этом, как правило, «составные части», например, координаты цветности, связаны друг с другом и не могут иметь произвольные значения.

В описанном случае при составном результате измерений из нескольких чисел, получаемых отдельно, но связанных друг с другом, исключение выбросов из выборки составных результатов измерений проводится в основном с соблюдением следующих принципов:

1. Каждая составляющая результата измерений (например, каждая координата цветности по отдельности) представляется в виде независимой случайной величины, распределенной по определенному закону, и анализируется отдельно от остальных составляющих с применением критерия Граббса и/или Кохрена. Из выборки исключаются результаты измерений, у которых хотя бы одна составляющая является выбросом. Это вынуждает создавать выборки результатов измере-

ний слишком большого размера (не менее сотни), особенно в случае, если измерения проводятся в лабораториях с различной точностью СИ. Обработка таких выборок требует много времени и вычислительных мощностей. И даже в этих условиях не гарантировано получение «конечной» выборки хотя бы из десяти «годных» величин.

2. Составляющие результата измерений рассматриваются как координаты многомерной случайной величины, и выборка производится по правилам работы с многомерными случайными величинами [2]. В результате требуется разработка и обоснование отдельных критериев исключения выбросов для каждой физической величины, и теряется унификация подхода к МЛС и ВЛК.

Чтобы уменьшить сложности при статистическом анализе результатов испытаний, предлагается использовать следующий алгоритм обработки результатов измерений связанных между собой составляющих величин на выбросы, который удобно рассмотреть на примере координат цветности:

1. По результатам измерений сформировать выборку координат цветности, в которой каждый результат измерения имеет две составляющие – координату цветности x и координату цветности y .

2. Рассчитать для каждого результата измерений координату цветности z , которая однозначно определяется из выражения (1)

$$z = 1 - x - y, \quad (1)$$

полученного с использованием спектральных зависимостей, и не является эмпирической (аппроксимированной) зависимостью, и не содер-

жит других неопределенностей, кроме тех, которые были при измерении x и y [3].

3. Оценить выборку координат цветности z на выбросы с помощью критериев Граббса и Кохрена. Эта оценка окажется положительной, если хотя бы в одной координате цветности из пары x , y была слишком большая неопределенность.

4. Удалить из первоначальной выборки те пары x и y , которые соответствуют выбросам координаты цветности z .

5. Провести статистический анализ согласно предписаниям процедуры для одномерных случайных величин.

Данный подход позволяет не разрабатывать отдельные критерии оценки на выбросы для каждого составного результата измерений и не создавать слишком большие по объему выборки данных при статистическом анализе результатов измерений.

Недостаток данного алгоритма состоит в необходимости установления функциональной связи между составляющими величинами составных результатов измерений, что не позволяет применять к ним описанный подход.

Литература

1. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2: Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method : ISO 5725-2:2019. – Введ. 01.12.2019 // International Organization For Standardization [Electronic resource]. – 2019.

2. Практические рекомендации по валидации результатов и методов измерений / Савкова, Е. Н. [и др.] // Техническое нормирование, стандартизация и сертификация в строительстве. – 2013. – № 2. – С. 12–17.

3. Джадд, Д. Цвет в науке и технике: пер. с англ. / Д. Джадд, Г. Вышецки ; под ред. Л. Ф. Артюшин. – Москва : Мир, 1978. – 592 с.

УДК 616.12-008.313.315-08-71; 620.1.05 (476)

МЕТОДЫ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДЕФИБРИЛЯТОРОВ. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ДЕФИБРИЛЯТОРОВ

Сидоров К.А.

РУП «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана методика проведения испытаний дефибриляторов, обеспечивающая сокращение временных затрат и повышение точности измерения контролируемых параметров приборов. В ее основу положен принцип построения рациональной последовательности проведения испытаний с использованием современных аппаратных средств для измерения контролируемых параметров. Для разработки методики было изучено устройство дефибрилятора, проведен анализ технических характеристик прибора и методов испытаний.

Ключевые слова: дефибрилятор, импульс дефибриляции, пиковые напряжения, импеданс.

**METHODS AND HARDWARE FOR TESTING DEFIBRILLATORS.
DEFIBRILLATOR TEST PROCEDURE
Sidorov K.**

*Belarussian state institute of metrology
Minsk, Belarus*

Abstract. A methodology for testing defibrillators has been developed, it provides a reduction in time costs and an increases in the accuracy of measuring the controlled parameters of devices. It is based on the principle of constructing a rational sequence of testing using modern hardware for measuring the controlled parameters. To develop the methodology, the defibrillator device was studied, and the technical characteristics of the device and test methods were analysed.

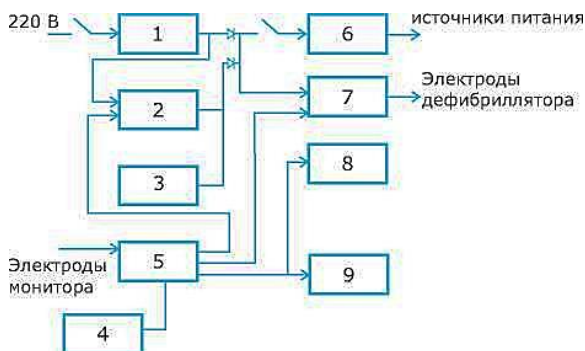
Keywords: defibrillator, defibrillation pulse, peak voltages, impedance.

Адрес для переписки: Сидоров К.А., Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: kirsidorov94@gmail.com

Дефибрилятор – прибор, использующийся в медицине для электроимпульсной терапии грубых нарушений сердечного ритма. Устройство генерирует короткий высоковольтный импульс, который вызывает полное сокращение миокарда. После полного сокращения сердечной мышцы существует вероятность восстановления нормального синусового ритма.

Структурная схема дефибрилятора приведена на рис. 1.

Преобразователь сетевой (ПС) (1) осуществляет прием напряжения сети 220 В и его преобразование в магистраль постоянного тока напряжением 17–18 В. Выходное напряжение ПС и встроенной батареи (3) объединяется на пассивной диодной сборке и подается как силовое питание на зарядное устройство накопительных конденсаторов (7), зарядное устройство батареи (2) и через переключатель ДКИ – на преобразователь напряжения типа DC-DC для формирования сети напряжений питания всех узлов дефибрилятора.



1 – преобразователь сетевой; 2 – зарядное устройство батареи; 3 – встроенная батарея; 4 – панель управления; 5 – устройство управления дефибрилятором; 6 – преобразователь DC-DC; 7 – зарядное устройство накопительных конденсаторов и высоковольтный коммутатор; 8 – дисплей; 9 – регистратор

Рисунок 1 – Структурная схема дефибрилятора

Устройство управления (5) выполнено с применением микроконтроллеров и предназначено для управления работой всех узлов дефибрилля-

тора. Команды управления на него поступают с передней панели (4) дефибрилятора.

Основные характеристики дефибрилятора.

Требуемая форма импульса дефибрилляции – бифазный усеченный экспоненциальный импульс с компенсацией параметров в зависимости от сопротивления нагрузки (рис. 2).

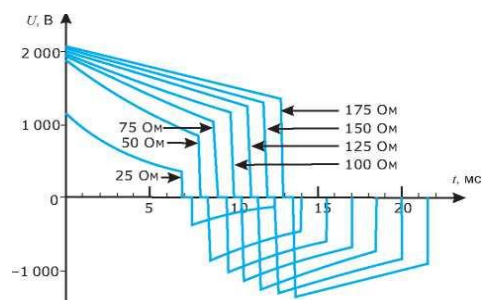


Рисунок 2 – График импульса дефибрилляции энергией 360 Дж при различной нагрузке

Дефибрилятор должен обеспечивать выдачу энергии в нагрузку в зависимости от установленной энергии и сопротивления нагрузки согласно данным, приведенным в табл. 1.

Таблица 1.

Установленная энергия, Дж	Энергия, отдаваемая в нагрузку, Дж							Допустимое отклонение
	Сопротивление нагрузки, Ом							
	25	50	75	100	125	150	175	
10	5	10	10	9	9	9	9	±3 Дж
25	12	25	25	24	22	21	20	
50	25	50	50	48	45	43	40	
100	50	100	100	97	95	93	90	
150	75	150	150	145	140	135	130	
200	100	200	200	190	185	175	170	
250	125	250	250	245	235	230	220	
300	150	300	300	290	280	270	260	
360	175	360	350	330	310	290	280	

Длительность первой фазы, паузы и второй фазы импульса дефибрилляции в зависимости от сопротивления нагрузки должна соответствовать параметрам, указанным в табл. 2, а пиковые напряжения первой и второй фаз импульса де-

фибрилляции в зависимости от сопротивления нагрузки и установленной энергии – параметрам, приведенным в табл. 3.

Таблица 2.

Длительность фаз импульса дефибрилляции							
Сопротивление нагрузки, Ом	25	50	75	100	125	150	175
I фаза, мс	7,0 ± 0,5	8,0 ± 0,5	9,0 ± 0,5	10,0 ± 0,5	11,0 ± 0,5	12,0 ± 0,5	13,0 ± 0,5
Пауза, мс	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,1
II фаза, мс	5,0 ± 0,5	5,5 ± 0,5	6,0 ± 0,5	6,5 ± 0,5	7,0 ± 0,5	7,5 ± 0,5	8,0 ± 0,5

Таблица 3.

Установленная энергия, Дж	Фаза	Пиковое напряжение, В							Допустимое отклонение
		Сопротивление нагрузки, Ом							
		25	50	75	100	125	150	175	
10	I	215	335	370	375	378	380	385	±15 В
	II	60	150	200	220	230	245	250	
25	I	325	525	575	585	595	600	605	±4 %
	II	95	238	310	340	370	380	395	
50	I	455	740	805	825	835	845	850	±4 %
	II	135	335	435	480	520	545	560	
100	I	665	1075	1180	1200	1220	1230	1235	±4 %
	II	200	495	640	705	760	790	815	
150	I	810	1310	1430	1460	1480	1495	1500	±4 %
	II	245	605	780	860	925	965	990	
200	I	920	1490	1630	1670	1690	1700	1715	±4 %
	II	285	690	895	990	1060	1100	1130	
250	I	1045	1695	1855	1900	1925	1940	1950	±4 %
	II	330	790	1020	1130	1205	1260	1290	
300	I	1140	1840	2010	2055	2080	2100	2110	±4 %
	II	360	860	1110	1225	1305	1365	1400	
360	I	1190	1900	2070	2120	2160	2175	2180	±4 %
	II	375	890	1140	1260	1350	1410	1440	

По параметрам безопасности дефибрилляторы должны соответствовать требованиям СТБ ИЕС 60601-1 «Изделия медицинские электрические. Часть 1. Общие требования безопасности и требования к основным характеристикам» и ИЕС 60601-2-4 «Оборудование медицинское электрическое. Часть 2–4. Дополнительные требования к безопасности и основным характеристикам кардиодефибрилляторов».

Для контроля точности и измерений параметров дефибрилляторов в БелГИМ используется установка, разработанная в соответствии со стандартом ИЕС 60601-2-4. Доставленная энергия измеряется с помощью биомедицинского анализатора Seculife DF+ и анализатора электробезопасности Fluke (ESA 620), используемых для общих оценок электробезопасности при измерении тока утечки на пациента и дополнительного тока в цепи пациента.

При испытаниях оцениваются все параметры безопасности и производительности. В соответствии со стандартом ИЕС 60601-2-4 проверка

точности доставляемой энергии должна проходить при различных смоделированных импедансах (25 Ом, 50 Ом, 75 Ом, 100 Ом, 125 Ом, 150 Ом, 175 Ом).

Испытания выполнялись для максимальной энергии на выходе при трех различных нагрузках – 25, 50 и 100 Ом. Для предотвращения непреднамеренного прерывания в реальной аварийной ситуации необходимо, чтобы все процессы оценки выполнялись на основе режима работы от аккумулятора. Во всех дефибрилляторах было проведено несколько тестов безопасности в соответствии с общим стандартом для медицинского электрооборудования (ИЕС 60601-1).

Анализ точности измерений доставленной энергии показал, что количество полученных результатов во многих единицах являлось критическим и имело меньшее значение по сравнению со стандартными ограничениями.

Для всех дефибрилляторов были проведены общие оценки электробезопасности для измерения тока утечки на пациента и дополнительного тока в цепи пациента. В некоторых случаях величины токов утечки превышали стандартные ограничения.

Полученные результаты указывали на необходимость разработки новых правил периодической проверки производительности и программ контроля качества дефибрилляторов.

Методика проведения испытаний дефибрилляторов.

При разработке методики были использованы как существующие методы, так и решения, связанные с вводом в эксплуатацию современных средств измерений, позволяющие проводить измерения эксплуатационных свойств в автоматическом режиме, что ранее было неосуществимо.

Разработанная методика включает проверку:

- упаковки и маркировки;
- требований электробезопасности;
- электромагнитной совместимости;
- функций в нормальных климатических условиях.

А также основных параметров:

- при пониженном и повышенном напряжении питания;
- при работе от аккумулятора;
- в условиях эксплуатации при повышенной и пониженной температуре;
- в условиях эксплуатации после механических воздействий;
- в условиях транспортирования при повышенной и пониженной температуре;
- в условиях транспортирования при воздействии повышенной влажности;
- в условиях транспортирования после механических воздействий.

Исходя из полученных результатов проверок, делается заключение о соответствии/несоответствии дефибриллятора.

Заключение. Проведен анализ основных технических характеристик дефибрилляторов, методов испытаний и аппаратных средств для их проведения. Показано, что совершенствование методики испытаний дефибрилляторов связано с изменением последовательности их проведения и с применением современных аппа-

ратных средств для измерений контролируемых параметров.

Разработанная методика позволяет с более высокой точностью определять контролируемые параметры дефибрилляторов и сокращает время испытаний, тем самым повышая производительность труда.

УДК 001.893:65.011.56

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБОРА МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Соколовский С.С., Гома М.А., Янчиленко А.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассматриваются квалиметрические модели, позволяющие получать комплексные оценки качества конкурирующих вариантов методик выполнения измерений.

Ключевые слова: методики выполнения измерений, квалиметрические модели, комплексные оценки качества.

USING QUALIMETRIC MODELING TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF SELECTION OF MEASUREMENT TECHNIQUES

Sokolovsky S., Goma M., Janchilenko A.

*Belarusian national technical university
Minsk, Belarus*

Abstract. Qualimetric models are considered that make it possible to obtain comprehensive assessments of the quality of competing options for measurement techniques.

Key words: measurement techniques, qualimetric models, comprehensive quality assessments.

*Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sokolovski@bntu.by*

При выборе методики выполнения измерений (МВИ) для решения конкретной измерительной задачи проектировщику, как правило, приходится сталкиваться с необходимостью выделения наилучшего варианта из некоторого набора конкурирующих вариантов МВИ. Все эти варианты по своим точностным характеристикам могут считаться равноценными с точки зрения решаемой измерительной задачи, но будут отличаться по некоторым другим свойствам, важным с точки зрения обеспечения требуемого качества измерений. В такой ситуации для выбора наиболее эффективного варианта МВИ предлагается проводить комплексное оценивание их качества по специальной методике.

Первым и наиболее важным этапом такого оценивания является моделирование качества МВИ в виде иерархической структуры свойств, определяющих их качество. С учетом специфики оцениваемого объекта, т.е. МВИ, в результате его системного анализа нами был разработан следующий вариант модели его качества в виде иерархической структуры определяющих его свойств, представленный на рис. 1.

Предлагаемая структура качества МВИ включает 3 уровня дифференциации свойств. Исходя из представленной структуры можно сделать вывод, что качество МВИ в целом пред-

ставляет собой не простой набор свойств, а некоторую систему свойств с существующими взаимосвязями между ними. Это исходный вариант такой структуры, который может корректироваться в зависимости от специфики измерительной задачи. Такая коррекция может производиться как в направлении дополнения этой структуры некоторыми важными с точки зрения решаемой измерительной задачи свойствами, так и в направлении ее урезания с исключением несущественных свойств. Кроме этого, очевидно, что для различных измерительных задач свойства, включенные в такую иерархию, могут иметь различную значимость с точки зрения качества МВИ в целом.

Для получения комплексной оценки качества каждого конкурирующего варианта МВИ в принципе можно было бы использовать комплексный метод оценки качества объекта в его классической реализации, т.е. произвести оценивание или измерение отдельных выделенных свойств исходя из степени их интенсивности или выраженности, произвести оценивание весомости этих свойств с использованием известных экспертных методов и затем произвести комплексирование полученных оценок, используя при этом, как наиболее простой вариант, одну из моделей средневзвешенных обобщенных показателей качества.

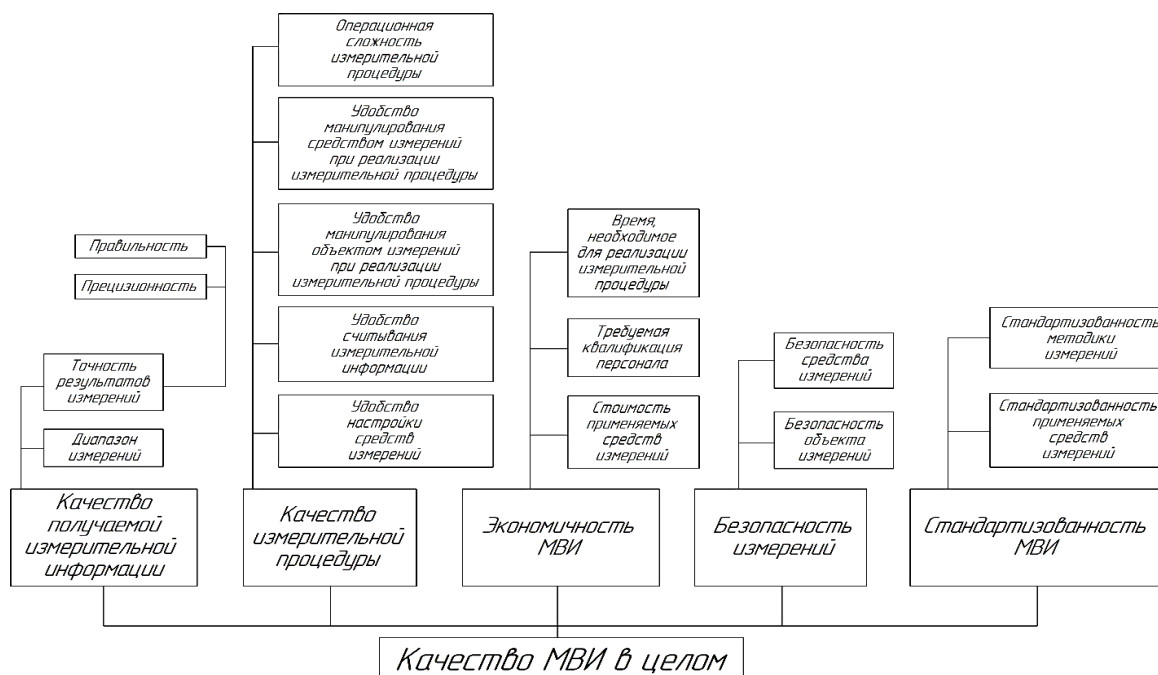


Рисунок 1 – Иерархическая структура свойств

Однако, на этапе выбора или проектирования МВИ осуществить прямое оценивание отдельных свойств, определяющих качество МВИ, может оказаться затруднительно, особенно для начинающего проектировщика. Исходя из этого нами предлагается использовать модернизированный комплексный метод, суть которого заключается в следующем.

На первом этапе проектировщик должен произвести анализ предложенного исходного варианта иерархической структуры свойств, на основании чего он может произвести его корректировку в соответствии с правилами, отмеченными выше. Затем он должен по каждому выделенному свойству провести попарное сопоставление конкурирующих вариантов МВИ и для каждого варианта найти оценку его превалирования над другими вариантами с использованием следующих аналитических моделей.

Индексы превалирования рассчитываются по формуле (1).

$$K_{ij} = \frac{f_{ij}}{C}, \quad (1)$$

где f_{ij} – частота превалирования; C – общее число возможных суждений или комбинаций; i – номер свойства, по которому проведено сопоставление ($i = 1, 2, 3, \dots, m$); j – номер рассматриваемого варианта МВИ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$).

$$f_{ij} = \sum_{j=1}^{n-1} f_{i(j/j)}, \quad (2)$$

где $f_{i(j/j)}$ – оценка превалирования j -го номера рассматриваемого варианта МВИ по отношению к варианту j' -го номера.

$$C = \frac{n(n-1)}{2}. \quad (3)$$

После этого, с использованием одного из известных экспертных методов оценивания весомостей, проектировщик должен произвести такое оценивание и присвоить каждому свойству соответствующий коэффициент весомости. Завершающим этапом реализации такого модернизированного комплексного метода является определение обобщенного показателя превалирования для каждого из конкурирующих вариантов МВИ с использованием следующей аналитической модели:

$$K_j^0 = \sum_{i=1}^m \mu_i \cdot K_{ij}, \quad (4)$$

где μ_i – коэффициент весомости i -го свойства; K_{ij} – индекс превалирования j -го варианта МВИ по i -му свойству.

Тот конкурирующий вариант МВИ, которому будет соответствовать максимальному значению такой оценки и принимается за основу, как наиболее эффективный.

УДК 006.91:681.2

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ОБЪЕКТОВ КАСТОМИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Соломахо В.Л.¹, Соколовский С.С.¹, Цитович Б.В.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный институт повышения квалификации по стандартизации, метрологии и управлению качеством
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются метрологические модели и роль метрологической экспертизы в рационализации кастомизированного производства.

Ключевые слова: кастомизированное производство, метрологическая экспертиза, метрологические модели.

METROLOGICAL MODELING AS THE BASIS FOR METROLOGICAL EXPERTISE OF CUSTOM PRODUCTION FACILITIES

Solomaho V.¹, Sokolovsky S.¹, Tsitovich B.²

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian state institute for advanced studies in standardization, metrology and quality management
Minsk, Belarus

Abstract. Metrological models and the role of metrological expertise in the rationalization of customized production are considered.

Key words: customized production, metrological expertise, metrological models.

Адрес для переписки: Соколовский С.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sokolovski@bntu.by

В условиях серийного производства изделий в рамках технологических процессов всегда бывают разработаны и апробированы методики измерительного контроля типовых параметров. Кастомизированное производство продукции отличается от массового и серийного частой сменой выпускаемых изделий, причем возможны существенные различия элементов деталей одно-типного назначения. К сложностям разработки комплекса модифицированных конструкций добавляются сложности создания новых технологических процессов и процессов метрологического обеспечения.

Лобовое решение этой проблемы включает индивидуальную разработку метрологического обеспечения процессов измерительного контроля параметров каждого из новых технологических процессов и изделий. В результате следует ожидать увеличения затрат на метрологические процедуры, включая затраты интеллектуальных ресурсов на их разработку. Для унификации метрологического обеспечения кастомизированного производства целесообразно опираться на квалифицированную метрологическую деятельность, основой которой может служить метрологическое моделирование, осуществляемое в рамках метрологической экспертизы изделий и технологических процессов.

Метрологическая экспертиза может быть использована как важнейший инструмент для оптимизации новых объектов производства и технологических процессов их получения.

На современном этапе требования к метрологической экспертизе устанавливает документ РМГ

63–2003 «Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации».

Экспертиза готовых изделий, проводимая при поломках, приносит значительную пользу, однако корректирующие воздействия в таких случаях явно опаздывают. Главной отличительной особенностью метрологической экспертизы являются ее прогностические возможности, позволяющие оценивать недостатки объектов еще на стадии их проектирования. Отсутствие натуральных объектов или их физических моделей не являются сдерживающим фактором для экспертизы, которую можно проводить с использованием аналитических моделей.

Метрологические модели изделий, необходимые для экспертизы изделий машино- и приборостроения, в большинстве случаев создаются на основе конструкторской документации. Необходимость создания физических моделей возникает в ситуациях существенного дефицита информации, возникающего по объективным причинам (особо высокая сложность объекта) или из-за недостаточной компетентности специалистов. Обладающие высокой квалификацией эксперты-метрологи способны освободить производство от затрат на создание и исследования физических моделей и обеспечить необходимой информацией для оптимизации разрабатываемых объектов, осуществляемой путем ликвидации дефектов и замены

неудачных решений еще в процессе проектирования.

Основой для создания аналитических метрологических моделей, необходимых при исследованиях функциональных параметров изделий машино- и приборостроения, являются чертежи деталей и сборочных единиц, а их важнейшими элементами – геометрические параметры изделий. Конструкторская документация представляет собой комплекс нормативных моделей, созданных на основе идеальных моделей объектов, дополненных допустимыми искажениями – полями или интервалами допусков геометрических параметров. В условиях производства осуществляют контроль параметров. Для этого по результатам оценивания контролируемых свойств создают экспериментальную модель объекта, предназначенную для сопоставления с его нормативной моделью.

Экспериментальная модель геометрических параметров объекта – метрологическая модель, без получения которой рациональное производство невозможно. Однако для ее реализации необходимо заранее подтвердить возможность получения такой модели. Это выполняют на заключительной стадии метрологической экспертизы параметра при оценке его контролепригодности. Для подтверждения контролепригодности параметра необходимо создание ряда метрологических моделей, которые будут включать следующие типы:

- нормативная метрологическая модель (совпадает с нормативной конструкторской моделью);
- аналитическая метрологическая модель параметра;
- аналитическая метрологическая модель измерения параметра;
- аналитическая метрологическая модель измерительного контроля параметра;

Две средних модели создают в процессе метрологической экспертизы, поскольку без них невозможно подтверждение контролепригодно-

сти параметра, которое позволяет запустить производство объекта.

Аналитическая метрологическая модель параметра, которую строят на основе конструкторской документации, позволяет проверить инструментальную доступность параметра на объекте (возможность доступа чувствительных элементов средств измерений для «снятия» с объекта сигнала измерительной информации) и дать исходную информацию о необходимой точности измерений для следующей модели.

Аналитическая метрологическая модель измерения параметра несет основные элементы будущей методики выполнения измерений (МВИ) параметра. Разработку и состав МВИ регламентирует ГОСТ 8.010 – 2013 «Государственная система обеспечения единства измерений. Методики выполнения измерений. Основные положения», однако на этапе метрологической экспертизы модель измерения параметра можно минимизировать, ограничив ее только теми составляющими элементами, которые позволят подтвердить возможность обеспечения требуемой точности измерений.

Разработка аналитической метрологической модели измерительного контроля параметра опирается на результаты предыдущего этапа, которые для контроля геометрических параметров должны быть дополнены такими элементами, как схемы контрольных сечений. Если модель измерения параметра предназначена для получения оценки его единичной реализации, то для контроля геометрических параметров поверхностей деталей, на которых параметр представлен бесконечным множеством номинально одинаковых значений, число и расположение контрольных сечений (контрольных точек) должно обеспечивать представительность результатов измерительного контроля. Представительность результатов контроля подразумевает выявление всех экстремальных контрольных сечений поверхности и иных возможных экстремальных геометрических параметров, которые могут выйти за нормированные границы.

УДК 338

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ОТДЕЛА СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Спесивцева Ю.Б., Данильчик В.Д., Бабанюк Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Один из инструментов бережливого производства «5S», использующийся как способ организации рабочего места, применен для повышения эффективности работы отдела стандартизации промышленного предприятия. На основе процессного подхода выявлены потери, с помощью FMEA-анализа решена задача ранжирования по срочности изменений, вносимых в конструкторскую документацию.

Ключевые слова: технология «5S», отдел стандартизации, потери.

**THE WORK IMPROVEMENT OF THE STANDARDIZATION DEPARTMENT
ON THE INDUSTRIAL ENTERPRISE
Spesivtseva Y., Danilchik V., Babanyuk D.**

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. One of the lean manufacturing tools “5S”, used as a way of organizing a workplace, is used to increase the efficiency of the standardization department of an industrial enterprise. Losses were identified on the process approach basis, the task of ranking according to the urgency of changes made to the design documentation was solved with the help of FMEA-analysis.

Key words: technology «5S», standardization department, losses.

*Адрес для переписки: Спесивцева Ю.Б., пр-т Независимости, 65, Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Повышению эффективности работы предприятий содействуют инструменты бережливого производства [1], одним из которых является система по организации и рационализации рабочего пространства 5S [2]. Рассмотрим опыт применения этой методики для совершенствования работы службы стандартизации.

Система 5S включает пять действий:

- сортировка – освобождение рабочего места от ненужных для выполнения производственных операций вещей;
- рациональное расположение – определение постоянного места для каждого предмета;
- уборка – порядок на рабочем месте;
- стандартизация – поддержание стабильности при выполнении этапов 5S;
- совершенствование установленных процедур.

Процессы отдела стандартизации: разработка новых и пересмотр действующих стандартов, ТУ и др., внесение изменений в техническую документацию, нормоконтроль технической документации, подготовка продукции к сертификации, оказание методологической помощи подразделениям в области стандартизации, экспертиза проектов ТНПА сторонних организаций, учет и актуализация ТНПА и других документов, обеспечение подразделений документами и информацией о них, ведение библиотеки ТНПА и других документов. Наиболее проблематичным является процесс внесения изменений, для выявления источников потерь представим его в виде схемы (рис. 1).

Система 5S выявляет 7 видов потерь:

- переделка (Причина: ошибки в работе. Следствие: затраты дополнительного времени, материалов, энергии, использовании оборудования, людских ресурсов),
- ожидание (Причина: ожидание людей, оборудования, информации. Следствие: простой у людей и оборудования),
- ненужные движения (Причина: неправильное расположение предприятия, непродуманный

дизайн офиса. Следствие: малопродуктивный рабочий процесс),

- излишняя работа (Причина: привычка выполнения работы, не позволяющая видеть альтернативы. Следствие: работа, не добавляющая ценности),

- простой оборудования (Причина: поломки оборудования, плохое планирование. Следствие: снижение производительности),

- излишние запасы (Причины: хранение неиспользованных материалов, документации. Следствие: затраты на хранение и обслуживание),

- проверки, выявление дефектов после того, как они возникли (Причина: ошибки в выполнении работы. Следствие: необходимость контроля, не добавляющего ценности).

Основными источниками потерь процесса подготовки изменений технической документации являются:

- исправления и переделки (блок 4, 7, 8);
- ожидания (блок 2, 5, 13, 15, 17);
- ненужные движения (блок 3);
- проверки (блок 13).

Потери связаны с несвоевременной передачей документов другим подразделениям, несогласованной работой подразделений, потерей времени на поиск извещений и сбором подписей, недостаточно высокой квалификацией работников, несогласованностью действий руководства.

Преобладающей потерей является потеря от ожидания, основная причина которой это отсутствие подробного ранжирования изменений по срочности.

Для решения этой проблемы воспользуемся методом анализа видов и последствий потенциальных отказов FMEA [3].

Баллы критериев значимости последствий отсутствия изменений:

10 – Потенциальный дефект ухудшает безопасность работы и/или вызывает несоответствие обязательным требованиям безопасности без предупреждения.

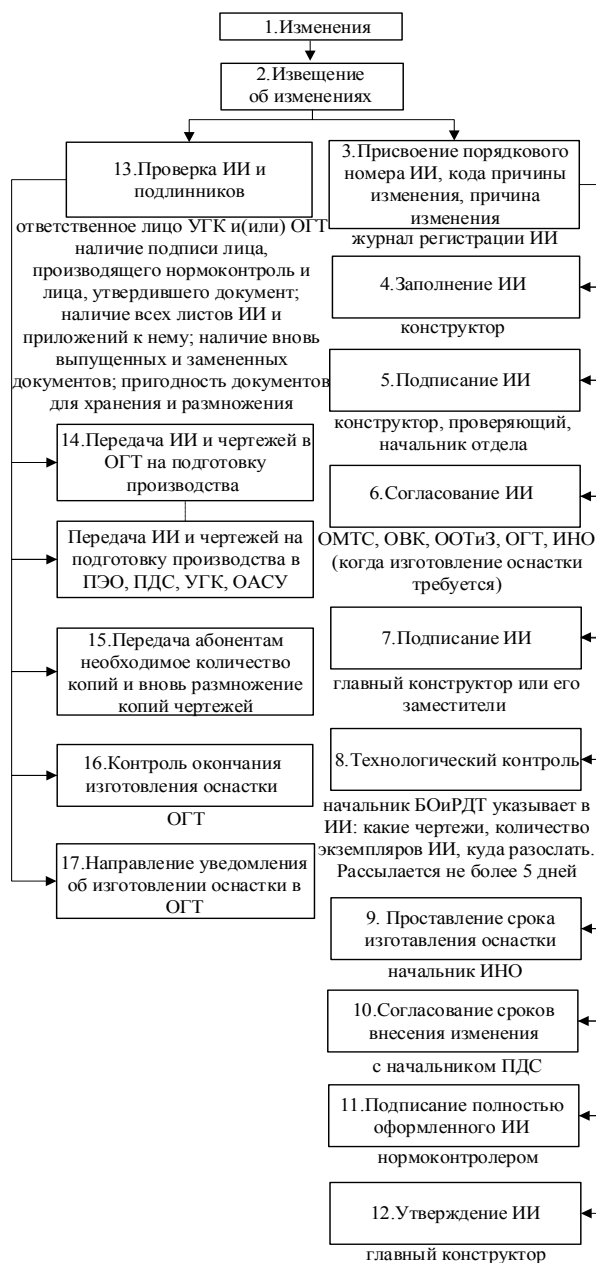


Рисунок 1 – Поток работ подготовки изменений технической документации (ИИ – извещение об изменении)

9 – Потенциальный дефект ухудшает безопасность работы и/или вызывает несоответствие обязательным требованиям безопасности с предупреждением.

8 – Большое нарушение производственной линии. Может окончательно браковаться до 100% продукции.

7 – Часть продукции окончательно бракуется.

6 – Пониженная эффективность работы процесса. Часть продукции бракуется.

5 – Переделка до 100 % продукции.

4 – Небольшое нарушение производственной линии.

3 – Доработка части продукции на специальном участке.

2 – Доработка части продукции на основной производственной линии.

1 – Нет последствий.

Для ранжирования извещений об изменениях по срочности критерии значимости последствий были объединены.

1. Очень высокий уровень срочности – нарушения, которые несут опасность для персонала, возникновение брака до 100 % в случае, когда все компоненты продукции не соответствуют требуемым характеристикам.

2. Высокий уровень срочности – нарушения, в результате которых возникает частичный брак, переделка продукции до 100 %;

3. Средний уровень срочности – нарушения, в результате которых необходима частичная доработка продукции;

Не срочно – последствия незначительные.

Литература

1. Бережливое производство. Основные положения и словарь : ГОСТ Р 56020-2014.
2. Фабрицио, Т. 5S для офисов : как организовать эффективное рабочее место / Т. Фабрицио, Д. Тэппинг. – Москва : Институт комплексных стратегических исследований, 2008. – 214 с.
3. Система менеджмента. Менеджмент риска. Метод анализа видов и последствий потенциальных отказов : СТБ 1506-2015.

УДК 338

ОЦЕНКА РИСКОВ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ В РАМКАХ САМООЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИИ Спесивцева Ю.Б., Утлая О.В., Артюхевич Е.А.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проанализированы понятия риски и возможности, оценка которых является важнейшим требованием СТБ ISO 9001 – 2015. Предложен подход оценки рисков и возможностей в рамках самооценки организации.

Ключевые слова: риски, возможности, самооценка организации.

RISK AND OPPORTUNITY ASSESSMENT WITHIN THE ORGANIZATION'S SELF-ASSESSMENT Spesivtseva Y., Utlaya O., Artyukhevych E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The concepts of risks and opportunities are analyzed, which assessment is the most important requirement of STB ISO 9001 - 2015. An approach to assessing risks and opportunities within the framework of an organization's self-assessment is proposed.

Key words: risks, opportunities, self-assessment of the organization.

*Адрес для переписки: Спесивцева Ю.Б., пр-т Независимости, 65, Минск, 220113, Республика Беларусь
e-mail: spesivtseva@bntu.by*

Одно из важнейших требований, предъявляемых организациям национальным стандартом СТБ ISO 9001 – 2015 – риск-ориентированное мышление, включающее определение и оценку возможностей. В п. 6.1 требуется определить и адресовать риски и возможности в качестве основы для повышения результативности СМК, улучшения результатов и предотвращения негативных эффектов. Примерами возможностей являются новые практики, продукты, рынки, клиенты, технологии, партнерства [1].

В ISO 14001:2015 (п. 3.2.11) «риски и возможности» определены как «потенциальные негативные эффекты (угрозы) и потенциальные выгодные эффекты (возможности)» [2].

Руководство ISO по риск-ориентированному мышлению [3] поясняет требования стандарта. «В ISO 9001:2015 риски и возможности часто размещаются вместе. Возможности не являются положительной стороной риска. Возможности – это набор обстоятельств, которые делают возможным сделать что-либо. Реализуя или не реализуя возможности, мы говорим о разных уровнях риска».

Таким образом, речь идет о двух видах неопределенности: возможности и угрозы. Возможности создают условия для улучшения, угрозы носят негативный характер. Для их выявления могут быть использованы методы менеджмента качества, хорошо зарекомендовавшие себя для решения аналогичных задач. А именно методики самооценки организации.

Самооценка может быть важным элементом в системе управления качеством организации. Она позволяет выявить потенциальные проблемы (риски) до их реализации, а также повысить понимание проблематики рисков сотрудниками. Для максимальной эффективности самооценка должна проводиться на базе не только бизнес-процессов, но и процессов их сопровождающих. Как правило, суть самооценки заключается в том, что члены экспертной группы, в которую входят руководители структурных подразделений заполняют специальную анкету, в которой фиксируют свое мнение об открывающихся возможностях и подверженности подразделений влиянию рисков. Фактически методом экспер-

ной оценки определяется два основополагающих фактора:

– какие события могут происходить в структурном подразделении;

– по принятой балльной оценке определяется значимость каждого вида события.

Также могут определяться вероятности возникновения событий и строятся модели влияния реализовавшегося события на работу организации. Для повышения результативности самооценки может быть составлена классификация возможностей и рисков, систематизирующая одни и те же типы событий, влияющие на различные подразделения.

На основании собранных данных может быть создана карта возможностей и рисков в конкретных структурных подразделениях организации. Работа в направлении сбора данных о событиях может позволить увидеть, какие события реализовались, оценить их количество и появившиеся преимущества или возникшие потери. Для начала первые полученные данные по самооценке возможностей и рисков можно считать эталонными. Дальнейшие отклонения от количества событий в конкретных структурных подразделениях будут показывать динамику изменения возможностей и рисков на данном участке карты. Подобные показатели являются основой для ведения системы ключевых индикаторов рисков (англ. Key Risk Indicator, KRI). Риски связаны с источниками (факторами риска), о которых сигнализируют индикаторы. Для демонстрации причин и последствий возможных событий может быть использована модель «галстук-бабочка» [4].

Изложенные подходы были реализованы на базе одного из машиностроительных предприятий для выявления возможностей и рисков, связанных с проектированием, производством и обслуживанием выпускаемой техники. Идентификация включает события, независимо от того, контролирует ли организация причину их возникновения или нет. В первую очередь рассматривались возможности и риски, связанные с:

- процессами СМК;
- ориентацией на потребителя;
- планированием СМК;
- операционной деятельностью.

Идентификация возможностей и рисков осуществлялась с использованием SWOT-анализа, в результате которого выявлялись сильные и слабые стороны организации, связанные с организационной структурой, производством, финансами, инновациями и маркетингом. Внешняя среда оценивалась по параметрам: спрос, конкуренция, возможности сбыта, состояние экономики, существующая культура потребления товаров, состояние окружающей среды.

С помощью диаграммы Исикавы выявлены риски, приводящие к недостижению целей. Ниже приведены риски и их причины для процесса «Проектирование и разработка продукции».

1. Юридические и законодательные риски:

- несоответствие законодательству (несвоевременный контроль за изменениями);
- утечка информации (недостаточный контроль службы безопасности);
- несвоевременная защита новых разработок (отсутствие патента);
- несоответствие внешним ТНПА (неактуальные ТНПА, не своевременное информирование об изменениях ТНПА).

2. Производственно-технологические риски:

- выход из строя оборудования (несвоевременное техническое обслуживание, нерациональное использование оборудования, не рациональное использование средств, снижение доходов предприятия);
- неактуальное ПО (несвоевременный контроль, не рациональное использование средств, снижение доходов предприятия);
- нехватка оборудования (отсутствие в плане закупок, не рациональное использование средств, снижение доходов предприятия, расходы на устранение брака);
- усложнение конструкции (повышенные требования заказчика);
- применение неэффективных технологий (отсутствие планов по внедрению новых технологий);
- недостаточный контроль при проектировании (отсутствие соответствующей системы контроля);
- недостаточный контроль при изготовлении (отсутствие соответствующей системы контроля).

3. Рыночные риски:

- разработка неконкурентоспособной продукции (деятельность конкурентов, моральное устаревание, высокая стоимость, недостаточный анализ рынка, экономический кризис).

4. Риски, связанные с поставщиками:

- отсутствие электроэнергии (аварии, отсутствие резервного источника питания);
- отсутствие необходимых расходных материалов для оргтехники (нерациональное использование средств, снижение доходов предприятия);
- Несвоевременная поставка материалов (недобросовестные поставщики).

5. Риски персонала:

- прогулы работников (отсутствие «штрафных санкций», слабый уровень ответственности);
- болезни работников (сезонные эпидемии, отсутствие ЗОЖ, монотонность труда);
- неуккомплектованность штата (сложность работы, уровень ЗП);
- зависимость от ключевых сотрудников (отсутствует «база знаний», отсутствие взаимозаменяемости);
- ошибки разработчиков (несоответствующий уровень квалификации, отсутствие мотивации);
- «срыв» сроков разработки продукции (не правильное нормирование времени, отсутствие мотивации).

6. Экологические риски:

- ухудшение экологической ситуации, авария (недостаточный контроль за выполнением мероприятий по защите окружающей среды и обеспечению безопасности работников предприятия).

Модернизация традиционных методик самооценки путем использования в них технологий управления качеством позволят значительно повысить их эффективность.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001-2015.
2. Системы управления (менеджмента) окружающей среды. Требования и руководство по применению : СТБ ISO 14001-2017.
3. Risk-based thinking in ISO 9001:2015, document ISO/TC 176/SC2/N1284.
4. Васин С. М. Управление рисками на предприятии : учебное пособие / С. М. Васин, В. С. Шутов. – М. : КРОНУС, 2016. – 300 с.

УДК 537.86.029

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ

Станкевич М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе рассматривается вопрос автоматизации рабочего места метролога при проведении метрологической оценки. Представлено обоснование использования таких роботизированных средств как роботизированная рука и компьютерное зрение. Сделаны выводы на основе рассмотренной информации.

Ключевые слова: автоматизация, научно-технический прогресс, качество, робототехника, улучшение.

JUSTIFICATION FOR THE USE OF ROBOTIC MEANS IN CONDUCTING METROLOGICAL ASSESSMENT

Stankevich M.

*Belarusian national technical university
Minsk, Belarus*

Abstract. The article deals with the issue of automation of the metrologist's workplace during metrological assessment. The rationale for the use of such robotic means as a robotic arm and computer vision is presented. Conclusions are made based on the information considered.

Key words: automation, scientific and technological progress, quality, robotics, improvement.

*Адрес для переписки: Станкевич М. А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mihwil27021@gmail.com*

Метрологические работы охватывают практически все сферы деятельности человека. Расширение диапазона различных метрологических работ приводит к разработке соответствующего технического оснащения. В данный момент современный уровень науки и техники в значительной степени определяется уровнем автоматизации, в том числе и метрологических работ.

Автоматизация процесса поверки и калибровки дает много преимуществ техническим специалистам: повышается производительность труда, достоверность измерений, а также облегчается процесс документального оформления свидетельств и протоколов по проведенным измерениям. Также облегчается создание отчетов и ведение статистического учета занятости технического персонала. Кроме этого, использование программного обеспечения для управления процессом поверки и калибровки обеспечивает учет средств измерения, хранение результатов поверки и калибровки всех средств измерения когда либо находящихся в данной метрологической службе, отслеживать средства измерения у которых истек или истекает межповерочный интервал, а также проводить анализ информации по средствам поверки и в составлении отчетов по этой информации.

Автоматизация – одно из магистральных направлений повышения эффективности метрологических работ, призванное обеспечивать высокие темпы научно-технического прогресса, за счет:

– повышение качества исследования;

– получения более развернутых данных об исследуемых средствах измерения;

– сокращения сроков метрологических оценок измерений на основании уменьшения трудоемкости измерений, ускорения экспериментов и уменьшения статистических ошибок;

– повышение точности измерений;

– оптимизация работ по ведению учета средств измерений и измерительного оборудования, составлению планов и графиков поверки, калибровки, проверки работоспособности, аттестации и ремонта;

– созданию баз данных, содержащих сведения о стандартах, технических описаниях, руководств по эксплуатации, технических условий и т.д.;

– и другие сферы человеческой деятельности.

Автоматизация позволяет повысить производительность труда, улучшить качество продукции, оптимизировать процессы управления, отстранить человека от производств, опасных для здоровья.

Автоматизация, за исключением простейших случаев, требует комплексного, системного подхода к решению задачи. Применяемые методы вычислений иногда копируют нервные и мыслительные функции человека.

Современный способ автоматизации может взаимодействовать с робототехникой, ведь современное общество вступило в эпоху информатизации и находится на грани 4-й промышленной революции, которая предполагает массовое внедрение киберфизических потребностей в проведении метрологической оценки средств измерений. Одной из них является роботизиро-

ванная рука. Это тип механической руки, обычно программируемой, с функциями, аналогичными человеческой руке. Рука может быть как самостоятельным механизмом, так и частью более сложного робота. Сегменты манипулятора имеют соединения, позволяющие совершать вращательные или поступательные движения. Роботизированная рука заканчивается либо захватным механизмом, либо каким-то рабочим инструментом.

Преимущества роботизирования:

- эффективность;
- качество;
- безопасность;
- рентабельность.

Одним из главных достоинств является эффективность работы, ведь роботизированная рука способна выполнять определенные задачи быстрее, точнее и лучше людей. Автоматизация процессов, которые раньше занимали значительно больше времени и ресурсов, приведет к большей эффективности производственной линии. Пример данной замены был произведен в китайской компании, которая заменила более 90% таких участков завода. В результате произошло увеличение производительности на 250% и уменьшился выход брака до 80%.

Благодаря высокому уровню точности и повторяемости, роботизированные участки будут производить действия, соответствующий заданной программе, а также сократят необходимое для контроля качества время.

Использование роботизированной руки поможет выполнять те работы, которые считаются опасными, вредными либо трудоемкими для человека.

Благодаря повышению производительности и качества продукции или услуг, а также сокращению ресурсных затрат, это поможет предприятию, увеличить свою рентабельность.

Присутствуют так же и недостатки, такие как:

- использование в основном для однотипных действий;
- внедрение в производство требует значительных финансовых затрат для программирования, тестирования и отладки оборудования;
- при программировании данного оборудования невозможно учесть все экстренные ситуации.

Также одним из методов автоматизации проведения метрологической оценки является использование компьютерного зрения. Компьютерное зрение (Computer Vision, CV) – это область искусственного интеллекта, связанная с анализом изображений и видео. Она включает в себя набор методов, которые наделяют компью-

тер способностью «видеть» и извлекать информацию из увиденного. Чтобы научить компьютер «видеть», используются технологии машинного обучения. Собирается множество данных, которые позволяют выделить признаки и комбинации признаков для дальнейшей идентификации похожих объектов.

Компьютерное зрение позволяет усилить человеческие возможности, сократить времени, затрачиваемое на рутинные задачи.

Компьютерное зрение позволяет увидеть то, что человек может не заметить, распознавание, как правило, занимает несколько миллисекунд, в то время как человеку нужно больше времени, чтобы обработать и запомнить увиденное значение.

Таким образом, внедрение рассмотренных средств может повысить эффективность проведения метрологической оценки в десятки раз.

Внедрение описанных средств в совокупности с компьютером позволит:

- производить высокоскоростное считывание показаний;
- производить полный расчет вероятностей и бюджета неопределенности;
- формировать и хранить протоколы метрологической оценки в электронном виде;
- обеспечить объективность результатов измерений;
- уменьшить количество рисков, связанных с несоблюдением методики поверки/калибровки;
- значительно увеличить скорость проведения работ по метрологической оценке;
- повысить рентабельность услуг по проведению работ по метрологической оценке;
- уменьшить сроки окупаемости средств измерений.

Литература

1. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь : СТБ ISO 9000-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 60 с.
2. Ревин В. Т. Автоматизация метрологических работ / В. Т. Ревин. – Минск: БГУИР, 2011. – 64 с.
3. Толковый словарь Ушакова. Д. Н.: толковый словарь в 4 т. / Д. Н. Ушаков. – М. : Гос. ин-т «Сов. энцикл», 1935–1940. – 4 т.
4. Системы менеджмента качества. Требования : СТБ ISO 9001-2015. – Введ. 01.03.16. – Минск : Госстандарт : Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2015. – 36 с.
5. Mahalakshmi, T. Review article: an overview of template matching technique in image processing / T. Mahalakshmi, R. Muthaiah, P. Swaminathan // Научно-исследовательский журнал прикладных наук, техники и технологий. – 2012. – Т 4, № 24. – С. 5469–5473.

УДК 528.854

АНАЛИЗ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Трефилов Д.А.¹, Хабибуллин А.Р.¹, Антонов Е.А.², Калугин А.И.²

¹Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова

²Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН
Ижевск, Россия

Аннотация. Предложена глубокая нейронная сеть, которая позволяет проводить анализ мультиспектральных изображений в режиме реального времени. Выполнено сравнение полносвязных нейронных сетей со сверточными сетями. Показано, что в случае малого количества слоев мультиспектрального изображения результаты анализа с помощью полносвязных сетей сопоставимы с результатами, получаемыми с помощью сверточных сетей. При этом скорость обработки мультиспектральных изображений полносвязной сети в несколько раз превосходит скорость сверточной сети.

Ключевые слова: мультиспектральное изображение, нейронная сеть.

ANALYSIS OF MULTISPECTRAL IMAGES USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Trefilov D.¹, Khabibullin A.¹, Antonov E.², Kalugin A.²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russia

Abstract. A deep neural network is proposed that allows real-time analysis of multispectral images. Comparison of fully connected neural networks with convolutional networks is performed. It was shown that in the case of a small number of layers of a multispectral image, the results of analysis using fully connected networks are comparable to the results obtained using convolutional networks. At the same time, the processing speed of multispectral images of a fully connected network is several times higher than the speed of a convolutional network.

Key words: multispectral image, neural network.

e-mail: slick25@mail.ru

В настоящее время требуются мультиспектральные системы видения в различных отраслях промышленности, сельского хозяйства и других областях жизнедеятельности человека. Такие системы должны в режиме реального времени производить анализ полученных изображений и выделять различные объекты на них.

Как известно, каждый материал имеет свой уникальный спектр отражения. Пиксель получаемого мультиспектрального изображения содержит интенсивности отраженного от объекта излучения на соответствующих длинах волн. Поэтому анализ таких изображений позволяет различить объекты, состоящие из разных материалов, но которые неразличимы при анализе изображений, полученных обычными средствами фото и видеосъемки.

Наиболее известными и эффективными методами анализа мультиспектральных изображений являются методы с использованием сверточных нейронных сетей [1] и метод опорных векторов [2]. Сверточные нейронные сети способны выделять как пространственные, так и спектральные признаки объектов на изображении. Для классификации мультиспектральных изображений применяются сверточные нейронные сети, которые в основном выделяют только спектральные признаки. В то же время, сверточные сети характеризуются длительным временем их обучения, причем весьма склонны к переобучению. То есть сверточ-

ные сети очень требовательны к набору обучающих данных. В связи с этим возникает задача поиска более простых вариантов глубоких нейронных сетей без применения сверточных слоев.

Для работы в режиме реального времени необходима достаточно простая нейронная сеть с малым количеством слоев. В работе представлена нейронная сеть для классификации мультиспектральных изображений. Данная нейронная сеть состоит из 14 полносвязных слоев и не имеет сверточных слоев. На вход сети подается массив из интенсивностей каждого пикселя. На выходе сети находятся 12 нейронов для классификации изображения, соответствующие категориям, на которых производилось обучение сети. Результатом анализа мультиспектрального изображения является изображение, каждый пиксель которого имеет цвет соответствующий определенному типу материала. В качестве категорий были выделены такие материалы как: асфальт, листва дерева, кора дерева, пластик, различные строительные материалы и т.д. Для получения обучающих данных с помощью мультиспектральной камеры (МСК) были получены мультиспектральные изображения на следующих длинах волн: 532, 612, 780, 850, 940 нм [3]. Нейронная сеть обучалась на небольшом количестве тренировочных данных, в качестве которых были использованы усредненные значения области, соответствующей одному типу материала.

На рис. 1 представлено изображение, полученное на длине волны 850 нм, результат анализа мультиспектрального изображения представлен на рис. 2. Точность анализа представленной нейронной сети сопоставима с точностью сверточной сети, которая была предложена в работе [4]. В отличие от сверточной сети данная сеть не учитывает влияние соседних пикселей, однако превосходит в несколько раз по скорости анализа мультиспектральных изображений.



Рисунок 1 – Результаты съемки МСК на длине волны 850 нм



Рисунок 2 – Результаты анализа мультиспектрального изображения с помощью нейронной сети

Основными недостатками представленной сети являются ошибки в классификации изображений связанные с освещенностью объектов, зеркальной поверхностью объекта, а также с объектами, частично пропускающими излучение на длинах волн, на которых производилась съемка. Даже если нейронная сеть неверно определяет тип материала, она достаточно хорошо разделяет различные типы материалов. На полученном в результате анализа изображении можно выделить области, которые соответствуют одному типу материала. Далее такое изображение можно анализу с помощью традиционных нейронных сетей по классификации изображений.

Работа выполнена в рамках темы НИР Удм-ФИЦ УрО РАН «Искусственный интеллект в разработке, обучении и сопровождении экспертных систем представления и использования знаний в естественно-научных, технических и социогуманитарных направлениях» АААА-А19-119092690104-4.

Литература

1. Deep feature extraction and classification of hyperspectral images based on convolutional neural networks / Y. Chen [et al.] // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2016. – Vol. 54, № 10. – P. 6232–6251.
2. Melgani, F. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines / F. Melgani L. Bruzzone // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. – 2004. – Vol. 42., № 8. – P. 1778–1790.
3. Ефимова, У. А. Макет мультиспектральной системы видения для мобильных систем / У. А. Ефимова, Г. М. Шаранова, А. И. Калугин, Е. А. Антонов, М. Р. Зарипов // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 367–369.
4. Применение искусственных нейронных сетей для анализа мультиспектральных изображений / М.Ю. Альес [и др.] // Оптический журнал. – 2021. – Т. 88., № 8. – С. 48–53.

УДК 620.1.052

ОСОБЕННОСТИ НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ

Трухан Р.Э.¹, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³, Муравьёва Т.И.³, Мерзин А.М.³, Самардак В.Ю.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН
Москва, Российская Федерация

⁴Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет
Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. В работе описан метод наноскретч-теста, реализованный на наноинденторе Hysitron 750 Ubi. Приведены параметры эксперимента и испытуемого материала и их влияние на результаты, полученные при царапании алмазоподобных покрытий. Наибольшее влияние на стабильность результатов измерений оказывают длина царапины и шероховатость поверхности.

Ключевые слова: наноскретч-тест, алмазоподобные покрытия, наноиндентор.

NANOSCRATCH TEST FEATURES WHEN STUDYING DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS

Trukhan R.¹, Habarova A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Torskaya E.³, Myravyeva T.³, Merzin A.³, Samardak V.⁴

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS
Moscow, Russia

⁴School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University
Vladivostok, Russia

Abstract. Nanoscratch test implemented on the Hysitron 750 Ubi described in this paper. The experiment and the test material parameters and their influence on diamond like carbon coatings scratch results are given. The greatest influence on the measurement results stability is the scratch length and the surface roughness.

Key words: nanoscratch test, diamond like carbon coatings, nanoindenter.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. Петруся Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Тонкие твердые пленки и покрытия широко применяются для улучшения и придания новых свойств поверхностям различного назначения при создании миниатюрных устройств [1]. Для контроля параметров таких слоев используется специальное оборудование, позволяющее работать в микро- и наномасштабах нагрузок.

Скретч-тест применяется в качестве метода оценки адгезионных и механических свойств материалов и в качестве инструмента, реализующего контакт с единичной неровностью. Если он используется для определения твердости покрытия, то называется склерометрией. При определении микротвердости склерометрия значительно уступает индентированию, но имеет свои преимущества в наномасштабе:

1) шероховатость и дефекты материала оказывают меньшее влияние на результат за счет усреднения данных при обработке;

2) эффект упругого восстановления ширины царапины меньше по сравнению с периметром отпечатка при индентировании;

3) чувствителен к анизотропии механических свойств.

С целью расчета твердости необходимо определить ширину царапины. Для этого выполняется визуализация с помощью оптических, интерферометрических методов и сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ). СЗМ предпочтительнее при малых размерах царапин т. к. позволяет получать более полное и точное представление о рельефе поверхности, чем другие методы [2]. Зачастую в склерометрии используются наконечники типа Беркович, что позволяет изменять ориентацию индентора и разносторонне оценивать свойства поверхности [3].

В работе [4] предложен способ оценки упругих и упруго-пластических напряжений на основе параметров нанесенных царапин. Полученные в работе [4] значения предела текучести согласуются со справочными данными для выбранных

материалов и является статистически значимым, т. к. длина царапины составляла от 3 до 5 мм. Также этот способ можно использовать при оценке прочности поверхности после упрочняющей обработки.

Измерения с помощью скретч-теста реализуются тремя способами: 1) с постоянной нагрузкой, 2) с возрастающей нагрузкой, 3) многопроходный, повторяющийся, однонаправленный с постоянной нагрузкой (наноизнос). Широкое применение этот метод получил при определении адгезионных характеристик покрытий. Измерение в этом случае проводят с возрастающей нагрузкой с регистрацией нормальной и тангенциальной силы, коэффициента трения и сигнала акустической эмиссии. Изменение этих параметров дают представление о критических нагрузках, при которых происходит переход между разными типами деформации и разрушение покрытия [5].

Для проведения испытания царапанием применяются как специализированные устройства (скретч-тестеры), так и приборы с возможностью индентирования и перемещения в направлении двух координат.

Наноиндентор Hysitron 750 Ubi, оснащенный двойным преобразователем, кроме индентирования реализует скретч-тест и испытание на износ. В совокупности с коническим алмазным индентором он становится чувствительным инструментом для испытания царапанием. Радиус закругления 226 нм повышает чувствительность зонда к неровностям и локальным свойствам в области контакта, и позволяет реализовывать высокие контактные давления (до 70 ГПа).

Подбор параметров проведения наноцарапания зависит как от свойств покрытия, так и от характеристик используемого прибора. Так, для наноиндентора 750 Ubi при царапании с постоянной нагрузкой, доступное время нанесения царапины находится в интервале от 5 до 30 сек,

что соответствует скоростям от 0,67 до 4 мкм/с. Такого диапазона достаточно для того, чтобы наблюдались изменения значений силы и коэффициента трения. Приборы, реализующие скретч-тест, работают с широким диапазоном нагрузок. В случае возрастающей нагрузки при достижении определенного значения происходит разрушение покрытия. В зависимости от твердости подложки и покрытия могут быть реализованы разные механизмы отрыва покрытия от подложки [5]. Шероховатость, как и микротвердость (H) покрытия, оказывает большое влияние на результат царапания. При царапании индентором с радиусом закругления 226 нм алмазоподобных покрытий (АПП) с разной твердостью и шероховатостью СКО коэффициента трения снижается с уменьшением показателя R_a (табл. 1). Эти значения получены при нагрузке 1400 мкН и скорости царапания 1,33 мкм/с, но и при нагрузках до 2000 мкН наблюдается схожая тенденция.

Во время движения индентора по поверхности на ней могут находиться образования, взаимодействие с которыми приводит к перепадам значений силы трения и, следовательно, коэффициента трения. Перепады бывают как слабые, так и сильные при которых сила трения может изменить свой знак, что приведет к появлению в массиве значений нулевого коэффициента трения. Эти значения вносят вклад в конечный результат, изменяя как среднее значение, так и стандартное отклонение (СКО) результата измерений.

Таблица 1. Влияние R_a и H на стандартное отклонение коэффициента трения

Подложка	Сталь ШХ15		Кремний n -типа (111)		
H , ГПа	17,5	19,8	25,0	33,0	20,0
R_a , нм	15,70	14,10	2,61	1,60	1,01
СКО	0,163	0,144	0,070	0,030	0,020

В случае царапания АПП длина царапины также влияла на конечный результат. Нанесение царапин на одном покрытии, значение среднего арифметического отклонения профиля (R_a) которого составляет 2,61 нм, с одинаковой скоростью в 1,33 мкм/с и нагрузкой в 2000 мкН привело к разным значениям коэффициента трения и его стандартного отклонения (табл. 2). При этом ко-

личество точек было постоянным и составляло 3000, то есть менялось только расстояние между соседними точками. Как видно из табл. 2: с увеличением длины царапины снижается отклонение результатов от среднего значения.

Таблица 2. Значения коэффициентов трения при варьировании длины царапины

Длина царапины, мкм	$K_{тр}$	СКО	$K_{обр}$	СКО
6	0,190	0,095	0,192	0,083
10	0,265	0,049	0,228	0,075
16	0,274	0,047	0,236	0,068
20	0,237	0,060	0,197	0,063

Закключение. На результаты наноскретч-теста индентором с радиусом закругления в 226 нм оказывает влияние множество факторов. Среди них: шероховатость и микротвердость исследуемого покрытия, длина царапины, скорость царапания и прилагаемые нагрузки, и наличие на поверхности препятствий для движения индентора. Наиболее стабильные результаты измерений достигаются при длине царапины – 20 мкм и R_a менее 3 нм.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф20Р-217.

Литература

1. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Б. Вархолински [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217.
2. Кузнецова, Т. А. Применение атомно-силовой микроскопии при определении микротвердости тонких покрытий методом склерометрии / Т. А. Кузнецова // Трение и износ. – 2007. – Т. 28, № 3. – С. 276–281.
3. Усеинов, А. Измерение механических свойств методом царапания / А. Усеинов, С. Усеинов // Наноиндустрия. – 2010. – № 6. – С. 28–33.
4. Селиванов, К. С. Оценка прочности материала поверхности при его испытании методом «скретч-тест» / К. С. Селиванов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 1. – С. 100–106.
5. Определение адгезионных характеристик покрытий с использованием современного скретч теста. Часть 1. Возможности использования современного скретч теста для определения адгезионных свойств покрытий / В.К. Белов [и др.] // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2020. – Т. 76, № 2. – С. 143–152.

УДК 004.056.5

РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ISO/IEC 27001:2013

Хвистик М.Д., Серенков П.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена информация как один из важнейших ресурсов в жизни современного человека и необходимость ее защиты. Была проанализирована актуальность разработки и внедрения системы менеджмента информационной безопасности в ИТ-компаниях. Также была проанализирована необходимость получения сертификата соответствия ISO/IEC 27001:2013.

Ключевые слова: информация, СМИБ, Confluence, сертификат, ISO/IEC 27001:2013.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE INFORMATION SECURITY MANAGEMENT SYSTEM IN ACCORDANCE WITH ISO/IEC 27001:2013

Khvistik M., Serenkov P.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Information was considered as one of the most important resources in the life of a modern person and the need to protect it. The relevance of the development and implementation of an information security management system in IT companies was analyzed. The necessity of obtaining a certificate of compliance with ISO/IEC 27001:2013 was also analyzed.

Key words: information, ISMS, Confluence, certificate, ISO/IEC 27001:2013.

*Адрес для переписки: Хвистик М.Д., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: mkhvistikm@gmail.com*

Информация – сведения, независимо от формы их представления, воспринимаемые человеком или специальными устройствами как отражение фактов материального мира в процессе коммуникации. Нет смысла спорить, что в 21 веке информация – один из важнейших ресурсов в жизни человечества.

На первый план в современном обществе выходит проблема информационной безопасности практически во всех отраслях деятельности человека. В ИТ-сфере потеря информации является одной из ключевых проблем: потеря баз данных, результатов аналитических исследований, исходных кодов, программных продуктов, персональных данных клиентов означает угрозу для продолжения бизнеса. *Медицинские организации являются операторами персональных данных пациентов. Они принимают участие в сборе, систематизации, накоплении, хранении, уточнении, обновлении, изменении, распространении и уничтожении такой информации.* В банковской отрасли могут быть случаи утечки баз данных, содержащих персональные данные субъектов, а также участвовавшие случаи несанкционированной передачи персональных данных со стороны финансовых организаций третьим лицам.

В связи с необходимостью защиты информации белорусские компании разрабатывают и внедряют систему менеджмента информационной безопасности в соответствии с СТБ ISO/IEC 27001 или в соответствии с ISO/IEC 27001, если компания ориентируется на международный рынок.

Компания выбирает необходимые меры управления безопасностью, предназначенные для

защиты информационных активов и гарантирующие доверие заинтересованных сторон. В соответствии с международным стандартом информационная безопасность трактуется как сохранение конфиденциальности, доступности и целостности информации, достичь этого можно с помощью управления рисками. На этом и базируется стандарт ISO/IEC 27001:2013 [1].

Компания ООО «Эффективные программы», позиционирующая себя как разработчик программной продукции для организаций широкого профиля деятельности заинтересована в разработке и внедрении системы менеджмента информационной безопасности. Причина – требования рынка. Высокая конкуренция заставляет демонстрировать ИТ – компаниям широкий спектр возможностей для обеспечения высокой степени удовлетворенности потребителя.

Отличительной особенностью разработки СМИБ в данной компании, является то, что вся документация СМИБ была разработана и находится на электронном ресурсе Confluence вики-системе для внутреннего пользования Компанией. Что в ходе сертификационного аудита, было отмечено аудитором, как явный показатель прогресса и удобства в использовании.

Цели управления и средства управления из приложения А стандарта ISO/IEC 27001 должны быть выбраны как часть этого СМИБ-процесса для того, чтобы удовлетворять определенные требования. Цели управления и средства управления, перечисленные в приложении А стандарта ISO/IEC 27001, получены непосредственно из перечня целей управления и средств управления,

перечисленных в разделах 5–15 ISO/IEC 17799:2005, и согласованы с ними [2].

Следует отметить, что эффективное и результативное внедрение СМИБ возможно только учитывая принципы процессного подхода, в соответствии с ISO 9001:2015. Цель такой модели – выявить источники появления рисков и места их возникновения, что позволяет построить процессы таким образом, чтобы локализовать источники или вовсе их устранить.

Процессный подход, представленный в семействе стандартов СМИБ, основан на операционном принципе, принятом в стандартах ISO на системы управления, и известном как процесс «План (Plan) – Осуществление (Do) – Проверка (Check) – Действие (Act)» (цикл PDCA) [2].

В связи с этим, перед тем, как приступить к разработке системы, в компании были проанализированы существующие процессы на предмет возможных угроз и присущих уязвимостей. Была просчитана вероятность возникновения рисков и методы управления ими.

Далее разработка системы менеджмента информационной безопасности велась по плану действий, который можно визуализировать с помощью диаграммы Ганта (рис.1). Следует отметить, что в данном плане указаны только ключевые этапы, без детального описания.

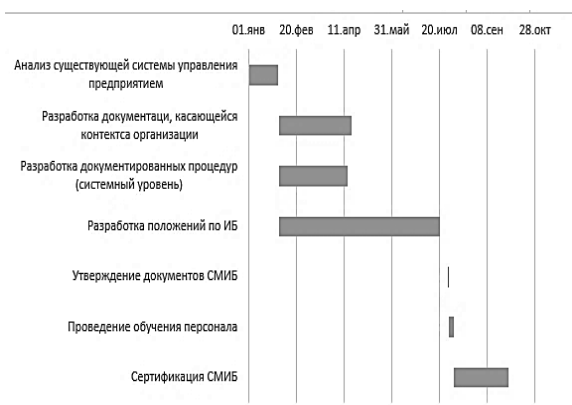


Рисунок 1 – План действий «Разработки документации системы менеджмента информационной безопасности, соответствующей ISO/IEC 27001»

В соответствии с планом, приведенным выше, на первом этапе велись работы по распределению ответственности, актуализации должностных инструкций, разработке актуальной организационной структуры и органиграммы, а также по планированию системы и по организационной деятельности.

Разработка документации, касающейся контекста организации, включала в себя проведение SWOT-анализа методом мозгового штурма, оформление протокола анализа и мониторинга. Протокол стал основой для составления контекста ор-

ганизации и определения рисков деятельности организации.

Третий этап – разработка документированных процедур, включал в себя формальное описание таких процессов в компании, как: менеджмент рисков, управление документированной информацией, менеджмент непрерывности бизнеса и других, а также формирования фонда НПА и НД и Глоссария.

Этап разработки положений по информационной безопасности являлся самым длительным, так как состоял из подготовки частных политик, которые были разработаны в соответствии с Приложением А стандарта ISO/IEC 27001, и формирования Заявления о применимости (SoA).

Проведение обучения сотрудников компании включало в себя ознакомление персонала с документированной информацией СМИБ, файлом с аудио-обучением посредством отправки по корпоративной электронной почте ссылки и коммуникациями в Skype непосредственно перед проведением сертификационного аудита. Сотрудники под роспись были ознакомлены с приказами руководства, документированной информацией и файлом с обучением по ISO/IEC 27001.

Соответствие рабочих процессов компании описанным политикам было подтверждено при проведении внутренних аудитов.

Таким образом, компания была готова к сертификации в 2021 году. Этап «Сертификация СМИБ», включал в себя: подготовку отчетных документов необходимых для прохождения сертификационного аудита, формирование и подачу заявки в орган по сертификации, прохождение первого этапа сертификационного аудита, работу над несоответствиями и аспектами для улучшения, выявленными на первом этапе сертификационного аудита и прохождение второго этапа сертификационного аудита.

На данный момент компания находится в ожидании получения сертификата на соответствие ISO/IEC 27001.

Прохождение сертификации много значит для компании, так как сертификат обеспечивает доверие заказчиков, гарантирует защиту персональных данных клиентов и дает конкурентное преимущество на рынке.

Литература

1. ISO/IEC 27001 [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа https://ru.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_27001. – Дата обращения: 19.09.2021.
2. ISO/IEC 27000:2018 Information technology – Security techniques – Information security management systems – Overview and vocabulary [Электронный ресурс]. – Режим доступа <https://ru.wikipedia.org>. – Дата обращения: 19.09.2021.

УДК 531.788.089.68-027.542 (476)

СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

Шавилков Э.С.

*РВИ «Белорусский государственный институт метрологии»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрено понятие вакуума, сферы его применения в промышленном и научном секторе, а также актуальность создания Национального эталона единицы давления в области измерения вакуума в Республике Беларусь.

Ключевые слова: вакуум, эталон, абсолютное давление, вакуумметр.

ESTABLISHING A NATIONAL STANDARD OF PRESSURE UNIT IN THE FIELD OF VACUUM MEASUREMENT

Shavilkov E.

*Belarusian state institute of metrology
Minsk, Belarus*

Abstract. The article discusses the concept of vacuum, the scope of its application in the industrial and scientific sector, as well as the relevance of the creation of the National Standard of the unit of pressure in the field of measuring vacuum in the Republic of Belarus.

Key words: vacuum, standard, absolute pressure, vacuum gauge.

*Адрес для переписки: Шавилков Э.С., ул. Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Республика Беларусь
e-mail: shavilkov@belgim.by*

Общие сведения. В технике и прикладной физике под вакуумом понимают среду, состоящую из газа при давлении значительно ниже атмосферного [1]. Мерой степени разрежения вакуума служит длина свободного пробега молекул, то есть вакуум характеризуется соотношением между длиной свободного пробега молекул газа, связанной с их взаимными столкновениями, и характерным размером сосуда, в котором находится газ.

В зависимости от того, насколько давление ниже атмосферного давления, равного 101325 Па (при стандартных условиях), вакуум подразделяют на диапазоны в соответствии с технологией, необходимой для его достижения или измерения [2]. Выделяют несколько уровней вакуума, распределение давления в которых выглядит следующим образом:

- низкий вакуум (НВ): от 10^5 до 10^2 Па,
- средний вакуум (СВ): от 10^2 до 10^{-1} Па,
- высокий вакуум (ВВ): от 10^{-1} до 10^{-5} Па,
- сверхвысокий вакуум (СВВ): от 10^{-5} до 10^{-9} Па,
- чрезвычайно высокий вакуум (ЧВВ): $< 10^{-9}$ Па.

Данные уровни вакуума в зависимости от области применения разделяют на три производственные группы.

Низкий вакуум: в основном используется там, где требуется откачка большого количества воздуха. Для получения низкого вакуума используют электромеханические насосы лопастного типа, центробежного, насосы с боковым каналом, генераторы потока и т.д.

Промышленный вакуум: соответствует диапазону значений давления от 1 до 80 кПа. Промышленный вакуум получают с помощью ротационных, жидкостно-кольцевых, поршневых

насосов и лопастных вакуумных генераторов по принципу Вентури. Областью применения промышленного вакуума является захват присосками, термоформование, вакуумный зажим, вакуумная упаковка и др.

Технический вакуум: соответствует значениям давления от 1 кПа и меньше. Такой уровень вакуума получают при помощи двухуровневых ротационных насосов, эксцентриковых роторных насосов, вакуумных насосов Рутса, турбомолекулярных насосов, диффузионных насосов, криогенных насосов и т.д. Технический вакуум используется, в основном, при лиофилизации, металлизации и термообработке. В науке технический вакуум используется в качестве симуляции космического пространства.



Рисунок 1 – Общий вид установки вакуумметрической эталонной 2-го разряда УВЭ-3

Вакуум используется в электродуговых трубках, лампах накаливания, ускорителях частиц, в металлургии, пищевой и аэрокосмической промышленности, в установках для контроля ядерного синтеза, в микроэлектронике, в стекольной и кера-

мической промышленности, в науке, в промышленной роботехнике, в системах захвата с помощью вакуумных присосок и т.д.

Для измерения вакуума используются специальные средства измерений – вакуумметры различных типов и принципов действия.

Актуальность работы. В настоящее время в Республике Беларусь отсутствует эталонное оборудование, которое может применяться для проведения метрологического контроля средств измерений вакуума.

Предприятия Республики Беларусь для проведения метрологического контроля средств измерений вакуума пользуются услугами других государств, в частности, Российской Федерации, которая имеет Государственный рабочий эталон 2-го разряда единицы давления для области низких абсолютных давлений (ФГУП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева») со следующими характеристиками:

- диапазон измерений от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1,06 \cdot 10^5$ Па;
- пределы допускаемой относительной погрешности:

- $\pm 15\%$ в диапазоне от $1 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^{-2}$ Па;

- $\pm 10\%$ в диапазоне свыше $1 \cdot 10^{-2}$ до $6,65 \cdot 10^3$ Па;

- ± 665 Па в диапазоне свыше $6,65 \cdot 10^3$ до $1,06 \cdot 10^5$ Па.

Цель и новизна разработки. Конечной целью является создание Национального эталона единицы давления в области измерения вакуума.

Национальный эталон единицы давления в области измерения вакуума будет служить для хранения, воспроизведения и передачи размера единицы давления в области измерения вакуума эталонам, для проведения метрологического контроля средств измерений низкого абсолютного давления, в первую очередь, в области измерения вакуума, обеспечения единства измерений в области измерения давления на территории Республики Беларусь.

Метрологические требования к Национальному эталону:

- диапазон воспроизведения (измерения) и передачи единицы давления в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^5$ Па;

- пределы допускаемой относительной погрешности:

- $\pm 15\%$ в диапазоне от $1 \cdot 10^{-6}$ до $1 \cdot 10^{-1}$ Па;

- $\pm 5\%$ в диапазоне свыше $1 \cdot 10^1$ до 10 Па;

- $\pm 4\%$ в диапазоне свыше 10 до 10^3 Па;

- $\pm 2\%$ в диапазоне свыше $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^5$ Па.

Предельное остаточное давление установки, не более: $1 \cdot 10^{-7}$ Па.

Аналоги создаваемого эталона в Республике Беларусь отсутствуют.

Создание Национального эталона единицы давления в области измерения вакуума обеспечит:

- единство измерений низкого абсолютного давления, в первую очередь, в области измерения вакуума на территории Республики Беларусь;

- воспроизведение, хранение и передача размера единицы давления в области измерения низкого абсолютного давления к рабочим эталонам;

- проведение метрологического контроля средств измерений низкого абсолютного давления в области измерения вакуума;

- сокращение затрат предприятий Республики Беларусь на метрологические услуги организаций других государств, повышение качества и конкурентоспособности продукции, выпускаемой предприятиями Республики Беларусь;

- проведение научно-исследовательских работ в области измерения низкого абсолютного давления в области измерения вакуума

Литература

1. Chambers, A. Modern Vacuum Physics / A. Chambers. – Boca Raton : CRC Press, 2004.

2. Родин А. М. Вакуум. Физическая энциклопедия : в 5 т. / А. М. Родин, А. В. Дружинин ; гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – Т. 1. – С. 235–236. – 707 с.

**Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ**

REENGINEERING DETAILS BY ADDITIVE TECHNOLOGIES

Yemets A., Barandych K., Gladskyi M.

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

Kyiv, Ukraine

Abstract. Repair of body parts is a very responsible process because such breakdowns can destroy the protective function, make adjustments to the operation of the mechanism itself. Many repair methods are currently used, but they have significant drawbacks. Reengineering is a new perspective, and the use of additive technologies is one of the modern and effective ways to repair parts.

Key words: 3D-printing, 3D-scanner, reengineering, repair.

РЕИНЖЕНИРИНГ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДТИВНИХ ТЕХНОЛОГИЙ

Емець А.Б., Барандич К.С., Гладский М.Н.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ, Україна

Аннотация. Ремонт деталей корпуса – довольно ответственный процесс, так как такие поломки могут снизить функцию защиты механизма и оказывать нежелательное влияние на его работу в штатном режиме. На сегодняшний день используются множества способов ремонта элементов корпуса, однако, в каждом из них можно отметить значительные недостатки. Реинжиниринг – это взгляд на известные проблемы с новой стороны, а использование аддитивных технологий – один из современных и эффективнейших способов ремонта деталей корпуса механизмов.

Ключевые слова: 3D-печать, 3D-сканер, реинжиниринг, ремонт.

*Адрес для переписки: Ємець А.Б., ул. Красноткацкая 93, г. Киев 02094, Украина
e-mail: nastia4019@gmail.com*

Goal of the work. Advancement of methods in administrative technologies, relevance, and reengineering in the daily reengineering of details.

Reengineering of parts. Expansion of traditional methods of repair of basic body parts:

1. Elimination of cracks: using couplers, using fonts, using on-layings.

2. Repair of a broken protruding part (bracket, lugs, rod) is carried out: by installing an insert or plug, welding the broken part to the body.

3. Repair of worn holes is carried out: by the installation of a repair sleeve, surfacing of holes.

4. Repair of the worn-out nests under clamps is lever carried out: by the installation of a repair stopper, installation of an overlay [1].

All methods have their drawbacks: the impossibility of using surfacing for shafts of small diameters, splined joints, internal holes; large losses of metal on spraying; the need for special types of wire and special power supplies – the disadvantage of the surfacing method; insufficient stability of the plasmatron, high gas consumption, low powder utilization, especially when restoring parts of small diameters for the method of plasma spraying.

Currently, there are other ways to repair, such as using 3D-printing to repair damaged parts. All you need for such a repair is a 3D-model of the required product.

Methods of construction of three-dimensional models. Construction of three-dimensional models of renewable parts can be performed in a CAD CAD module or using a 3D-scanner [2].

Regarding classical drawing, there are many programs for this. The most famous of them are КОМПАС-3D, NanoCAD, FreeCAD, ABViewer, CATIA, INVENTOR, and others. Each of them has a number of advantages and disadvantages, but most of them are compatible with different models of 3D-printers, the ability to perform 3D-scans, save in various formats and more.

Another option is a 3D-scanner. 3D-scanning is a technology for creating 3D-models of real-world objects [3]. 3D-scanning works like this: the scanner takes several pictures of the object, then the pictures are combined into a 3D-model, which is an exact three-dimensional copy of the object that can be rotated and viewed at different angles. The scanner works like a video camera, ie it captures an object. The camera, however, takes two-dimensional photos, while the scanner captures the geometry of the surface of the object, and the images taken are converted into a 3D-model, not video [3]. 3D-scanning is performed as follows and is divided into the following stages: data collection, data acquisition, modeling selection depending on the scope and possible verification.

1. By scanning method: contact, contactless, active, and passive.
2. Accuracy: high-precision, low-precision, and general application.
3. By scan object size: for small, medium, and large objects.
4. By scope;
5. By level of mobility: manual and stationary.

3D-printing. The scope of 3D-printing today is very diverse. For example, Boyce has launched its 3D-printing, with the task of quickly creating parts with high-quality and reliable results [3]. Another example, the German railway Deutsche Bahn, which is one of the largest transport companies in the world, uses 3D-scanning and later 3D-printing in case of need to replace old parts, this reduces the cost of maintaining warehouses and unnecessary production.

3D-printing covers several manufacturing technologies that create parts in layers. Each of them differs in the method of forming plastic and metal parts and may differ in the choice of material, surface treatment, strength, speed of manufacture, and cost [3]. There are several methods of 3D-printing:

- Stereolithography (SLA);
- Selective Laser Sintering (SLS);
- PolyJet;
- Fusion Deposition Modeling (FDM);
- Digital Light Processing (DLP);
- Multi Jet Fusion (MJF);
- Electron Beam Melting (EBM);

One of the most well-known methods of 3D-printing is SLA, which is also called laser stereolithography. SLA is a technology of three-dimensional printing using raw materials in the form of a liquid photopolymer, which hardens under the influence of laser light radiation, forming a solid surface at the point of projection of the laser.

Main advantages:

- excellent positioning accuracy, surface smoothness;
- production of models of any complexity (thin-walled and small details);
- rather high, in comparison with other technologies, speed of creation of object;
- no technological problems with printing (overheating, delamination, collapse underweight, failure of the route of the head, poor adhesion, degluing corners) [4].

SLS – this method is similar to the previous one, except that instead of liquid photopolymer, the crushed powder is used, which is sintered by a laser at the point of contact and thus increases the structure of the object being manufactured.

The advantages of this method include first of all:

- the ability to print objects without the use of supporting structures under overhanging surfaces;
- a variety of different materials that can be used for printing;
- the high strength of products, which can be achieved by using the appropriate material (currently available as raw materials nylon, glass, plastic, ceramics, various metals).

But the most popular method is FDM. It is based on inkjet printing technology. FDM is a technology of layer-by-layer surfacing of plastic, which is continuously fed to the contour of the future part through a thin forming nozzle.

Advantages of this method:

- inexpensive and widespread raw materials for printing (polymers and plastics);
- easy to manufacture and repair mechanical part of the device;
- the ability to use a wide range of colors for printing;
- low cost of printing.

Conclusions. Thus, the use of additive technologies in the repair and restoration of parts and components allows to speed up and significantly reduce the cost of these processes. However, assessments and justifications are required: the choice of method of obtaining a 3D-model of the product, the method of 3D-printing and the quality of the obtained part or assembly.

References

1. Схиртладзе, А. Г. Технология восстановления корпусных деталей / А. Г. Схиртладзе // Технология металлов. – 2001. – № 12.
2. Горьков, Д. 3D-печать с нуля / Д. Горьков., 2020. – 256 с.
3. Brian Garret. The 3D-Printing Handbook: Technologies, design and applications / Brian Garret, Filemon Schöffner, Ben Redwood. – 2017. – 350 с.
4. Joan Horvath. Mastering 3D-Printing: A Guide to Modeling, Printing, and Prototyping / Joan Horvath. – 400 с. – (2).
5. Виды 3D-принтеров: характеристики, технологии и схемы печати [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tv-st.ru/cifro-tehnika/typy-3d-printerov.html>.

УДК 544.537

**МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА
КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ,
МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ ТИТАНА**

Акула И.П.¹, Маркевич М.И.¹, Малышко А.Н.¹, Чекан Н.М.¹, Щербакова Е.Н.²

¹ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования структуры и магниторезонансных свойств смесовой ткани 07C11-KB, модифицированной кластерами титана. Исследования производились с использованием растрового электронного микроскопа MIRA 3 и анализатора ЭМР «Минск 22».

Ключевые слова: морфология поверхности, магниторезонансные свойства.

**SURFACE MORPHOLOGY AND MAGNETIC RESONANCE PROPERTIES OF A COMPOSITE
MATERIAL BASED ON A MIXED TISSUE MODIFIED WITH TITANIUM CLUSTERS**

Akula I.¹, Markevich M.¹, Malyshko A.¹, Chekan N.¹, Shcherbakova E.²

¹Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The results of a study of the structure and magnetic resonance properties of a 07C11-KB mixed fabric modified with titanium clusters are presented. The studies were carried out using a scanning electron microscope MIRA 3 and an EMR analyzer “Minsk 22”.

Key words: surface morphology, magnetic resonance properties.

Адрес для переписки: Щербакова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

В последнее время в мире большое внимание уделяется разработкам композиционных материалов (на основе тканей), поглощающих электромагнитное излучение [1]. Высокотехнологические ткани для специальной и фирменной одежды входят в систему приоритетов многих компаний («Моготекс», «Kufner», «Метакрон», «Rayen SA»).

В данной работе модификация смесовой ткани осуществлялась кластерами титана. Процесс проходил в вакууме с использованием источника стационарной металлической плазмы (титан), работающего в режиме сепарации. Покрытие наносилось на смесовую ткань 07C11-KB (производитель «Моготекс»).

Поскольку температура покрытия при его формировании на поверхности основы может достигать нескольких сотен градусов Цельсия, то процесс осуществлялся путем чередования периодов работы источника плазмы (продолжительность составляла 1 минуту) и паузы для охлаждения ткани (1 минута).

Предварительно перед формированием покрытий поверхность тканей обрабатывалась высокоэнергетичными ионами аргона для удаления органических загрязнений в течение 15 минут при следующих параметрах: давление аргона в вакуумной камере порядка $3,2 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 2000 В, ионный ток 40 мА.

Исследования структуры синтезированных материалов производилось с использованием растрового электронного микроскопа MIRA 3.

Исследования элементного состава образцов проводились с помощью системы энергодисперсионного (EDS) микроанализа, установленной на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3. Полученные спектры, свидетельствующие о наличии в образцах титана, представлены на рис. 1.

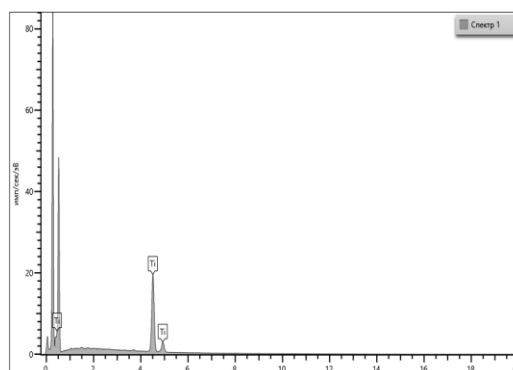
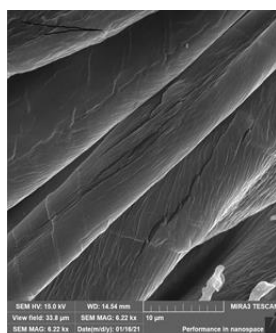
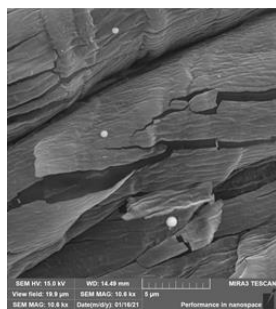


Рисунок 1 – Элементный состав покрытия, нанесенного на поверхность ткани 07C11-KB

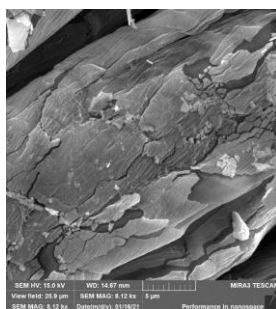
Результаты исследования морфологии покрытия, нанесенного на поверхность ткани 07C11-KB, представлены на рис. 2.



а



б



в

Рисунок 2 – Морфология покрытия, нанесенного на поверхность ткани 07С11-КВ

Как следует из рис. 2, а, нанесенное покрытие однородно покрывает поверхность ткани. Размер филамента ткани с покрытием составляет примерно 8 мкм.

Из рис. 2, б следует, что при нанесении покрытия формируется капельная фаза. Капли различаются по размеру, размеры капель варьируются от 0,3 до 0,5 мкм.

На рис. 2, в представлены дефекты покрытия, неоднородные по толщине, состоящие из отдельных кусочков, разделенных между собой трещинами. По-видимому, при формировании покрытия возникают упругие напряжения в системе подложка – осажденное титановое покрытие, приводящее к его растрескиванию.

Исследования магнитного резонанса проводились на специализированном малогабаритном анализаторе ЭМР «Минск 22» при комнатной температуре. Рабочая длина волны – 3 см. Максимальное значение индукции магнитного поля – 450 мТл, частота модуляции – 30 кГц. Для калировки интенсивности сигналов объектов исследования использовался образец из монокристалла рубина ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Cr}^{3+}$). В процессе измерений дополнительный контроль стабильности работы спектрометра осуществлялся путем измерения калибровочного материала двухвалентного марганца ($\text{MgO}:\text{Mn}^{2+}$) [2].

На рис. 3 представлен спектр ЭМР смесовой ткани с покрытием.

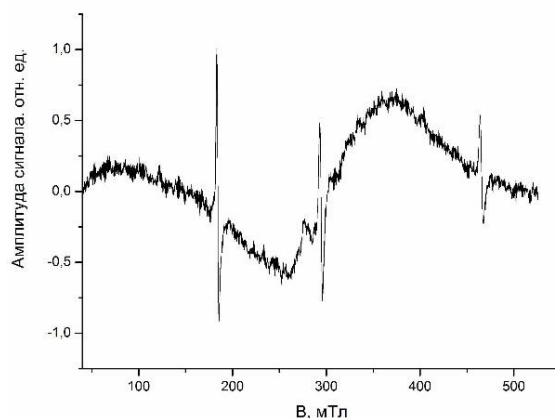


Рисунок 3 – Спектр ЭПР системы смесовая ткань – титановое покрытие

На спектре проявляется широкая неоднородно уширенная резонансная линия в области эффективного g -фактора $2,3 \pm 0,1$. Ширина линии составляет 120 мТл, что связано с прямым взаимодействием атомов титана с поверхностными центрами полимерной ткани в процессе формирования композита. Из соотношения интенсивностей сигналов заполненного резонатора и калибровочного образца следует, что нерезонансное поглощение электрической компоненты электромагнитного поля незначительно.

Литература

1. Бондарчук, М. М. Подходы к классификации технического текстиля / М. М. Бондарчук // Проблемы современной науки и образования. – 2015. – № 11. – С. 95–99.
2. Морфология поверхности и магниторезонансные свойства лавсана, модифицированного кластерами стали ионно-плазменным воздействием / А. Г. Анисович [и др.] // Литье и металлургия. – 2019. – № 3. – С. 142–146.

УДК 621.793.3

ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА СВЕТОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ СЕЛЕКТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

Андрухович И.М., Гасенкова И.В., Денисюк С.В.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе рассмотрены способы нанесения никелевого светопоглощающего покрытия на селективирующие элементы. Исследованы морфология поверхности и состав полученных покрытий.

Ключевые слова: светопоглощающее покрытие, никель, селективирующий элемент, сканирующая электронная микроскопия.

RESEARCH OF THE MORPHOLOGY AND COMPOSITION OF THE LIGHT-ABSORBING COATING OF THE SELECTIVE ELEMENTS FOR PLASMA FLOWS SENSORS

Andrukhovich I., Gasenkova I., Dzenisiuk S.

*SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology"
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper considers the methods of applying a nickel light-absorbing coating to the selective elements. The morphology of the surface and the composition of the obtained coatings are investigated.

Key words: light-absorbing coating, nickel, selective element, scanning electron microscopy.

*Адрес для переписки: Андрухович И.М., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: irini.andrukhovich@gmail.com*

Исследование межпланетной космической среды с помощью прямых измерений, проводимых на космических аппаратах, выходящих за пределы магнитосферы Земли, представляют собой одну из важнейших научных и практических задач. Составной частью межпланетной космической среды являются сверхзвуковые потоки плазмы солнечного ветра, переносящие различные возмущения от Солнца к Земле. Непрерывный мониторинг параметров межпланетной среды и солнечного ветра необходим для изучения геофизической обстановки в околоземном космическом пространстве и прогнозирования космической погоды.

В настоящее время определение параметров солнечного ветра с высоким временным разрешением осуществляется обычно на основе интегральных или модуляционных цилиндров Фарадея. При измерении необходимо контролировать основные параметры плазмы солнечного ветра с временным разрешением не хуже 1,5–3,0 с по переносной скорости, ионной температуре и концентрации, и разрешением в 0,03 с по величине и направлению вектора потока ионов солнечного ветра. Достижение таких параметров во многом определяется конструктивно-технологическими особенностями применяемых в цилиндрах Фарадея селективирующих элементов в виде металлических сеточных структур с кольцами-держателями [1].

Сеточные структуры выполнены из светлого никеля. Поэтому для уменьшения коэффициента отражения в ультрафиолетовой области солнечного спектра и уменьшения тока вторичных фотоэлектронов на электродах необходимо разра-

ботать методику нанесения светопоглощающего покрытия из «черного» никеля на селективирующие элементы в виде сеточных структур.

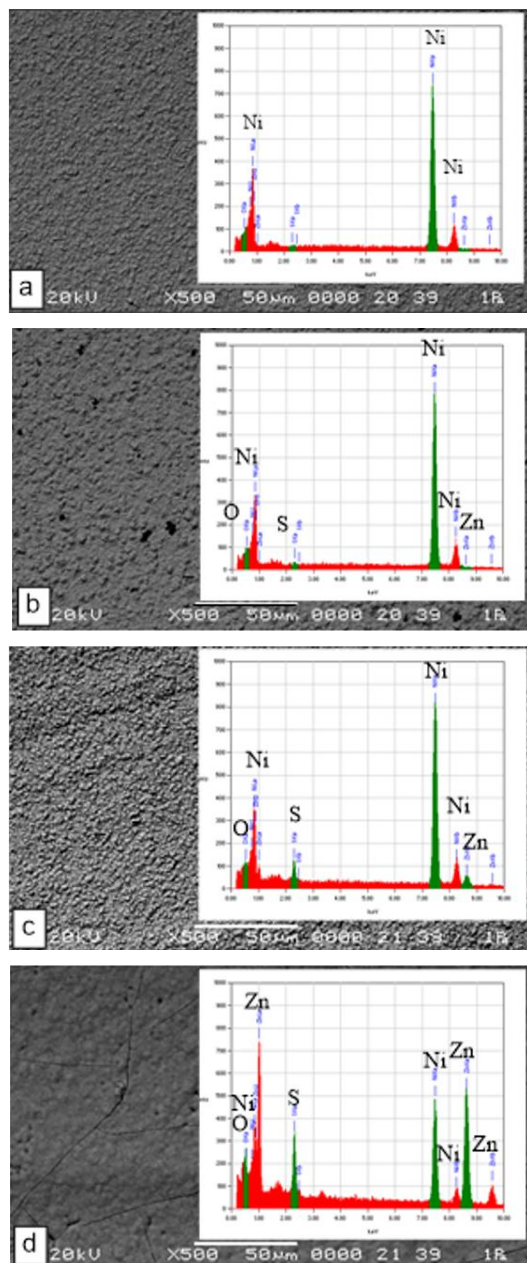
В настоящее время для получения черных покрытий используются вакуумное напыление, химическое осаждение из паровой фазы [2], химическое осаждение из раствора, золь-гель метод [3], электрохимическое осаждение [4–5]. В работе применялось химическое и электрохимическое осаждение слоев «черного» никеля.

Изучение морфологии поверхности и определение состава образцов было проведено с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-6510LV с системой электронно-зондового энергодисперсионного химического анализа EDX JED-2201 с использованием детектора вторичных электронов.

Исходные селективирующие элементы получены из сульфатного электролита никелирования. Поверхность элементов светло-серого цвета, представлена кристаллитами размером до 4 мкм (рис. 1, *a*). В составе образца присутствует никель (99,7 мас. %), примеси серы, кислорода и цинка обусловлены составом электролита

Первый вариант формирования светопоглощающего покрытия осуществлялся с использованием раствора, содержащего $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ (200 г/л) Na_2SO_4 (100 г/л), FeSO_4 (9 г/л), NH_4SCN (6 г/л). При окрашивании образца в течение 15 мин образовывался темносерый слой. Из рис. 1, *b* видно, что после обработки поверхности размер кристаллитов достигает 6 мкм, наблюдается появление пор размером от 1 мкм до 6 мкм. Применение данного метода нанесения покрытия приводит к увеличению его шероховатости. По резуль-

татам анализа состава покрытие состоит из 0,66 % атомов кислорода, 1,16 % атомов серы и 99,18 % атомов никеля. Цвет покрытия объясняется наличием оксида и сульфида никеля.



a – без покрытия; *b* – покрытие из раствора 1;
c – покрытие из раствора 2;
d – покрытие из раствора 3

Рисунок 1 – РЭМ-изображение и ЭД-спектр поверхности никелевых слоев

Во втором варианте осаждение слоя покрытия проводили из раствора, состоящего из NiSO_4 (65 г/л), NH_4SCN (17 г/л), ZnCl_2 (18 г/л), AlCl_3 (8 г/л), NH_4F (10 г/л), Na_2SiO_3 (0,8 г/л). В качестве катода выступала сеточная структура, в качестве анода использовалась алюминиевая пла-

стина, время процесса составляло 40 мин. В результате осаждения получено никелевое покрытие темно-серого цвета. Из РЭМ-изображения поверхности видно, что кристаллиты приобретают округлую форму (рис. 1, *c*) по сравнению с исходной поверхностью (рис. 1, *a*). Покрытие состоит из 1,12 % атомов кислорода, 2,44 % атомов серы, 88,64 % атомов никеля и 7,80 % атомов цинка. Присутствие цинка и сульфида никеля придает полученному покрытию черный цвет.

Третий вариант светопоглощающего покрытия получали электрохимическим осаждением из электролита, содержащего NiSO_4 (144 г/л), ZnSO_4 (25 г/л), $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ (15 г/л), H_3BO_3 (25 г/л), KSCN (25 г/л), $\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2$ (45 г/л). Температура электролита в процессе осаждения $30 \pm 1^\circ\text{C}$, плотность тока процесса 3 мА/см². Получено покрытие из слоя никеля черного цвета. РЭМ-изображение поверхности показывает, что данный состав электролита способствует формированию выравнивающего слоя никеля (рис. 1, *d*), наблюдаются трещины, при изгибе покрытие не осыпается. Наличие трещин обусловлено большой толщиной слоя покрытия. По результатам энергодисперсионного анализа светопоглощающее покрытие состоит из 3,51 % атомов кислорода, 5,36 % атомов серы, 29,87 % атомов никеля и 61,26 % атомов цинка

Для получения светопоглощающего покрытия селективирующих элементов для датчиков потоков космической плазмы предпочтительно использование первого и второго вариантов формирования слоя «черного» никеля.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор №Т20М-016).

Литература

1. Разработка датчика потока космической плазмы с четырехсекционным коллектором / Н. И. Мухуров [и др.] // Известие вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 7. – С. 624–632.
2. Accelerated aging tests of chromium containing amorphous hydrogenated carbon coatings for solar collectors / R. Gampp [et al.] // Solar Energy Mat Sol. – 1998. – Vol. 54. – P. 369–377.
3. Lira-Cantua, M. Electrochemical deposition of black nickel solar absorber coatings on stainless steel AISI316L for thermal solar cells / M. Lira-Cantua // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2005. – Vol. 87. – P. 685–694.
4. Black nickel electrodeposition from a modified Watts bath / A. M. Ibrahim [et al.] // Journal of Applied Electrochemistry. – 2006. – Vol. 36. – P. 295–301.
5. Lizama-Tzecz, F. I. Electrodeposition of selective coatings based on black nickel for flat-plate solar water heaters / F. I. Lizama-Tzecz // Solar Energy. – 2019. – Vol. 194. – P. 302–310.

ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД ПРИ НАЛИЧИИ НА НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Бобученко Д.С.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получены выражения и проведены расчеты для коэффициентов отражения от границы раздела сред при наличии электрического тока на ней.

Ключевые слова: коэффициент отражения, диэлектрическая и магнитная проницаемости, напряженности электрического и магнитного полей.

REFLECTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES FROM THE INTERFACE IN THE PRESENCE OF CURRENT

Babuchenka D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The expressions and calculations for the reflection coefficients from the boundary of the media partition in the presence of current on it have been obtained.

Key words: reflection coefficient, dielectric and magnetic permeability, electric and magnetic field strengths.

*Адрес для переписки: Бобученко Д.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dbobuchenko@gmail.com*

Коэффициенты отражения электромагнитной волны от плоской границы двух сред, известные как формулы Френеля, получены при условии отсутствия свободных зарядов и токов на этой границе. Поэтому представляло интерес исследовать, как будут изменяться значения коэффициентов отражения при наличии свободных зарядов и токов на границе. В работе сначала рассмотрено изменения электрического и магнитного полей на границе раздела двух сред с диэлектрическими и магнитными проницаемостями $\epsilon_1, \mu_1, \epsilon_2, \mu_2$ для этих сред при наличии на границе свободных зарядов и тока.

Граничные условия для вектора напряженности электрического поля E. Выделим на границе прямоугольный замкнутый контур (длины а, ширины в), и используем закон электромагнитной индукции:

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} d\vec{S}.$$

Устремим ширину контура в к нулю, поток вектора магнитной индукции В обратится в нуль. $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = 0$ или $E_{1\tau}a - E_{2\tau}a = 0$. Т.е. $E_{1\tau} = E_{2\tau}$. На границе раздела двух сред касательная составляющая напряженности электрического поля не изменяется.

Граничные условия для вектора электрического смещения D. Выделим на границе раздела объем в виде симметричного цилиндра. По теореме Гаусса:

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV,$$

где ρ – объемная плотность свободных зарядов. Устремим высоту цилиндра h к нулю, получим:

$$D_{1n}S - D_{2n}S = \rho hS.$$

Т.к.: $\lim_{h \rightarrow 0} \rho h = \sigma$, σ = поверхностная плотность свободных зарядов. В результате: $D_{1n} - D_{2n} = \sigma$. На границе раздела двух сред разность нормальных составляющих электрического смещений равна поверхностной плотности свободных зарядов.

Граничные условия для вектора напряженности магнитного поля H. Выделим на границе прямоугольный замкнутый контур, и используем теорему для полного тока:

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S},$$

где j – плотность тока, А/м². Устремим ширину контура к нулю, получим:

$$H_{1\tau}a - H_{2\tau}a = j b a.$$

Т.к.: $\lim_{b \rightarrow 0} j b = j_p$, получим $H_{1\tau} - H_{2\tau} = j_p$, j_p – поверхностная плотность тока (А/м). На границе раздела двух сред разность касательных составляющих напряженности магнитного поля равна поверхностной плотности тока.

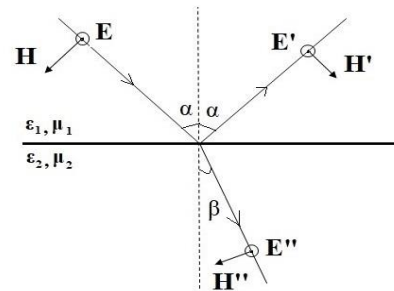


Рисунок 1 – Отражение s-поляризованной волны от границы раздела двух сред

Отражение плоскополяризованной, в плоскости перпендикулярной плоскости падения (*s*-поляризация), электромагнитной волны на границу раздела двух сред представлено на рис. 1. По поверхности протекает ток с поверхностной плотностью j_p . Согласно граничным условиям: для тангенциальных составляющих электрического поля :

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad (1)$$

для тангенциальных составляющих магнитного поля:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} + j_p. \quad (2)$$

Поскольку, напряженность магнитного поля является быстро осциллирующей функцией времени по сравнению с плотностью тока, уравнение (2) возвели в квадрат, и усреднили по времени за период колебаний, в результате получили для амплитуд:

$$H_{1\tau}^2 = H_{2\tau}^2 + 2j_p^2. \quad (3)$$

Согласно, направлениям напряженностей полей в *s*-поляризованной волне, показанным на рис. 1, получили систему уравнений:

$$E + E' = E''; \quad (4)$$

$$(H - H')^2 \cos^2 \alpha = (H'')^2 \cos^2 \beta + 2j_p^2, \quad (5)$$

где напряженности без штрихов относятся к амплитуде падающей волны, с одним штрихом – к отраженной, с двумя – к преломленным волнам. Введя амплитудный коэффициент отражения: $r_{\perp} = \frac{E'}{E}$, и используя связь между E , H в электромагнитной волне, из уравнений (4), (5) получим:

$$r_{\perp} = \frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - c_1(c_1 + 2j_e^2)}}{c_1},$$

где

$$c_1 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\mu_2^2} \sin^2 \alpha - \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \cos^2 \alpha \right\};$$

$$c_2 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\mu_2^2} \sin^2 \alpha + \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \cos^2 \alpha \right\}; \quad j_e = \frac{j_p}{E}.$$

Коэффициент отражения R_{\perp} интенсивности излучения ($R_{\perp} = r_{\perp}^2$) зависит от поверхностной плотности тока, и также от амплитуды напряженности электрического поля в падающей волне.

Падение плоскополяризованной, в плоскости падения (*p*-поляризация), электромагнитной волны на границу раздела двух сред, с протекающим по ней током, показано на рис. 2. По граничным условиям: для тангенциальных составляющих электрического поля:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau}; \quad (6)$$

для тангенциальных составляющих магнитного поля:

$$H_{1\tau} = H_{2\tau} + j_p. \quad (7)$$

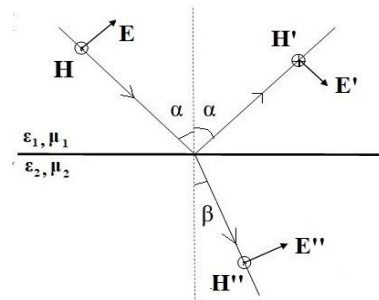


Рисунок 2 – Отражение *p*-поляризованной волны от границы раздела двух сред

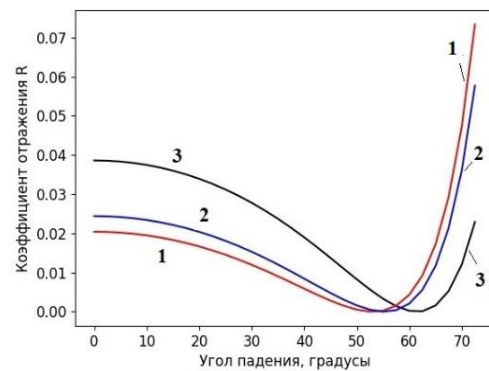


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения для *s*-поляризованной волны при $j_e = 0$ (1); $5 \cdot 10^{-4}$ (2); 10^{-3} (3) [$A^2 c^3 kg^{-1} m^{-2}$].

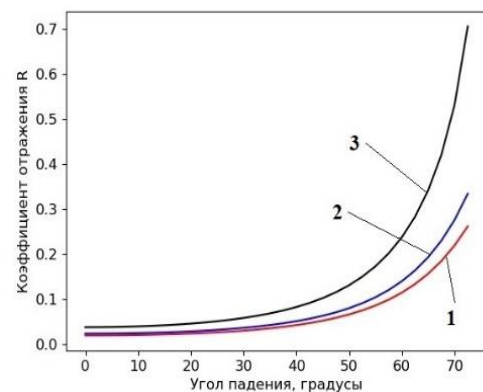


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента отражения для *p*-поляризованной волны при $j_e = 0$ (1); $5 \cdot 10^{-4}$ (2); 10^{-3} (3) [$A^2 c^3 kg^{-1} m^{-2}$].

В результате преобразований, как для *s*-поляризованной волны, получили для амплитуд:

$$H_{1\tau}^2 = H_{2\tau}^2 + 2j_p^2. \quad (8)$$

Согласно, направлениям напряженностей полей в *p*-поляризованной волне, показанным на рис. 2, получили систему уравнений:

$$(E + E') \cos \alpha = E'' \cos \beta; \quad (9)$$

$$(H - H')^2 = (H'')^2 + 2j_e^2, \quad (10)$$

где напряженности без штрихов относятся к амплитуде падающей волны, с одним штрихом – к отраженной, с двумя – к преломленным волнам. Введя амплитудный коэффициент отражения: $r_{||} = \frac{E'}{E}$, и используя связь между E, H в электромагнитной волне, из уравнений (9), (10) получили

$$r_{||} = \frac{-c_2 \pm \sqrt{c_2^2 - c_1(c_1 + 2j_e^2)}}{c_1},$$

где

$$c_1 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} * \frac{\cos^2 \alpha}{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sin^2 \alpha} - \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \right\};$$

$$c_2 = \frac{\varepsilon_0}{\mu_0} \left\{ \frac{\varepsilon_2}{\mu_2} * \frac{\cos^2 \alpha}{1 - \frac{\varepsilon_1 \mu_1}{\varepsilon_2 \mu_2} \sin^2 \alpha} + \frac{\varepsilon_1}{\mu_1} \right\}; \quad j_e = \frac{j_p}{E}.$$

Коэффициент отражения R интенсивности излучения равен: $R_{||} = r_{||}^2$.

Результаты расчетов коэффициентов отражения R_{\perp} и $R_{||}$ от угла падения α при различных значениях эффективной поверхностной плотности тока j_e на границе воздух-вода, представлены на рисунках 3 и 4. Они показывают, что коэффициент отражения для s -поляризованной волны R_{\perp} с увеличением j_e возрастает при всех углах падения. Коэффициент отражения для p -поляризованной волны $R_{||}$ с увеличением j_e возрастает при углах падения меньших угла Брюстера, и уменьшается при углах падения меньших угла Брюстера.

УДК 537.874

ГИБКИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Бойправ О.В., Богущ Н.В., Лыньков Л.М.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена методика изготовления структур, содержащих в своем составе фольгированные материалы и характеризующихся гибкостью и низкой массой на единицу площади. Выполнены измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц структур, изготовленных в соответствии с предложенной методикой. С использованием результатов выполненных измерений рассчитаны значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения таких структур. На основании анализа рассчитанных значений установлено, что структуры, изготовленные в соответствии с предложенной методикой, характеризуются радиопоглощающими свойствами. Эти структуры рекомендованы для использования в целях изготовления перегородок типа «занавес», предназначенных для функционального зонирования помещений, направленного на электромагнитную развязку расположенных внутри этих помещений радиоэлектронных приборов.

Ключевые слова: воздухопроницаемость, гибкость, радиопоглощающая структура, фольгированный материал.

FLEXIBLE RADIO-ABSORBING STRUCTURES BASED ON FOILED MATERIALS

Boiprav O., Bogush N., Lynkou L.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. The technique for the making of structures containing foiled materials and characterized by flexibility and low mass per unit area has been proposed. The measurements of the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values in the frequency range 0.7–17.0 GHz of the structures made in accordance with the proposed method have been performed. Using the measurements results, the electromagnetic radiation absorption coefficient values of such structures have been calculated. Based on the analysis of the calculated values, it was found that the structures made in accordance with the proposed technique are characterized by radio-absorbing properties. These structures are recommended for use in the manufacture of partitions of the “curtain” type, intended for functional zoning of premises, aimed at the electromagnetic decoupling of the electronic devices located inside these premises.

Key words: air permeability, flexibility, radio-absorbing structure, foiled material.

*Адрес для переписки: Бойправ О.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: smu@bsuir.by*

Обеспечение электромагнитной развязки радиоэлектронных приборов – одна из ключевых

задач, которую необходимо решать в целях создания условий для корректной работы этих

приборов. Как правило, решение этой задачи связано с использованием изделий на основе материалов или структур, обеспечивающих ослабление мощности электромагнитного излучения [1]. В случае, если радиоэлектронные приборы, электромагнитную развязку которых необходимо обеспечивать, не являются стационарными, то планируемые к применению в указанной цели изделия должны характеризоваться гибкостью и низкой массой на единицу площади. Это связано с тем, что представленные свойства обуславливают высокую степень транспортабельности изделий, для которых они характерны.

Авторами предложена методика изготовления структур, обеспечивающих ослабление энергии электромагнитного излучения и характеризующихся представленными свойствами. Предложенная методика включает в себя следующие шаги.

1. Откраивание от нетканого полиэфирного полотна фрагмента прямоугольной формы, длина и ширина которого не менее габаритных размеров, которыми должна характеризоваться изготавливаемая структура.

2. Откраивание от рулона фольгированной самоклеящейся пленки полос, ширина которых равна $0,5 \pm 0,1$ см, а длина – длине диагонали фрагмента нетканого полиэфирного полотна, откраенного в рамках шага 1. Для определения количества откраиваемых полос необходимо использовать совокупность следующих условий:

- откраенные полосы должны быть размещены под углом 45° по отношению к двум смежным сторонам фрагмента нетканого полиэфирного полотна;

- откраенные полосы должны быть размещены на обеих поверхностях фрагмента нетканого полиэфирного полотна с шагом, значение которого сопоставимо со значением четверти длины электромагнитной волны в рабочем диапазоне частот изготавливаемой структуры.

3. Закрепление полос, откраенных в рамках шага 2, на обеих поверхностях фрагмента нетканого полиэфирного полотна, откраенного в рамках шага 1, в соответствии с условиями, использованными в рамках шага 2.

4. Придание полученной структуре требуемой формы с использованием станка для фигурной резки поролон.

Для установления типа структур, получаемых с помощью предложенной методики (радиоэкранирующие или радиопоглощающие), выполнено следующее.

1. В соответствии с предложенной методикой изготовлены образцы структур.

2. Выполнены измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц изготовленных образцов. Для этого были ис-

пользованы панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0,01–18 [2] и методика [3].

3. Выполнен расчет коэффициента поглощения электромагнитного излучения изготовленных образцов с использованием формулы

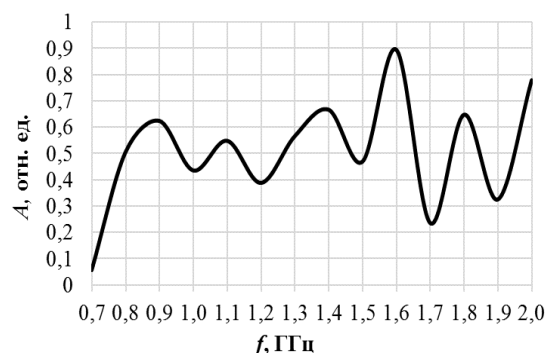
$$A = 1 - R - T,$$

где R и T – соответственно значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения, выражаемые в разгах и вычисляемые на основе следующих формул:

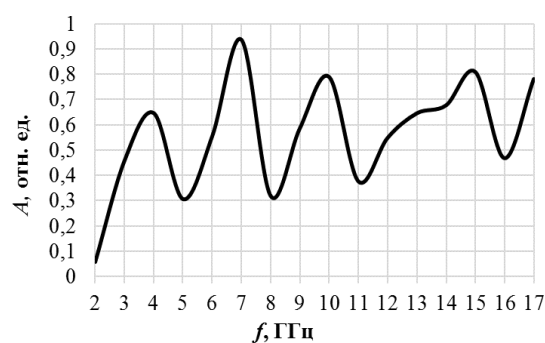
$$R = 10^{\frac{S_{11}}{10}}, T = 10^{\frac{S_{21}}{10}},$$

где S_{11} и S_{21} – соответственно измеренные значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения, выраженные в децибелах.

Полученная в результате реализации предложенных действий частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц структур, изготовленных в соответствии с предложенной методикой, приведена на рис. 1.



а



б

Рисунок 1 – Частотная зависимость коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–2,0 ГГц (а) и 2,0–17,0 ГГц (б) структур, изготовленных в соответствии с предложенной методикой

Из рис. 1 следует, что структуры, изготовленные в соответствии с предложенной методикой обеспечивают поглощение в среднем более 50 % мощности взаимодействующего с ними электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц. Таким образом, указанные структуры являются радиопоглощающими. Они представляются перспективными для использования в изготовлении изделий, предназначенных для функционального зонирования помещений, в которых располагаются радиоэлектронные приборы, чувствительные к воздействию электромагнитных помех. Такие изделия должны представлять собой занавесы, размещаемые между указанными приборами и закрепляемые на направляющих, зафиксированных либо на потолке помещения, либо на специальном подвижном каркасе.

Благодарности. Работа выполнена в рамках НИР «Эластичные и воздухопроницаемые электромагнитные экраны на основе фольгированных материалов для обеспечения информационной

и экологической безопасности» по заданию № 1.5 «Разработка новых материалов и технологий для систем электромагнитной защиты радиоэлектронного и информационного оборудования, биологических объектов от воздействия широкого спектра электромагнитных излучений, обеспечения электромагнитной безопасности населения и электромагнитной совместимости электро- и радиотехнических средств и оборудования» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021–2025 гг.

Литература

1. EMI shielding: methods and materials – a review / S. Geetha [et al.] // Journal of Applied Polymer Science, 2009. – Vol. 112, № 4. – P. 2073–2086.
2. Скалярные анализаторы цепей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://mwmlab.com/oborudovanie/izmeritelnoe-svch-oborudovanie/skalyarnye-analizatory-cepей>. – Дата доступа: 21.09.2021.
3. Изделия электронные СВЧ. Методы измерения электрических параметров : ГОСТ 20271.1-91.

УДК 004.056:061.68

ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Бокуть Л.В.¹, Деев Н.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе рассматривается один из компенсационных методов подавления интенсивных узкополосных помех в системе передачи дискретно-непрерывных сообщений. Исследуется помехоустойчивость устройств обработки двоичных сигналов с межсимвольной псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ).

Ключевые слова: обработка сигналов, дискретно-непрерывные сообщения, подавление помех, перестройка рабочей частоты.

SUPPRESSION OF HINDRANCES IN WIRELESS INFORMATION SYSTEMS

Bokut L.¹, Deev N.²

¹Belarusian National Technical University

²The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus

Minsk, Belarus

Abstract. In the work one of compensation methods of suppression of intensive narrow-band hindrances in the system of transfer of discrete and continuous messages is considered. The noise stability of processing devices of binary signals with the intersymbolical pseudorandom reorganization of operating frequency (PROF) is investigated.

Key words: processing of signals, discrete and continuous messages, suppression of hindrances, reorganization of operating frequency.

Адрес для переписки: Бокуть Л.В., ул. Якуба Коласа, 22, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: lvbokut@bntu.by

В настоящее время одной из важных проблем при функционировании беспроводных информационных систем передачи данных является обеспечение защищенности и повышение стойкости к воздействию аддитивных, мультипликативных помех и межсимвольной интерференции [1].

Для снижения вероятности ошибки на бит при действии интенсивных узкополосных помех целесообразно применение адаптивных компенсаторов помех (АКП). С этой целью в каждый из частотных каналов включается АКП, обеспечивающий обнаружение помехи и оценку ее уровня

[2]. Схема включения АКП и его структура приведены на рис. 1.

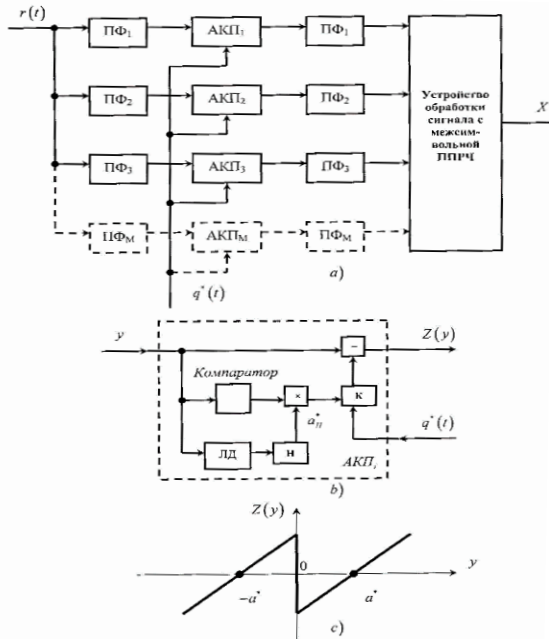


Рисунок 1 – Схема включения адаптивного компенсатора помех

На рис. 1 приняты обозначения ПФ – полосовой фильтр, Н – накопитель, ЛД – линейный детектор, К – коммутатор. С помощью схемы, представленной на рисунке, обеспечивается компенсация квазигармонических колебаний с относительно медленным изменением амплитуды $a(t)$. В паузе сигнала в частотном канале оценка амплитуды $a^*(t)$ осуществляется с высокой точностью. Включение компенсатора обеспечивается синхронизированной псевдослучайной последовательностью $q^*(t)$, коммутирующей выход устройства оценки помехи. Полосовые фильтры, включенные на выходе без инерционного АКП подавляют составляющие на частотах $(1 + 2k)\omega_{\text{пн}}$, $k \geq 1$, образующиеся на выходе компаратора. Для компенсации узкополосной помехи адаптивный нелинейный преобразователь строится по схеме, представленной на рис. 1.

Характеристика преобразователя показана на рисунке (с) и описывается следующим выражением: $Z(y) = y - a_{\text{п}}^* \text{sing}(y)$, где $Z(y)$ – амплитудная характеристика АКП, $a_{\text{п}}^*$ – оценка амплитуды помехи.

Оценка амплитуды $a_{\text{п}}^*$ помехи формируется из условия статистической независимости отсчетов помехи и определяется математической зависимостью:

$$a_{\text{п}}^* = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |y_i|,$$

где $a_{\text{п}}^*$ – оценка амплитуды помехи, k – порядковый номер независимого отсчета помехи.

Операция вычисления модуля осуществляется в линейном детекторе, а суммирование в накопителе. Поскольку оценка $a_{\text{п}}^*$ формируется в интервале времени, когда действует только помеха и внутренний шум приемника, то качество оценивания будет определять $P_{\text{ш}}$ – средняя мощность шума. При появлении в частотном канале сигнала включается цепь формирования оценки помехи с учетом оценки $a_{\text{п}}^*$, что обеспечивает качественную компенсацию первой гармоники помехи. Продукты помехового процесса, образуемые в компараторе, подавляются в полосовом фильтре (ПФ₁) включенном после вычитающего устройства компенсатора. За счет компенсации узкополосной помехи отношение q сигнал/помеха на выходе компенсатора увеличивается по сравнению с входным $q_{\text{вх}}$.

Между q и $q_{\text{вх}}$ существует следующая связь:

$$q = q_{\text{вх}} \mu_a^2,$$

где q – отношение сигнала/помеха на выходе компенсатора, $q_{\text{вх}}$ – отношение сигнала/помеха на входе компенсатора, μ_a^2 – коэффициент амплитудного подавления помехи.

Для рассматриваемого случая, требуемое соотношение мощности сигнала к мощности шума следующее:

$$P_{\text{с}}/P_{\text{ш}} \approx 10, \sigma_a^2/P_{\text{ш}} \ll 1,$$

$$q_{\text{п}} = a_{\text{п}}^2/P_{\text{ш}} \approx P_{\text{п}}/P_{\text{ш}} \approx 100,$$

тогда

$$\mu_a^2 = (1 + q_{\text{п}})/(1 + \sigma_a^2/P_{\text{ш}}) \approx 100,$$

$$q_{\text{вх}} = P_{\text{с}}/P_{\text{ш}}(1 + P_{\text{п}}/P_{\text{ш}}) = 10/101 \approx 1 \cdot 10^{-1},$$

где $q_{\text{п}}$ – отношение мощности помехи к мощности внутреннего шума приемника; ($q_{\text{п}} = a_{\text{п}}^2/P_{\text{ш}}$), σ_a^2 – дисперсия ошибки оценивания помехи, $P_{\text{ш}}$ – средняя мощность шума; $P_{\text{с}}$ – средняя мощность сигнала, $P_{\text{п}}$ – средняя мощность помехи.

Оценкой помехозащищенности систем связи с ППРЧ сигналами и адаптивными компенсаторами интенсивных гармонических помех определен обеспечиваемый энергетический выигрыш в сравнении с известными системами [3].

Отношение сигнал/помеха за счет АКП увеличивается в $\mu = [1 + (P_{\text{п}}/P_{\text{ш}})]$ раз, где $P_{\text{п}}$, $P_{\text{ш}}$ – мощности помехи и внутреннего шума приемника.

В случае оценивания помехи в канале без сигнала при относительно большом времени усреднения имеем $\sigma_a^2 \ll P_{\text{ш}}$, при этом $\mu_a^2 \approx (1 + q_{\text{п}})$.

В известных технических решениях коммутация каналов отсутствует, и оценка амплитуды помехи осуществляется в присутствии сигнала, поэтому:

$$q_{\text{п}} = a_{\text{п}}^2/(P_{\text{ш}} + P_{\text{с}}),$$

где $P_{\text{с}}$ – средняя мощность сигнала, и ошибка оценки помехи увеличивается до уровня мощности сигнала $P_{\text{с}}$.

Таким образом, снижается величина коэффициента μ_a^2 , т.е. эффективность компенсации помехи без коммутации каналов падает. Для оценки качества приема при действии помехи вводится энергетический параметр μ_Σ , определяющий вероятность ошибок P_e различения двоичных символов:

$$\mu_\Sigma = q_c / (1 + q_{\Pi} / \mu_a^2),$$

где $q_c = P_c / P_{\text{ш}}$ – отношение мощности сигнала к мощности шума; $q_{\Pi} = P_{\Pi} / P_{\text{ш}}$ – отношение мощности помехи к мощности шума, μ_a^2 – коэффициент амплитудного подавления помехи.

При отсутствии адаптивного компенсатора помех $\mu_\Sigma = q_c / (1 + q_{\Pi})$, т.е. интенсивная помеха ($q_{\Pi} \gg 1$) приводит к существенному снижению энергетического параметра μ_Σ по сравнению с q_c .

Включение адаптивного компенсатора помех позволяет снизить уровень действия помехи в $\mu_a^2 \approx (1 + q_{\Pi})$ раз, при этом обеспечивается $\mu_\Sigma = q_c$.

Таким образом, если $q_{\Pi} > 20$ дБ, то энергетический выигрыш при приеме с адаптивным компенсатором помех составляет более 20 дБ, а за счет автокомпенсации узкополосных помех не происходит полного стирания информации в пораженных помехами частотных каналах приема.

Литература

1. Бокуть, Л. В. Исследование компенсационного метода подавления помех в радиоканалах охранно-пожарных систем сигнализации / Л. В. Бокуть, Н. А. Деев // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 240–242.

2. Хорошко, В. А., Чекатков, А. А. Методы и средства защиты информации. – М. : Юниор, 2010. – 501 с.

3. Борисов, В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук; под ред. В. И. Борисова. – М. : РадиоСофт, 2008. – 512 с.

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ P^+ , B^+ И Sb^+ В ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120 НА КРЕМНИИ

Бринкевич Д.И.¹, Просолович В.С.¹, Черный В.В.²

¹Белорусский государственный университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) исследованы пленки диазохинон-новолачного фоторезиста ФП9120 толщиной 1,8–5,0 мкм, имплантированные ионами B^+ , P^+ и Sb^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ см⁻². Рассмотрены различные механизмы радиационно-индуцированной модификации структурных и оптических свойств пленок ДХН-резистов за область пробега ионов, обусловленные электронным и ядерным механизмами торможения ионов.

Ключевые слова: диазохинонноволачный фоторезист; ионная имплантация; нарушенное полное внутреннее отражение; адгезия; кремний.

FEATURES OF IMPLANTATION OF P^+ , B^+ AND Sb^+ IONS INTO FILMS OF FP9120 POSITIVE PHOTORESIST ON SILICON

Brinkevich D.¹, Prosolovich V.¹, Chorny V.²

¹Belarusian State University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Diazoquinone-novolac photoresist films with 1,8–5,0 μm thick, implanted with B^+ , P^+ , and Sb^+ ions with an energy of 60 keV in the dose range $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ cm⁻² were investigated. Various mechanisms of radiation-induced modification of the structural and optical properties of resist films beyond the ion path region, caused by the electronic and nuclear mechanisms of ion inhibition, were considered.

Key words: diazoquinone-novolac photoresist; ion implantation; attenuated total reflection; adhesion; silicon.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск 22030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Литография является одним из основных технологических процессов микроэлектроники. В качестве защитного светочувствительного материала (фоторезиста) в современной литографии

наибольшее распространение получили диазохинонноволачные (ДХН) резисты, представляющие собой композиты из фенолформальдегидных смол и нафтохинондиазида [1]. Модификация

структуры ДХН-резиста марки AZ-1350 J в области пробега R_p ионов с различной массой и, следовательно, с разным типом торможения, рассмотрена в работе [2]. Однако при применяемых в микроэлектронике энергиях пробег ионов существенно меньше толщины фоторезистивной пленки. Известно [3], что при ионной имплантации (ИИ) трансформация фоторезиста (ФР) может наблюдаться далеко за областью пробега ионов. Это может приводить к модификации физико-механических свойств по всей толщине пленки. Однако механизм трансформации при ИИ структуры ДХН-резистов за областью пробега ионов и, соответственно, изменения физико-механических свойств пленок ФР на Si, к настоящему времени окончательно не установлен.

Цель настоящей работы – изучение особенностей поведения структурных и оптических свойств пленок ДХН-резистов за областью пробега ионов при имплантации легкими и тяжелыми ионами.

Материалы и методы измерений. Пленки позитивного ДХН-резиста ФП9120 толщиной 1,8–5,0 мкм наносились методом центрифугирования на поверхность пластин кремния с ориентацией (100) и (111) [4]. Перед формированием пленки ФР кремниевые пластины подвергали стандартному циклу обработки поверхности в органических и неорганических растворителях. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону пластины проводилась сушка в течение 50–55 мин при температуре 88 °С. Имплантация ионами B^+ , P^+ и Sb^+ с энергией 60 кэВ в интервале доз $5 \cdot 10^{14}$ – $6 \cdot 10^{17}$ см⁻² в режиме постоянного ионного тока проводилась при комнатной температуре на имплантаторе «Везувий-6». Используемые режимы ионной имплантации широко применяются при производстве интегральных микросхем. Спектры НПВО структур резист-кремний в диапазоне $\nu = 400$ – 4000 см⁻¹ регистрировались при комнатной температуре ИК-Фурье спектрофотометром ALPNA (Bruker Optik GmbH). Разрешение составляло 2 см⁻¹, количество сканов – 24.

Эксперимент. В процессе имплантации легкими ионами B^+ и P^+ происходит интенсивная трансформация спектра НПВО, выражающаяся в перераспределении интенсивности полос плоскостных деформационных колебаний O–H связей и пульсационных колебаний углеродного скелета ароматических колец. Заметного разрушения или повреждения ароматических колец при ИИ за областью пробега ионов не наблюдается, однако изменяется состав их заместителей, что приводит к перераспределению интенсивности валентных колебаний. Наблюдалось также увеличение интенсивности и смещение в низкоэнергетичную полосу колебаний C=O связей, обусловленное удалением водорода в процессе имплантации,

которое приводит к возникновению упругих напряжений в пленке ФР и, соответственно, к увеличению длины указанных связей [3].

В процессе ИИ наблюдается слабое смещение в низкоэнергетичную область максимумов валентных колебаний C–H-связей и перераспределение интенсивностей между максимумами, обусловленными концевой метильной и метиленовой группами в пользу последней, что указывает на радиационное сшивание молекул новолачной смолы с участием радикалов, локализованных на концевых метильных группах. У полосы 1430–1455 см⁻¹, обусловленной валентными колебаниями ароматического кольца, связанными с CH_2 -мостиком, в процессе имплантации наблюдается перераспределение интенсивности между максимумами 1451 и 1433 см⁻¹, обусловленное образованием водородных связей по CH_2 -мостику. Образование сшивков способствует росту микротвердости пленки [4]. В результате радиационно-индуцированного деазотирования нафтахинондиазида и образования кетена в спектре ФР появлялись полосы с максимумами при 2151 и 2115 см⁻¹, обусловленные валентными колебаниями двойных кумулятивных связей [3].

Имплантация тяжелыми ионами Sb^+ приводила к более сильной, чем в случае легких ионов, радиационно-индуцированной модификации ФР за слоем внедрения. В спектре НПВО имплантированных Sb^+ пленок ФР появляется полоса при 2331 см⁻¹, обусловленная валентными колебаниями O=C=O. Наблюдалось интенсивное образование сшивков молекул обоих компонентов ФР, приводящее к сильному росту (почти на порядок) микротвердости пленки и резкому снижению ее адгезии к кремнию. Нарушение адгезии приводит к появлению в спектре НПВО полосы 610 см⁻¹, связанной с решеточным поглощением Si.

При ИИ действует несколько конкурирующих механизмов радиационно-индуцированных процессов в пленке ФР за областью пробега ионов, обусловленные разными механизмами торможения ионов – электронном, которое преобладает в случае легких ионов, и ядерным (в случае тяжелых ионов

В случае электронного торможения (ионы B^+ и P^+) основная доля потерь энергии ионов (около 80–90 %) приходится на процессы ионизации и возбуждения макромолекул полимера [3]. Энергия возбуждения может передаваться по цепочкам макромолекул. Если энергия возбуждения не превышает величину энтальпии гомолитической диссоциации самой слабой связи в фенолформальдегидной смоле, то эта избыточная энергия будет мигрировать на большие расстояния в полимерном компаунде. В этих условиях такое низкоэнергетичное излучение может передаваться на нафтохинондиазид, привитый к фенолфор-

мальдегидной смоле, с последующим деазотированием (перестройка Вульфа) и образованием кетена [3].

При ядерном торможении (тяжелые ионы Sb^{+}) происходят столкновения с ядрами мишени с образованием ядер отдачи (С, Н, О), которые способны вызвать деструкцию полимера за областью пробега имплантированных ионов. На большие расстояния энергия возбуждения способна в этом случае передаваться в виде упругих волн, которые отражаясь на различных неоднородностях/границах раздела будут вызывать модификацию структуры ФР и существенно влиять на его адгезию к кремнию. Следует учитывать наличие в пленке упругих напряжений, возникающих вследствие испарения растворителя при сушке. В процессе ИИ в зависимости от массы иона эти напряжения могут как компенсироваться, так и увеличиваться, приводя к накоплению деформации. При ИИ возникает также явление накопления электрического заряда в полимере, связанное с тем, что электроны, выбиваемые при ионизации полимера, стекают на границы раздела фаз. Они в основном накапливаются в припо-

верхностном слое кремния. При этом в полимере остаются имплантированные ионы и образовавшиеся в полимере катион-радикалы, что приводит к возникновению объемного заряда (разности потенциалов) на границе раздела фоторезист/кремний, который снижает адгезию ФР к кремнию.

Литература

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы : в 2-х ч. / У. Моро. – М.: Мир, 1990. – Ч. 2. – 632 с.
2. Garcia, I. T. S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac-diazoquinone films / I. T. S. Garcia, F. C. Zawislak, D. Samios // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228. – P. 63–76.
3. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов V^{+} / С. Д. Бринкевич и [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386.
4. Прочностные свойства структур фоторезист-кремний, γ -облученных и имплантированных ионами V^{+} и P^{+} / С. А. Вабищевич [и др.] // Вестник Полоцкого гос. университета, 2016. – № 12. – С. 30–36.

УДК 678.057.9

КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЬНО-ДОЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРОВ

Выдумчик С.В., Васильева В.С., Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены основные характеристики лабораторного комплекса для проведения учебно-научных работ по изучению влияния наноразмерных и мелкодисперсных добавок различной природы на процессы дозации, смешения и отверждения высоко реакционноспособных мономерных и олигомерных композиций при формировании полимерных композитов. Оборудование имеет широкий набор базовых функций, которые позволят полностью автоматизировать процессы дозирования и смешения многокомпонентных полимерных систем и получать для изучения лабораторные образцы и изделия высокого качества.

Ключевые слова: дозатор, смеситель, мультикомпонентные полимеры, реакционные системы.

THE CONCEPT OF CREATING A MULTIFUNCTIONAL MIXING AND DOSING DEVICE FOR OBTAINING LABORATORY SAMPLES FROM MULTICOMPONENT POLYMERS Vydumchik S., Vasilyeva V., Gavrilenko O., Gorokhov S., Pavlyukevich T., Ponaryadov V.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper presents the main characteristics of a laboratory complex for conducting educational and scientific work on the study of the effect of nanoscale and fine-dispersed additives of various nature on the processes of dosing, mixing and curing of highly reactive monomeric and oligomeric compositions during the molding of polymer composites. The equipment has a wide range of basic functions that will allow fully automating the processes of dosing and mixing of multicomponent polymer systems and obtaining laboratory samples and products of high quality for study.

Keywords: dispenser, mixer, multicomponent polymers, reaction systems.

*Адрес для переписки: Выдумчик С.В., лаборатория ФХПМ и ПОС НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: lab_dozator@mail.ru*

Принципы получения высокорекреационных поликонденсационных полимеров реализуют путем смешения в течение нескольких секунд двух взаимодействующих жидких композиций, после чего с высокими скоростями начинаются процессы поликонденсации, нарастания вязкости и отверждения композиции. Формование изделий начинается непосредственно после смешения реагентов и наступающего вслед за этим инициирования целой серии сложных химических реакций, приводящих в дальнейшем к росту полимерных молекул одновременно, а, следовательно, и изменению вязкоупругих свойств реакционной системы в целом.

Механизм образования полимера исключительно сложен. Полный цикл формирования композита может продолжаться 1–2 мин, жидкая фаза переходит в твердую, при этом изделие принимает конфигурацию, заданную поверхностями формы. Стабильность свойств и качество изделий достигается постоянством свойств компонентов, воспроизводимостью технологических параметров в каждом цикле, точным поддержанием требуемого соотношения компонентов, заданной интенсивностью смешения компонентов.

Большие скорости образования полимера затрудняют, а зачастую и не позволяют в ручном режиме быстро совместить, тщательно перемешать высокорекреационные химические компоненты, а так же отдозировать микродозы добавок и получить качественные лабораторные образцы изделий. Это обуславливает актуальность создания автоматизированной дозирующе-смесительной установки, использование которой значительно увеличит точность дозирования, высокие скорости смешения реакционноспособных систем в процессе изготовления различных экспериментальных образцов полимерных композиций с широким диапазоном соотношений реагентов и различной природой и количеством добавок [1, 2].

В основу работы комплекса положен принцип подачи дозированного количества жидких компонентов А, Б, С и наноразмерных или мелкодисперсных добавок в смесительную головку с динамическим перемешиванием. Процесс смешения компонентов осуществляется в проточной малогабаритной смесительной камере за счет механической энергии, благодаря высокой скорости вращения смесительного элемента.

Функционально комплекс состоит из следующих основных агрегатов: трех термобоксов, дозатора добавок, смесительного устройства, системы автоматической очистки смесительной камеры, комплекта пневмооборудования с компрессором, шкафа управления с персональным компьютером (рис. 1).

Все элементы комплекса расположены в вытяжном шкафу, предназначенном для удаления

газообразных продуктов выделяющихся при заправке и в процессе работы. Шкаф снабжен светодиодным светильником, выключателем светильника и брызгозащищенной розеткой, вытяжной вентилятор в комплект поставки не входит.



Рисунок 1 – Лабораторный смесительно-дозировочный комплекс

Управление работой комплекса и контроль параметров технологического процесса осуществляется с персонального компьютера. Заливки выполняются по заданной программе. Количество заливаемой смеси определяется временем открытия клапанов смесительного устройства, которое определяется программой автоматически исходя из заданной массы заливки.

Система управления обеспечивает комплексную автоматизацию при эксплуатации комплекса, задание и контроль технологических параметров, мониторинг состояния узлов и агрегатов с индикацией соответствующих сообщений на мониторе в режиме «реального времени», обеспечивает функцию дозирования компонентов в заданном соотношении, смешивание и заливку смеси, нагрев и контроль температуры компонентов в емкостях, перемешивание компонентов в емкостях, нагрев и контроль температуры дозирующих насосов, соединительных рукавов и смесительной головки, контроль давления в линиях нагнетания компонентов, регулировку частоты вращения ротора, автоматическую промывку камеры смешения с сушкой сжатым воздухом.

Электронный журнал обеспечивает визуализацию, обработку и хранение информации, содержащей установленные при работе параметры, а также телеметрические данные о процессе заливки.

Такое оборудование необходимо для учебных и научно-исследовательских лабораторий, занимающихся разработкой новых модифицированных материалов и технологий их производства.

Комплекс будет иметь широкий набор базовых функций, которые позволят полностью автоматизировать процессы дозирования и смешения многокомпонентных полимерных систем и

получать для изучения образцы и изделия высокого качества. Установка обеспечит:

- заливку смеси программируемыми дозами;
- высокую точность поддержания соотношения компонентов, что особенно важно для получения материалов с заданными свойствами;
- работу с быстрореагирующими системами;
- возможность введения в смесь различных мелкодисперсных наполнителей в разных программируемых пропорциях, что позволит разрабатывать новые гибридно-композитные материалы.

Установка будет оборудована малогабаритной проточной смесительной головкой роторного типа с плунжерными впускными клапанами и варьруемой скоростью вращения смесительного элемента, что позволит создать необходимую однородность композиции за счет равномерного распределения всех компонентов смеси за малый

промежуток времени. Влияние вредного воздействия компонентов на окружающую среду будет минимизировано за счет герметичной системы дозирования и смешения компонентов.

Литература

1. Ксенофонов, М. А. Создание эффективных наукоемких машин для производства различных изделий из полимерных композитов / М. А. Ксенофонов // Доклады НАН Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 2. – С. 7–12.

2. Создание и внедрение автоматизированных комплексов и технологических процессов производства ресурсосберегающих изделий из газонаполненных полимеров / М. А. Ксенофонов [и др.] // Тезисы докладов. Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2019), Гомель, 2019. – С. 143.

УДК 372

РАЗДАТОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ПО ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ

Гундина М.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье рассматриваются особенности разработки и использования раздаточного материала при организации образовательного процесса. В процессе работы с раздаточным материалом у студента усиливается мотивация к обучению, развивается наглядно-образное, теоретическое, логическое мышление. Также осуществляется процесс формирования культуры учебной деятельности, информационной культуры общества, активизируется взаимодействием интеллектуальных и эмоциональных функций при совместном решении исследовательских задач. Для примера представлены методические разработки по теме «Решение дифференциальных уравнений».

Ключевые слова: раздаточный материал, математика, образовательный процесс.

HANDOUTS FOR HIGHER MATHEMATICS FOR STUDENTS OF ENGINEERING SPECIALTIES

Hundzina M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. This article discusses the features of the development and use of handouts in the organization of the educational process. In the process of working with handouts, the student's motivation for learning increases, visual-figurative, theoretical, logical thinking develops. Also, the process of forming a culture of educational activity, information culture of society is carried out, it is activated by the interaction of intellectual and emotional functions in the joint solution of research problems. For example, methodological developments on the topic "Solving differential equations" are presented.

Key words: handouts, mathematics, educational process.

*Адрес для переписки: Гундина М.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: hundzinama@bntu.by*

Математическая подготовка является неотъемлемой частью системы высшего технического образования. Полноценное развитие мышления современного инженера невозможно без формирования его логической культуры.

Математическая подготовка позволяет сформировать у студента навыки логического анализа представленной ситуации, умение ана-

лизировать причинно-следственные связи, умение работать с определениями и абстрактными понятиями, умение анализировать, обобщать, выделять частное и общее, навыки рационального мышления.

В процессе изучения математики будущий инженер сталкивается с задачами прикладной математики, элементами аналитической геомет-

рии, методикой построения графиков явных и неявных функций, дифференцированием, решением дифференциальных уравнений, анализом реальных данных, представленных в различной форме.

Математике на первых курсах университета отводится значительное количество часов. В этом случае высшая математика выступает как особая образовательная дисциплина, так как является фундаментом для изучения других общеобразовательных, инженерных и специальных дисциплин, что позволяет создать межпредметные связи. Однако в последнее время наблюдается тенденция сокращения часов, отводимых на изучение математики. Поэтому представление учебного материала студентом требует тщательного отбора, сокращения, адаптации и выбора формы изложения материала.

Поэтому разработка необходимых раздаточных материалов по математическим дисциплинам является актуальной задачей. Дефицит доступной студентам актуальной и корректной информации приводит к неполной реализации требований учебных программ дисциплин, в том числе в отношении результатов освоения дисциплин. Возникает необходимость в разработке специальных раздаточных материалов, предназначенных для самостоятельной работы студентов в ходе реализации поставленных перед ними задач.

Известно, что раздаточный материал – это разновидность наглядных материалов, использование которых способствует активизации познавательной деятельности студентов, экономии учебного времени.

Также под раздаточным материалом будем понимать материалы, созданные на базе информационных технологий, раздаваемые студентам для самостоятельной работы на аудиторных занятиях.

В процессе работы с раздаточным материалом у студента усиливается мотивация обучения, происходит развитие наглядно-образного, теоретического, логического мышления. Осуществляется процесс формирования культуры учебной деятельности, информационной культуры общества, активизируется взаимодействие интеллектуальных и эмоциональных функций при совместном решении исследовательских задач.

При создании раздаточного материала (на примере темы «Решение дифференциальных уравнений») необходимо учитывать достижение следующих целей:

- рассказать об основных определениях, необходимых для решения задач;
- ознакомить с видами объектов (например, типами дифференциальных уравнений);
- акцентировать внимание на различии свойств или содержания объектов (различие между внешним видом уравнений);

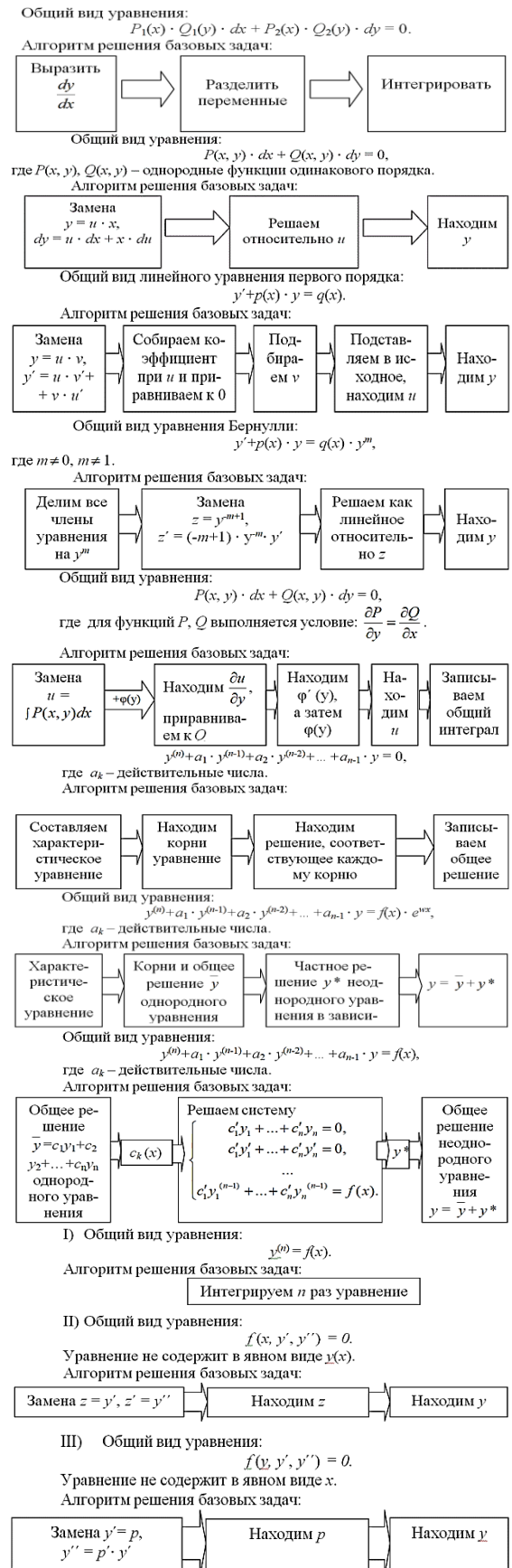


Рисунок 1 – Раздаточный материал по теме «Дифференциальные уравнения»

- создать условия для применения студентами знаний и умений в знакомой обстановке и новых учебных ситуациях;
- воспитать интерес к учебной дисциплине «Математика»;
- навыки работы в коллективе, малых группах и самостоятельно с раздаточным материалом;
- развитие умений выделять главное;
- умение грамотно, четко, кратко излагать мысли;

- развитие умения оперировать ранее полученными знаниями;
- формирование и развитие у студентов познавательных способностей.

Рассмотрим некоторые возможные варианты внешнего вида раздаточного материала по теме «Дифференциальные уравнения» (рис. 1).

Разработка раздаточных материалов способствует достижению наиболее полной результативности образовательного процесса.

УДК 004

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ В WOLFRAM MATHEMATICA

Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Юхновская О.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрены возможности разработки и применения алгоритмов сегментации изображений, полученных с помощью промышленного оборудования, в условиях производства, имеющего специфику. На примере снимка коронавируса проиллюстрировано автоматическое определение границ компонентов и отображение их на изображении в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Ключевые слова: компоненты изображения, сегментация изображения, алгоритм сегментации изображения.

DEFINING IMAGE COMPONENTS IN SYSTEM WOLFRAM MATHEMATICA

Hundzina M., Kondratieva N., Yukhnovskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. The article considers the possibilities of developing and applying algorithms for segmentation of images obtained using industrial equipment in production conditions that have specific characteristics. Using the example of a image of coronavirus, the automatic determination of the boundaries of components and their display on the image in the Wolfram Mathematica computer system is illustrated.

Keywords: image components, image segmentation, image segmentation algorithm.

*Адрес для переписки: Кондратьева Н.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kondratyeva@bntu.by*

Качественный контроль производимой продукции часто выполняется автоматическими методами анализа изображения [1]. При обработке таких изображений решается большой круг задач, таких как улучшение качества изображений; измерение числовых характеристик; распознавание областей интереса, сжатие изображений и др.

Современные устройства формирования изображений позволяют решать комплекс технических и научных задач [2–4], требующих синтеза и анализа методов обработки, бинаризации, классификации изображений, применение машинного обучения.

Развитие микроэлектроники позволяет повысить сложность применяемых алгоритмов для решения прикладных задач. В зарубежной и отечественной литературе [5–7] приводится большой класс алгоритмов обработки цифровых изображений, который может быть применен для решения задач производства, приводится набор актуальных

вопросов сегментации, распознавания образов, описания и представления деталей, морфологического анализа изображения [6–7]. Многие из этих алгоритмов предназначены для решения научных задач. В то же время, существует необходимость в разработке алгоритмов, которые можно использовать в условиях конкретного производства, имеющего свою специфику, таких алгоритмов, которые будут полезны инженерам в современных условиях.

Сегментация изображений, полученных промышленным оборудованием, в наше время находит широкое применение во многих сферах человеческой деятельности. Методы обработки изображений применяются в промышленности (изображения, полученные атомно-силовыми микроскопами). Также они нашли свое применение в физике и механике (изображения, полученные электронными микроскопами). В современной медицине не обходятся без обработки изображений специалисты, работающие с изоб-

ражениями, полученными рентгеновскими аппаратами, томографами. Методы цифровой обработки изображений применяются при управлении технологическими процессами, автоматизации обнаружения и распознавании объектов различной природы, при дефектоскопии.

Сегментация позволяет упростить представление изображения, чтобы его было проще и легче анализировать. Используется для выделения объектов и границ на изображениях (рис. 1). В том числе, активно применяется на промышленных предприятиях.

Выбор метода обработки изображения зависит от сложности решаемой задачи, а также знаний и опыта специалиста. Для работы с определенным классом изображений применяется соответствующий алгоритм. Однако большинство алгоритмов сегментации имеют в своей основе схожую идею – нахождение соответствий или различий в характеристиках пикселей. Характеристиками могут являться их расположение, цвет, яркость и текстура.

В данной статье рассматривается пример применения компьютерной системы Wolfram-Mathematica для автоматического определения границ компонентов и отображения их на изображении.

Под компонентом понимается бинарное изображение, содержащее множество связанных точек, т.е. множество, состоящее из всех тех точек, между любыми двумя из которых существует связывающий их путь. Будем считать две точки изображения связными, если существует путь между ними, вдоль которого характеристическая функция постоянна.

Известно, что сегментация делит изображение на его составные части и объекты. Например, при осуществлении автоматического контроля при сборке узлов аппаратуры важно уметь выявлять определенные дефекты или отсутствие компонентов, наличие разрывов контактных дорожек на плате.

Исходное изображение представлено на рис. 1.

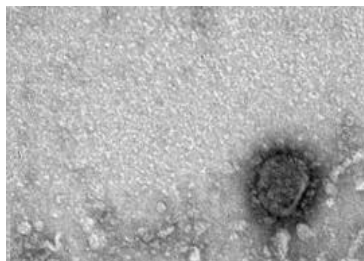


Рисунок 1 – Исходное изображение коронавируса, полученное микроскопом [8]. Определены и подсвечены структурные компоненты с помощью следующей команды: `MorphologicalComponents [Binarize[t1,0.3], Method->"Nested"] // Colorize`

Результат работы этой команды представлен на рис. 2.



Рисунок 2 – Выделенные компоненты изображения

Границы компонентов можно определить с помощью функции `MorphologicalPerimeter` (рис. 3).



Рисунок 3 – Результат выполнения функции `MorphologicalPerimeter`

После определения границ необходимо удалить малые компоненты. `DeleteSmallComponents [MorphologicalPerimeter [Binarize[t1]]]`.

Выделение цветом элемента можно выполнить с помощью следующей команды:

`t2=Colorize [MorphologicalComponents [Binarize [EntropyFilter[s2,1]]]]`.

Комбинация изображений представлена на рис. 4.



Рисунок 4 – Результат определения компонента

Метод сегментации также применяется для обнаружения опухолей, определения объемов тканей, в диагностике и изучении анатомической структуры.

Литература

1. Blanchet, G. Digital signal and image processing using Matlab / G. Blanchet, M. Charbit. – London : ScienceEurope, 2001. – 764 p.
2. Breton, V. The Healthgrid White Paper / V. Breton // Studies in Health Technology and Informatics, 2005. – Vol. 112. – P. 249–318.
3. Мирошников, М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов / М. М. Мирошников. – СПб.: «Лань», 2010. – 704 с.
4. Gonzalez, R. C. Digital Image Processing / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – New Jersey : Prentice Hall, Upper Saddle River, 2002. – 797 p.

5. Bribiesca, E. A chain code for representing 3-D curves / E. Bribiesca // Pattern Recog, 2000. – Vol. 33, №. 5. – P. 755–765.

6. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2006. – 616 с.

7. Рудаков, П. И. Обработка сигналов и изображений. MATLAB 5.x / П. И. Рудаков, И. В. Сафонов. – М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2000. – 416 с.

8. PublicHealth [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://phil.cdc.gov/Details.aspx?pid=189>. – Дата доступа: 07.08.2021.

УДК539

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА, ПОДВЕРЖЕННОГО ДАВЛЕНИЮ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ

Гундина М.А., Юхновская О.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной статье рассматривается решение задачи определения напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра, подверженного внутреннему и внешнему давлению, реализованные в компьютерной системе WolframMathematica.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, толстостенный цилиндр, метод конечных элементов.

SIMULATION OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF A CYLINDER UNDER PRESSURE IN PLASTIC CASE

Hundzina M., Yuhnovskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. This article discusses the solution to the problem of determining the stress-strain state of a thick-walled cylinder subject to internal and external pressure, implemented in the Wolfram Mathematica computer system.

Key words: stress-strain state, thick-walled cylinder, finite element method.

*Адрес для переписки: Юхновская О.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: juhnovskaja@bntu.by*

Исходя из опыта эксплуатации и проведенных исследований, основными факторами, определяющими долговечность цилиндрических изделий, можно назвать следующие: внешние механические нагрузки; нагрузки, связанные с совершением рабочего цикла; воздействие рабочей и окружающей среды; длительная эксплуатация и хранение этих изделий [1].

Поэтому моделирование напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров представляет значительный интерес сточки зрения обеспечения работоспособности конструкции. Проведены исследования данной тематики в отечественной и зарубежной литературе. В исследованиях Куликова И.С. и Ширвеля П.И. рассмотрен случай неосесимметричного НДС однородного бесконечно длинного, сплошного цилиндра, находящегося в температурном поле T и подвергающегося действию радиационного распухания и внешнего давления. Разработана схема численного решения данной задачи в перемещениях, с дальнейшим построением тензоров деформаций и напряжений в любой точке по периметру цилиндра [2]. В статье Бульбовича Р.С. определено напряженно-деформированное состояние ортотропного упругопластического тела метода конеч-

ных элементов на примере толстостенной трубы, нагруженной внутренним давлением [3]. В статье Зайцева В.Ю. и Порунова Д.С. приведена оценка напряжения и перемещения во внутреннем объеме цилиндрических изделий под воздействием различных механических нагрузок [1].

В работе Сало В.А. предлагает использование RVR-метода для решения пространственной задачи о напряженно-деформированном состоянии толстостенного цилиндра, который находится под действием статической нагрузки при различных граничных условиях на торцах [4].

Рассмотрим цилиндр с внутренним радиусом R_1 (0,8 мм) и внешним радиусом R_2 (3,8 мм). Высота цилиндра составляет 10 мм. Пусть на этот цилиндр действует внутреннее давление P_i и внешнее давление P_0 . Эту задачу можно рассматривать как случай плоского напряжения ($\sigma_z = 0$) либо как случай плоской деформации ($\varepsilon_z = 0$).

Рассмотрим концы цилиндра, которые могут свободно расширяться. Пусть $\sigma_z = 0$. За счет равномерной радиальной деформации τ_n , σ_φ и σ_r обозначают касательные и радиальные напряжения, действующие перпендикулярно сторонам элемента (рис. 1).

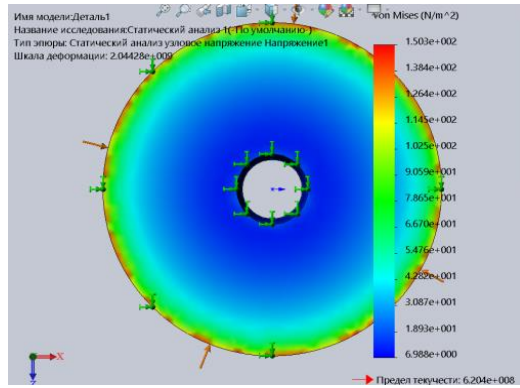


Рисунок 1 – Схема нагружения цилиндра в случае действия P_0

Для упругопластического сплошного цилиндра имеем компоненты вектора приращений:

$$u_r(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} U_n(\varphi) r^{\lambda_n}, \quad u_\varphi(r, \varphi) = \sum_{n \geq 0} V_n(\varphi) r^{\lambda_n}.$$

Соотношения Коши в полярной системе координат имеют вид:

$$\varepsilon_{rr} = u_{r,r} = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n U_n r^{\lambda_n - 1},$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{u_{\varphi,\varphi}}{r} + \frac{u_r}{r} = \sum_{n=0}^{\infty} (V_n' + U_n) r^{\lambda_n - 1},$$

$$\varepsilon_{r\varphi} = \frac{1}{2} (u_{\varphi,r} + u_{r,\varphi} / r - u_\varphi / r) = \frac{1}{2} \sum_{n=0}^{\infty} (\lambda_n V_n + U_n' - V_n) r^{\lambda_n - 1}$$

где ε_{rr} , $\varepsilon_{r\varphi}$, $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ – физические проекции компонент тензора деформаций; u_r , u_φ – компоненты вектора перемещений.

Скорость будем определять следующим образом:

$$\frac{df}{dt} = \frac{\partial f}{\partial t} - v \left(\cos \phi \frac{\partial f}{\partial r} - \frac{\sin \phi}{r} \frac{\partial f}{\partial \phi} \right),$$

где v – скорость роста трещины.

Запишем соотношения теории течения, которые описывают зависимость между компонентами девиаторов деформаций и напряжений при $i, j = r, \varphi$ [5]:

$$s_{rr} = 2G_0 \dot{\varepsilon}_{rr} - p(E) \dot{E} \varepsilon_{rr},$$

$$s_{r\varphi} = 2G_0 \dot{\varepsilon}_{r\varphi} - p(E) \dot{E} \varepsilon_{r\varphi},$$

$$s_{\varphi\varphi} = 2G_0 \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi} - p(E) \dot{E} \varepsilon_{\varphi\varphi},$$

где s_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – приращения компонент девиаторов напряжений и деформаций.

$E = \varepsilon_{rr}^2 - \varepsilon_{rr} \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{\varphi\varphi}^2 + 3\varepsilon_{r\varphi}^2$ – функция интенсивности деформаций;

$$p(E) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n E^n.$$

Рассмотрим представление среднего напряжения также в виде асимптотического разложения в следующем виде:

$$\sigma = \sum_{n \geq 0} W_n(\varphi) r^{\lambda_n - 1},$$

Запишем необходимые уравнения равновесия в полярной системе координат для плоской задачи:

$$\frac{\partial \dot{\sigma}_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\sigma}_{r\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} (\dot{\sigma}_{rr} - \dot{\sigma}_{\varphi\varphi}) = 0,$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{\sigma}_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + \frac{\partial \dot{\sigma}_{r\varphi}}{\partial r} + 2 \frac{\dot{\sigma}_{r\varphi}}{\partial r} = 0,$$

$$u_\varphi = 0 \text{ при } r = 0, \quad \sigma_r = -P \text{ при } r = R.$$

Литература

1. Зайцев, В. Ю. Модели напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров / В. Ю. Зайцев, Д. С. Порунов. – Научно-методический электронный журнал «Концепт». – 2014. – Т. 20. – С. 1771–1775.
2. Ширвель, П. И. О неосесимметричном НДС неравномерно нагретого длинного сплошного цилиндра, подверженного нейтронному облучению / П. И. Ширвель, И. С. Куликов // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; под ред. Б. М. Хрусталева. – Минск : БНТУ, 2009. – Вып. 24, т. 1. – С. 184–189.
3. Бульбович, Р. В. Расчет напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра из ортотропного упругопластического материала при помощи модифицированного метода переменных параметров упругости с использованием метода конечных элементов / Р. В. Бульбович, В. В. Павлоградский, П. П. Еременко. – Пермь : Пермский национальный политехнический университет, 2015. – Т. 1. – С. 75–77.
4. Сало, В. А. Расчет напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра при различных граничных условиях на его торцевых поверхностях / В. А. Сало. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2004. – № 3. – С. 43–47.
5. Trifan, D. A new theory of plastic flow / D. Trifan // Quarterly of Applied Mathematics. – 1949. – No. 7. – P. 201–211.

УДК 539

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА, ПОДВЕРЖЕННОГО ДАВЛЕНИЮ В УПРУГОМ СЛУЧАЕ

Гундина М.А., Юхновская О.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье рассматривается решение задачи определения напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра, подверженного внутреннему и внешнему давлению, реализованные в компьютерной системе WolframMathematica.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, толстостенный цилиндр, метод конечных элементов.

SIMULATION OF THE STRESS-DEFORMED STATE OF A CYLINDER UNDER PRESSURE IN ELASTIC CASE

Hundzina M., Yuhnovskaya O.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. This article discusses the solution to the problem of determining the stress-strain state of a thick-walled cylinder subject to internal and external pressure, implemented in the Wolfram Mathematica computer system.

Key words: stress-strain state, thick-walled cylinder, finite element method.

Адрес для переписки: Юхновская О.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: juhnovskaja@bntu.by

Задача об исследовании разрушения той или иной конструкции часто является нелинейной и остается сложной и малоизученной. Рассмотрим решение упругой задачи определения напряженно-деформированного состояния толстостенного цилиндра, подверженного внутреннему и внешнему давлению, реализованные в компьютерной системе Wolfram Mathematica.

Известно, что цилиндр следует считать толстостенным, если толщина его стенки больше одной десятой среднего радиуса цилиндра. Двумя сечениями, перпендикулярными к оси цилиндра и находящимися друг от друга на расстоянии, вырежем кольцо (рис. 1).

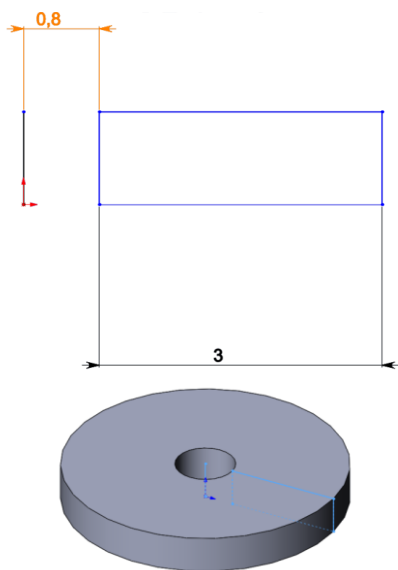


Рисунок 1 – Исходный вид цилиндра

Рассмотрим концы цилиндра, которые могут свободно расширяться. Пусть $\sigma_z = 0$. За счет равномерной радиальной деформации τ_r , σ_θ и σ_r обозначают касательные и радиальные напряжения, действующие перпендикулярно сторонам элемента.

Поскольку r – единственная независимая переменная, приведенное выше уравнение можно записать как

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \left(\frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r}\right) = 0,$$

$$\frac{d}{dr}(r\sigma_r) - \sigma_\theta = 0.$$

Из закона Гука

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta), \varepsilon_\theta = \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r).$$

Деформация элемента симметрична относительно оси и поэтому вызовет радиальные перемещения всех точек цилиндра. Пусть u – радиальное перемещение цилиндрической поверхности радиуса r . Абсолютное радиальное удлинение элемента dr будет равно du , а относительное удлинение:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}.$$

Относительное удлинение в тангенциальном направлении на радиусе r

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}.$$

В случае двухстороннего растяжения, которому подвергается рассматриваемый элемент,

согласно закону Гука, напряжения и деформации связаны между собой следующими зависимостями:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta),$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r).$$

Подставляя их в уравнение равновесия:

$$\frac{d}{dr}\left(r \frac{du}{dr} + \nu u\right) - \left(\frac{u}{r} + \nu \frac{du}{dr}\right) = 0,$$

$$\frac{du}{dr} + r \frac{d^2u}{dr^2} + \nu \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} - \nu \frac{du}{dr} = 0,$$

или

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0.$$

Вышеприведенное уравнение называется уравнением равномерного радиального смещения. Решение вышеуказанного уравнения:

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r},$$

где C_1 и C_2 – постоянные.

Следовательно,

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[C_1(1+\nu) - C_2 \left(\frac{1-\nu}{r^2} \right) \right],$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[C_1(1+\nu) + C_2 \left(\frac{1-\nu}{r^2} \right) \right].$$

Константы определяются из граничных условий, когда

$$\begin{aligned} r = a, & \quad \sigma_r = -p_i, \\ r = b, & \quad \sigma_r = -p_0. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\sigma_r = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_r + \nu\varepsilon_\theta),$$

$$\sigma_\theta = \frac{E}{(1-\nu^2)}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_r).$$

Значит

$$\sigma_r = \left(\frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{(b^2 - a^2)} \right) - \left(\frac{(p_i - p_0) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r^2} \right),$$

$$u = \left(\frac{1-\nu}{E} \right) \frac{(a^2 p_i - b^2 p_0) r}{(b^2 - a^2)} + \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \frac{(p_i - p_0) a^2 b^2}{(b^2 - a^2) r}.$$

График компонента напряжения σ_r представлен на рис. 2.

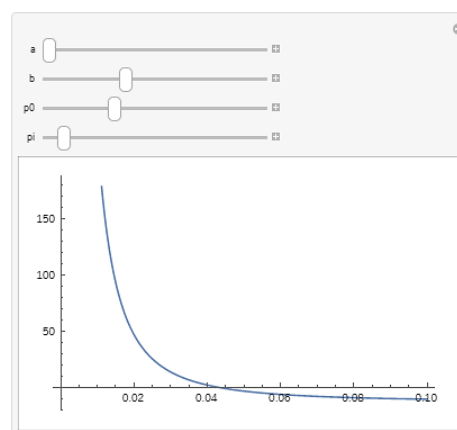


Рисунок 2 – График компонента напряжения σ_r

В условиях квазистатического нагружения разрушение цилиндра происходит в результате развития трещины, распространяющейся в радиальном направлении от внутренней поверхности. Длина участка устойчивого роста трещины оказывается сопоставимой с толщиной цилиндра, поэтому анализ его прочности должен основываться на представлениях механики разрушения. При этом необходимо учесть возможность пластического деформирования.

УДК. 539.216; 539.22

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА Al-Si ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ Гусакова О.В.¹, Шепелевич В.Г.², Гусакова С.В.²

¹Международный государственный экологический институт им. А.Д.Сахарова БГУ

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования микроструктуры силуминов околоэвтектического состава, полученных при скоростях охлаждения расплава 10^2 К/с и 10^5 К/с. Показано, что повышение скорости затвердевания до 10^5 К/с не приводит к смещению точки эвтектики. Сплав, с концентрацией Si 12,5 мас. % содержит первичные дендриты α -Al, при концентрации кремния 13,6 мас.% наблюдаются первичные кристаллы Si. При высокоскоростном затвердевании наименьший объем фазы α -Al при концентрации Si 12,7 мас.%, что соответствует эвтектике при равновесном затвердевании.

Ключевые слова: алюминий, кремний, эвтектика, высокоскоростное затвердевание.

DETERMINATION OF EUTECTIC COMPOSITION OF Al-Si ALLOY AT HIGH SPEED SOLIDIFICATION

Gusakova O.¹, Shepelevich V.², Husakova S.²

¹International Sakharov Environmental Institute BSU

²Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. The results of the study of the microstructure of the silumins of the near-eutectic composition produced at the cooling rates of the melt 10^2 K/s and 10^5 K/s are presented. It is shown that increasing the rate of solidification to 10^5 K/s does not lead to shift of the eutectic point. Alloy, with a concentration of Si 12.5 wt. % Contains primary dendrites α -Al, at a concentration of silicon 13.6 wt.% primary Si crystals are observed. At rapid solidification, the lowest volume of the α -Al phase observed at a concentration of Si 12.7 wt.%, which corresponds to eutectics at equilibrium solidification.

Key words: aluminum, silicon, eutectic, high speed solidification.

Адрес для переписки: Гусакова С.В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: husakova@bsu.by

Сплавы Al-Si отличаются рядом хороших эксплуатационных свойств. Механические свойства силуминов зависят от их состава и микро-структуры, в частности от размеров частиц кремния, для измельчения которого наиболее перспективным считается повышение скорости охлаждения расплава, в том числе при высокоскоростном затвердевании [1]. Существуют работы, в которых указывается, что повышение скорости кристаллизации, а также дополнительное легирование приводит к смещению эвтектической концентрации в сторону более тугоплавкого кремния [2]. Ранее было показано, что большое влияние на характеристики плавления силуминов, полученных высокоскоростным затвердеванием, оказывает легирование медью [3]. При концентрации меди выше 1,3 мас. % температура плавления эвтектического сплава возрастает. Цель настоящей работы исследование влияния скорости охлаждения расплава на микро-структуру близкого по составу к эвтектическому силумина, дополнительно легированного медью.

В работе исследовались сплавы, полученные при средней скорости охлаждения расплава 10^2 и 10^5 К/с. Скорость охлаждения массивных образцов 10^2 К/с достигалась при затвердевании расплава в графитовой изложнице. Фольга толщиной 50–70 мкм получалась методом сверхбыстрой закалки при скорости охлаждения расплава 10^5 К/с. Составы исследуемых сплавов их составы приведены в табл. 1.

Таблица 1. Концентрация элементов в сплавах.

Название сплава	Концентрация, мас. %			
	Al	Si	Cu	Fe
Сплав 1	86,1	12,5	1,2	0,2
Сплав 2	85,9	12,7	1,2	0,2
Сплав 3	85,4	13,6	1,1	0,2

Согласно равновесной диаграмме состояния сплав 1 является доэвтектическим, сплав 2

наиболее близок к эвтектическому, сплав 3 имеет заэвтектический состав.

Общий вид микроструктуры доэвтектического сплава 1 в сечении массивного образца и фольги приведен на рис. 1, а и б. В массивном образце кристаллизация протекает с образованием первичных дендритов твердого раствора на основе α -Al (темные участки). Размеры дендритов достигают 100 мкм, размеры боковых ветвей составляют 10–20 мкм, расстояние между боковыми ветвями находится в пределах 2–5 мкм. В массивном образце интерметаллические выделения располагаются как по границам ветвей дендритов так и в междендритном пространстве.

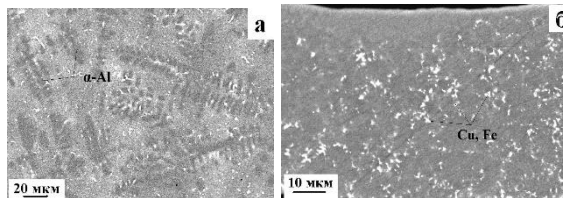


Рисунок 1 – Микроструктуры массивного образца и фольги сплава 1

В микроструктуре фольги выявляются темные участки, оконтуренные светлыми включениями, которые состоят из интерметаллических соединений AlSiCu, AlSiFe и AlSiCuFe.

В заэвтектическом сплаве, содержащем 13,6 мас. % Si первичный кремний присутствует как в массивном образце, так и в фольге, как показано на рис. 2. Повышение скорости охлаждения расплава приводит к измельчению среднего размера частиц первичного Si от 26 мкм до 2,3 мкм, а также к изменению формы частиц от пластинчатой к равноосной.

Методом рентгеноспектрального микроанализа определены средние значения концентрации элементов в ветвях дендрита α -Al и в междендритном пространстве. Результаты исследования приведены в табл. 2.

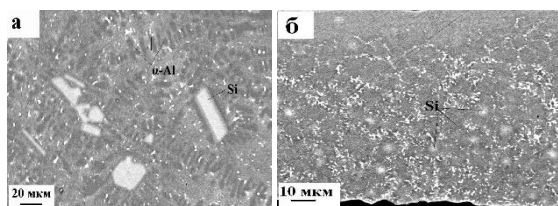


Рисунок 2 – Микроструктуры массивного образца (а) и фольги (б) сплава 2

Таблица 2. Концентрация элементов в дендритах и междендритном пространстве

Сплавы	Концентрация элементов в α -Al, мас. %					
	Массив			Фольга		
	Al	Si	Cu	Al	Si	Cu
1	97,8	1,8	0,3	97,4	2,3	0,5
2	97,7	1,9	0,3	97,5	2,2	0,4
3	9,8	1,8	0,4	97,5	2,1	0,4
	Концентрация элементов в междендритном пространстве, масс. %					
	Al	Si	Cu	Al	Si	Cu
1	82,0	17,1	0,8	82,2	16,9	0,9
2	82,2	17,0	0,7	81,9	17,3	0,8
3	82,1	17,2	0,6	82,1	16,9	1,3

Показано, что при скоростях охлаждения расплава 10^2 и 10^5 К/с растворимость Si в Al составляет 1,8 и 2,2 мас. %, соответственно. Обнаружено, что независимо от скорости охлаждения расплава и от концентрации Si в исходном сплаве его содержание в междендритном пространстве составляет около 17 мас. %.

На рис. 3 приведены карты распределения кремния в фольге сплавов 1, 2 и 3 (а, б и в, соответственно). Установлено, что в сплаве 3, содержащем 13,6 мас. % Si, присутствуют частицы первичного кремния, участки α -Al, а также области смеси пластин Al и Si. Различие в микроструктуре доэвтектического и эвтектического сплавов заключается в уменьшении объемной доли дендритов первичного α -Al и увеличении объемной доли междендритного пространства, представляющего собой смесь пластин алюминия и кремния. Размер пластин кремния в междендритном пространстве слабо зависит от состава сплава, средняя длина пластин составляет 2–3 мкм, а их ширина не превышает 200 нм.

УДК 620.179.14

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРУТКОВ АРМАТУРЫ ПРИ ОДНОПОЛЮСНОМ И ДВУХПОЛЮСНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ ПОСТОЯННЫМ ПОЛЕМ МАГНИТОВ

Гусев А.П., Загорский И.Е., Полоневич А.А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Выполнено экспериментальное исследование магнитного поля стальных прутков при однополюсном и двухполюсном намагничивании. Получены зависимости магнитной индукции B поля рассеяния от диаметра d прутков в пределах 6–19 мм и от расстояния h между прутком и намагничивающей системой в пределах 2–20 см. Показано, что модуль $|B|$ и степень локализации магнитного поля прутков при однополюсном намагничивании выше, чем при двухполюсном.

Ключевые слова: намагничивание прутков, магнитное поле.

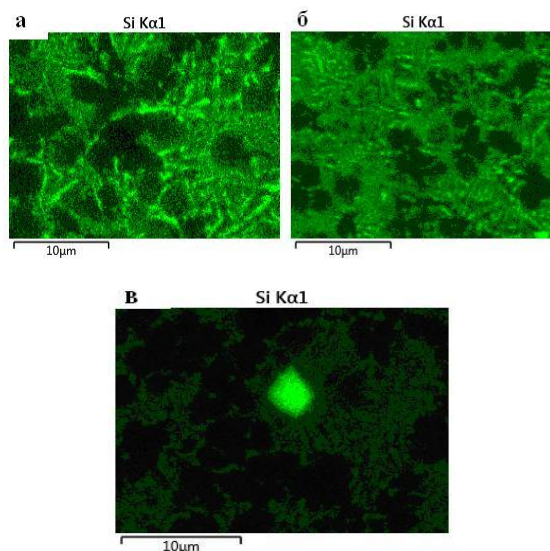


Рисунок 3 – Микроструктура и карта распределения кремния в фольге сплавах 1, 2 и 3

В результате проведенных исследований установлено, что повешение скорости охлаждения расплава до 10^5 К/с не приводит к существенному изменению концентрации компонент эвтектического состава. Микроструктура фольги эвтектического сплава, легированного медью обладает наименьшим объемом фазы α -Al.

Литература

1. Марукович, Е. И. Основные проблемы литья силуминов. Пути решения / Е. И. Марукович, В. Ю. Стеценко / Литье и металлургия. – 2016. – № 3. – С. 28–30.
2. Wang, S. Microstructure and Mechanical Properties of Al–12.6Si Eutectic Alloy Modified with Al–5Ti Master Alloy / Shuo Wang [et al.] // Adv. Eng. Mater. – 2017. – P. 1700495–1700500.
3. Влияние меди на микроструктуру и механические свойства силуминов / О. В. Гусакова [и др.] // Приборостроение–2019 : материалы 12 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2019 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 281–283.

CHARACTERISTICS OF THE MAGNETIC FIELD OF VALVE BARS AT ONE-POLE AND TWO-POLE MAGNETIZATION BY A CONSTANT FIELD OF MAGNETS

Gusev A., Zahorski I., Polonevich A.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. An experimental study of the magnetic field of steel bars with unipolar and bipolar magnetization has been carried out. The dependences of the magnetic induction B of the stray fields on the diameter d of the rods within 6–19 mm and on the distance h between the bar and the magnetizing system within 2–20 cm are obtained. It is shown that the modulus $|B|$ and the degree of localization of the magnetic field of the rods with one-pole magnetization is higher than with two-pole.

Key words: bar magnetization, magnetic field.

*Адрес для переписки: Гусев А.П., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: gusevap@iaph.bas-net.by*

С использованием магнитного метода [1, 2] разработаны и применяются приборы для контроля толщины h защитного слоя бетона или диаметра d прутков арматуры строительных конструкций, например: Profometer PM-600 [3] и PM-630/650 [4]; Elcometer Protovale 331 [5]; Profoskope [6]; ИПА-МГ4 [7]; ПОИСК-2.5 и 2.6 [8]; Rebar Locator TC100/TC110 [9] и другие.

Применение по назначению существующих измерителей возможно в случаях, если известен один из определяемых параметров, который обычно получают из проектной документации на контролируемый объект. Данное ограничение обусловлено применяемым однопараметровым методом измерений.

Более полным решением проблемы является метод, основанный на одновременном измерении двух характеристик вторичного магнитного поля. Физическим обоснованием двухпараметрового метода может служить независимость пространственного распределения индукции B магнитного диполя от величины его магнитного момента M . Поэтому пространственное распределение индукции поля рассеяния в зоне измерений определяется расстоянием h до магнитного диполя (при его фиксированной ориентации), а значение $|B|$ – расстоянием h и величиной M .

С использованием данных особенностей взаимосвязи расположения намагничиваемых тел и характеристик их магнитного поля рассеяния предложены два метода измерения параметров армирования железобетонных конструкций. В [10] показано, что по результатам регистрации распределения тангенциальной составляющей магнитного поля (метод экстремальных точек) возможно определение величины h толщины защитного слоя бетона, независимо от диаметра прутков, и с учетом полученного значения h – определение диаметра d прутков. В [11] предложен метод градуировочных сеток одновременного определения параметров армирования d и h по результатам изме-

рения в двух точках пространства напряженности поля рассеяния намагниченного прутка.

Однако, следует отметить, что достижение наилучших характеристик по чувствительности проектируемых средств контроля к параметрам d и h в значительной степени зависит от способа намагничивания прутков.

В связи с этим выполнены экспериментальные исследования пространственного распределения магнитного поля рассеяния прутков различных сталей при локальном однополюсном и двухполюсном намагничивании постоянным полем магнитов.

Экспериментальная модель (рис. 1) содержит пруток 1, намагничивающую систему 2 из двух наборов постоянных магнитов, расположенных вдоль прутка, и измерительный преобразователь 3. Магниты при однополюсном намагничивании одинаковыми полюсами повернуты в одну сторону, при двухполюсном намагничивании – в противоположные.

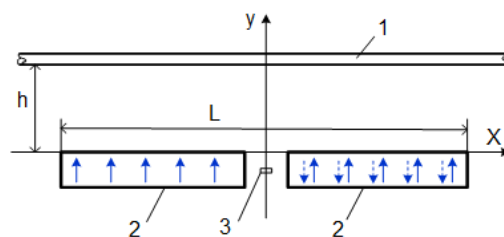


Рисунок 1 – Экспериментальная модель

Преобразователь в процессе измерений перемещается в плоскости YOZ параллельно оси OZ. При однополюсном намагничивании (длина намагничивающей системы L и $2L$) измерена составляющая B_y индукции магнитного поля намагничиваемого прутка, при двухполюсном намагничивании – составляющая B_x . На рис. 2 представлена зависимость средних значений B_y и B_x по набору прутков различного диаметра от их расстояния h до намагничивающей системы.

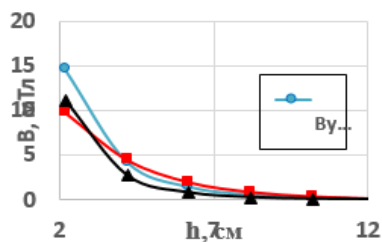


Рисунок 2 – Зависимость от h индукции магнитного поля рассеяния прутков при двух способах намагничивания. L – длина намагничивающей системы

Объяснение характеристик кривых на рис. 2 возможно на основе принципа суперпозиции магнитных полей. Намагниченность любого тела можно представить как одного или суммы нескольких магнитных диполей. Намагниченность прутка в неоднородном поле характеризуется поперечной и продольной составляющими, которые, с учетом принципа суперпозиции, можно считать поперечными и продольными магнитными диполями. При однополюсном поперечном намагничивании (рис. 1) намагниченность прутка имеет центральный поперечный магнитный диполь и два продольных, намагниченность которых направлена в противоположные стороны. При намагничивании двухполюсной системой магнитов имеем один центральный продольный магнитный диполь, два боковых поперечных и два боковых продольных. При этом следует иметь в виду, что из-за большого размагничивающего фактора прутка в поперечном направлении наибольший вклад в магнитное поле рассеяния вносят продольные магнитные диполи. В практике применения средств контроля параметров армирования железобетонных конструкций наибольший интерес по толщине защитного слоя бетона имеет диапазон $h > 4$ см. В этом диапазоне, как видно из рис. 2, преимущественное значение по величине индукции B поля рассеяния имеет однополюсное намагничивание системы, длина $2L$ которой находится в этом же диапазоне. Объясняется данное обстоятельство наличием в намагниченном прутке двух расположенных близко к зоне измерений продольных

магнитных диполей, вносящих наибольший вклад в поле рассеяния прутка.

Литература

1. Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры : ГОСТ 22904-93.
2. Prefabricated reinforced components of light-weight aggregate concrete with open structure with structural or non-structural reinforcement : EN 1520:2011.
3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-600.html>. – Дата доступа: 01.10.2021.
4. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profometer-pm-630-650.html>. – Дата доступа: 01.10.2021.
5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.elcometer.com/images/stories/PDFs/InstructionBooks/331_b.pdf. – Дата доступа: 01.10.2021.
6. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.proceq.com/ru/produkcija/kontrol-betona/lokator-sterzhnei-armatury-v-betone/profoscope.html?pqf=5>. – Дата доступа: 01.10.2021.
7. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stroypribor.com/produkt/catalog/naprarm>. – Дата доступа: 01.10.2021.
8. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.interpribor.ru/measuring-the-thickness-of-the-protective-layer-of-concrete-poisk25>. – Дата доступа: 01.10.2021.
9. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tgindt.com/products/concrete-testing-gauge/time-tc100-tc110-rebar-locator.html>. – Дата доступа: 01.10.2021.
10. Гусев, А. П. Двухпараметровый метод контроля армирования железобетонных конструкций / А. П. Гусев, Я. И. Шукевич, А. Л. Лукьянов // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов / Сборник статей Шестой междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 сентября 2017 г. / Белорусско-Российский университет. – С. 126–131.
11. Гусев, А. П. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и диаметра прутков арматуры строительных конструкций / А. П. Гусев, Я. И. Шукевич, А. В. Лукьянов // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2017. – № 1. – С. 5–10.

УДК 666.638, 666.651, 666.652

**СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ
НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ФЕРРИТА ВИСМУТА**

Дятлова Е.М.¹, Гундилович Н.Н.¹, Попов Р.Ю.¹, Бука А.В.¹, Колонтаева Т.В.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Установлены закономерности энергоэффективного нитрат-цитратного синтеза нанодисперсного феррита висмута модифицированного La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} , Er^{3+} и Lu^{3+} . Изучена структура и фазовый состав синтезированных материалов. Разработаны керамические материалы на основе модифицированного феррита висмута с наноразмерными частицами, также исследованы нанопористые матрицы и показана возможность их заполнения керамической субстанцией на основе дисперсного феррита висмута и различных дисперсионных сред. Разработанные керамические материалы могут быть использованы для изготовления различных компонентов электронной техники, в том числе для получения функциональных покрытий нанопористых структур, используемых для создания средств автоматизации и автоматики.

Ключевые слова: феррит висмута, мультиферроик, нитрат-цитратный синтез, структура.

**SYNTHESIS AND STUDY OF MULTIFERROIC CERAMIC MATERIALS BASED
ON MODIFIED BISMUTH FERRITE**

Dyatlova E.¹, Gundilovich N.¹, Popov R.¹, Buka A.¹, Kolontaeva T.²

¹Belarusian state technological university

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The regularities of energy-efficient nitrate-citrate synthesis of nanodispersed bismuth ferrite modified with La^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} , Eu^{3+} , Gd^{3+} , Er^{3+} and Lu^{3+} have been established. The structure and phase composition of the synthesized materials have been studied. Ceramic materials based on modified bismuth ferrite with nanosized particles have been developed, nanoporous matrices have also been investigated and the possibility of filling them with a ceramic substance based on dispersed bismuth ferrite and various dispersion media has been shown. The developed ceramic materials can be used for the manufacture of various components of electronic equipment, including to obtain functional coatings of nanoporous structures used to create automation and automation equipment.

Key words: bismuth ferrite, multiferroic, nitrate-citrate synthesis, structure.

Адрес для переписки: Гундилович Н.Н., ул. Сведлова, 13а, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: kolgund@mail.ru

Введение. Кристаллами, одновременно сочетающие в себе свойства сегнетоэлектриков или антисегнетоэлектриков и ферромагнетиков или антиферромагнетиков, а также сегнетоэластичность являются мультиферроики.

В мультиферроиках, помимо свойств, характерных для каждого типа упорядочения в отдельности (спонтанная намагниченность, магнитострикция, спонтанная поляризация и пьезоэлектрический эффект) присутствуют свойства, связанные с взаимодействием электрической и магнитной подсистем: магнитоэлектрический эффект (индуцированная магнитным полем электрическая поляризация и индуцированная электрическим полем намагниченность); эффект магнитоэлектрического контроля (переключение спонтанной поляризации магнитным полем и спонтанной намагниченности электрическим полем); магнитодиэлектрический эффект или магнитоемкость (изменение диэлектрической постоянной под действием магнитного поля). Связь между электрической и магнитной подсистемами (магнитоэлектрический эффект) дает возможность управлять магнитными свойствами мультиферроиков электрическим полем и,

наоборот, изменять их электрические свойства в магнитном поле. мультиферроики являются перспективными материалами для применения в различных отраслях промышленности.

Мультиферроиками преимущественно являются соединения со структурой шпинели, граната или перовскита. Наиболее перспективными из них являются соединения со структурой перовскита, но на данный момент таких соединений известно немного. Характерными примерами мультиферроиков являются:

- ферриты (BiFeO_3),
- ванадаты (PbVO_3),
- манганаты (BiMnO_3),
- феррониобаты ($\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3$),
- ферровольфраматы ($\text{Pb}(\text{Fe}_{2/3}\text{W}_{1/3})\text{O}_3$),
- кобальтовольфраматы ($\text{Pb}(\text{Co}_{1/2}\text{W}_{1/2})\text{O}_3$).

Одним из наиболее изучаемым и широко используемым мультиферроиком в настоящее время является феррит висмута BiFeO_3 (BFO), который представляет собой двойной перовскит со сложной пространственно-модулированной магнитной структурой циклоидного типа (G-типа) с достаточно высокими температурами антиферромагнитного ($T_N \sim 640$ K) и сегнетоэлектриче-

ского ($T_K \sim 1100$ К) фазовых переходов, что делает возможным его использование в широком диапазоне температур включая комнатные.

Благодаря величине ширины запрещенной зоны BiFeO_3 , составляющей порядка 2,2 эВ, и отличной химической стабильности области его применения, охватывает многие области радиоэлектроники, спинтроники, катализа и фотоники.

Материалы и методы исследования. В качестве сырьевых материалов для синтеза ортоферрита висмута BiFeO_3 использовались: 5-водный нитрат висмута $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (порошок); 9-водный нитрат железа $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (порошок); лимонная кислота $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (порошок); нитрат аммония NH_4NO_3 (порошок); растворы модифицирующих добавок (на основе анализа обзора литературы выбраны нитраты лантана (La^{3+}), церия (Ce^{3+}), празеодима (Pr^{3+}), европия (Eu^{3+}), гадолиния (Gd^{3+}), эрбия (Er^{3+}) и лютеция (Lu^{3+}). Все сырьевые материалы имели квалификацию ч.д.а.

Получение феррита висмута осуществляется нитрат-цитратным экзотермическим синтезом, где в качестве восстановителя использовалась лимонная кислота, а в качестве окислителя – нитрат аммония и кислород воздуха.

Полученные порошки измельчались и прокаливались в электрической печи при температуре 450°C со скоростью подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ в течение 60 мин, после чего измельчались для разрушения образовавшихся агрегатов.

Для приготовления пресс-порошка в синтезированных материалах в качестве связки вводился этанол с добавлением метанола. Прессование опытных образцов осуществлялось при удельном давлении 150 ± 5 МПа, с последующей сушкой в естественных условиях в течение суток. Обжиг образцов выполнялся в электрической печи при температуре 800°C со скоростью подъема температуры $10^\circ\text{C}/\text{мин}$ с выдержкой при максимальной температуре в течение 30 мин.

Результаты и их обсуждение. В работе изучены физико-химические, электрофизические и магнитные свойства синтезированных образцов.

Зависимость диэлектрической проницаемости не модифицированного феррита висмута и феррита висмута, модифицированного ионами-модификаторами, от температуры измерения, представлена на рис. 1.

Также можно заметить, что в области температур $800\text{--}1000$ К у образцов с ионами Eu^{3+} , Gd^{3+} , Lu^{3+} и у не модифицированного образца зависимость диэлектрической проницаемости приобретает пологий характер, который относится к поляризованному состоянию образца.

Из данной зависимости можно также выделить, что введение ионов больших радиусов более значительно влияет на снижение диэлектрической проницаемости (Er^{3+} , Lu^{3+} , Ce^{3+} , Pr^{3+} , La^{3+}). Данные ионы также в большей степени подавляют поляризованное состояние.

Введение лантаноидов способствует снижению энергии, требуемой на фазовый переход из

ферромагнитного в парамагнитное состояние (снижение температуры точки Нееля).

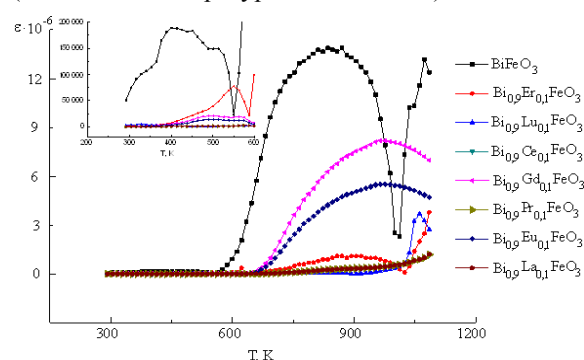


Рисунок 1 – Зависимость диэлектрической проницаемости не модифицированного и модифицированного феррита висмута от температуры измерения

Установлено, что с ростом температуры у исследуемых образцов растет удельная электропроводность, что закономерно, т.к. значительно увеличивается подвижность носителей заряда. В области температур $500\text{--}600$ К у всех образцов наблюдается плавный экстремум, который является ферромагнитной точкой Нееля. Снижение электропроводности на участках температур в области точек Кюри и Нееля связано с разрушением доменной структуры.

Определены следующие показатели энергии активации процесса электропроводности для составов опытных композиций, мэВ: BiFeO_3 – 51,0; $\text{Bi}_{0,9}\text{Er}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 78,2; $\text{Bi}_{0,9}\text{Lu}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 49,4; $\text{Bi}_{0,9}\text{Ce}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 91,3; $\text{Bi}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 94,1; $\text{Bi}_{0,9}\text{Pr}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 91,3; $\text{Bi}_{0,9}\text{Eu}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 94,1; $\text{Bi}_{0,9}\text{La}_{0,1}\text{FeO}_3$ – 91,3. По данным значений энергии активации можно сделать вывод, что наименьшим значением энергии активации обладает образец, модифицированный ионами лютеция (49,4 мэВ), а наибольшим – модифицированный ионами европия и гадолиния (94,1 мэВ). При увеличении радиуса иона-модификатора значение энергии активации этого процесса возрастает.

Все полученные образцы имеют наноразмерные частицы ($\sim 10^{-8}$ м), что доказывается расчетом по формуле Шеррера и наличием спонтанной намагниченности, т.к. феррит висмута имеет пространственно-модулированную структуру G-типа в виде циклоиды. Такая структура является антиферромагнитной, однако разрушение такой структуры приводит к раскомпенсации магнитных доменов. Нарушение структуры происходит при формировании частиц размером менее 64 нм.

В процессе исследований синтезированы керамические материалы, которые могут быть применимы для изготовления различных компонентов электронной техники, в т.ч. для получения функциональных покрытий нанопористых структур, используемых для изготовления средств автоматизации и автоматики. На основе полученных систем можно изготавливать подложки интегральных схем.

УДК 535-34; 539.1.06

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ И ЗОЛЬНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА
ПОСРЕДСТВОМ РАССЕЯННОГО И ТРАНЗИТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Василевич Л.Н., Ермакович О.Л., Лисовский Г.А.

*НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Проводится оценка методики работы приборов, использующих рассеянное и транзитное рентгеновское излучение для их применения в системах контроля качества при производстве бумаги, картона и других листовых материалов.

Ключевые слова: контроль качества бумаги, рентгеновское излучение.

**THE METHODS DETERMINATION OF THE MASS AND ASH PAPER BY MEANS
OF DIFFUSED AND TRANSIT X-RAY RADIATION**

Vasilevich L., Lisovski G., Yermakovich O.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Belorussian state university
Minsk, Belarus*

Abstract. It is conducted estimation of the methods of the work instrument, using diffused and transit x-ray radiation for their using in system of the checking quality at production of the paper, paperboard and other sheet material.

Key words: checking quality papers, x-ray radiation.

*Адрес для переписки: Ермакович О.Л., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: ermakovichol@tut.by*

Современное производство бумаги и картона осуществляется с применением систем контроля качества, работающих в режиме реального времени и постоянно отслеживающих параметры производимой продукции. Одним из основных параметров производимого бумажного или картонного полотна является величина массы на единицу площади (г/м^2), так же зачастую необходимо контролировать количество минеральной составляющей в бумажном полотне (зольность). Для осуществления контроля данного типа применяются радиоизотопные приборы. Контроль массы метра квадратного полотна осуществляется посредством радиоизотопного прибора с источником β -частиц [1]. Применяются изотопные источники с радионуклидами Sr90, Kr85, Pm147. Для измерения зольности применяются радиоизотопные источники содержащие радионуклид Fe55 являющийся источником мягкого рентгеновского излучения с энергией основной линии ХК_α (5,9 кэВ). Принцип измерения массы основан на том факте, что имеется слабая зависимость потери энергии пучка β – частиц от элементного состава контролируемого материала. В первом приближении потери энергии пропорциональны плотности электронов в материале (n_e). В свою очередь плотность электронов в веществе пропорциональна плотности. Ослабление рентгеновского излучения в мягкой области спектра сильно зависит от элементного состава вещества, так как основным фактором потерь энергии в этой области является фотоэффект. Энергия фотоэффекта является уникальной для каж-

дого элемента. Вследствие этого, ослабление рентгеновского излучения изотопа Fe55 зависит от минерального наполнителя бумажного полотна. Сравнивая величины ослабления излучения β – частиц и рентгеновского излучения появляется возможность определять процент минеральной составляющей в бумажном полотне.

Целью данной работы является разработка методики измерения массы квадратного метра бумажного полотна и его зольности посредством применения в качестве источника излучения рентгеновской трубки.

Радиоизотопный источник рентгеновского излучения Fe55 испускает кванты двух узких спектральных линий ХК_α (5,9 кэВ) и ХК_β (6,49 кэВ). Поэтому оценка ослабления бумажным полотном данного излучения позволяет судить о процентном содержании минерального вещества только в том случае, если заранее известен применяемый наполнитель. В качестве минеральных наполнителей обычно применяются каолин, мел, двуокись титана. Наиболее часто мел. Методика определения процентного содержания данных минеральных веществ в бумажном полотне основана на сильном отличие в поглощающей способности рентгеновского излучения Fe55 для: Al и Si содержащегося в каолине, Ca в меле и Ti в его двуокиси, от поглощающей способности веществ органики в целлюлозе.

В отличие от спектра излучения изотопа Fe55 спектр излучения рентгеновской трубки непрерывный. Вид спектральной плотности излучения трубки зависит от напряжения на аноде, материала анода и фильтра излучения на выходном окне.

Для оценки спектральной плотности излучения рентгеновской трубки применяется приближенная формула Крамерса [2]:

$$\frac{dP_\varepsilon}{d\varepsilon} = k_0 \cdot i \cdot Z(\varepsilon_{\max} - \varepsilon), \quad (1)$$

где P_ε – мощность потока рентгеновских фотонов (Вт), $k_0 = 2,2 \cdot 10^{-9}$, i – ток (А), Z – атомный номер анода трубки, ε_{\max} – максимальная энергия фотонов (эВ), ε – энергия фотонов (эВ).

Влияние ослабления в мишени анода генерируемого излучения приводит к спаду излучения в мягкой области. В [2] приводится расчет для трубки 1БПВ1-60 и делается вывод, что максимум генерируемой мощности при $\varepsilon \sim 8$ кэВ.

Для оценки величин транзитного рентгеновского излучения воспользуемся данными, приведенными в [3]. В табл. 1 приведены данные по коэффициенту взаимодействия рентгеновского излучения с веществом в диапазоне 6–60 кэВ.

Таблица 1. Коэффициенты взаимодействия рентгеновского излучения с веществом

ε (кэВ)	Майлар μ (см ² /г)	Al μ (см ² /г)	Ca μ (см ² /г)	Ti μ (см ² /г)
6	16,08	115,3	373,1	432,3
8	6,75	50,33	172,6	202,3
10	3,481	26,23	93,41	110,7
15	1,132	7,955	29,76	35,87
20	0,5798	3,441	13,06	15,85
30	0,3009	1,128	4,08	4,972
40	0,2304	0,5686	1,83	2,214
50	0,202	0,3681	1,019	1,213
60	0,1868	0,2778	0,6578	0,7661

Таблица 2. Разность коэффициентов взаимодействия μ и коэффициентов поглощения энергии μ_ε

ε (кэВ)	Майлар $\mu - \mu_\varepsilon$ (см ² /г)	Al $\mu - \mu_\varepsilon$ (см ² /г)	Ca $\mu - \mu_\varepsilon$ (см ² /г)	Ti $\mu - \mu_\varepsilon$ (см ² /г)
6	0,47	2	34,4	63,2
8	0,38	1,23	12,6	23
10	0,328	0,83	5,97	10,6
15	0,2652	0,468	1,72	2,76
20	0,2336	0,347	0,86	1,2
30	0,20118	0,2502	0,415	0,484
40	0,18345	0,2085	0,292	0,31
50	0,17118	0,1841	0,2368	0,2393
60	0,16172	0,1679	0,2058	0,2027

Данные по майлару приводятся вследствие того, что это органика и по поглощающей способности близка к целлюлозе. Заметно сильное отличие коэффициентов взаимодействия в мягкой области (6–10 кэВ). Следовательно, при проведении измерений транзитного излучения в этом диапазоне получим значительное отличие показаний для веществ с одинаковой массой на единицу площади, но с разным составом.

Данные приведенные в табл. 2 позволяют произвести оценку рассеянного рентгеновского излучения. Из приведенных данных следует, что результат проведения измерений рассеянного излучения в жесткой области спектра в основном определяется массой на единицу площади.

Таким образом, проводя измерения транзитного рентгеновского излучения в диапазоне –10 кэВ и рассеянного в диапазоне выше 20 кэВ, можно одновременно получать данные по массе и элементному составу контролируемого бумажного полотна.

Для расчета массы на единицу площади и процента зольности необходимо решить систему уравнений. В первом приближении из-за незначительного поглощения в жесткой части спектра излучения, система уравнений следующая:

$$I_{\text{рас.в.}} / I_{0.в.} = \mu_{\text{рас.цел.}} * M_{\text{цел.}} + \mu_{\text{рас.з.}} * M_{\text{з.}}, \quad (2)$$

$$\ln \left(I_{0.н.} / I_{\text{пр.н.}} \right) = \mu_{\text{вз.ц.}} * M_{\text{цел.}} + \mu_{\text{вз.з.}} * M_{\text{з.}}, \quad (3)$$

где $I_{0.в.}$ – интенсивность входного излучения в жесткой части спектра, $I_{0.н.}$ – интенсивность входного излучения в мягкой части спектра, $I_{\text{рас.в.}}$ – интенсивность рассеянного излучения в жесткой части спектра, $I_{\text{пр.н.}}$ – интенсивность прошедшего излучения в мягкой части спектра, $M_{\text{цел.}}$ – масса целлюлозы, $M_{\text{з.}}$ – масса золы, $\mu_{\text{рас.цел.}}$ – коэффициент рассеяния целлюлозы, $\mu_{\text{рас.з.}}$ – коэффициент рассеяния золы, $\mu_{\text{вз.цел.}}$ – коэффициент взаимодействия целлюлозы, $\mu_{\text{вз.з.}}$ – коэффициент взаимодействия золы.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержки Министерства Образования Республики Беларусь. В рамках научной программы «Разработка методики получения информации о внутренней структуре и плотности объектов и материалов с использованием проходящего и рассеянного рентгеновского излучения».

Литература

1. Измерение поверхностной плотности листовых материалов радиоизотопным методом / А. Ч. Беяичиц [и др.]. – НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ. – С. 202–204.
2. Иванов, С. А. Рентгеновские трубки технического назначения / С. А. Иванов, Г. А. Щукин. // Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 200 с.
3. NIST: Standard reference database126 (Last Update: July 2004). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMascCoef/tab3.html>.

УДК 621.382

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

Жевняк О.Г., Борздов В.М., Борздов А.В.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. На основе метода Монте-Карло проведено моделирование электронного переноса в короткоканальных кремниевых МОП-транзисторах с мелким и глубоким стоком. Рассчитаны плотности электронного тока в данных транзисторах. Показано, что в структурах с мелким стоком электронный ток протекает в узком приповерхностном слое, что может способствовать появлению высоких паразитных токов.

Ключевые слова: МОП-транзистор, электронный перенос, ток стока, метод Монте-Карло, дрейфовая скорость.

SIMULATION OF ELECTRON CURRENT DENSITY IN SHORT-CHANNEL MOSFETS

Zhevnyak O., Borzdov V., Borzdov A.

Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. Electron transport in silicon short-channel MOSFETs with shallow and deep drain is simulated by Monte Carlo method. Spatial distributions of electron current density are calculated. It is shown that electron current in simulated structures with shallow drain flows in thin layer near the surface. That can produce the high parasitic current into insulating oxide.

Key words: MOS-transistor, electron transport, drain current, Monte Carlo simulation, drift velocity.

Адрес для переписки: Жевняк О. Г., ул. Коржа, 1, 39, г. Минск 220036, Республика Беларусь
e-mail: zhevnyakog@mail.ru

Введение. Короткоканальные кремниевые МОП-транзисторы являются важнейшими базовыми элементами интегральных микро-схем, на которых построены современные цифровые устройства. Надежность работы этих транзисторов и неискажение бита двоичной информации, хранимой в схемах памяти, во многом определяется величиной плотности электронного тока, возникающего в приповерхностной области данных приборов [1, 2]. Высокая плотность тока способствует появлению эффектов горячих электронов и больших паразитных токов (токов утечки).

Цель настоящей работы заключалась в моделировании изменения величины плотности тока в проводящем канале короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов по его глубине для мелкого и глубокого стока при различных напряжениях на стоке.

Приборная структура. На рис. 1 приведена структурная схема моделируемого транзистора.

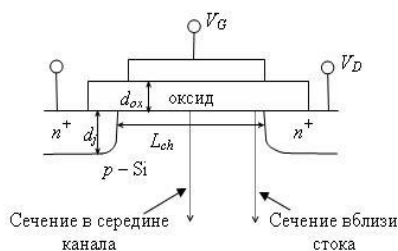


Рисунок 1 – Структурная схема моделируемого транзистора

Глубина мелкого стока, позволяющая значительно увеличить степень масштабирования и повысить емкость схем памяти, равнялась $d_j = 10$ нм. Глубина глубокого стока выбиралась равной $d_j = 100$ нм. Длина канала равнялась $L_{ch} = 0,2$ мкм. Для обеспечения резкой границы областей истока и стока уровень легирования донорной примеси в них был выбран равным $N_D = 10^{26} \text{ м}^{-3}$. Концентрация акцепторной примеси в подложке $N_A = 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Толщина подзатворного оксида $d_{ox} = 7$ нм. Напряжение на затворе $V_G = 2$ В. Исследовались два режима с величиной стокового напряжения, равнявшегося $V_D = 1$ В и $V_D = 2$ В. Расстояние z в глубь подложки отсчитывается от границы раздела оксида кремния.

Используемая модель. С помощью численного моделирования электронного переноса в проводящем канале МОП-транзистора на основе метода Монте-Карло были рассчитаны двумерные распределения величины плотности электронного тока в проводящей области транзистора. Алгоритмы и процедуры численного моделирования аналогичны тем, что приведены в наших работах [3, 4].

Моделирование базировалось на процедуре самосогласованного решения уравнений Больцмана и Пуассона. В каждой ячейке аппроксимации электрического поля рассчитывались значения электронной концентрации N_e и среднего значения дрейфовой скорости электронов v_{dr} . Величина плотности электронного тока j в лю-

бом участке проводящего канала рассчитывалась согласно равенству

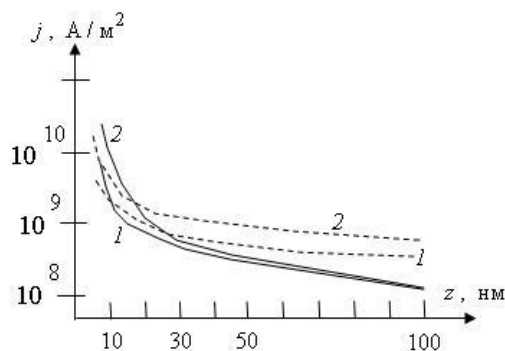
$$j = eN_e v_{dr},$$

где e – величина заряда электрона.

Результаты моделирования и их обсуждение. На рис. 2 и 3 приведены полученные распределения плотности электронного тока в сечениях канала, соответственно, в его середине и вблизи области стока. Практический смысл данных зависимостей заключается в том, что площадь под любой из кривых при умножении на величину ширины канала дает оценку величины тока стока для условий, при которых получена данная кривая.

Из рис. 2, в частности, следует, что в середине канала как для случая мелкого стока, так и для случая глубокого стока практически весь электронный ток сосредоточен в относительно узкой приповерхностной области, ширина которой не превышает 20 нм, и величина стокового напряжения не оказывает заметного влияния на растекание линий тока в глубь подложки.

Рис. 3 свидетельствует о том, что вблизи области стока для случая глубокого стока наблюдается уже заметное растекание тока в глубь подложки на область шириной около 50 нм. В случае же мелкого стока растекание тока возникает только с повышением напряжения на стоке.

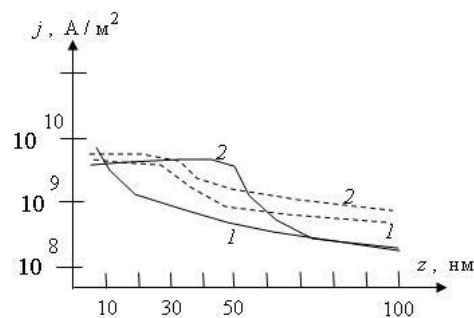


непрерывные кривые – $d_j = 10$ нм;
штриховые кривые – $d_j = 10$ нм;
1 – $V_D = 1$ В; 2 – $V_D = 2$ В

Рисунок 2 – Зависимости плотности электронного тока от координаты z в середине канала

Количественный анализ показывает, что наиболее существенное влияние на величину плотности тока в той или иной области канала оказывает значение в этой области величины концентрации электронов N_e .

Все полученные закономерности в значительной мере определяются поведением зависимостей этой величины от исследуемых параметров, а именно, от глубины залегания истоковой и стоковой областей и напряжения на стоке. В сечении вблизи стока на величину плотности тока оказывает влияние и величина дрейфовой скорости электронов, хотя и в меньшей мере.



непрерывные кривые – $d_j = 10$ нм;
штриховые кривые – $d_j = 10$ нм;
1 – $V_D = 1$ В; 2 – $V_D = 2$ В

Рисунок 3 – Зависимости плотности электронного тока от координаты z вблизи области стока

Заключение. Таким образом, результаты моделирования показывают, что с уменьшением глубины залегания областей истока и стока короткоканальных МОП-транзисторов в процессе миниатюризации элементов микросхем для недопущения высокой величины плотности электронного тока в поверхностной области транзистора возникает необходимость повышать напряжение на стоке, что при уменьшении размеров микросхем нежелательно. Поэтому требуется выбирать оптимальные размеры глубины залегания области стока и величины стокового напряжения.

Литература

1. Scaling the MOS Transistor Below 0.1 μm : Methodology, Device Structures, and Technology Requirements / C. Fiegna [et al.] // IEEE Trans. Electron Dev. – 1994. – Vol. 41, № 6. – P. 941–951.
2. Iwai, H. Technology toward low power / low voltage and scaling of MOSFETs / H. Iwai, H. S. Momose // Microelectron. Engineer. – 1997. – Vol. 39, № 1. – P. 7–30.
3. Моделирование методом Монте-Карло приборных структур интегральной электроники / В. М. Борздов [и др.] – Минск : БГУ, 2007. – 175 с.
4. Жевняк, О. Г. Моделирование паразитных туннельных токов в элементах флеш-памяти на основе короткоканальных кремниевых МОП-транзисторов / О. Г. Жевняк // Eurasian science journal. – 2020. – № 6, Ч. 2. – С. 26–28.

УДК 539.2; 669.(2–8)

СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГАХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ОЛОВО-ЦИНК

Зерница Д.А.¹, Шепелевич В.Г.²

¹Мозырский государственный педагогический университет им. И.П. Шамякина

Мозырь, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе исследуются быстрозатвердевшие сплавы системы Sn-40 мас. % Zn. Показано, что структура на поверхностных слоях фольги неодинакова вследствие различия скоростей образования зародышей. На поверхности, прилегающей к кристаллизатору, наблюдается дисперсная структура с выделениями цинка, распределенными в матрице олова. Противоположная сторона фольги характеризуется более крупными выделениями цинка, с преобладающей дендритной структурой. Текстура олова в поверхностном слое фольги отсутствует. Установлено, что в области концентраций 40 мас. % Zn наблюдается текстура зерен цинка ($10 \bar{1} 0$).

Ключевые слова: олово-цинк, сверхбыстрое затвердевание, зерно, текстура.

STRUCTURAL FEATURES AND TEXTURE FORMATION IN RAPIDLY SOLIDIFIED ALLOYS OF THE TIN-ZINC SYSTEM

Zernitsa D.¹, Shepelevich V.²

¹Mozyr State Pedagogical University named after I.P. Shamyakin

Mozyr, Belarus

²Belarusian State University

Minsk, Belarus

Abstract. In this work we study the rapidly solidified alloys of the Sn-40 wt. % Zn. It is shown that the structure on the surface layers of the foil is not the same due to the unequal rate of nucleation. On the surface adjacent to the crystallizer, there is a dispersed structure with zinc precipitates distributed in the tin matrix. The opposite side of the foil is characterized by larger zinc precipitates, with a predominant dendritic structure. There is no tin texture in the surface layer of the foil. It was found that in the concentration range of 40 wt. % Zn, a zinc texture of ($10 \bar{1} 0$) is observed.

Key words: tin-zinc, rapidly solidification, grain, texture.

Адрес для переписки: Зерница Д.А., ул. Студенческая, 28, г. Мозырь 247760, Республика Беларусь

e-mail: dzernitsa@mail.ru

Шепелевич В.Г., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь

e-mail: shepelevich@bsu.by

Сплавы на основе олова относятся к легкоплавким материалам. Для изготовления припоев предлагается использовать сплавы на основе олова, дополнительно легированные цинком [1], полученные традиционными методами. Однако при получении расплавов при малых и средних скоростях охлаждения в процессе кристаллизации происходит формирование нежелательной дендритной структуры, существенно ухудшающей эксплуатационные характеристики [2]. В последние десятилетия активно ведутся разработки по синтезу сплавов системы «олово-цинк» методом сверхбыстрой кристаллизации из расплава, при которой удается избежать образования дендритов, устранить микросегрегации, уменьшить структурные параметры сплавов. В связи с этим целью настоящей работы является исследование быстрозатвердевших фольг сплавов Sn-40 мас. % Zn.

Двойные сплавы Sn-Zn получались методом сплавления исходных компонентов в кварцевой

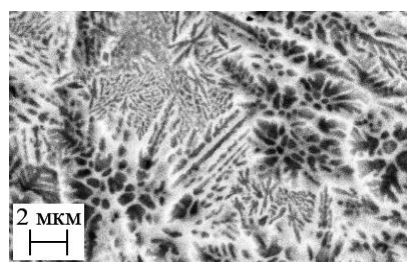
ампуле, с дальнейшей заливкой в графитовые изложницы. Далее вырезались образцы массой до 0,2 г, расплавлялись и инжестрировались на полированную поверхность вращающегося медного цилиндра. Скорость охлаждения при этом, как показал расчет [4], составляла не менее 10^5 К/с. В результате получались фольги толщиной до 80 мкм, из которых со средней части вырезались образцы для проведения дальнейших исследований. Микроструктура быстрозатвердевших фольг исследовалась с помощью растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP (Carl Zeiss, Германия), имеющего приставки для проведения рентгеноспектрального микроанализа и фазового анализа «HKL Channel5» (Oxford Instruments, Великобритания). Определение параметров кристаллической решетки и текстуры проводилось на дифрактометре Rigaku Ultima IV с медным анодом. Текстура быстрозатвердевших фольг сплавов изучалась с помощью обратных полюсных фигур. Полюсная плотность ρ_{hkl} ди-

фракционных линий hkl олова и цинка рассчитывалась по методу Харриса.

На рис. 1 представлены микрофотографии поверхностей A (а) и B (б), охлаждаемых со стороны медной подложки и противоположной соответственно. Показано, что поверхность A гладкая и блестящая, не содержит пор и раковин. Напротив, со стороны поверхности B наблюдается бугристая структура, поверхность неровная, матовая. С помощью рентгеновского спектрального микроанализа при распределении Sn и Zn вдоль линии сканирования было установлено, что темные участки на изображениях соответствуют выделениям цинка, а более светлый фон является оловянной матрицей. Противоположная сторона фольги характеризуется дендритообразными выделениями цинка размером, превышающим 1,5 мкм. Такая структура характерна при малых скоростях кристаллизации, когда первичные кристаллы Zn растут в виде скелетообразных выделений, вытянутых вдоль направления перемещения фронта кристаллизации.



а



б

Рисунок 1 – Микрофотографии поверхностей быстрозатвердевшей фольги со стороны а) A и б) B сплава Sn-40 мас. % Zn после 60 ч выдержки при комнатной температуре

В слое вблизи поверхности A скорость зародышеобразования максимальная. Следовательно, при кристаллизации этого слоя выделяется теплота, которая приводит к уменьшению переохлаждения до нескольких градусов.

Это приводит к тому, что последующие слои закристаллизовавшейся фольги имеют скорость зародышеобразования ниже, и размер зародышей увеличивается, что приводит к формированию более крупной структуры (рис. 1, б).

Приведенная на рисунке 2 фотография прямой полюсной фигуры быстрозатвердевшего сплава Sn-40 мас. % Zn поверхности A показывает, что текстуры олова на поверхностном слое быстрозатвердевшей фольги не наблюдается. Отсутствие текстуры подтверждается также результатами рассчитанных полюсных плотностей p_{hkl} дифракционных линий олова. Следует отметить, что по рассчитанным полюсным плотностям дифракционных линий цинка установлено преобладание текстуры $(10\bar{1}0)$. Несмотря на формирование текстуры (0001) в областях концентраций цинка 80 мас. % и выше, в сплавах меньшими составами имеется тенденция к потере этой текстуры. Следовательно, благодаря легирующему элементу скорость роста зерен с ориентировкой (0001) затормаживается, и на смену приходит текстура $(10\bar{1}0)$.

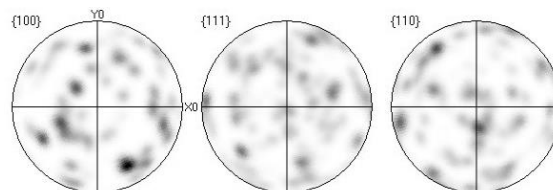


Рисунок 2 – Прямые полюсные фигуры для фазы твердого раствора на основе олова

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования в рамках гранта по НИР (№ госрегистрации 20211069).

Литература

1. Microstructural development of hypoeutectic Zn–(10–40) wt % Sn solder alloys and impacts of interphase spacing and macrosegregation pattern on hardness / L.R.S. Washington [et al.] // Journal of Alloys and compounds, 2015. – Vol. 647. – P. 989–996.
2. Saleh, A. A. A comparative experimental study of hypoeutectic Sn–Zn solder alloys / A. A. Saleh // International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). – 2018. – Vol. 9, iss. 6. – P. 909–915.
3. Mevlü, Ş. The effect of the solidification rate on the physical properties of the Sn–Zn eutectic alloy / Ş. Mevlü, F. Karakurt // Physica B: Physics of Condensed Matter. – 2018. – P. 48–54.
4. Салли, И. В. Кристаллизация при сверхбольших скоростях охлаждения / И. В. Салли. – Киев : Наукова думка, 1972. – 136 с.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ ИЗ САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ

Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., Мамаднazarова М.С., Амонов С.Т.

*Таджикский технический университет им.академик М.С.Осими
Душанбе, Таджикистан*

Аннотация. Устройство для центробежной абразивной обработки шариков, отличается тем, что в неподвижной верхней части монтированы пластины перемещающие заготовки в процессе обработки поочередно к периферии и из периферии к центру, что способствует равномерному износу инструмента и улучшает показатели обработки.

Ключевые слова: абразив, устройство, инструмент, загрузка, производительность.

DEVICE FOR CENTRIFUGAL ABRASIVE MACHINING OF GEM STONE BALLS

Imomov N. Mirzoaliev I., Mamadnazarova M., Amonov S.

*Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
Dushanbe, Tajikistan*

Annotation. The device for centrifugal abrasive processing of balls, differs in that in the fixed upper part, plates are mounted that move the workpieces in the process of processing alternately to the periphery and from the periphery to the center, which contributes to uniform wear of the tool and improves processing performance.

Key words: abrasive, device, tool, loading, performance.

В технологических процессах объемной обработки широкое применение получили методы центробежной абразивной обработки в контейнерах с вращающимся дном [1–3]. При данных способах обработки рабочая загрузка совершает сложное пространственное движение. Обработка производится за счет относительного скольжения заготовок и абразивной массы. Чем больше скорости относительного скольжения абразив-заготовка соответственно, тем больше производительность обработки.

В устройстве [1] при вращение дна под действием центробежных сил заготовки и абразивная масса, перемещаясь по криволинейному профилю дна и поднимаются вверх. Взаимодействуя с неподвижной цилиндрической чаши контейнера снабженный вертикальными пластинами криволинейного профиля, установленными в крышке, заготовки замедляют ход и обратно падают в контейнер. За счет относительного движения заготовок и абразивной массы происходит объемная обработка заготовок. Недостатком данного устройства является низкая производительность обработки и невозможности управление формой обрабатываемых заготовок. Данное устройство в основном используется для удаления заусенцев и округления острых кромок заготовок.

В устройстве для объемной обработки деталей [2], вращающееся дно снабжено группой перегородок, выполненных в виде ломаных поверхностей, расходящихся от центра к его периферии. Рабочей среде в этом случае сообщается дополнительное перемещение по дну рабочей емкости в радиальном направлении. В этом случае рабочая среда получают линейную скорость равной скорости вращения дно и под действием центробежных сил подаются вверх к неподвижной об-

рабатываемой части барабана, теряют скорость и обратно падают в дно контейнера.

Недостатком анного устройства является недостаточная относительная скорость скольжения абразив заготовка и большие ударные нагрузки. Поэтому использование данного устройства для обработки хрупких заготовок, какими являются самоцветные камни, приведет к поломкам заготовок и появление трещины, что снижает качество обработки.

Имеется также устройство для центробежно-абразивной обработки деталей [3], содержащее барабан с вращающимся дном и неподвижной верхней части. Данное устройство, снабжен абразивным кольцом, размещенным на границе между частями дна, на его верхней части. Каждая часть дна снабжена индивидуальным приводом. Такое конструктивное выполнение устройства позволяет повысить интенсивность обработки за счет разных скоростей вращение частей дна. Наличие абразивного кольцо между частями дна приводит к дополнительному съему материала и повышает производительность обработки. Недостатками данного устройство неравномерный износ абразивного кольца и быстрой потери работоспособности, сложность изготовления станка из-за наличие нескольких приводов.

С целью повышение производительности и точности обработки деталей, типа шаров, повышение долговечности абразивного инструмента путем обеспечения его равномерного изнашивания нами предложено и изготовлено новая конструкция устройство для формообразования шаров. В предлагаемой конструкции вращающееся дно изготовлено из абразивного материала, а стенки образующее барабана расположены перпендикулярно к его вращающегося дно (рис. 1).

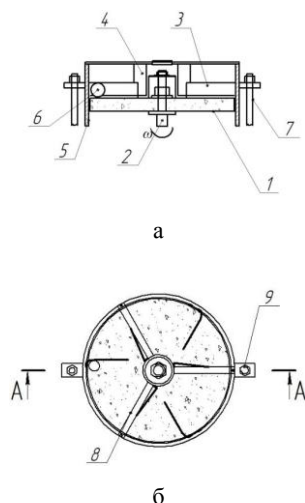


Рисунок 1 – Устройство для центробежной абразивной обработки шариков из самоцветных камней

Дополнительно к этому в неподвижной верхней части монтированы пластины перемещающие заготовки от центра к периферии и из периферии к центру.

На рис. 1, а и рис. 1, б показаны принцип шлифовки шаровидных тел на данном устройстве. Устройство состоит из абразивного круга 1, приводного вала 2, пластина для перемещения заготовок к центру круга 3, пластина для перемещения заготовок к периферии круга 4, барабан 5, держатели барабана 7, державки 8, болты 9.

Вращающееся дно, представляющий собой опорный абразивный круг 1 приводится во вращательное движение приводным валом 2. Над абразивным кругом, с некоторым зазором установлены пластины 3 перемещающие заготовки к центру и 4 из центра в периферии. Пластины перемещающие заготовки от периферии к центру прикреплены непосредственно внутри барабана 5, а пластины перемещающие заготовки от центра к периферии круга монтированы в стержнях 8 прикрепленных к верхнему торцу барабана. Барабан 5 посредством ушек и стоек 7 и болтов 9 прикрепляется к станине станка.

Работа в данном устройстве осуществляется следующим образом: в начале заготовки размещают внутри барабана. В качестве заготовок служат предварительно обработанные галтованные шары 6. При вращении дна 1 представляющий собой алмазная планшайба, заготовки приводятся в движение. При соприкосновении с неподвижными пластинами 3 и 4 они перемещаются под действием силы резания вдоль пластины и одновременно вращаются вокруг своих осей. Направление перемещения за-

висит от угла расположения пластины относительно радиуса круга в точки соприкосновения. Пластины расположены таким образом, что перемещают заготовки от периферии круга к центру (пластины 3 прикреплены непосредственно внутри барабана 5) и от центра к периферии (пластины 4 монтированные в стержнях 8 прикрепленных к верхнему торцу барабана).

На рис. 2. Приведено график зависимости производительности и исправление формы от продолжительности обработки на данном станке. Здесь $\delta_m, \%$ – уменьшение массы в процентах относительно исходной массы заготовок; $\delta_e, \%$ – процент исправления исходной погрешности.

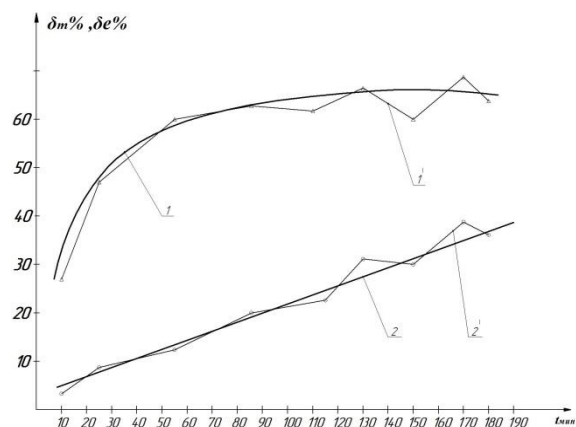


Рисунок 2 – График зависимости производительности и исправления формы от продолжительности обработки

Исследования процесса обработки показали, что использование предложенного устройства позволяет существенно повысить качество и производительность обработки заготовок из самоцветных камней, также существенно повышается срок службы шлифовального инструмента за счет равномерного его изнашивания по всей рабочей поверхности.

Литература

1. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей : а. с. US 1093507 / А. А. Серегин, В. В. Рябов, Л. Ф. Борзина. – Оpubл. 23.05.1984.
2. Центробежная установка для объемной обработки деталей : а. с. US 1549728 / С. С. Фасатуров. – Оpubл. 15.03.1990.
3. Устройство для центробежно-абразивной обработки деталей : а. с. US 1093508 / Л. Ф. Косухин, Н. С. Федотва. – Оpubл. 23.05.1984.
4. Устройство для центробежной абразивной обработки шариков : положительное решение на заявку № 2101573 на выдачу патента Республики Таджикистан. – 08.07.2021.

УДК 546.06

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ КОВАРА Канафьев О.Д.

ГНПО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению»
Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Ковар используется в качестве экранов электромагнитной защиты чувствительных элементов высокоточных приборов и при этом имеет ряд преимуществ, таких как: хорошая адгезия к расплавленному стеклу, невысокая стоимость, технологическая функциональность, также он очень пластичен, легко поддается вытягиванию, прокатке, сварке и штамповке. Для придания ему антикоррозионных свойств данный материал должен обладать хорошей адгезией, которая достигается химической полировкой. В данной работе были рассмотрены различные составы для химической полировки, а также подобрано оптимальное время воздействия данных составов на образцы ковара.

Ключевые слова: ковар, полировка, атомно-силовая микроскопия, шероховатость.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF KOVAR CHEMICAL POLISHING METHODS Kanafyev O.

SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”
Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Kovar is used as screens for electromagnetic protection of sensitive elements of high-precision devices and at the same time has a number of advantages, such as: good adhesion to molten glass, low cost, technological functionality, it is also very plastic, easy to stretch, rolling, welding and stamping. To give it anti-corrosion properties, this material must have good adhesion, which is achieved by chemical polishing. In this work, various compositions for chemical polishing were considered, and the optimal time of exposure of these compositions to kovar samples was selected.

Key words: kovar, polishing, atomic force microscopy, roughness.

Адрес для переписки: Канафьев О.Д., ул. Тикоцкого, д.14, кв.19, г. Минск 220119, Республика Беларусь
e-mail: olegkan96@mail.ru

Введение. Повсеместное распространение электроприборов в современном мире несет в себе несомненную пользу для человечества, но вместе с этим они служат источниками электромагнитного излучения. Данный тип излучения пагубно влияет на чувствительные элементы высокоточных приборов. С целью минимизации ущерба от ЭМИ, используются экраны электромагнитной защиты, состоящие из различных сплавов, в частности ковара. Данный сплав имеет определенные преимущества, такие как хорошая адгезия к расплавленному стеклу, невысокая стоимость, а также технологическая функциональность материала, также он очень пластичен, легко поддается вытягиванию, прокатке, сварке и штамповке [1]. Но использование деталей из данного сплава во влажной среде, требует дополнительного нанесения защитных антикоррозионных покрытий, самым распространенным из которых является никель. В связи с этим детали из ковара должны обладать хорошей адгезией, которая достигается химической полировкой.

Материалы и методы. В данном исследовании было проанализировано 3 химических метода полировки. В качестве образцов выступали пластины ковара (29 % никеля (Ni), 17 % кобальта (Co) и 54 % железа (Fe)) [1]. Исходный класс шероховатости – 10 (0,08–0,16 мкм).

Методы полирования были представлены следующими растворами:

– раствор №1 (250 мл уксусной кислоты + 50 мл азотной кислоты + 3 мл соляной кислоты) при 80 °С;

– раствор №2 (азотная кислота 20 % + уксусная кислота 40 % + ортофосфорная кислота 40 %) при комнатной температуре;

– раствор №3 (азотная кислота 30 % + уксусная кислота 70 %) при 80 °С.

Эффективность полировки оценивалась с помощью оптического микроскопа ЭПИТИМ-2, и атомно-силового микроскопа (АСМ) НТ-206. Шероховатость поверхности была измерена с помощью изображения АСМ по формуле

$$R_a = \frac{1}{l} \int_l^0 |y_i| dx,$$

где l – базовая длина, y_i – отклонение от профиля.

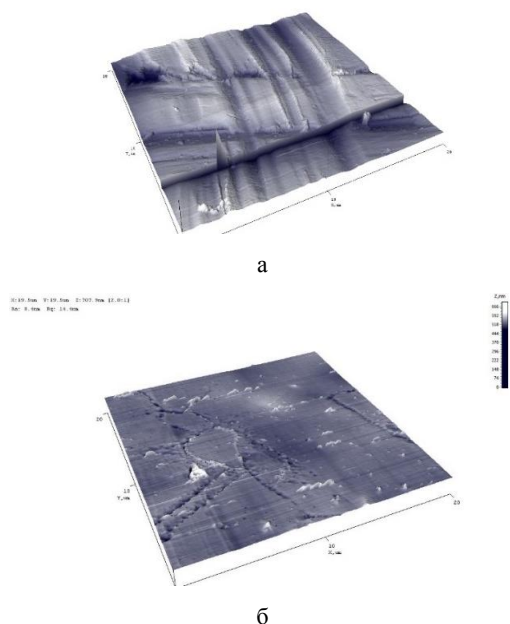
Результаты. Полировка раствором №1 значительно улучшает внешний вид исследуемых образцов, а также снижает их шероховатость. Наилучшее значение шероховатости достигается при $t = 5$ с (рис. 1, 2). Дальнейшая обработка в растворе приводит к образованию пор различного диаметра. При полировке раствором №2

класс шероховатости улучшается на 1 пункт при $t = 120$ с. Дальнейшее увеличение длительности воздействия раствора никак не сказывается на значениях шероховатости (табл. 1). Обработка раствором № 3 при всех значениях t практически не влияет на внешний вид образцов, при этом класс шероховатости близок к исходным значениям. Увеличение длительности обработки в данном растворе приводит к уменьшению исходных размеров образцов.

Таблица 1. Параметры исследуемых образцов

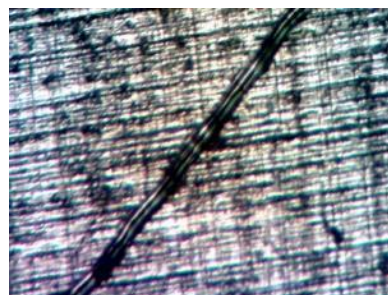
№	$t_{\text{пол.}}$, с	R_a , нм	Класс шероховатости
Исх. обр.	0	77,78	11
Раствор № 1	5	21,345	12
	10	30,085	12
	15	29,615	12
	30	30,955	12
Раствор № 2	30	46,555	11
	60	53,07	11
	90	52,175	11
	120	35,89	12
Раствор № 3	1	92,85	10
	2	67,7	11
	3	81,26	10
	4	91,83	10

Классы шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73



a – исходный образец, b – после полировки раствором № 1 при $t = 5$ с;

Рисунок 1 – Изображение морфологии образца полученного с помощью АСМ



a



b

a – исходный образец, b – после полировки раствором № 1 при $t = 5$ с;

Рисунок 2 – Изображение поверхности образца полученного с помощью оптического микроскопа

Выводы. Анализируя полученные данные можно сделать вывод о том, что при полировке раствором № 1 (250 мл уксусной кислоты + 50 мл азотной кислоты +3 мл соляной кислоты) при $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $t = 5$ с, шероховатость ковра значительно снижается, что способствует лучшей адгезии и более равномерному распределению никеля при дальнейшей антикоррозионной обработке, благодаря удалению оксидной пленки и растравливанию поверхности. Увеличение времени воздействия данным раствором приводит к ухудшению механических характеристик и образованию пор различного диаметра. Это происходит вследствие бурно протекающей реакции окисления из-за достаточно высокой температуры. Обработка образцов в растворах № 2 и № 3 приводит к незначительным изменениям трибологических свойств.

Литература

- Бегун, П. И. Прикладная механика / П. И. Бегун, О. П. Кормилицын // Учебник, 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2006. – 463 с.
- Лебединский, М. А. Электривакуумные материалы (металлы и сплавы) / М. А. Лебединский. – Изд. 2-е. – Л. : Энергия, 1966. – 232 с.

УДК 681.7.023.72

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МИКРОШАРИКОВ

Козерук А.С., Филонова М.И., Макаренко М.С., Ларионов Н.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Статья носит обзорный характер, в ней излагаются современные представления о микрошариках, приводятся данные об их роли, технологии обработки, рассматриваются преимущества и новые технологии.

Ключевые слова: микрооптика, энергосберегающие технологии, технологии обработки микрошариков, математическое моделирование.

IMPROVEMENT OF MICROBALL PROCESSING TECHNOLOGY

Kozeruk A., Filonova M., Makarenok M., Larionov N.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The article is of an overview nature, it outlines modern ideas about microspheres, provides data on their role, processing technologies, discusses the advantages and new technologies..

Key words: micro-optics, energy-saving technologies, microbeads processing technologies, mathematical modeling.

e-mail: mariya.makarenok@yandex.ru

В оптическом приборостроении актуальным является внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий. Такие технологии могут быть внедрены и при изготовлении микрооптики. Данный класс оптических деталей применяется при изготовлении всевозможных микрообъективов, для медицинских приборов (эндоскопов) и приборов специального назначения.

Характерной особенностью изготовления стеклянных шариков для микрооптики по технологии получения шаровидных деталей являются шлифование и полирование сферической поверхности в свободном состоянии. В этом случае заготовки будущих шариков делают в виде кубиков, которым в результате грубого шлифования придают предварительную форму шара [1]. Прогрессивный прием получения шаровидных деталей из хрупких материалов – это применение метода пневмоцентробежной обработки, при реализации которого используются два соосно установленных большими диаметрами друг к другу конических кольца с абразивными рабочими поверхностями, вдоль которых прокатываются заготовки. Вращение последним сообщается посредством рабочей среды под давлением.

Имеющиеся устройства для пневмоцентробежной обработки пригодны для получения шариков диаметром до 6 мм. Обработка деталей с полными сферическими поверхностями большего диаметра на этих устройствах непроизводительна из-за невозможности обеспечить достаточное усилие на заготовку в рабочей зоне.

Поэтому предлагается устройство [2] (рис.1), в котором дополнительная нагрузка на обрабатываемую заготовку создается за счет верхнего рабочего диска 1, совершающего возвратно-поступательное движение вдоль оси абразивных

конических колец 2 и 3. Это движение реализовано с помощью цилиндрического кулачкового механизма в виде кольца 4 с профильным рабочим торцом 5.

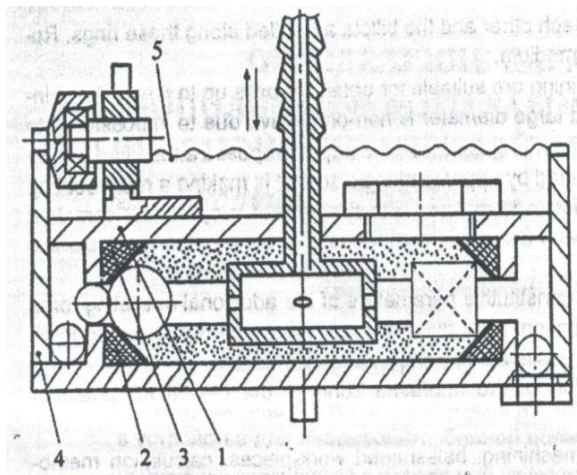


Рисунок 1 – Инструмент для пневмоцентробежной обработки шаровидных деталей из кубиков

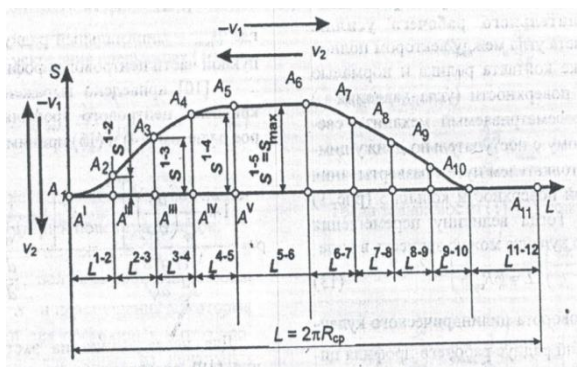


Рисунок 2 – К определению центрального профиля кольца

С целью достижения высокого качества изготавливаемых шариков необходимо подобрать такой закон движения элемента нагружения $S(t)$, при котором не возникало бы грубых сколов на заготовках во время обработки. Отмеченное условие не позволяет выбрать $S(t)$ с жесткими или мягкими ударами. В таких случаях рекомендуется использовать синусоидальный закон движения элемента нагружения. С этой целью необходимо определить основные размеры механизма дополнительного рабочего усилия. В [3] для расчета угла между вектором полной реакции в точке контакта ролика и нормалью к профильной поверхности (угла давления V) предлагается рассматриваемый механизм свести к кулачковому с поступательно движущимся кулачком и толкателем путем развертывания цилиндрической поверхности кольца 5 (рис. 1) на плоскость. Тогда величину перемещения эквивалентного кулачка можно записать в виде

$$L = \varphi R_{cp}, \quad (1)$$

где φ – угол поворота цилиндрического кулачка; R_{cp} – средний радиус рабочего профиля цилиндра.

В работе [4] показано, что радиус ролика R должен удовлетворять условию $R < \rho_{min}$, где ρ_{min} – минимальный радиус кривизны выпуклой части центрального профиля кулачка. Для нахождения ρ_{min} целесообразно вычислить ряд последовательных значений ρ и определить наименьшее.

При построении точного очертания действительного профиля кулачка можно аналитически вычислить координаты x_b и y_b этого профиля [4]:

$$\begin{cases} x_b = S + \frac{r \frac{dS}{d\varphi}}{R_{cp}^2 \sqrt{1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2}} \\ y_b = S - \frac{r}{\sqrt{1 + \frac{1}{R_{cp}^2} \left(\frac{dS}{d\varphi}\right)^2}} \end{cases} \quad (2)$$

где r – радиус ролика.

Используя формулу (2) можно рассчитать координаты x_b и y_b для ряда точек, принадлежащих действительному профилю рабочего торца 5 (рис. 1), который является эквидистантным центральному профилю.

Проведенное математическое описание основных размеров механизма дополнительного рабочего усилия в устройстве для пневмоцентробежной обработки шаровидных деталей позволило получить аналитическое выражение, которое положено в предлагаемую методику определения оптимального значения радиуса кривизны центрального профиля кулачка упомянутого механизма.

Выполненное математическое моделирование закономерностей работы механизма дополнительного рабочего усилия позволяет на основе численных исследований установить оптимальный профиль его кулачка в виде синусоиды с углом давления, при котором графики скоростей и ускорений не имеют точек разрыва, способствуя тем самым повышению выхода годных деталей на стадии галтовки на 20 % за счет исключения в траектории движения элемента нагружения ударов, являющихся причиной грубых сколов на заготовках.

Литература

1. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель ; под ред. М. Н. Семибратова. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.
2. Инструмент для обработки шариков: пат. ВУ 5049 / А. С. Козерук, А. А. Сухоцкий, М. И. Филонова. – Оpubл. 30.03.03.
3. Теория механизмов и машин. Проектирование. Учеб. пособие для машиностроительных специальностей вузов ; под ред. И. Кульбачного. – М. : Высш. шк., 1970. – 288 с.
4. Определение параметров механизма дополнительного рабочего усилия в устройстве для пневмоцентробежной обработки шаровидных деталей / А. А. Сухоцкий [и др.] // Наука и техника. – 2014. – № 4. – С. 42–47.

УДК 52-334.7; 621.315.592.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ (InSb), ОБЛУЧЕННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ

Колесникова Е.А., Углов В.В., Тетеруков Е.В.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе представлены исследования влияния облучения гамма-квантами Co^{60} с экспозиционной дозой не менее 10^{15} – 10^{16} кв./см² на удельное электросопротивление гетероэпитаксиальных пленок InSb, сформированных методом взрывного термического испарения. Условия облучения являются имитацией радиационного воздействия на околоземной орбите с поглощенной дозой не менее $2 \cdot (10^6$ – $10^7)$ рад. Проведенные исследования показали, что в результате облучения удельное сопротивление пленок InSb не изменяется, что свидетельствует о высокой стойкости гетероэпитаксиальных пленок InSb и устройств на их основе к заданным радиационным воздействиям.

Ключевые слова: антимонид индия; пленка; вакуумное осаждение; удельное сопротивление; радиационная стабильность.

INVESTIGATION OF THE ELECTRIC PROPERTIES OF INDIUM ANTIMONIDE FILMS (InSb) IRRADIATED BY GAMMA RAYS

Kolesnikova E., Uglov V., Teterukov E.

*Belarusian state university
Minsk, Belarus*

Abstract. In this work, presents a study of the effect of irradiation with Co^{60} γ -irradiation with an exposure dose of at least 10^{15} – 10^{16} cm⁻² on the electrical resistivity of heteroepitaxial InSb films formed by explosive thermal evaporation. The irradiation conditions are imitation of radiation exposure in Earth orbit with an absorbed dose of at least $2 \cdot (10^6$ – $10^7)$ rad. The studies carried out have shown that, as a result of irradiation, the electrical resistivity of InSb films does not change, which indicates a high resistant of heteroepitaxial InSb films and devices based on them to the specified radiation effects.

Keywords: indium antimonide; film; vacuum deposition; electrical resistivity; radiation stability.

*Адрес для переписки: Колесникова Е.А., ул. Бобруйская, 5, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: kolesnikea@bsu.by*

Антимонид индия (InSb) имеет широкое применение в области микро- и оптоэлектроники. InSb имеет рекордно высокую подвижность электронов и длину свободного пробега, а также рабочий температурный диапазон более 500 градусов. Фотопроводимость InSb лежит в ИК-диапазоне с длиной волны вплоть до $\lambda = 7$ мкм. Именно поэтому на основе InSb изготавливают высокочувствительные фотоэлементы, датчики Холла, магниторезисторы, оптические фильтры, которые, в том числе, могут использоваться для комплектации космических аппаратов [1].

Во время эксплуатации космические аппараты подвергаются воздействию ионизирующего излучения, что приводит к появлению дефектов в структуре используемого полупроводникового кристалла и, как следствие, изменению функциональных характеристик приборов и устройств на их основе. Поэтому важно при разработке учитывать процессы, происходящие в полупроводниках при воздействии ионизирующего излучения.

Из литературы известно, что дефекты в кристаллической решетке при облучении гамма-квантами вызваны непосредственно воздействием вторичных электронов, излучаемых в ходе комптоновского рассеяния, фотоэффекта и образования пар [2]. Взаимодействие вторичных элек-

тронов с веществом приводит к смещению атомов в узлах кристаллической решетки, оказывающему влияние на конечные электрические и оптические свойства полупроводниковых материалов [3–6]. В частности, что после облучения InAs/GaSb гамма-квантами с энергией 1,17 и 1,33 МэВ и дозой 500 Гр привело к уменьшению подвижности и длины свободного пробега носителей заряда [3]. При облучении GaAs также наблюдалось уменьшение подвижности и концентрации носителей заряда, что может быть связано с появлением в ходе облучения дополнительных центров рассеяния и рекомбинации в виде радиационных дефектов кристаллической решетки [6].

В данной работе проведено исследование удельного электросопротивления пленок InSb, подвергнутых облучению, имитирующему радиационное воздействие на околоземной орбите.

Осаждение пленок InSb проводилось на полированные пластины i-GaAs (100) методом взрывного термического испарения монокристаллического порошка InSb [7]. Контролируемая температурой температура подложки-держателя с пластиной GaAs составляла $(430 \pm 2,5)$ °С. Проведенные исследования показали, что при этой температуре формируются гетероэпитаксиальные

пленки InSb [8]. После получения пленок их толщина измерялась с помощью профилометра MahrMarSurf M400. Измеренная толщина полученной пленки составила $(2,0 \pm 0,05)$ мкм.

Для имитации условий радиационного воздействия на околоземной орбите пленки InSb были подвергнуты облучению гамма-квантами Co^{60} на гамма-установке «Исследователь» с экспозиционной дозой не менее 10^{15} – 10^{16} кв./см² (оцененная поглощенная доза порядка $2 \times (10^6$ – $10^7)$ рад). Как известно, системы для орбитальных космических аппаратов разрабатываются с радиационной стойкостью не менее 10^6 рад [9].

Для определения радиационной стойкости получаемых пленок были проведены измерения удельного электросопротивления до и после облучения. Отметим, что для всей серии образцов пленок InSb зависимости $\rho(T)$ аналогичны представленной на рис. 1.

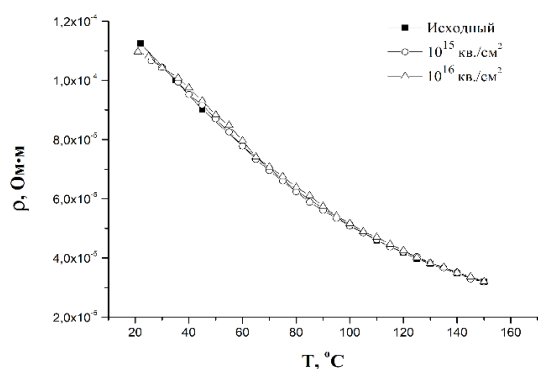


Рисунок 1 – Удельное электросопротивление пленки InSb в зависимости от температуры для различных доз облучения гамма-квантами

Из данных рис. 1 следует, что облучение гамма-квантами в интервале доз 10^{15} – 10^{16} кв./см² гетероэпитаксиальных пленок InSb не изменяет их удельного электросопротивления. Из литературных данных известно, что при облучении монокристаллов электронами интегральными потоками до 1×10^{19} см⁻², протонами до 2×10^{16} см⁻² происходит уменьшение концентрации свободных носителей заряда до определенного значения с ростом дозы облучения, т.е. удельное электросопротивление монокристалла увеличивается с ростом дозы облучения [2]. Гетероэпитаксиальные пленки InSb в отличие от совершенных кристаллов обладают структурными особенностями, состоящими в мелкокристаллической структуре пленки, наличии внутренних напряжений, границ

кристаллитов, а также наличием переходного дефектного слоя между подложкой и пленкой. Эти структурные особенности пленок представляют собой стоки для генерируемых при облучении гамма-квантами радиационных дефектов кристаллической решетки. Рекомбинация генерируемых дефектов на особенностях структуры гетероэпитаксиальных пленок InSb приводит к постоянству удельного электросопротивления.

Заключение. Установлено, что облучение гамма-квантами в интервале доз 10^{15} – 10^{16} кв./см², имитирующие радиационное воздействие на околоземной орбите, гетероэпитаксиальных пленок InSb не изменяет их удельного электросопротивления.

Литература

1. Болванович, Э. И. Полупроводниковые пленки и миниатюрные измерительные преобразователи / Э. И. Болванович. – Минск : Наука и техника, 1981. – 214 с.
2. Gamma and electron NIEL dependence of irradiated GaAs / E. El Allam [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2017. – Vol. 64, issue 3. – P. 991–998.
3. Impact of temperature and gamma radiation on electron diffusion length and mobility in p-type InAs/GaSb superlattices / J. Lee [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 123, iss. 23. – P. 235104.
4. Wang, J. Effects of irradiation with gamma and beta rays on semiconductor Hall effect device / J. Wang, W. Yang // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2008. – Vol. 266, iss. 16. – P. 3583–3587.
5. Performance analysis of GaAs based solar cells under gamma irradiation / N. Papež [et al.] // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 510. – P. 145329.
6. Effect of ⁶⁰Co c-ray irradiation on electrical properties of GaAs epilayer and GaAs p-i-n diode / Sh. K. Khamar [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2011. – Vol. 269, iss. 3. – P. 272–276.
7. Maissel, L. I. Handbook of Thin Film Technology / L. I. Maissel, R. Glang // New York : McGraw-Hill, 1970. – 800 p.
8. Структура и терморезистивные свойства пленок антимида индия, полученных методом взрывного термического испарения / Е. А. Колесникова [и др.] // Материалы и структуры современной электроники : материалы IX Международной научной конференции / БГУ. – Минск, 2020. – С. 65–70.
9. Егоров, Д. А. Проблемы обеспечения радиационной стойкости волоконно-оптических гироскопов и пути ее повышения (обзор) / Д. А. Егоров, А. В. Рупасов, А. А. Унтилов // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26, № 4 (103). – С. 23–42.

УДК 004.42

ИНФОРМАТИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА СТУДЕНТОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА

Кондратьева Н.А., Вансович Д.И.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В статье рассмотрены особенности создания и практического применения программных продуктов «Электронный журнал» и «Расписание занятий студентов БНТУ» в условиях информатизации учебного процесса в техническом университете. Описан процесс работы вебсайта посещаемости занятий студентами приборостроительного факультета БНТУ. Представлены возможности программного средства в виде расписания занятий в мобильной системе Android.

Ключевые слова: информационные технологии, вебсайт, электронный журнал, учебный процесс, успеваемость.

INFORMATIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS OF STUDENTS OF THE INSTRUMENT ENGINEERING FACULTY

Kondratieva N., Vansovich D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. The article describes the features of the establishment and practical application of software products “Electronic Journal” and “Schedule of students Belarusian National Technical University” under the conditions of informativeton of the educational process at the Technical University. Website describes the working process of attendancesti Occupation student electronics faculty National Technical University. Presents the possibility of pro-gram means in the form of timetables in the Android mobile system.

Key words: information technology, website, e-zine, the learning process, academic performance.

*Адрес для переписки: Кондратьева Н.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kondratyeva@bntu.by*

Современная система обучения в техническом университете направлена на повышение качества подготовки специалистов с использованием информатизации учебного процесса, на достижение ритмичной работы студентов в семестре и объективной оценки успехов их учебной деятельности.

Электронный журнал – это web-приложение с простым, но очень удобным интерфейсом, которое было создано для заполнения информации о посещаемости занятий студентами в режиме онлайн по поручению центра информационных технологий БНТУ.

Электронный журнал доступен с любого мобильного устройства. Программа написана в редакторе кода Visual Studio Code, серверная часть реализована на программной платформе nodejs, вебсайт – html, css, javascript. Зайдя в браузер и прописав в адресной строке days.bntu.by вы можете попасть на сайт журнала [1]. На данный момент электронный журнал разделен на две части: функционал старост, деканатов, администрации и функционал студентов, родителей.

Студенты и родители студентов могут быть авторизованы в соответствующем разделе. После авторизации пользователь появляется на странице посещаемости занятий студентом, на которой есть: краткая информация о пропусках учебных занятий за текущий месяц, график по-

сещаемости (за последние 7 дней, за последние 30 дней), таблица посещаемости каждого студента. В таблице посещаемости можно увидеть в какие дни у студента были пропуски и по каким предметам.

Для деканатов и администрации университета реализован дополнительный функционал. Работники деканатов могут просматривать пропуски занятий отдельных студентов и таблицы посещаемости групп своего факультета, а также при авторизации в специальный аккаунт – изменять данные в случае ошибки. Администрация тоже имеет возможность производить редактирование данных, но это уже группы любого факультета. Реализован дополнительный функционал для отслеживания работы системы, графики нагрузки на систему, графики авторизаций пользователей, информация о работоспособности, информация о группах и старостах. Веб страница полностью адаптирована для разных групп людей: в электронном журнале предусмотрен функционал смены языка интерфейса. Главная задача журнала – доступность из любой точки мира, и его реализация с ней отлично справляется. После авторизации в электронный журнал студента либо родителей на странице таблицы посещаемости так же отображается подсчет пропусков занятий за месяц и за семестр, открывается возможность просмотреть успеваемость студента.

Система предметов имеет функционал их добавления, редактирования, а также удаления для администрации и деканата. Так же на странице общей информации о группе можно просмотреть список студентов группы, быстро узнать их контакты и просмотреть таблицу посещаемости конкретного студента, так и всей группы в целом. В случаях, когда список студентов в группе изменяется, имеется возможность его так же обновить и в электронном журнале на этой же странице.

Во втором семестре 2020–2021 учебного года работникам деканатов и старостам учебных групп БНТУ был предоставлен доступ к пользованию программной разработкой «Электронный журнал». Отметим его актуальность и преимущества: быстрый доступ, удобный интерфейс, возможность быстрого редактирования, практичность.

Также была выполнена разработка удобного и быстрого программного средства «Расписание занятий студентов БНТУ» под мобильную систему Android [2], предлагающее пользователю следующий функционал: просматривать расписание своей группы; переключаться между неделями учебы; изменять группу и факультет университета (БНТУ). В программном обеспечении еще предусмотрено то, что каждый раз при открытии расписания происходит его обновление, без участия пользователя. Расписание для каждой группы может редактироваться пользователями, которые имеют определенные права на специальном вебсайте.

Для достижения поставленных целей и получения необходимого программного продукта были проделаны следующие этапы работы: анализ приложений-конкурентов; разработка каркасного мобильного приложения; разработка сервера; проектирование базы данных; разработка специального вебсайта; установление связи между мобильным приложением и сервером; тестирование и отладка ПО. Разработан специальный вебсайт и создан функционал редактирования расписания для его сохранения либо удаления. В мобильном приложении на систему Android можно переключаться по календарю, видеть на какую неделю и на какое число показано расписание. Есть возможность изменить факультет и группу пользователя. Сайт так же предоставляет возможность изменить язык интерфейса, для будущего подключения групп с иностранными студентами. В специализированном сайте присутствует обязательная авторизация для пользователя. Реализована возможность редактирования расписания для групп.

Специальный вебсайт с возможностью редактирования расписания: <http://176.96.238.141:8080>.

Приложение «Расписание для студентов БНТУ» для установки на мобильное устройство с системой Android: <https://vk.cc/bVIR3q>.

Литература

1. Фримен, Э. Изучаем HTML, XHTML и CSS / Э. Фримен. – СПб : Питер, 2014. – 720 с.
2. Android. Программирование для профессионалов / Б. Харди [и др.] – СПб : Питер, 2016. – 640 с.

УДК 621.7, 620.186

МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Al-Cr-N С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Al

Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Чижик С.А.^{1,2}, Вархолински Б.³, Гилевич А.³, Трухан Р.Э.¹

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Кошалинский технологический университет

Кошалин, Польша

Аннотация. Методами атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования проведены исследования морфологии поверхности и механических свойств покрытий AlCrN с различным содержанием Al. На поверхности покрытий наблюдается большое количество микрочастиц. Морфология покрытия изменяется с увеличением концентрации Al и увеличивается количество микрочастиц на поверхности. Модуль упругости E и микротвердость H_y покрытия с равным содержанием Al и Cr снижается до значений 184 и 13,8 ГПа соответственно по сравнению с покрытием CrN. С увеличением содержания Al в покрытии до 70 % E и H_y возрастают до значений 234 и 19,8 ГПа соответственно. Дальнейшее увеличение содержания Al до 80 % приводит к снижению механических свойств.

Ключевые слова: катодно-дуговое испарение, покрытие AlCrN, структура, микротвердость, модуль упругости.

SURFACE MORPHOLOGY AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al-Cr-N COATINGS WITH DIFFERENT Al CONTENT

Kuznetsova T.^{1,2}, Lapitskaya V.^{1,2}, Khabarava A.¹, Chizik S.^{1,2}, Warcholinski B.³, Gilewicz A.³, Trukhan R.¹

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus

²Belarusian national technical university

Minsk, Belarus

³Koszalin Technological University

Koszalin, Poland

Abstract. Surface morphology and mechanical properties of AlCrN coatings with different Al content have been studied by atomic force microscopy and nanoindentation. There is a large number of microparticles on the surface coating. The morphology of the coating changes with increasing Al concentration and the number of microparticles on the surface increases. The elastic modulus E and microhardness H of the coating with equal Al and Cr content are reduced to values of 184 and 13,8 GPa, respectively, compared with the CrN coating. E and H increase to values of 234 and 19,8 GPa with an increase in the Al content in the coating to 70 %. A further increase in the Al content to 80 % leads to a decrease in mechanical properties.

Key words: cathode-arc evaporation, AlCrN coating, structure, microhardness, elastic modulus.

Адрес для переписки: Кузнецова Т.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: kuzn06@mail.ru

Введение. Использование нитридов переходных металлов в виде многокомпонентных систем позволяет одновременно получить высокие механические свойства, коррозионную и термическую стойкость, стойкость к износу и окислению. Добавление дополнительных компонентов к нитридной системе из двух элементов приводит к измельчению зерна, одновременному образованию аморфных и кристаллических фаз, формированию в кристаллических фазах различных решеток и появлению метастабильных фаз [1–3]. Изменяя фазовый состав покрытия за счет варьирования технологическими режимами и введения дополнительных элементов можно добиться эффективного влияния на поверхностные свойства покрытий [3].

Одним из наиболее широко применяемых в промышленности покрытий является нитрид хрома, обеспечивающий высокую стойкость к окислению и коррозии, хорошую адгезию к стальным подложкам [4]. Однако из-за относительно низких твердости [5] и абразивной износостойкости покрытия CrN следует усовершенствовать для более широкого применения. Изменение и улучшение свойств CrN достигают легированием металлами (Al, V) и неметаллами (C, Si) с образованием тройных систем [4–6].

Целью данной работы являлось исследование морфологии поверхности и механических свойств покрытий AlCrN методами атомно-силовой микроскопии и наноиндентирования.

Материалы и методы исследования. Покрытия AlCrN толщиной 2–4 мкм наносились катодно-дуговым испарением на стальные подложки HS6-5-2 с использованием установки TINA 900 M. Для улучшения адгезии покрытия к подложке, на подложку наносили тонкий слой хрома толщиной около 100 нм. При нанесении всех покрытий использовалась реакционная атмосфера чистого азота с давлением 3 Па. Иссле-

дуемый набор покрытий был нанесен с использованием следующих катодов: Cr, Al₅₀Cr₅₀, Al₇₀Cr₃₀ и Al₈₀Cr₂₀.

Исследования топографии поверхности покрытий AlCrN проводили атомно-силовой микроскопией (АСМ) на приборе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM (количественное наномеханическое картирование) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа NSC-11 (производство Micromash, Эстония) с радиусами закругления острия 30 и 24 нм, с жесткостью консоли 4,9 и 6,9 Н/м.

Измерение механических свойств покрытий AlCrN проводили на наноинденторе Hysitron 750 Ubi (Bruker, США) с алмазным индетором типа Беркович с радиусом 60 нм. Нагрузка на индетор составляла 5 мН.

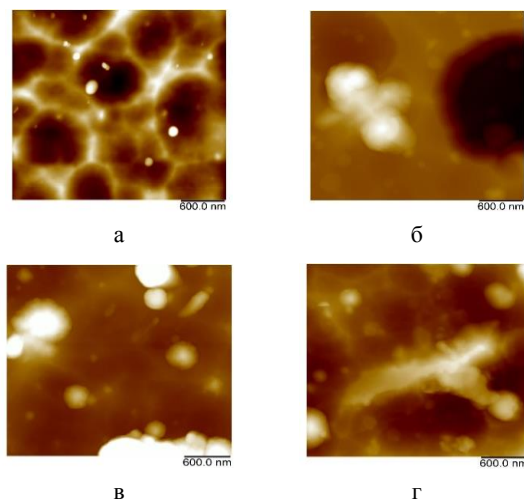
Результаты исследования. Структура поверхности на полях 3 мкм² покрытия без Al состоит из ячеек размером от 0,3 до 1,5 мкм (рис. 1). На поверхности покрытия с увеличением содержания Al растет и количество частиц размером 0,2–2,0 мкм. Появление частиц на поверхности покрытий приводит к значительному росту шероховатости поверхности по сравнению с покрытием CrN (табл. 1). Шероховатость R_a покрытия CrN составила 15,0 нм, а покрытия Al₈₀Cr₂₀N – 84,5 нм.

Таблица 1. Шероховатость поверхности покрытий

Покрытие Al _x Cr _{1-x} N	R_a , нм	Rq , нм	Rz , нм
x = 0	15,0	18,0	54,5
x = 0,5	186,0	220,0	991,0
x = 0,7	69,1	101,0	860,0
x = 0,8	84,5	110,0	423,0

Модуль упругости E и микротвердость H покрытия без Al (CrN) равны соответственно 206 и 25,9 ГПа (рис. 2). У покрытия с равным содержанием Al и Cr (Al₅₀Cr₅₀N) снижается до

значений 184 и 13,8 ГПа соответственно по сравнению с покрытием CrN (рис. 2). С увеличением содержания Al в покрытии до 70% ($Al_{70}Cr_{30}N$) E и H возрастают до значений 234 и 19,8 ГПа соответственно. Дальнейшее увеличение содержания Al ($Al_{80}Cr_{20}N$) приводит к снижению механических свойств.



$a - x = 0$; $б - x = 0,5$; $в - x = 0,7$; $г - x = 0,8$

Рисунок 1 – АСМ-изображения (3 мкм^2) поверхности покрытий $Al_xCr_{1-x}N$

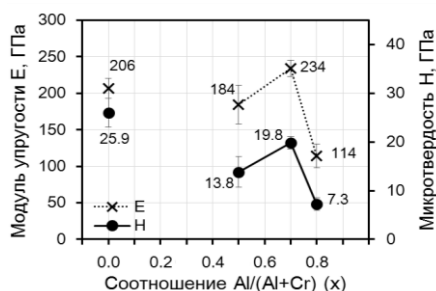


Рисунок 2 – Механические свойства покрытий AlCrN

Заключение. Проведены исследования морфологии поверхности и механических свойств покрытий AlCrN с различным содержанием Al. Установлено, что добавление Al в состав покрытия приводит к появлению на поверхности микрочастиц, которые способствуют увеличению шероховатости поверхности. По результатам определения механических свойств установлено, что наибольшие значения E и H у покрытия с содержанием Al 70% ($Al_{70}Cr_{30}N$).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № T21MC-029.

Литература

1. Microstructural evolution and thermal stability of AlCr(Si)N hard coatings revealed by in-situ high-temperature high-energy grazing incidence transmission X-ray diffraction / N. Jager [et al.] // Acta Materialia. – 2020. – Vol. 186. – P. 545–554.
2. Microstructure and mechanical properties of nanocrystalline Al–Cr–B–N thin films / C. Trittemmel [et al.] // Surface & Coatings Technology. – 2012. – Vol. 213. – P. 1–7.
3. Franz, R. Vanadium containing self-adaptive low-friction hard coatings for high-temperature applications: A review / R. Franz, Ch. Mitterer // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 228. – P. 1–13.
4. Investigation of the properties of $Al_{1-x}Cr_xN$ coatings prepared by cathodic arc evaporation / A. E. Reiter [et al.] // Surf. Coat. Technol. – 2005. – Vol. 200. – P. 2114–2122.
5. Influence of deposition parameters on hard Cr–Al–N coatings deposited by multi-arc ion plating / L. Wang [et al.] // Appl. Surf. Sci. – 2012. – Vol. 258. – P. 3629–3636.
6. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. – № 2. – С. 209–217.

УДК 519.2:006

РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА

Кулуев Р.Р., Матякубова П.М.

¹Ташкентский государственный технический университет им. И.А. Каримова
Ташкент, Республика Узбекистан

Аннотация. На основе полученных данных и результатов обоснованы две физические модели емкостных преобразователей, как наиболее эффективные для контроля влажности зерна и зернопродуктов в результате которого разработано и изготовлена конструкция емкостных преобразователей и микропроцессорное устройство контроля влажности зерна, основанного на емкостном измерении. Проведен структурный синтез измерительного преобразователя влажности зерна, в результате которого построена ее оптимальная структура, отличающаяся компактностью размещения схемы.

Ключевые слова: емкостные преобразователи, физические модели, устройство, влажность.

DEVELOPMENT OF PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELS OF CAPACITIVE CONVERTERS OF GRAIN MOISTURE

Kuluyev R., Matyakubova P.

Tashkent State Technical University named after I.A. Karimov
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. On the basis of the obtained data and results, two physical models of capacitive converters were substantiated as the most effective for controlling the moisture content of grain and grain products, as a result of which the design of capacitive converters and a microprocessor device for controlling grain moisture based on capacitive measurement were developed and manufactured. Structural synthesis of the measuring transducer of grain moisture has been carried out, as a result of which its optimal structure is constructed, which is distinguished by the compactness of the layout of the circuit.

Key words: capacitive transducers, physical models, device, humidity.

Адрес для переписки: Кулуев Р.Р., г. Ташкент, Республика Узбекистан
e-mail: ruslan-kuluyev@mail.ru

В косвенных методах оценка влажности сыпучих материалов производится по изменению различных его свойств. В работе приведены основные характеристики косвенных методов, показаны достоинства и недостатки. В технологическом процессе из перечисленных методов способны применяться следующие: радиоактивный; метод ядерного магнитного резонанса; кондуктометрический; емкостной; СВЧ; инфракрасный и тепловой метод. Недостатками поточных преобразователей влажности сыпучих материалов на основе ядерно-магнитного резонанса – это дорогостоящая аппаратура и высокие требования к отсутствию внешних помех. Недостатками поточных инфракрасных преобразователей влажности это технология поверхностного измерения влажности и влияние увеличения размера частиц на результат измерения. Недостатками тепловых поточных преобразователей влажности это невысокая точность из-за больших потерь тепла нагрева тепловых элементов окружающую среду и большая динамическая погрешность из-за тепловой инерции теплопровода. Радиоактивный и кондуктометрический методы не обладают высокой точностью измерения. Вдобавок радиоактивный метод требует сложного, дорогого и потенциально опасного оборудования. На практике поточные влагомеры обычно используют либо емкостной, либо СВЧ датчики. СВЧ устройство сложнее и дороже. Емкостной метод вследствие высокой чувствительности широко использован в областях поточных преобразователей влажности [1–2]. Кроме того, использование микропроцессоров в измерительных схемах существенно расширяет функциональные возможности емкостных преобразователей. Так же, преимуществом данного метода является простота и сравнительно невысокая стоимость как измерительной схемы, так и самого емкостного датчика. Емкостной метод обладает достаточно высокой точностью измерения.

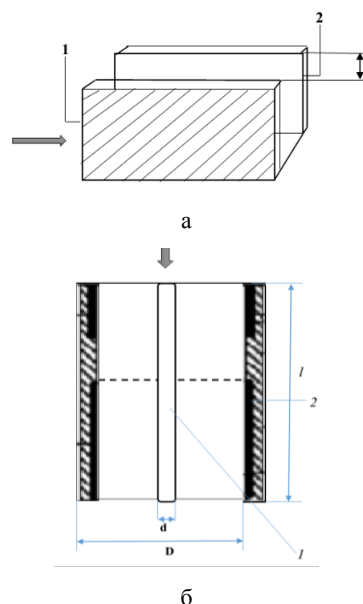
Для разработки первичного измерительного преобразователя выбраны две наиболее широко

применяемые типы емкостных конструкции: первый – плоскопараллельный, второй – коаксиальный.

Первый плоскопараллельный емкостной преобразователь весьма эффективно сочетается с конструкцией для сыпучих материалов с кюветой, которая транспортируется с помощью ленточного транспортера.

Вторая конструкция – коаксиальная, которая установленная вертикально с бункером и сыпучий материал транспортируется с помощью специального шнека с приводом.

Мы обосновали, что среди емкостных преобразователей для автоматического контроля влажности зерна и зернопродуктов весьма эффективные по точности и чувствительности две простые конструкции емкостного плоскопараллельного типа и емкостных датчиков коаксиального типа, которые представлены на рис. 1 а и б.



а – плоскопараллельного типа;

б – коаксиального типа; 1, 2 – электроды

Рисунок 1 – Физические модели емкостного преобразователя

Математическая модель емкостного преобразователя плоскопараллельного типа может быть представлена в следующем виде

$$C_0 = [\sum_l^r \varepsilon_r g_r + \sum_l^a \varepsilon_a g_a] F, \quad (1)$$

где ε_r – диэлектрическая проницаемость вещества основного зазора; ε_a – диэлектрическая проницаемость вещества вне зазора; g_r – пространственная характеристика поля зазора, м; g_a – пространственная характеристика элемента внешнего поля, м.

Емкость датчика коаксиального типа, образованного двумя цилиндрами d и D , имеющими длину взаимного перекрытия $l \gg \frac{D-d}{2}$, без учета краевых эффектов может быть определена следующим образом.

При заборе между внутренними поверхностями, во многом раз большем половины диаметра внутреннего цилиндра, т.е. при $(D-d) \gg d$, емкость системы определяется по формуле

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_i g_V = \varepsilon_0 \varepsilon_i \frac{2\pi l}{\ln \frac{D}{d}} = 55,6 \varepsilon_i \frac{l}{\ln \frac{D}{d}} 10^{-12} F, \quad (2)$$

где ε_i – диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего зазор; g_V – пространственная характеристика поля, м; l – длина взаимного перекрытия цилиндров, м; d – внешний диаметр внутреннего цилиндра, м; D – внутренний диаметр внешнего цилиндра, м.

За последние годы в развитии информационно-измерительной техники произошел существенный прорыв, обусловленный в первую очередь гигантским прогрессом микроэлектроники и компьютеризацией. Широкое применение микропроцессоров привело к созданию «интеллектуальных» первичных преобразователей.

На основе полученных данных и результатов обоснован емкостной метод как наиболее эффективный для контроля влажности зерна и зернопродуктов в результате которого разработано и изготовлено микропроцессорное устройство контроля влажности зерна, основанного на емкостном измерении. Проведен структурный синтез измерительного преобразователя влажности зерна, в результате которого построена ее оптимальная структура, отличающаяся компактностью размещения схемы, наглядностью отображение информации, удобством эксплуатации и минимальной потребляемой мощностью (рис. 2).

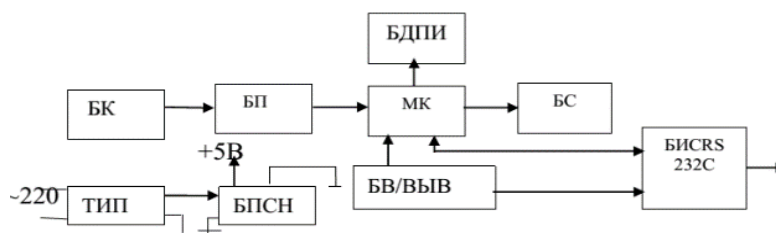


Рисунок 2 – Структурная схема устройства контроля влажности зерновых продуктов

Структурная схема микропроцессорного устройства контроля влажности зерна состоит из следующих блоков:

- блок кювета (БК);
- блока преобразователя (БП);
- микроконтроллера (МК);
- блока ввода и вывода информации (БВ/Выв);
- дисплея (Дисп);
- блока сигнализации (БС) блока типового источника питания (ТИП);
- блока интерфейсной связи, блока питания и стабилизации напряжения (БПСН).

Литература

1. Берлинер, М. А. Измерения влажности / М. А. Берлинер. – М. : Энергия, 1973. – 400 с.
2. Кострикина, И. А. Методы и средства измерений электрических параметров материалов для оценивания влажности. Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Пенза, 2004. – 140 с.
3. Каландаров, П. И. Особенности измерения влажности зерновых культур в полевых условиях. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2021. – № 1. – С. 60–63.

УДК 612.086.2

МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ В КОРПУСА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Ланин В.Л., Мишечек А.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрен процесс монтажа кристаллов в корпуса интегральных схем с применением вибраций и ультразвуковых колебаний. В результате моделирования в ANSYS WorkBench получена картина распределения механических напряжений в ультразвуковой системе монтажа и в рабочей области. Получены зависимости амплитуды колебаний от частоты и определена резонансная частота УЗ технологической системы монтажа кристаллов, которая составила 94,5 кГц. При пайке с использованием УЗ колебаний наблюдается улучшение качества соединения вплоть до температуры в 225 °С.

Ключевые слова: кристаллы, интегральные схемы, монтаж, корпуса, ультразвук.

CRYSTALS MOUNTING IN INTEGRATED MICROSCIRCUITS PACKAGES USING ULTRASONIC VIBRATIONS

Lanin V., Mishechek A.

*Belarus State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. The process of mounting crystals in integrated circuit packages with the use of vibrations and ultrasonic vibrations is considered. As a result of modeling in ANSYS WorkBench, a picture of the distribution of mechanical stresses in the ultrasonic mounting system and in the working area was obtained. The dependences of the oscillation amplitude on the frequency were obtained and the resonant frequency of ultrasonic technological system for mounting crystals was determined, which was 94.5 kHz. When soldering using ultrasonic vibrations, an improvement in the quality of the joint is observed up to a temperature of 225 °C.

Key Words: crystals, integrated circuits, mounting, packages, ultrasound.

*Адрес для переписки: Ланин В.Л., ул. П Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: vlanin@bsuir.by*

Монтаж кристаллов интегральных схем (ИС) в корпуса должен обеспечить высокую прочность соединений при термоциклировании и механических нагрузках, низкое электрическое и тепловое сопротивление, минимальное механическое воздействие на кристалл и отсутствие загрязнений. В настоящее время для монтажа кристаллов широко используется технология вибрационной эвтектической пайки кристалла к основанию корпуса с использованием припоя Au-Si и золотого покрытия кристалла [1]. Для обеспечения необходимой смачиваемости припоя и предотвращения окисления в процессе пайки используют формирующий газ на основе смеси 10 % водорода и 90 % азота. Нанесение припоя на подложку осуществляется дозированием проволочной припоя или паяльной пасты, либо припойными прокладками.

Монтаж кристалла на эвтектические сплавы помимо технологических трудностей (высокие температуры, золотое покрытие) имеет и другие недостатки. В виду малой пластичности эвтектики Au-Si и разницы в коэффициентах термического расширения кристалла и подложки в кристалле возникают значительные механические напряжения, что приводит к сколам кристаллов на последующих технологических операциях и испытаниях, а также к снижению надежности приборов. Установлено, что основ-

ными причинами, приводящими к снижению выхода годных изделий, являются отслаивание кристаллов из-за неполного образования эвтектики по всей площади, образование микротрещин и растрескивание кристаллов после термокомпрессионной разварки выводов.

Применение ультразвуковых (УЗ) колебаний в процессе присоединения кристаллов более характерно для технологии Flip-Chip [2], однако может использоваться для обеспечения более качественного слоя эвтектики или паяного соединения. Процессы бесфлюсовой пайки наиболее важны при сборке электронных устройств и приборов, где требуется исключить применение флюсов, поскольку продукты их разложения способствуют развитию коррозионных процессов, при этом ухудшаются рабочие характеристики ИС, снижаются надежность и долговечность электронной аппаратуры.

При использовании УЗ колебаний для пайки кристаллов возникают определенные трудности, связанные с выбором частоты и амплитуды колебаний, устранением механического воздействием на кристаллы, дозированием припоя и др. Проведено моделирование механических напряжений, возникающих в кристаллах ИС при УЗ монтаже на подложку. Поэтапное создание модели УЗ технологической системы монтажа проводилось с применением пакета программ

SolidWorks. В результате моделирования в ANSYS WorkBench получена картина распределения механических напряжений в УЗ системе и рабочей области монтажа (рис. 1).

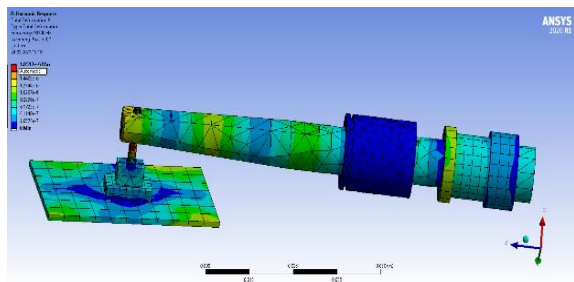


Рисунок 1 – Распределение механических напряжений в кристалле и УЗ системе

На основании моделирования получены зависимости амплитуды колебаний от частоты, которые представлены на рис. 2. Определена резонансная частота УЗ технологической системы монтажа кристаллов, которая составила 94,5 кГц.

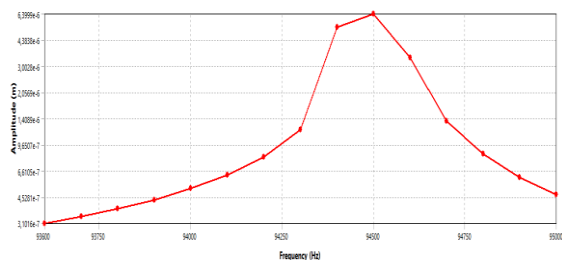


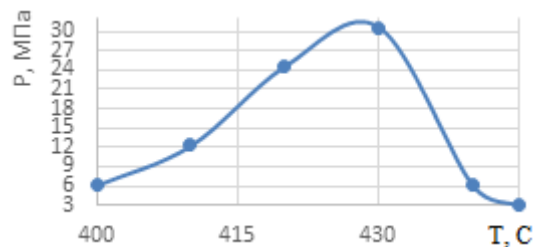
Рисунок 2 – АЧХ колебаний УЗ системы

Результаты моделирования показали, что преимущественно механические напряжения возникают в области инструмента для захвата кристалла и в области пакетного пьезоэлектрического преобразователя.

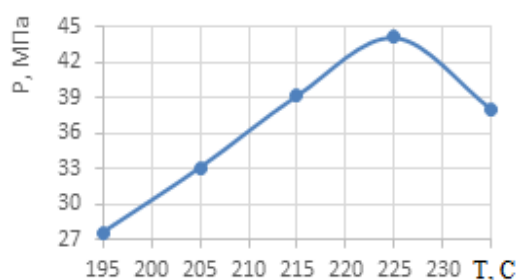
Вибрационный монтаж кристаллов в корпусе ИС проводился на установке настольного типа ЭМ-4075А-1 ОАО «ПЛАНАР-СО» при температурах 400–445 °С и частотах 2–9 Гц. Для проведения УЗ пайки данная установка дополнена УЗ генератором и УЗ технологической системой монтажа.

Анализ экспериментальных данных показал, что прочность соединения растет с повышением температуры вплоть до 430 °С, а с дальнейшим повышением температуры пайки начинается ухудшение качества монтажа вследствие экзотермических процессов (рис. 3, а). При пайке с

использованием УЗ колебаний наблюдается улучшение качества соединения вплоть до температуры в 225 °С, далее качество ухудшается (рис. 3, б). Для решения этой проблемы необходимо проводить процесс в среде с инертным или формирующим газом.



а



б

Рисунок 3 – Зависимости усилия на сдвиг кристалла от температуры пайки: а) вибрационной, б) с УЗ колебаниями

Использование УЗ колебаний при эвтектической пайке позволяет получать достаточно надежные соединения кристаллов с корпусом с малой областью монтажа и уменьшить температуру процесса присоединения кристалла почти в 2 раза.

Увеличивая частоту колебаний до 66 и выше кГц, можно снизить амплитуду колебаний инструмента до 1–2 мкм при интенсивности колебаний, достаточных для разрушения оксидных пленок.

Литература

1. Зенин, В. В. Монтаж кристаллов и внутренних выводов в производстве полупроводниковых изделий / В. В. Зенин, В. А. Емельянов, В. Л. Ланин. – Минск : Интегралполиграф, 2015. – 380 с.
2. Ланин, В. Л. Электромонтажные соединения в электронике. Технологии, оборудование, контроль качества / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2013. – 406 с.

УДК 621.9.22

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭСТЕТИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ЮВЕЛИРНЫХ КАМНЕЙ Луговой В.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для улучшения художественной ценности ювелирных изделий используют различные дизайнерские приемы и технические способы. Одним из них является способ улучшения вставок из ювелирных камней, который достигается дизайнерским решением использовать особые природные формы минералов, нанесение на камни покрытий, облагораживание камней, инкрустирование природных и синтетических материалов и пр. Цель работы заключается в изменении цветовой окраски камней, имеющих недостаточные эстетические качества. Результат достигается использованием физическими, химическими и механическими способами переработки исходного сырья, а также дизайнерскими приемами, которые позволяют усилить светоотражающие и цветовые характеристики ювелирных камней.

Ключевые слова: ювелирные изделия, природные и синтетические камни, эстетические качества.

METHODS OF IMPROVING THE AESTHETIC QUALITIES OF JEWELRY STONES Lugovoj V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Various design techniques and technical methods are used to improve the artistic value of jewelry. One of them is a way to improve inserts from jewelry stones, which is achieved by a design decision to use special natural forms of minerals, coating stones, ennobling stones, inlaying natural and synthetic materials, etc. The purpose of the work is to change the color coloration of stones that have insufficient aesthetic qualities. The result is achieved by using physical, chemical and mechanical methods of processing raw materials, as well as design techniques that enhance the reflective and color characteristics of jewelry stones.

Key words: jewelry, natural and synthetic stones, aesthetic qualities.

*Адрес для переписки: Луговой В.П., пр.Независимости,65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lyhavuypr@mail.ru*

Ювелирные украшения содержат различные по размеру, форме и цвету вставки из драгоценных и недрагоценных камней. Красота подобных украшений во многом зависит от эстетических качеств самих камней и от их гармоничного сочетания с конструктивной основой и декором металлической части. Важнейшими факторами, определяющими красоту камней, являются их оптические свойства, текстура и цветовая окраска. Однако не всегда камни в своем первоначальном состоянии пригодны для художественного оформления ювелирных украшений.

Обработка ювелирных камней включает шлифование кабошонов, огранка драгоценных и самоцветных камней, резьба по камню гемм и инталий.

На мировом рынке испытывают все возрастающую потребность в современных украшениях с драгоценными камнями, что вызывает потребность в увеличении объемов производства ограненных вставок из природных минералов. Однако наряду с красивой окраской очень часто встречаются природные бесцветные, не имеющие окраски минералы, которые не используются ювелирами из-за недостаточной окраски и прочих эстетических качеств.

Для улучшения художественной ценности ювелирных изделий используют различные дизайнерские приемы и технические способы,

позволяющие повысить их эстетических качества путем использования особых природных форм, нанесения покрытий, облагораживания камней, инкрустирования природных и синтетических материалов и пр.

Использование особых природных форм, текстуры, расцветки и текстуры природных минералов позволяет повысить эстетические качества украшений, во много раз усиливая восприятие красоты ювелирных украшений. К числу минералов с таким свойствами можно отнести камни с изменяющимися окрасками: турмалин, агат, аметист, опал, малахит, сподумен, лабрадорит, тигровый глаз и многие другие. Такие приемы демонстрируют возможность реализации творческих замыслов дизайнеров при создании украшений особой красоты с тщательно подобранными вариантами расцветки ювелирных камней.

Технологии инкрустирования камней ставят целью имитировать природные минералы, прорастающие в других камнях, которые называют включениями, инклюзиями или инкрустациями. Привлекательность таких редких камней вызвала потребность в разработке технологий для искусственной имитации инкрустаций, образованных из природных или синтетических камней. Технологии по термическим условиям образования инкрустаций можно разделить на «холодные» и «горячие». Технология изготовления за-

ключается в склейке распиленных заготовок эпоксидной смолой и последующей огранке полученного трехцветного составного камня (рис.1). Метод «горячей» инкрустации заключается в внесении инклюзии выдерживающей тепловую обработку (например, фианитов различных цветов и пр.) в инкрустируемую основы из стекла различных цветов при высокой температуре до 1200 °С.



Рисунок 1 – Вставка, составленная из трех минералов

Методы облагораживания (модификации) камней позволяет рационально использовать некондиционный материал путем улучшения внешнего вида и технологических свойств без изменения химического состава камней. Распространенные способы модификации можно объединить на два вида: физическим и химическим воздействием.

Физические способы облагораживания делятся на три группы: пропиткой химически инертными веществами, термообработкой камней и обработка камней под высоким давлением. Первый способ позволяет изменить окраску, увеличить твердость и плотность камней, усилить прозрачность и декоративные свойства таких камней пористый опал-гидрофан. Отжиг ювелирных камней проводят в специальной печи. Второй способ применяют исключительно для необработанных камней во избежание возможного растрескивания при термическом нагревании материалов с низким коэффициентом теплового расширения. Цветовая окраска камней изменяется при действии высоких температур. Обработка под высоким давлением сопровождается уплотнением поликристаллических материалов (бирюза), проявления эффекта опалесценции (кварц, корунд).

Химические способы облагораживания камней, как правило, применяют для модификации пористых камней. Химическая пропитка химическими веществами сопровождается образованием новых веществ, изменяющих химический состав, окраску и механические свойства. Наиболее известным является старинный способ окрашивания агатов водным раствором сахара с последующим его обугливанием концентрированной серной кислотой, который приводит к контрастам черно-белого рисунка минерала. Агаты поддаются химической пропитке также

растворами солей хрома и железа, окрашиваясь в широкий спектр цветов.

К новым способам окрашивания камней следует отнести ряд современных методов с использованием инновационной технологии: ионизирующего излучения и обработка лазером. *Ионизирующее облучение* применяется для изменения цвета таких ювелирных камней как алмаз, топаз, кварц, берилл-максис. Камни подвергаются воздействию одного или нескольких типов излучений: ультрафиолетового, рентгеновского, гамма-излучения, либо воздействию потока энергетических частиц: электронов, протонов, нейтронов, альфа-частиц. Важным параметром процесса облагораживания является доза облучения. С помощью облучения можно добиться практически любой окраски топаза – бесцветной, зеленоватой, коричневой, розовой.

Обработка лазером начата с 1970-х для облагораживания темных алмазов с включениями. Незаметное отверстие прожигается лазером, после чего включение либо испаряется, либо вытравливается кислотой.

Кроме перечисленных методов облагораживания существуют и более простые приемы, такие как подкладка фольги, отбеливание, покрытие лаками и эмалями и др. Некоторые разновидности камней можно подвергать отбеливанию. Таким образом, окрашивается черный коралл в красивый золотистый цвет в перекиси водорода; коричневый тигровый глаз можно осветлить до медового при помощи хлорного отбеливателя и насыщенной щавелевой кислоты.

В промышленных масштабах облагораживания камней осуществляют многие известные компании, такие как Signity Gems (США) и Leslie, являющиеся дочерней компаний фирмы Swarovski, австрийская компания Thermal Color Fusion (TCF), шриланкийской компании Sithy Gems & Lapidary, фирмой Azotic Coating Technology, Inc. (США) и др. В России освоена технология окрашивания топаза в оранжевый и оранжево-желтый цвета с коммерческим названием – «Мандарин-топаз», которой занимается компания «Соколов» совместно с Gunter Meelis E.K.

Литература

1. Коновалов, Н. П. Использование природных форм кристаллов турмалина для дизайна ювелирных изделий / Н. П. Коновалов, А. Н. Коновалова // Дизайн. Теория и практика. – 2013. – С. 70–76.
2. Дормидонтова, М. А. Особенности применения топазов с покрытием в ювелирных изделиях / М. А. Дормидонтова // Дизайн теория и практика – 2015. – Вып. 21.
3. Генеральченко, П. С. Инкрустирование природных и синтетических материалов по принципу «камень в камень» / П. С. Генеральченко, Р. М. Лобачкая // Дизайн теория и практика. – 2015. – Вып. 21.

УДК 621.9.22

ВЯЗАННЫЕ И ПЛЕТЕННЫЕ ЮВЕЛИРНЫЕ УКРАШЕНИЯ ИЗ ПРОВОЛОКИ

Луговая И.С., Луговой В.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Статья посвящена некоторым аспектам изготовления украшений из проволоки, которые изготавливают вязанием и плетением. Их отличает сравнительно малый вес, невысокая стоимость, изящество и простота изготовления. Указывается, что техника плетения известна с древних времен и в настоящее время находит свое возрождение. Украшения могут быть изготовлены из различных материалов: драгоценных и цветных металлов, которые должны удовлетворять технологическим требованиям и санитарно-гигиеническим нормам. Как правило, это изделия ручной работы, выполняемые с применением простых ручных инструментов: ригелей, спиц и крючков. Ассортимент подобных украшений разнообразен: это серьги, браслеты, кольца, подвески и пр.

Ключевые слова: вязание, плетение, ювелирные украшения.

KNITTED AND BRAIDED WIRE JEWELRY

Lugovaja I., Lugovoj V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. This article is devoted to some aspects of wire jewelry, which are made by knitting and weaving. They are distinguished by their relatively low weight, low cost, elegance and ease of manufacture. It is pointed out that the technique of weaving has been known since ancient times and is now finding its revival. Jewelry can be made of different materials: precious and nonferrous metals, which must meet technological requirements and hygienic norms. As a rule, these are handmade items made with the use of simple hand tools: ribs, spokes and hooks. The assortment of such jewelry is diverse: earrings, bracelets, rings, pendants, etc.

Keywords: knitting, weaving, jewelry.

*Адрес для переписки: Луговой В.П., пр.Независимости, 65, г.Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lyhavuyr@mail.ru*

Изготовление украшений из проволоки известно еще с древних времен, с тех пор научились получать проволоку. Техника плетения из проволоки возникла в Египте примерно за 3 тыс. лет до н.э., в Шумере она использовалась в 2600 г. до н.э. для изготовления золотых и серебряных лент которыми украшали свои прически придворные дамы. Со временем это ремесло распространилось в Передней Азии и через Константинополь дошло до Европы.

Ювелирные и бижутерийные украшения отличаются разнообразием интересных дизайнерских решений и низкой стоимостью. Одной из разновидностей исполнения ажурных украшений являются, изделия выполненные из проволоки вязанием или плетением (рис. 1).



Рисунок 1 – Изделия из плетеной и вязаной проволоки

Они отличаются особой легкостью, изяществом, изысканностью и воздушностью.

По красоте они не уступают ювелирным украшениям, изготовленным из монолитных металлов. Исходным материалом для плетения и вязания служит проволока из различных металлов, соответствующих технологическим требованиям и санитарным нормам.

Могут быть изготовлены из благородных металлов, так же и из цветных металлов. Проволока должна иметь необходимые физико-механические и химические свойства, обладать эксплуатационной долговечностью и при этом соответствовать эстетическим требованиям и замыслу дизайнера. Этим требованиям соответствуют проволоки из сплавов золота и серебра, медных, алюминиевых, титановых и редкоземельных металлов и сплавов, которые обладают высокой пластичностью и технологичностью, стойкостью к коррозионному воздействию, прочностью, твердостью, упругостью, блеском и благородным цветом. Особую красоту изделия из неблагородных металлов приобретают после нанесения серебряного покрытия.

Технологию плетения и вязки можно разделить на три этапа:

- подготовка заготовки из проволоки;
- вязание (плетение);
- отделочные операции.

Технология изготовления проволоки из драгоценных металлов состоит из предварительной

прокатки и волочения исходной заготовки до требуемого размера поперечного сечения с промежуточными отжигами. Для плетения и вязания проволоки из недорогих металлов может быть использована проволока, выпускаемая металлургической промышленностью и при необходимости проволоченная до требуемого диаметра.

Вязание может быть выполнено вручную подобно традиционному вязанию из ниток, либо механизировано на специальных вязальных станках. Диаметр крючка для вязания зависит от толщины проволоки и плотности вязки. Техника вязания косичкой выполняется так же, как и при вязании обычных ниток. Вязание проволоки позволяет получить заготовки в виде спирали или трубок различного диаметра (рис. 3). После вязки полоса складывается вдвое, что придает изделию объемность, а также необходимую жесткость сохранения формы без деформаций.

Применяют различные приемы плетения и вязки для ювелирных украшений. Кольчужное плетение, французскую вязку и т.д.

Для ручного вязания проволоки применяют различные техники исполнения, среди которых вязание крючком является одним из самых популярных.

Ручное плетение имеет различные вариации исполнения (рис. 2). Они могут быть выполнены в виде плетеных цепей, кольчуги, плетеной ткани и трубок. Особую привлекательность представляют собой современные украшения для ушей – каффы.



Рисунок 2 – Кольчужное и тканное плетение

Изделия изготавливают из проволоки диаметром 0,2–2,0 мм.

Проволока для плетения различается по жесткости на мягкую, полужесткую и жесткую в зависимости от вида материала и механических свойств. Пример плетения проволоки в трубку на ригеле и ажурных изделий, плетением через спицы приведен на рис. 3. Такой прием позволяет получить легкие пустотелые ажурные украшения, высокие эстетические качества.

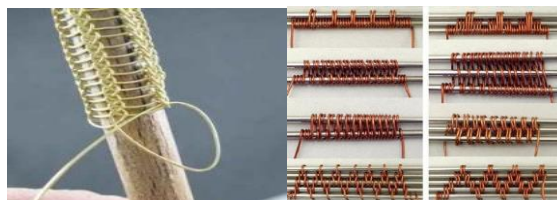


Рисунок 3 – Приемы плетения проволоки

Кольчужное плетение – является одним из наиболее известных видов работ. Его использовали еще в средние века для изготовления кольчуг. Кольчужным плетением можно получать плоские и объемные украшения (рис. 4).

К достоинствам вязанных и плетеных украшений из драгоценных материалов следует отнести невысокую материалоемкость так как затрачивается меньшее количество драгоценного материала и относительную дешевизну по сравнению с литыми или штампованными украшениями.



Рисунок 4 – Украшения с кольчужным плетением

К машинным способам плетения относятся ювелирные цепочки различных видов плетения, полученные на специальных станках-автоматах.

Отделочные операции необходимы для удаления оксидных пленок с поверхности изделий и придания блеска. Полирование производят на фетровых полировальных кругах с использованием абразивных паст до достижения требуемого блеска. Изделия обезжириваются в щелочном растворе, промываются и сушатся. После этого их отбеливают в слабом растворе серной кислоты или в растворе лимонной кислоты и промывают.

Широкое распространение техника плетения и вязания украшений из проволоки нашла при изготовлении бижутерийных украшений. Особую привлекательность такие украшения приобретают, в том случае когда содержат вставки из прозрачных камней.

УДК 621.315.592.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ InP

Манего С.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследовано влияние физико-технологических факторов на структурное совершенство приповерхностных слоев подложек фосфида индия. Анализ влияния преэпитаксиального процесса подготовки подложек InP проводился методом дифракции быстрых электронов на отражения и по измерению интегральной интенсивности длинноволновой полосы (1,08 эВ) и коротковолновой полосы (1,41 эВ) люминесценции. Установлено, что минимальные нарушения приповерхностных слоев наблюдались при парциальных давлениях фосфина $(3-5) \cdot 10^2$ Па, в температурном диапазоне 400–960 К.

Ключевые слова: подложка фосфида индия, электронограммы, интенсивность люминесценции, приповерхностные слои.

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF PHYSICAL AND TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE STRUCTURAL PERFECTION OF NEAR-SURFACE LAYERS InP

Manego S.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The influence of physical and technological factors on the structural perfection of the near-surface layers of indium phosphide substrates is investigated. The influence of the preepitaxial process of preparation of InP substrates was analyzed by fast electron diffraction on reflections and by measuring the integral intensity of the long-wavelength band (1.08 eV) and short-wavelength band (1.41 eV) luminescence. It was found that minimal disturbances of the near-surface layers were observed at partial pressures of phosphine $(3-5) \cdot 10^2$ Pa, in the temperature range 400–960 K.

Key words: indium phosphide substrates, electronograms, luminescence intensity, near-surface layers.

Исследование физических свойств твердых растворов соединений АППВ в последние годы показывают, что гомогенность твердых растворов существенно определяется условиями их получения. Формирование нано-, микро- и макронеровностей обусловлено как предварительной подготовкой подложки, на которой проводится эпитаксия, условиями проведения и процессами окончания эпитаксии, так и условиями последующих термических обработок. В ранее проведенных исследованиях отмечалось влияние на люминесцентные и электрофизические свойства твердых растворов соединений АППВ процессов газовой очистки, скорости и атмосферы, в которой происходят процессы охлаждения эпитаксиальных структур от температуры эпитаксии до комнатной. Однако, влияние процесса начальной стадии эпитаксии не рассматривалось. Кроме преэпитаксиального процесса на формирование и рост неоднородностей в многокомпонентных твердых растворах существенную роль оказывают такие физико-технологические факторы как: соотношение газовых потоков гидридов и хлоридов, присутствие неконтролируемых примесей в реакторе, степень взаимодействия хлористого водорода с металлами III группы в источнике и т.д. Полное и глубокое рассмотрение всех физико-технологических факторов, определяющих образование и рост неоднородностей в многокомпонентных твердых растворах соединений

АППВ, весьма сложен, что заставляет нас ограничить круг рассматриваемых вопросов данной проблемы.

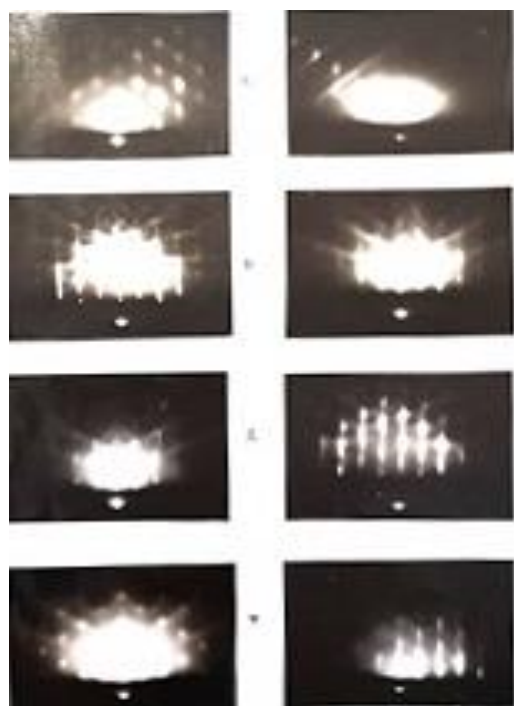
Известно, что термическое воздействие на полупроводниковые материалы, особенно соединений АППВ, приводит к существенному изменению структуры их приповерхностных слоев [1]. Поэтому, процесс загрузки пластин в реактор из предростовой камеры и температурно-временные режимы хранения полупроводниковых подложек в предростовой камере имеют определяющее значение для последующего роста эпитаксиальных слоев твердых растворов. Для исследования влияния предростовой подготовки на структуру приповерхностных слоев фосфида индия использовались подложки фосфида индия марки ФИЭТ-1, ориентированные в плоскости $(100) \pm 2^\circ$. Концентрация носителей заряда подложек была $\sim 10^{17}$ см⁻³. Предварительно подложки фосфида индия обрабатывались механически, с последующим удалением верхнего слоя (5–6 мкм) химико-динамическим травлением. Термическая обработка фосфида индия проводилась в предростовой камере реактора в течение 10 мин с плавным изменением температуры от 400 до 950 К в атмосфере водорода и фосфина, парциальное давление которого изменялось от $1,25 \cdot 10^2$ до $19,1 \cdot 10^2$ Па.

Структурное совершенство приповерхностных слоев фосфида индия исследовалось на

электронографе ЭМР-102 (метод дифракции быстрых электронов на отражение) и по измерению интегральной интенсивности различных полос люминесценции при послойном снятии приповерхностного слоя. Анализ электронограмм, полученных от образцов, отожженных при различном парциальном давлении фосфина, показал, что по кристаллическому совершенству их можно разделить на несколько групп (рис. 1).

К первой группе относятся образцы, у которых на электронограммах наблюдается правильная сетка точечных рефлексов от решетки фосфида индия и Кикучи-линии. Структура поверхностного слоя таких образцов мозаична, разориентировка блоков (2–3)°, структура более глубокого слоя совершенна, кристаллографические плоскости строго параллельны.

Ко второй группе относятся образцы, у которых на электронограммах наблюдались Кикучи-линии и сетка штрихов. Образцы обладали волнистым профилем поверхности и искаженной структурой поверхностного слоя. Структура более глубоких слоев была аналогична образцам первой группы.



$a - 1,9 \cdot 10^2$ Па; $b - 2,5 \cdot 10^2$;
 $v - 3 \cdot 10^2$; $z - 3,5 \cdot 10^2$; $d - 5,3 \cdot 10^2$; $e - 6,3 \cdot 10^2$;
 $ж - 7,1 \cdot 10^2$; $з - 10,5 \cdot 10^2$

Рисунок 1 – Парциальные давления фосфина в предростовой камере:

К третьей группе были отнесены образцы, на электронограммах которых наблюдается сетка размытых штрихов, Кикучи-линии не проявляются. Профиль поверхности этих образцов волнистый, структура поверхностного слоя искажена, кристаллографические плоскости не параллельны.

Зависимость изменения отношения интегральных интенсивностей краевой полосы люминесценции образцов до и после отжига в предростовой камере от давления фосфина представлена на рис. 2, а. Обнаружено, что отношение интегральных интенсивностей краевой полосы люминесценции после термической обработки (I) и до термического отжига (I_0) резко возрастает при увеличении парциального давления, при плавном изменении температуры подложки от 400 до 950 К в приповерхностных слоях фосфида индия формируется слой с повышенной концентрацией дефектов, образующийся в результате нестехиометрического разложения фосфида индия. Глубина залегания этого слоя 0,1 мкм, а толщина – 0,1 мкм. Таким образом, из данных электронограмм и люминесценции видно, что при парциальных давлениях фосфина ($P > 0,3$ кПа) в предростовой камере, наблюдалась минимальная термическая деградация подложек фосфида индия. Кроме того, следует отметить, что недостаток фосфина сильнее сказывается на степень деградации подложки фосфида индия, чем его избыток.

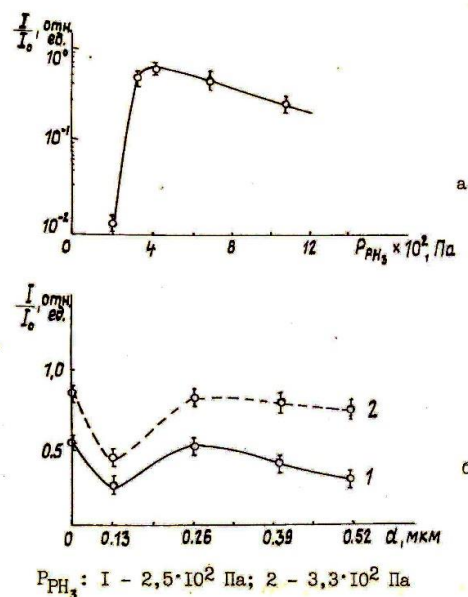


Рисунок 2

Необходимость защиты поверхности подложек фосфида индия от деградации в начальный период эпитаксии, а также создание областей селективной эпитаксии потребовали разработки способов создания маскирующих покрытий. В качестве маскирующих покрытий использовались пленки двуокиси кремния, полученные пироэлектрическим разложением тетраэтоксисилана при температуре 603 К и комбинированные пленки с подслоем собственного окисла, полученного как химическим окислением, так и анодным окислением. Определение степени деградации приповерхностных слоев, после нанесения маскирующего покрытия про-

водилось люминесцентным методом. Для этого после соответствующей обработки поверхности подложки фосфида индия, диэлектрическая пленка удалялась химическим травлением. Известно, что длинноволновые полосы (0,9–1,2) эВ в фосфиде индия связаны с вакансиями фосфора и индия [2]. Поэтому исследование зависимости изменения отношения интегральных интенсивностей длинноволновой полосы к краевой полосе от глубины снятия верхнего слоя подложки позволяет определить относительное изменение концентрации дефектов по глубине монокристаллического фосфида индия. Исследования фотолюминесценции при низком уровне возбуждения проводилась при 77 К. Источником возбуждения служил (He-Cd)-лазер с $\lambda = 441,6$ нм. Каждое измерение проводилось в 3–5 точках пластины и усреднялось. Люминесцентные исследования приповерхностных слоев фосфида индия показали, что наименьшее изменение величины отношения интегральной интенсивности длинноволновой полосы (1,08 эВ) к интегральной интенсивности краевой полосе (1,41 эВ) было у подложек, на которых формировались маскирующие покрытия пиролизическим разложением тетрээтоксисилана в присутствии травящих добавок (рис. 2, б). Сильное изменение величины $I_{дл}/I_{кр.}$ по глубине припо-

верхностного слоя связывается с процессом формирования пленки двуокиси кремния, т.е. происходит нестехиометрическое разложение фосфида индия, покрытого пленкой собственного окисла. Использование в процессе формирования диэлектрической пленки травящих добавок приводит к удалению верхних нестехиометрических слоев с последующей пассивацией поверхности фосфида индия пленкой двуокиси кремния.

Таким образом, исследование влияния физико-технологических факторов предростовой подготовки подложек фосфина индия на структурное совершенство приповерхностных слоев позволило установить оптимальные технологические режимы в предростовой камере. Минимальные нарушения приповерхностных слоев фосфида индия наблюдались при парциальных давлениях фосфина $(3-5) \cdot 10^2$ Па, в температурном диапазоне 400–960 К.

Литература

1. Марина, Л. И. Полупроводниковые фосфиды АПВВ и твердые растворы на их основе / Л. И. Марина, А. Я. Нашельский, Л. И. Колесник. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
2. Temkin, N. Photoluminescence study of melt grown InP / N. Temkin, W. A. Bonner // J. Appl. Phys. – 1981. – Vol. 51, № 1. – P. 397–401.

УДК 620.3

ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

Маркевич М.И.¹, Малышко А.Н.¹, Журавлева В.И.², Щербакова Е.Н.³

¹ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

²Военная академия Республики Беларусь

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В настоящей работе исследовались морфология поверхности наночастиц алюминия. Для получения материала использовали лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме. Исследования наночастиц алюминия, образовавшихся в результате лазерного воздействия, проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3.
Ключевые слова: морфология поверхности, наночастицы алюминия, лазерная абляция.

PRODUCTION OF ALUMINUM NANOPARTICLES BY LASER ABLATION

Markevich M.¹, Malyshko A.¹, Zhuravleva V.², Shcherbakova E.³

¹Physical-technical Institute of the NAS of Belarus

²Military Academy of the Republic of Belarus

³Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. In this work, we investigated the surface morphology of aluminum nanoparticles. To obtain the material, a yttrium aluminum garnet laser (LS-2134D) with a wavelength of 1064 nm, generating in a two-pulse mode, was used. Studies of aluminum nanoparticles formed as a result of laser exposure were carried out on a scanning electron microscope MIRA-3.

Key words: surface morphology, aluminum nanoparticles, laser ablation.

Адрес для переписки: Щербакова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Введение. Интерес к наноматериалам, особенно к наночастицам обусловлен существенным изменением их физических свойств по сравнению с массивными материалами, вызванный соизмеримостью вкладов в свободную энергию наночастицы, как объемной, так и поверхностной составляющей. Одним из актуальных методов использования импульсного лазерного излучения является получение металлических наночастиц в жидкостях. Преимуществами лазерной абляции материалов в жидкостях являются: относительная простота процесса, возможность получения готовых коллоидных растворов, возможность получения частиц малого размера.

Принципиально новый материал, который состоит из воды и наночастиц алюминия, был разработан для применения в двигателях и устройствах преобразования энергии [1–2].

Методика проведения исследований. В настоящей работе в качестве мишени использовали поликристаллический алюминий, а в качестве среды, в которой находилась алюминиевая мишень, применяли дистиллированную воду. При этом жидкость принудительно не перемешивали.

Для обработки материала использован лазер на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D) с длиной волны 1064 нм, генерирующий в двухимпульсном режиме (импульсы разделены временным интервалом 3 мкс, длительность импульсов 10 нс, частота следования импульсов 10 Гц, энергия одиночного импульса ~0,05 Дж).

Образованная в результате испарения алюминия под действием первого импульса абляционная плазма создает в приповерхностном слое область с повышенной температурой и пониженной плотностью частиц воздуха, что приводит к более полному использованию энергии второго импульса для лазерной абляции.

Образец обрабатывали лазерным излучением в интервале энергий 1000–1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин. Размеры образцов: толщина ~ 10 мм, длина – 30 мм, ширина – 12 мм.

В процессе получения и во время хранения водных растворов наночастиц алюминия не применяли поверхностно-активные вещества.

В настоящей работе исследовались морфология поверхности наночастиц алюминия. Исследования образцов проводились на растровом электронном микроскопе MIRA-3

Особенности микроскопа MIRA:

- катод Шоттки высокой яркости для получения отображений высокого разрешения, высокой кратности, с низким уровнем шумов;
- запатентованная трехлинзовая электронная оптика;
- система торможения пучка для накопления изображений с высоким разрешением при минимальных энергиях пучка (от 50 эВ);

- In-Beam – детекторы, встроенные в объективную линзу, позволяют получать изображения превосходного качества во вторичных и в отраженных электронах;

- высокая скорость сканирования вплоть до 20 нс/пкс;

- полностью автоматизированная процедура настройки микроскопа предусматривает, в частности, оптимизацию параметров электронной оптики;

- современное программное обеспечение.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 приведено полученное на микроскопе MIRA изображение морфологии частицы алюминия, образовавшейся в результате лазерного воздействия.

Размер частиц составляет от 20 нм до 0,6 мкм (рис. 1).

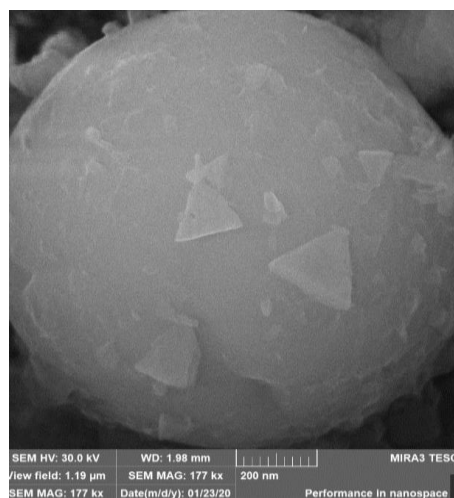


Рисунок 1 – Морфология поверхности частиц алюминия, образовавшихся в результате лазерного воздействия. Вложенная энергия 1500 Дж, время воздействия 25 мин

На поверхности крупной частицы размером 1000 нм видны более мелкие частицы. Необходимо отметить, что форма некоторых частиц имеет правильную кристаллографическую огранку.

При выходе эрозионной плазмы, образующейся под действием лазерного импульса в водную среду, происходит ее охлаждение со скоростью более 106 град/с.

Наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, как показывают исследования [3], могут быть, как кристаллическими, так и аморфными.

Процесс конденсации наночастиц может происходить по двум различным механизмам: пар-жидкость (п→ж) и пар-кристалл (п→к) [4–5].

В общем образовавшаяся по механизму п→ж наночастица может находиться в аморфном состоянии или в дальнейшем кристаллизоваться (частица имеют правильную геометрическую форму в виде треугольников) по механизму (ж→к) (рис. 1).

Выводы. Таким образом, в процессе проведенных исследований была изучена морфология поверхности наночастиц алюминия, полученных путем обработки лазером на алюмоиттриевом гранате (LS-2134D), определены размеры наночастиц.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что лазерная абляция в двухимпульсном режиме в интервале энергий 1000–1500 Дж при временах экспозиции от 10 до 25 мин является перспективным методом обработки для получения наночастиц алюминия.

Литература

1. Combustion of frozer nanoaluminium and water mixtures / G. A. Risha [et al.] // J. Propul. Power. – 2014. – Vol. 30, № 1. – P. 133–142.

2. Tappan Combustion of nanoaluminium and liquid water / G. A. Risha [et al.] // Proc. Combust. Inst, 2007. – Vol. 31, № 2. – P. 2029–2036.

3. Маркевич, М. И. Структурные превращения в тонких металлических пленках при импульсном лазерном воздействии / М. И. Маркевич, А. М. Чапланов // Вести Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-математических наук, 2016. – № 1. – С. 28–35.

4. Возможности получения наночастиц никеля в водной среде с помощью лазерного воздействия / В. К. Гончаров [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 2. – С. 206–210.

5. Формирование коллоидных растворов металлов в воде методом лазерной абляции / В. К. Гончаров [и др.] // Актуальные проблемы физики твердого тела. – 2009. – С. 381–382.

УДК 539.23

ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ АМФИФИЛЬНЫХ КИСЛОТ МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ

Мельникова Г.Б.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Беларусь

Аннотация. На поверхности кремния и наноструктурированных никелевых поверхностях методом Ленгмюра–Блоджетт сформированы пленки на основе перфторированных амфифильных кислот с добавлением различно количества наночастиц диоксида кремния. Проведены исследования морфологии и шероховатости поверхности полученных пленок методом атомно-силовой микроскопии. Установлено увеличение значений шероховатости пленок Ленгмюра–Блоджетт на кремнии с увеличением содержания наночастиц. Пленка Ленгмюра–Блоджетт из перфторированной кислоты с 1 мг наночастиц оксида кремния приводит к уменьшению шероховатости на наноструктурированных никелевых поверхностях. Полученные слои планируется применять для управляемого изменения смачиваемости поверхности.

Ключевые слова: перфторированные амфифильные кислоты, пленки, метод Ленгмюра–Блоджетт, атомно-силовая микроскопия.

FORMING OF FILMS BASED ON PERFLUORINATED AMPHIPHILIC ACIDS BY THE LANGMUIR – BLODGETT METHOD

Melnikova G.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Khabarava A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. Films based on perfluorinated amphiphilic acids with the addition of various amounts of silicon dioxide nanoparticles were formed on the silicon surface and nanostructured nickel surfaces by the Langmuir-Blodgett method. The morphology and surface roughness of the obtained films were studied by atomic force microscopy. An increase in the roughness values of Langmuir-Blodgett films on silicon with an increase in the content of nanoparticles has been established. Langmuir-Blodgett film of perfluorinated acid with 1 mg of silicon oxide nanoparticles leads to a decrease in roughness on nanostructured nickel surfaces. The obtained layers are planned to be used for controlled changes in the wettability of the surface.

Key words: perfluorinated amphiphilic acids, films, Langmuir-Blodgett method, atomic force microscopy.

Адрес для переписки: Лапицкая В.А., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Введение. Поверхности, образованные перфторированными цепями амфифильных соединений, одновременно обладают гидрофобными и липофобными свойствами. Поверхностное натя-

жение перфторалканов в среднем вдвое меньше, чем у алканов с аналогичной длиной цепи. Следовательно, перфторированные поверхностно-активные вещества в водном растворе способны

снижать поверхностное натяжение воды до гораздо более низких значений, чем их гидрогенизированные аналоги. Таким образом, фторированные поверхностно-активные вещества используются в качестве водо- и грязеотталкивающих покрытий [1–2]. Пленки Ленгмюра–Блоджетт (ЛБ) являются хорошо зарекомендовавшими себя модельными системами в области двумерной фундаментальной физики и достаточно хорошо изучены на примерах гидрогенизированных жирных кислот, спиртов, фосфолипидов и т. д. [3], в то время как фторированные амфифильные соединения требуют подробного изучения. Тем не менее, были предприняты важные попытки описать и интерпретировать фазовые переходы и молекулярную организацию в ЛБ-пленках нескольких перфторированных кислот, спиртов и фосфолипидов [4–5], а также амфифильных веществ с более сложной молекулярной структурой [6–7].

Материалы и методы. Для формирования пленок использовали раствор перфтороктадекановой кислоты ($\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$, 97 %, AlfaAesar) в гексафторбензоле (99 %, Sigma-Aldrich) с концентрацией 0,5 мг/мл. Наночастицы диоксида кремния (Sigma-Aldrich, $d = 10\text{--}20$ нм) добавляли в массовом соотношении 1 и 3 мг на 1 мл раствора перфторированной кислоты. Для равномерного распределения неорганических наночастиц в течение 15 мин растворы кислот обрабатывали ультразвуком.

Выделение пленок перфторированных амфифильных кислот проводили с использованием установки «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь). Поверхностное давление выделения пленки выбрали на основании экспериментально полученных изотерм «поверхностное давление – площадь на молекулу» в области образования наиболее плотного слоя пленки (фазовое состояние «твердая пленка»).

Гидрофилизацию кремниевых подложек, используемых для получения контрольных образцов, проводили в пероксидно-аммиачном растворе в течение 15 мин при температуре 80 °С.

Морфологию поверхности исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) Dimension FastScan (Bruker, США) со стандартным кремниевым кантилевером типа CSG10_SS (TipsNano, Россия), с радиусом закругления острия 10,4 нм и жесткостью консоли 0,51 Н/м, в режиме PeakForce QNM.

Результаты. На основании данных наноструктуры поверхности ЛБ пленок перфтороктадекановой кислоты показано формирование плотного слоя при поверхностном давлении, $\pi = 15$ мН/м. Введение наночастиц диоксида кремния приводит

к встраиванию наночастиц в формируемый монослой амфифильного соединения на поверхности воды. Поверхностное давление формирования плотного монослоя не изменяется. Площадь на молекулу при введении наночастиц уменьшается от значений 1,6 (для перфторированной кислоты) до 1,2 нм² (для композиционных пленок).

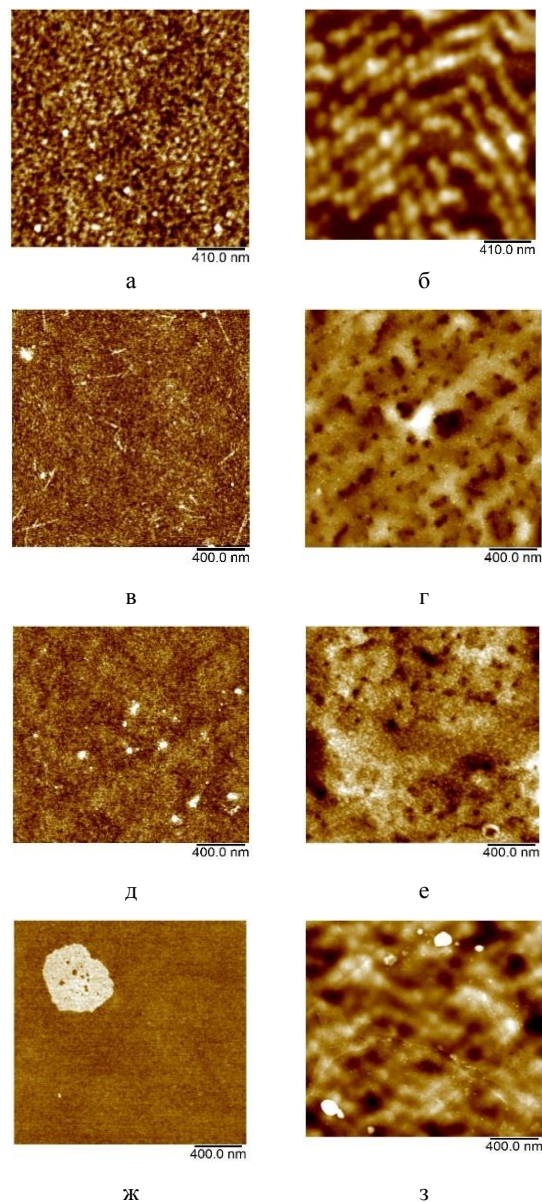


Рисунок 1 – Структура исходной поверхности кремния (а), наноструктурированной никелевой поверхности (б), ЛБ пленок $\text{CF}_3(\text{CF}_2)_{16}\text{CO}_2\text{H}$ (в, з) и композиционных с наночастицами оксида кремния 1 мг (д, е) и 3 мг (ж, з) на гидрофилизированных пластинах кремния (а, в, д, ж) и на структурированных никелевых поверхностях (б, з, е, з)

Следует отметить образование конгломератов диаметром 400 нм и более на поверхности композиционных ЛБ-пленок, полученных из растворов с содержанием наночастиц 3 мг на 1 мл кислоты (рис. 1).

Возрастают значения шероховатости ЛБ-пленок на кремнии с увеличением содержания наночастиц: R_a от 0,134 до 0,212 нм. В случае наноструктурированных никелевых поверхностей в результате формирования ЛБ-пленки перфторированной кислоты и с 1 мг наночастиц оксида кремния значения R_a уменьшаются от 4,79 до 2,49 и 1,94 нм, R_q – от 4,79 до 7,46 и 2,52 нм, что свидетельствует о формировании тонкого однородного слоя, который нивелирует шероховатость исходной поверхности. Содержание наночастиц в количестве 3 мг вносит дополнительный вклад в неоднородность поверхности, в результате чего шероховатость возрастает до исходных значений.

Сформированные монослои могут быть рекомендованы для получения защитных гидрофобных слоев на основе тонких ЛБ-пленок перфторированных кислот

Благодарности. Исследование было выполнено в рамках задания 3.03.3 ГПНИ «Конвергенция–2025» на 2021–2025 годы.

Литература

1. Kissa, E. Fluorinated Surfactants: Synthesis, Properties, Applications : 1st ed. / Kissa, E. – Marcel Dekker : New York, 1994.
2. Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Environment: Terminology, Classification, and Origins. Integr / R. C. Buck [et al.] // Environ. Assess. Manag. – 2011. – Vol. 7. – P. 513–541.
3. Kaganer, V. M. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers / V. M. Kaganer, H. Möhwald, P. Dutta // Rev. Mod. Phys. – 1999. – Vol. 71. – P. 779–819.
4. Structure of Langmuir Monolayers of Perfluorinated Fatty Acids: Evidence of a New 2D Smectic C Phase / P. Fontaine [et al.] // Molecules. – 2019. – Vol. 24. – P. 3590.
5. Spontaneous self-assembly of partially fluorinated bolaamphiphiles into ordered layered structures / J. Paczesny [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2012. – Vol. 14. – P. 14365–14373.
6. Kirsch, P. Modern Fluoroorganic Chemistry : 2nd ed. / Kirsch, P. – Wiley-VCH : Weinheim, 2004.
7. Bunn, C. W. Structure of molecules and crystals of fluorocarbons / C. W. Bunn, E. R. Lowells // Nature. – 1954. – Vol. 4429. – P. 549–551.

УДК 621.923.9

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГАЛТОВКИ ОТ УСЛОВИЯ ОБРАБОТКИ

Мирзоалиев А.И., Мирзоалиев И., Мамадназарова М.С., Имомов Н.Б.

*Таджикский технический университет им.академик М.С.Осими
Душанбе, Таджикистан*

Аннотация. В данной статье исследованы различные условия галтовки самоцветных камней. В том числе: сухая галтовка без абразива, сухая галтовка с добавлением абразива, галтовка в водной среде без абразива, галтовка в водной среде при добавление определенного количества абразива. Установлено, что на производительность процесса обработки наибольшее влияние оказывает кавитационное изнашивание материала. Предложено создать устройства создающие суперкавитационный поток, и обеспечивающий направленного его воздействия на обрабатываемую поверхность.

Ключевые слова: галтовка, абразив, заготовка, устройство, инструмент, загрузка.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF PRODUCTIVITY GALLERY FROM THE PROCESSING CONDITION

Mirzoaliev A., Mirzoaliev I., Mamadnazarova M., Imomov N.

*Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi
Dushanbe, Tajikistan*

Annotation. This article examines various conditions of gallery of semi-color stones. Including: dry galton without abrasive, dry gallery with the addition of abrasive, hacking in a water medium without abrasive, hacking in a water medium when adding a certain amount of abrasive. It has been established that cavitation wear of the material has the highest effect on the performance of the processing process. It is proposed to create devices creating a supercaviability stream, and ensures its directional effect on the treated surface.

Keywords: galton, abrasive, blank, device, tool, loading.

Галтовка является один из широко используемых технологических процессов. При изготовлении изделия из самоцветных камней наиболее широко распространен способ галтовки в барабанах с горизонтальной и наклонной оси вращения. При данном способе заготовки и абра-

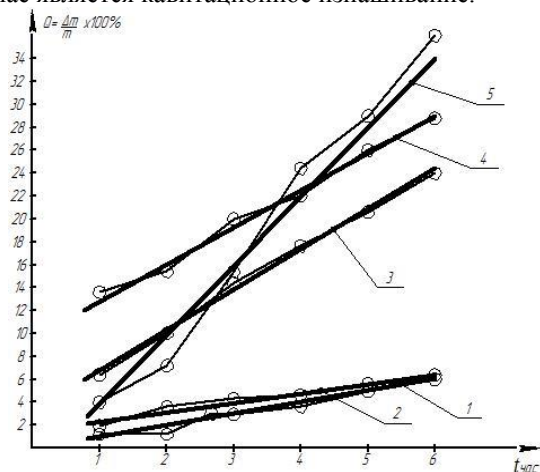
зивную массу загружают в барабан и производят обработку при вращение барабана с небольшой угловой скоростью. Можно производить как «сухую», так и «мокрую» обработку путем добавление жидкости в барабан [1]. Данный способ галтовки имеет низкую производительность. Ис-

следования показали, что производительность и качество обработки при изготовлении изделия из самоцветных камней можно существенно повысить использованием планетарно-центробежной обработки. Экспериментальные исследования процессов галтовки в барабанах с горизонтальной осью вращения и планетарно-центробежной галтовки показали, что добавление жидкости сильно влияет на производительность и качество галтовки в обоих процессах [2].

В качестве рабочей жидкости используют обычно водные растворы технического мыла с добавками кальцинированной соды, триэтаноламина, тринатрийфосфата, а также активных смазочных ОП-7 или ОП-10 и т.д.

Зона интенсивной обработки составляет незначительную часть объема загрузки, что является причиной неравномерного съема металла и нестабильности качественных характеристик поверхностей деталей. Продолжительность обработки при галтовке обычно определяется опытным путем [3].

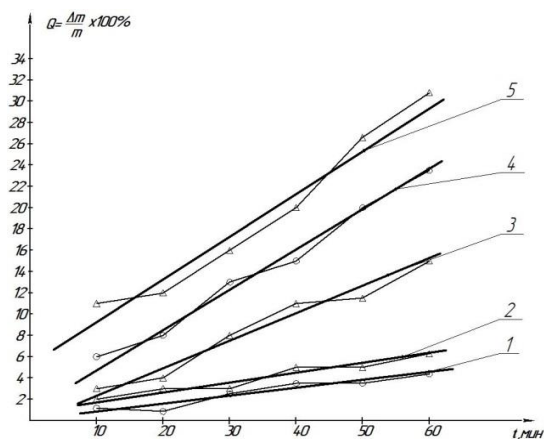
На графике рис. 1. и рис. 2. показаны зависимость величины съема от условия обработки при галтовке в барабанах с горизонтальной осью вращения и планетарно-центробежной обработке соответственно. Из графика рис. 1. видно, что производительность галтовки в водной среде на порядок выше, чем сухой галтовки. Производительность при сухой галтовке с добавлением из расчета 10 г/кг абразива немного выше, чем при сухой галтовке без абразива. При добавлении воды в количестве, покрывающем заданный объем загрузки, производительность процесса возрастает более чем в 5 раз. Основной причиной возрастания производительности в данном случае является кавитационное изнашивание.



1 – сухая галтовка без абразива; 2 – сухая галтовка с добавлением абразива 10 г на 1 кг камня; 3 – галтовка в водной среде без абразива; 4 – галтовка в водной среде при 50 г на 1 кг абразива; 5 – галтовка в водной среде при 10 г на 1 кг абразива

Рисунок 1 – График зависимости величины съема от условия обработки при барабанной галтовке

При центробежно-планетарной галтовке барабана, в которые загружаются заготовки из самоцветных камней, получают сложное движение: вращение вокруг своей оси и одновременное вращение вокруг центральной оси. На детали при обработке действуют центробежная переносная сила инерции, центробежная относительная сила инерции от вращения стакана вокруг собственной оси, сила трения со стенками барабана и Кориолисова сила инерции.



1 – сухая галтовка без абразива; 2 – сухая галтовка с добавлением абразива 5 г/кг; 3 – галтовка в водной среде без абразива; 4 – галтовка в водной среде с добавлением 5 г/кг абразива; 5 – галтовка в водной среде с добавлением 20 г/кг абразива

Рисунок 2 – График зависимости величины съема от условий обработки при планетарно-центробежной галтовке

Исследования зависимости производительности от различных факторов приведены на графике рис. 2. На графике приведены результаты экспериментального исследования зависимости производительности – Q от продолжительности обработки – t в минутах.

Как видно из графика (рис. 2), производительность обработки в водной среде без абразива даже выше, чем при обработке всухую с абразивом.

Основной причиной возрастания производительности в водной среде является явление кавитации. Кавитационное изнашивание в данном случае превышает абразивное.

Как известно, во многих случаях, особенно при эксплуатации насосов, гребных винтов, гидротурбин и др., по причине кавитации происходит износ и разрушение (или потеря работоспособности) узлов и механизмов. В этих случаях принимают меры для снижения кавитации.

Отсюда можно сделать вывод, что съем материала с поверхности деталей происходит в следствии абразивного и кавитационного износа.

Явление кавитации в данном случае полезен, так как повышает производительность обработки и необходимо принять меры для ее усиления. При обработке материалов задача сводится к созданию

суперкавитационного потока, его устойчивому содержанию и обеспечению направленного его воздействия на обрабатываемую поверхность. В качестве среды для создания кавитации можно использовать любую жидкость. Чем меньше температура кипения жидкости, тем эффективнее она работает. Другие требования к жидкости это – нетоксичность, несгораемость, низкая стоимость и доступность. Хотя есть целый ряд жидкостей с температурой кипения меньше воды, например: спирты, эфирные масла, керосин, бензин и т.д., но они не отвечают требованиям пожарной безопасности, токсичности и уступают по этим критериям обычной воде. Поэтому наиболее эффективной средой для обработки материалов является обычная вода. Главным преимуществом кавитационной обработки водой является отсутствие нагрева

обрабатываемых заготовок (выделяемое в процессе резки тепло сразу уносится водой).

Литература

1. Синкенес, Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней / Дж. Синкенес. – Москва : «МИР», 1989. – 415 с.
2. Кулаков, Ю. М. Отделочно-зачистная обработка деталей / Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков. – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
3. Галтовочный барабан : а. с. US 4605050 / В. А. Грачев, Н. А. Горелов, Р. В. Васин. – Оpubл. 23.05.1991.
4. Способ абразивной центробежно-планетарной обработки деталей и устройство для его осуществления : а. с. US 992172 / И. Е. Бондаренко [и др.]. – Оpubл. 30.01.1983.

УДК 692.7

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ

Монич С.Г., Бобоев А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе перечислены требования, предъявляемые к стоматологическим имплантатам, среди которых наибольшее внимание отведено усталостной прочности, приведено описание электроэрозионного модифицирования поверхности стоматологических имплантатов, описана схема испытания таких имплантатов на усталостную прочность согласно действующего стандарта.

Ключевые слова: стоматологический имплантат, электроэрозионное модифицирование, усталостная прочность, выносливость, испытание.

THE RELEVANCE OF TESTING DENTAL IMPLANTS AFTER ELECTRIC DISCHARGE MACHINERY FOR FATIGUE STRENGTH

Monich S., Boboev A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. This paper lists the requirements for dental implants, among which the greatest attention is paid to fatigue strength, describes the electroerosion modification of the surface of dental implants, describes the scheme of testing such implants for fatigue strength according to the current standard.

Key words: dental implant, electroerosion modification, fatigue strength, endurance, testing.

*Адрес для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by*

Имплантат – это изделие из биосовместимого материала, которое вводится в организм хирургическим путем для замены какого-либо органа или его части и выполняет утраченную этим органом функцию [1]. На сегодняшний день существует большое разнообразие конструкций имплантатов: эндопротезы тазобедренного, коленного, голеностопного, локтевого суставов.

Наиболее широкое применение нашли стоматологические (дентальные) имплантаты, предназначенные для устранения дефектов зубных ря-

дов и выполняющие роль опоры зуба для последнего протезирования (рис. 1) [2].



Рисунок 1 – Форма стоматологических имплантатов

Через определенное время (3-5 месяцев) после вживления имплантата, на него устанавливается коронка или мостовидный протез требуемой конструкции и при этом исключается травмирование соседних зубов.

Основными требованиями, предъявляемыми к конструкции и материалам имплантатов, являются следующие [3]:

- клинико-биологические, определяемые особенностями взаимодействия живых тканей с материалами имплантатов;
- биологические, связанные с токсикологическими, канцерогенными и коррозионными свойствами материала имплантата;
- физико-механические свойства материала, в частности, высокая прочность, стойкость к истиранию, низкая теплопроводность, высокая рентгеноконтрастность, хорошая стерилизуемость, устойчивость к циклическим нагрузкам;
- конструкционные, позволяющие создавать эффективные и удобные протезы;
- технологические, определяемые особенностями обработки;
- экономические, определяемые стоимостью материала и затратами на производство имплантатов.

В настоящее время широко применяются различные способы окончательной обработки винтовой поверхности стоматологических имплантатов, среди которых высоко себя зарекомендовало электроэрозионное модифицирование.

В основе всех операций электроэрозионного модифицирования лежит явление электрической эрозии – направленное разрушение токопроводящих материалов в результате кратковременного теплового действия импульсных электрических разрядов между электродом-инструментом и заготовкой [4]. В результате воздействия единичного электрического разряда на поверхности заготовки образуется лунка, имеющая форму близкую к сферической. При воздействии серии разрядов поверхность приобретает кратерообразную форму с четко выраженными углублениями в виде множества перекрывающихся друг друга лунок. Именно за счет перекрытия лунок в результате многократного повторения импульсов происходит удаление металла по всей обрабатываемой поверхности заготовки, т.е. ее размерная обработка.

Установлено [4], что после электроэрозионного модифицирования поверхностный слой приобретает свойства, положительно влияющие на эксплуатационные показатели деталей. Так, увеличение твердости поверхности при сохранении вязкой сердцевины повышает износостойкость поверхности. Наличие на ней большого количества лунок благоприятно сказывается на условиях удержания смазки между трущимися поверхностями, особенно, в условиях граничной смазки. Эти лунки выполняют

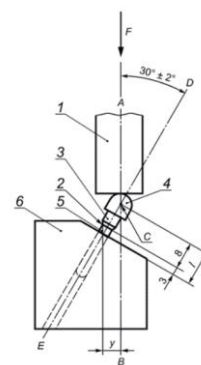
роль микрокарманов, за счет чего смазка гарантировано удерживается на поверхности.

Исследование механических свойств, в частности, прочностных характеристик материалов, относится к важным научным и прикладным задачам, стоящим перед предприятиями различных отраслей.

Как известно, под действием циклических напряжений в металлах и сплавах зарождаются и постепенно развиваются трещины, вызывающие в конечном итоге полное разрушение детали или образца [5]. Это разрушение особенно опасно потому, что может протекать под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести. Подсчитано, что более 80% всех случаев эксплуатационного разрушения происходит в результате циклического нагружения.

Испытания стоматологических имплантатов на усталостную прочность в настоящее время осуществляется согласно ГОСТ Р ИСО 14801-2012.

Согласно данного стандарта испытание следует проводить на образцах, которые представляют собой готовые изделия (т.е. на компонентах, которые подверглись такому же производственному процессу и стерилизации, что и изделие, которое планируют выпустить на рынок). Если изготовитель предполагает, что стерилизацию внутрикостного стоматологического имплантата будет выполнять врач перед операцией, то перед испытанием нужно выполнить стерилизацию, как указано в инструкциях по эксплуатации изготовителя. Однако если есть данные о том, что указанный метод стерилизации не влияет значительно на свойства всех материалов тестируемых образцов, тогда проводить стерилизацию перед испытанием не обязательно. Схема нагружения стоматологического имплантата при испытании на усталостную прочность приведена на рис. 2.



- 1 – устройство для прикладывания нагрузки;
 2 – номинальный уровень кости; 3 – соединительный компонент; 4 – полусферический нагружаемый элемент; 5 – тело стоматологического имплантата; 6 – держатель образца

Рисунок 2 – Схема нагружения стоматологического имплантата при испытании на усталостную прочность

Литература

1. Вильямс, Д. Ф. Имплантаты в хирургии / Д. Ф. Вильямс, Р. Роуф; пер. с англ. Е. В. Колпакова. – М. : Медицина, 1978. – 552 с.
2. Kramer, K.-H. Implants for surgery – a survey on metallic materials / K.-H. Kramer // Materials for Med. Engineering. – 1999. – Vol. 2. – P. 9–29.
3. Effects of implant surface microtopography on osteoblast gene expression / C. Massaki [et al.] // Clin-

cal Oral Implants Research. – 2005. – Vol. 16, № 6. – P. 650–656.

4. Модифицирование поверхности титановых имплантатов и ее влияние на их физико-химические и биомеханические параметры в биологических средах / В. В. Савич [и др.]; под науч. ред. В. В. Савича. – Минск : Беларус. навука, 2012. – 244 с.

5. Effect of dental implants diameter on fatigue performance Part II : Failure analysis / K. Shemtov-Yona [et al.] // Clin. Implant Dent. Relat. Res. – 2014. – Vol. 16. – P. 178–184.

УДК 615.82

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОБРАТНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА
Монич С.Г., Есьман Г.А., Галаваченко П.О.

*Белорусский национальный технический университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе приведен расчет геометрических параметров пьезокерамического излучателя обратной биологической связи ударно-волнового генератора. Работа датчика биологической обратной связи по точкам акупунктуры основана на законе Лоренца. Отмечено, что оптимальным вариантом работы составного преобразователя является размещение пьезоэлементов между узловой плоскостью и торцом отражающей накладки. При этом получают промежуточные усредненные условия по прочности пьезоматериала, КПД и стабильности работы преобразователя.

Ключевые слова: обратная связь, пьезокерамический излучатель, ударно-волновой генератор.

DETERMINATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF A PIEZOCERAMIC BIOLOGICAL FEEDBACK EMITTER OF A SHOCK WAVE GENERATOR

Monich S., Yesman G., Galavachenko P.

*Belarusian National Technical University
 Minsk, Belarus*

Abstract. In this article is carried out the calculation of the geometric parameters of a piezoceramic biological feedback emitter of a shock wave generator. The operation of the biofeedback sensor for acupuncture points is based on Lorentz's law. It is noted that the best option for the operation of a composite converter is the placement of piezoelectric elements between the nodal plane and the end of the reflecting plate. In this case, intermediate averaged conditions are obtained for the strength of the piezomaterial, efficiency and stability of the converter.

Key words: feedback, piezoceramic emitter, shock wave generator.

*Адрес для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: sgmonich@bntu.by*

Биологическая обратная связь позволяет контролировать эффективность проведения ударно-волновой терапии и регистрировать изменение электрических сигналов биотканей в результате активации обменных процессов [2–6, 8, 9].

Датчик биологической обратной связи выполнен в виде пьезокерамического излучателя и представляет собой пьезоэлемент, на который наклеена катушка индуктивности с множеством витков (рис. 1).

Работа датчика биологической обратной связи по точкам акупунктуры основана на законе Лоренца [7]. Биообъект излучает собственное магнитное поле. Если в это поле поместить движущуюся катушку индуктивности, в ней наведется ЭДС, которое можно измерить, предварительно усилив сигнал.

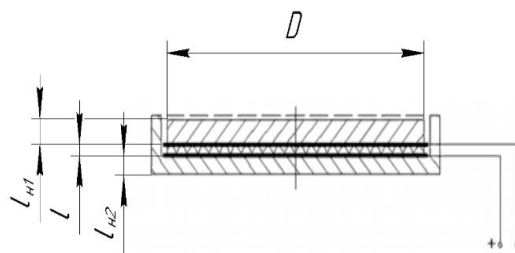


Рисунок 1 – Схема пьезокерамического преобразователя с пассивной накладкой

Длина волны, излучаемая преобразователем:

$$\lambda = \frac{c_3^D}{f} = \frac{4120}{1 \cdot 10^6} = 0,004 \text{ м.}$$

Рассчитаем размеры пьезокерамических накладок (рис. 1) [1]. Внешний диаметр:

$$D = \frac{20 \cdot \lambda}{4} = \frac{20 \cdot 0,004}{4} = 0,020 \text{ м.}$$

Площадь излучающей поверхности преобразователя:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,020^2 = 3,333 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Удельная акустическая мощность:

$$P_{\text{уд}} = \frac{P_{\text{ак}}}{S} = \frac{0,0005}{3,333 \cdot 10^{-4}} = 1,5 \text{ Вт/м}^2.$$

Волновое число в пьезокерамике:

$$K = \frac{2\pi f}{c_3^D} = \frac{2\pi \cdot 1000000}{4120} = 1525,045 \text{ м}^{-1}.$$

Волновое число в накладке:

$$K_1 = K_2 = \frac{2\pi f}{c_1} = \frac{2\pi \cdot 1000000}{5164} = 1217 \text{ м}^{-1}.$$

Толщина пьезокерамических пластин выбирается из условия:

$$\frac{\pi}{8K} < l < \frac{\pi}{3K};$$

$$\frac{\pi}{8 \cdot 1525,045} < l < \frac{\pi}{3 \cdot 1525,045} \text{ м.}$$

Примем $l = 0,0006 \text{ м}$.

Длина волны в материале накладки:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{c_2}{f} = \frac{5164}{1000000} = 0,005 \text{ м.}$$

Линейный размер тыльной накладки определяется из условия:

$$0,1\lambda_2 < l_{H2} < 0,2\lambda_2;$$

$$0,1 \cdot 0,005 < l_{H2} < 0,2 \cdot 0,005 \text{ м.}$$

Примем размер тыльной накладки: $l_{H2} = 0,001 \text{ м}$.

Определим отношение характеристических сопротивлений рабочей, тыльной накладок и активного элемента:

$$q_1 = q_2 = \frac{\rho_2 c_2 s_1}{\rho_3 c_3^D s} = \frac{2700 \cdot 5164 \cdot 1,178 \cdot 10^{-6}}{7200 \cdot 5164 \cdot 1,178 \cdot 10^{-6}} = 0,470.$$

Толщину рабочей накладки l_{H1} определяем из условия резонанса полуволнового преобразователя составного трехсекционного стержня:

$$\text{tg}(K_1 l_{H1}) = \frac{q_2 \text{tg}(K_2 l_{H2}) + \text{tg}(Kl)}{q_1 (q_2 \text{tg}(K_2 l_{H2}) \text{tg}(Kl) - 1)},$$

$$\text{tg}(K_1 l_{H1}) = 8,381.$$

Тогда толщина рабочей накладки:

$$l_{H1} = \left| \frac{\pi - \arctg(\text{tg}(K_1 l_{H1}))}{K_1} \right| = 0,0014 \text{ м.}$$

На эффективность работы преобразователя влияет положение пьезоэлементов в системе (в узловой плоскости, в пучности или при промежуточном положении между узлом и пучностью колебаний), толщина пьезоэлементов, соотношение удельных волновых сопротивлений (произведения плотности материала на скорость распространения УЗ колебаний в нем) пьезоэлементов и накладок. Оптимальным вариантом работы составного преобразователя является размеще-

ние пьезоэлементов между узловой плоскостью и торцом отражающей накладки. При этом получаются промежуточные усредненные условия по прочности пьезоматериала, КПД и стабильности работы преобразователя.

Определим положение нейтрального сечения полуволнового преобразователя из уравнения:

$$\text{tg}(K_1 l_{H1}) \cdot \text{tg}(K x_0) = \frac{\rho c_3^D s}{\rho_1 c_1 s_1} = \frac{1}{q_1}.$$

Решив его с помощью пакета MathCad, получим следующее значение для положения нейтрального сечения полуволнового преобразователя:

$$x_0 = \frac{1}{K_1} \arctg\left(\frac{1}{q_1 \text{tg}(K_1 l_{H1})}\right) = -2,043 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Отрицательный результат говорит о том, что узловое сечение проходит не через пьезокерамические пластины, а через рабочую накладку.

Общая длина преобразователя:

$$L = l_{H1} + l + l_{H2} =$$

$$= 0,0014 + 0,0006 + 0,001 = 0,003 \text{ м.}$$

Литература

1. Физическая энциклопедия [Электронный ресурс]. – Минск 2009. – Режим доступа: http://femto.com.ua/articles/part_2/4341.html.
2. Extracorporeal Shock Waves Activate Migration, Proliferation and Inflammatory Pathways in Fibroblasts and Keratinocytes, and Improve Wound Healing in an Open-Label, Single-Arm Study in Patients with Therapy-Refractory Chronic Leg Ulcers / I. Aschermann [et al.] // Cell Physiol Biochem. – 2017. – Vol. 41, № 3. – P. 890–906.
3. Extracorporeal shock waves enhance normal broblast proliferation in vitro and activate mRNA expression for TGF-beta1 and for collagen types I and III // L. Berta [et al.] // Acta Orthop. – 2009. – Vol. 80, № 5. – P. 612–617.
4. Способ лечения остеохондроза при его клинических проявлениях: пат. RU 2163108 / Кучиев Т. Г. – Опубл. 20.02.2001.
5. Шелль, Я. Современные представления о фокусированной и радиальной терапии / Я. Шелль // Спортивная медицина. – 2013. – Т. 2013, № 1. – С. 3–6.
6. Шмагой, В. Л. Место ударно-волновой терапии в послеоперационной реабилитации пациентов с устройствами репаративного остеогенеза после переломов костей голени / В. Л. Шмагой, Р. Г. Родак, В. В. Карась // Медицина транспорта Украины. – 2014. – № 4. – С. 58–63.
7. Стимуляция регенерации периферического нерва: современное состояние, проблемы и перспективы / И. Н. Щаницын [и др.] // Успехи физиологических наук. – 2017. – Т. 48, № 3. – С. 92–112.
8. Щегольков, А. М. Ударно-волновая терапия в комплексном лечении и реабилитации больных ишемической болезнью сердца с рефрактерной стенокардией / А. М. Щегольков [и др.] // Вестник восстановительной медицины. – 2014. – № 6. – С. 69–75.
9. Новейший опыт применения терапии ударными волнами в различных областях медицины / А. Е. Семейский [и др.] // Доктор.Ру. – 2009. – № 7. – С. 32–40.
10. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов. [Электронный ресурс]. – Минск 2021. – Режим доступа: <http://helios.izmiran.rssi.ru/helioecology/titles/freq/freq.html>.

УДК 615.82

УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ГЕНЕРАТОР

Монич С.Г., Саяб А., Галаваченко П.О.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной работе отражена проблема использования медико-технических средств для лечения и профилактики заболеваний суставов конечностей и позвоночного столба человека, приведены схема конструкции ударно-волнового генератора и описание принципа его действия, отмечено, что достоинством приведенной конструкции генератора ударно-волновых импульсов является низкая амплитуда полуволны отрицательного давления из-за исключения неравномерности магнитного поля.

Ключевые слова: ударно-волновой генератор, ударная волна, акустическая линза, дегенеративно-дистрофическое заболевание, позвоночник.

SHOCK-WAVE GENERATOR

Monich S., Sayab M., Galavachenko P.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. This paper reflects the problem of using medical and technical means for the treatment and prevention of diseases of the joints of the extremities and the spinal column of a person, provides a diagram of the design of a shock wave generator and a description of the principle of its operation, it is noted that the advantage of the given design of a shock wave pulse generator is a low amplitude of a half-wave of negative pressure due to the exclusion of the unevenness of the magnetic field.

Key words: shock wave generator, shock wave, acoustic lens, degenerative-dystrophic disease, spine.

Адрес для переписки: Монич С.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: sgmonich@bntu.by

Устройство относится к области медицины, в частности к травматологии и ортопедии, и предназначено для лечения и профилактики различных заболеваний, связанных с нарушением обменных процессов в области суставов конечностей.

А также может быть использовано при лечении дегенеративно-дистрофических заболеваний позвоночника (больных с нарушением осанки, сколиозом, остеохондрозом, остеохондропатией позвонков, различными травмами и другими заболеваниями позвоночника).

Механизм действия ударно-волновой терапии заключается в следующем: сфокусированная ударная волна представляет собой высокоэнергетический одиночный импульс давления, который распространяется в продольном направлении от источника к зоне (точке) воздействия.

Ударная волна распространяется почти без потерь только в проводящей среде (например, вода, гель). В воздушной среде ударная волна преобразуется в звуковую (акустическую) и ее энергия существенно снижается.

Характеристики ударной волны [1]:

- резкий скачок давления за очень короткий промежуток времени (около 1 нс);
- избыточное давление очень короткое время (порядка 1 мкс);
- фаза разрежения (рис. 1).

Предполагается, что остеогенез подвергается воздействию ударной волны. При этом возника-

ют микротрещины и благодаря механическим повреждениям, фибробласты трансформируются в остеобласты.

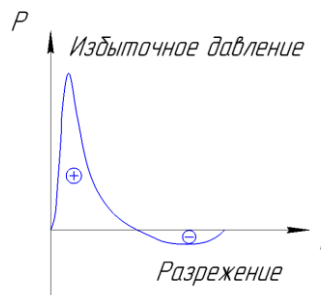


Рисунок 1 – Основные фазы ударной волны

Под влиянием ударной волны отмечается локальное усиление кровотока, изменение проницаемости клеточных мембран, активизация обмена веществ и восстановление клеточного ионного обмена. Тем самым обеспечивается интенсивное выведение конечных продуктов катаболизма, стимуляция восстановительных процессов тканей, противовоспалительный и противоотечный эффект [3].

Метод стойко снижает болевую чувствительность, мышечный спазм, разрыхляет болезненные костные выросты, участки обызвествления, фиброзные очаги, с последующим постепенным рассасыванием их фрагментов, повышает эластичности связок и сухожилий, улучшает местное кровообращение, существенно уменьшает

болевого синдром, восстанавливает объем движений в суставах, повышает переносимость физических нагрузок и, как следствие, возобновляет профессиональной или бытовой деятельности.

Экстракорпоральная ударно-волновая терапия является альтернативой хирургическому методу лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата.

На рис. 2 приведена схема конструкции ударно-волнового генератора. Он содержит катушку индуктивности 1, сердечник со штоком 2, корпус 3, акустическую линзу 4, заполненную дегазированной водой 5, круглую тонкую мембрану 6.

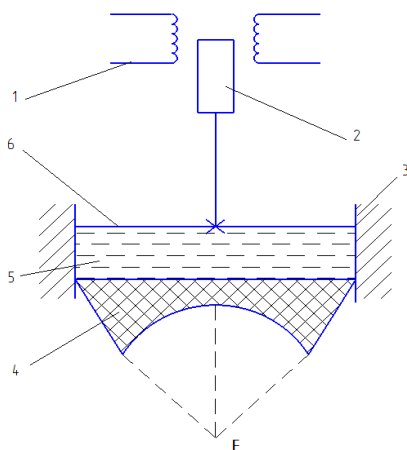


Рисунок 2 – Схема ударно-волнового генератора

Устройство работает следующим образом. С помощью схемы управления задаются параметры импульса (длительность, частота следования, амплитуда). При подаче импульса от блока запуска схемы на катушку индуктивности 1 протекает импульс тока, который создает магнитное поле. В результате чего сердечник со штоком увлекается внутрь катушки индуктивности. Этот импульс фокусируется акустической линзой 4 в фокальной точке F.

Ударно-волновой импульс передается пациенту контактным методом через «водяную подушку» 4, выполненную на основе силиконовых смесей и заполненной дегазированной водой 5.

Индуктор 7 контактирует с тепловой трубой 8, которая охлаждается потоком воздуха.

Достоинством данной конструкции генератора ударно-волновых импульсов является низкая амплитуда полуволны отрицательного давления из-за исключения неравномерности магнитного поля, а также снижение индуктивности рассеяния индуктора и возможность изменения длительности ударно-волнового импульса.

Литература

1. Extracorporeal Shock Waves Activate Migration, Proliferation and Inflammatory Pathways in Fibroblasts and Keratinocytes, and Improve Wound Healing in an Open-Label, Single-Arm Study in Patients with Therapy-Refractory Chronic Leg Ulcers / I. Aschermann [et al.] // Cell Physiol Biochem. – 2017. – Vol. 41, № 3. – P. 890–906.
2. Extracorporeal shock waves enhance normal blast proliferation in vitro and activate mRNA expression for TGF-beta1 and for collagen types I and III / L. Berta [et al.] // Acta Orthop. – 2009. – Vol. 80, № 5. – P. 612–617.
3. Способ лечения остеохондроза при его клинических проявлениях : пат. RU 2163108 / Т. Г. Кучиев / – Оpubл. 20.02.2001.
4. Шелль, Я. Современные представления о фокусированной и радиальной терапии / Я. Шелль // Спортивная медицина. – 2013. – Т. 2013, № 1. – С. 3–6.
5. Шмагой, В. Л. Место ударно-волновой терапии в послеоперационной реабилитации пациентов с расстройствами репаративного остеогенеза после переломов костей голени / В. Л. Шмагой, Р. Г. Родак, В. В. Карась // Медицина транспорта Украины. – 2014. – № 4. – С. 58–63.
6. Стимуляция регенерации периферического нерва: современное состояние, проблемы и перспективы / И. Н. Щаницын [и др.] // Успехи физиологических наук. – 2017. – Т. 48, № 3. – С. 92–112.
7. Ударно-волновая терапия в комплексном лечении и реабилитации больных ишемической болезнью сердца с рефрактерной стенокардией / А. М. Щегольков [и др.] // Вестник восстановительной медицины. – 2014. – № 6. – С. 69–75.
8. Новейший опыт применения терапии ударными волнами в различных областях медицины / А. Е. Семевский [и др.] // Доктор.Ру. – 2009. – № 7. – С. 32–40.

УДК 681.586

ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ЕМКОСТНОЙ МИКРОДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ**Николаева Т.А., Таратын И.А., Чижик С.А.***Белорусский национальный технический университет**Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Емкостной датчик давления состоит из подвижной мембраны, которая вызывает изменение емкости для приложенного давления. Для достижения высокой чувствительности используется тонкая мембрана большой площади с небольшим разделительным зазором между мембраной и металлическим контактом. Это приводит к нелинейности, уменьшает динамический диапазон измерений и увеличивает размер датчика. Таким образом, оптимальная конструкция датчика необходима для достижения баланса между этими компромиссами.

Ключевые слова: эллиптический емкостной датчик давления, чувствительный элемент, чувствительность, разделительный зазор.

ELLIPTICAL CAPACITIVE PRESSURE MICROSENSOR**Nikolaeva T., Taratyn I., Chizhik S.***Belarusian National Technical University**Minsk, Belarus*

Abstract. A capacitive pressure sensor consists of a moving diaphragm that causes a change in capacitance for the applied pressure. To achieve high sensitivity, a thin, large area diaphragm with a small separation gap between the diaphragm and the metal contact is used. This results in non-linearity, reduces the dynamic range of the measurement and increases the size of the sensor. Thus, optimal sensor design is needed to achieve a balance between these tradeoffs.

Key words: elliptical capacitive pressure sensor, sensing element, sensitivity, separation gap.

Адрес для переписки: Николаева Т.А., ул. Я.Коласа, 22/1, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: nic.tamara@mail.ru

МЭМС стали основным направлением на сенсорном рынке из-за ряда преимуществ, таких как компактный размер, малый вес, технологичность, масштабируемость, низкое энергопотребление и низкая стоимость. Устройства на основе МЭМС используются для измерения параметров, таких как перемещение, напряжение, деформация, ускорение, сила, давление, крутящий момент, удар, вибрация, поток, температура и влажность, в различных областях, таких как биомедицина, автомобильная, аэрокосмическая, бытовая и портативная электроника [1–3].

Среди различных типов датчиков давления широко применяемыми является пьезорезистивные датчики давления и емкостные датчики давления [4]. Пьезорезистивные датчики давления обладают различными преимуществами, такими как простота изготовления, линейный выход, хорошая надежность и простая схема компенсации. Однако емкостные датчики давления имеют лучшие параметры: устойчивость к температурному дрейфу, большой динамический диапазон измерений и лучшую чувствительность по сравнению с пьезорезистивными датчиками давления.

Как правило, в емкостных датчиках давления в качестве чувствительного элемента используется тонкая мембрана. Для достижения высокой чувствительности датчика давления необходимо оптимизировать толщину мембраны, площадь перекрытия между параллельными пластинами и разделительный зазор [5–6].

Конструкция емкостного датчика давления состоит из двух противоположно заряженных параллельных пластин, которые разделены средой, как показано на рис. 1.

В емкостных МЭМС-датчиках давления с параллельными пластинами изменение емкости достигается за счет уменьшения разделительного зазора между пластинами в результате приложенного давления. Приложение давления вызывает изгиб мембраны, так что разделительный зазор уменьшается. Уменьшение разделительного зазора увеличивает емкость датчика, соответствующую величине приложенного давления [4].

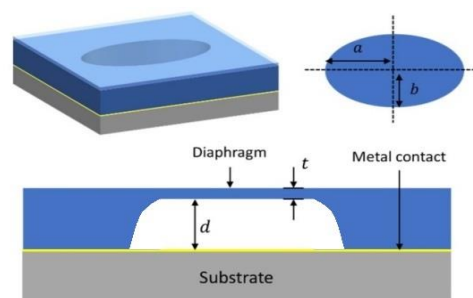


Рисунок 1 – Эллиптический емкостной датчик давления, состоящий из тонкой эллиптической мембраны, отделенной от металлического контакта фиксированным зазором

Моделирование емкостных датчиков давления необходимо для разработки датчиков с оптимальными характеристиками и минимальными габари-

тами. Это особенно важно в условиях растущей миниатюризации электронных устройств. Для прогнозирования поведения сложных систем, состоящих из нескольких технологий, таких как система на кристалле, необходимо моделировать МЭМС-устройства наряду с другими технологиями, включая схемы CMOS, радиочастотные схемы, блоки памяти и так далее. Традиционно моделирование использовалось для эффективного моделирования больших схем для повышения производительности в различных условиях эксплуатации.

Расчет емкости. Рассчитана емкость в конструкциях с эллиптической мембраной толщиной 7 мкм, модулем упругости 186 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,266 после приложения давлений 10 и 100 кПа.

Ниже представлен расчет для мембраны с большой полуосью равной 150 мкм после приложения давления 10 кПа.

Жесткость при изгибе мембраны:

$$D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} = 5,72 \cdot 10^{-6}, \text{ Н} \cdot \text{ м},$$

где E – модуль упругости, t – толщина мембраны, ν – коэффициент Пуассона.

Максимальное отклонение в эллиптической мембране:

$$w_{e,max} = \frac{P}{8D} \left[\frac{a^4 b^4}{3(a^4 + b^4) + 2a^2 b^2} \right] = 4,87, \text{ нм},$$

где P – приложенное давление, a – большая полуось мембраны, b – малая полуось мембраны.

Начальная емкость для эллиптического емкостного датчика давления:

$$C_0 = \frac{\epsilon \pi a b}{d} = 4,7128, \text{ мФ},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость для азота.

Емкость после отклонения мембраны:

$$C_w = \frac{C_0}{2} \left[\sqrt{\frac{d}{w_{e,max}}} \ln \left| \frac{\sqrt{d} + \sqrt{w_{e,max}}}{\sqrt{d} - \sqrt{w_{e,max}}} \right| \right] = 4,7136, \text{ мФ}.$$

В табл. 1 представлены результаты всех расчетов.

Таблица 1. Результаты расчетов

	При приложении давления 10 кПа		При приложении давления 100 кПа	
	a = 150 мкм	a = 300 мкм	a = 150 мкм	a = 300 мкм
$D, \text{ Н} \cdot \text{ м}$	$5,72 \cdot 10^{-6}$			
$w_{e,max}, \text{ нм}$	4,87	6,7	48,7	67
$C_0, \text{ мФ}$	4,7128	9,4257	4,7128	9,4257
$C_w, \text{ мФ}$	4,7136	9,4278	4,7205	9,4468

Изменение емкости. Изменение емкости из-за отклонения мембраны относительно изменения давления показано на рис. 2, которое получено путем поддержания постоянной малой полуоси размером 100 мкм и изменения большой полуоси от 150 до 300 мкм. Разделительный зазор составляет 10 мкм для диапазона давлений от 10 до 100 кПа.

Емкость увеличивается по мере увеличения отклонения, т.е. по мере уменьшения разделительного зазора между пластинами.

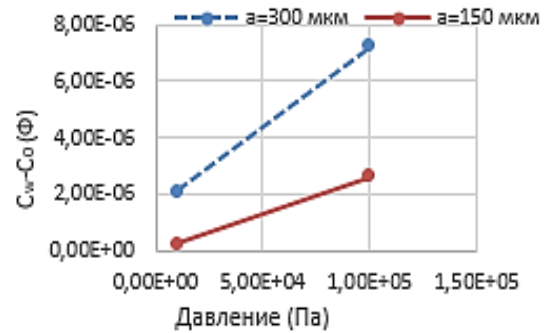


Рисунок 3 – Изменение емкости по отношению к изменению давления для конструкций, где $b = 100$ мкм

Литература

- Hussain, A. M. CMOS- Technology-Enabled Flexible and Stretchable Electronics for Internet of Everything Applications / A. M. Hussain, M. M. Hussain // Adv. Mater. – 2016. – Vol. 28, № 22. – P. 4219–4249.
- Solid state MEMS devices on flexible and semi-transparent silicon (100) platform / S. M. Ahmed [et al.] // IEEE 27th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), San Francisco, CA, 2014. – P. 548–551.
- Hussain, A. M. Deterministic Integration of Out-of-Plane Sensor Arrays for Flexible Electronic Applications / A. M. Hussain, M. M. Hussain // Small. – 2016. – Vol. 12, № 37. – P. 5141–5145.
- A micro-capacitive pressure sensor design and modelling / A. E. Kubba [et al.] // J. Sen. Syns. Syst. – 2016. – Vol. 5. – P. 95–112.
- Mishra, R. B. Analytical modelling and FEM Simulation of Capacitive Pressure Sensor for Intraocular Pressure Sensing / R. B. Mishra, S. S. Kumar, R. Mukhiya // ICCRME, IOP Conf. Series: Material Sci. and Eng. – 2018. – Vol. 404. – P. 012026.
- Zhang Y. A high-sensitive ultrathin MEMS capacitive pressure sensor / Y. Zhang, R. Howver, B. Gogoi, N. Yazdi // 16th International SolidState Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Beijing, 2011. – P. 112–115.

УДК 621.382

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ОБЕДНЕНИЯ *p-i-n*-ФОТОДИОДОВ

Оджаев В.Б.¹, Петлицкий А.Н.², Просолович В.С.¹, Ковальчук Н.С.², Филипеня В.А.², Черный В.В.³,
Шестовский Д.В.², Явид В.Ю.¹, Янковский Ю.Н.¹

¹Белорусский государственный университет

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния с вертикальной структурой и охранным кольцом. Установлено, что заметная зависимость величины барьерной емкости (на частоте 1 кГц) и размеров области обеднения от температуры наблюдается только при приложенных обратных напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_b \leq 1$ В). На вольт-амперных характеристиках при обратном смещении можно выделить три области изменения тока в зависимости от приложенного напряжения: сублинейную, линейную и суперлинейную, обусловленные различными механизмами генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения *p-n*-перехода.

Ключевые слова: *p-i-n*-фотодиоды, вольт-амперные характеристики, вольт-фарадные характеристики, генерационно-рекомбинационные процессы.

SPECIFIC FEATURES OF GENERATION-RECOMBINATION PROCESSES IN THE DEPLETION REGION OF *p-i-n*-PHOTODIODES

Odzhaev V.¹, Pyatlitski A.², Prosolovich V.¹, Fililpenya V.², Chorny V., Shestovsky D.², Yavid V.¹,
Yankovsky Yu.¹

¹Belarusian State University

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company

³Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The current-voltage and capacitance-voltage characteristics of *p-i-n*-silicon-based photodiodes with a vertical structure and a guard ring have been investigated. It was found that a appreciable dependence of the barrier capacitance value (at a frequency of 1 kHz) and the size of the depletion region on temperature is observed only at applied reverse voltages not exceeding the contact potential difference ($V_b \leq 1$ V). On the current-voltage characteristics at reverse bias, three regions of current variation can be distinguished depending on the applied voltage: sublinear, linear, and superlinear, due to different mechanisms of generation-recombination processes in the *p-n*-junction depletion region.

Key words: *p-i-n*-photodiodes, current-voltage characteristics, capacitance-voltage characteristics, generation-recombination processes.

Адрес для переписки: Просолович В.С., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

В работе проведен анализ изменения электрофизических параметров *p-i-n*-фотодиодов на основе кремния в зависимости от величины внешнего смещения и температуры.

Приборы изготавливались на пластинах Si *p*-типа проводимости ориентации (100) с $\rho = 1000$ Ом·см, выращенных методом бестигельной зонной плавки. Область *p*⁺-типа анода (изотипный переход) создавалась имплантацией ионов бора, области катода *n*⁺-типа – диффузией фосфора. Измерения ВАХ и вольт-фарадных характеристик (ВФХ) производились в диапазоне температур минус 30–70 °С с шагом 10 °С.

Из данных ВФХ следует, что зависимость емкости (*C*) от приложенного обратного смещения (*V_R*) имеет вид $1/C^2 \sim V_R$ характерный для резкого асимметричного *p-n*-перехода [1] (рис. 1).

Расчеты зависимости толщины области обеднения *W* от приложенного напряжения согласно [1] и сравнение их с экспериментальными результатами из измерений барьерной емкости и обратного тока *I_R* показали, что переход резкий асимметричный. Из рис. 1 также следует, что при $V > 8$ В для *I_R* появляется дополнительный канал утечки. Рост величины *I_R* происходит не только за счет увеличения толщины *W*, но и за счет включения нового механизма рекомбинации внутри области обеднения или утечки вне ее.

Исследование температурной зависимости барьерной емкости ($f = 1$ кГц) показали (рис. 2), что заметная зависимость *C* наблюдается только при напряжениях, сравнимых с величиной контактной разности потенциалов. При напряжениях смещения $V \leq V_{bi}$ зависимость *W* от температуры

определяется температурной зависимостью V_{bi} . Для обратной ВАХ p - n -перехода, в области пространственного заряда которого преобладает генерация электронно-дырочных пар, присуща степенная зависимость тока от напряжения $I_R \sim V^n$ [1]. На рис. 3 приведены ВАХ темновых токов в двойном логарифмическом масштабе. Видно, что зависимость может быть разбита на три участка. I – сублинейный, $n \sim 0,5$. В широкозонных полупроводниках с низкой концентрацией собственных носителей заряда n_i (таких, как Si) и большой концентрацией генерационно-рекомбинационных центров (которой соответствует низкое значение времени жизни неравновесных носителей заряда τ_e) при комнатной температуре преобладает генерационный ток.

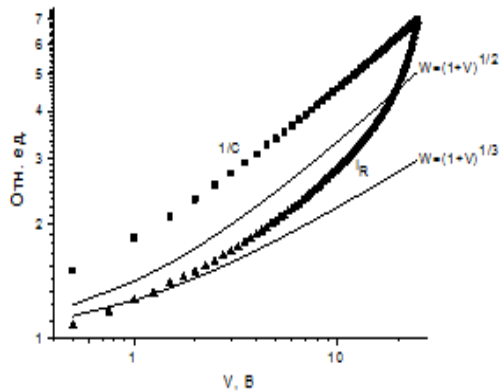


Рисунок 1 – Расчетные зависимости толщины области обеднения W от приложенного напряжения и их сравнение с экспериментальными данными $1/C$ и I_R

$$J_{gen} = \int_0^W q|U| dx \approx q|U|W = \frac{qn_iW}{\tau_e};$$

$$J_{gen} = \frac{1}{\tau_e}; \quad J_{gen} \sim W \sim (V_{bi} + V)^{\frac{1}{2}}.$$

При заданной температуре J_{gen} пропорционален ширине обедненного слоя, которая в свою очередь зависит от приложенного обратного смещения V_R . Таким образом, следует ожидать, для резкого перехода степенную зависимость генерационного тока от приложенного напряжения с показателем степени $n = 0,5$.

При $V_R = 10$ – 25 В ток возрастает с ростом приложенного напряжения и n становится больше 0,5, а $1/C \sim W$ продолжает расти по закону с $n = 0,5$ (рис. 1). Т.е., включается новый механизм увеличения обратного тока, не связанный с увеличением W от V_R . Из исследований температурных зависимостей обратного тока установлено, что генерация носителей заряда на участке I происходит с уровня 0,20 эВ. На участке II наблюдается сублинейная зависимость с $n \sim 2$, которая возможно обусловлена высокой концентрацией рекомбинационно-генерационных центров и их неоднородным распределением по

объему кристалла [2]. На участке III (рис. 3) ток прямо пропорционален приложенному напряжению ($n \sim 1$). На данном участке ток экспоненциально зависит от температуры, генерация носителей заряда происходит с уровня 0,26 эВ. Возможно это пассивный шунтирующий элемент.

Установлено, что заметная зависимость величины барьерной емкости (на частоте 1 кГц) и размеров области обеднения от температуры наблюдается только при приложенных обратных напряжениях, не превышающих контактную разность потенциалов ($V_b \leq 1$ В).

На ВАХ при обратном смещении можно выделить три области изменения тока в зависимости от приложенного напряжения: сублинейную, линейную и суперлинейную, обусловленные различными механизмами генерационно-рекомбинационных процессов в области обеднения p - n -перехода.

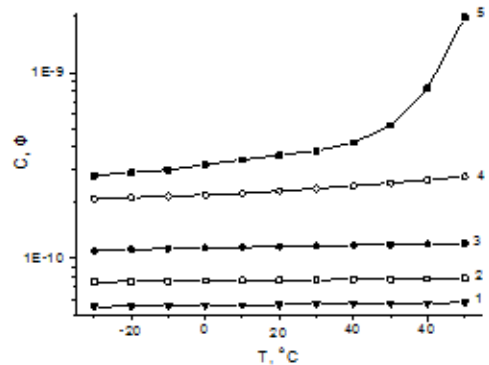


Рисунок 2 – Температурная зависимость барьерной емкости при $f = 1$ кГц: 1 = 20 В; 2 = 10 В; 3 = 5 В; 4 = 0,5 В; 5 = 0 В

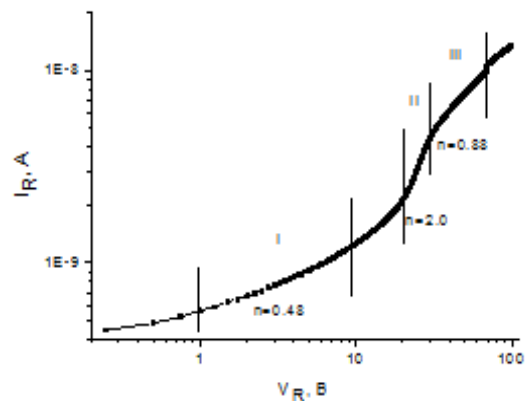


Рисунок 3 – ВАХ темновых токов при $T = 20$ °С

Литература

1. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, M. K. Lee – Pub. 3. – John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012. – 582.
2. Liefing, R. Improved device performance by multistep or carbon co-implants / R. Liefing [et al.] // IEEE Trans. Electron Devices. – 1994. – Vol. ED-41. – P. 50–55.

УДК 539.23

ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ СПИН-КОАТИНГА

Петровская А.С.¹, Радюкевич Д.Л.¹, Мельникова Г.Б.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,3}, Сапсалиёв Д.В.²

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский государственный педагогический университет имени М. Танка

³Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана методика получения пленок методом спин-коатинга на основе водорастворимых полимеров (поливинилового спирта и хитозана) и неорганических наночастиц оксида алюминия. На основании данных атомно-силовой микроскопии о структуре покрытий определена оптимальная концентрация наночастиц оксида алюминия в полимерных пленках, которая составила 0,63 %.

Ключевые слова: нанокomпозиционные пленки, наночастицы оксида алюминия, поливиниловый спирт, спин-коатинг, хитозан.

COMPOSITE COATINGS BASED ON WATER-SOLUBLE POLYMERS AND INORGANIC ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES FORMATION BY SPIN-COATING TECHNIQUE

Petrovskaya A.¹, Radyukevich D.¹, Melnikova G.^{1,2}, Chizhik S.^{1,3}, Sapsaliou D.²

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank

³Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. A method has been developed for obtaining films based on water-soluble polymers (polyvinyl alcohol and chitosan) and inorganic aluminum oxide nanoparticles by the spin-coating technique. Based on the data of atomic force microscopy on the structure of the coatings, the optimal concentration of aluminum oxide nanoparticles in polymer films was 0.63%.

Key words: chitosan, nanocomposite films, nanoparticles of aluminum oxide, polyvinyl alcohol, spin-coating.

Адрес для переписки: Петровская А.С., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: agata.petrovskaya@gmail.com

Введение. Актуальной задачей как наноматериаловедения, так и медицины является разработка сорбирующих пленок биополимеров. В качестве биополимеров могут быть использованы поливиниловый спирт (ПВС), полиакриловая и полиметакриловая кислоты, целлюлоза, хитозан, желатин и др. [1, 2]. Преимущества таких полимерных пленок существенны: более высокая степень защиты по сравнению с тканевыми материалами, а также их полная атравматичность. Одним из важнейших показателей защитных полимерных пленок является их влагопоглощающая способность, поскольку с этой характеристикой связана и способность полимерного покрытия к сорбции раневого экссудата, и влаго- и газопроницаемость пленки, а также их транспортные свойства в отношении высвобождения активных лекарственных компонентов [3].

Материалы и методы исследования. Перед нанесением пленок, кремниевые пластины 1x1 см гидрофилизировали выдерживанием в течение 15 минут при 70 °С в пероксидно-аммиачной смеси, затем промывали дистиллированной водой и сушили в токе азота.

Раствор хитозана готовили с концентрацией $c = 0,25$ мг/мл в растворе 1М уксусной кислоты. Раствор ПВС в дистиллированной воде исполь-

зовали с концентрацией $c = 1$ мг/мл. Перед нанесением на кремниевые пластины полученные растворы подвергали воздействию ультразвука (УЗ; Bandelin electronic, Germany; частота 35 кГц) в течение 5 мин. Исходную суспензию наночастиц (н-ц) оксида алюминия ($w = 20$ масс. % Al_2O_3 в H_2O , $d=30-60$ нм; Sigma-Aldrich, China) разбавляли дистиллированной водой до концентраций 5 масс. %, 1,25 масс.% и 0,63 масс.%.

К 1 мл раствора хитозана, $c = 0,5$ мг/мл, и 1 мл раствора ПВС, $c = 2$ мг/мл, добавляли по 1 мл Al_2O_3 определенной концентрации. Полученные растворы УЗ 15 мин. Для нанесения пленок методом спин-коатинга на кремниевые пластины, вращающиеся со скоростью 3000 об/мин, прикапывали растворы объемом 8 мкл. Для формирования многослойных покрытий между нанесением слоев выдерживали 1 мин для испарения остатков растворителя (вращение не прекращалось).

Морфологию поверхности полученных пленок исследовали методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе NT-206 (ОДО «Микротестмашины», Республика Беларусь) с использованием стандартных кремниевых кантилеверов NCS 11 A (Mikromasch, Эстония), константа жесткости согласно паспорту производителя 3 Н/м.

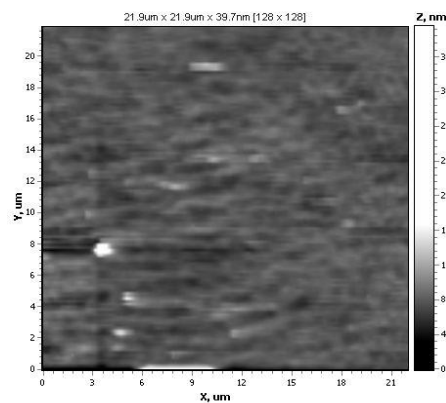
Результаты и их обсуждение. Методом АСМ установлено, что структура поверхности пленки хитозана является однородной (средне-квадратичная шероховатость 1,0 нм). Для пленки ПВС характерны «неровности» поверхности, значение шероховатости увеличивается и составляет 1,5 нм. Следует также отметить, что пленка хитозана более равномерно распределена по поверхности подложки.

Различная концентрация Al_2O_3 в растворе приводит к получению полимерных пленок с различной морфологией поверхности. Так, пленки хитозана и ПВС с w (н-ц Al_2O_3) = 5 % обладают большим числом конгломератов, локализованных в виде «островков» и «цепочек». На поверхности полимерных пленок с w (н-ц Al_2O_3) = 1,25 % присутствуют как отдельные наночастицы Al_2O_3 , так и конгломераты, однако их количество значительно меньше по сравнению с предыдущим составом нанокomпозиционных пленок. Кроме того, на скопление наночастиц влияет не только концентрация Al_2O_3 , но и химический состав и структура полимера из которого сформирована пленка. Большее количество конгломератов наблюдается у пленок ПВС, что обусловлено большим количеством гидроксильных групп в молекуле полимера, и, как следствие, высокой степенью взаимодействия и обволакивания им наночастиц оксида алюминия.

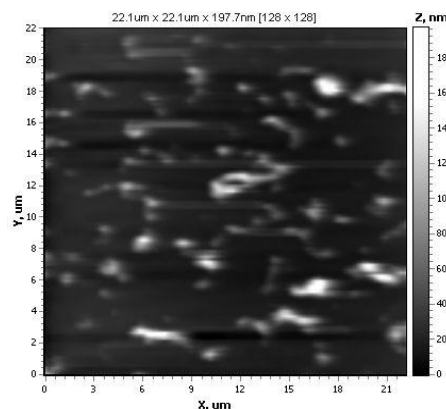
При w (н-ц Al_2O_3) = 0,63 % на поверхности пленки хитозана наблюдаются неравномерно распределенные единичные наночастицы оксида алюминия (рис. 1, а). На поверхности пленки ПВС (рис. 1, б), при данной концентрации Al_2O_3 , присутствует значительно большее количество наночастиц, чем на поверхности пленки хитозана.

Следует отметить, что количество конгломератов наночастиц на поверхности пленки ПВС уменьшается, а отдельных наночастиц – увеличивается, из чего следует, что оптимальная концентрация наночастиц Al_2O_3 составляет 0,63 %. Таким образом, для дальнейшего исследования были выбраны полимерные пленки с концентрацией наночастиц 0,63 %.

Заключение. Была разработана методика получения пленок на основе водорастворимых полимеров и неорганических наночастиц оксида алюминия методом спин-коатинга. В результате чего были получены пленки хитозана, ПВС, и композиционные с наночастицами оксида алюминия различной концентрации. Оптимальная концентрация наночастиц в полимерных пленках составила 0,63 %. Данные пленки могут найти свое применение в качестве раневых покрытий.



а



б

а – хитозан + Al_2O_3 ; б – ПВС + Al_2O_3

Рисунок 1 – АСМ-изображения поверхности полимерных пленок с наночастицами оксида алюминия ($w = 0,63$ %), поле сканирования 22×22 мкм²

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Т21М-051.

Литература

1. Mallakpour, S. Enhancement in thermal properties of poly(vinyl alcohol) nanocomposites reinforced with Al_2O_3 nanoparticles / S. Mallakpour, M. Dinari // Journal of Reinforced Plastics and Composites. – 2012. – Vol. 32, № 4. – P. 217–224.
2. Соловьев, В. С. Полимерные водопоглощающие композиции с повышенной прочностью / В. С. Соловьев, М. В. Успенская, Н. В. Сиротинкин // Изв. Вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 63–65.
3. Пленочные полимерные покрытия на основе хитозана / Р. Д. Каримова [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 11. – С. 132–135.

УДК 539.23

ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ, НИТРИДОВ ТАНТАЛА И АЛЮМИНИЯ

Петровская А.С.¹, Мельникова Г.Б.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2},
Зыкова А.В.³, Сафонов В.И.³, Трухан Р.Э.¹

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси» Минск

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина

Харьков, Украина

Аннотация. Исследован гидрофильно–гидрофобный баланс одно- и двухслойных наноструктурированных покрытий оксидов и нитридов тантала (V) и алюминия методами неподвижной капли и атомно-силовой микроскопии. Установлено, что наименьшие значения краевого угла смачивания $92,6^\circ$ и удельной поверхностной энергией $\gamma_1 0,17$ мДж/м² зафиксированы у пленки Ta₂O₅. Для покрытий на основе алюминия характерны более высокие гидрофобные свойства. Так, краевой угол смачивания AlN/Al₂O₃ составил $100,9^\circ$.

Ключевые слова: алюминий, гидрофильно-гидрофобный баланс, наноструктурированные покрытия, сила адгезии, тантал.

HYDROPHILIC PROPERTIES OF NANOSTRUCTURED COATINGS OF OXIDES AND NITRIDES OF TANTALUM AND ALUMINUM

Petrovskaya A.¹, Melnikova G.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2},
Zykova A.³, Safonov V.³, Trukhan R.¹

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

³V.N. Karazin Kharkiv National University

Kharkov, Ukraine

Abstract. The hydrophilic – hydrophobic balance of one- and two-layer nanostructured coatings of oxides and nitrides of tantalum (V) and aluminum was studied using atomic force microscopy and sessile drop method. It was found that the smallest values of the contact angle 92.6° and specific surface energy $\gamma_1 0.17$ mJ/m² were recorded for the Ta₂O₅ film. Aluminum-based coatings are characterized by higher hydrophobic properties. Thus, the AlN/Al₂O₃ contact angle was 100.9° .

Key words: adhesion force, aluminum, hydrophilic-hydrophobic balance, nanostructured coatings, tantalum.

Адрес для переписки: Петровская А.С., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь

e-mail: agata.petrovskaya@gmail.com

Введение. Разработка и создание новых технологий и функциональных покрытий с уникальными свойствами микронной толщины для имплантатов нового поколения является актуальной задачей не только медицины, но и материаловедения [1]. За счет улучшения биосовместимости, биоактивности и антибактерицидности имплантанта можно эффективно решить проблемы остеоинтеграции [2]. Однако формирование покрытий на поверхности имплантатов приводит к изменению поверхностных и структурных свойств материала, в том числе гидрофильно-гидрофобного баланса [3]. Поэтому исследование данных свойств на наноуровне является определенно важным этапом при разработке новых биоматериалов.

Материалы и методы исследования. Нанесение однослойных (Ta₂O₅, TaN, Al₂O₃, AlN) и двухслойных (TaN/Ta₂O₅ и AlN/Al₂O₃) нано-

структурированных покрытий осуществлялось методом магнетронного распыления. В качестве подложек использовали предварительно очищенные образцы полированной нержавеющей стали марки AISI 316L.

Немаловажной характеристикой поверхности материала является сила адгезии. Силу адгезии определяли методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе Dimension FastScan в режиме PeakForce QNM (Quantitative Nano Mechanics – количественное наномеханическое картирование). Использовали стандартные кремниевые кантилеверы CSG10_SS (TipsNano, РФ), с радиусом кривизны острия зонда $R = 10,38$ нм и константой жесткости консоли $k = 0,51$ Н/м. Силу адгезии определяли по полученным АСМ-изображениям на области сканирования 1×1 мкм с использованием программного обеспечения NanoScopeAnalysis. Величину удельной поверх-

ностной энергии γ_1 на границе раздела зонд – образец рассчитывали, учитывая площадь контакта [4]. Методом неподвижной капли определяли краевой угол смачивания (θ°) на приборе DSA 100 E (KRUSS, Германия). Для расчета удельной поверхностной энергии γ_2 по значениям θ° на поверхность образца наносили две тестовые жидкости – воду и дийодметан. Поверхностную энергию рассчитывали по модели ОБПК (Оунса, Вендта, Рабеля и Кьельбле). В данной модели поверхностное натяжение рассматривается с точки зрения полярной γ^p и дисперсной γ^d составляющих [5].

Результаты и их обсуждение. Установлено, что Ta_2O_5 и Al_2O_3 обладают наименьшими значениями силы адгезии (F_{adh}) по сравнению с нитридными и двухслойными покрытиями: для Ta_2O_5 F_{adh} составила 8,37 нН, а для Al_2O_3 – 10,99 нН. Данное обстоятельство, вероятно, связано со структурными особенностями пленок: покрытия Ta_2O_5 и Al_2O_3 являются более однородными и обладают самыми низкими значениями среднеквадратичной шероховатости R_q 8,49 нм и 6,75 нм, соответственно.

Согласно данным, полученным методом неподвижной капли, наименьший краевой угол смачивания (табл. 1) характерен для пленки Ta_2O_5 и составляет $92,6^\circ$. Значения удельной поверхностной энергии γ_1 и γ_2 для данной пленки составили $0,17$ мДж/м² и $36,59$ мДж/м². Различие в значениях поверхностной энергии связано с методологическими особенностями методов – значения силы адгезии, измеренные методом АСМ, оценивают локальные характеристики материала в точке контакта кантилевера с поверхностью образца. В случае определения краевого угла смачивания мы получаем интегральную характеристику поверхности, усредняющую свойства материала в области исследуемой поверхности.

Таблица 1. Значения краевого угла смачивания θ° и удельной поверхностной энергии наноструктурированных пленок на AISI 316L методами АСМ (γ_1) и неподвижной капли (γ_2)

Образец	γ_1 , мДж/м ²	θ°	γ_2 , мДж/м ²	γ^p , мДж/м ²
Ta_2O_5	0,17	92,6	36,59	0,92
TaN	0,20	95,9	33,27	0,71
TaN/ Ta_2O_5	0,38	95,1	34,41	0,72
Al_2O_3	0,22	100,3	30,56	0,35
AlN	0,32	95,1	46,94	0,03
AlN/ Al_2O_3	0,39	100,9	31,92	0,20

Пленки TaN и TaN/ Ta_2O_5 на AISI 316L обладают схожими гидрофобными свойствами: значения краевых углов смачивания и удельных поверхностных энергий γ_2 различаются незначительно, причем изменения значений последней величины происходят за счет изменения ее дис-

персионной составляющей (табл. 1). Можно сделать вывод о том, что нижний слой (TaN) оказывает влияние на гидрофобные свойства поверхности двухслойной пленки. Значения удельной поверхностной энергии γ_1 пленок различаются в 2 раза, что связано с возрастанием F_{adh} двухслойной пленки по сравнению с однослойным покрытием TaN. Следует отметить, что значение шероховатости поверхности R_q двухслойной пленки выше по сравнению с однослойной и составляет 16,2 нм, что в свою очередь могло оказать влияние на силу адгезии и, следовательно, поверхностную энергию. Следует отметить, что для танталовых покрытий характерны наиболее высокие значения γ^p по сравнению с алюминиевыми, что свидетельствует о более гидрофильных свойствах поверхности покрытий Ta.

В случае алюминиевых пленок было установлено, что наивысшие значения краевого угла смачивания характерны для Al_2O_3 ($100,3^\circ$) и AlN/ Al_2O_3 ($100,9^\circ$), а значения удельной поверхностной энергии пленок изменяются в пределах экспериментальной ошибки. В данном типе покрытий наибольшее влияние на гидрофильно-гидрофобный баланс поверхности двухслойной пленки оказывает верхний слой (Al_2O_3). Методом АСМ было зафиксировано изменение поверхностной энергии: γ_1 для AlN/ Al_2O_3 составило 0,39, что в 1,8 раз больше γ_1 для Al_2O_3 . Для пленки AlN характерен более низкий краевой угол смачивания равный $95,1^\circ$. Кроме того, пленка AlN обладает максимальным значением поверхностной энергии $\gamma_2 = 46,94$ мДж/м².

Заключение. В результате проведенных исследований было установлено, что наименьшим краевым углом смачивания обладает пленка Ta_2O_5 . Кроме того, напыление Ta_2O_5 в качестве верхнего слоя двухслойной пленки снижает краевой угол смачивания TaN/ Ta_2O_5 до $95,1^\circ$. В случае покрытий на основе алюминия наблюдается увеличение гидрофобных свойств по сравнению с танталовыми покрытиями. Двухслойное покрытие AlN/ Al_2O_3 продемонстрировало наибольшее значение краевого угла смачивания равное $100,9^\circ$, а пленка AlN – максимальное значение поверхностной энергии $\gamma_2 = 46,94$ мДж/м².

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Т20УКА-030.

Литература

1. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217.
2. Новиков, С. В. Тонкопленочные покрытия для дентальных имплантатов с минимальной шероховатостью / С. В. Новиков, А. П. Тополянский, П. А. Тополянский // Материалы 18 Международной научно-

практической конференции. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 331–345.

3. Fabrication of tantalum oxide layers onto titanium substrates for improved corrosion resistance and cytocompatibility / G. Xu [et al.] // *Surface & Coatings Technology*. – 2015. – Vol. 272. – P. 58–65.

4. Свириденко, А. И. Механика дискретного фрикционного контакта / А. И. Свириденко, С. А. Чижик, М. И. Петроковец. – Мн. : Наука и техника, 1990. – 272 с.

5. Johnson, R. E. Contact angle, wettability and adhesion / R.E. Johnson, Jr., R. H. Dettre // *Amer. Chem. Soc.* – 1964. – Vol. 43. – P. 112–135.

УДК 621.373.52

УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ЦИКЛА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МЕЖСОЕДИНЕНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ МИКРОСВАРКИ

Петухов И.Б., Кипарин И.Н.

ОАО «Планар-СО»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Для повышения надежности работы автоматического оборудования монтажа проволочных выводов предложена методика контроля полного цикла присоединения за счет прозвонки полупроводниковой структуры кристалла биполярным сигналом, подаваемым на присоединяемую проволоку при монтаже методом «шарик-клин». Установлено, что предложенная методика позволяет обнаруживать такие дефекты, как обрывы, неприсоединение проволоки к контактным площадкам кристалла или корпуса.

Ключевые слова: катушка с золотой (медной) проволокой, капилляр для микросварки, ультразвуковой преобразователь, термозвуковая микросварка «шарик-клин», зажим проволоки.

CONTROL UNIT FOR THE WIRE INTERCONNECTION FORMING CYCLE IN AUTOMATIC MICRO-BONDING SYSTEMS

Petuhov I., Kiparin I.

OJSC «Planar-SO»
Minsk, Belarus

Abstract. To increase reliability of automatic equipment for wire bonding the method of control full cycle of wire loop forming by checking conductivity of a semiconductor crystal structure with bipolar signal applied to a bonding wire is offered. It is established, that the offered method allows to detect such defects, as breaks, non-connection of a wire to contact pads of a crystal or the case.

Key words: spool with gold (copper) wire, capillary for micro-bonding, ultrasonic transducer, thermosonic micro-bonding “ball-wedge”, wire clamp.

Адрес для переписки: Петухов И.Б., пр.Партизанский 2/6, г. Минск 220033, Республика Беларусь
e-mail: petuchov@kbtm.by

Проволочный монтаж золотой (медной) проволокой методом «шарик-клин» в микроэлектронике является наиболее используемым ввиду его надежности и высокой производительности [1]. В настоящее время производительность процесса достигнута компанией Kulicke and Soffa до 10–16 выводов в секунду [2].

При монтаже проволочных выводов в автоматическом режиме подразумевается, что контроль за качеством и надежностью техпроцесса полностью возложен на управляющую систему автомата присоединения выводов. Контроль может осуществляться как визуально с помощью встроенной системы машинного зрения после обработки прибора на позиции присоединения, так и с помощью специальных сенсоров или устройств контроля, позволяющих своевременно обнаружить дефект в виде отслоения точки сварки или обрыв проволоки в процессе формирования вывода и выдать сигнал сбоя для остановки работы автомата. Такой контроль необходим для исключения воздействия сварочным капилляром

без проволоки (в случае ее обрыва) на контактные площадки кристалла и 100 % определения наличия вывода в цикле монтажа.

Для решения данной задачи предлагается устройство контроля обрыва перемычки (УКОП), основанное на прозвонке структуры кристалла биполярным сигналом, подаваемым на присоединяемую проволоку, которая, в свою очередь должна быть механически изолирована от корпуса (земли) автомата. Принцип работы устройства контроля поясняется на рис. 1.

Вход устройства контроля присоединен к зажиму проволоки, выполненного из металлических пластинок (губок), за счет чего обеспечивается электрический контакт проволоки с устройством контроля. Присоединяемая проволока сматывается с катушки и пропускается через керамический капилляр, под торцем которого формируется в начале цикла присоединения оплавленный шарик. В цикле образования межсоединения первая точка начинается с присоединения шарика к контактной площадке кристалла,

затем с помощью интерполированного перемещения капилляра к второй точке присоединения образуется дугообразное межсоединение (проволочная петля).

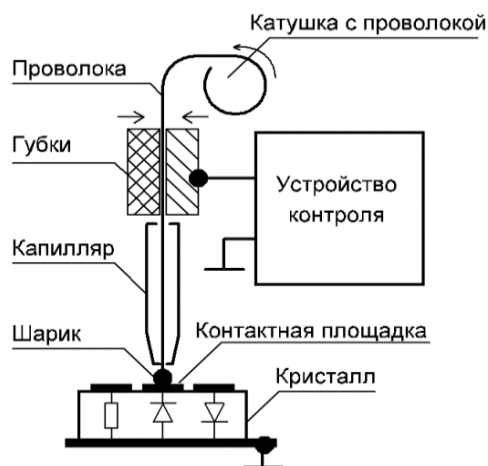


Рисунок 1 – Принцип работы УКОП

Учитывая тот факт, что топологическая структура полупроводникового кристалла представляет смешанную высокоимпедансную токопроводящую структуру относительно заземленного держателя кристалла, возможен контроль протекания измерительного тока положительной и отрицательной полярности через полупроводниковую структуру. Экспериментально установлено, что для одних кристаллов измерительный ток выше для положительной полярности, а для других - при отрицательной полярности. Амплитуда подаваемого биполярного измерительного напряжения не превышает 3,5 В и ограничена по току на уровне 6–7 мкА.

Таким образом, УКОП определяет отсутствие проводимости через P-N, N-P переходы полупроводниковых структур в случае обрыва (или отслоения точки сварки) соединения в течение перемещения капилляра от присоединенного шарика к контактной площадке кристалла до присоединения второй точки на выводе прибора.

Время отклика на аварийное событие при контроле определяется периодом биполярных измерительных импульсов микротока и не превышает значения 1 мс. При уменьшении проводимости ниже порогового значения, УКОП формирует гальванически развязанный сигнал «ОБРЫВ», поступающий на выход оптопары (рис. 2). УКОП имеет возможность гальванической развязки цепи питания от измерительной цепи. Структурная схема УКОП приведена на рис. 2.

УКОП работает следующим образом. Релаксационный генератор 1 формирует биполярное выходное напряжение формы меандр амплитудой порядка 3,5 В с периодом менее 1 мс. Это напряжение через токоограничивающий резистор R1 образует измерительный сигнал микротока не превышающего значение 7 мкА. Измерительный сигнал микротока поступает к зажимным губкам, образующим электрический контакт с проволокой.

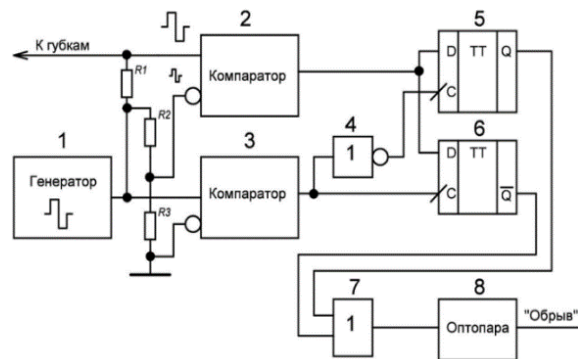


Рисунок 2 – Структурная схема УКОП

Цепь измерения от зажимных губок подключена к неинвертирующему входу компаратора 2. К инвертирующему входу компаратора 2 подключен делитель напряжения, выполненный на резисторах R2, R3, подключенный к выходу генератора 1. Делитель напряжения образует опорный уровень напряжения для контроля обрыва соединения. При превышении напряжения над уровнем контроля в случае дефекта в виде обрыва проволоки формируется сигнал логической единицы «ОБРЫВ». Следует отметить, что зажим (губки) фиксирует проволоку в процессе формирования межсоединения в определенных точках перемещения капилляра и опрос выходного сигнала УКОП управляющей системой автомата присоединения выводов производится в этих точках траектории перемещения капилляра.

Триггеры 5, 6 хранят состояния компаратора 2 при смене полярности выходного напряжения генератора 1. Далее сигналы с выходов триггеров 5, 6 поступают на входы элемента «2-ИЛИ» 7, на выходе которого формируется сигнал «ОБРЫВ», который поступает на вход оптопары 8 в случае обрыва проводника или дефекта точки сварки.

Вывод. Рассмотренное техническое решение исключает необходимость подбора (переключения) полярности для обеспечения оптимальной чувствительности при контроле формирования межсоединения.

Литература

1. Петухов, И. Б. Технология и оборудование микросварки в производстве изделий электронной техники / И. Б. Петухов, В. Л. Ланин, В. А. Емельянов. – Минск : Интегралполиграф, 2021. – 186 с.
2. Aluminium wedge-wedge bonding using capillary and ball bonder / S. Murali [et al.] // 50th International Symposium on Microelectronics-Raleigh, NC USA, 2017.

УДК 666.7

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА

Попов Р.Ю.¹, Дятлова Е.М.¹, Самсонова А.С.¹, Шабуря М.А.²

¹Белорусский государственный технологический университет

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведен анализ технической литературы в области синтеза материалов технического назначения, выбрана область составов, осуществлен синтез керамики и исследованы эксплуатационные характеристики; изучено влияние минерализующих добавок на свойства, структуру и фазовый состав, установлены закономерности изменения физико-технических, теплофизических характеристик и рентгеноструктурных показателей керамических материалов на основе различного природного кремнезем- и кальцийсодержащего сырья. Результаты исследований могут использоваться для производства керамического огнеприпаса на основе волластонита с использованием природного и техногенного сырья.

Ключевые слова: волластонит, техническая керамика, температурный коэффициент линейного расширения, термостойкость, огнеупорность.

INFLUENCE OF MINERALIZING ADDITIVES ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF CERAMICS BASED ON SYNTHETIC WOLASTONITE

Popov R.¹, Dyatlova E.¹, Samsonova A.¹, Shabura M.²

¹Belarusian State Technological University

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

Abstract. The analysis of technical literature in the field of synthesis of materials for technical purposes was carried out, the area of compositions was selected, the synthesis of ceramics was carried out and the operational characteristics were investigated; the effect of mineralizing additives on the properties, structure and phase composition was studied, the regularities of changes in the physical, technical, thermophysical characteristics and X-ray structural characteristics of ceramic materials based on various natural silica and calcium-containing raw materials were established. The research results can be used for the production of wollastonite-based ceramic firepower using natural and technogenic raw materials.

Key words: wollastonite, technical ceramics, temperature coefficient of linear expansion, heat resistance, refractoriness.

Адрес для переписки: Самсонова А.С., ул. Белорусская, 21, г. Минск 220006, Республика Беларусь
e-mail: misakamadara@yandex.by

Техническая керамика является самостоятельным классом материалов и находит все более распространенное применение в современных отраслях техники и промышленности, таких как электротехника, энергетика, в том числе ядерная, радиотехника, металлургия, химическое машиностроение [1].

Большой практический интерес представляет волластонит $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, как сырье многоцелевого назначения, обладающий крупнокристаллической игольчато-волокнистой структурой и широко используемый в различных отраслях промышленности [2].

Для изготовления изделий технической керамики используют природный волластонит, содержащий минимальное количество примесей. Для пластификации масс вводят небольшое количество глинистых и флюсующих добавок не ухудшающих свойства изделий. Температура обжига составляет 1200–1300 °С. Волластонитовая керамика обладает высокими электрофизическими и механическими свойствами. Для получения изделий технической керамики использу-

ют главным образом природное сырье высокой чистоты [3].

Высокая активность к спеканию тонкодисперсной фракции волластонита дает возможность повысить механическую прочность керамики при минимальном содержании спекающей добавки, не снижая термостойкости, а в некоторых случаях вообще отказаться от применения спекающих добавок [4].

Целью данной работы является разработка волластонитсодержащей керамики на основе природного сырья Республики Беларусь и изучение влияния минерализующих добавок на процессы, протекающие при синтезе.

Использование минерализующих добавок позволяет интенсифицировать процесс фазообразования и улучшить характеристики материала.

Разработка керамических втулок на основе синтетического волластонита осуществлялась в двух направлениях. В первом случае использовалось природное сырье Республики Беларусь: мел, трепел, а в качестве минерализующих добавок кальцийсодержащий отход производства вяжу-

щих материалов и природный волластонит. Пластификатором выступала огнеупорная глина Веселовского месторождения. Количество компонентов изменялось в пределах: мел (30–50 мас. %), трепел (50–60 мас. %), глина (10–15 мас. %), кальцийсодержащий отход (5–10 мас. %), природный волластонит (3–6 мас. %).

Во втором случае применялось следующее сырье: мел, маршалит (молотый кварцевый песок), минерализующие добавки – кальцийсодержащий отход (5–10 %), природный волластонит (3–6 %). Пластифицирующим компонентом являлась глина Веселовского месторождения.

Изготовление опытных образцов в виде цилиндров диаметром 22 мм осуществлялся методом полусухого прессования при давлении 20–25 МПа. Обжиг материалов проводился в интервале температур 1050–1150 °С с выдержкой 1 час.

Определение показателей спекания керамических масс являются критериальными, характеризующими механические характеристики конечного продукта и условия его эксплуатации. Результаты измерения физико-химических свойств опытных образцов оптимального состава приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические свойства опытных образцов оптимального состава

Номер состава	Свойства образцов при температуре обжига, °С		
	1050	1100	1150
	Водопоглощение, %		
1	24,0	23,2	21,3
2	24,7	22,9	20,8
3	21,5	20,9	16,6
	Кажущаяся плотность, кг/м ³		
1	1663	1681	1735
2	1669	1697	1745
3	1739	1748	1888
	Открытая пористость, %		
1	39,9	38,9	36,1
2	41,2	38,8	37,3
3	37,4	36,3	31,3

Как видно из приведенных данных, образцы с добавкой волластонита улучшают физико-химические показатели синтезированного материала.

Присутствие в составах масс дополнительного количества волластонита до 3 % не оказывает существенного влияния на процессы спекания, однако при увеличении содержания указанного компонента выше данного значения, показатели спекания значительно отличаются от первоначального уровня. Такое поведение керамических масс может быть связано, по-нашему мнению, с возможностью взаимодействия вводимой добавки волластонита с матрицей материала с образованием различных легкоплавких соединений (силикатов и алюмосиликатов), дальнейшее увеличение содержания волластонита в исходной композиции существенным образом изменяет

соотношение химических компонентов керамических масс, что снижает вероятность образования легкоплавких эвтектик в указанном интервале температур.

Наличие в составе кальцийсодержащего отхода приводит к ухудшению показателей спекания в интервале исследуемых температур, что связано с малой вероятностью формированием стекловидной фазы при данных условиях синтеза, а именно – не достигается необходимые соотношения оксидов, обеспечивающих образование легкоплавких эвтектик, либо температурные параметры не позволяют создать условия для их образования.

Механическая прочность при сжатии материалов, полученных на основе масс исследуемой системы и обожженных при температуре 1150 °С, находится в пределах 32,9–37,7 МПа.

Из источников литературы известно, что тонкодисперсная фракция волластонита повышает механическую прочность керамики за счет армирования кристаллами волластонита, которые вытягиваются вдоль оси образца.

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что наиболее низким ТКЛР обладают образцы состава 3 ($\alpha = (6,05 - 7,24) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).

В ходе исследования были установлены зависимости свойств керамики от состава и температуры синтеза. Оптимальной является температура 1150 °С, при данных условиях синтеза наблюдается более полное спекание. Исследования свойств позволили сделать выводы о том, что наилучшими эксплуатационными характеристиками обладают образцы на основе мела и трепела с добавлением природного волластонита (3–6 %). Присутствие трепела в составе масс способствует активации процессов фазообразования и спекания за счет наличия аморфной составляющей.

Исследование фазового состава синтезированной керамики позволяет сделать выводы о том, что использование трепела приводит к существенному изменению фазового состава материала. В структуре керамики четко прослеживаются кристаллические образования, идентифицируемые по габитусу, как волластонит, что подтверждает возможность получения волластонитсодержащих материалов на основе белорусского сырья.

Литература

1. Будников, П. П. Химическая технология керамики и огнеупоров / П. П. Будников, Д. Н. Полубояринов. – М.: Стройиздат, 1972. – 553 с.
2. Кулдашева, А. Х. Экспериментальные исследования прочностных свойств бетонов на основе волластонитового сырья / А. Х. Кулдашева // Вестник. – 2011. – № 7. – С. 627–630.
3. Волочко, А. Т. Огнеупорные и тугоплавкие керамические материалы / А. Т. Волочко, Е. М. Дятлова. – Минск, 2013. – 383 с.

4. Керамика из природного воллатсонита для литейных установок алюминиевой промышленности / Л. Н. Русанова [и др.] ; под общ. ред. Л. Н. Русановой. – ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 5. – С. 45–47.

новой. – ФГУП «ОНПП «Технология», г. Обнинск Огнеупоры и техническая керамика. – 2008. – № 5. – С. 45–47.

УДК 673.2.082

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ

Реутская О.Г.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Чувствительные элементы мультисенсорных микросистем применяют для измерения выходного сигнала сенсора. Конструктивные особенности составных частей сенсоров определяют рабочие диапазоны устройств на их основе. Исследование форм «полоска» и «меандр» нагревателей позволило установить влияние компонентов конструкции на измеряемый сигнал. Определены режимы работы, позволяющие снизить энергопотребление микросистем на алюмооксидных подложках.

Ключевые слова: мультисенсорная микросистема, чувствительный элемент, нагреватель, алюмооксидная подложка.

SENSITIVE ELEMENTS FOR MULTISENSORY MICROSYSTEMS

Reutskaya O.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The sensing elements of multi-sensor microsystems are used to measure the sensor output signal. The design features of the sensor components determine the operating ranges of devices based on them. The study of the shapes of the “strip” and “meander” heaters allowed us to establish the influence of the design components on the measured signal. The operating modes allowing to reduce the energy consumption of microsystems on aluminum oxide substrates are determined.

Key words: multisensory microsystem, sensing element, heater, aluminum oxide substrate.

*Адрес для переписки: Реутская О.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: oreutskaya@bntu.by*

Датчики и системы контроля многофакторной анализируемой среды позволяют получать широкий спектр различных параметров. Постановка задачи и цели использования таких систем определяет диапазон применения их в соответствующих приборах. Чувствительные элементы для полупроводниковых мультисенсорных микросистем могут быть интегрированы в биоанализаторы, газовые пожарные извещатели, системы контроля состава газовой среды в производственных и жилых помещениях и т.д.

Выбор режимов работы и подбор анализирующего состава позволяет расширять диапазон применения таких сенсорных элементов. Качественный и количественный состав газовой среды можно определять химическими датчиками. Полупроводниковые слои сенсоров могут работать при повышенных температурах (200–400 °С). Поэтому выбор конструкции является одним из основных вопросов в области создания газоаналитических приборов [1].

Рабочий диапазон температур отражается на энергопотреблении устройства. Для его снижения и повышения чувствительности сенсора особое внимание уделяется исследованию возмож-

ности определения концентраций газов в нижних пределах их допустимых концентраций [2].

Увеличение рабочей морфологии поверхности сенсора и чувствительного слоя позволяет увеличить удельную поверхность к объему газочувствительного слоя. Такая особенность конструкции сенсора позволяет улучшить и повысить его сигнал.

Условно методы получения «развитой» поверхности чувствительных элементов можно разделить на две группы. К первой группе относятся технологические приемы обработки поверхности кремния и формирования подслоя пористого кремния на них. Ко второй группе относятся методы изготовления пористых алюмооксидных подложек [2].

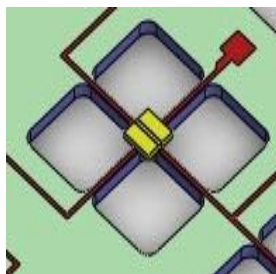
Пористый оксид алюминия – это диэлектрический материал с регулярной упорядоченной структурой и большой удельной поверхностью. Он обладает высокой прочностью, а также хорошей адгезией к материалам контактов в мультисенсорных системах [1, 2]. Поверхность подложек не должна содержать большого числа дефектов после осуществления всех технологических приемов формирования сенсоров. Для повышения се-

лестивности микросистем на поверхности подложек формируют матрицы сенсоров.

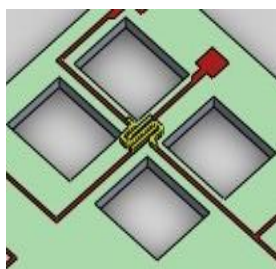
Снизить потребляемую мощность и повысить газочувствительные свойства сенсорных устройств, при этом сохранить равномерное распределение температуры по поверхности чувствительных элементов микросистемы, позволяет технология создания микросистем *lab-on-chip*.

В конструкции сенсоров используют чувствительные элементы с нагревателями разной формы. Нами рассмотрены два типа: нагреватель в форме «полоска» и в форме «меандр» (рис. 1).

На рис. 1, *а* представлен нагреватель шириной 25 мкм с зазором между информационными электродами 5 мкм. На рис. 1, *б* изображен нагреватель с двумя «витками» с шириной 7 мкм и зазором между информационными электродами 3 мкм. Такие размеры модели связаны с технологическими приемами создания сенсорных элементов микросистем для изготовления экспериментальных образцов датчиков на их основе.



а



б

а – модель с нагревателем в форме «полоска»;
б – модель с нагревателем в форме «меандр»

Рисунок 1 – Модели чувствительных элементов

Нагреватель в форме «меандр» может включать большее число «витков». А также можно варьировать размеры между нагревателем и информационными электродами. Для исследования температурных зависимостей и термомеханических деформаций, возникающих при разных режимах работы, в программном пакете *COMSOL Multiphysics* были построены конечно-элементные модели микросистем с различной топологией нагревателей (рис. 1).

Проведено исследование экспериментальных образцов микросистем с заданными нагревателями для установления влияния формы элемента на свойства устройства в целом.

На рис. 2 представлена зависимость потребляемой мощности от температуры нагревателя для микросистем.

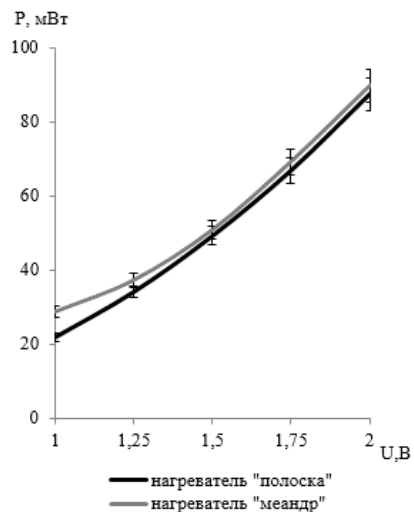


Рисунок 2 – Зависимость потребляемой мощности мультисенсорной микросистемы с нагревателями типа «полоска» и «меандр» от питающего напряжения

Из рисунка 2 видно, что при малых мощностях электропитания нагреватель в форме «меандр» обладает большим энергопотреблением, чем нагреватель в форме «полоска». Активная поверхность первого нагревателя больше, что позволяет разогревать чувствительные слои на их поверхности более равномерно. С увеличением электропитания, потребляемая мощность нагревателей разной формы становится соизмеримой друг с другом. При этом изменение потребляемой электрической мощности микросистемы в целом составляет $\Delta P \sim 1,1 \pm 0,1$ мкВт.

При выборе формы нагревателя следует учитывать технические требования, предъявляемые к микросистеме в составе датчиков и приборов на их основе.

Литература

- Афанасьев, Д. С. Аналитический обзор датчиков летучих веществ для интернета вещей / Д. С. Афанасьев, Е. А. Бардакова, Д. С. Быстряков // Информационные технологии и телекоммуникации. – 2016. – Т. 4, № 4. – С. 1–12.
- Реутская, О. Г. Разработка газочувствительных сенсоров на основе оксидных структур с низким энергопотреблением / О. Г. Реутская, Н. И. Мухуров, И. А. Таратын // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 119–124.

УДК 539.622

ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ

Ризноокая Н.Н.¹, Касьмин В.Ю.¹, Матвиевич В.Г.²

¹Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

²ООО «НефтеХимДиагностика»

Бобруйск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведен анализ влияния капиллярных сил на динамику качания маятника в режиме предварительного смещения. Приведены результаты эксперимента с использованием дистиллированной воды и глицерина.

Ключевые слова: трение качения, предварительное смещение, капиллярные силы, маятниковый метод.

A PHYSICAL PENDULUM DYNAMICS WITH A SINGLE BALL SUPPORT ON A PLANE SURFACE UNDER ACTIVE IMPACT OF CAPILLARY FORCES

Riznookaya N.¹, Kasmin V.¹, Matvievich V.²

¹Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

²LLC “NefteHimDiagnostika”

Bobruisk, Belarus

Abstract. The influence of capillary forces on pre-rolling friction is analyzed. The results of an experiment using distilled water and glycerin are presented.

Key words: rolling friction, pre-displacement, capillary forces, pendulum method.

Адрес для переписки: Н.Н. Ризноокая, пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: Riznookaya@bntu.by

Изучению состояния поверхности твердых тел в настоящее время уделяется все больше внимания в научных и прикладных исследованиях. Современная микроэлектроника буквально и фигурально базируется на поверхности полупроводникового материала или покрытия.

Одной из тенденций современного приборостроения является создание микромашин. Здесь, по мере уменьшения размеров приборов, состояние поверхностей их элементов оказывает все большее влияние на свойства этих приборов. Однако несмотря на значительные успехи нанотрибология до сих пор не привела к существенному прорыву в понимании макроскопических трибологических процессов, поскольку до сих пор остается незаполненным пробел между классической трибологией и нанотрибологией [1].

Наиболее простым, чувствительным и точным методом для измерения коэффициентов сопротивления качению является маятниковый метод. Данный метод основан на наблюдении затухания амплитуд свободных колебаний физического маятника, который опирается одним шариком на плоскую поверхность исследуемого материала.

Целью данной работы является исследование динамики качаний физического маятника с опорой на один шарик при активном влиянии капиллярных сил на плоской поверхности.

Основным механизмом сопротивления качению являются силы деформации. На пятне кон-

такта имеют место адгезия и проскальзывание. В [2] высказали предположение, что гистерезис силы трения качения возникает именно вследствие проскальзывания.

В работе [3], где изучалось трение качения при малых свободных качаниях физического маятника с опорой на два шарика, также считают, что в области малых перемещений этих шариков в основном работает деформационный механизм сопротивления качению.

Отметим, что вывод о том, что деформация контактирующих тел в процессе предварительного смещения при качении является основным механизмом диссипации энергии, нельзя считать универсальным. Из анализа литературных источников следует, что, по мере уменьшения нагрузки, роль адгезии, как механизма потерь энергии возрастает.

Для решения поставленной цели необходимо проанализировать влияние механизмов взаимодействия на динамику качения при малых нагрузках, а также, экспериментально оценить влияние механизмов взаимодействия на динамику качаний маятника. В работах [4, 5] предложен маятниковый метод определения коэффициента сопротивления качению и предложен метод определения поверхностной плотности работы адгезии на отрыв.

В эксперименте использовался маятник, массой 0,406 кг, который опирался на плоскопараллельный образец одним шариком с радиусом

сом $R = 6,05$ мм, выполненным из стали. Контактный угол, радиус пятна контакта и глубина внедрения шарика для стекла К8 равны 37 угл. мин, 66 мкм и 0,7 мкм соответственно.

Исследования влияния капиллярных сил на микрокачания маятника проводились на поверхности образца из оптического стекла марки К8.

Первый опыт проводили на «чистой» поверхности (рис. 1).

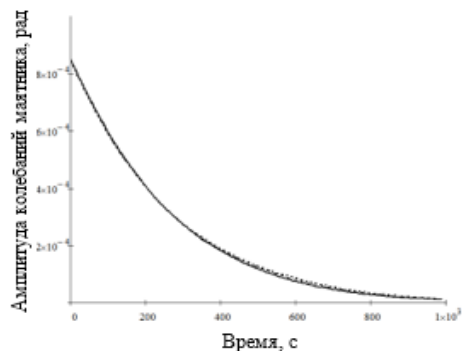


Рисунок 1 – Результаты измерений амплитуд колебаний маятника и соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой $8,4 \cdot 10^{-4}$ рад

Затем, на поверхность отдельных образцов капли жидкости: дистиллированную воду, раствор глицерина и дистиллированной воды в различной концентрации. После чего, не удаляя жидкость со стекла, проводили измерения. При проведении эксперимента за меру объема раствора принята капля, примерно равная 0,01 мл для дистиллированной воды и 0,005 мл для раствора глицерина.

Результаты измерений амплитуды колебаний от времени и периода колебаний от амплитуды при начальном отклонении $8,4 \cdot 10^{-4}$ радиан, проведенных при разном объеме дистиллированной воды, показаны на рис. 2 и 3.

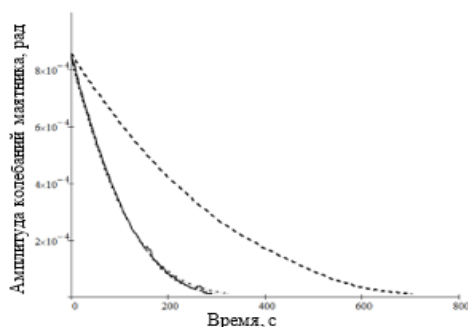


Рисунок 2 – Результаты измерений амплитуд колебаний маятника и соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой $8,4 \cdot 10^{-4}$ рад в присутствии жидкости на пятне контакта (— — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом 0,01 мл; - - - — очищенная поверхность с каплей ДВ, объемом $\approx 0,02$ мл)

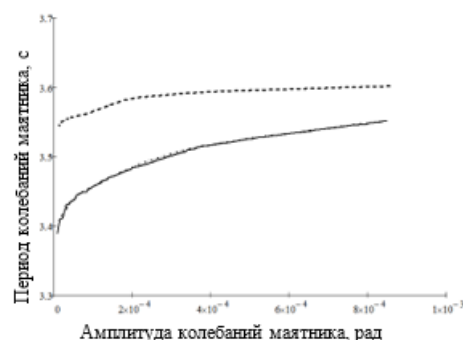


Рисунок 3 – Зависимость периода колебаний маятника от амплитуды на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой $8,4 \cdot 10^{-4}$ в присутствии жидкости на пятне контакта (— — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом 0,01 мл; - - - — очищенная поверхность с каплей дистиллированной воды, объемом $\approx 0,02$ мл)

Для опыта с одинаковым объемом жидкости использовался раствор глицерина в различной концентрации (21 % р-р глицерина; 42,5 % р-р глицерина; 63 % р-р глицерина; 85 % р-р глицерина). Результаты эксперимента показаны на рис. 4, а результаты измерения коэффициента сопротивления качению в таблице 1.

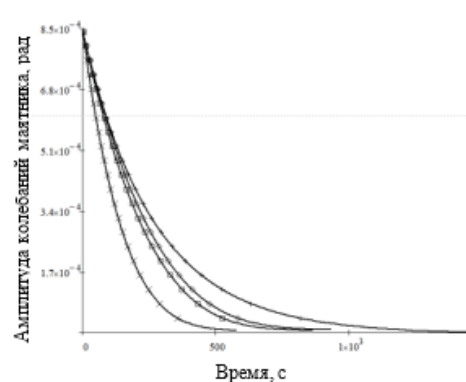


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний маятника от соответствующих им моментов времени на поверхности стекла марки К8 с начальной амплитудой $8,4 \cdot 10^{-4}$ в присутствии раствора глицерина различной концентрации на пятне контакта (\diamond 21 % р-р глицерина; \square 42,5 % р-р глицерина; $+$ 63 % р-р глицерина; \times 85 % р-р глицерина)

Таблица 1. Коэффициент сопротивления качению

Условие качения	Коэффициент сопротивления качению
Сухая поверхность	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Дистиллированная вода	$4,0 \cdot 10^{-6}$
21% р-р глицерина	$1,8 \cdot 10^{-6}$
42.5% р-р глицерина	$2,0 \cdot 10^{-6}$
63% р-р глицерина	$1,5 \cdot 10^{-6}$
85% р-р глицерина	$3,0 \cdot 10^{-6}$

В результате проведенного эксперимента можно отметить, что жидкость оказывает влияние на динамику качаний маятника, более того,

влияет как состав жидкости, так и ее объем. Наличие жидкости в объеме, обеспечивающем граничное трение, приводит к более быстрому затуханию маятника, чем на сухой поверхности.

Литература

1. Попов, В. Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений / В. Л. Попов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 352 с.

2. Mekid, S. A non-linear model for pre-rolling friction force in precision positioning / S. Mekid // Proc. Instn Mech. Engrs Part J: J. Engineering Tribology. – Vol. 218 – P. 305–311.

3. Савенко, В. И. Применение маятникового метода для анализа механизмов поглощения энергии при качении / В. И. Савенко [и др.] // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 2. – С. 212–222.

4. Джиладари, И. З. Методика и средство измерения малых коэффициентов сопротивления качению маятниковым методом / И. З. Джиладари, Н. Н. Ризноокая // Метрология и приборостроение. – 2010. – № 4. – С. 13–17.

5. Gilavdary, I. A new theory on pure pre-rolling resistance through pendulum oscillations / I. Gilavdary, S. Mekid, N. Riznookaya // Proc IMechE Part J: Journal of Engineering /tribology. – 2013. – Vol. 227, № 6 – P. 618–628.

УДК 681.2.084

ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ: ОТ ШКОЛЬНЫХ ОПЫТОВ ПО ФИЗИКЕ ДО НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ Савич В.В.

*Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе приводится обзор достижений в области использования трибоэлектрического эффекта.

Ключевые слова: трение, трибоэлектричество, достижения/

TRIBOELECTRIC EFFECT: FROM SCHOOL EXPERIENCES IN PHYSICS TO NEW ENERGY SOURCES Savich V.

*The State Scientific Institution "Powder Metallurgy Institute"
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper provides an overview of the achievements in the field of using the triboelectric effect.

Key words: friction, triboelectricity, achievements.

*Адрес для переписки: В.В. Савич, ул. Платонова, 41, Минск 220005, Республика Беларусь
e-mail: savich.vadim@gmail.com*

Трибоэлектрический эффект известен со времен изучения физики в средней школе: при трении двух разнородных материалов или веществ (например, с разной плотностью) между ними происходит разделение зарядов [1]. Еще один пример проявления данного эффекта – электрофорная машина – электростатический генератор для демонстрации высоковольтного (до десятков кВ) разряда. Считается, что трибоэлектрический эффект вызван адгезией двух материалов, состоящих из разных молекул. Хотя адгезия не является химической связью между атомами, происходит обмен электронами между различными молекулами, который приводит к электростатическому притяжению между ними. Физическое разделение материалов приводит к трению. Поскольку перенос электронов между молекулами в различных материалах не является немедленно обратимым, избыточные электроны в одном типе молекул остаются позади, в то время как дефицит электронов возникает в другом. Таким образом, в материале может образовываться положительный или отрицательный заряд, который рассеивается после разделения материалов [2].

Механизмы трибоэлектрификации (или контактной электризации) обсуждались много лет, включая перенос электронов, перенос ионов или перенос частиц материала. Недавние исследования 2018 года с использованием зондовой микроскопии Кельвина и трибоэлектрических наногенераторов показали, что перенос электронов является доминирующим механизмом трибоэлектрификации между твердым телом и твердым телом. Модель работы выхода может быть использована для объяснения переноса электронов между металлом и диэлектриком. Модель поверхностных состояний может быть использована для объяснения переноса электрона между двумя диэлектриками. Для общего случая, поскольку трибоэлектризация происходит для любого материала, Ванга предложил общую модель, в которой перенос электрона вызывается сильным перекрытием электронного облака между двумя атомами для пониженного межатомного потенциального барьера за счет сокращения длины связи. На основе модели исследовано влияние температуры и фотовозбуждения на трибоэлектрификацию. Такую модель можно распространить на

пары «жидкость – твердое тело», «жидкость – жидкость» и «газ – жидкость» [2].

До недавнего времени проявления трибоэлектрического эффекта и связанные с ним электрические разряды являлись серьезными техническими проблемами XX и XXI столетий, поскольку производство боеприпасов и взрывчатых веществ, нефтехимические и фармацевтические предприятия, типографии, производство дисперсных пищевых продуктов – от муки до сахара – это те отрасли промышленности, где борьба со статическим электричеством имеет определяющее значение для их безопасности. Статическое электричество и электростатический разряд – враг всех полупроводниковых приборов [3].

К середине 20-х годов XXI века исследователи из Georgia Tech (США) – руководитель проф. Zhong Lin Wang, обернули трибоэлектрический эффект из вреда в пользу и построили прототип простого устройства, преобразующего старто-стопное движение в энергию [4]. Морские волны, ходьба, танцы, капли дождя могут быть использованы для управления датчиками, мобильными гаджетами и даже стать генераторами энергии.

Прототип трибогенератора, назначение которого в демонстрации потенциальных возможностей сбора энергии при трении, представляет собой диск диаметром около 10 сантиметров. Внутри находятся два вращающихся листа материала в форме круга, один донор электронов, другой их приемник. При вращении между ними образуется электрический заряд, так как листы изолированы друг от друга. Третий диск с электродами расположен между двумя первыми. Он «снимает» заряд и обеспечивает небольшой электрический ток через полезную нагрузку [5]. Мощность устройства при максимальной скорости вращения 3000 оборотов в минуту составляет 1,5 Вт. Энергоэффективность прототипа составляет 24 %, что сравнимо с показателями магнитно-индукционных турбин и в три раза выше эффективности пьезокристаллов, ранее считавшихся лучшими сборщиками механической энергии и ее преобразования в электрическую.

Исследователи из Georgia Tech предложили использовать разработанный ими трибогенератор для самозапитывающегося микрофона, для акустического определения положения тела, для акустических весов.

Схема разработанного устройства представлена ниже (рис. 1) [6]. Она мало чем отличается от традиционного микрофона, с той лишь разницей, что вместо электромагнитных эффектов, таких как изменение индукции или емкости конденсатора, измеряемой характеристикой является, как и случае с трибогенератором, ток.

Микрофон имеет такую диаграмму направленности, что на его основе создан детектор по-

ложения источника звука, причем самозапитывающийся.

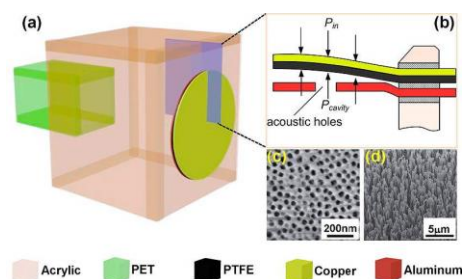


Рисунок 1 – Схема устройства самозапитывающегося микрофона и детектора акустических волн (PET – полиэтилентерефталат, PTFE – политетрафторэтилен)

Подобного рода самозапитывающаяся мембрана может быть использована для взвешивания предметов посредством звука. Удалось добиться чувствительности 270 мВ/мг, взвешивая массы от 40 мг до 400 мг. Такие весы могут найти свое применение в ювелирной промышленности из-за крайне низкой цены и высокой чувствительности.

Специалисты под руководством проф. Zhong Lin Wang разработали схему трибоэлектрического генератора с возвратно-поступательным движением коаксиальных трубчатых элементов (рис. 2) [7].

Здесь электрический заряд накапливается при перемещении двух полимерных пленок с медными контактами друг относительно друга. И хотя максимальная выходная мощность составляет всего 10-12 мВт (1.36 Вт/м^2) при токе около 300 мкА и при скорости движения 1 м/с для созданного устройства, потенциально оно может быть использовано для питания навигационных маяков, а также для подпитки встроенного кардиометра или трекера [7].

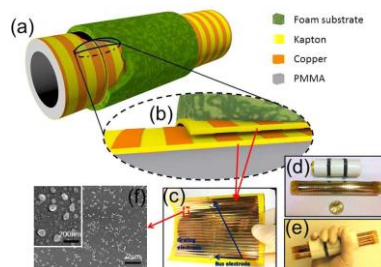


Рисунок 2 – Схема трибоэлектрического генератора (a, b). Полимерная пленка (каптон) с медными контактами в собранном и разобранном состоянии (c–e)

Разработана модель генератора электроэнергии от капель дождя (рис. 3, 4) [8]. Использовалась более сложная двухконтурная система, которая позволяет конвертировать не только электростатическую электроэнергию от перекачивания капель, но и получать энергию от ударного взаимодействия капель с поверхностью.

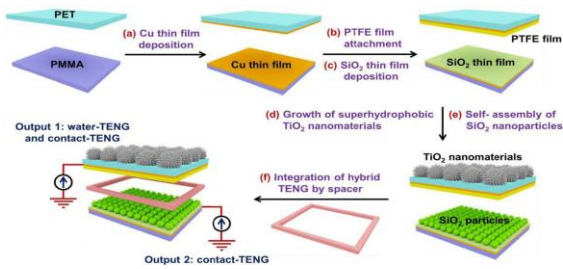


Рисунок 3 – Общая схема двухконтурного трибоэлектрического генератора: первый контур – наночастицы диоксида титана, обеспечивающие несмачиваемость поверхности и скатывание капель дождя, второй контур – наночастицы диоксида кремния, соприкасающиеся с тефлоновой пленкой при ударе падающей капли

Капля, попадая на наклонную поверхность такого генератора, несет с собой некоторый заряд (допустим положительный), а в процессе перекапывания по поверхности электризует полимерную пленку (соответственно, отрицательно), а медный электрод лишь «собирает» этот избыточный отрицательный заряд. Второй же контур работает на принципе описанном несколько раз выше: наночастицы диоксида кремния при ударе соприкасаются с тефлоновой пленкой, создавая разность потенциалов и электризуясь. Подробности работы двух контуров по отдельности в схематическом виде представлены ниже:

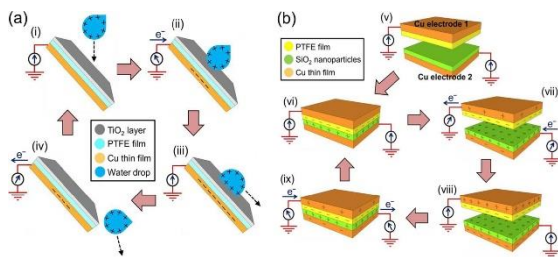


Рисунок 4 – Работа двух контуров по отдельности

В конечном счете, первый контур дает мощность около $1,3 \text{ Вт/м}^2$, тогда как контур, утилизирующий механическую энергию падения капли позволяет дополнительно получить до $0,3\text{--}0,4 \text{ Вт/м}^2$. К тому же, на основе таких систем могут быть созданы самозапитывающиеся сенсоры различных молекул. В частности, в [8] приведен пример с этанольным сенсором, позволяющим определять доли процента данного соединения.

Ученые создали ткань (рис. 5) на основе обычных хлопчатобумажных нитей, которая позволяет вырабатывать электричество за счет сокращений мышц при ходьбе, например, или простого похлопывания [9].

В данном случае хлопчатобумажные волокна сначала покрываются углеродными нанотрубками, а затем часть из них дополнительно тефлоном. Далее пары таких волокон вплетаются в обычную ткань и могут работать, как генератор

трибоэлектричества за счет перемещения и трения волокон друг о друга.

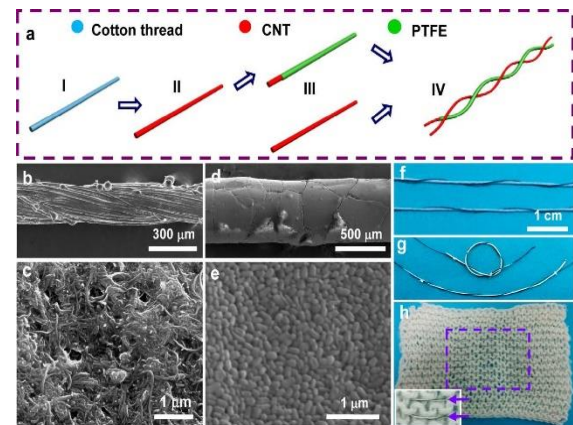


Рисунок 5 – Ткань, позволяющая вырабатывать электроэнергию: специальные волокна вплетаются в обычное хлопчатобумажное

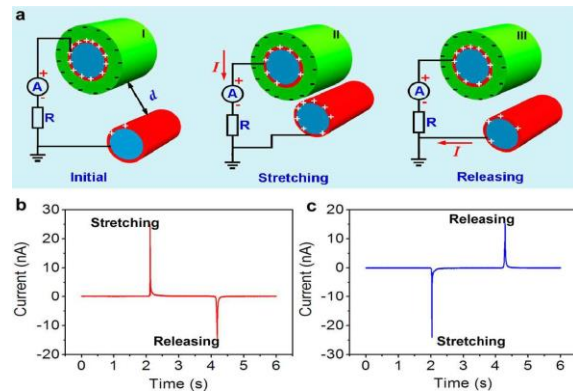


Рисунок 6 – Электрический принцип работы двух волокон для получения трибоэлектричества

Удельная мощность таких устройств не так велика, как хотелось бы, равно как и накапливаемый заряд – всего несколько нКл за полминуты, однако, этого хватает, чтобы оживить монохромный дисплей простым движением пальца или же, такого малого количества электроэнергии вполне может хватить для какого-нибудь сенсора, встроенного в одежду, например, термометра, для активации которого достаточно лишь похлопать по месту расположения трибогенератора [9].

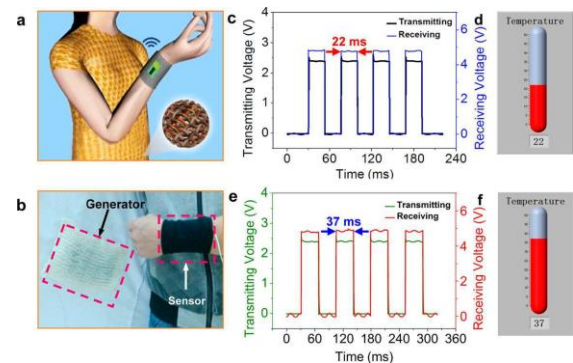


Рисунок 7 – Носимый самозапитывающийся термометр

Компания Sumitomo (Япония) представила разработанную совместно с Кансайским университетом технологию выработки электроэнергии, основанную на вращении специального устройства для генерации статического электричества, прикрепленного к внутренней части шины [10]. В основе технологии лежит трибоэлектрический эффект, говорит технический специалист Shina Guide, позволяющий устройству для выработки электроэнергии эффективно генерировать энергию каждый раз, когда шина деформируется при вращении (рис. 8).

Производитель шин заявляет, что эта технология имеет большой потенциал для практического применения. Ее можно использовать в качестве источника питания для различных автомобильных цифровых систем.

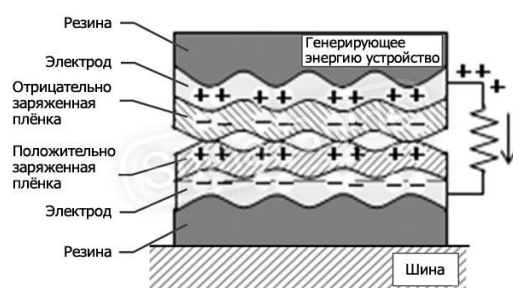


Рисунок 8 – Фрикционная зарядка с использованием деформации шины при вращении

Литература

1. Тюкин, А. В. Электрические и триботехнические свойства и трибоэлектрические эффекты при

трении композиционного материала на основе политетрафторэтилена // Автореф. дис. канд. техн. наук. – Омск: ФГБОУ ВПО «Омский государственный технический университет», 2011. – 19 с.

2. Трибоэлектрический эффект [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // https://tftwiki.ru/wiki/Triboelectric_effect.

3. Основы электростатического разряда [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://prodiod.com/blog/osnovyi-elektrostaticheskogo-razryada.html>.

4. Трибоэлектричество – еще один источник энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://integral-russia.ru/2016/08/09/triboelektrichestvo-eshhe-odin-istochnik-energii>.

5. Wang Z. L. Progress in triboelectric nanogenerators as new energy technology and self-powered sensors / Z. L. Wang, J. Chen, L. Lin // *Energy & Environmental Sci.* 8, 2015. – P. 2250–2282.

6. Triboelectrification-Based Organic Film Nanogenerator for Acoustic Energy Harvesting and Self-Powered Active Acoustic Sensing / J. Yang [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 3. – P. 2649–2657.

7. Case-Encapsulated Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Energy from Reciprocating Sliding Motion / Q. Jing [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 4. – P. 3836–3842.

8. Dual-Mode Triboelectric Nanogenerator for Harvesting Water Energy and as a Self-Powered Ethanol Nanosensor / Zong-Hong Lin [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, № 6. – P. 6440–6448.

9. Fiber-Based Generator for Wearable Electronics and Mobile Medication / J. Zhong [et al.] // *ACS Nano.* – 2014. – Vol. 8, no. 6. – P. 6273–6280.

10. B. Sumitomo придумали как использовать энергию шин для электроники автомобиля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shina.guide/press/20264>.

УДК 614.7.628.58

РЕЦИРКУЛЯТОР ВОЗДУХА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ

Савченко А.Л., Мальцев Д.В., Муминбоев А., Скурковина Л.Е.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Объектом исследования являются технические средства, предназначенные для обеззараживания воздуха в процессе его принудительной циркуляции. Цель разработки – анализ технических средств и разработка новой конструкции для обеззараживания воздуха в помещениях различного типа. В процессе выполнения работы проводилось накопление и применение теоретических сведений о способах обеззараживания воздуха в медицинских учреждениях. В результате была разработана конструкция бактерицидного рециркулятора. Использование устройства обеспечивает постоянную рециркуляцию воздуха через закрытый корпус.

Ключевые слова: рециркулятор воздуха, ультрафиолетовое облучение, подогрев воздуха, дистанционное управление.

AIR RECIRCULATOR FOR MEDICAL INSTITUTIONS

Savchenko A., Maltsev D., Muminboev A., Skurkovina L.

Belorussian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The object of the research is technical devices intended for disinfection of air in the process of its forced circulation. The purpose of the development is the analysis of technical devices and the development of a new design for air disinfection in rooms of various types. In the process of performing the work, the accumulation and application of theoretical information on the methods of air disinfection in medical institutions was carried out. As a result, the design of a bactericidal recirculator was developed. The use of the device ensures constant air recirculation through the closed housing.

Key words: air recirculator, ultraviolet irradiation, air heating, remote control.

*Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by*

Бактерицидные рециркуляторы воздуха – это устройства, предназначенные для обеззараживания воздуха в процессе его принудительной циркуляции. В подавляющем большинстве случаев основными элементами конструкции рециркулятора являются вентилятор, ультрафиолетовая лампа и металлический корпус.

Бактерицидные рециркуляторы воздуха имеют широкую сферу применения. Однако чаще всего их используют в медицинских учреждениях для обеззараживания воздуха в помещениях различного типа: палатах, кабинетах диагностики и терапии, операционных, лабораториях и т.д. Важным преимуществом рециркуляторов над традиционным способом «кварцевания» является возможность их работы в присутствии людей. Это достигается путем применения безозоновых ультрафиолетовых ламп. Особенностью таких ламп является то, что их колба не пропускает т.н. жесткое УФ-излучение, т.е. излучение с длиной волны ниже 200 нм, при котором образуется озон. В наиболее распространенных лампах низкого давления 86 % излучения приходится на длину волны 254 нм, что хорошо согласуется с пиком кривой бактерицидной эффективности, т.е. эффективности поглощения ультрафиолета молекулами ДНК. Бактерицидное УФ-излучение на этих длинах волн вызывает димеризацию тимина в молекулах ДНК. Накопление таких изменений в ДНК микроорганизмов приводит к замедлению темпов их размножения и вымиранию.

Эффективность ультрафиолетового облучения помещения оценивается по степени снижения микробной обсеменности воздуха, поверхностей ограждений и оборудования под воздействием облучения или на основе оценки уровня микробной обсеменности после облучения. Оба показателя сопоставляются с нормативами. Испытания проводятся согласно методическим рекомендациям [1].

Ультрафиолетовая обработка воздуха не обладает пролонгированным эффектом. Поэтому используется постоянная рециркуляция воздуха через закрытый корпус с лампами.

В холодное время года, воздух, выходящий из рециркулятора, целесообразно было бы подогревать. Для этого лучше всего использовать инфракрасный нагревательный элемент, который, в отличие от ТЭНов или нихромовой проволоки, не сжигает кислород.

Создание рециркулятора с использованием малошумных вентиляторов, УФ-ламп длительного срока службы, а также с подогревом выходящего воздуха является актуальной задачей.

В подавляющем большинстве конструкций рециркуляторов используется наиболее простой вариант исполнения, включающий следующие основные элементы:

- корпус закрытого типа;
- вентилятор (один или несколько);
- УФ-лампа (одна или несколько).

Чаще всего вентиляторы устанавливаются либо на входе, либо на выходе корпуса с лампами, однако встречаются конструкции с дублирующими вентиляторами. Существуют варианты исполнения с фильтром на входе, для защиты вентиляторов и ламп от пыли.

Для предотвращения распространения УФ-излучения через входное и выходное воздушные отверстия используются различные защитные элементы. Чаще всего это т.н. лабиринтные и У-образные решетки.

Встречаются конструкции рециркуляторов, в которых УФ-излучение преобразуется в видимое с помощью прозрачного корпуса, покрытого люминофором. Такие рециркуляторы можно использовать для освещения обрабатываемого помещения.

При проектировании конструкции были учтены достоинства и недостатки существующих решений. На основании этого была разработана конструкция, схема которой представлена на рис. 1.

Рециркулятор воздуха бактерицидный содержит входные и выходные вентиляторы 1, установленные, соответственно, на входе и выходе корпуса 2. Вентиляторы 1 продублированы для снижения потерь воздушного потока. Внутри корпуса 2 установлены три ультрафиолетовые бактерицидные безозоновые лампы 3. Для экра-

нирования УФ излучения на вентиляторах закреплены трубы 4. Перед входными вентиляторами 1 установлен фильтр 5, служащий для защиты вентиляторов и ламп от пыли. На пути выходящего потока воздуха размещается нагревательный элемент 6.

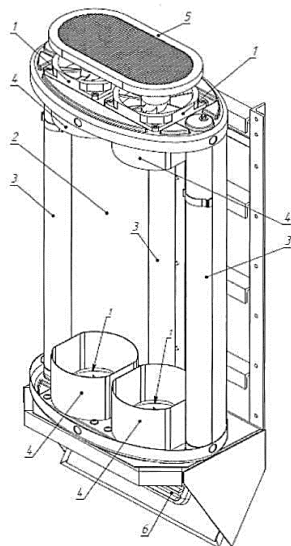


Рисунок 1 – Схема конструкции рециркулятора

Рециркулятор работает следующим образом.

Воздух, всасываемый входными вентиляторами 1, проходит через фильтр 5, сами вентиляторы и попадает внутрь корпуса 2. Там происходит

обеззараживание воздуха с помощью УФ-излучения, генерируемого лампами 3. Затем воздух вытягивается из корпуса 2 с помощью выходных вентиляторов 1 и попадает на нагревательный элемент 6. Нагретый воздух, отражаясь от нагревателя 6, распространяется в помещение.

Таким образом, конструкция рециркулятора является достаточно простой и принцип работы, соответственно, так же является несложным.

Внешний вид прибора представлен на рис. 2.

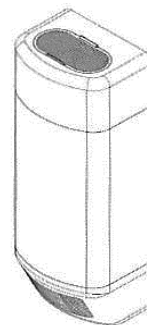


Рисунок 2 – Внешний вид рециркулятора

Литература

1. Методические рекомендации Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 01.06.2001 N 26-01 О 1 «Применение ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха и поверхностей в лечебно-профилактических учреждениях» – Мн., 2001.

УДК 616:7,681.2

СВАРКА НИТИНОВОЙ ПРОВОЛОКИ С УЛЬТРАЗВУКОМ

Савченко А.Л., Минченя В.Т., Роговцова А.С.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования технологического процесса сварки элементов стентграфтов с использованием ультразвуковых колебаний. Ранее установлено, что введение колебаний в процесс лазерной и контактной сварки позволяет повысить качество сварного шва. Разработана конструкция ультразвукового устройства для установки на сварочный автомат. Конструкция обеспечивает закрепление, позиционирование заготовки и введение ультразвуковых колебаний в зону сварки.

Ключевые слова: нитинол, проволока, сварка, ультразвуковые колебания, эндопротезы сосудов.

NITINOL WIRE WELDING WITH ULTRASONIC

Savchenko A., Minchenya V., Rogovtsova A.

Belorussian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The results of the study of the technological process of welding of stentgraft elements using ultrasonic vibrations are presented. Earlier it was found that the introduction of vibrations into the process of laser and resistance welding can improve the quality of the weld. The design of an ultrasonic device for installation on a welding machine has been developed. The design provides fastening, positioning of the workpiece and the introduction of ultrasonic vibrations into the welding zone.

Key words: nitinol, wire, welding, ultrasonic vibrations, vascular endoprotheses.

Адрес для переписки: Савченко А.Л., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: alsavchenko@bntu.by

В сосудистой хирургии применяются изделия, выполненные из материалов, обладающих памятью формы, например, из нитинола. Эти изделия представляют собой сложные по форме пространственные структуры, многие из них получают либо лазерной резкой из трубчатых заготовок, либо гибкой из нитиноловой проволоки с использованием дополнительных операций сварки, соединения пластическим деформированием с помощью трубок. Разработка технологии формообразования нитиноловых конструкций из проволоочных материалов, позволит внедрить их в производстве импортозамещающих аналогов медицинских изделий.

В рамках исследования разрабатывался технологический процесс изготовления элемента стентграфта – внутрисосудистого эндопротеза, состоящего из проволоочного каркаса и тканевой оболочки и предназначенного для лечения аневризм грудного отдела аорты (рис. 1).

Элемент стентграфта, взятый для разработки техпроцесса представляет собой зигзагообразный замкнутый контур.

Стент-элемент изготовлен из нитиноловой проволоки марки ASTM F2063 диаметром 0,23 мм с термообработкой и последующей сваркой концов.

Наиболее перспективным способом соединения проволоочных элементов конструкций из нитинола является лазерная и точечная контактная сварка. Сверхупругость и эффект памяти формы обычно сохраняются в материале после сварки [1].

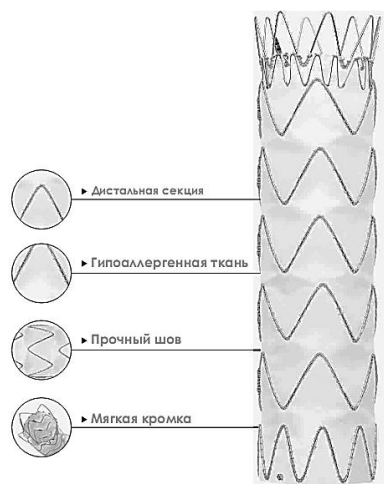


Рисунок 1 – Стентграфт

Например, в работе [2] приводится сравнительный анализ характеристик соединений из нитиноловой проволоки, полученных точечной контактной сваркой и лазерной сваркой. Для обоих видов сварки важным является предварительная очистка поверхности от посторонних веществ.

В существующем техпроцессе элемент каркаса получен гибкой с последующей термообра-

боткой и соединением концов проволоки лазерной сваркой.

Лазерная сварка внахлест обеспечивает прочность швов, сравнимую с прочностью сплошного металла, при этом возможен подбор режимов сварки, обеспечивающих достаточную статическую и усталостную прочность, однако следует рассмотреть и другие методы получения сварного соединения, обеспечивающие требуемые характеристики соединения.

В работе [3] исследовался процесс точечной контактной сварки проволоки внахлест с использованием ультразвуковых колебаний образцов в зоне сварки.

Для сварки концов проволоки использовался сварочный автомат Rofin Select производства ROFIN-BAASEL Lasertech GmbH & Co, Германия, доработанный для выполнения контактной сварки.

При сварке концы проволоки устанавливаются в специальное приспособление, обеспечивающее прижим свариваемых элементов, ввод ультразвуковых колебаний и подвод электрических сварочных импульсов.

Конструкция состоит из двухкоординатного стола с шаговыми двигателями, стоек в которых закреплена нитиноловая проволока, направляющими с системой позиционирования.

Координатный стол осуществляет позиционирование образца в процессе измерения. Перемещение по осям X, Y производится при помощи двух шаговых двигателей. Поворот стола также осуществляется шаговым двигателем.

Для сварки один конец проволоки закрепляется в стойке на столе приспособления, второй – в зажиме на концентраторе ультразвукового излучателя.

На рис. 2 показана рабочая зона приспособления (вид сверху).

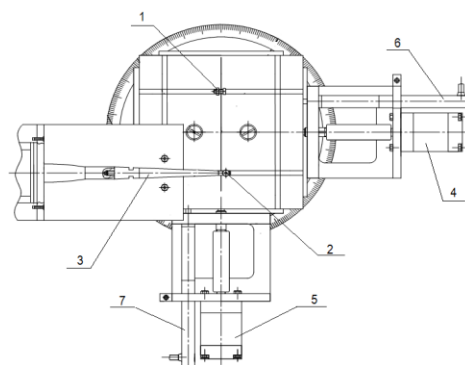


Рисунок 2 – Сварочное приспособление

Крепежные элементы для свариваемой проволоки 1 и 2 расположены соответственно на стойке, установленной в Т-образном пазу на столе приспособления и на концентраторе ультразвукового преобразователя 2.

Для перемещения стола по двум координатам используются шаговые приводы 4 и 5 с контролем величины перемещения индуктивными датчиками 6 и 7.

После сварки выполнялось исследование статической и циклической прочности сварных швов.

Исследование статической прочности швов выполнялось на разрывной машине Tinius Olsen H150K-U (Великобритания). Образцы подвергались статическому нагружению вдоль оси проволоки с увеличением нагрузки до разрушения шва.

Исследование циклической прочности сварных швов выполнялось на специально разработанной установке. Замкнутые образцы подвергаются циклическому нагружению с частотой 25 Гц и амплитудой 5 мм в течение 5 часов. После этого исследовалась целостность шва.

Результаты исследований динамической прочности позволяют выбрать оптимальные режимы сварки и ультразвуковых колебаний, обеспечивающих требуемое качество сварки.

В результате исследований было показано, что образование неразъемного соединения протекает в две стадии: на первой стадии за счет УЗК происходит разрушение оксидных пленок, адсорбирующих слоев и развитие физического контакта путем сближения вскрытых ювенильных поверхностей; на второй стадии происходит

образование локальных микросхватываний соединяемых металлов в результате взаимной диффузии материалов при нагревании их импульсом электрического тока. Установлено, что наибольшая средняя прочность соединения достигается при соотношении длительности электрического импульса к длительности периода ультразвуковых колебаний в пределах 10...15.

Полученные результаты внедрены в технологический процесс изготовления элементов стентграфтов в ООО «Полимедтех».

Литература

1. Ming, H. Wu. Fabrication of Nitinol Materials and Components In: Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies / H. Wu. Ming // Kunming, China. – 2001. – P. 285–292.
2. Tan, B. Micro-Welding of Nitinol Shape Memory Alloy / B. Tan // Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2004.
3. Савченко, А. Л. Интенсификация процесса электроконтактной микросварки проволочных изделий медицинской техники с наложением УЗК / А. Л. Савченко / Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка : материалы 14 МНТК, 9–11 сентября 2020 г. – Минск : Белорусская наука, 2020. – С. 579–582.

УДК 53.088; 620.179.14

ПОВЫШЕНИЕ ЛОКАЛЬНОСТИ НАМАГНИЧЕННОГО УЧАСТКА ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО НАМАГНИЧИВАНИИ МЕТОДОМ «ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА»

Сандомирский С.Г.

*ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Известные устройства для намагничивания стальных и чугунных изделий с целью их магнитной структуроскопии не в полной мере обеспечивают локальность намагничивания. В докладе задача повышения локальности намагниченного участка изделия решена за счет формирования «пятна» остаточной намагниченности в контролируемом изделии только участками изделия, расположенными в непосредственной близости от места контакта постоянного магнита с поверхностью изделия. При этом эти участки изделия намагничиваются до состояния, близкого к магнитному насыщению. Это повышает достоверность контроля физико-механических свойств ферромагнитных изделий за счет повышения коэрцитивного эффекта метода.

Ключевые слова: локальное намагничивание, коэрцитивная сила, остаточная намагниченность, метод «точечного полюса».

INCREASING THE LOCALISATION OF THE MAGNETISED AREA OF A PRODUCT WHEN MAGNETISED USING THE “POINT POLE” METHOD

Sandomirski S.

*Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The known devices for magnetization of steel and iron items for the purpose of their magnetic structuroscopy do not fully ensure the magnetization locality. In the report, the task of increasing the magnetised local content is solved by forming a “spot” of residual magnetisation in the monitored product only by parts of the product, located in the immediate vicinity of the contact point of the permanent magnet with the surface of the product. These parts are magnetised to a state of near magnetic saturation. This increases the reliability of controlling the physical and mechanical properties of ferromagnetic articles by increasing the coercivity of the method.

Key words: local magnetisation, coercive force, residual magnetisation, point pole method.

Адрес для переписки: Сандомирский С.Г., ул. Академическая, 12, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: sand_work@mail.ru

Неразрушающий анализ структуры локальных участков крупногабаритных стальных изделий и чугунных отливок основан на локальном измерении их коэрцитивной силы [1]. Одним из методов намагничивания изделий для этого является метод «точечного полюса» [2, 3] и реализующие его приборы «Магнитный сортировщик МС» (рис. 1) [4].



Рисунок 1 – Прибор «Магнитный сортировщик»

Но они обладают и недостатком – локальность намагничивания контролируемого участка изделия не высока.

Цель доклада – анализ и разработка технических средств, повышающих локальность намагниченного участка изделия при его «точечном» намагничивании.

Недостатки проанализированных устройств [2–4] в низкой стабильности и локальности остаточной намагниченности контролируемого участка изделия. Они связаны с тем, что в формировании намагниченного «пятна» изделия вовлекаются участки, расположенные за пределами площадки контакта известных устройств с поверхностью контролируемого изделия, и эти участки не намагничиваются до технического насыщения.

Задача решена в устройстве (рис. 2), содержащем стержневой постоянный магнит 1, намагниченный перпендикулярно своей рабочей поверхности, и экран 2, изготовленный из магнитомягкого материала, охватывающий боковую поверхность магнита. Плоскость расположения торцевой поверхности экрана совпадает с плоскостью рабочей (контактирующей с поверхностью изделия 3) поверхностью магнита. Экран и магнит выполнены одинаковой длины и их торцевые поверхности, противоположные рабочей поверхности магнита, расположены в одной плоскости и замкнуты между собой магнитным шунтом 4 из магнитомягкого материала. Причем стержневой постоянный магнит жестко скреплен с экраном так, что плоскость расположения торцевой поверхности экрана совпадает с плоскостью рабочей поверхности магнита, а площадь $S_{\text{Э}}$ сечения экрана, параллельного рабочей поверхности магнита, установлена из соотношения:

$$\frac{S_M B_{rM}}{\mu_0 M_{sЭ}} \leq S_{\text{Э}} \leq \frac{1,5 S_M B_{rM}}{\mu_0 M_{sЭ}},$$

где S_M – площадь центрального сечения магнита, параллельного его рабочей поверхности; B_{rM} – остаточная индукция материала магнита; $M_{sЭ}$ – намагниченность технического насыщения материала экрана; μ_0 – магнитная постоянная.

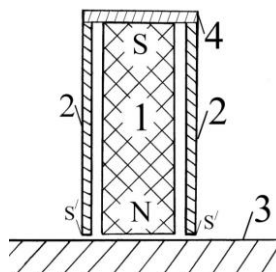


Рисунок 2 – схема сечения устройства

Для намагничивания изделия осуществляют кратковременный контакт рабочей торцевой поверхности устройства с поверхностью изделия. После намагничивания устройство удаляют от намагниченного изделия.

Эффект подмагничивания материала магнита полем охватывающих его не рабочую поверхность экрана и магнитного шунта способствует увеличению намагниченности магнита и эффективности намагничивания локального участка контролируемого изделия, повышает коэрцитивный эффект метода. При намагничивании устройством изделия 3 практически все силовые линии магнитной индукции, сосредоточенные в магните, через его магнитный полюс N и изделие замыкаются на магнитный полюс S', индуцированный на торцевой поверхности экрана магнитным полюсом N магнита. При этом в формировании локально намагниченного «пятна» изделия участвуют только его области, расположенные под местом контакта рабочей поверхности устройства с поверхностью изделия, которые при этом намагничиваются до магнитного насыщения. Следствием усиления локализации «пятна» остаточной намагниченности на поверхности изделия и лучшего намагничивания его материала является увеличение [5] градиента ∇H_{\perp} нормальной составляющей поля остаточной намагниченности на поверхности изделия после его полюсного намагничивания устройством по сравнению с намагничиванием изделия только магнитом. Это подтверждают приведенные на рис. 3 результаты модельного эксперимента по намагничиванию контролируемого изделия (в качестве которого использован диск из стали 3 диаметром 196 мм толщиной 34 мм) разработанным устройством с экраном разной площади $S_{\text{Э}}$ сечения.

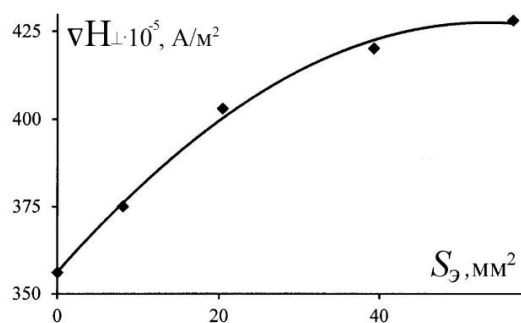


Рисунок 3 – Зависимость градиента ∇H_{\perp} поля остаточной намагниченности стального изделия после намагничивания от площади $S_{Э}$ поперечного сечения экрана устройства

Технический результат применения устройства: повышение локальности намагничивания контролируемого изделия и остаточной намагниченности контролируемого участка изделия после намагничивания. Это повышает достоверности контроля физико-механических свойств ферромагнитных изделий за счет повышения коэрцитиметрического эффекта метода. Область

применения – измерения в неразрушающем контроле и смежных областях физики и техники.

Литература

1. Гобов, Ю. Л. Измерение коэрцитивной силы в локальной области образца / Ю. Л. Гобов, С. В. Жаков, А. В. Михайлов // Дефектоскопия, 2017. – № 11. – С. 27–32.
2. Сандомирский, С. Г. Применение полюсного намагничивания в магнитном структурном анализе (обзор) / С. Г. Сандомирский // Дефектоскопия, 2006. – № 9. – С. 36–64.
3. Матюк, В. Ф. Приборы магнитной структурографии на основе локального однополярного импульсного намагничивания / В. Ф. Матюк // Неразрушающий контроль и диагностика, 2012. – № 2. – С. 28–64.
4. Универсальный магнитный сортировщик и его применение для решения задач неразрушающего контроля / С. Г. Сандомирский [и др.] // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 8. – С. 27–31.
5. Сандомирский, С. Г. Анализ чувствительности поле- и градиентометрических датчиков к коэрцитивной силе материала изделия с плоской поверхностью после полюсного намагничивания / С. Г. Сандомирский // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 5. – С. 31–41.

УДК 539.21

НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ

Сапсалиев Д.В.¹, Петровская А.С.², Мельникова Г.Б.^{1,2}, Аксютчиц А.В.³, Котов Д.А.³,
Радокевич Д.Л.², Чижик С.А.²

¹Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка,

²ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Методом атомно-силовой микроскопии исследована структура покрытий никеля, сформированных методом ионно-лучевого распыления. Изучено влияние различных типов обработки металлического покрытия и его модификации пленками Ленгмюра–Блоджетт на основе полиметилметакрилата.

Ключевые слова: никелевые покрытия, ионно-лучевое распыление, атомно-силовая микроскопия, метод Ленгмюра–Блоджетт, емкостные датчики.

NANOSTRUCTURED NICKEL COATINGS FOR CAPACITIVE SENSORS

Sapsaliou D.¹, Petrovskaya A.², Melnikova G.^{1,2}, Aksyuchits A.³, Kotov D.³,
Radzuikevich D.², Chizhik S.²

¹Belarusian State Pedagogical University named after Maxim Tank

²A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus

Abstract. Structural and morphological characteristics of nickel coatings formed by ion-beam sputtering were studied by atomic force microscopy. The effect of different types of metal coating processing and its modification with Langmuir–Blodgett films based on poly(methyl methacrylate) has been studied.

Key words: nickel coatings, ion-beam sputtering, atomic force microscopy, Langmuir–Blodgett method, capacitive sensors.

Адрес для переписки: Мельникова Г.Б., ул. П.Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: galachka@gmail.com

Введение. Разработка химических сенсоров необходима для упрощения процедуры проведения количественного анализа веществ. В настоящее время классические аналитические методы

замещаются на сенсорные измерения. Помимо очевидных преимуществ миниатюризации, таких как уменьшение габаритов, массы, расхода реагентов, интегрирование в одном чипе нескольких

химических операций, это позволяет также осуществлять пробоподготовку, дозирование, смешивание реагентов, разделение и анализ проб в одном микрочипе. Актуальность разработки сенсорных систем обусловлена появлением новых материалов, позволяющих получить новые результаты, недостижимые ранее; появлением новых методов, применяемых в измерениях, а также новых прикладных задач. Разработка новых методов и оптимизация условий формирования селективных слоев на наноструктурированных металлических поверхностях является перспективной задачей материаловедения в области датчиков нового поколения [1, 2].

Материалы и методы. Покрyтия никеля толщиной 216 нм были сформированы методом ионно-лучевого распыления из мишени никеля с чистотой 99,5 %, диаметром 80 мм и толщиной 7 мм. Источник ионов построен по типу ускорителя с анодным слоем, имеет одну ступень для очистки и травления, а вторую для распыления мишени.

Перед напылением никеля была выполнена ионно-лучевая очистка поверхности подложки в течение двух минут в неподвижном режиме, при расходе газа 0,6 л/ч; ток и напряжение разряда составили 52 мА и 1100 В соответственно.

В процессе напыления расстояние мишень – подложка составляло 200 мм, рабочее давление в камере $4 \cdot 10^{-2}$ Па при расходе рабочего газа – аргона 0,9 л/ч. Ток и напряжение разряда составляли соответственно 160 мА и 4500 В. Время напыления составило 25 минут.

Для формирования селективных слоев на поверхности проводящих наноструктурированных покрытий необходима предварительная очистка металлических слоев. Предварительно было изучено влияние обработки этиловым спиртом, хлороформом и гидрофиллизации (в пероксидно-аммиачной смеси в течение 15 мин при температуре 80 °С) поверхности никелевого покрытия.

Формирование тонкого полимерного слоя полиметилметакрилата (ПММА, Sigma-Aldrich, $M_r \sim 10000$) на никелевой гидрофиллизованной поверхности проводили методом Ленгмюра–Блоджетт на установке «Автоматизированный комплекс для модифицирования поверхностей мембран молекулярными и ультратонкими слоями» (Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, Беларусь) при поверхностном давлении $\pi = 25$ мН/м из раствора ПММА в хлороформе с концентрацией 1 мг/мл.

Морфологию поверхности контрольных образцов исследовали на атомно-силовом микроскопе (АСМ) NT-206 с использованием кремниевых кантилеверов CSC 21 В (“Mickromasch”, Эстония), средняя жесткость, согласно паспорту производителя, 2 Н/м.

Результаты. Методом атомно-силовой микроскопии было установлено, что для покрытий на основе никеля, сформированных методом ионно-лучевого распыления, характерна доменная структура (рис. 1, а).

Обработка поверхности никелевого покрытия спиртом, хлороформом, а также гидрофиллизация контрольных образцов в пероксидно-аммиачной смеси не приводит к значительным изменениям в структуре металлического слоя (рис 1, б–г).

Предварительная гидрофиллизация контрольных образцов позволяет сформировать плотную однородную ЛБ-пленку полиметилметакрилата на поверхности никелевого слоя (рис. 1, д). Такой тип модификации оказывает влияние и на структурные характеристики поверхности. Так, поверхность образца с полимерной пленкой имеет меньшие значения параметров шероховатости по сравнению с исходной подложкой, что связано с нивелированием влияния собственных дефектов никелевого покрытия при его модификации полимерной ЛБ-пленкой.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований на 2021–2025 гг. «Энергетические и ядерные процессы и технологии», подпрограммы «Энергетические процессы и технологии» (задание 2.25).

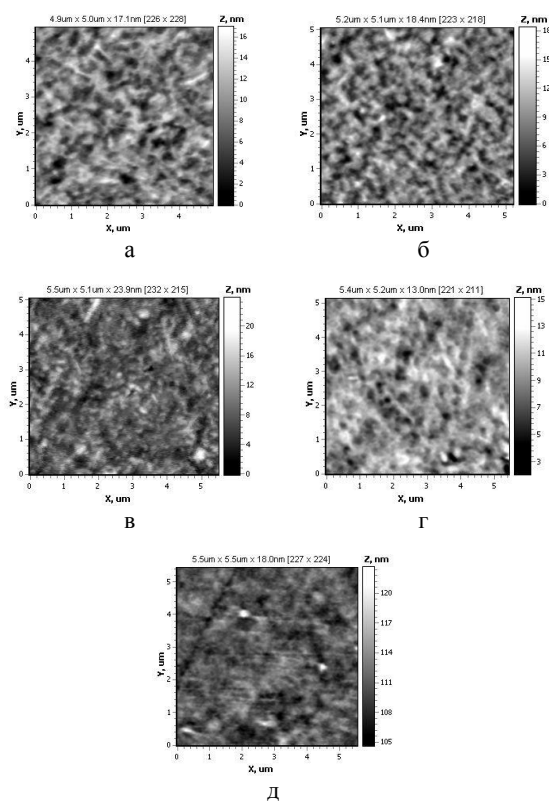


Рисунок 1 – Структура исходного никелевого покрытия (а) и после обработки поверхности спиртом (б), хлороформом (в), и ее гидрофиллизации (г), с ЛБ-пленкой ПММА, (д)

Литература

1. Петрухин, О. М. Сенсоры в аналитической химии / О. М. Петрухин, О. О. Максименко // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д. И. Менделеева). – 2008. – Т. LII, № 2. – С. 3–6.

2. Arshak, K. I. Development of new capacitive strain sensors based on thick film polymer and cermet technologies / K. I. Arshak, D. McDonagh, M. A. Durcan // Sensors and Actuators. – 2000. – Vol. 79. – P. 102–114.

УДК 534-16:534-8:621.9.048.6

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ

Степаненко Д.А.¹, Бунчук К.А.², Жуков В.И.³, Роговцова А.С.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²РИУП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»

³ГУ «Минский научно-практический центр хирургии, трансплантологии и гематологии»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана механико-математическая модель колебаний кольцевых упругих элементов, используемых в качестве усилителей колебаний по амплитуде. Рассмотрен численный пример расчета кольцевого усилителя колебаний с уклонами торцовых поверхностей. Достоверность полученных результатов подтверждена путем их сравнения с результатами моделирования с помощью метода конечных элементов и путем проверки обобщенного условия ортогональности собственных форм колебаний.

Ключевые слова: упругие колебания, усилитель колебаний, метод гармонического баланса.

APPLICATION OF HARMONIC BALANCE METHOD FOR DESIGN AND MODELLING OF RING-SHAPED AMPLIFIERS OF ELASTIC VIBRATIONS

Stepanenko D.¹, Bunchuk K.², Zhukov V.³, Rogovcova A.¹

¹Belarusian National Technical University

²State Unitary Innovative Enterprise “Science and Technology Park of BNTU “Polytechnic”

³State Institution “Minsk Scientific and Practical Center for Surgery, Transplantology and Hematology”

Minsk, Belarus

Abstract. The article presents mechanico-mathematical model of vibrations of ring-shaped elastic elements used as amplifiers of vibrations’ amplitude. Numerical example of modelling of ring-shaped amplifier with oblique planar surfaces is considered. Validity of the obtained results is proved by comparing them to the results of modelling using finite element method and by checking generalized orthogonality condition for the eigenmodes of vibration.

Key words: elastic vibrations, amplifier of vibrations, method of harmonic balance.

Адрес для переписки: Степаненко Д.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: dstepanenko@bntu.by

Усиление упругих, в частности, ультразвуковых, колебаний по амплитуде может осуществляться стержневыми концентраторами в виде прямолинейных стержней с изменяющимися по длине площадью поперечного сечения и/или механическими свойствами материала или с помощью кольцевых упругих элементов, у которых перечисленные характеристики изменяются по длине окружности. Расчет и проектирование усилителей упругих колебаний могут производиться численными, аналитическими и полуаналитическими методами. Примером последних является метод гармонического баланса (МГБ), ранее использованный авторами для расчета и проектирования стержневых концентраторов [1]. В данной работе рассматривается применение МГБ для расчета и проектирования кольцевых усилителей упругих колебаний (рис. 1).

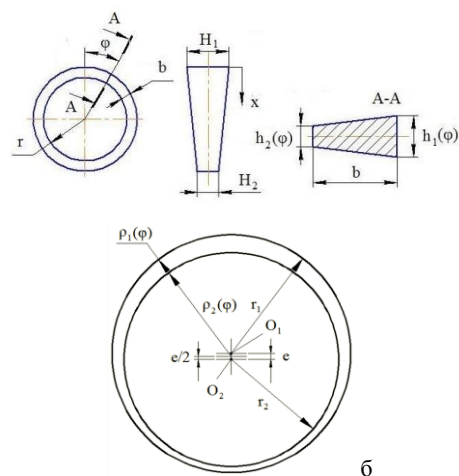


Рисунок 1 – Варианты конструктивного исполнения кольцевых усилителей упругих колебаний

Для описания изгибных колебаний кольцевого упругого элемента используется уравнение

$$\frac{1}{r_m^4}(Iu^V + 3I'u^{IV} + 2Iu'''' + 3I''u'' + 4I'u'' + I''''u'' + I'u' + 3I''u' + I'u + I''u) + \frac{\rho\omega^2}{E}(S \int_0^\phi u d\phi - S'u - Su') = -\frac{\rho\omega^2 w_0}{E} S, (1)$$

где $u = w'$, $w(\phi)$ – амплитуда радиальной составляющей колебательного смещения, $w_0 = w(0)$ – значение амплитуды во входном поперечном сечении, ω – круговая частота колебаний, $S(\phi)$ – площадь поперечного сечения, $I(\phi)$ – осевой момент инерции поперечного сечения, r_m – радиус средней линии, E – модуль продольной упругости материала, ρ – плотность материала.

Входящие в уравнение (1) периодические функции $I(\phi)$, $S(\phi)$ и $w(\phi)$ представляются в виде многочленов Фурье с коэффициентами $a_i^{(1)}$, $a_i^{(2)}$ и $a_i^{(3)}$. Вектор коэффициентов $a^{(3)}$ определяется с помощью МГБ, приводящего к неоднородной системе линейных алгебраических уравнений

$$M(\omega)a^{(3)} = -\frac{\rho\omega^2 w_0}{E} a^{(2)}, (2)$$

имеющей решение в смысле наименьших квадратов

$$a^{(3)} = -\frac{\rho\omega^2 w_0}{E} M^\dagger(\omega)a^{(2)}, (3)$$

где $M^\dagger(\omega) = (M^T(\omega)M(\omega))^{-1}M^T(\omega)$ – псевдообратная матрица Мура-Пенроуза.

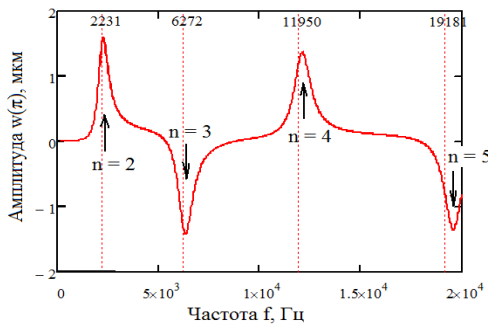


Рисунок 2 – Расчетная зависимость амплитуды $w(\pi)$ от частоты f

Для определения собственных частот колебаний при заданных значениях геометрических параметров рассчитываются решения системы (2) для ряда значений частоты f , а собственные частоты определяются как значения f , при которых модуль $|w(\pi)|$ амплитуды в выходном поперечном сечении достигает максимумов:

$$f_{cob} = \arg \max_f \left| w_0 + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor} \frac{a_{2k-1}^{(3)}(f)}{2k-1} \right|, (4)$$

где $\lfloor \cdot \rfloor$ – целая часть числа, N – число гармоник многочлена Фурье.

Аналогичным образом определяются геометрические параметры, например, толщина b_0 , обеспечивающие заданное целевое значение собственной частоты колебаний f_0 :

$$b_0 = \arg \max_b \left| w_0 + 2 \sum_{k=1}^{\lfloor \frac{N+1}{2} \rfloor} \frac{a_{2k-1}^{(3)}(b, f_0)}{2k-1} \right|. (5)$$

В качестве примера был рассмотрен расчет кольцевого упругого элемента с уклонами торцовых поверхностей (рис. 1, а) при следующих данных: внутренний радиус $r = 20$ мм, радиальная толщина $b = 1,5$ мм, предельные значения осевой толщины $H_1 = 3,5$ мм и $H_2 = 2$ мм, плотность $\rho = 7800$ кг/м³, модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, число гармоник $N = 5$, входная амплитуда $w_0 = 1$ мкм. На рис. 2 приведена расчетная зависимость амплитуды $w(\pi)$ от частоты f , экстремумы которой соответствуют собственным частотам различного порядка n .

Вертикальными линиями отмечены значения собственных частот, определенные методом конечных элементов (МКЭ) с помощью программы COMSOL Multiphysics. Эти значения отличаются от значений, полученных с помощью МГБ, на 2,0–2,2 %. Аналогичная точность была получена для кольцевого элемента с эксцентричными цилиндрическими поверхностями (рис. 1, б).

Корректность полученных результатов была подтверждена путем проверки выполнения обобщенного условия ортогональности для соответствующей уравнению (1) обобщенной задачи Штурма-Лиувилля 6-го порядка

$$\int_0^\pi \tilde{w}_n(\phi)L\tilde{w}_m(\phi)d\phi = \delta_{nm}, (6)$$

где $L = -S + S' \frac{d}{d\phi} + S \frac{d^2}{d\phi^2}$ – линейный дифференциальный оператор, δ_{nm} – символ Кронекера, $\tilde{w}_n(\phi)$ – нормированные (отнесенные к величине $\sqrt{\int_0^\pi w_n(\phi)Lw_n(\phi)d\phi}$) собственные формы колебаний n -го порядка.

Абсолютное значение интеграла (6) при $n \neq m$ составило от $5,1 \cdot 10^{-5}$ до $9,8 \cdot 10^{-4}$, то есть условие ортогональности выполняется с высокой точностью.

Предложенный в работе метод расчета кольцевых усилителей упругих колебаний в силу своего полуаналитического характера упрощает анализ и оптимизацию получаемых решений в сравнении с численными методами и, как следствие, обладает по сравнению с ними более высокой прогностической способностью.

Литература

1. Степаненко, Д. А. Расчет и проектирование стержневых ультразвуковых концентраторов с помощью метода гармонического баланса / Д. А. Степаненко, В. И. Жуков, А. С. Роговцова // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2019. – № 3. – 11 с.

УДК 620.179.14

ОБ УЧЕТЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Счастный А.С., Пиунов В.Д., Осипов А.А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследована неоднородность образцов стали 35 при изменении температуры отжига от 0 до 900 °С. Рассмотрена возможность использования импульсного магнитного метода для неразрушающего контроля данной стали и дополнительно оценена чувствительность импульсного метода к неоднородности листового проката. Проведено сравнение результатов контроля возможными вариантами использования импульсного магнитного метода.

Ключевые слова: импульсный магнитный метод, неразрушающий контроль, неоднородность, градиент поля остаточной магнитной индукции.

ON ACCOUNTING ADDITIONAL ERRORS WHEN CONTROLLING THE HEAT TREATMENT OF STEEL PRODUCTS

Schastny A., Piunov V., Osipov A.

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The inhomogeneity of samples of steel 35 was investigated with a change in the annealing temperature from 0 to 900 °С. The possibility of using the pulsed magnetic method for non-destructive testing of this steel is considered and the sensitivity of the pulsed method to the heterogeneity of sheet metal is additionally evaluated. A comparison of the results of testing by possible options for using the pulsed magnetic method is carried out.

Key words: pulsed magnetic method, non-destructive testing, inhomogeneity, residual magnetic induction field gradient.

Адрес для переписки: Осипов А.А., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: osipov@iaph.bas-net.by

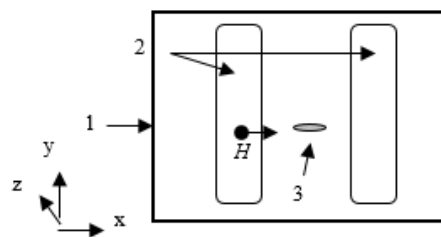
На промышленных предприятиях получили широкое распространение магнитные методы неразрушающего контроля [1]. Одним из них является импульсный магнитный метод [2], основанный на использовании зависимости ферромагнитных свойств материала изделий от их механических характеристик

Импульсный магнитный метод позволяет также дополнительно оценивать возможное влияние неоднородности материала (изделия) на результаты контроля качества термообработки (механических свойств). Эксперимент выполнялся на прямоугольных холоднокатаных образцах стали 35 (с разной температурой отжига) размерами 200×200 мм² и толщиной 1,5 мм. Сначала проводилось их намагничивание анализатором ИМА-5Б [3] с использованием двух прямоугольных катушек, которые были включены последовательно по полю, имели в плоскости перпендикулярной их оси размеры 100×35 мм² и располагались на поверхности образца (рис. 1) так, что расстояние между центрами прямоугольных катушек составляло 100 мм.

Измерения градиента поля остаточной намагниченности после намагничивания выполнялись специальным датчиком, подсоединенным к серийному импульсному магнитному анализатору ИМА-4М [4] и проводились в центре прямоугольных образцов последовательно на верхней

и нижней их поверхностях. Датчик располагался в центре между прямоугольными катушками (рис. 1) и был выполнен из двух полузондов, расположенных друг над другом и над поверхностью исследуемого образца [5]. При этом регистрировались попарно поперечные значения градиента поля остаточной намагниченности dH_x/dz , как вдоль, так и поперек направления прокатки.

Проведенные измерения показали, что обычно достаточно трех пар измерений, чтобы результаты стабилизировались, например, как это следует из значений, приведенных в табл. 1 для температуры отжига равной 200 °С. Повторяемость измерений находится на уровне не хуже 1 %.



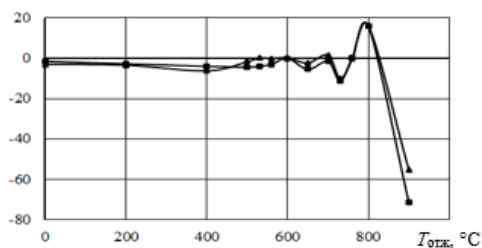
1 – прямоугольные образцы, 2 – прямоугольные намагничивающие катушки, 3 – специальный датчик, подключенный к прибору ИМА-4М

Рисунок 1 – Схема расположения намагничивающих катушек и специального датчика для анализатора ИМА-4М

На рис. 2 приводятся отклонения градиентов остаточной намагниченности, измеренных с двух сторон образцов (верхней и нижней) для третьей пары измерений. Отклонение градиентов δ вычислялось, как разница между градиентом на верхней и нижней поверхностях, деленное на их среднее значение. В идеальном случае значения градиентов должны совпадать с той точностью, которую обеспечивают используемые приборы неразрушающего контроля.

Таблица 1. Результаты измерений поперечного градиента dH_x/dz по направлению прокатки (\parallel) и перпендикулярно направлению прокатки (\square)

№ δ_r , % напр.	1; \parallel	1; \square	2; \parallel	2; \square	3; \parallel	3; \square
Град. dH_x/dz , $10A/M^2$	1273	1490	1290	1493	1290	1493



■ – отклонение измеренных градиентов δ по прокатке;
▲ – отклонение измеренных градиентов δ перпендикулярно прокатке

Рисунок 2 – Отклонения градиентов остаточной намагниченности, измеренных с двух сторон образцов

Исходя из данных рис. 2 для температур отжига до 500 °C можно сделать вывод, что неоднородности градиентов остаточного магнитного поля по прокатке и перпендикулярно прокатке приблизительно одинаковы, от 500 до 600 °C отклонение измеренных градиентов перпендикулярно прокатке не превышает 2 %. Далее значения неоднородностей превышают даже 40 %, что можно объяснить недостаточным выполнением требований к технологии изготовления образцов при максимальных значениях температуры. Также необходимо обратить внимание, что отклонение градиентов δ почти всегда отрицательно по величине, то есть градиент поля остаточной намагниченности, измеренный на верхней плоскости образца меньше, чем на нижней.

Исходную неоднородность листового проката можно оценить по образцам с минимальной температурой отжига. Так для температуры 200 °C и менее неоднородность образцов не превышает 5 %. При проведении исследований намагничивание образцов осуществлялось также круглой катушкой анализатора ИМА-5Б, ось которой бы-

ла перпендикулярна плоскости листа. Сравнительные результаты измерений для ряда температур отжига представлены в табл. 2.

Таблица 2. Отклонения поперечного градиента при намагничивании по направлению прокатки δ_{\parallel} , перпендикулярно направлению прокатки δ_{\square} и для круглой катушки δ_0

$T_{отж}$, °C	400	600	760	900
Откл. град. δ_{\parallel} , %	3,9	7,4	46,5	44,4
Откл. град. δ_{\square} , %	5,8	10,6	54,2	35,2
Откл. град. δ_0 , %	3,4	0,8	44,6	14,4

Согласно экспериментальным данным табл. 2 при намагничивании круглой катушкой во всех приведенных случаях чувствительность к неоднородностям структуры образцов ниже, причем для температуры отжига 600 °C ее величина почти на порядок меньше.

В ряде случаев такие дополнительные измерения могут использоваться для повышения достоверности контроля. Для конкретного потребителя это может быть оправданно при более высоких требованиях к качеству металлопродукции.

Таким образом, рассмотрена чувствительность импульсного магнитного метода к неоднородности образцов стали 35 с изменением температуры отжига от 0 до 900 °C. На основе полученных экспериментальных данных, а также проведенных дополнительных исследований, можно заключить, что неоднородность образцов и изделий может составлять десятки процентов и более. Исходя из требований потребителя и обеспечения качества выпускаемой им продукции, рекомендуется проводить предлагаемый выше дополнительный неразрушающий контроль металла, например, импульсным магнитным методом с использованием прямоугольных намагничивающих катушек, стремясь одновременно к улучшению технологии производства.

Литература

1. Михеев, М. Н. Магнитные методы структурного анализа и неразрушающего контроля / М. Н. Михеев, Э. С. Горкунов. – Москва : Наука. – 1993. – 252 с.
2. Мельгуй, М. А. Магнитный контроль механических свойств сталей / М. А. Мельгуй. – Минск : Наука и техника, 1980. – 184 с.
3. Импульсный магнитный анализатор ИМА-5Б / М. А. Мельгуй [и др.] // Научно-технические достижения. – 1990. – № 4. – С. 41–44.
4. Импульсный магнитный анализатор ИМА-4М / В. Ф. Матюк [и др.] // Дефектоскопия. – 2003. – № 3. – С. 47–53.
5. Счастный, А. С. Исследование возможности контроля анизотропии листового проката / А. С. Счастный, А. А. Осипов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2014. – № 3. – С. 20–33.

КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены вопросы контроля качества структуры изоляционных изделий. Показано, что дефектные участки изоляционных материалов генерируют градиенты напряженности электрического поля. Предложен метод контроля структуры изоляционных изделий, базирующийся на оценке интенсивности электрических полей от контролируемых поверхностей.

Ключевые слова: изоляционные изделия, контроль качества структуры, измерительный электрод, электрическое поле, дефектные участки.

STRUCTURE CONTROL OF INSULATING PRODUCTS Sychyk V.A., Ulasiuk M.M.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The issues of quality control of the structure of insulating products are considered. It is shown that defective are-as of insulating materials generate gradients of the electric field strength. A method for controlling the structure of insulating products based on the assessment of the intensity of electric fields from the controlled surfaces is proposed.

Key words: insulating products, structure quality control, measuring electrode, electric field, defective areas.

Адрес для переписки: Сычик В.А. пр. Рокоссовского, 49-18, г. Минск 220095, Республика Беларусь

Для контроля качества структуры изоляционных изделий широко используются радиотехнический, ультразвуковой и методы, базирующиеся на интенсивности поглощения либо отражения от образцов высокоэнергетических частиц. Эффективным методом контроля целостности изоляционных изделий является электрический метод, основанных на измерении электрических полей и их градиентов [1].

Способ точного измерения электростатических полей [2] основан на периодическом экспонировании и экранировании помещенного в электростатическое поле металлического электрода и измерении информационного сигнала в нагрузке-затворе МДП-триодной структуры с индцированным каналом. В случае, если время экспонирования $t_{ес} = \tau_1$, а время экранирования $t_{сэ} = \tau_2$, где τ_1 – постоянная времени индуцирования на измерительном электроде максимально достижимого заряда q_m ; τ_2 – время стекания q_m через входное сопротивление МДП-структур, выходное напряжение, выделяемое в истоковой цепи МДП-транзистора, максимально и составляет

$$U_{вых.} = K_1 S_R E_x,$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий площадь электрода S , и свойства окружающей среды; $K_1 = \varepsilon_a S_3 / C$, C – суммарная емкость системы измерительный электрод–МДП-структура. Поскольку контролируемая напряженность $E_x = q / (4\pi\epsilon r^2)$, то для снижения систематической погрешности необходимо обеспечить $r = \text{const}$ и стабилизировать ε_a . Реализация этих условий заложена в конструкции преобразователя электрических полей.

Контроль качества структуры и выявление дефектов в изоляционных материалах и изделиях базируется на методике, связанной с выявлением локальных участков повышенной напряженности электрического поля, излучаемого заряженной плоскостью металлических поверхностей. Механизм выявления областей нарушения целостности структуры изоляционных материалов следующий.

Гибкий, эластичный изоляционный материал, протягивается через круглый металлический стержень, к которому подводится высокий электрический потенциал. При выполнении неравенства $d \gg D$, где d – ширина изоляционного материала, D – диаметр металлического стержня, излучаемое заряженным стержнем поле E_2 в местах нарушения целостности структуры, которое воздействует на измерительный электрод преобразователя электрических полей (ПЭП), находится из выражения

$$E_2 = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon_1 r}, \quad (1)$$

где τ – линейная плотность заряда в металле; ϵ_1 – относительная диэлектрическая проницаемость воздуха; r – расстояние от стержня до электрода. При условии $d > h$, где d , h – соответственно толщина изоляционного материала и воздушного зазора, что имеет место при непосредственном размещении ПЭП на поверхности изоляционного слоя, напряженность поля

$$E_1 = \frac{\tau_1}{2\pi\epsilon_0\epsilon_2 r}, \quad (2)$$

где линейная плотность заряда $\tau_1 = \frac{2\epsilon_1}{\epsilon_1 + \epsilon_2} \tau$;

ϵ_2 – относительная диэлектрическая проницаемость изоляционного материала.

Найдем усиление напряженности электрического поля в области дефекта изоляционного материала с учетом (1) и (2)

$$K_E = \frac{E_2}{E_1} = \frac{(\epsilon_1 + \epsilon_2)\epsilon_2}{2\epsilon_1\epsilon_2} \cong \frac{\epsilon_2(1 + \epsilon_2)}{2}. \quad (3)$$

Как следует из (3), при изменении ϵ_2 от 2 до 10 $K_E \cong 3-50$. Следовательно, появление локальных участков повышенной напряженности E_x свидетельствует о нарушении целостности структуры контролируемых изоляционных материалов, причем области локальных полей являются местами структурных дефектов этих материалов.

При контроле устройством диагностики качества структуры изоляционных изделий выносной элемент – твердотельный ПЭП, либо на дискретной МДП-структуре перемещается по поверхности находящегося под положительным потенциалом металлического стержня. Электрическое поле, создаваемое потенциалом стержня, периодически с частотой 1 кГц воздействует на стадии экспонирования на измерительный электрод ИЭ2 в режиме контроля качества структуры изоляционных материалов. На выходе ПЭП по обоим каналам формируется переменное напряжение $U_{вых} = K \cdot E_x$, частотой 1 кГц, где E_x – локальная напряженность электрического поля контролируемого объекта. Напряжение сигнала фильтруется от сетевых и высокочастотных помех сглаженным фильтром, настроенным на рабочую частоту электронного коммутатора. Напряжение сигнала оптимального значения по амплитуде (0,5–1,5 В) формируется в блоке многорежимных усилителей.

УДК 681.316

МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ

Сычик В.А., Уласюк Н.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Синтезирован матричный преобразователь тепловых полей, реализованных матрицей фотодиодов, сформированных на полупроводниковом основании. Приведены конструктивные параметры преобразователя, механизм его работы и электрофизические параметры.

Ключевые слова: преобразователь тепловых полей, фотодиод, p-n-переход, омический контакт, матрица фотодиодов.

MATRIX CONVERTER OF THERMAL FIELDS

Sychyk V., Ulasiuk M.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. A matrix converter of thermal fields is synthesized, implemented by an array of photodiodes formed on a semiconductor base. The design parameters of the converter, the mechanism of its operation and electro-physical parameters are given.

Key words: thermal field converter, photodiode, p-n junction, ohmic contact, photodiode array.

Адрес для переписки: Сычик В.А., пр-т Рокоссовского, 49-18, г. Минск 220095, Республика Беларусь

Типы и точность выявления дефектов в изоляционных материалах представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вид дефекта	Порог чувствительности дефектов, В/мм	Точность выявления места дефекта, мм
Сплошные трещины, раковины	0,1–0,4	±0,5
Тип контролируемого объекта	Способ выделения информации	Расстояние ПЭП от контролируемой поверхности, мм
Изоляционный материал	Амплитудно-частотный	0,1

На базе рассмотренного метода можно синтезировать ряд высокоэффективных устройств для качественного контроля целостности структуры изоляционных материалов и изделий.

Выводы.

1. Дефектные участки изоляционных материалов, контактирующих с находящимися под постоянным напряжением металлами, генерируют градиенты напряженности электрического поля.

2. Точный контроль качества структуры диэлектрических материалов и изделий обеспечивает метод, базирующийся на оценке интенсивности электрических полей от находящихся под электрическим потенциалом контролируемых областей.

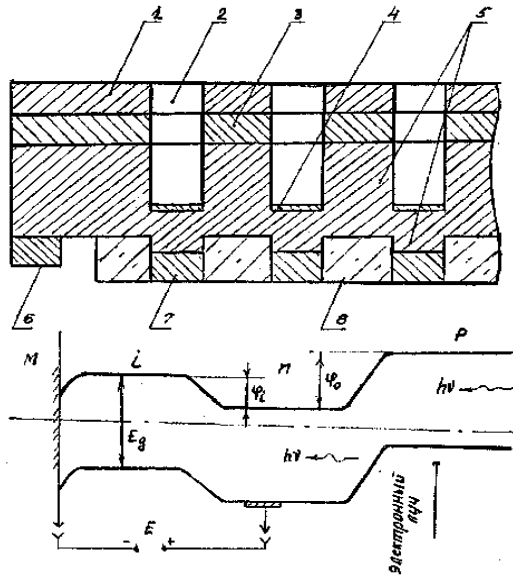
Литература

- Сычик, В. А. Измерительные преобразователи излучений на основе полупроводниковых приборных структур / В. А. Сычик. – Мн. : Выш. Школа, 1991. – 179 с.
- Способ измерения напряженности электрического поля : пат. RU Д010249 / В. А. Сычик, В. А. Воробьев, А. В. Бреднев.

Для неразрушающего контроля дефектов структуры электрических агрегатов, базирующегося на оценке интенсивности тепловых полей от нагретых поверхностей агрегатов, необходимо использование в устройствах контроля специальных преобразователей тепловых полей. Для этой цели можно использовать терморезисторы [1], которые, однако, имеют низкую чувствительность, разрешающую способность и высокую инерционность. Более эффективны полупроводниковые фотодиоды [2], обладающие высоким быстродействием, однако они также имеют недостаточную чувствительность и точность оценки интенсивности тепловых излучений.

В качестве первичного преобразователя тепловых полей нами разработан термоохлаждаемый инфракрасный преобразователь, который обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Структурно термоохлаждаемый преобразователь тепловых полей содержит, как показано на рис. 1, матрицу диодов обратной проводимости, состоящих из верхних и нижних слоев 1, 2. Слой примесного полупроводника, защищенный окисной пленкой, является одновременно и нижним слоем монокристаллического полупроводникового основания, верхний слой которого, представляет собой структуру собственного полупроводника, на который нанесена металлическая пленка.



- 1 – металлический слой; 2 – оптический канал;
- 3 – слой собственного полупроводника;
- 4 – просветляющий слой; 5 – полупроводниковое основание; 6 – омический контакт;
- 7 – слой обратной проводимости;
- 8 – изоляционный слой

Рисунок 1 – Структура преобразователя фоновых излучений (а) и зонная диаграмма его полупроводниковой структуры (б)

Нижний слой фотодиода обратной проводимости формируется путем легирования верхних слоев фотодиода акцепторной примесью. В полупроводниковом основании выполнены оптические каналы к фотодиодам. Нижние слои фотодиода и частично его верхние слои отделены друг от друга диэлектрическими окисными областями. На слое примесного полупроводника сформирован омический контакт.

Полупроводниковое основание в устройстве является конструкционной основой и служит в комплексе со слоем металла термоохлаждающим. Как показали результаты эксперимента, оптимальным для реализации этих функций материалом полупроводникового основания является монокристаллический кремний, который в контакте со слоем металла обеспечивает эффективное охлаждение основания. Так как ток протекающий, через основание, осуществляет инжекцию электронов из металлического слоя в слой 4, его толщина выбирается из условия полного поглощения инжектированными электронами энергии кристаллической решетки собственного полупроводника в течение времени их жизни, а следовательно должна быть не меньше длины свободного пробега электронов и не больше удвоенной ее длины. Кроме того, собственный полупроводниковый слой выбирается широкозонным (для кремния $E_g = 1,11$ эВ), монокристаллическим и высокоомным с целью получения высокого потенциального барьера между слоем металла и слоем 4 и минимальной концентрации электронов в этом слое. Эти факторы и обуславливают максимально возможное снижение температуры синтезированного устройства, что обеспечивает существенное повышение чувствительности и точности показаний.

Нижний слой полупроводникового основания, который является одновременно и верхним слоем фотодиода, получается легированием кремния донорной примесью. Кремний, легированный примесью, создающей глубокие примесные уровни ($E_n \geq 0,1$ эВ), является также высокочувствительным материалом в широкой полосе излучений нагретых поверхностей от инфракрасного ($\lambda \sim 6$ мкм, $T \sim 20$ °С) до ультрафиолетового ($\lambda = 0,5$ мкм, $T \geq 2500$ °С). Это то позволяет решить одновременно несколько задач: создать омический контакт к основанию; обеспечить эффективную инжекцию электронов из металлического слоя в слой 4, что возможно при эффективной рекомбинации электронов за его пределами, и при выполнении условия, что работа выхода собственного полупроводника выше работы выхода металла; получить в слое I глубокие примесные уровни, но не ниже 0,1 эВ, которые обуславливают высокий квантовый выход носителей заряда, что позволяет использо-

вать примесный слой в качестве чувствительных к фононным и фотонным потоком верхних областей фотодиодов матрицы.

Толщина этого слоя определяется максимально возможным числом генерируемых излучением носителей тока и их разделением на р-п-перехода фотодиода, обуславливающим высокую чувствительность и точность показаний. Это достигается в случае, когда толщина примесного слоя фотодиода не превышает длину свободного пробега носителей в данном полупроводнике (L). Минимальное значение ее должно быть не ниже $1/2L$ из-за существенного снижения числа генерируемых носителей. Однако число генерируемых в слое фотодиода носителей тока зависит от скорости поверхностной рекомбинации этих носителей. Последняя существенно зависит от состояния поверхности матрицы, что обуславливает значительное снижение чувствительности и точности. Устранение этого недостатка было достигнуто окислением верхней части полупроводниковых слоев фотодиодов.

Оптимальная толщина окисной пленки, удовлетворяющая данным требованиям, находится в интервале 300–500 Å. Толщина слоя металла обуславливается равномерной инжекцией электронов во все области собственного полупроводника, а также его низкоомностью и в среднем составляет 2 мкм.

Нижние слои фотодиодов обратной проводимости формируются легированием верхних слоев акцепторной примесью, причем оптимальная суммарная толщина обоих р-п-слоев фотодиодов матрицы составляет в среднем $3L$.

Толщина окисного слоя соответствует сумме толщины нижнего слоя фотодиода и половине толщины его верхнего слоя. Такая толщина диэлектрика обеспечивает высокую электроизоляцию фотодиодов матрицы между собой и надежное соединение всех верхних слоев фотодиодов со слоем собственного полупроводника.

Оптические каналы, выполненные в полупроводниковом основании, предотвращают попадание фононных либо фотонных потоков от других излучающих поверхностей.

Это существенно повышает чувствительность и точность показаний устройства и его разрушающую способность, вследствие устранения локальных помех на каждом из фотодиодов от сигналов посторонних оптических излучений.

Оптимальная длина оптических каналов, которая позволяет получить максимальное ослабление фононных и фотонных потоков – помех, зависит от диаметра канала \varnothing и составляет, как показатели результаты эксперимента, отношение $\Delta = \ell/\Phi = 100$.

В рабочем состоянии омический контакт полупроводникового слоя подсоединяется к земляной клемме, а к металлическому слою подводит-

ся напряжение постоянного тока такой полярности, чтобы осуществлялась инжекция электронов с поверхности металла в слой собственного полупроводника, то есть напряжение отрицательной полярности.

Плотность тока через контакт металл-полупроводник определяется выражением

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

и экспоненциально возрастает с повышением питающего напряжения.

В (1) J_s – ток насыщения; e , k , T – соответственно заряд электрона, постоянная Больцмана, температура. В результате отбора энергии инжектированными электронами от кристаллической решетки собственного полупроводника его температура, а следовательно температура фотодиодной матрицы понижается. Величина поглощаемой тепловой энергии определяется зависимостью

$$Q_n = \Pi I t, \quad (2)$$

где Π – коэффициент Пельтье, $I = J S$ – ток, протекающий через барьер Шоттки сечением S ; t – время протекания тока.

Матрица фотодиодов чувствительной стороной, т.е. оптическими каналами, устанавливается возле излучаемой фононный (фотонный) поток нагретой поверхности элемента, температура которого контролируется. Съём информации с фотодиодов устройства осуществляется сканирующим электронным лучом, в цепи которого включено нагрузочное сопротивление. Нагрузочное сопротивление при помощи конденсатора подключается на вход измерительной части устройства, например к его усилительному тракту.

Перед измерением температуры объекта путем подачи напряжения к слою металла осуществляют быстрое (2–5) мин охлаждение устройства в среднем на 20 °С в сравнении с температурой окружающей среды. После термостабилизации устройства осуществляют измерение температуры соответствующих элементов. При контроле температуры нагретых тел на каждый элемент фотодиода матрицы поступает фононный поток J_v , интенсивность которого и энергия их пропорциональны излучаемой температуре. Каждый охлаждаемый фотодиод, представляющий полупроводниковый р-п переход, который обладает емкостью C , накапливает электрический заряд $Q = CU_x$, где U_x – фотоэдс, р-п перехода, вследствие разделения генерируемых фотоносителей на р-п переходах. Заряд Q пропорционален интенсивности потока и энергии $W = h\nu$ падающих фононов (фотонов), т.е. температуре поверхности контролируемого нагретого тела.

Электронный луч, например генерируемый электронной пушкой, сканирует по поверхности

матрицы фотодиодов преобразователя, поочередно замыкая цепь фотодиода. В результате на вход усилителя измерительного устройства поступает сигнал, пропорциональный накопленному на р-п переходе фотодиода заряду т.е. контролируемой температуре. Усиленный сигнал, формируемый преобразователем тепловых полей подается на вход регистрирующего прибора: самописца, осциллографа, видеоконтрольного устройства и т.д., который показывает истинное значение температуры поверхности контролируемого нагретого тела. Основные параметры преобразователя: вольт-

ватная чувствительность $S = 1,4 \text{ В/Вт}$, пороговая чувствительность $Q_{\text{пор}} = 4,58 \cdot 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$, инерционность 10^{-8} с , диапазон контролируемых температур $T = 0-1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Литература

1. Сафронов, Ю. П. Инфракрасная техника и космос / Ю. П. Сафронов, Ю. Г. Андрианов. – М. : Сов. Радио, 1998. – 376 с.
2. Ветохин, С. С. Одноэлектронные фотоприемники / С. С. Ветохин. – М. : Энергоатомиздат, 1994. – 160 с.

УДК 621.317

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НАГРЕВАТЕЛЕМ ИЗ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Таратын И.А., Козуля А.А., Рысик А.Н.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе рассматривается конструкция и характеристики газового сенсора, реализованные на кремниевой подложке, с использованием планарной технологии. При измерениях выходного сигнала в качестве нагревательного элемента были использованы оксиды металлов III-й группы таблицы Менделеева, которые одновременно являлись газочувствительным слоем. Данная конструкция обеспечивает высокую чувствительность к воздействию оксида азота с концентрацией 2 ppm и оксида углерода с концентрацией 11,8 ppm.

Ключевые слова: полупроводниковые химические сенсоры, оксид азота, газовый сенсор.

SEMICONDUCTOR GAS SENSOR WITH METAL OXIDE HEATER

Taratyn I., Kozulya A., Rysik A.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. In this paper, the design and characteristics of a gas sensor implemented on a silicon substrate using planar technology are considered. When measuring the output signal, metal oxides of the III group of the periodic table were used as a heating element, which simultaneously served as a gas-sensitive layer. This design provides high sensitivity to the effects of nitric oxide with a concentration of 2 ppm and carbon monoxide with a concentration of 11.8 ppm.

Key words: semiconductor chemical sensors, nitrogen oxide, gas sensor.

*Адрес для переписки: Таратын И.А., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: tarigal@yandex.ru*

Газовый сенсор представляет кристалл кремния размером $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм на поверхности которого сформирован слой SiO_2 и платиновый резистор, сопротивлением 15 Ом. Кристалл разварен платиновой проволокой, диаметром 20 мкм в 4-х выводной корпус. На поверхности кристалла из раствора сформирован газочувствительный слой, температура формирования которого достигала $700 \text{ }^\circ\text{C}$. Для определения температуры кристалла, при которой достигается максимальный выходной сигнал была определена зависимость температуры от мощности, подаваемой на нагревательный элемент из оксида металла Me_2O_3 . Полученные результаты представлены на рис. 1.

Температура контролировалась с помощью прибора IP-140.

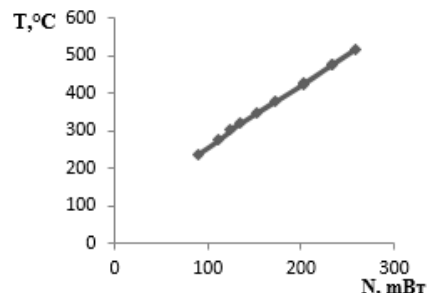


Рисунок 1 – Зависимость температуры кристалла (T , $^\circ\text{C}$) от мощности нагрева

В данной работе исследовались характеристики 2-х электродного газового сенсора, кон-

струкция которого обеспечивает возможность использования нагревателей 2-х типов: на основе Pt-резистора, и в том числе резистора с использованием оксидов металлов, полученных высокотемпературной обработкой нанесенных слоев из раствора, приготовленного по золь-гель технологии [1], для создания температур до 700 °С. На рис. 2 представлена зависимость величины выходного сигнала ΔU_v сенсора от концентрации оксида углерода 0,05 % с использованием нагревательного элемента из оксидов металлов.

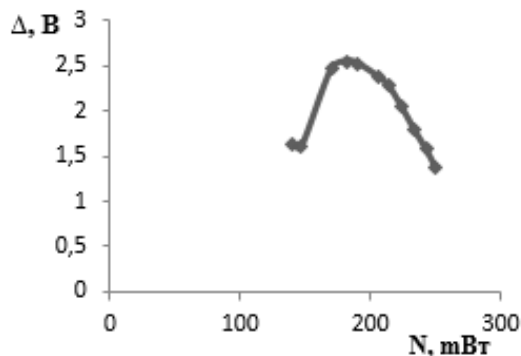
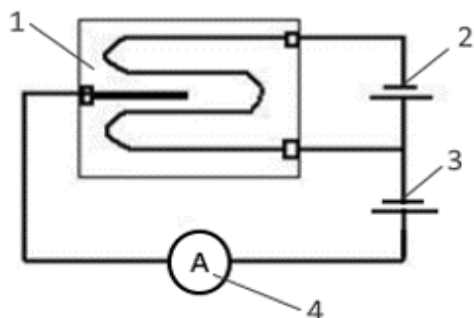


Рисунок 2 – Зависимость величины выходного сигнала ΔU_v сенсора от концентрации оксида углерода

Как следует из полученных результатов максимальная чувствительность достигается при температуре сенсора 350 °С, что соответствует потребляемой мощности 170 мВт.

Схема включает в себя один источник питания, который работает в режиме постоянного тока с контролем выходного напряжения.

При использовании 2-х источников питания по схеме измерений, представленной на рис. 3, были проведены измерения низких концентраций NO_2 (2 ppm) с контролем выходного тока, как контролируемого параметра.



1 – кристалл; 2 – источник питания В5-49;
3 – источник питания В5-45; 4 – измеритель тока В5-40/7

Рисунок 3 – Схема измерения с двумя источниками питания

Измерения выходного сигнала при воздействии NO_2 с концентрацией 2 ppm проводились при напряжении 1,68 В на источнике В5-49, и на втором источнике В5-45 равном 0,89 В. Измерение тока проводилось на приборе В5-40/7. Результаты измерения представлены на рис. 4.

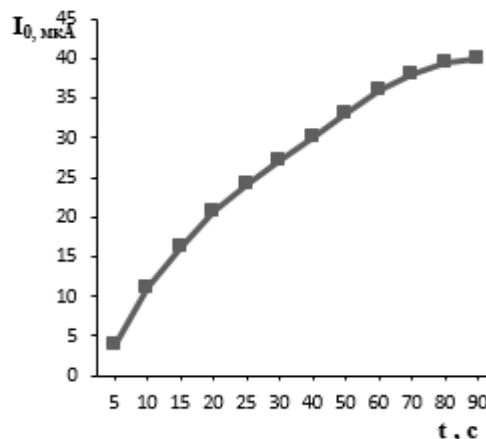


Рисунок 4 – Зависимость выходного сигнала сенсора I_0 от времени при воздействии NO_2 с концентрацией ppm

Время возвращения в исходное состояние составляет приблизительно 1 минуту, чувствительность составила:

$$S(\%) = \frac{I_{\text{кон}} - I_0}{I_0} = \frac{54 - 0.5}{0.5} = \frac{53.5}{0.5} = 1,07 \cdot 10^4 \%. \quad (1)$$

Полученные результаты позволяют рассмотреть конструкцию газового сенсора без использования платинового нагревателя, заменив его на оптимизированный нагревательный элемент из оксидов металлов, который также выполняет функцию газочувствительного слоя. Данный подход предполагает возможность снижения размеров кристалла, дает упрощение конструкции и снижение потребляемой мощности.

Выводы. Разработан газовый сенсор, представляющий кремниевый кристалл $1,5 \times 1,5 \times 0,2$ мм с газочувствительным слоем на основе оксидов металлов 3-й группы таблицы Менделеева.

Данная конструкция позволяет проводить измерения чувствительности сенсора к воздействию газов, применяя две схемы измерения. В том числе одна схема измерения предполагает использование газочувствительного слоя и в качестве нагревателя. Получена чувствительность (S , %) к воздействию NO_2 с концентрацией 2 ppm на уровне $1,07 \cdot 10^4 \%$.

Литература

1. Котиков, Д. А. Использование золь-гель метода для синтеза различных структурных модификаций оксида железа (III) в наноразмерном состоянии / Д. А. Котиков, М. И. Ивановская // Вестник БГУ. Серия 2. – 2005. – № 2. – С. 11.

УДК 621.793.184

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННЫХ ПУЧКОВ МЕДИ

Телеш Е.В.¹, Данилович С.В.², Гутенко Н.Д.¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

²НП УП «Дисплей»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследованы параметры пучков ионов меди в зависимости от режимов работы ионного источника и особенностей его конструкции. Измерения осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающим в режиме ионно-пучкового фокуса, одиночного и многосеточного зондов. При измерениях плотности тока варьировались давление рабочего газа, ускоряющее напряжение на аноде U_a и расстояние h «ионный источник–диафрагма». Установлено, что при низких давлениях рабочего газа и при ускоряющем напряжении свыше 1,5–2,0 кВ наблюдается снижение плотности тока ионов. Увеличение h способствовало снижению плотности тока электронов и росту плотности ионного тока до 10 мА/см². Анализ тормозных характеристик показал, что энергия ионов изменялась в диапазоне 36–60 эВ.

Ключевые слова: ускоритель с анодным слоем, вторичный разряд, ионно-пучковый фокус, ионы меди, энергия ионов.

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF COPPER ION BEAMS

Telesh E.¹, Danilovich S.², Gutenko N.¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

²SM UE «Display»

Minsk, Belarus

Abstract. The parameters of beams of copper ions are investigated depending on the operating modes of the ion source and the features of its design. The measurements were carried out using an accelerator with an anode layer operating in the ion-beam focus mode, single and multigrad probes. When measuring the current density, the pressure of the working gas, the accelerating voltage at the anode U_a , and the distance h «ion source – diaphragm» were varied. It was found that at low pressures of the working gas and at an accelerating voltage above 1.5–2.0 kV, a decrease in the ion current density is observed. An increase h promoted a decrease in the electron current density and an increase in the ion current density to 10 mA/cm². Analysis of the inhibitory characteristics showed that the ion energy varied in the range of 36–60 eV.

Key words: accelerator with anode layer, secondary discharge, ion-beam focus, copper ions, ion energy.

Адрес для переписки: Телеш Е.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: etelesh@mail.ru

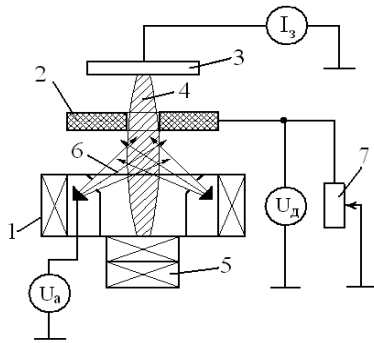
Современная электроника требует разработки новых методов получения тонких пленок. Недостатки существующих методов связаны с ограниченными возможностями управления энергией осаждаемых частиц, переносом вещества к подложке по закону «косинуса» и трудностями контроля количества осаждаемого вещества. Перспективным методом является осаждение тонких пленок непосредственно из пучков ионов, энергия может варьироваться от десятков до сотен электронвольт в то время как в процессах ионного распыления материалов энергия осаждаемых атомов составляет в среднем 5–15 эВ, а при термическом испарении – не превышает обычно 0,2 эВ. Возможность управления энергией осаждаемых ионов позволяет изменять адгезию пленок к подложке, структуру и состав растущей пленки, и, следовательно, управлять свойствами формируемых слоев [1].

Наноразмерные полупрозрачные медные пленки находят все большее применение в качестве электродов в гибких ЖК дисплеях, сенсорных экранах [2]. Перспективным направлением является также замена серебряных низкоэмиссионных слоев на медные в архитектурных стеклах и полимерных покрытиях [3].

Разработан новый метод нанесения тонких медных пленок посредством формирования потока ионов меди из ионно-пучкового фокуса. Его суть заключается в том, при определенных условиях в ионном источнике на основе ускорителя с анодным слоем имеет место формирование зоны вторичного разряда. Атомы меди генерировались путем распыления диафрагмы первичным пучком ионов аргона. Задачей настоящей работы являлось исследование параметров пучков ионов меди в зависимости от режимов работы ионного источника и особенностей его конструкции.

Исследования осуществляли с использованием ускорителя с анодным слоем, работающего в режиме ионно-пучкового фокуса. Измерение плотности тока вторичного ионного пучка осуществлялось зондовым методом (рис. 1) Варьировалось давление рабочего газа, ускоряющее напряжение на аноде U_a и расстояние h «ионный источник–диафрагма». На рис. 2 приведены зависимости плотности тока от вышеуказанных параметров. Установлено, что при низких давле-

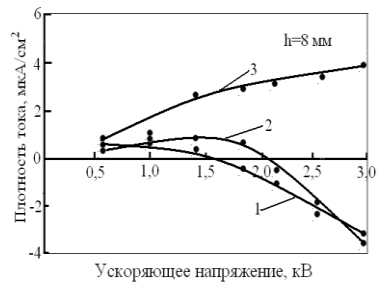
ниях рабочего газа и при U_a свыше 1,5–2,0 кВ наблюдалось снижение плотности тока ионов. Более того дальнейшее увеличение U_a привело к равенству плотностей тока ионов и электронов, а затем и к превалированию электронного тока.



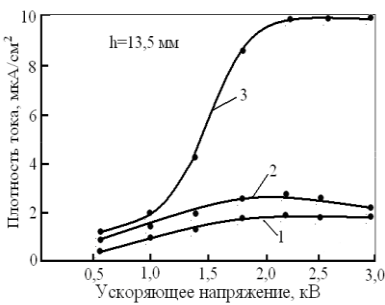
1 – ионный источник; 2 – медная диафрагма; 3 – зонд;
4 – вторичный пучок ионов; 5 – дополнительный магнит;
6 – первичный ионный пучок;
7 – переменный резистор

Рисунок 1 – Схема проведения измерений

Это можно объяснить усилением процессов вторичной ионной эмиссии электронов из металла диафрагмы (медь) из металла зонда (нержавеющая сталь). Следует отметить, что увеличение h способствовало снижению плотности тока электронов и росту плотности ионного тока до 10 mA/cm^2 при давлении газа $4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$.



а



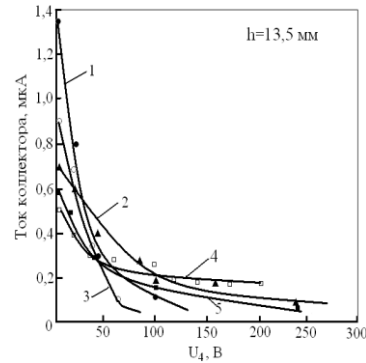
б

1 – $p = 2,66 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$; 2 – $p = 3,32 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$;
3 – $p = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$

Рисунок 2 – Зависимости плотности тока от давления рабочего газа, U_a и расстояния «ионный источник–диафрагма»

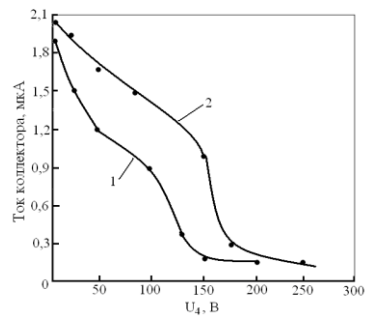
Измерение энергии ионов осуществлялось с использованием многосеточного зонда путем снятия тормозных характеристик. На рис. 3 приведены тормозные характеристики пучков ионов, полученных при разных режимах и при $h = 13,5 \text{ мм}$. Анализ характеристик показал, что энергия ионов варьируется в диапазоне 36–60 эВ.

При наличии положительного потенциала на диафрагме U_d энергия ионов возрастает с 135 эВ ($U_d = 50 \text{ В}$) до 175 эВ ($U_d = 100 \text{ В}$), что можно объяснить ускорением пучка ионов электрическим полем диафрагмы.



1 – $U_a = 3,5 \text{ кВ}$, $I_p = 60 \text{ mA}$; 2 – $U_a = 4,0 \text{ кВ}$, $I_p = 50 \text{ mA}$;
3 – $U_a = 3,0 \text{ кВ}$, $I_p = 60 \text{ mA}$; 4 – $U_a = 2,0 \text{ кВ}$, $I_p = 60 \text{ mA}$;
5 – $U_a = 3,0 \text{ кВ}$, $I_p = 50 \text{ mA}$

Рисунок 3 – Тормозные характеристики пучков ионов, полученных при разных режимах



1 – $U_d = 50 \text{ В}$; 2 – $U_d = 100 \text{ В}$

Рисунок 4 – Тормозные характеристики при разных напряжениях на диафрагме

Литература

1. Телеш, Е. В. Применение вторичного разряда в ускорителе с анодным слоем для формирования оптических покрытий из диоксида кремния / Е. В. Телеш, А. П. Достанко // Контенант. – 2014. – Т. 13, № 2. – С. 31–33.
2. Indium-free, highly transparent, flexible $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}$ mesh electrodes for flexible touch screen panels / D. J. Kim [et al.] // Sci. Rep. – 2012. – Vol. 5, 16838. DOI: 10.1038/srep16838
3. Properties of low-emission coatings based on Ag and Cu deposited on polymer film by magnetron sputtering / A. N. Zakharov [et al.] // Inorganic Materials: Applied Research. – 2012. – Vol. 3. – № 5. – P. 433–439.

УДК 621.793.18

ИОННО-ЛУЧЕВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МИШЕНИ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА

Телеш Е.В., Точеный В.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Определено влияние ускоряющего напряжения на аноде U_a , давления и состава рабочего газа на процессы нагрева и ионно-лучевого распыления мишени из политетрафторэтилена. Увеличение U_a и рабочего давления приводило к росту скорости нагрева и достижения максимальной температуры мишени до 480 К за 4–5 минут распыления. Установлено, что через 1–1,5 мин после начала распыления происходит увеличение рабочего давления в камере за счет разложения политетрафторэтилена. Повышение давления приводит к росту тока разряда и снижению напряжения анода до 1,0–1,2 кВ. Добавка фторсодержащего газа C_3F_8 способствовала росту скорости нагрева мишени ~ в 2 раза и достижению за время распыления 4 мин температуры мишени 500 К.

Ключевые слова: ионно-лучевое распыление, политетрафторэтилен, температура мишени, деструкция.

ION-BEAM SPUTTERING OF A POLYTETRAFLUOROETHYLENE TARGET

Telesh E., Tocheny V.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. The influence of the accelerating voltage at the anode U_a , the pressure and composition of the working gas on the heating and ion-beam sputtering of a polytetrafluoroethylene target is determined. An increase in U_a and working pressure led to an increase in the heating rate and to a maximum target temperature of up to 480 K in 4–5 minutes of sputtering. It was found that 1–1.5 min after the start of sputtering, the working pressure in the chamber increases due to the decomposition of polytetrafluoroethylene. An increase in pressure leads to an increase in the discharge current and a decrease in the anode voltage to 1.0–1.2 kV. The addition of fluorine-containing gas C_3F_8 promoted an increase in the heating rate of the target by ~ 2 times and reached the target temperature of 500 K in a sputtering time of 4 min.

Key words: ion-beam sputtering, polytetrafluoroethylene, target temperature, destruction.

*Адрес для переписки: Телеш Е.В., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: etelelesh@mail.ru*

Фторированный аморфный углерод (а-С:F). диэлектрическая проницаемость которого составляет около 2,4 является одним из перспективных материалов для межслойных диэлектриков [1]. Фторуглеродные тонкопленочные покрытия могут также использоваться в качестве оптических, гидрофобных, антифрикционных, защитных, химически стойких покрытий. Из всех видов методов формирования покрытий наиболее перспективными являются плазменное распыление и электронно-лучевое испарение полимера поскольку они имеют высокую управляемость технологического процесса [2–3]. При ионном распылении энергия ионного пучка расходуется на физическое распыление и на нагрев поверхностного слоя полимера. Происходит два процесса – чисто физическое распыление и испарение продуктов деструкции, образованных под действием высоких температур на поверхности. Признаки разложения обнаруживаются уже при температуре 473 К. При температурах от 573 до 633 К продуктами разложения являются такие газы, как гексафторэтан и октафторциклобутан. Свыше этой температуры появляется перфторизобутилен и другие продукты пиролиза. Многие из этих продуктов не конденсируются при комнатных

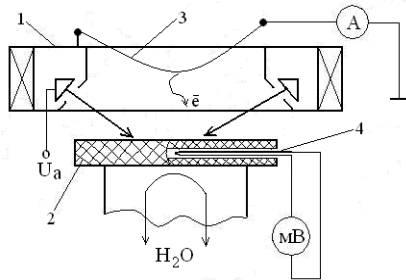
температурах и поэтому существенно меняют состав плазмообразующего газа.

Задачей данных исследований было определение влияния технологических факторов на процессы нагрева и ионно-лучевого распыления мишени из политетрафторэтилена.

Процессы распыления исследовались с применением ионного источника на основе ускорителя с анодным слоем. Диск из политетрафторэтилена (фторопласт-4 ТУ-МХП-197-57) диаметром 70 мм и толщиной 7 мм закреплялся на водоохлаждаемом основании и имел глухое отверстие, в которое помещалась термopара ТХК (рис. 1). В процессе распыления варьировались ускоряющее напряжение на аноде U_a , давление и состав рабочего газа. Ток термоэлектронного катода-компенсатора составлял 14 А.

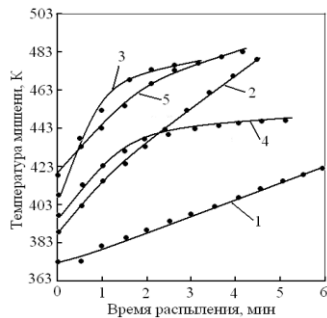
На рис. 2 представлены зависимости температуры полимера от режимов распыления. В качестве рабочего газа использовался аргон. Увеличение U_a и рабочего давления приводило к росту скорости нагрева и достижения максимальной температуры мишени до 480 К за 4–5 минут распыления. Очевидно, на самой поверхности мишени температура будет намного выше. Установлено, что через 1–1,5 мин после начала распыления происходит увеличение рабочего

давления в камере за счет разложения политетрафторэтилена (рис. 3). Повышение давления приводит к росту тока разряда и снижению напряжения анода до 1,0–1,2 кВ (рис. 4).



1 – ионный источник;
2 – диск из политетрафторэтилена;
3 – термоэлектронный катод-компенсатор;
4 – термопара ТХК

Рисунок 1 – Схема проведения экспериментов по ионно-лучевому распылению мишени из политетрафторэтилена

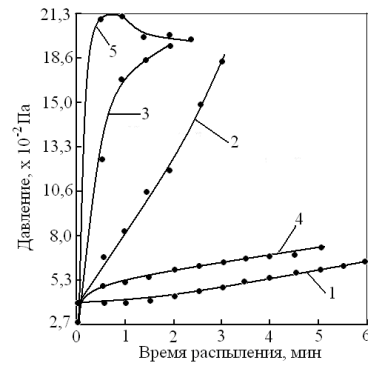


1 – $U_a = 1,5$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
2 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
3 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 5,3 \cdot 10^{-2}$ Па;
4 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па;
5 – $U_a = 3,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па

Рисунок 2 – Зависимость температуры мишени от времени распыления

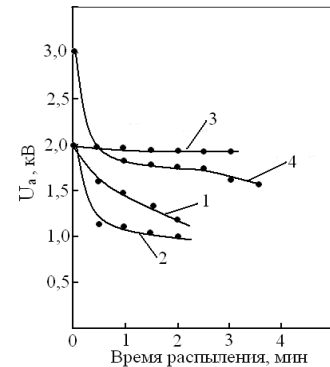
Можно также, инициировав процесс распыления на инертном газе, удалить его постепенно, по мере генерации собственной газовой среды, организовав таким способом самоподдерживающийся процесс распыления. Такие пленки отличаются повышенной чистотой, так как в них отсутствует даже растворенный инертный газ.

Добавка фторсодержащего газа C_3F_8 (хладон-218) способствовала росту скорости нагрева мишени ~ в 2 раза и достижению за время распыления 4 мин температуры мишени 500 К.



1 – $U_a = 1,5$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
2 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
3 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 5,3 \cdot 10^{-2}$ Па;
4 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па;
5 – $U_a = 3,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па

Рисунок 3 – Зависимость давления в камере от времени распыления



1 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
2 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 4 \cdot 10^{-2}$ Па;
3 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па;
4 – $U_a = 2,0$ кВ, $p = 2,66 \cdot 10^{-2}$ Па

Рисунок 4 – Зависимость напряжения на аноде от времени распыления

Литература

1. Лучников, А. П. Микроструктура и электрофизические свойства фторполимерных пленок для МЭМС и наноэлектроники / А. П. Лучников, П. А. Лучников, А. С. Сигов // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 12(89). – С. 34–40.
2. Казаченко, В. П. Кинетика электронно-лучевого диспергирования полимеров в вакууме, структура и свойства покрытий, полученных осаждением летучих продуктов. Автореф. канд. дис. – М. : НИИФХИ, 1992.
3. Красовский, А. М. Получение тонких пленок распылением полимеров в вакууме / А. М. Красовский, Е. М. Толстопятков. – Минск, 1989. – 181 с.

УДК 533.9.082.76

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СВЧ МОЩНОСТИ
В ПЛАЗМЕННОМ ОБЪЕМЕ ПРИ КВАЗИПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ ЕЕ ГЕНЕРАЦИИ**

Тихон О.И., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Достанко А.П., Лях А.С., Жаворонок И.А.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены особенности влияния условий электропитания СВЧ-магнетрона на величину СВЧ мощности в плазменном объеме при импульсном и квазипостоянном режимах генерации энергии. Установлено, что в режиме работы СВЧ-магнетрона с постоянным уровнем сигнала анодного тока величина СВЧ-мощности в объеме возбуждаемой ею плазмы разряда в среде воздуха уменьшается до 2,3 раз, по сравнению с условиями импульсного электропитания при одинаковой величине мощности электропитания СВЧ-генератора.

Ключевые слова: плазма СВЧ разряда, импульсный источник питания, режим генерации.

**RESEARCH OF THE NATURE OF CHANGES IN THE VALUE OF MICROWAVE POWER
IN THE PLASMA VOLUME AT THE QUASI-CONSTANT MODE OF ITS GENERATION**

Tsikhan O., Madveika S., Bordusau S., Dostanko A., Liakh A., Zhavaranak I.

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper discusses the peculiarities of the microwave magnetron power supply conditions effect on the microwave power value in the plasma volume in pulsed and quasi-continuous energy generation modes. It was found that in the microwave magnetron operating mode with a constant anode current signal level, the microwave power value in the volume of the excited air plasma discharge decreases by up to 2.3 times, compared to the pulsed power supply conditions at the same power consumption level of the microwave generator.

Key words: microwave plasma, pulsed power supply, generation mode.

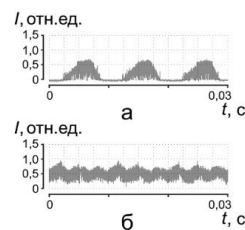
*Адрес для переписки: Тихон О.И., ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: kritgar@bsuir.by*

Технологические процессы плазменной обработки полупроводниковых материалов являются в настоящее время неотъемлемой частью современного производства микро- и наноэлектроники. За счет высокой степени ионизации и плотности широкое применение в производстве микроструктур находит плазма СВЧ-разряда, используемая на операциях плазменной очистки, травления и модификации поверхностных слоев материалов.

Актуальной задачей является разработка нового и модернизация имеющегося производственного оборудования с целью повышения энергоэффективности реализуемых технологических процессов.

В настоящее время большинство технологических установок СВЧ-плазменной обработки, использующих в качестве источника энергии СВЧ магнетроны средней мощности, реализуют импульсный режим их электропитания с частотой следования импульсов анодного тока в 50 или 100 Гц, скважность сигналов составляет примерно 2. Пример осциллограммы сигнала анодного тока в импульсном режиме питания представлен на рис. 1, а [1]. Одним из перспективных направлений повышения эффективности работы СВЧ-плазменных установок является переход к квазипостоянному режиму питания СВЧ-магнетрона. Осциллограмма сигнала анод-

ного тока в таком режиме генерации представлена на рис. 1, б [2].



а – импульсный режим со скважностью 2;
б – квазипостоянный режим

Рисунок 1 – Осциллограмма сигналов анодного тока при различных режимах питания СВЧ магнетрона

Для реализации квазипостоянного режима генерации плазмы СВЧ-разряда был применен экспериментальный импульсный трехфазный источник питания СВЧ-магнетрона 2М261-М22 (рис. 2). Использование регулируемого инверторного блока в цепи каждой фазы дает возможность динамически управлять скважностью и амплитудой сигнала анодного тока, тем самым задавая длительность воздействия и величину потребляемой генераторной системой мощности [1]. Работа источника в составе СВЧ-генератора с включением трех блоков инверторов позволяет обеспечить относительно постоянный уровень сигнала анодного тока.

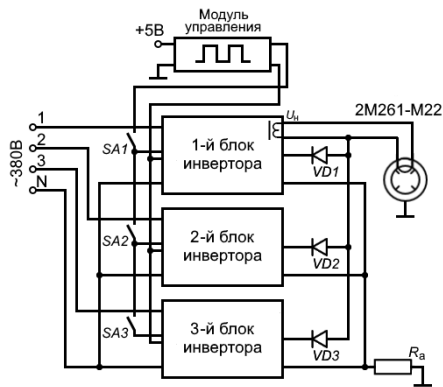


Рисунок 2 – Схема трехфазного импульсного источника питания СВЧ-магнетрона

Целью исследования являлось определение влияния условий электропитания СВЧ-магнетрона на величину СВЧ-мощности в плазменном объеме. Структурная схема исследовательского стенда представлена на рис. 3.



Рисунок 3 – Структурная схема исследовательского стенда

Определение величины мощности выполнялось с использованием «активного зонда», подключенного к измерителю МЗ-28 и расположенного в центре вакуумируемой разрядной камеры СВЧ-плазмотрона резонаторного типа [3]. Величина давления при формировании СВЧ-разряда составляла 133 Па, рабочий газ – воздух.

СВЧ-магнетрон при проведении экспериментов работал в двух режимах генерации: в импульсном со скважностью ~2 и частотой импульсов анодного тока 100 Гц; в квазипостоянном режиме. Величина мощности, потребляемой СВЧ-генераторной системой, устанавливалась путем изменения скважности управляющих сигналов источника питания и изменялась для импульсного режима в диапазоне 570–1850 Вт, для квазипостоянного – 1850–5450 Вт.

Полученная экспериментальная зависимость представлена на рис. 4. Для обоих режимов электропитания наблюдается близкий к линейному

характер роста величины мощности СВЧ-энергии в плазменном объеме с увеличением мощности, потребляемой СВЧ-генератором.

На основании полученных данных установлено, что при квазипостоянном режиме генерации плазмы наблюдаются меньшие значения проникающей в разряд СВЧ-мощности, чем в импульсном режиме при близких величинах потребляемой генератором мощности электропитания. Зарегистрированные показания измерителя мощности МЗ-28 указывают на снижение примерно в 2,3 раза уровня СВЧ-мощности для случая уменьшения скважности сигнала анодного тока СВЧ магнетрона, а значит изменения режима электропитания, при величине потребления от сети на уровне ~1850 Вт.

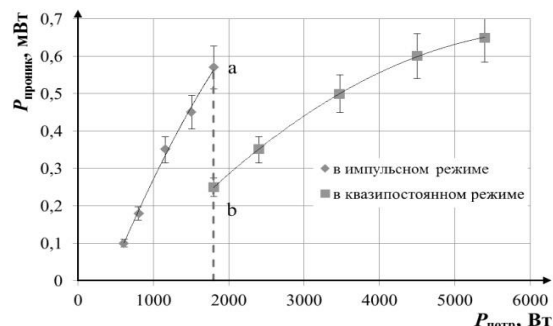


Рисунок 4 – Зависимость величины СВЧ-мощности в плазменном объеме от мощности, потребляемой СВЧ генераторной системой

Полученные результаты указывают на то, что реализация квазипостоянного режима генерации СВЧ-разряда может иметь положительный эффект при обработке в плазме полупроводниковых структур, для которых недопустимо воздействие высокого уровня СВЧ-электромагнитного излучения.

Литература

1. Тихон, О. И. Исследование режима работы СВЧ магнетрона от инверторного блока питания / О. И. Тихон (науч. рук. С.И. Мадвейко) // Актуальные вопросы физики и техники : материалы X Респ. научной конф. студ., магистр. и аспирантов, Гомель, 22 апреля 2021 г. : в 2 ч. / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол. : Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.] – Гомель, 2021. – Ч. 1. – С. 208–211.
2. Жаворонок, И. А. Исследование режимов работы трехфазного импульсного источника питания СВЧ магнетрона на плазменную нагрузку / И. А. Жаворонок, О. И. Тихон // Электронные системы и технологии : сборник матер. 57-й научной конф. аспирантов, магистрантов и студентов УО «БГУИР», Минск, 19–23 апреля 2021 г. / Белорус. гос. ун-т информ. и радиоэлектр. ; ред.: Д. В. Лихачевский [и др.] – Минск, 2021. – С. 178–180.
3. Investigation of Silicon Wafers' Influence on the Local Microwave Power Values in a Resonator-Type Plasmatron / S. Madveika [et al.] // Plasma Physics and Technology. – 2019. – Vol. 6, № 3. – P. 239–242.

УДК 620.178.152.341.4

**ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ,
ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ**
Трухан Р.Э.¹, Хабарова А.В.¹, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Лапицкая В.А.^{1,2}, Чижик С.А.^{1,2}, Торская Е.В.³,
Муравьёва Т.И.³, Мерзин А.М.³, Самардак В.Ю.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

³Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН

Москва, Российская Федерация

⁴Школа естественных наук, Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Российская Федерация

Аннотация. В работе приведены результаты исследования физико-механических свойств алмазоподобных пленок на стальной подложке методом многоциклового индентирования с частичным разгрузением. Получены зависимости модуля упругости и микротвердости от максимальной нагрузки в цикле. Показано влияние подслоя Ti в совокупности с толщиной пленок на поведение их свойств.

Ключевые слова: алмазоподобное покрытие, модуль упругости, микротвердость, инструментальное индентирование, частичное разгрузение.

**DIAMOND LIKE CARBON COATINGS PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES
DETERMINED BY NANOINDENTATION**

**Trukhan R.¹, Habarova A.¹, Kuznetsova T.^{1,2}, Lapitskaya V.^{1,2}, Chizhik S.^{1,2}, Torskaya E.³,
Myravyeva T.³, Merzin A.³, Samardak V.⁴**

¹A.V. Lukov Heat- and Mass Transfer institute NAS Belarus

²Belarusian National Technical University

Minsk, Belarus

³Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS

Moscow, Russia

⁴School of Natural Sciences, Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Abstract. The paper presents the results of the physical and mechanical properties studying of diamond-like coatings on a steel substrate by the indentation with partial unloading technique. The elasticity modulus and microhardness dependences on the maximum load in the cycle are obtained. The effect of the Ti sublayer with the thickness of the films on the behavior of their properties is shown.

Key words: diamond like carbon coating, elasticity modulus, microhardness, instrumental indentation, partial unloading.

Адрес для переписки: Трухан Р.Э., ул. Петруся Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: ruslan.trukhan@mail.ru

Введение. Модуль упругости (E , Па) и микротвердость (H , Па) являются важными характеристиками для оценки свойств покрытий и тонких пленок. Они характеризуют способность материала упруго деформироваться под действием нагрузок и сопротивления внедрению в покрытие деформирующего его тела [1]. На основании этих характеристик оценивается индекс пластичности (H/E), сопротивление пластической деформации (H^3/E^2) и моделируются контактные взаимодействия объектов с пленками [2].

Определение E и H является непростой задачей в случае тонких покрытий из-за их малой толщины (менее 2,5 мкм). Для этого применяется оборудование, которое реализует метод индентирования с регистрацией зависимости глубины внедрения от приложенной силы величиной до

10000 мкН и анализирует их в соответствии с моделью Оливера-Фарра.

Алмазоподобные покрытия (АПП) объединяют тонкие углеродные слои со структурой, сочетающей в себе межатомные связи как алмаза (sp^3), так и графита (sp^2). Такое сочетание приводит к большой вариативности свойств присущих алмазу (высокая твердость, химическая инертность, износостойкость, высокое удельное сопротивление) и графиту (невысокое удельное сопротивление, низкий коэффициент сухого трения и поглощение видимого света) [3]. Из-за высоких внутренних напряжений и низкой адгезии пленки к подложке толщина АПП не превышает нескольких микрометров. Для нивелирования этих недостатков применяют различные технологические приемы: легирование, нанесение

подслоев и другие. Применение таких покрытий достаточно широкое, хоть и ограничено небольшой толщиной и деградацией свойств при температуре более 350 °С. Это снижение коэффициента трения износа в деталях автомобилей, защита от износа сверл, концевых фрез и пресс форм, оптические компоненты [4].

Материалы и методы исследования. Объектами исследования стали алмазоподобные покрытия, нанесенные на подложку из стали ШХ15 методами лазерной абляции и импульсным дуговым осаждением. Толщина покрытий составляла 100, 300 и 500 нм. Перед нанесением 300 и 500 нанометровых покрытий осаждался подслой титана толщиной 800 нм для снижения внутренних напряжений.

Определение модуля упругости и микротвердости проводилось на наноинденторе модели 750 Ubi (Hysitron, США) путем внедрения трехгранной алмазной пирамиды Берковича с радиусом закругления в 150 нм в поверхность покрытия. Применялся метод многоциклового индентирования с частичным разгрузением. Нагрузка увеличивалась с 440 до 10000 мкН. Каждый последующий шаг сопровождался повышением нагрузки на 683 мкН относительно предыдущего максимального значения.

Результаты исследования. По итогам проведенных испытаний покрытий были получены зависимости значений модуля упругости (рис. 1) и микротвердости (рис. 2) от максимальной приложенной нагрузки.

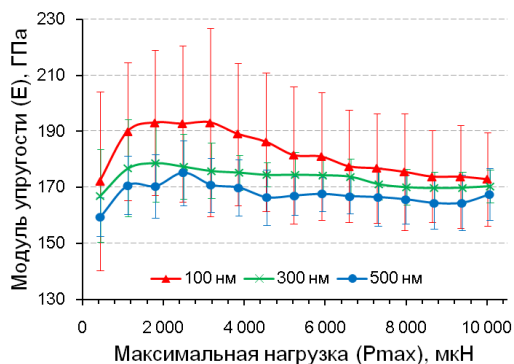


Рисунок 1 – Изменение E с ростом нагрузки

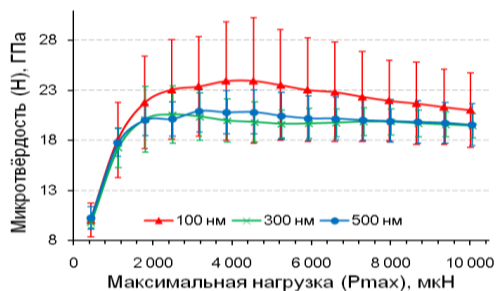


Рисунок 2 – Изменение H с ростом нагрузки

По мере увеличения нагрузки до 1200 мкН наблюдался рост E для всех покрытий. Это объясняется наличием более мягких слоев на поверхности. Далее чередуются области, в которых модуль упругости изменяется незначительно или уменьшается. При нагрузке в 10000 мкН E для всех покрытий стремится к значению 170 ГПа. Наибольшими средними значениями обладает покрытие толщиной 100 нм, наименьшими – АПП 500 нм.

Значение микротвердости (рис. 2) покрытий сильно возрастает к нагрузке 2200 мкН, а при дальнейшем нагружении незначительно изменяется у АПП 300 и 500 нм и растет до 24 ГПа с последующим уменьшением у АПП 100 нм. Большим значением H обладает пленка с толщиной 100 нм. АПП 300 и 500 нм обладают близкими значениями параметра.

Контактная глубина (h_c) при максимальной нагрузке на индентор в контакте с пленкой толщиной 100 нм составила 118,7 нм, при этом h_c в 100 нм достигалась при нагрузках от 7200 мкН. Стабилизация значений E и H происходит на уровне 20 и 27 нм, снижение значений E и H начинается при h_c около 50 нм и 58 нм. В случае АПП 300 и 500 нм максимальная контактная глубина составляла около 125 нм. Выравнивание значений E и H для всех покрытий происходит примерно на одинаковой глубине.

Различия в физико-механических свойствах исследуемых пленок обусловлены их толщиной и характеристиками нижележащего слоя. Поведение модуля упругости и микротвердости у пленок толщиной 300 и 500 нм с подслоем титана очень схожи в отличие от АПП 100 нм у которого не было подслоя. Значение микротвердости и модуля упругости используемой стали при нагрузке в 1000 мкН составляют $12,9 \pm 0,59$ и $185,25 \pm 14,82$ ГПа. Эти показатели выше чем у титана что и внесло свой вклад в свойства 100-нанометрового АПП.

Заключение. Были исследованы свойства алмазоподобных покрытий на стали методом инструментального индентирования в многоцикловом режиме с частичным разгрузением. Получены зависимости E и H от максимальных нагрузок циклов. Самые высокие показатели характерны для пленки толщиной 100 нм. Различие в поведении свойств покрытий связано с наличием подслоя Ti.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф20Р-217.

Литература

1. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Б. Вархолински [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 2. – С. 209–217

2. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е. И. Орешко [и др.] // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1. – С. 101–117.

3. Структура и оптические свойства покрытий алмазоподобного углерода / Н. М. Чекан [и др.] // Изв. НАН Беларуси. Сер. Физ.-тех. наук. – 2018. – Т. 63. – № 3. – С. 280–289.

4. Княжев, Ф. Р. Обзор возможностей применение алмазоподобных пленок в различных отраслях / Ф. Р. Княжев, М. М. Сергеевна // Материалы конференций ГНИИ «НАЦРАЗВИТИЕ» апрель 2021. – 2021. – С. 28.

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРАОБРАЗНЫХ НАНОСТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ В ОБЪЕМЕ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ

Францкевич А.В., Францкевич Н.В., Мартинович В.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Основная идея представляемой работы – исследовать условия получения и свойства сфераобразных наноструктур, формируемых в объеме пластин монокристаллического кремния. Стандартные пластины Cz-Si, n типа имплантировались ионами водорода при разных температурах и разными дозами. Формирование объемных наноструктур, происходило в результате обработки образцов в DC плазме водорода, при температуре не выше 300 °C. Полученные структуры исследовались методами СЭМ и комбинационного рассеяния. СЭМ-исследование проводилось как в режиме вторичных электронов (SE), так и в режиме поверхностно-индуцированного потенциала (SEBIV). Исследования показали, что в приповерхностном слое кремниевых пластин формируются сфераобразные (пузырьковые) наноструктуры. Данные комбинационного рассеяния позволяют предположить о накоплении, в полученных структурах, газообразного водорода.

Ключевые слова: кремний, сфераобразные наноструктуры, водород.

STUDY OF THE SPHERE OF SHAPED NANOSTRUCTURES FORMED IN THE VOLUME OF MONOCRYSTAL SILICON PLATES

Frantskevich A., Frantskevich N., Martinovich V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. The main idea of this work is to investigate the conditions for the preparation and properties of sphere-shaped nanostructures formed in the bulk of single-crystal silicon wafers. Standard Cz-Si, n type plates were implanted with hydrogen ions at different temperatures and different doses. The formation of bulk nanostructures occurred as a result of processing the samples in DC hydrogen plasma at a temperature not higher than 300 °C. The resulting structures were investigated by SEM and Raman scattering methods. The SEM study was carried out both in the secondary electron (SE) mode and in the surface-induced potential (SEBIV) mode. Studies have shown that sphere-shaped (bubble) nanostructures are formed in the near-surface layer of silicon wafers. Raman scattering data suggest the accumulation of hydrogen gas in the resulting structures.

Key words: silicon, spherical nanostructures, hydrogen.

e-mail: N_Frantskevich@bntu.by

Введение. Эффект образования протяженных дефектов в конструкционных материалах, при содержании в них водорода или гелия с концентрацией 5–10 атомных процента известен достаточно давно [1]. В микроэлектронной технологии практическое применение данного эффекта – отщепление тонких слоев кристаллических материалов по технологии Smart-Cut [2]. Авторами статьи, была показана принципиальная возможность создания структур типа кремний/оксид кремния на месте протяженных дефектов [3]. Данные структуры можно формировать на определенной глубине, в виде систем вертикальных нанотрубок, или конических структур на поверхности. Одно из возможных практических приме-

нений указанных выше структур – это увеличение эффективности солнечных элементов. Но на пути успешной коммерческой реализации данной технологии есть следующее препятствие – сравнительно высокие дозы имплантированного водорода или гелия, что в значительной степени влияет на себестоимость конечного изделия. В связи с этим актуальным вопросом в разрабатываемой технологии было снижение дозы имплантированных ионов. Решение данного вопроса возможно за счет частичной замены сравнительно дорогостоящей технологической операции – имплантации, на более дешевую – плазменную обработку, при двух стадийном процессе. На первом этапе имплантацией водорода или гелия, при дозах им-

плантации $1 \cdot 10^{14}$ – $5 \cdot 10^{15}$ ат.\(\text{см}^2\) формируется слой первичных дефектов. На слой первичных дефектов, производится геттерирование водорода, вводимого в кремний из DC плазмы. В дальнейшем, введенный дополнительно водород, формирует протяженные дефекты с необходим распределением по объему или поверхности. Экспериментальное исследование возможных условий обработки, при которых реализуется предложенный подход, а так же получаемые наноструктуры, изучались в данной работе.

Эксперимент. В первой серии образцов использовались стандартные пластины *n*-типа 4,5 $\Omega \cdot \text{см}$ Cz Si. Данные образцы имплантировались протонами при комнатной температуре с энергией 100 keV флюенсом $1 \cdot 10^{16}$, $2 \cdot 10^{16}$ или $4 \cdot 10^{16}$ ат.\(\text{см}^2\). Во второй серии образцов, пластины кремния аналогичные используемым в первой серии, имплантировались протонами при температурах 150, 300, 400 или 500 °C. Флюенс ионов составлял $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ или $5 \cdot 10^{15}$ ат.\(\text{см}^2\) для каждой из температур. После создания первичного дефектного слоя, водород вводился в кремний из DC плазмы при 150 °C. Спектры комбинационного рассеяния снимались при комнатной температуре с использованием газового Ar^+ лазера с длиной волны 488 нм и выходной мощностью 20 мВт. Образ поверхности образцов, а так же глубинных наноструктур, был получен в СЭМ, в режиме вторичных электронов (SE) и в режиме поверхностно индуцированного потенциала (SEBIV), соответственно.

Результат. На рис. 1, *a* и *б* представлен типичный образ поверхности и структура сфера образных нано-структур, полученные в СЭМ, в режиме SE (*a*) и SEBIV (*б*), от образцов кремния из первой серии.

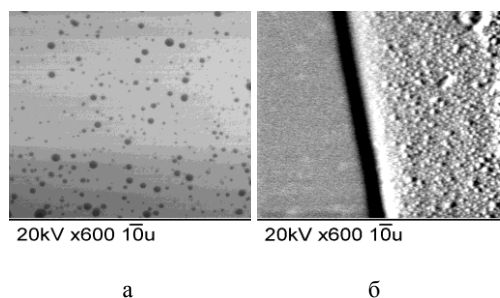


Рисунок 1 – Типичный образ поверхности, для первой серии образцов, полученный в СЭМ, в режиме SE (*a*) и SEBIV (*б*)

При проведении эксперимента, для установления однозначной зависимости, что сфера образные наноструктуры, формируются именно в области с предварительно созданным дефектным слоем, использовались образцы содержащие две области, не имплантированную, и имплантированную. Как видно из результатов представленных на рис. 1, *б*, наблюдаются две области, содержащие сфера образные структуры, и без них.

Доказательством того, что данные структуры образуются именно в имплантированных областях, является то что, в исходных, не имплантированных образцах, подобных структур не наблюдалось. Кроме этого, размер образований зависит от флюенса предимплантированных протонов. С увеличением флюенса, диаметр сфер увеличивается.

Для первой и второй серии образцов, а так же исходных, не имплантированных но обработанных в плазме водорода образцов, проводилось снятие спектров комбинационного рассеяния. Проведенные исследования показали, что для исследуемых образцов форма и положение основной линии кремния (521 см^{-1}) практически не зависят от температуры образцов во время имплантации. Для образцов имплантированных дозами $1 \cdot 10^{14}$, $1 \cdot 10^{15}$ или $5 \cdot 10^{15}$ при температуре 300 °C и обработанных в плазме водорода при 150 °C, спектры комбинационного рассеяния, нормализованные по основной линии кремния, для спектрального диапазона в областях LVM сопоставляемых SiH связям (*a*) и водородной молекуле H_2 (3800 – 4400 см^{-1}), представлены на рис. 2 (*a*, *б*).

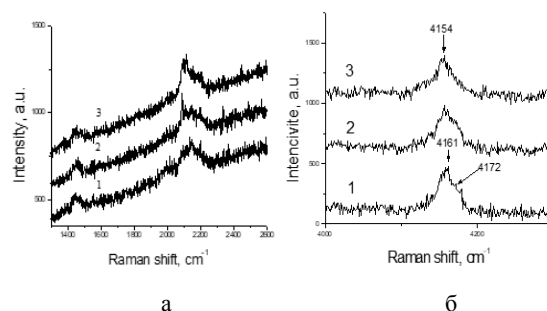


Рисунок 2 – Спектры комбинационного рассеяния в областях LVM сопоставляемых SiH связям (*a*) и водородной молекуле H_2 (*б*), для Cz Si *n*-типа пластин, имплантированных протонами при 300 °C, дозами $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (1), $1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (2) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (3) и обработанных в плазме водорода при 150 °C

Как видно из представленных результатов, на спектрах комбинационного рассеяния, наблюдается зависимость формы и местоположения LVM сопоставляемых SiH связям и H_2 молекулы, в зависимости от флюенса предимплантированных протонов. А именно, с увеличением дозы предимплантированных протонов интенсивность сигнала LVM от H_2 молекулы уменьшается. Поскольку именно при флюенсе $(0,5$ – $1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ предимплантированных протонов, на результатах SEBIV начинает наблюдаться образование сфера образного объемного нанослоя, это позволяет предположить о возможности накопления газообразного водорода в этом слое.

Благодарности. Работа выполнена в рамках программы «Наноматериалы и нанотехнологии» (ГПНИ 2.24).

Литература

1. Terreault, B. *Physica status solidi* / B. Terreault. – 2007. – Vol. 204. – P. 2129.
2. Bruel, M. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1996. – Vol. 313.
3. Frantskevich N. V., Frantskevich A. V., Fedotov A. K., Mazanik A. V. // *Journal: Solid State Phenomena*. – 2009. – Vol. 156–158. – P. 91–94.

УДК 620.178.1

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ

Хабарова А.В.¹, Лапицкая В.А.^{1,2}, Кузнецова Т.А.^{1,2}, Куприн А.С.³, Чижик С.А.^{1,2}, Трухан Р.Э.¹, Конеру А.⁴

¹ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси»

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

³ИНЦ Харьковский физико-технический институт НАН Украины
Харьков, Украина

⁴Somnio Global
Новай, США

Аннотация. Приведены результаты исследований свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором (NiP), толщиной 2 мкм после триботехнических испытаний методом атомно-силовой микроскопии. Испытания проводились при нагрузке от 3,45 до 6,89 мкН за 40 циклов. В результате определены основные характеристики триботехнических свойств – коэффициент $k_{тр}$ и сила трения $F_{тр}$, глубина износа h и удельный объемный износ ω . Установлено, что с увеличением нагрузки коэффициент и сила трения снижаются.

Ключевые слова: вакуумно-дуговое покрытие, NiP, атомно-силовая микроскопия, триботехнические испытания, коэффициент трения.

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF VACUUM-ARC NICKEL COATING DOPED WITH PHOSPHORUS

Khabarava A.¹, Lapitskaya V.^{1,2}, Kuznetsova T.^{1,2}, Kuprin A.³, Chizik S.^{1,2}, Trukhan R.¹, Koneru A.⁴

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus

²Belarusian national technical university
Minsk, Republic of Belarus

³NSC Kharkov Institute of Physics and Technology of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kharkov, Ukraine

⁴Somnio Global
Novi, USA

Abstract. The results of studies of the properties of a vacuum-arc nickel coating doped with phosphorus (NiP), 2 μm thick after tribotechnical tests by atomic force microscopy are presented. The tests were carried out at a load of 3.45 to 6.89 m μN for 40 cycles. As a result, the main characteristics of the tribotechnical properties were determined – the coefficient k_{fr} and the friction force F_{fr} , the wear depth h , the specific volumetric wear ω . It was found that with an increase in the load, the coefficient and the friction force decrease.

Key words: vacuum arc coating, NiP, atomic force microscopy, tribotechnical tests, coefficient of friction.

Адрес для переписки: Хабарова А.В., ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: AV.Khabarova@mail.ru

Введение. Вакуумно-дуговые никелевые покрытия характеризуются хорошей износостойкостью, высокой твердостью. Легирование фосфором приводит к повышению физико-механических и триботехнических свойств таких покрытий. Наличие на поверхности вакуумно-дуговых никелевых покрытий окисных пленок и различных фаз может создавать хорошие условия для формирования трибопленок [1]. Микротвердость таких покрытий может варьироваться от 2

до 17 ГПа [2]. Однако их применение ограничено недостаточным изучением свойств [1].

Целью работы является определение триботехнических свойств вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором, методом атомно-силовой микроскопии.

Материалы и методы исследования. Покрытия толщиной 2 мкм с концентрацией фосфора 2 ат. % нанесены на диск из нержавеющей стали 08X18H10T вакуумно-дуговым методом на

установке «Булат-6» с никель-фосфорным катодом содержащим 6 ат. % фосфора.

Исследования триботехнических свойств (силы и коэффициента трения) покрытия проводили на атомно-силовой микроскопе Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме Lateral Force с использованием кантилевера с алмазным острием на кремниевой консоли типа D300 (SCDprobes, Эстония) с жесткостью консоли 38,24 Н/м и радиусом закругления острия 35 нм. Нормальная нагрузка изменялась от 3,45 до 6,89 мкН. Коэффициент и силу трения исследовали на поле 1×1 мкм², 128×128 точек в течение 40 циклов при скорости возвратно-поступательного движения зонда по поверхности 1,99 мкм/с. Метод атомно-силовой микроскопии позволяет учесть микрогеометрию поверхности взаимодействия в нанометровом масштабе и, при непрерывной регистрации угла закручивания кремниевой консоли зонда вокруг своей оси, рассчитать коэффициент ($k_{тр}$) и силу ($F_{тр}$) трения.

Удельный объемный износ ω определяли как отношение объема материала V , удаленного во время испытания, к величине нормальной нагрузки P и расстоянию скольжения зонда s . АСМ-профиль следа износа, полученного в результате многоциклового трения, применяется для расчета объема изношенного материала как произведение площади профиля сечения дорожки износа S на длину дорожки износа l .

Результаты исследования. После проведения многоциклового трения на образце при изменении силы нагружения на зонд произошел износ покрытия, на глубину 188 нм при нагрузке 3,45 мкН и на 305 нм при нагрузке 6,89 мкН (рис. 1, табл.1).

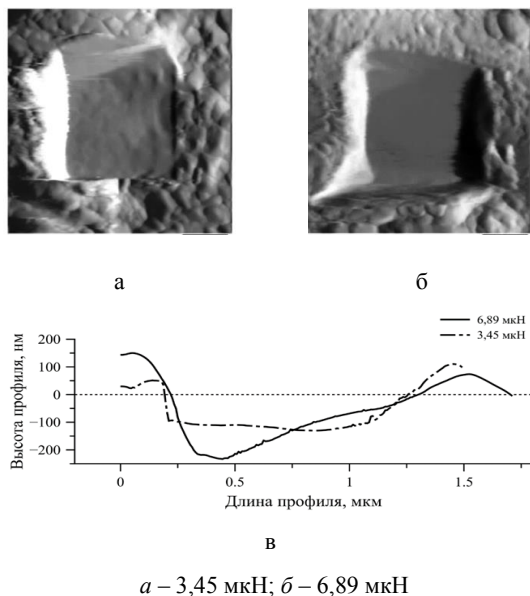


Рисунок 1 – АСМ-изображения (а, б) и профили (в) результатов износа покрытия NiP при изменении силы нагружения на зонд

Рис. 2 показывает изменение коэффициента трения от количества циклов. Установлено, что меньший коэффициент трения 0,14 и сила трения 476,6 нН получены при большей силе нагружения на зонд – 6,89 мкН. При нагрузке 3,45 мкН коэффициент трения равен 0,21, а сила трения – 716,5 нН.

Удельный объемный износ с увеличением нагрузки уменьшается с $5,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м до $4,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Такие значения удельного объемного износа показывают хорошую износостойкость относительно значений, например, полученных на износотойких покрытиях CrN [3]. Удельный объемный износ на покрытии CrN при нагрузке 3,5 мкН составил $4,4 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Удельный объемный износ на пленке меди, определенный тем же методом и нагрузке составил $15,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м.

Таблица 1. Характеристики покрытия NiP, полученные при трибоиспытаниях

P, мкН	h, нм	$\omega, \cdot 10^{-12}$ м ³ /Н·м	$k_{тр}$	$F_{тр}$, нН
3,45	188	5,3	$0,21 \pm 0,05$	$716,8 \pm 157,1$
6,89	305	4,3	$0,14 \pm 0,03$	$476,1 \pm 96,1$

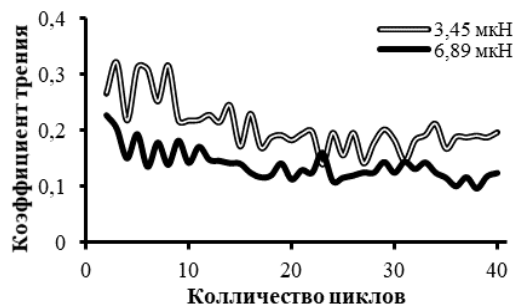


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента трения от количества циклов на покрытии NiP при изменении силы нагружения на зонд

Закключение. В результате триботехнических испытаний вакуумно-дугового никелевого покрытия, легированного фосфором, методом атомно-силовой микроскопии установлено, что меньшие значения коэффициента трения $0,14 \pm 0,03$ и силы трения $476,6 \pm 96,1$ нН получены в процессе многоциклового испытания за 40 циклов при нагрузке 6,89 мкН. Удельный объемный износ составил $4,3 \cdot 10^{-12}$ м³/Н·м. Полученные результаты показывают высокую износостойкость покрытия в микроконтакте, позволяющую расширить область его применения – например, в микроустройствах в качестве защитного покрытия электродов и поверхностей трения, а также как барьерный слой для избежания диффузии атомов между слоями в электрических разъемах и печатных платах [5].

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского фонда фундаментальных исследований № Ф20М–083.

Литература

1. Асланян, И. Р. Изнашивание электролитических NiP покрытий при трении скольжения / И. Р. Асланян, Л. Ш. Шустер // Труды ВИАМ. – 2015. – № 3. – С. 52–60.
2. Yan, M. Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni-P coating / M. Yan, H. G. Ying, T. Y. Ma // Surface & Coatings Technology. – 2008. – Vol. 202. – P. 5909–591.
3. Механические и триботехнические свойства нитридных и оксинитридных покрытий на основе

хрома и циркония, полученных электродуговым испарением / Вархолински Б. [и др.] // Трение и износ. – 2019. – Т. 40. № 2. – С. 209–217.

4. Износ тонких покрытий различной твердости зондовыми методами / Лапицкая В. А. [и др.] // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2020. – № 6. – С. 61–67.

5. Ni-P layer system and process for its preparation : пат. FR WO2009115192A2 / J. Barthelmes. – Оpubл. 20.03.2008.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12X18H10T С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ Чернышёв А.В., Шарандо В.И., Кременькова Н.В.

*ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Исследовано влияние степени пластической деформации и толщины образцов из стали 12X18H10T на амплитуды вносимой ЭДС и ее третьей гармонической составляющей накладного вихревого преобразователя. Частота переменного поля возбуждения составляла 2,5 кГц. Установлено, что максимальная толщина образцов, с достижением которой прекращается изменение амплитуд в обоих случаях, составляет 2–3 мм. С увеличением степени деформации и толщины образца амплитуда вносимой ЭДС возрастает. Амплитуда третьей гармонической составляющей имеет максимум в области деформаций 20–25 %, положение и высота которого определяются толщиной образца.

Ключевые слова: электромагнитный контроль, аустенитная сталь, пластическая деформация, толщина.

INFLUENCE OF THE THICKNESS OF THE PRODUCTS WHEN STUDYING THE PROCESSES OF DEFORMATION OF STEEL 12X18H10T USING THE ELECTROMAGNETIC CONTROL METHOD

Chernyshev A., Sharando V., Kremenkova N.

*Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Influence of the degree of plastic deformation and the thickness of samples made from steel 12X18H10T on the amplitudes of the introduced EMF and its third harmonic component of the superimposed eddy current transducer was investigated. The frequency of the alternating excitation field was 2.5 kHz. It was found that the maximum thickness of the samples, upon reaching which the change in amplitudes ceases in both cases, is 2–3 mm. With an increase in the degree of deformation and thickness of the sample, the amplitude of the introduced EMF increases. The amplitude of the third harmonic component has a maximum in the range of deformations of 20–25 %, the position and height of which are determined by the thickness of the sample.

Key words: electromagnetic control, austenitic steel, plastic deformation, thickness.

*Адрес для переписки: Чернышёв А.В., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by*

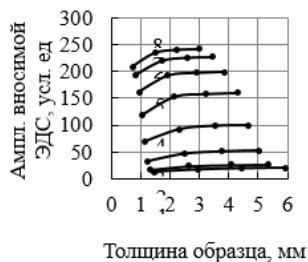
В работе [1] рассмотрена возможность изучения процессов пластической деформации стали 12X18H10T с помощью прибора контроля твердости ПКТ-2 [2]. Измерялась амплитуда третьей гармонической составляющей E_3 выходной ЭДС накладного преобразователя. В настоящей работе приведены результаты аналогичных исследований влияния степени пластической деформации на E_3 , но измерения проводились при различных толщинах образцов. Дополнительно проводились измерения амплитуды E вносимой ЭДС того же накладного преобразователя. Частота тока возбуждения преобразователя 2,5 кГц. Он состоял из трех соосных катушек – поля воз-

буждения, измерительной и компенсационной. Наружный диаметр катушек 10 мм. Выходная ЭДС преобразователя в исходном положении (без образца) компенсировалась до нулевого значения.

Образцы были изготовлены следующим образом. Из верхнего слоя стального листа толщиной 10 мм в состоянии поставки были вырезаны пластинки размером 20×20 мм² и прошлифованы до толщин 1,4–1,5 мм. Затем они прокатывались при комнатной температуре в двух взаимно перпендикулярных направлениях с обеспечением последовательного ряда степеней пластической деформации. Измерения проводились на пла-

стинках с одинаковой степенью деформации, сложенных в образцы различной толщины.

На рис. 1 показана зависимость амплитуды E вносимой ЭДС преобразователя от толщины образца при различных степенях деформации.



1 – 0 %, 2 – 10 %, 3 – 15 %, 4 – 21 %, 5 – 28 %, 6 – 35 %, 7 – 42 %, 8 – 51 %

Рисунок 1 – Зависимость амплитуды вносимой ЭДС накладного преобразователя от толщины образца при степенях деформации:

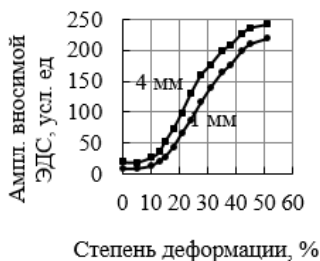
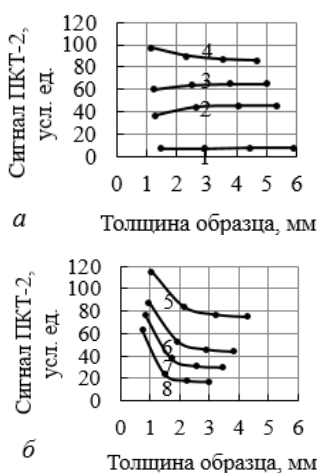


Рисунок 2 – Зависимость амплитуды вносимой ЭДС вихретокового преобразователя от степени деформации при толщинах образцов 1 и 4 мм

На рис. 2 представлена зависимость E от степени деформации при экстраполяции толщин составных образцов на 1 и 4 мм. Количество степеней деформации здесь представлено в более полном виде, оно вдвое превышает использованное для рис. 1.



1 – 0 %, 2 – 10 %, 3 – 15 %, 4 – 21 %; 5 – 28 %, 6 – 35 %, 7 – 42 %, 8 – 51 %.

Рисунок 3 – Зависимость сигнала прибора ПКТ-2 от толщины образца при степенях деформации



Рисунок 4 – Зависимость сигнала прибора ПКТ-2 от степени деформации при толщинах образцов 1 и 4 мм

Рис. 3 и 4 показывают, соответственно, зависимость E_3 преобразователя от толщины образца при разных степенях деформации и от степени деформации при толщинах образцов 1 мм и 4 мм.

Из рис. 2 следует, что по мере роста степени деформации E растет, что объясняется увеличением при этом в образце процентного содержания ферромагнитного мартенсита деформации. При этом растет магнитная проницаемость и, соответственно, E , прямо пропорциональная этой проницаемости. Этим фактором объясняется и рост на начальном участке E_3 , которая прямо пропорциональна коэффициенту Релея β .

Толщина, с достижением которой прекращается изменение E и E_3 , зависит от степени деформации. Это объясняется тем, что глубина проникновения электромагнитной волны в металл обратно пропорциональна магнитной проницаемости – с ее ростом глубина проникновения уменьшается. Следовательно, с ростом степени деформации и увеличением при этом магнитной проницаемости глубина проникновения уменьшается. Например, при деформации 51 % влияние изменения толщины на E и E_3 прекращается после 2 мм, что видно из рис. 1 и 3, б. При деформации 15 % влияние толщины на E и E_3 прекращается после 3 мм.

Уменьшение E_3 при превышении степени деформации 25 % объясняется уменьшением β из-за увеличения в образце плотности дислокаций.

Таким образом, по измерениям E возможен контроль в широком диапазоне степени деформации образцов из стали 12Х18Н10Т, однако при этом может возникнуть необходимость учета толщины образца. Контроль степени деформации по измерениям E_3 возможен лишь в ограниченном интервале ввиду неоднозначной зависимости E_3 от степени деформации. В этом случае также имеет место влияние толщины образца на результаты контроля.

Литература

1. Шарандо, В. И. Использование магнитодинамического и электромагнитного методов контроля при изучении процессов деформации стали 12Х18Н10Т / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 173–175.
2. Гусак, Н. О. Прибор для контроля твердости ПКТ-2 / Н. О. Гусак, А. В. Чернышев, В. Л. Цукерман // Дефектоскопия. – 1991. – № 10. – С. 92.

УДК 621

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА С СЕГНЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

Шабуря М.А., Колонтаева Т.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь

Аннотация: Представлены технологии получения сегнетокерамического материала на основе титанатов бария и висмута. Проведен сравнительный анализ двух рассмотренных технологий: прямой синтез и двухступенчатый синтез. Изучены основные физико-химические свойства и структура опытных образцов.

Ключевые слова: твердый раствор, фазовый состав, структура, спекание, сегнетокерамика.

FEATURES OF TECHNOLOGY FOR PRODUCTION OF MATERIAL WITH SEGNEELECTRIC PROPERTIES

Shabura A., Kolontaeva V.

Belarusian National Technical University,
Minsk Republic of Belarus

Abstract: Technologies of production of segnetoceramic material based on barium and bismuth titanates are presented. Comparative analysis of the two technologies considered was carried out: direct synthesis and two-stage synthesis. Basic physicochemical properties and structure of prototypes were studied.

Keywords: solid solution, phase composition, structure, sintering, segmetoceramics.

Адрес для переписки: Шабуря М.А., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: marina75800@mail.ru

Введение новых компонентов, образующих твердые растворы с компонентами исходной системы, позволяет в широких пределах изменять состав, а следовательно, и параметры твердых растворов и получать большое разнообразие свойств материалов. Благодаря этому на основе одной многокомпонентной системы можно получать материалы для различных областей применений, что удобно для их производства. Практически важным является также расширение возможности образования твердых растворов.

В данной научной работе были изучены две технологии изготовления керамики на основе твердых растворов титаната бария и висмута. Первый способ получения – двухступенчатая технология. В качестве исходных компонентов использовали оксид титана TiO_2 , оксид висмута Bi_2O_3 и карбонат бария $BaCO_3$.

Для синтеза образцов базового титаната бария $BaTiO_3$ использовали $BaCO_3$ и TiO_2 . Рассчитанные количества исходных компонентов взвешивались и смешивались. Смеси компонентов готовились путем помолы в микрошаровой мельнице в течение 20 минут. Затем полученные смеси помещались в тигли и подвергались высокотемпературной обработке в электрической печи.

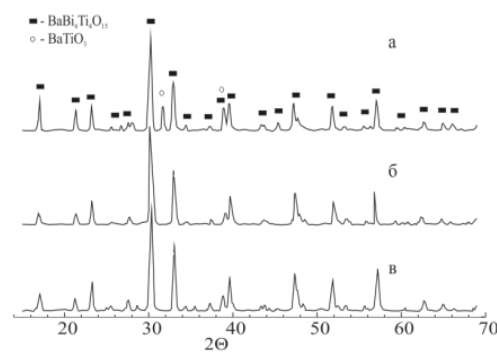
Температура спекания составила 1250 °С, с выдержкой при максимальной температуре 2 часа. Далее полученные спеки измельчали до удельной поверхности приблизительно 7000 $см^2/г$.

Аналогично по описанной выше технологии синтезировали $Bi_4Ti_3O_{12}$ из исходных компонентов Bi_2O_3 и TiO_2 . Температура спекания $Bi_4Ti_3O_{12}$ составила 1050 °С, с выдержкой при максимальной температуре 2 часа. Полученные порошки

после измельчения спеков $BaTiO_3$ и $Bi_4Ti_3O_{12}$ смешивались в заданном соотношении для синтеза трехкомпонентной керамики в системе $BaO-Bi_2O_3-TiO_2$.

Формование опытных образцов в виде дисков диаметром 10 мм и толщиной 2 мм производилось методом прессования при удельном давлении 30 МПа. В качестве связующего вещества использовали ПВС (поливиниловый спирт). Полученные образцы подвергали высокотемпературной обработке в электрической печи. Температура спекания составила 1150 °С.

На рис. 1 представлены рентгенограммы опытных образцов.



а – образец № 1; б – образец № 2; в – образец № 3

Рисунок 1 – Дифрактограммы опытных образцов

Данные рентгенофазового анализа показали, что основной кристаллической фазой является $BaBi_4Ti_4O_{15}$ и синтезированные материалы представляют собой твердые растворы замещения

В табл. 1 представлены основные физико-химические и электрофизические свойства син-

тезированных образцов оптимального состава по двухступенчатой технологии.

Таблица 1. Свойства образца № 2

Свойство образца	Состав № 2
Плотность, 10^{-3} кг/м ³	5,23
Пористость, %	4,35
Диэлектрическая проницаемость	64442
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,093
Удельное сопротивление, Ом	5,106

Структура образцов исследовалась с помощью сканирующего электронного микроскопа серии EVO (Zeiss, Германия).

Структура образца показана на рис. 2.

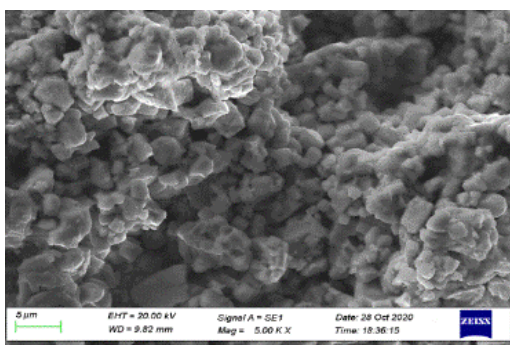


Рисунок 2 – Структура образцов сегнетокерамики, полученной по двухстадийной технологии (Mag = 5,00 kx)

Структура синтезированного керамического материала, достаточно однородная и плотная. В представленной структуре отмечается небольшое количество пор размером 5–10 мкм.

Анализ полученных результатов показал, что элементный химический состав образцов, полученных по двухстадийной технологии предварительного синтеза базовых титанатов бария и висмута с последующим спеканием, достаточно однородный, с преобладанием титана

В соответствии со второй технологией, сегнетокерамика на основе твердых растворов титаната бария-висмута синтезировалась одностадийным методом. Для синтеза использовали карбонат бария, оксид титана и оксид висмута.

Расчет шихты производили для химического соединения $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ ($\text{BaO}, 2\text{Bi}_2\text{O}_3, 4\text{TiO}_2$). Формование цилиндрических образцов после смешивания исходных компонентов производили аналогично двухступенчатой технологии. Образцы подвергались высокотемпературной обработке в электрической печи. Температура спекания составила 1150 °С. Выдержка при максимальной

температуре спекания составила 2 часа. Данные рентгенофазового анализа показали, что идентифицируются две основные кристаллические фазы BaTiO_3 и $\text{BaBi}_4\text{Ti}_4\text{O}_{15}$ (рис. 3)

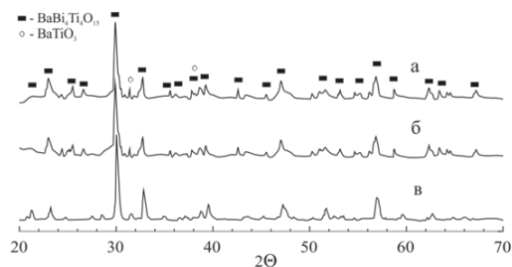


Рисунок 3 – Дифрактограммы опытных образцов

В табл. 2 представлены основные физико-химические и электрофизические свойства синтезированных образцов по двухступенчатой технологии.

Таблица 2. Свойства образца № 1

Свойство образца	Состав № 1
Плотность, каж. 10^{-3} кг/м ³	5,5
Водопоглощение, %	2,5
Диэлектрическая проницаемость	92196
Тангенс угла диэлектрических потерь	0,1
Удельное сопротивление, Ом	7,106

Структура образцов показана на рис. 4.

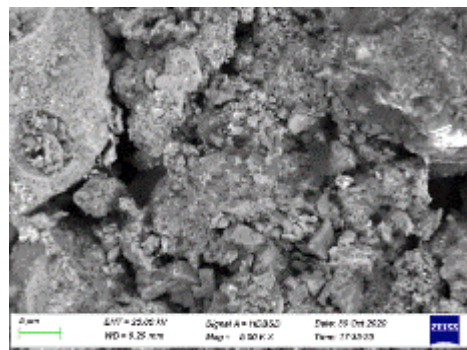


Рисунок 4 – Структура образцов сегнетокерамики, полученной по одностадийной технологии (Mag = 5,00 kx)

Как видно из снимков, структура сегнетокерамики, полученной прямым синтезом, отличается, от структуры двухстадийной технологии.

Зерна имеют различную морфологию и структуру. Имеются поры разной формы и размера (до 10 мкм), что свидетельствует о неполном завершении и процессов спекания при использовании прямого синтеза сегнетокерамики на основе твердых растворов.

УДК 621

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

Шабуря М.А., Колонтаева Т.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск Республика Беларусь

Аннотация: Представлены результаты исследования электрофизических свойств сегнетокерамического материала на основе титаната бария, модифицированного оксидами щелочно-земельных металлов. Изучено влияние модифицирующих добавок на диэлектрические свойства и фазовый состав материала.

Ключевые слова: сегнетокерамический материал, модифицирующие добавки, диэлектрическая проницаемость, фазовый состав.

STUDY OF DEPENDENCE OF ELECTROPHYSICAL PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF BARIUM TITANATE ON MODIFYING ADDITIVES

Shabura M., Kolontaeva T.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract: The results of the study of electrophysical properties of ferroelectric material based on barium titanate modified with alkaline-earth metal oxides are presented. Effect of modifying additives on dielectric properties and phase composition of material is studied.

Keywords: segnetoceramic material, modifying additives, dielectric constant, phase composition.

Адрес для переписки: Шабуря М.А., ул. Я. Коласа, 22, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: marina75800@mail.ru

Синтез сегнетоэлектрических материалов с особыми свойствами является актуальной задачей материаловедения. Разнообразие сегнетоэлектриков по составу предопределяет их широкое применение в различных областях техники, и прежде всего в микро- и нанозлектронике. Электрофизические свойства являются определяющими для данного вида керамики. Для сегнетоэлектриков характерно очень высокое значение диэлектрической проницаемости (10^3 – 10^4), в то время как для диэлектриков свойственно низкая диэлектрическая проницаемость, которая достигает всего несколько единиц. Так как титанат бария относится к сегнетоэлектрикам, то для него характерны высокая относительная диэлектрическая проницаемость, наличие спонтанной поляризации вблизи температуры фазового перехода второго рода при переходе через точку Кюри – потеря сегнетоэлектрических свойств.

В данной научной работе представлены результаты исследования электрофизических свойств сегнетокерамического материала, синтезированного на основе системы BaO-TiO₂ методом спекания с использованием модифицирующих добавок. Для регулирования технологического процесса и свойств керамики в состав массы в процессе смешивания вводят следующие добавки – MgO, CaO, SrO. Химический состав вводимых минерализаторов определяется составом получаемой керамики и зависит от механизма процесса спекания. Модифицирующие добавки вводят также для управления электрофизическими свойствами керамики.

На рис. 1 представлена зависимость удельного объемного сопротивления опытного образца чистого BaTiO₃ от температуры измерения и частоты электрического поля.

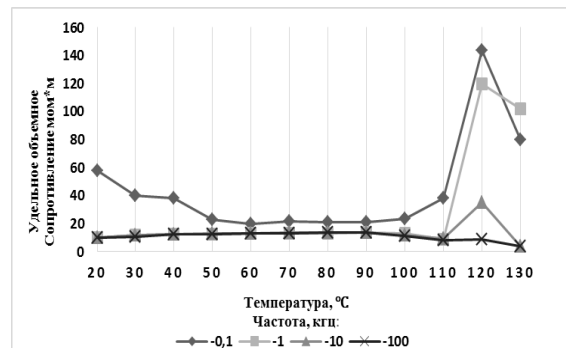


Рисунок 1 – Диэлектрическая проницаемость базового образца

Из представленной зависимости видно, что при температуре 120 °C наблюдается максимум удельного объемного сопротивления опытного образца, обусловленный структурной перестройкой кристаллической фазы и переходом из сегнето- в параэлектрическую область.

На рис. 2 представлена зависимость удельного объемного сопротивления опытных образцов, модифицированных различными добавками, при комнатной температуре от частоты измерения.

Из представленной выше зависимости видно, что при комнатной температуре наиболее высоким сопротивлением обладает образец с добавкой оксида магния. С увеличением частоты

удельное объемное сопротивление падает. Анализируя полученные зависимости можно сделать вывод, что при температуре Кюри наибольшим удельным объемным сопротивлением обладает чистый титанат бария и образец, модифицированный оксидом кальция.

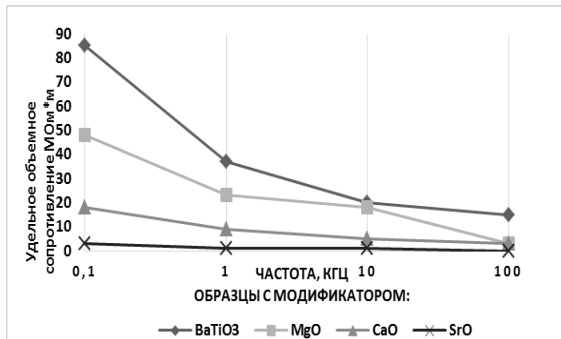


Рисунок 2 – Зависимость удельного объемного сопротивления опытных образцов

На рис. 3 представлена зависимость диэлектрической проницаемости от температуры измерения образца из чистого титаната бария при различной частоте электрического поля.

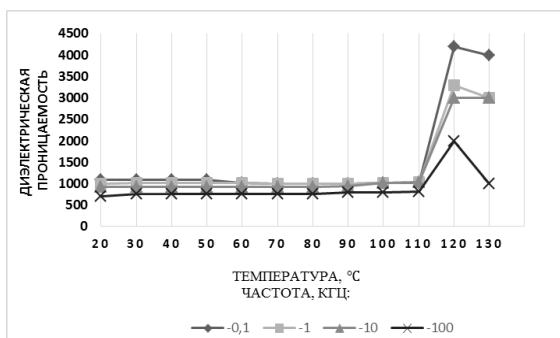


Рисунок 3 – Зависимость диэлектрической проницаемости опытного образца

Из представленной зависимости видно, что максимум диэлектрической проницаемости находится в районе 120 °C. Эта температура соответствует точке Кюри. При данной температуре происходит полиморфное превращение титаната бария из тетрагональной модификации в кубическую и следовательно изменение степени поляризации.

На рис. 4 представлена зависимость диэлектрической проницаемости опытных образцов, модифицированных различными добавками, от частоты измерения при температуре Кюри. Наибольшей диэлектрической проницаемостью обладает титанат бария, в то время как наиболее стабильными свойствами в широком частотном диапазоне характеризуется, содержащие SrO.

Снижение значений диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления материалов с увеличением частоты измерений объясняется нарастающей несогласованностью направлений электромагнитных моментов отдельных диполей материалов и внешнего электрического поля.

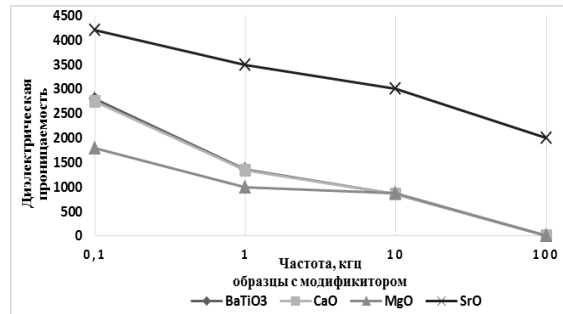


Рисунок 4 – Зависимость диэлектрической проницаемости опытных образцов с различными модификаторами

С помощью качественного рентгено-фазового анализа были проведены исследования фазового состава полученных материалов. Основной кристаллической фазой в образцах на основе системы Ba(Mg, Ca, Sr)O–TiO₂ является титанат бария в тетрагональной полиморфной модификации. Наиболее интенсивными максимумами титаната бария характеризуется образец без использования модифицирующих добавок.

При введении в состав материала иона магния кроме титаната бария BaTiO₃ образуется титанат магния MgTiO₃, при введении иона стронция – титанат стронция SrTiO₃, с введением иона кальция – титанат кальция CaTiO₃.

Необходимо отметить, что введение модифицирующих добавок приводит к снижению интенсивности рефлексов синтезированного титаната бария.

Анализ приведенных данных показал, что введение модифицирующих добавок оказывает заметное влияние на фазовый состав синтезируемых материалов. Оксиды кальция, магния и стронция образуют новые кристаллические фазы в виде титанатов этих металлов.

Снижение дифракционных максимумов титаната бария обусловлено уменьшением относительного количества этой фазы и формированием титанатов других металлов, а также образованием их твердых растворов. В меньшей степени на снижение максимумов влияет оксид магния, а в большей оксид кальция и стронция. Таким образом, используя различные модификаторы, можно регулировать фазовый состав и основные физико-химические свойства сегнетокерамики.

УДК 620.179.14

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ

Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В., Полоневич А.А.

ГНУ «Институт прикладной физики НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследовано изменение величины магнитного потока, измеряемого магнитным толщиномером МТЦ-3, и остаточной намагниченности, измеряемой измерителем остаточной намагниченности ИОН-4, от степени пластической деформации и толщины образцов из аустенитной стали 12Х18Н10Т. Установлено, что максимальная толщина, с достижением которой прекращается изменение сигналов обоих магнитодинамических приборов, составляет 3–4 мм. С увеличением степени деформации и толщины образца показания прибора МТЦ-3 возрастают. Показания прибора ИОН-4 имеют максимум в области деформаций 15–25%, положение и высота которого определяются толщиной образца.

Ключевые слова: магнитодинамический контроль, аустенитная сталь, деформация, толщина изделия.

INFLUENCE OF THE THICKNESS OF PRODUCTS IN STUDYING THE PROCESSES OF DEFORMATION OF STEEL 12X18H10T USING THE MAGNETODYNAMIC CONTROL METHOD

Sharando V., Chernyshev A., Kremenkova N., Polonevich A.

Institute of Applied Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus

Abstract. The change in the magnitude of the magnetic flux, measured by the magnetic thickness gauge MTTs-3, and the remanent magnetization, measured by the meter of remanent magnetization ION-4, on the degree of plastic deformation and the thickness of the samples of austenitic steel 12X18H10T, was investigated. It was found that the maximum thickness, upon reaching which the change in the signals of both magnetodynamic devices stops, is 3–4 mm. With the increasing in the degree of deformation and thickness of the sample, the readings of the MTTs-3 device increase. The readings of the ION-4 device have a maximum in the range of deformations of 15–25%, the position and height of which are determined by the thickness of the sample.

Key words: magnetodynamic control, austenitic steel, deformation, thickness.

Адрес для переписки: Шарандо В.И., ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: lab1@iaph.bas-net.by

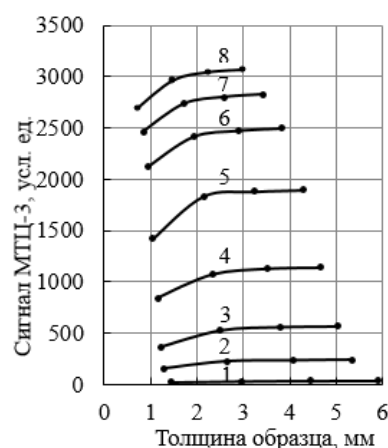
В работе [1] рассмотрена возможность применения для контроля структурных изменений в стали 12Х18Н10Т при ее пластической деформации магнитодинамических приборов МТЦ-3 и ИОН-4. Целью настоящей работы является изучение зависимости полученных результатов от толщины контролируемых изделий.

Из верхнего слоя стального листа толщиной 10 мм в состоянии поставки вырезаны пластинки размером 20×20 мм² и шлифованы до толщин 1,4–1,5 мм. Затем их прокатывали при комнатной температуре во взаимно перпендикулярных направлениях с обеспечением последовательного ряда степеней пластической деформации. Приборные измерения проводились на пластинках с одинаковой степенью деформации, сложенных в образцы различной суммарной толщины.

Толщиномер МТЦ-3 [2,3] регистрировал изменение магнитного потока в индукционной катушке, охватывающей стержневой магнит, при его контакте с разными образцами стали. Измеритель остаточной намагниченности ИОН-4 [3], снабженный катушкой без магнита, определял поток индукции от магнитного пятна, оставленного на поверхности образца магнитным нако-

нечником преобразователя толщиномера МТЦ-3 и характеризовал остаточную намагниченность.

На рис. 1 представлена зависимость сигнала прибора МТЦ-3 от толщины образца при некоторых из исследованных степеней деформации.



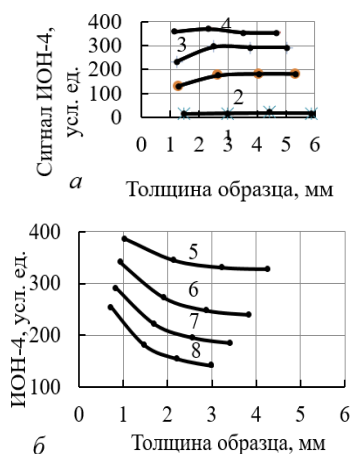
1 – 0 %, 2 – 10 %, 3 – 15 %, 4 – 21 %, 5 – 28 %, 6 – 35 %, 7 – 42 %, 8 – 51 %

Рисунок 1 – Зависимость сигнала прибора МТЦ-3 от толщины образца при степенях деформации

На рис. 2 представлена зависимость сигнала прибора МТЦ-3 от степени деформации при экстраполяции толщин составных образцов на 1 мм и 4 мм. Количество степеней деформации здесь представлено в более полном, соответствующем реальному количеству измерений, виде и вдвое превышает использованное для рис. 1.



Рисунок 2 – Зависимость сигнала прибора МТЦ-3 от степени деформации при толщинах образцов 1 и 4 мм



1 – 0 %, 2 – 10 %, 3 – 15 %, 4 – 21 %;
5 – 28 %, 6 – 35 %, 7 – 42 %, 8 – 51 %

Рисунок 3 – Зависимость сигнала прибора ИОН-4 от толщины образца при степенях деформации



Рисунок 4 – Зависимость сигнала прибора ИОН-4 от степени деформации при толщинах образцов 1 и 4 мм

Рис. 3 и рис. 4 показывают, соответственно, зависимость сигнала прибора ИОН-4 от толщины образца при разных степенях деформации и от степени деформации при толщинах образцов 1 и 4 мм. Для наглядности на рис. 3, как и на рис. 1, представлено вдвое уменьшенное количество кривых.

Из рисунков следует, что максимальная толщина, с достижением которой прекращается изменение сигналов обоих магнитодинамических приборов, составляет 3–4 мм. С увеличением степени деформации и толщины образца показания прибора МТЦ-3 возрастают, что связано с увеличением участвующего в создании магнитного потока количества ферромагнитной фазы. Показания прибора ИОН-4 имеют максимум в области деформаций 15–25%, положение и высота которого определяются толщиной образца. Поведение кривых остаточной намагниченности может быть связано с двумя разнонаправленными процессами. Необходимо учитывать, что используемые нами приборы работают с расположенной у поверхности локальной информационной зоной; изменение объема и плотности магнитного материала в образце приводит к перераспределению ее намагниченности за счет замыкания на глубинные слои. При начальных деформациях, вероятно, превалирует эффект увеличения, в том числе у поверхности, количества ферромагнитной фазы, затем большую роль начинает играть внутреннее замыкание намагниченной зоны. С уменьшением толщины образца намагниченная зона медленнее растет, но и меньше размагничивается.

Учет полученных результатов позволяет создавать необходимые методики контроля аустенитных сталей магнитодинамическим методом.

Литература

- Шарандо, В. И. Использование магнитодинамического и электромагнитного методов контроля при изучении процессов деформации стали 12Х18Н10Т / В. И. Шарандо, А. В. Чернышев, Н. В. Кременькова // Приборостроение–2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 173–175.
- Лухвич, А. А. Магнитные толщинометры нового поколения / А. А. Лухвич // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2010. – № 4. – С. 3–15.
- Разработки лаборатории металлофизики ИПФ НАН Беларуси в области неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iaph.basnet.by/lab1/products>. – Дата доступа: 30.09.2021.

УДК 538.9:669.2

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА $\text{Bi}_{17}\text{In}_{25}\text{Sn}_{59}$
Шепелевич В.Г., Гусакова С.В., Гольцев М.В., Гусакова О.В.

*Белорусский государственный университет
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлены результаты исследования фазового состава, микроструктуры, зеренной структуры тройного сплава Bi-In-Sn, полученного методом сверхбыстрой закалки из расплава при скорости охлаждения расплава 10^5 К/с. Показано, что при высокоскоростном затвердевании сплав состоит из двух мелкодисперсных фаз: BiIn (ϵ -фаза) и Sn_4In (γ -фаза). Определены объемные доли каждой фазы и размеры их зерен. Изучена текстура фольги и рассмотрен механизм образования преимущественной ориентации зерен.

Ключевые слова: висмут, индий, олово, высокоскоростное затвердевание.

PHASE COMPOSITION AND MICROSTRUCTURE OF $\text{Bi}_{17}\text{In}_{25}\text{Sn}_{59}$ ALLOY
Shepelevich V., Husakova S., Goltcev M., Gusakova O.

*Belarusian State University
 Minsk, Belarus*

Abstract. The results of studying the phase composition, microstructure, and grain structure of the Bi-In-Sn ternary alloy obtained by rapid quenching from the melt at a melt cooling rate of 10^5 K/s are presented. It is shown that during rapid solidification, the alloy consists of two finely dispersed phases: BiIn (ϵ -phase) and Sn_4In (γ -phase). The volume fractions of each phase and the sizes of their grains have been determined. The texture of the foil is studied and the mechanism of the formation of the preferred orientation of grains is considered.

Key words: bismuth, indium, tin, high speed solidification.

*Адрес для переписки: Гусакова С.В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
 e-mail: husakova@bsu.by*

Сплав олова с висмутом один из широко применяемых при низкотемпературной пайке изделий электронной промышленности.

В работе сплав синтезировался методом сверхбыстрой закалки из расплава при скорости охлаждения расплава 10^5 К/с. Припой, полученные методом сверхбыстрой закалки в виде фольги, имеют ряд преимуществ по сравнению с массивными. Использование фольги позволяет уменьшить расход материала, осуществлять пайку тонких изделий. Высокая химическая однородность материала обеспечивает сужение температурного интервала плавления и кристаллизации и уменьшение времени нагрева для получения гомогенного расплава, что понижает деструктивное влияние высокой температуры на элементы пайки. Исследования микроструктуры и свойств околэвтектических сплавов системы Bi-Sn показали, что при высокоскоростном затвердевании образуется ультрадисперсная структура, неустойчивая при комнатной температуре [1]. Для микроструктуры и свойств используется добавление третьего компонента [2]. Поэтому в настоящем исследовании представлены результаты по микроструктуре и свойствам тройного сплава Bi – In – Sn.

На дифрактограмме фольги сплава $\text{Bi}_{17}\text{In}_{25}\text{Sn}_{59}$, приведенной на рис. 1 наблюдаются дифракционные линии (101, 111, 200, 220 и др.) соединения BiIn (ϵ -фаза) а также дифракционные линии, принадлежащие соединению Sn_4In (γ -фаза). Полученные данные позволяют утвер-

ждать, что быстрозатвердевшая фольга соединения $\text{Bi}_{20}\text{In}_{28}\text{Sn}_{52}$ двухфазна.

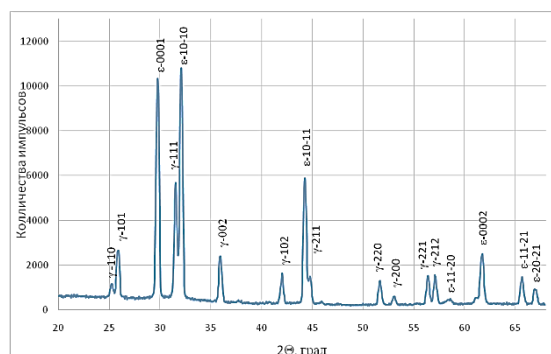
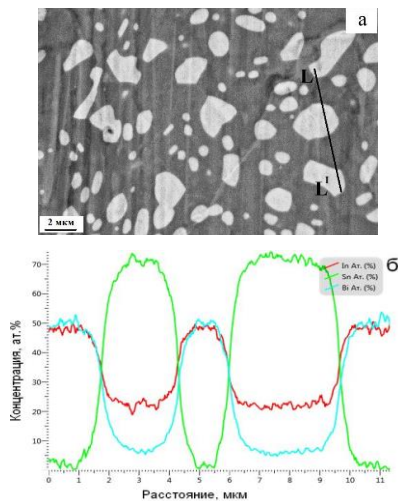


Рисунок 1 – Дифрактограмма сплава $\text{Bi}_{17}\text{In}_{25}\text{Sn}_{59}$

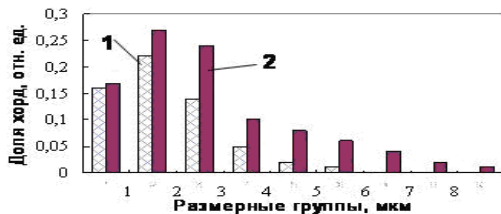
Изображение микроструктуры сплава $\text{Bi}_{17}\text{In}_{25}\text{Sn}_{59}$, и распределение элементов вдоль линии сканирования представлено на рис. 2. В микроструктуре фольги наблюдаются светлые и темные участки. Светлые участки, для которых отношение концентрации Bi и In близко к единице соответствует сечениям ϵ -фазы (BiIn). В темных участках концентрации Bi, In и Sn равны 6, 22 и 74 ат.%, соответственно. Это позволяет считать, что темные участки являются сечениями выделений γ -фазы, в которой часть атомов олова замещена атомами висмута.

Металлографический анализ показал, что объемная доля ϵ -фазы равна 0,28, а γ -фазы – 0,72. Распределение хорд случайных секущих ϵ -фазы и γ -фазы приведен на рис. 3.



а – микроструктура, б – распределение концентрации элементов

Рисунок 2 – Микроструктура и распределение элементов вдоль линии сканирования L-L¹ быстрозатвердевшей фольги сплава Bi₁₇In₂₅Sn₅₉



1 – ε-фаза, 2 – γ-фаза

Рисунок 3 – Распределение хорд случайных секущих на включениях сплава Bi₁₇In₂₅Sn₅₉

Наибольшая доля хорд сечений приходится на размерную группу от 1 до 2 мкм. Наибольшие хорды сечений ε- и γ-фаз не превышают 6 и 9 мкм, соответственно. Средние сечения длин хорд для сечений ε- и γ-фаз составляют 1,7 мкм и 2,6 мкм, соответственно. Удельная поверхность межфазных границ, рассчитанная из стереографического соотношения [4] равна 0,86 мкм⁻¹.

Изображение зеренной структуры фольги сплава Bi₁₇In₂₅Sn₅₉ приведено на рисунке 3.4. Средний размер зерна ε-фазы составляет 0,56 мкм, а γ-фазы – 4,3 мкм.

УДК 621.3.049.774

ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ В КОРПУСАХ ИС С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА МКМ-1 Ширяева В.Д.¹, Щербакова Е.Н.²

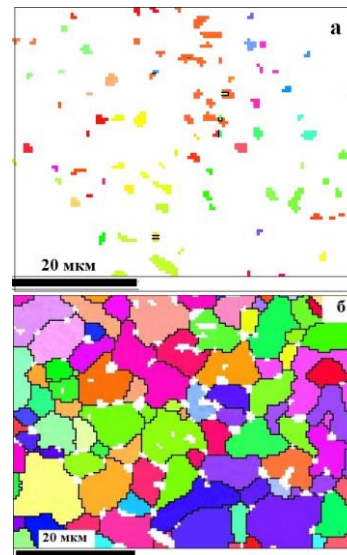
¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

²Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены результаты исследования содержания воды в корпусах интегральных схем. Исследования производились с использованием масс-спектрометрического комплекса МКМ-1.

Ключевые слова: интегральные микросхемы, содержание воды.



а – ε-фаза, б – γ-фаза

Рисунок 4 – Зеренная структура фаз фольги сплава Bi₁₇In₂₅Sn₅₉

Текстура фольги исследована методом обратных полюсных фигур. Значения полюсных плотностей дифракционных линий для ε-фазы и γ-фазы, снятых на стороне фольги, прилегающей к кристаллизатору. Наибольшее значение полюсной плотности γ-фазы принадлежит дифракционной линии 0001, т.е. наблюдается текстура (0001), при которой более 50 % площади зерен данной фазы ориентировано плоскостью (0001) параллельно поверхности фольги. Образование такой текстуры обусловлено тем, что плоскость (0001) является наиболее плотноупакованной. В ε-фазе не наблюдается преимущественной ориентировки зерен.

Литература

1. Diffusionless (chemically partitionless) crystallization and subsequent decomposition of supersaturated solid solutions in Sn-Bi eutectic alloy / O. V. Gusakova [et al.] // Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences. – 2019. – Vol. 377. – P. (2143): 20180204.

2. Шепелевич, В. Г. Влияние легирования сурьмой на микроструктуру и свойства быстрозатвердевшего сплава Bi-60% (ат.) Sn / В. Г. Шепелевич, О. В. Гусакова // Материаловедение, 2019. – № 3. – С. 18–23.

MEASURING OF THE WATER CONTENT IN INTEGRATED CIRCUIT PACKAGE BY USING MKM-1 ANALYZER

Shiryaeva D.¹, Shcherbakova N.²

¹JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company

²Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The results of the study of the water content in the housings of the integrated circuits are presented. The studies were carried out using the mass spectrometric complex MKM-1.

Key words: Integrated circuits, water content.

Адрес для переписки: Щербакова Е.Н., пр. Независимости, 65, г. Минск 220013, Республика Беларусь
e-mail: scherbakova@bntu.by

Эксплуатационная надежность интегральных схем (ИС) в герметичных корпусах в значительной мере зависит от содержания влаги в подкорпусном объеме [1].

Выделяют 2 вида источников влаги:

1. Внешние;
2. Внутренние.

К внешним источникам относится влага, которая натекает через поры или сквозные трещины, а также может диффундировать через объем полимерного материала.

К внутренними можно отнести выделение влаги из материалов (клей и стеклоприпой), которые контактируют с атмосферой объема корпуса ИС, а также влага, сорбирующая в порах и микронеровностях.

негодные микросхемы, проанализировать причины появления влаги и оценить мероприятия по снижению влаги в подкорпусном объеме для повышения надежности. Этот метод является разрушающим.

MKM-1 обеспечивает выполнение требований ОСТ II 073.013-2008 (метод 222-1) и MIL-STD-883 (метод испытаний 1018). Время от начала измерения до конца составляет не более часа. Процесс измерения влаги состоит из четырех этапов: подготовка образца, загрузка образца, проведение измерений, выгрузка образца.

1. Подготовка образца.

Микросхема обезжиривается в этиловом спирте. Затем она закрепляется на предметном столике с помощью технологической оснастки так, чтобы под местом прокола не находился кристалл нашей микросхемы, и выдерживается в термокамере.

2. Загрузка образца.

С помощью пинцета образец, закрепленный на предметном столике, загружается в шлюзовую камеру. Важно, чтобы перемещение микросхемы из термокамеры в шлюзовую камеру составляло менее 3 минут. Включаются турбомолекулярный и фовакуумный насосы. По достижении давления менее $4 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст. (контролируется по датчику ZAGR, расположенном на приборе) открывается высоковакуумный затвор между камерами и с помощью магнитного транспортера образец перемещается в камеру вскрытия (рис. 2). Там он крепится на приемном столике, транспортер убирается назад в шлюзовую камеру и затвор закрывается. Температура в камере вскрытия варьируется от 100 °С до 104 °С. Наблюдая в окно измерительного отсека, игла подводится к корпусу микросхемы в «ручном» режиме как можно ближе, но не должна его касаться.

3. Проведение измерений.

На компьютере контролируется изменение (вначале увеличение, а затем уменьшение) парциального давления паров H₂O. Через 20-30 минут оно стабилизируется. На панели шагового двигателя прокальвателя переходим из режима «ручной» в режим «автомат», нажимаем «старт». Алгоритм «прокальвания» задан автоматически



Рисунок 1 – Масс-спектрометрический комплекс MKM-1

В настоящей работе для измерения объемной доли влаги газовой среды в подкорпусном пространстве устройств физической электроники, использовался анализатор влажности MKM-1 (рис. 1). Данные измерения помогают выявить

и состоит из 128 циклов. Игла прокальвателя перемещается вниз до образования микротечи. Замер количества H_2O производится, когда величина напуска из микротечи окажется в диапазоне $1,2 \cdot 10^{-6}$ – $1,8 \cdot 10^{-6}$ мм.рт.ст.

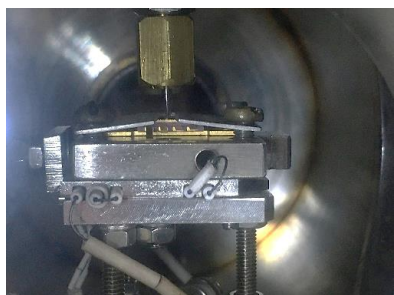


Рисунок 2 – Камера вскрытия с микросхемой, закрепленной на предметном столике

4. Выгрузка образца.

Открываем высоковакуумный затвор. Переходим в «ручной» режим и пошагово медленно извлекаем иглу прокальвателя из микросхемы. Когда на экране контроллера высвечивается надпись «turbo off», выключаем формвакуумный насос и производим напуск воздуха. Открываем шлюз и с помощью пинцета извлекаем образец.

На рис. 3 изображена микросхема с отверстием в крышке корпуса, которое образуется в результате измерения. Температура воздуха в помещении при проведении испытаний не должна превышать 25 °С.

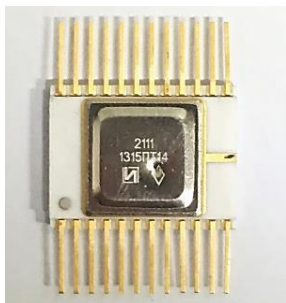


Рисунок 3 – Внешний вид микросхемы после проведения измерений

Допустимый уровень H_2O , установленный в отраслевом стандарте [2], при температуре 100 °С должен быть не более 0,5 объемного процента (5000 ppm). Детали корпусов с кристаллами ИС перед герметизацией должны быть тщательно просушены, так как, если этим пренебречь, то результаты измерения могут превышать допустимые значения влаги в десятки или даже сотни раз.

Это было подтверждено экспериментально. Были взяты 12 микросхем и половина из них дополнительно прошла отжиг. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты измерения H_2O в корпусах микросхем

№	Содержание H_2O в микросхемах с дополнительным отжигом, об. %	Содержание H_2O в микросхемах без дополнительного отжига, об. %
1	0,03	0,05
2	0,04	0,04
3	0,05	0,11
4	0,08	0,10
5	0,11	0,10
6	0,04	0,08

Из измерений следует, что у четырех из шести микросхем, прошедших дополнительный отжиг, уменьшилось содержание влаги в подкорпусном объеме, у одной микросхемы содержание H_2O не изменилось, еще у одной количество H_2O составило больше, чем у той же микросхемы, которая не проходила дополнительный отжиг.

По результатам проведенного исследования мы можем предполагать, что дополнительный отжиг микросхем перед герметизацией в большинстве случаев улучшает их качество.

Литература

1. Чернышов, А. А. Контроль влажности в корпусах интегральных микросхем / А. А. Чернышев, С. А. Крутоверцев, А. И. Бутурлин // Зарубежная электронная техника. –1987. – № 2. – С. 3–63.
2. Микросхемы интегральные. Система и методы операционного контроля в процессе производства. Технические требования к технологическому процессу при аттестации производства : ОСТ 11 20. 9903-86.

УДК 617.3

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ АБСОРБЦИИ И ЛЕЧЕНИЯ РАНЕНИЙ Ющенко Е.В., Терещенко Н.Ф.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина*

Аннотация. Раны, в том числе хронические, источник больших проблем в современном мире и медицине, где из-за многих факторов можно иметь разные травматические последствия. Лечение требуется эффективное, недорогостоящее и комфортное для пациентов, которого можно достичь с помощью автоматизированной системы вакуумной абсорбции и лечения ранений (АСВАЛР). Она работает с помощью воздействия отрицательного давления, отсасывает таким образом лишнюю жидкость и очищает поверхность раны, стимулируя пролиферацию грануляционной ткани.

Ключевые слова: рана, вакуум, лечение, очищение.

AUTOMATED SYSTEM OF VACUUM ABSORPTION AND TREATMENT OF WOUNDS

Yushchenko K., Tereshchenko M.

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
Kyiv, Ukraine

Abstract. Wounds, including chronic ones, are a source of great problems in the modern world and medicine, where, due to many factors, one can have different traumatic consequences. Treatment requires effective, inexpensive and patient-friendly, which can be achieved with an automated vacuum absorption and wound healing system (ASVATW). It works by using negative pressure, thus sucking out excess fluid and cleansing the wound surface, stimulating the proliferation of granulation tissue.

Key words: wound, vacuum, treatment, absorption.

Адрес для переписки: Ющенко К.В., пр. Победы 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: eka.yushchenko@gmail.com

Цель работы. Исследование методов очистки раневой поверхности кожи, актуальности и преимуществ методики автоматизированной системы вакуумной абсорбции и лечения ран.

Методы очистки поверхности раны. Важность и физиологическая сложность процесса заживления ран, особенно с возможными последующими гнойными инфекциями и проблемами, с которыми сталкивается медицина и медицинская промышленность, при их лечении, всегда имели первоочередной приоритет в системной медицине и в разработке новейших технологий и средств лечения [1].

Раны бывают различные и имеют много классификационных признаков, например, по причинам возникновения, способам заживления и методом очистки поверхности, который изображен на рис. 1.

Классификация ран по причине их возникновения [2]:

1. Внешние причины: механическое воздействие (рубленые, колотые, огнестрельные раны, ушибы), термическое воздействие (ожоги, обморожения), химическое воздействие (химические ожоги), электрическое воздействие (ожоги).

2. Внутренние причины: язвы (язвы голени, пролежни, диабетическая стопа), например, вследствие дефекта кровообращения.



Рисунок 1 – Методы очистки поверхности ран

Существуют различные методы очистки раны, но выделим 3 основных .

1. Метод очистки с помощью антисептических препаратов.

2. Метод аспираторной очистки и антисептических средств.

Этот метод состоит из таких процессов, как размещение влажной салфетки с содержанием антисептического средства и поверхностного закрепления вакуумной присоски.

3. Но наиболее эффективным является механизм действия автоматизированной системы вакуумной абсорбции и лечения ран, который улучшает и сочетает в себе два предыдущих метода и осуществляет автоматизированное управление и контроль процесса очистки.

Этот процесс состоит из трех частей:

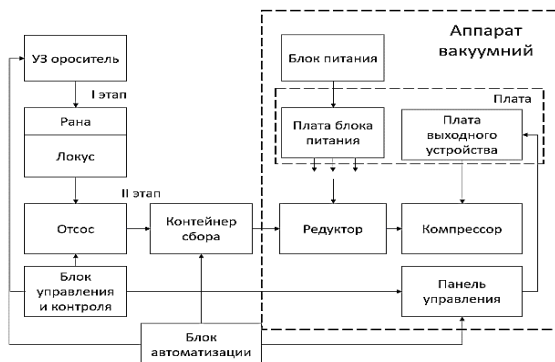
- сначала осуществляется обработка раны антисептическим средством методом распыления,
- далее размещается повязка (салфетка-спонж),
- фиксируется вакуумная присоска и осуществляется работа вакуумного аспиратора для удаления лишних отмерших и твердых частиц поврежденной кожи и раны [3].

Вакуум-терапия. В данной работе исследованы механизмы действия при терапии ран отрицательным давлением (вакуум-терапия) одной из новейших методик, используемых в лечении ран различной этиологии [4]. Отрицательное давление обеспечивает непрерывное отсасывание жидкости, стимулирует пролиферацию грануляционной ткани и эффективно очищает поверхность зоны раны. Местное пролонгированное лечение ран отрицательным давлением – это детально разработанная, надежная, эффективная и профессиональная технология, которая значительно сокращает продолжительность и стоимость лечения.

Вакуумная терапия ран, которая так же называется «терапия ран отрицательным давлением» используется для хронических ран, которые долго не могут зажить. Отрицательное давление локально применяется к области раны и с его помощью уменьшается количество бактерий и отек, а так же стимулирует образование грануляционной ткани. Механизм действия данного метода следующий: абсорбция, очистка раны и удаления экссудата. Защита раны от вторичной инфекции, уменьшение бактерий. Снижение отека и улучшения кровотока. Уменьшение площади раны.

Вакуумная абсорбция позволяет удалить излишки интерстициальной жидкости, производит декомпрессию сосудов, тем самым обеспечивая приток крови и питательных веществ к ране, что приводит к уменьшению бактериальной нагрузки и улучшение перфузии [5]. Все эти вещи являются основными составляющими быстрого заживления раны. Кроме удаления избытка жидкости, также создается давление на рану, который действует на клетки как механический сигнал, процесс, известный как механотрансдукция [6]. В основе этого процесса - действие отрицательного давления на клетки, которое активирует каскад реакций, приводящих к повышению активности генов, кодирующих клеточную пролиферацию. Все это позволяет грануляционную ткань формироваться быстрее. Грануляционная ткань необходима для дальнейшего формирования рубца, следовательно, этот процесс играет ключевую функцию.

На рис. 2 приведена структурная схема автоматизированной системы вакуумной абсорбции и лечения ран (АСВАЛР) и показаны этапы выполнения терапевтической процедуры.



УЗ – ультразвуковой

Рисунок 2 – Автоматизированная система вакуумной абсорбции и лечения ран

Выводы. Проанализировав вышеупомянутый материал можно сделать вывод, что лечение ран имеет большую актуальность в сфере медицины. Поэтому передовой и эффективной методикой лечения ран различного происхождения является автоматизированная система вакуумной абсорбции. С помощью которой можно уменьшить риски заражения и быстро вылечить пациента.

Литература

1. Терещенко, М. Ф. Методи дослідження параметрів чистоти поверхні ран системою вакуумної абсорбції та санації / М. Ф. Терещенко, О. В. Рущька, М. В. Чухраєв // Вісник КПІ, серія Приладобудування. – 2019. – № 58(2). – С. 97–105.
2. Терещенко, М. Ф. Біофізика: практикум / М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, І. О. Яковенко. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. – 288 с.
3. Ультразвукові фізіотерапевтичні апарати та пристрої: монографія / М.Ф. Терещенко [и др.] – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2018. – 184 с.
4. Матвієнко, С. М. Вплив процесів конвекції в рідині на похибку вимірювання теплопровідності методом прямого підігріву термістора / А. М. Матвієнко, Г. С. Тимчик, М. Ф. Терещенко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2017. – № 4. – С. 121–130.
5. Ющенко, К. В. Автоматизована системи вакуумної абсорбції та лікування ран / К. В. Ющенко, М. Ф. Терещенко // Збірник праць XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Ефективність та автоматизація інженерних рішень у приладобудуванні», 08–09 грудня 2020 р. – К.: ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – 2020. – С. 362–365.
6. Ющенко, К. В. Системи автоматизованого контролю чистоти поверхні ран / К. В. Ющенко, М. Ф. Терещенко // Збірник матеріалів XX Міжнародної науково-технічної конференції «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», ПБФ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 18–19 травня 2021 р., Київ, Україна, 2021. – С. 120–123.

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 539.26, 538.958, 621.373.8

**NON-LINEAR OPTICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT
GLASS-CERAMICS BASED ON $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}_4$ SPINEL NANOCRYSTALS**
Glazunov I.¹, Malyarevich A.¹, Yumashev K.¹, Dymshits O.², Alekseeva I.², Zhilin A.²

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

²S.I. Vavilov State Optical Institute
St. Petersburg, Russia

Abstract. Transparent glass-ceramics containing $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}_4$ spinel nanocrystals with sizes of 6–11 nm were studied. Absorption band of the Co^{2+} ions in the material is shifted to longer wavelengths as compared with glass-ceramics with no Ga_2O_3 addition. Absorption saturation at 1.54 μm was observed. The developed glass-ceramics is promising as saturable absorbers for 1.6 μm erbium lasers.

Keywords: transparent glass-ceramics; spinel nanocrystals; absorption saturation; cobalt ions; gallium oxide.

**НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИТАЛЛА, СОДЕРЖАЩЕГО НАНОКРИСТАЛЛЫ
ШПИНЕЛИ $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}_4$**

Глазунов И.В.¹, Маляревич А.М.^{1*}, Юмашев К.В.¹, Дымшиц О.С.², Алексеева И.П.², Жилин А.А.²

¹НИЦ Оптических материалов и технологий Белорусского национального технического университета
Минск, Республика Беларусь

НИТИОМ ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова»
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Аннотация. В работе исследованы ситаллы, содержащие нанокристаллы шпинели состава $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}(\text{Al},\text{Ga})_2\text{O}_4$ размером 6–11 нм. Полоса поглощения ионов кобальта в области 1,5 мкм в материале смещена на 20 нм в длинноволновую область в сравнении с ситаллами без добавления Ga_2O_3 . На длине волны 1,54 мкм наблюдается насыщение поглощения под воздействием мощного оптического излучения. Исследованный материал перспективен для насыщающихся поглотителей лазеров на основе ионов Er^{3+} с длиной волны излучения в области 1,6 мкм.

Ключевые слова: ситалл; нанокристаллы шпинели; насыщение поглощения; ионы кобальта; оксид галлия.

Адрес для переписки: Маляревич А.М., пр. Независимости, 65, корпус 17, г. Минск 220013, Республика Беларусь, e-mail: malyar@bntu.by

Materials doped with cobalt Co^{2+} ions placed in tetrahedral sites are well known as saturable absorbers for lasers emitting in 1.3–1.6 μm spectral region (see e.g. [1]). For this purpose saturation of absorption in the band related to the ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$ transition of tetrahedrally coordinated Co^{2+} ions is used. Among such materials $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ spinel single crystal is the most widely applied for passive Q-switching of erbium glass lasers emitting at 1.54 μm .

Spectral region of 1.5–1.7 μm attracts attention for range-finding, environmental sensing, aerial navigation, telecom applications and laser surgery due to low propagation losses of light in the atmosphere and silica fiber. Several crystalline materials doped with Er^{3+} ions were recently developed as laser ones with emission wavelengths in the 1.6–1.7 μm spectral region (see e.g. [2]). For such lasers passive Q-switching with $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ spinel single crystal is not very efficient. This is due to low absorption in the range of the ${}^4\text{A}_2({}^4\text{F}) \rightarrow {}^4\text{T}_1({}^4\text{F})$ transition of Co^{2+} ions and consequently, low saturable absorption contrast at the lasing wavelength. Therefore, new materials containing Co^{2+} ions with high absorption in the range of 1.6–1.7 μm are needed.

Spectral properties of transition metal ions are sensitive to their surrounding, and this is used to adjust position of the absorption bands by designing the proper environment of the transition metal ion [3]. Therefore, if the addition of gallium oxide to the composition of the initial zinc aluminosilicate glass result in crystallization of the gallium-doped spinel, such material will provide a desired spectral shift of the Co^{2+} absorption band used for Q-switching to longer wavelengths.

In this paper we present results of study of the new glass-ceramics of the zinc gallioaluminosilicate (ZGAS) system nucleated by TiO_2 and doped with CoO . The optical absorption and absorption saturation properties of these materials are reported below.

Initial glass of the composition 25 ZnO , 23 Al_2O_3 , 2 Ga_2O_3 , 50 SiO_2 , (mol%) nucleated by 7 mol % TiO_2 and doped with and 0,1 wt % CoO , both added above 100 % of the base composition, was prepared from the reagent grade raw materials. The glass was melted in a laboratory furnace with Global heating elements at 1580 °C. Then the initial transparent violet-colored glass was cut into pieces and heat-treated in the muffle furnace by two-stage

heat-treatments with the first hold at 720 °C and the second hold in the temperature range of 750–1000 °C.

Fig. 1 shows the linear absorption spectra of the Co²⁺-doped initial glass and glass-ceramics. The spectrum of the initial glass is a typical absorption spectrum of the Co²⁺ ions in aluminosilicate glasses [4]. Absorption spectra of glass-ceramics are characteristic for materials with tetrahedrally coordinated Co²⁺ ions, which can be confirmed by a comparison with absorption spectra of tetrahedral Co²⁺ ions in different single crystals (see, e.g. [5]).

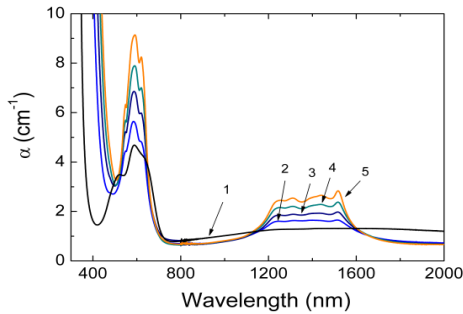


Figure 1 – Absorption spectra of the initial glass (1) and glass-ceramics prepared by heat-treatments at: 800 °C (2), 850 °C (3), 900 °C (4), 1000 °C (5)

Typical experimental data on initial absorption recovery after power light excitation are presented in Fig. 2. The relaxation demonstrates monoexponential nature. To evaluate the initial absorption recovery time τ , results were modeled using the dependence (1)

$$\Delta\alpha = A\exp(-t/\tau), \quad (1)$$

where $\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha(t) = \ln(I(t)/I_0)$, α_0 – initial (non-excited) absorption coefficient, $I(t)$ – time dependent intensity of probing radiation transmitted through the sample, I_0 – initial intensity of probing radiation, A – numerical coefficient.

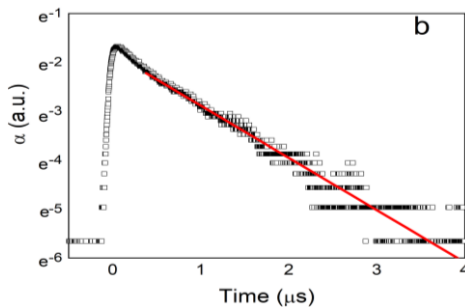


Figure 2 – Kinetics of relaxation of the bleached state for glass-ceramics prepared by heat-treatments at the second stage at 1000 °C

The measured relaxation time was $\tau = 790 \pm 10$ ns for the glass-ceramic prepared by heat-treatment at 1000 °C; $\tau = 815 \pm 10$ ns for the sample prepared by heat-treatment at 850 °C.

Fig. 3 presents transmission of the Co²⁺-doped glass-ceramics as a function of input energy fluence at 1.54 μm wavelength, which corresponds to the ${}^4A_2({}^4F) \rightarrow {}^4T_1({}^4F)$ transition.

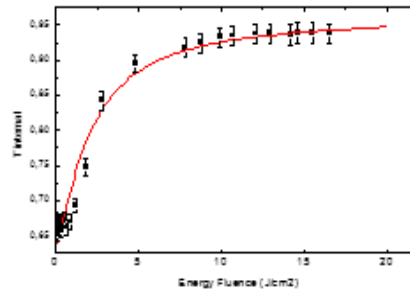


Figure 3 – Dependence of transmission of the glass-ceramics at $\lambda = 1,54 \mu\text{m}$ on the input energy fluence

The experimental data were modelled with a slow saturable absorber model because the characteristic recovery time for Co²⁺ ions is few hundreds of ns that is much longer than the duration of the excitation pulse (70 ns in our case).

$$\frac{dE}{dz} = -hv \frac{\ln\left(\frac{1}{T_0}\right)}{L} (1 - \gamma) \times \left(1 - e^{-\frac{\sigma_{GSA} E}{hv}}\right) - \frac{\ln\left(\frac{1}{T_0}\right)}{L} \gamma E, \quad (2)$$

where z denotes the axial coordinate inside the SA, $F_s = hv/\sigma_{GSA}$ is the energy absorption saturation fluence; h is the Planck constant; $\gamma = \sigma_{ESA}/\sigma_{GSA}$ is the absorption saturation contrast; σ_{ESA} and σ_{GSA} are the excited and ground state absorption cross-sections (ESA and GSA) for the SA, respectively.

The best fitting curve results are $(2.5\text{--}2.6) \cdot 10^{-19} \text{ cm}^2$ for glass-ceramics prepared by the heat-treatment at 850 and 900 °C. The absorption saturation contrast, γ^{-1} , increases from 3 (for $T = 800$ °C) to 12.5 (for $T = 1000$ °C).

References

1. Camargo, M. B. Co²⁺:YSGG saturable absorber Q switch for infrared erbium lasers / M. B. Camargo, R. D. Stultz, M. Birbaum // Opt. Lett., 1995. – Vol. 20. – P. 339–341.
2. In-band pumped room-temperature Er:KY(WO₄)₂ laser emitting near 1.6 μm / K. N. Gorbachenya [et al.] // Laser Phys, 2013. – Vol. 23. – P. 125005–125009.
3. Bates, T. Ligand field theory and absorption spectra of transition-metal ions in glasses, in Modern Aspects of the Vitreous State / T. Bates, J.D. Mackenzie Ed. // Butterworth: London, 1962. – P. 195–254.
4. Linear and nonlinear optical properties of cobalt-doped zinc aluminum glass ceramics / I. A. Denisov [et al.] // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 93 (7). – P. 3827–3831.
5. Co²⁺:LiGa₅O₈ saturable absorber passive Q-switch for 1.34 μm Nd³⁺:YAlO₃ and 1.54 μm Er³⁺:glass lasers / I. A. Denisov [et al.] // Appl. Phys. Lett., 2000. – Vol. 77. – P. 2455–2457.

УДК 621.375.826

SPECTROSCOPY OF Tm:KY(WO₄)₂ CRYSTAL GROWN BY THE MODIFIED CZOCHRALSKI METHOD

Gusakova N.¹, Gorbachenya K.¹, Kisel V.¹, Yasukevich A.¹, Guretskii S.², Trukhanova E.², Kravtsov A.², Karpinsky V.², Ozen Y.³, Ozelik S.^{3,4}, Kuleshov N.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University

²Scientific and Practical Materials Research Center NAS Belarus

Minsk, Belarus

³Photonics Application & Research Center, Gazi University

⁴Photonics Department of Applied Science Faculty, Gazi University

Ankara, Turkey

Abstract. Tm³⁺:KY(WO₄)₂ (KYW) single crystals were grown by the modified Czochralski method. Laser-related spectroscopic properties of Tm³⁺:KYW crystal: absorption and luminescence spectra as well as kinetics of luminescence decay were studied.

Key words: tungstate crystals, thulium, laser-related spectroscopy.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ Tm:KY(WO₄)₂, ВЫРАЩЕННЫХ МОДИФИЦИРОВАННЫМ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Н.В. Гусакова¹, К.Н. Горбаченя¹, В.Э. Кисель¹, А.С. Ясюкевич¹, С.А. Гурецкий², Е.Л. Труханова², А.В. Кравцов², Д.В. Карпинский², И. Ожен³, С. Ожелик^{3,4}, Н.В. Кулешов¹

¹Центр оптических материалов и технологий БНТУ

²Научно-практический центр материаловедения НАН Беларуси

Минск, Беларусь

³Научно-практический центр фотоники, Университет Гази

⁴Отделение фотоники факультета прикладных наук Университета Гази

Анкара, Турция

Аннотация. Кристаллы Tm³⁺:KY(WO₄)₂ (KYW) были выращены модифицированным методом Чохральского. Проведено исследование спектрально-люминесцентных свойств кристаллов Tm:KYW. Зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции, исследована кинетика затухания люминесценции.

Ключевые слова: кристаллы вольфраматов, тулий, спектрально-люминесцентные свойства.

Laser sources emitting in the 1.9–2 μm spectral range are of high interest for a variety of practical applications in medicine, remote sensing, micro structuring of semiconductor materials, and pumping of optical parametrical oscillators. Interest in thulium-doped crystals is particularly caused by the availability of powerful AlGaAs diode pump sources and cross-relaxation process ³H₆ + ³H₄ → ³F₄ + ³F₄ leading to efficient excitation of ³F₄ laser level thus increase the quantum efficiency of the systems. Monoclinic potassium double tungstate crystals activated with thulium ions attract attention due to relatively high absorption and emission cross-section, broad emission bands, and the possibility to grow highly activated crystals [1].

The growth of KYW crystals has been carried out at temperatures below the point of the phase transition (900–985 °C) using the oriented crystal seed which gradually pull up upon slow cooling of the solution- melt. The details of KYW single crystals growth were presented in [2]. The photograph of the Tm:KYW single crystal grown by the modified Czochralski method is demonstrated in Fig. 1.

The polarized absorption spectra obtained for the Tm³⁺ – doped KYW crystal at room temperature were registered by a Varian CARY-5000 spectrophotometer in the spectral ranges 750–850 nm and

1500–2100 nm with the spectral bandwidth of 0.3 nm and 1 nm, respectively. Two polished plates with dimensions of 5×7×2 mm³ oriented along three principal optical indicatrix axes Ng, Nm, and Np were used. The concentration of doping ions in the crystal was determined to be 1.9·10²⁶ m⁻³ (~3 at.%).

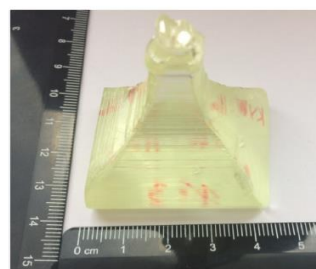


Figure 1 – Photograph of the 3% Tm doped KYW single crystal

The room-temperature polarized absorption cross-section spectra of the Tm:KYW crystal in the spectral range of 750–850 nm (³H₆→³H₄ transition) are shown in Fig. 2. The Tm:KYW crystal belongs to monoclinic crystallographic system and consequently it is bi-axial optical system. The polarized ³H₆ → ³H₄ absorption spectra were measured parallelly to adequate indicatrix axes. The maximum absorption cross-section of 6.4·10²⁰ cm² was deter-

mined at 794 nm with a bandwidth (FWHM) of 2.2 nm for light polarization $E//Np$ axis. The slightly lower value of $5.4 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2$ at 802 nm was found for $E//Nm$ polarization.

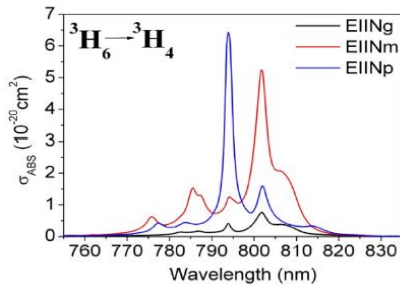


Figure 2 – Polarized absorption cross-section spectra of Tm:KYW crystal at near 800 nm

Absorption cross-section spectra of Tm^{3+} ions in KYW at near 1.75 μm at room temperature are presented in Fig. 3.

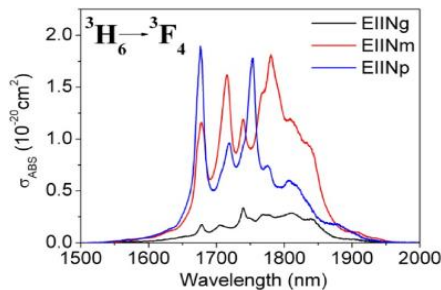


Figure 3 – Polarized absorption cross-section spectra of Tm:KYW crystal at near 1750 nm

Two prominent components located at 1676 nm and 1752 nm as well as three intense components located at 1678, 1715, and 1780 nm can be recognized for the $EIIInp$ and $EIIInm$ spectra, respectively. In contrast to these both polarizations, the $EIIIng$ spectrum is characterized by significantly lower value of the absorption cross-section $0.33 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2$ at 1740 nm.

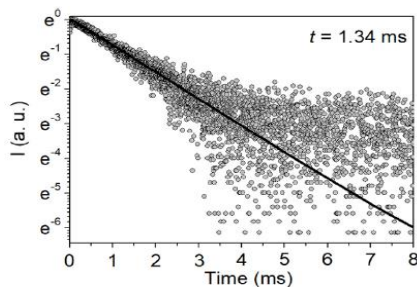


Figure 4 – Kinetics of luminescence decay of the 3F_4 level of Tm:KYW crystal in the region of about 1.75 μm

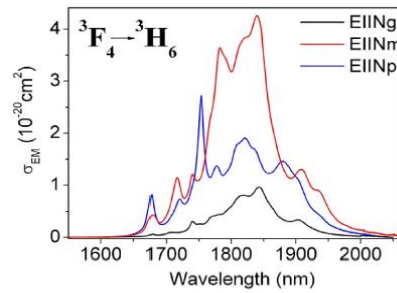


Figure 5 – Polarized emission cross-section spectra of the Tm:KYW crystal in the spectral range of 1500–2100 nm

The luminescence decay time of the 3F_4 level was estimated to be 1.34 ± 0.05 ms. The luminescence decay of the 3F_4 level of Tm:KYW crystal in the region of about 1.75 μm is presented in the Fig. 4. Emission cross-section spectra of Tm:KYW corresponding to the $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ transition calculated using modified reciprocity method [3] are presented in Fig. 5. The stimulated emission cross-section is most efficient for $EIIInm$ polarization and maximal value of $\sigma_{em} = 4.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2$ was found at 1840 nm. The substantially lower peak values of emission cross-sections were estimated at 1753 nm ($2.7 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2$) and at 1843 nm ($0.9 \cdot 10^{20} \text{ cm}^2$) for $EIIInp$ and $EIIIng$ polarizations, respectively.

In conclusion, high quality Tm^{3+} :KYW single crystals were grown by the modified Czochralski method. The optical characterization of the crystal and determined absorption and emission cross-section spectra indicated high structural and optical quality of the single crystal.

Acknowledgements. This research is performed in the framework of the bilateral project supported by National Academy of Sciences of Belarus and Tubitak (project number 120N014).

References

1. Gaponenko, M. Efficient diode-pumped Tm:KYW 1.9- μm microchip laser with 1 W cw output power / M. Gaponenko, N. Kuleshov, T. Sudmeyer // Opt. Express, 2014. – Vol. 22. – P. 11578–11582.
2. Guretskii, S.A. Tm^{3+} :KY(WO₄)₂ single crystals: controlled growth and spectroscopic assessment / S. A. Guretskii [et al.] // Opt. Mat. – 2021. – Vol. 120. – P. 111451.
3. Yasyukevich, A. S. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers / A. S. Yasyukevich // Journal of Applied Spectroscopy. – 2004. – Vol. 71, № 2. – P. 202–208.

UDC 535.327, 535.012

THERMO-OPTIC PROPERTIES OF ORTHORHOMBIC BeAl₆O₁₀ CRYSTAL
Yumashev K.¹, Malyarevich A.¹, Vilejshikova E.¹, Goman V.², Pavlovski L.²¹Center for Optical Materials and Technologies of Belarusian National Technical University²Institute of Improvement of Professional Skills and Staff Retraining on New Directions of Engineering
Technology and Economy of Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. Thermo-optic coefficients dn/dT were determined for orthorhombic BeAl₆O₁₀ crystal for light polarizations $E \parallel N_p$, N_m and N_g in the wavelength range of 0.4–1.1 μm . Thermo-optic dispersion formulas for principal thermo-optic coefficients of BeAl₆O₁₀ are presented for this spectral range. The principal dn/dT are positive and show a polarization-anisotropy: $dn_p/dT = 6.4$, $dn_m/dT = 5.0$, $dn_g/dT = 5.6$ (10^{-6} K^{-1}) at wavelength of 0.83 μm . Thermo-optic dispersion data are modeled in accordance with theory taking into account the contributions from the change of the electronic band gap with temperature and from the volumetric thermal expansion coefficient.

Key words: orthorhombic crystal, thermo-optic coefficient, BeAl₆O₁₀ crystal, thermo-optic dispersion.

Correspondence address: Yumashev K.V., Nezavisimosti ave., 65/17, Minsk 220113, Republic of Belarus
e-mail: kyumashev@bntu.by

ТЕРМООПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОРТОМБИЧЕСКОГО КРИСТАЛЛА BeAl₆O₁₀
Юмашев К.В.¹, Маляревич А.М.¹, Вилейшикова Е.В.¹, Гоман В.И.², Павловский Л.К.²¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ²Институт повышения квалификации и переподготовки кадров по новым направлениям развития
техники, технологии и экономики БНТУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Определены термооптические коэффициенты dn/dT для орторомбического кристалла BeAl₆O₁₀ для поляризаций света $E \parallel N_p$, N_m и N_g в диапазоне длин волн 0,4–1,1 мкм. Для этого спектрального диапазона получены формулы дисперсии главных термооптических коэффициентов BeAl₆O₁₀. Значения dn/dT положительны и характеризуются поляризационной анизотропией: $dn_p/dT = 6,4$, $dn_m/dT = 5,0$, $dn_g/dT = 5,6$ (10^{-6} K^{-1}) на длине волны 0,83 мкм. Данные по дисперсии термооптических коэффициентов моделируются в рамках модели, учитывающей вклады от изменения ширины электронной запрещенной зоны с температурой и от объемного коэффициента теплового расширения.

Ключевые слова: орторомбический кристалл, термооптический коэффициент, кристалл BeAl₆O₁₀, дисперсия термооптического коэффициента.

Адрес для переписки: Юмашев К.В., проспект Независимости, 65/17, Минск, 220113, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

Beryllium hexaaluminate BeAl₆O₁₀ crystal is a promising laser matrix for various transition metal ions such as Cr³⁺, Ti³⁺, Ni²⁺. The BeAl₆O₁₀:Cr³⁺ (Ti³⁺, Ni²⁺) crystals are promising for the use as active media for tunable solid state lasers in the spectral regions of 0.7–1.0 μm (Cr³⁺), 0.6–1.1 μm (Ti³⁺), and 1.35–1.65 μm (Ni²⁺) [1]. The first laser operation for BeAl₆O₁₀ crystal was achieved on Cr³⁺ ions [2]. BeAl₆O₁₀ crystals doped with Cr³⁺ and Ti³⁺ ions are promising media for the development of femto-second lasers [1]. However, thermo-optic properties of BeAl₆O₁₀ (optically biaxial) crystal have not been studied in detail to date.

In the present work, we report on a measurements of the thermo-optic coefficients (TOCs, dn/dT) of hexaaluminate crystal BeAl₆O₁₀.

Beryllium hexaaluminate BeAl₆O₁₀ is grown by the Czochralski technique. The BeAl₆O₁₀ is an orthorhombic crystal with space group *Pcam*, and thus is optically biaxial one. Optical properties of the BeAl₆O₁₀ are described within the frame of the optical indicatrix with the orthogonal principal axes N_p , N_m ,

and N_g . For BeAl₆O₁₀, these three axes are related to the crystallographic axes as follows: $N_p // c$, $N_m // a$ и $N_g // b$ [3]. Like the three principal refractive indices, the BeAl₆O₁₀ crystal should be characterized by three principal TOCs, namely dn_p/dT , dn_m/dT and dn_g/dT .

To determine the TOCs, the sample from the BeAl₆O₁₀ is prepared to be rectangular parallelepiped with dimensions 10×10×10mm³. The edges of the parallelepiped are parallel to the optical indicatrix (crystallographic) axes $N_p(c)$, $N_m(a)$, $N_g(b)$. All six surfaces of the sample were of a lasergrade quality.

For the determinations of the TOCs, the laser beam deviation technique for a material with a linear thermal gradient is used. Experimental setup and measurement procedure can be found elsewhere [4]. The measurements are performed at seven wavelengths by means of laser diodes (405 nm, 450 nm, 650 nm, and 800 nm), He-Ne laser (633 nm), and microchip diode-pumped Nd:YAG laser with frequency doubling (532 nm and 1064 nm). The laser beam deviation method allows one to measure the so-called thermal coefficients of the optical path

(TCOP), $W=dn/dT+(n-1)\mu$, where μ is the linear thermal expansion coefficient in the direction of light propagation k , n and dn/dT are the refractive index and TOC for corresponding light wavelength λ and polarization E . The precision of the TCOP measurements is $\sim 10\%$.

In order to extract the dn/dT value from the TCOP, literature data on the refractive index for $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ is used [3]. The principal linear thermal expansion coefficients $\mu_{a(m)}$, $\mu_{b(g)}$, and $\mu_{c(p)}$ are measured by means of Horizontal pushrod dilatometer Netzsch DIL 402 PC to be $\mu_{a(m)} = 6.5$, $\mu_{b(g)} = 6.9$, and $\mu_{c(p)} = 7.1$ (10^{-6} K^{-1}). The value of $\mu_{a(m)}$ obtained in present paper are in good accordance with the value of $\mu_a = 6.8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ from [5].

For each light polarization E , two values of dn/dT are determined corresponding to two different directions of light propagation k by the formula $dn_i/dT = W_{ij} - (n_i - 1) \mu_{j,}$, where $i = p, m, g$ is the light polarization index, $j = p, m, g$ is the index of the direction of light propagation, and $i \neq j$. Principal TOCs dn_p/dT , dn_m/dT , and dn_g/dT are defined as the average over the corresponding values for the two directions of light propagation. The results are presented in the Table 1. All three principal TOCs for $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ are positive. For the whole studied spectral range, anisotropy of the TOCs characterized by $dn_p/dT > dn_g/dT > dn_m/dT$. The value of $dn_{m(a)}/dT$ corresponds fairly well to the value of $dn_a/dT = 11.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ measured in [5] for visible spectral region with the minimum deviation method. There is no previous data on the dn_p/dT and dn_g/dT .

Table 1. Principal thermo-optic coefficients dn/dT (10^{-6} K^{-1}) for $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$

Wavelength, nm	dn_p/dT	dn_m/dT	dn_g/dT
405	15,6	11.9	13.6
450	13.0	9.5	10.8
532	9,7	7.9	8.9
633	7,9	6.25	6.85
650	7,7	6.0	6.55
800	6.55	5.0	5.5
1064	5.75	4.55	5.1

Experimental data on the wavelength dependence (dispersion) of the dn/dT are modeled by phenomenological model [6] according to which dn/dT is a sum of electronic and lattice contributions, $dn/dT = (dn/dT)_e + (dn/dT)_L$, where

$$(dn/dT)_e = (n^2_{\infty} - 1) / [2n(\lambda)] \{ -\mu_{\text{vol}} \lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_g^2) - (2/E_g) dE_g/dT [\lambda^2 / (\lambda^2 - \lambda_g^2)]^2 \}. \quad (1)$$

Here, $n(\lambda)$ is the dispersion equation for refractive index, λ is the wavelength, n_{∞} is the low frequency refractive index, μ_{vol} is the volumetric thermal expansion coefficient, E_g is the electronic

bandgap, λ_g is the wavelength corresponding to E_g . For $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$, the lattice contribution $(dn/dT)_L$ is small compared with the electronic part $(dn/dT)_e$, and can be neglected. Thus, the dn/dT values are considered to be $dn/dT = (dn/dT)_e$.

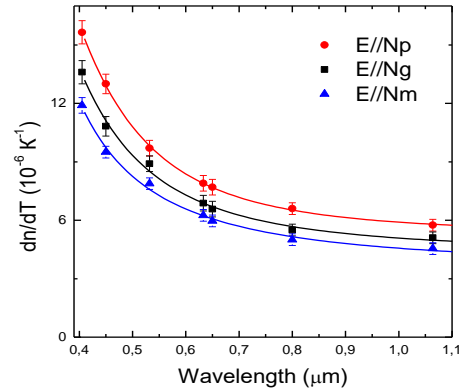


Figure 1 – Dispersion of principal thermo-optic coefficients dn/dT for $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ crystal: symbols – experimental data, lines – modeling using equation Eq. (1)

It follows from the Eq. (1) that the dn/dT value is controlled by two factors. The first factor $(dn/dT)_\mu$ is the contribution from the volumetric thermal expansion coefficient and is negative because μ_{vol} is normally positive for optical materials [6]. The second factor $(dn/dT)_g$ is the contribution from the change of the electronic band gap with temperature and is normally positive because the value of dE_g/dT is normally negative for optical materials [6]. These two factors compete with one another giving positive or negative values of dn/dT .

The results of the TOCs dispersion simulation with Eq. (1) are presented in Fig. 1. The free fitting parameters are E_g and dE_g/dT . The best-fit parameters are 5.6 and -8.2 (for $E // N_p$), 6.0 and -8.2 ($E // N_m$), and 5.8 (eV) and -0.80 (10^{-5} eV/K) ($E // N_g$), respectively. For $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$, the electronic bandgap was estimated to be 5.5 eV for unpolarized light propagating along $N_p(c)$ -axis [3] which is in agreement with the data obtained in this work. According to the Eq. (1), the positive dn/dT coefficients of $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ are related to the weak thermal expansion, so that the contribution of the $(dn/dT)_g$ term is dominant over the $(dn/dT)_\mu$ one.

To calculate the dn/dT value at some arbitrary wavelength it is more convenient to use the analytical thermo-optic dispersion formulas which are obtained based on the principal thermo-optic coefficients given in Table 1. It is

$$dn_i/dT = A_i + B_i/\lambda^2 + C_i/\lambda^4 + D_i/\lambda^6 \quad (10^{-6} \text{ K}^{-1}), \quad (2)$$

where $i = p, m, g$, λ is in μm , and A, B, C, D are constant parameters chosen to give the best agreement with experimental TOCs data (Table 2).

Table 2. Coefficients *A*, *B*, *C* and *D* in the thermo-optic dispersion formulas, Eq. (2), for BeAl₆O₁₀ crystal

dn_i/dT	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
dn_p/dT	5.247	0.3421	0.3313	-0.01751
dn_m/dT	3.596	0.9238	0.04069	0.004808
dn_g/dT	4.319	0.5744	0.2007	-0.007805

For Cr³⁺:BeAl₆O₁₀ crystal, the typical emission wavelength is 0.83 μm [1]. Using the obtained thermo-optic dispersion formulas, the TOCs are calculated at 0.83 μm as $dn_p/dT = 6.4$, $dn_m/dT = 5.0$, $dn_g/dT = 5.6$ (10⁻⁶ K⁻¹).

References

1. Pestryakov, E. V. Prospects for the development of femtosecond laser systems based on beryllium aluminate crystals doped with chromium and titanium ions /

E. V. Pestryakov, A. I. Alimpiev, V. N. Matrossov // Quantum Electron. – 2001. – Vol. 31 (8). – P. 689–696.

2. A tunable laser action due to the ⁴T₂-⁴A₂ electron-vibrational transition in Cr³⁺ ions in BeAl₆O₁₀ / A. I. Alimpiev [et al.] // Kvantovaya Elektron. (Moscow), 1988. – Vol. 15. – P. 509–511.

3. Pestryakov, E. V. Physical properties of BeAl₆O₁₀ single crystals / E. V. Pestryakov // J. of Appl. Phys. – 1977. – Vol. 82. – P. 3661–3666.

4. Thermo-optic coefficients measurements by a laser beam deviation method for the medium with linear thermal gradient / P. A. Loiko [et al.] // Devices and Methods of Measurements, 2010. – Vol. 1, № 3. – P. 70–77.

5. Thermo-optical properties of beryllium containing oxide crystals as materials for high power laser systems / E. V. Pestryakov [et al.] // Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6731. – P. 67312B-1–67312B-5.

6. Ghosh, G. Handbook of Thermo-optic Coefficients of Optical Materials with Applications / G. Ghosh // Academic Press, London, 1998.

УДК 621.373.826

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МРАМОРА

Алексеев В.А., Усольцева А.В.

*Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация*

Аннотация. Проведено исследование связи свойств натуральных материалов с технологическими режимами лазерного производства на примере применяемого в приборостроении мрамора. В работе на основании заданных показателей для оценки шероховатости поверхности экспериментально определена связь между режимами лазерного гравирования и свойствами поверхности материала. С учетом отклонения физико-механических характеристик материала, которые не позволяют точно аналитически рассчитать режимы лазерной обработки, проведены эксперименты. Проведена статистическая оценка величины микронеровностей, дисперсии. По результатам экспериментального исследования качества поверхности даны рекомендации по выбору параметров лазерного излучения с учетом характеристик поверхности материалов. Показано практическое применение результатов.

Ключевые слова: мрамор, декоративная обработка, лазерная технология, шероховатость поверхности.

INVESTIGATION OF IMPACT OF PROCESS MODES ON SURFACE QUALITY OF MARBLE LASER TREATMENT

Alekseev V., Usoltseva A.

*Izhevsk State Technical University named after M.T. Kalashnikov
Izhevsk, Russia*

Abstract. A study was conducted on the relationship of the properties of natural materials with the technological modes of laser production using the example of marble used in instrument making. In operation on the basis of specified parameters for estimation of surface roughness the relationship between laser engraving modes and properties of material surface is experimentally determined. Taking into account the deviation of the physical and mechanical characteristics of the material, which do not allow accurately analytically calculating laser processing modes, experiments were carried out. The value of micro-irregularities and dispersion was statistically estimated. Based on the results of the experimental study of surface quality, recommendations are made on the selection of laser radiation parameters taking into account the surface characteristics of materials. Practical application of results is shown.

Keywords: marble, decorative processing, laser technology, surface roughness.

Адрес для переписки: Усольцева А.В., ул. Черемуховая, 3, г. Ижевск 426023, Удмуртия
e-mail: ajieksa_oo@mail.ru

Обработка мрамора, одного из наиболее дорогих и разнообразных материалов среди всех используемых каменных пород, пользуется достаточно высоким спросом [1]. По разнообразию структурных рисунков и вариантов окраски, присущих мрамору, он не имеет равных среди всех иных пород камня.

При красоте и высоких эстетических качествах обработка мрамора является довольно проблемным вопросом. Прежде всего, это вызвано его химическим составом и кристаллической решеткой. Невысокая твердость и хрупкость приводит к тому, что обработка мрамора ударно-гравировальным станком не делается в принципе. Лазерное гравирование мрамора, с одной стороны достаточно простое, с другой стороны, натуральный мрамор достаточно быстро стареет, особенно в условиях эксплуатации на открытом воздухе с повышенной влажностью и перепадами температур, в результате чего впитывает влагу и преждевременно разрушается, что приводит к ухудшению качества изображения.

Для повышения потребительских свойств художественно – промышленных изделий проведено исследование влияния технологических режимов лазерной обработки на качество поверхности мрамора. Для достижения поставленной цели проведен анализ физических, механических, химических свойств мрамора, его технологий производства, видов и распространенность изделий из данного материала, определены преимущества лазерной обработки мрамора в сравнении с альтернативными технологиями, выбрана лазерная установка для обработки, заданы режимы обработки, получены опытные образцы, проведено исследование качества поверхности полученных образцов для уточнения и корректного задания технологического режима.

С учетом оптических, энергетических и технологических характеристики лазерных установок для обработки мрамора выбран CO₂-лазер, работающий на длине волны 10,6 мкм [2]. Для проведения эксперимента использована лазерная установка Trotec Speedy 300.

Эксперимент проводился при следующих режимах лазерного излучения: мощность лазерного излучения изменялась от 0 до 9,6 Вт, при постоянной скорости перемещения лазерного излучения 27,0 см/с, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц, диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал.

Для определения зависимости качества поверхности от режимов воздействия лазерного излучения проведена проверка применения предлагаемой методики с воспроизведением ступенчатого клина при изменении мощности излучения от нуля до максимально заданной. Для измерения микронеровностей на поверхности

после лазерной обработки образца использовался микроинтерферометр «МИИ-4» [3].

В соответствии с требованиями научно-технической документации для шероховатости поверхности определена высота неровностей профиля, снятая в 10 точках на одной ступени и рассчитано среднее арифметическое значение отклонения профиля [4].

Для повышения информативности рассчитана дисперсия, характеризующая разброс значений случайной величины микронеровностей относительно математического ожидания [5].

С увеличением мощности излучения глубина удаления материала пропорционально увеличивается, шероховатости поверхности увеличивается до определенного уровня, потом начинает уменьшаться.

Установленная зависимость качества поверхности лазерной обработки мрамора от технологических режимов работы лазерной установки позволяет получить поверхность с заданными параметрами шероховатости, успешно компенсировать имеющиеся естественные неоднородности материала, стабильно добиваться высоких результатов при промышленном изготовлении высокохудожественных эксклюзивных изделий, повысить сохранность нанесенных изображений.

Проведенные исследования показали, что для достижения заданного состояния обработанной поверхности мрамора перспективно применение проведенных экспериментов. В результате проведенных экспериментов выяснено, что при задании режимов лазерного гравирования при декоративной обработке мрамора, оптимальное значение мощности лазерного излучения составляет 5,5–10,5 Вт. Аналогичную методику можно использовать при задании скорости лазерного гравирования, разрешающей способности, частоты импульсов, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале, угла падения лазерного луча и т. д. Перспективно продолжение работ применительно к другим материалам.

Представленный подход экспериментального обоснования режимов лазерной обработки материалов использован при разработке учебно-методического пособия [6], выбранные в результате эксперимента технологические режимы (лазерной резки и лазерного гравирования) позволили провести полное изготовление прибора письменного настольного [7].

Литература

1. Приборостроение – XX век. / Сост. М. С. Шкабардя. – М. : Совершенно секретно, 2004. – 768 с.
2. Исследование влияния режимов лазерной обработки на качество поверхности материалов в приборостроении / В. А. Алексеев [и др.] // Приборостроение–2019: материалы 12-й Международной научно-технической конференции, 13–15 ноября 2019 года, Минск, Республика Беларусь / ред-

кол. : О.К. Гусев (председатель) [и др.] – Минск : БНТУ, 2019. – С. 433–435.

3. Alekseev, V. A. Increase in efficiency of use of laser technologies for identification / V. A. Alekseev, A. V. Usoltseva, V. P. Usoltsev // International Conference “Scientific research of the SCO countries: synergy and integration” Part 1: Participants’ reports in English 2019 December 11, 2019. Beijing, China, 2019 PRC. – 2019. – P. 149–156.

4. Гибадуллин, И. Н. Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости / И. Н. Гибадуллин, В. А. Валетов // Изв. вузов. Приборостроение–2019. – Т. 91, № 1. – С. 86–92.

5. Алексеев, В. А. Регрессионная модель лазерного воздействия на натуральные материалы / В. А. Алексеев, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев // Лазерно-информационные технологии в медицине,

биологии, геоэкологии и на транспорте – 2020: труды XXVIII Междунар. конф. г. Новороссийск, 7–12 сентября 2020 г.) / под ред. проф. В. Е. Привалова. – Пенза : ПГУ, 2020. – С. 95–99.

6. Задание режимов лазерной обработки неметаллических материалов. / В. А. Алексеев [и др.] // Учебно-методическое пособие по дисциплине «Взаимодействие лазерного излучения с веществом» направление подготовки 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии». – Ижевск: ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, Ижевск: Управление информационных ресурсов ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2020. – 32 с.

7. Прибор письменный настольный : пат. образец RU 109645 / А. В. Усольцева, В. П. Усольцев, М. М. Черных. – Опубл. 16.07.2018. Бюл. № 7.

УДК 535.317; 681.7

ВАРИООБЪЕКТИВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Артюхина Н.К.¹, Шарко Д.С.², Чергейко С.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Представлены анализ базовой схемы и результаты расчета нового вариообъектива для приемника излучения с охлаждаемой диафрагмой.

Ключевые слова: вариообъектив, объектив, система технического зрения, качество изображения.

ZOOM LENS FOR VISION SYSTEMS

Artioukhina N.¹, Sharko D.², Charheika S.¹

¹Belarusian National Technical University

²JSC “PELENG”

Minsk, Belarus

Abstract. The analysis of the basic scheme and the designing of a new zoom lens for a cooled infrared image sensor are presented.

Key words: zoom lens, lens, vision system, image quality.

Адрес для переписки: Чергейко С.В., ул. Ак.Высоцкого 3-114, г. Минск 220076, Республика Беларусь e-mail: ich0@bk.ru

Объективы с плавным изменением фокусного расстояния находят широкое применение в различных сферах деятельности человека. Они сопровождают нас повсеместно: в кинематографии, микроскопии, телевидении, фотографии, видеотехнике, спектрофотометрии, оптической когерентной томографии, астрономии, медицине, тепловидении, пирометрии (последнее время очень популярно), лазерной технике, системах технического зрения (СТЗ) и других областях. При изменении фокусного расстояния можно решить, прежде всего, две основные задачи:

– быстрый поиск наблюдаемого объекта и введение его в поле зрения системы (это выполнимо при малом фокусном расстоянии и большом поле зрения);

– наблюдение за объектом: выполнение различных измерений, наблюдение увеличенных

деталей, фиксация, запись и множество других операций (это выполнимо при увеличении фокусного расстояния и соответственно уменьшении поля зрения).

При больших фокусных расстояниях поле зрения системы заметно уменьшается [1].

В последнее время объективы с переменным фокусным расстоянием, в частности вариообъективы, все чаще стали применяться в СТЗ, так как современная элементная база позволяет создавать многоспектральные оптико-электронные приборы со значительно меньшими массой и габаритными размерами, при сохранении высоких технических характеристик [2]. Поэтому такие СТЗ возможно применять при проектировании беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для дистанционного зондирования Земли, а также мониторинга объектов в

различных спектральных диапазонах одновременно.

Поскольку в вариообъективе по сравнению с трансфокатором возможно достичь лучшего исправления aberrаций при меньшем числе линз и компонентов, а также добиться большой геометрической светосилы во всем диапазоне фокусных расстояний, его можно применять в СТЗ.

Повышенный спрос на СТЗ и минимизация габаритов приводят к необходимости разработки новых схемных решений, а также к оптимизации существующих систем.

Цель настоящей работы – расчет и разработка схемного решения вариообъектива, для работы в инфракрасной области спектра при работе с приемником излучения с охлаждаемой диафрагмой.

В процессе выполнения работы проанализировано большое количество существующих конструкций и выбран прототип, максимально подходящий по параметрам – инфракрасный объектив с плавно изменяющимся фокусным расстоянием [3] (рис. 1).

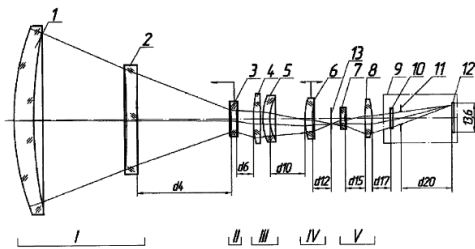


Рисунок 1 – Инфракрасный объектив с плавно изменяющимся фокусным расстоянием

Базовая схема содержит пять компонентов, состоящих из восьми линз, три из которых – с одной асферической поверхностью. Второй и четвертый компоненты имеют подвижку, предназначенную для изменения фокусного расстояния объектива, вторая линза пятого компонента так же выполнена подвижной и предназначена для температурной компенсации расфокусировки.

Пятый компонент позволяет осуществлять оптическое сопряжение охлаждаемой диафрагмы фотоприемного устройства с оправой первой линзы базового объектива, тем самым сделать световой диаметр этой линзы, работающей в узком поле зрения минимальным, что снижает вес объектива и исключает появление нежелательных теневых эффектов (виньетирования или срезания полевых пучков лучей). При этом качество изображения не ухудшается, что подтверждается графиками, представленными на рис. 2 и 3.

Расчет нового вариообъектива (рис. 4) производился для другого приемника излучения с охлаждаемой диафрагмой диаметром $\varnothing 3,58$ мм. В процессе оптимизации увеличен диапазон изменения фокусного расстояния объектива с сохранением длины системы 175 мм.

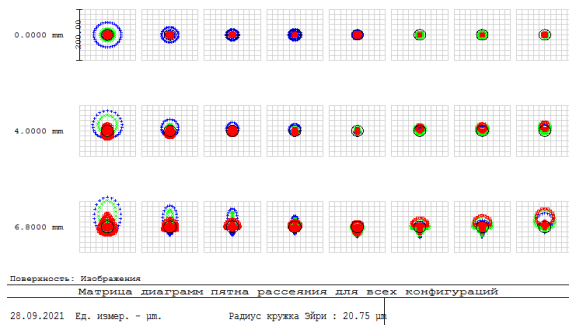


Рисунок 2 – Функция рассеяния точки по восьми конфигурациям

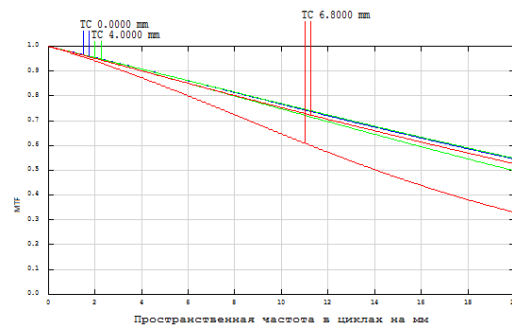


Рисунок 3 – Полихроматическая модуляционная передаточная функция объектива

Новый вариообъектив, содержит пять последовательно расположенных оптически связанных компонентов. Второй и четвертый компоненты установлены с возможностью перемещения вдоль оптической оси, для изменения фокусного расстояния.

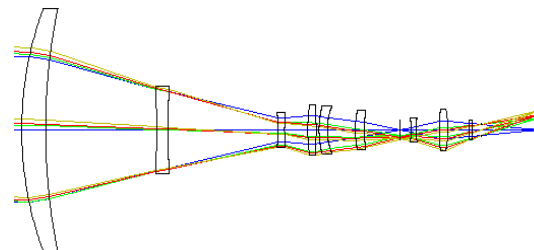


Рисунок 4 – Вариообъектив



Рисунок 5 – Функция рассеяния точки вариообъектива по девяти конфигурациям

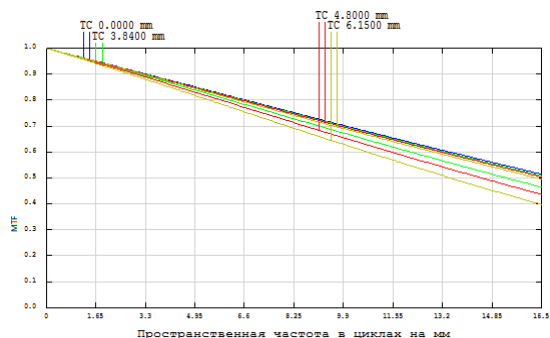


Рисунок 6 – Полихроматическая модуляционная передаточная функция вариообъектива

Как видно из рис. 5, пятна рассеяния вписываются в кружок Эйри, впечатанный на каждое пятно, составляющее 56,7 мкм.

Контраст изображения постоянен для всех конфигураций и приближается к дифракционному пределу (рис. 6).

Получены результаты:

- увеличен диапазон изменения фокусного расстояния объектива – (300–25) мм;
- расширен рабочий спектральный диапазон – (3,5–5,0) мкм.

Для сравнения – в прототипе: диапазон изменения фокусного расстояния (300–30) мм, спектральный диапазон работы (3,7–4,8) мкм.

Литература

1. Запрягаева, Л. А. Расчет и проектирование оптических систем / Л. А. Запрягаева, И. С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
2. Павлов, Н. И. Авиационный малогабаритный многоспектральный сканирующий прибор / Н. И. Павлов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 3. – С. 67–72.
3. Инфракрасный объектив с плавно изменяющимся фокусным расстоянием : пат. RU 2578661 С1 / А. И. Белоусов, Г. В. Вазагов. Оpubл. – 27.03.2016.

УДК 621.865.8:658.56

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ОТХОДОВ НА БАЗЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОРТИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА Бельман О.И., Стельмах Н.В.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
Киев, Украина*

Аннотация. В данной работе описана система автоматизированного сортировки твердых бытовых отходов. Одной из особенностей системы является полное исключение человеческого труда, достигается использованием ничем современных технологий. И по сравнению с другими методами утилизации не вредит окружающей среде.

Ключевые слова: автоматизация, утилизация, спектрометрия, схема автоматизации.

AUTOMATED WASTE SORTING SYSTEM BASED ON UNHOMOGENEOUS OPTICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF THE MATERIAL TO BE SORTED Belman O., Stelmakh N.

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
Kyiv, Ukraine*

Abstract. This paper describes a system of automated sorting of solid waste. One of the features of the system is the complete exclusion of human labor, which is achieved through the use of modern technologies. And compared to other methods of disposal does not harm the environment.

Key words: automation, utilization, spectrometry, automation scheme.

e-mail: o_belman@ukr.net , n.stelmakh@kpi.ua

Раздельная сортировка в последнее время все более активно внедряется в жизнь современного общества, но такое решение, на данном этапе внедрения, только частично уменьшает «поток» твердых бытовых отходов (ТБО) и никак не помогает в борьбе с ликвидацией огромных полигонов ТБО. И если не брать во внимание некомпетентность некоторых коммунальных предприятий, которые выгружают отсортированное сырье на те же полигоны. Поэтому надеяться на

то, что раздельная сортировка сделает наши города и воздух чище, не стоит, для этого необходим комплексный подход. Существует не так много методов борьбы с бытовыми отходами, и их можно разделить на пассивные и активные. Пассивными можно назвать абсолютное бездействия и беспечность со стороны населения. Это относится не только к властям, которых все по этому поводу критикуют, а и обычных граждан. В свою очередь, пассивность большинства, а

именно гражданских лиц, к вопросу: «Что будет с пластиковой бутылкой, которую я выкинул на мусор?», приводит к неконтролируемому росту мусора на улицах и на полигонах. Относительно активно метода борьбы с ТБО, то его можно разделить на несколько направлений по уровню сложности: простой, средний и тяжелый. Простой можно описать как действие по устранению некомфортной проблемы такой как мусор - уничтожить. Человечество, к сожалению, еще не достигло уровня технологии дезинтегрирования материи на отдельные атомы, что могло бы быть достаточно эффективным методом утилизации, но люди просто создают установки разной степени мощности и сложности, и сжигают ТБО, называя это пиролизом. Такие системы с современными устройствами на выходе дают энергию и топливо. Экологичность современных мусоросжигающих заводов высока, потому что все выбросы фильтруются и не попадают в атмосферу, но это относительно предприятия, если взять «продукцию» такого предприятия: топливо, газ, шлак, то к уровню экологичности возникают вопросы. Оправдывать такое «пассивное» загрязнение получением энергии нет смысла, пока КПД таких установок находится на уровне двигателя внутреннего сгорания (ДВС), вдобавок у нас есть технологии для более чистой добычи энергии нежели нагрев воды путем сжигания топлива.

Многие люди работали над решением этой проблемы, и одним из решений устранения бессмысленного сожжения такого ценного ресурса как ТБО, было внедрение мусоросортировочных заводов с неполной автоматизацией, что мы отнесем к решению проблемы отходов «среднего направления». В большинстве случаев, на предприятиях такого типа организован модульный принцип сортировки ТБО, в зависимости от типа отходов (пластик металл органические отходы). Но наибольшим недостатком является привлечение человеческого труда в качестве сортировщиков на начальном этапе сортировки. С одной стороны, возникают новые рабочих мест, а также универсальность человека позволяет ему сортировать из конвейера неподходящие для дальнейших модулей предметы: крупногабаритные контейнеры, одежда, камни и т.д. С другой стороны, трудоемкость в таких условиях труда не соответствует затраченного на нее усилий и здоровья. Для круглосуточного функционирования предприятия нужен огромный штат сортировщиков, что делает такую сортировку не рентабельной [1].

К «тяжелому пути» борьбе с ТБО, можно отнести более фундаментальный подход к изначальной раздельной сортировке потребителями. Проблемой является не расстановка разноцветных баков, а работа с психологией общественности и с развитием гражданской сознательности. Навыки понимание вопросов, связанных с мусором,

необходимо прививать с детства, и пройдет не одно поколение. Логичным решением является полностью автоматизированный комплекс сортировки ТБО.

Не во всех отраслях приборо- и машиностроения целесообразно применять полную автоматизацию. Для примера рассмотрим линии сборки автомобилей, где ручной человеческий труд является универсальным и имеет преимущество иногда даже над манипуляторами. Но в нашем случае полная автоматизация крайне необходима. Некоторые компании тестируют универсальные манипуляторы с вакуумным или гидравлическим захватом на замены людей, сортирующих отходы. по скорости манипулятор находится примерно на уровне с человеком, но на предприятиях могут быть привлечены десятки сортировщиков, при этом следует отметить, что настройка манипулятора на выделения з потока смешанных ТБО некоторых предметов, очень нетривиальная задача. Но анализируя современные технологии можно сделать заключение, что для полной автоматизации не нужны манипуляторы, качественную и безопасную сортировку можно провести, используя физическую разницу между материалами, которые нам необходимы [2].

Во избежание нежелательных предметов на линии сортировки, первым этапом будет измельчение материала на части регулируемого размера в дробилках, валы с твердосплавными пластинами измельчат любой материал. ТБО не является полностью сухим материалом, поэтому для предотвращения коррозии и налипания на поверхности контактные с ТБО, наносятся специальное гидрофобное покрытие. Следующим этапом сортировки, является стерилизация, сушка и выделения биологического вещества от материала, для этого измельченные ТБО направляются в автоклав, где при высоком давлении и температуре испаряется влага. За счет перемешивания отделяются все этикетки и остатки пищи. После автоклава материал выходит сухим и обеззараженным. Далее следует процесс отделения черных и цветных металлов. Следующим этапом идет прохождение через вибросито, которое отделяет пыль и мелкие частички, который является относительно чистым компостом потому, что температура в автоклаве не превышает температуры распада пластика. Макрокромости материала после вибросита делятся на пленки и плоские материалы, а также на объемные фигуры, разделение их необходимо, потому что пленки могут помешать распознаванию меньших частиц накрывая их собой. Для разделение по форме используется баллистический сепаратор. Завершающим этапом является сортировка пластика по видам, сортировка стекла по цвету. Стекло и другие материалы находятся в специальном вибробункере.

Вибрация служит для направления частиц на конвейерную ленту, над которой находятся оптические приборы для распознавания цвета стекла, а также инфракрасный спектрометр для пластиковых материалов. Сортировка происходит в автоматическом режиме, сжатым воздухом с системы соленоидных клапанов, каждый клапан отвечает своему типу материала. Параллельно к вибробункеру с объемным материалом, находится вибробункер с пластинками и пленками, разница заключается в подаче плоских частиц, для этого необходимо модернизировать бункер захватным устройством. Процесс сортировки похож по предыдущий, разница состоит только в отсутствии сортировки стекла по цветам. Время наполнения и период стерилизации можно назвать тактом, при котором за один такой такт можно обработать ограниченное количество материала, поэтому для непрерывной работы можно увеличить количество автоклавов [3].

В перспективе разработки проекта будет исследовано технологические особенности метода полностью автоматизированной системы сорти-

ровки ТБО, с целью улучшения технических характеристик. Для конкурентной способности данного метода с другими более простыми методами, необходимо показать несравненно лучшие технические показатели, а также уменьшить габариты системы для широкого распространения в черте города.

Литература

1. Горлицкий, Б. А. Обращение с бытовыми и промышленными отходами – основные изменения стратегии и тактики // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного водного бассейнов. Утилизация отходов: Тезисы докл. XIV Междунар. научно-пр. конф. – Харьков – Щелкино, 2006. – С. 192.
2. Стельмах Н. Автоматизований модуль сортування пластикових відходів / Н. Стельмах, С. Сапон, О. Бельман // Технічні науки та технології, 2021. – № 1 (23), 2021. – С. 37–44.
3. Стельмах Н. Вибір оптимального технологічного процесу на базі автоматизованої оцінки його техніко-економічних параметрів / Н. Стельмах, С. Сапон, Я. Рижук // Технічні науки та технології, 2020. – № 1 (19). – С. 89–97.

УДК 621.315.375

АППРОКСИМАЦИЯ КРИВЫХ СИЛЫ СВЕТА RGB СВЕТОДИОДОВ Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И., Шишурин Д.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложены и проанализированы различные варианты аппроксимации кривых силы света RGB светодиодов для использования в методике расчета освещенности поверхностей.

Ключевые слова: сила света, индикатриса распределения силы света, RGB светодиод, параметры освещения, спектральный состав излучения.

APPROXIMATION OF THE LIGHT INTENSITY CURVES OF RGB LEDs Bogdan P., Zaitseva E., Baranov P., Stepanenko A., Shishurin D.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. Various variants of approximation of the light intensity curves of RGB LEDs for use in the method of calculating the illumination of surfaces are proposed and analyzed.

Key words: light intensity, light intensity distribution indicator, RGB LED, lighting parameters, spectral composition of radiation.

*Адрес для переписки: Зайцева Е.Г., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by*

Концепция «интеллектуальная окружающая среда» подразумевает наличие благоприятных условий освещенности помещения на рабочем месте и в домашних условиях. Очевидно, что параметры освещения являются функциями выполняемой человеком деятельности, а также его физиологического и психологического состояния. Создана нормативная база рекомендуемых освещенностей в зависимости от рода выполняемых работ [1, 2]. В соответствующих документах указан уровень необходимой освещенности, ее равномерности, но не нормируется спектральный

состав светового излучения и его изменение во времени. Известные в настоящее время методики расчета параметров, количества и расположения светильников достаточно просты, но не позволяют конкретизировать спектральный состав излучения и его неравномерность в пространстве. В тоже время конкретные рекомендации к параметрам светового излучения в зависимости от состояния человека не разработаны.

Чтобы создать осветительные системы, обеспечивающие оптимальные параметры освещенности, необходимо разработать методику расчета

освещенности с учетом спектрального состава излучения. Особенно актуальна эта задача вследствие все более широкого использования светодиодных RGB осветительных систем, позволяющих варьировать спектральный состав излучения в широком диапазоне. Решение этой задачи позволит производить компьютерное моделирование источников освещения.

Исходной информацией для расчета являются индикатрисы силы света для RGB светодиодов и расстояние между данными элементами. На рис. 1 приведены индикатрисы распределения силы света для компонентов трех-кристального RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ фирмы COTCO с дельтаобразным расположением кристаллов внутри корпуса [3].

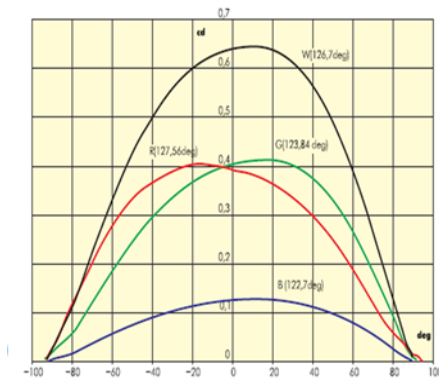


Рисунок 1 – Индикатрисы распределения силы света для трех-кристального RGB-SMD-светодиода LM1-TPP1-01 TTQ [3]: графики силы света светодиодных источников сверху вниз – суммарный в режиме баланса белого, красный компонент, зеленый, синий

Для представления этих кривых в аналитической форме были исследованы аппроксимации вида

$$I = d(\cos \beta)^n \quad (1)$$

где I – значение силы света, kd , β – угол между перпендикуляром к освещаемой поверхности и направлением луча света на индикатрисе, град, d – значение силы света при β , равном 0, n – показатель степени.

Расчет по формуле (1) был произведен для синего компонента светодиодного источника (нижний график на рис.1) для значений показателя степени n , равных 0,5, 1, 1,5, 2. Аппроксимируемый график и результаты расчетов представлены на рис. 2.

Анализ полученных значений показал, что в диапазоне от -90 градусов до 0 оптимально применить аппроксимацию с показателем степени n , равным 1,5, а от 0 до 90 градусов – с показателем, равным 0,5. При этом среднеквадратичное отклонение расчетных значений от фактических составило 0,077 %.

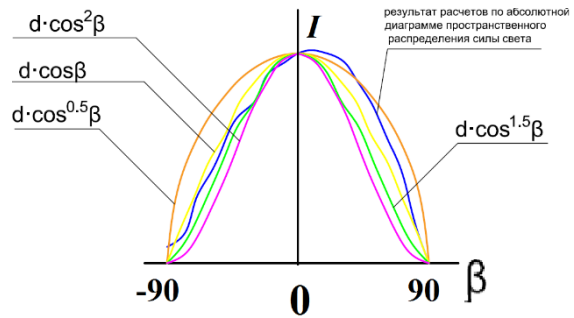


Рисунок 2 – Индикатриса силы света для синего компонента светодиода LM1-TPP1-01 TTQ и ее численные аппроксимации

Аппроксимация индикатрис силы света возможная также в пакетах Mathcad. Введенные численные значения соединяются отрезками прямых. В этом случае отклонение фактических и расчетных значений практически сводится к нулю, погрешность зависит от количества введенных фактических значений, формула аппроксимации не представляется в аналитическом виде. На рис. 3 представлен график такой аппроксимации и фактические значения для кривой силы света синего компонента светодиода LM1-TPP1-01 TTQ.

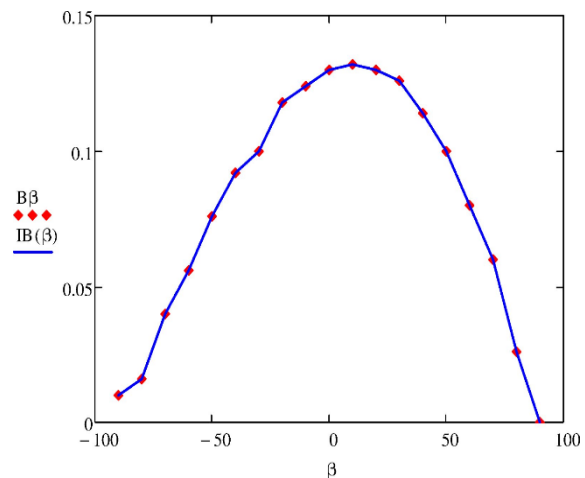


Рисунок 3 – Индикатриса силы света для синего компонента светодиода LM1-TPP1-01 TTQ и ее аппроксимация с использованием пакета Mathcad

Зная характер индикатрисы светодиода возможно рассчитать освещенность поверхности E_B в точке B (рис.4) по формуле [3]:

$$E_B = (I(\beta)/b^2)\cos \beta, \quad (2)$$

где b – расстояние между точками A и B .

Так как задачей расчета является распределение освещенности на освещаемой плоскости, необходимо перейти от зависимости освещенности от угла β к зависимости от пространственной координаты x в плоскости P .

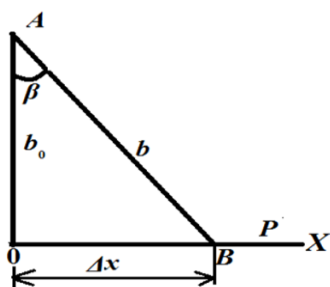


Рисунок 4 – Взаимное расположение источника света А и освещаемой точки В в плоскости Р

Из рис. 4 очевидно, что

$$E(x) = \frac{I(\arctg \frac{x}{b_0}) (\cos^3(\arctg \frac{x}{b_0}))}{b_0^2}, \quad (3)$$

где b_0 – расстояние между источником излучения А и плоскостью Р, x – координата освещаемой точки В, лежащей на плоскости Р.

Литература

1. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий : СанПиН 2.21/2.1.1/1278-03.
2. Освещение рабочих мест внутри зданий. Нормы и методы измерений : ГОСТ 55719-2013.
3. Никифоров, С. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества / С. Никифоров // Компоненты и технологии. – 2005. – № 5. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://kit-e.ru/led/problemy-teoriya-i-realnost-svetodiodov-dlya-sovremennyh-sistem-otobrazheniya-informaczi-vysshego-kachestva/> – Дата доступа: 2.09.2021.
4. Бугров, В. Е. Оптоэлектроника светодиодов. Учебное пособие / В. Е. Бугров, К. А. Виноградова. – СПб : НИУ ИТМО, 2013 – 174 с.
5. Гуторов, М. М. Основы светотехники и источники света : учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., доп. и перераб. / М. М. Гуторов. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 384 с.

УДК 621.315.592

ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

Гацкевич Е.И.¹, Ивлев Г.Д.², Малевич В.Л.^{3,4}

¹Белорусский национальный технический университет

²Белорусский государственный университет

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

⁴ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Изучено перераспределение элементов по глубине в эпитаксиальных GeSi слоях при облучении наносекундными импульсами рубинового лазера. Проанализировано влияние сегрегации на формирование ячеистых структур в неравновесных условиях импульсного воздействия.

Ключевые слова: германий, кремний, гетероструктура, лазерное облучение, сегрегация.

LASER-INDUCED THERMOPHYSICAL PROCESSES IN EPITAXIAL GERMANIUM-SILICON HETEROSTRUCTURES

Gatskevich E.¹, Ivlev G.², Malevich V.^{3,4}

¹Belarusian National Technical University

²Belarusian State University

³Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

⁴B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus

Minsk, Belarus

Abstract. The redistribution of elements in epitaxial GeSi layers under irradiation with nanosecond pulses of a ruby laser has been studied. The effect of segregation on the formation of cellular structures under nonequilibrium conditions of impulse influence is discussed.

Key words: germanium, silicon, heterostructure, laser irradiation, segregation.

Адрес для переписки: Гацкевич Е.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: gatskevich_elena@bk.ru

Одна из актуальных проблем полупроводниковой оптоэлектроники – создание эффективных источников света на основе германия, излучающих при комнатной температуре. В частности, гетероструктуры GeSi/Si были использованы при разработке фотодетекторов инфракрасного диа-

пазона [1] и лазерных структур [2]. Перспективы использования Ge/Si гетероструктур придают актуальность поиску альтернативных методов их создания и модификации. В недавних работах [3] было показано, что таким методом может быть импульсная лазерная обработка (ИЛО). В част-

ности установлено, что при ИЛО происходят морфологические изменения поверхности вплоть до образования ячеистых структур [3–4]. Механизмы появления этих морфологических изменений до конца не выяснены. В настоящей работе исследованы процессы массопереноса в условиях ИЛО в GeSi гетероструктурах (ГС), полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Изучаемые структуры, облучались наносекундными импульсами излучения рубинового лазера. Диагностика фазового состояния поверхности зоны ИЛО проводилась методом оптического зондирования *in situ*. Распределение элементов в образцах по глубине до и после ИЛО анализировалось методом вторично-ионной масс-спектропии (ВИМС). Для определения глубин проплавления проводилось численное моделирование теплофизических процессов ИЛО.

В процессе создания гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках Si (100) формировались четыре буферных слоя с толщиной приблизительно 0,25 мкм. Содержание Ge увеличивалось с каждым слоем на 15 %. Затем выращивался слой $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$ с низкой концентрацией дефектов дислокационного типа. Толщина $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$ слоев составляла 1,4 мкм (рис. 1).

Исследуемые образцы облучались пучком рубинового лазера (длительность импульса 80 нс по уровню 0,5) с заданными плотностями энергии W при неоднородности ее распределения по облучаемой зоне диаметром 3–4 мм не выше $\pm 5\%$. Одновременно проводилось оптическое зондирование зоны ИЛО на длинах волн 0,53 и/или 1,06 мкм путем детектирования отраженного от нее пробного пучка. Источником зондирующего излучения являлся лазер на стекле, активированном неодимом, работающий в режиме свободной генерации (длительностью 0,5 мс). Оба лазера работали в режиме взаимно синхронизированных одиночных вспышек. Зондирование поверхности позволяло по динамике отражательной способности зоны ИЛО определить время существования жидкой фазы. Плотность энергии в лазерном импульсе $W = 1,6\text{--}2,4$ Дж/см² варьировалась калиброванными нейтральными фильтрами.

ВИМС-измерения проводились на установке TOF.SIMS-5 с времяпролетным масс-анализатором и двумя ионными пушками – для распыления и зондирования [5]. Ранее этим методом выполнялись исследования подобных германий-кремниевых структур. Данные ВИМС были получены послойным анализом ГС на упомянутой установке при распылении тестируемой области образцов (~ 1 мкм²) ионами Cs^+ с энергией 1 кэВ (ток пучка 70 нА) и зондировании ионами Bi^+ (25 кэВ, 1 нА).

Полученные зависимости параметра $x(z)$, характеризующие распределения Ge по глубине,

приведенные на рисунке 1, в основном совпадают с исходной зависимостью; ступеньки на графиках отражают наличие переходных слоев между внешним слоем GeSi и базовым кристаллом Si. Вместе с тем наблюдаются особенности зависимостей $x(z)$ в модифицированных ИЛО слоях GeSi ($z < 1$ мкм), свидетельствующие о повышенном содержании Ge в ультратонких (< 50 нм) поверхностных областях образцов и локальных минимумах, положение каждого из которых по глубине (0,48 мкм, 0,66 и 0,86 мкм) определяется энергетическим режимом ИЛО ГС.

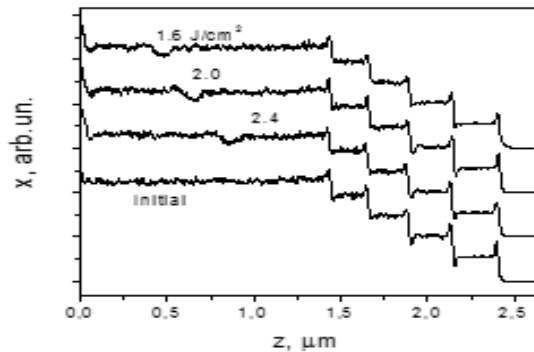


Рисунок 1 – Распределение Ge в эпитаксиальной гетероструктуре $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ по глубине до и после ИЛО с указанными плотностями энергии облучения

Результаты ВИМС анализировались с привлечением данных решения тепловой задачи об импульсном поверхностном нагреве зоны ИЛО. Соответствующее моделирование лазерно-индуцированных фазовых переходов (плавление \leftrightarrow отвердевание) в исследуемых образцах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ проводилось на основе численного решения задачи Стефана.

Для рассматриваемых экспериментальных условий длина тепловой диффузии за время импульса существенно меньше диаметра лазерного пятна (4 мм), что позволило ограничиться одним приближением.

При алгоритмизации задачи использовалась неявная разностная схема, разностные уравнения решались методом прогонки. При расчете учитывались температурные зависимости теплофизических параметров, а также их зависимость от фазового состояния и состава слоев.

Из результатов численного моделирования следует, что в исследованных энергетических режимах ИЛО достигается только частичное проплавление слоев $\text{Ge}_{70}\text{Si}_{30}$. Отвердевание бинарной жидкой фазы в этом случае происходит не от подложки кремния, а от самого твердого раствора. На рис. 2 приведены расчетные значения глубины проплавления и нанесены координаты локальных минимумов. Первая координата (рис. 2) соответствует локальному минимуму концентрации Ge (рис. 1), а вторая координата является координатой начала образования локального минимума.

Результаты расчета времени существования жидкой фазы хорошо коррелируют с экспериментальными данными, полученными методом оптического зондирования. Образование локальных минимумов в распределении Ge по глубине связано с явлениями сегрегации. Хотя кремний и германий образуют непрерывный ряд твердых растворов, в существенно неравновесных условиях нанопульсного нагрева ГС, инициирующего быстрые фазовые превращения твердое состояние ↔ бинарный расплав, при быстром отвердевании расплавленного слоя происходит сегрегация Ge. Ее следствие – формирование ячеистых структур [3, 4] в результате вытеснения германия в латеральных направлениях, а также к поверхности. Положение каждого из локальных минимумов в распределении Ge (рис. 1) приблизительно на 0,1 мкм ниже достигаемой глубины проплавления. Это различие связано с тем, что моделирование выполнено в приближении плоского фронта фазового перехода.

В результате данного исследования получены данные о перераспределении элементов по глубине в эпитаксиальных слоях $Ge_xSi_{1-x}/Si(100)$ в условиях ИЛО моноимпульсным излучением рубинового лазера. Установлено, что положение локальных минимумов в распределении Ge соответствует глубинам проплавления ГС при заданных значениях W . Происхождение указанных минимумов концентрации германия связано с начальной стадией отвердевания бинарного расплава и зарождением сегрегации, приводящей к формированию ячеистой структуры в результате ИЛО эпитаксиального слоя Ge_xSi_{1-x} .

Авторы признательны П.И. Гайдуку за предоставленный образец гетероструктуры $GeSi/Si(100)$ и М.Н. Дроздову за данные ВИМС.

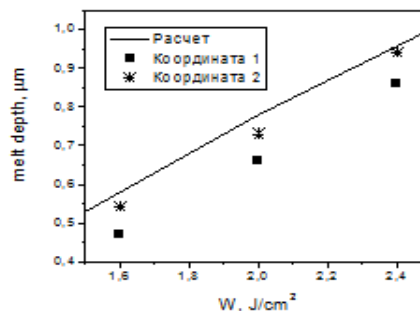


Рисунок 2 – Рассчитанная зависимость максимальной глубины проплавления (сплошная линия) от плотности энергии лазерного облучения. Координата 1 соответствует локальному минимуму, координата 2 – началу формирования локального минимума (пояснения в тексте)

Литература

1. Reliability and performance scaling of very high speed SiGe HBTs / G. Freeman [et al.] // *Microelectronics Reliability*. – 2004. – Vol. 44. – P. 397.
2. Liu, J. Ge-on-Si lasers for large-scale electronic-photon integration / J. Liu, L. C. Kimerling, J. Michel // *Semicond. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 27, № 9. – P.094006(13).
3. Структура и фотопроводимость эпитаксиальных слоев SiGe/Si, модифицированных моноимпульсным лазерным облучением / Г. Д. Ивлев [и др.] // *Письма в ЖТФ*. – 2014. – Т. 40, № 23. – С. 9–15.
4. Гацкевич Е. И. Образование ячеистой структуры в слоях SiGe при наносекундном лазерном облучении / Е. И. Гацкевич, Г. Д. Ивлев, В. Л. Малевич // *Письма в ЖТФ*. – 2015. – Т. 41, вып. 1. – С. 43–49.
5. Количественная калибровка и послойный анализ концентрации германия в гетероструктурах Ge_xSi_{1-x}/Si методом вторично-ионной масс-спектропии / М. Н. Дроздов [и др.] // *ФТП*. – 2014. – Т. 48, № 8. – С. 1138–1146.

УДК 621.375.826

РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $Er, Yb:YAl_3(BO_3)_4$

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лазарчук А.И.¹, Волкова Е.А.², Копорулина Е.В.², Мальцев В.В.², Кулешов Н.В.¹

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на подложке кристалла YAB были выращены образцы монокристаллических слоев $Er, Yb:YAB$. Определены спектрально-люминесцентные свойства полученных образцов, проведено их сравнение со свойствами объемных монокристаллов сходного состава, подтверждающее высокое оптическое качество полученных эпитаксиальных слоев.

Ключевые слова: жидкофазная эпитаксия, эпитаксиальные слои, борат, эрбий, иттербий, спектрально-люминесцентные свойства.

**GROWTH AND SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES
OF Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ EPITAXIAL LAYERS**

**Gorbachenya K.¹, Kisel V.¹, Lazartchuk A.¹, Volkova E.²,
Koporulina E.², Maltsev V.², Kuleshov N.¹**

¹Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus

²Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract. Crystalline Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ films were grown with LPE on undoped YAl₃(BO₃)₄ substrates. The spectral-luminescent properties of grown samples were determined. The comparison with spectroscopic properties of bulk crystals was done. It was shown the high optical quality of obtained epitaxial layers.

Key words: liquid phase epitaxy, epitaxial layers, borate, erbium, ytterbium, spectral-luminescent properties.

Адрес для переписки: Кисель В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: VEKisel@bntu.by

Интерес к исследованию и разработке волноводных лазеров на основе эрбийсодержащих активных сред, которые излучают в спектральной области 1,5–1,6 мкм, обусловлен тем, что полоса люминесценции ионов эрбия совпадает с С-диапазоном длин волн, используемым в волоконно-оптической связи, который соответствует окну прозрачности кварцевых волокон, являющихся основой современных сетей оптических телекоммуникаций. Кварцевые волокна характеризуются низкими значениями дисперсии и поглощения в данной спектральной области, что дает возможность передачи импульсов излучения с длиной волны 1,5–1,6 мкм посредством таких волокон на большие расстояния с минимальными искажениями. Успешная разработка волноводных активных сред на основе эрбийсодержащих материалов перспективна для последующего создания волноводных лазерных излучателей и усилителей оптического сигнала, которые могут быть интегрированы в оптический канал передачи информации, что позволит минимизировать оптические потери, связанные с вводом/выводом излучения.

В данной работе представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных свойств эпитаксиальных слоев иттербия – Er³⁺, Yb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ (YAB).

Эпитаксиальные слои Er,Yb:YAB получены методом жидкофазной эпитаксии из раствора-расплава на основе тримолибдата калия K₂Mo₃O₁₀. На основании кривой растворимости и данных по выращиванию кристаллов YAB на затравку [1] использовался оптимальный состав шихты, который предусматривал 17 мас. % R:YAB и 83 мас.% (K₂Mo₃O₁₀–B₂O₃–R₂O₃), где R = Er, Yb, Y. Содержание ионов Er³⁺ и Yb³⁺ в шихте составило 2 ат. % и 11 ат. % соответственно.

В качестве подложек использовались пластины, изготовленные из нелегированных кристаллов YAB и ориентированные перпендикулярно главной кристаллографической оси. Монокри-

сталлы YAB размером 10x10x8 мм получены на затравках в статическом режиме из аналогичного по составу раствора-расплава в температурном интервале 1050–850 °С.

В экспериментах по наращиванию эпитаксиальных слоев предварительно уточнялась температура насыщения системы, которая составила T_s = 1027 °С. Исходя из данных по кинетике роста тонких пленок аналогичного состава [2] наращивание слоев осуществлялось при переохлаждении системы ΔT = 4 °С и времени выдержки t = 24 часа. В результате, наблюдаемая скорость роста составила 5 мкм/ч, что соответствовало толщине пленки 117,5 мкм.

Анализ состава полученных слоев Er_{0.02}Yb_{0.11}Y_{0.87}Al₃(BO₃)₄ показывает, что соотношение редкоземельных катионов Er/Yb/Y практически полностью соответствует их соотношению в исходном растворе-расплаве и не меняется в процессе роста. С помощью цветного 3D сканирующего конфокального лазерного микроскопа VK-9700 (Keyence Corp., Япония) была изучена морфология поверхности. В результате выделено два основных морфологических типа нарастающей поверхности: (1) хорошо выраженные слои роста, распространяющиеся от периферийных участков подложек к центральному (рис. 1, а) и (2) вицинальные холмики, развитые на более гладких областях (рис. 1, б).

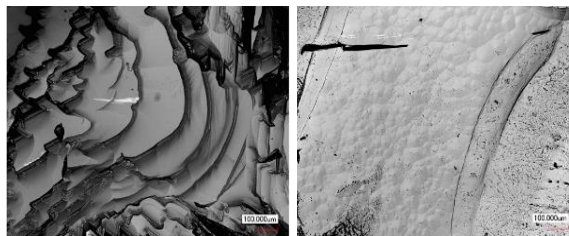


Рисунок 1 – Характерные элементы морфологии пленок Er_{0.02}Yb_{0.11}Y_{0.87}Al₃(BO₃)₄: слои роста (а) и вицинальные холмики (б)

Измерение спектров поглощения монокристаллического слоя производилось на двулучевом спектрофотометре Cary 5000 Varian при комнатной температуре. Спектральная ширина щели спектрофотометра составляла 0,9 нм. Спектр поглощения хорошо согласуется со спектром объемного кристалла Er,Yb:YAB (рис. 2) [3].

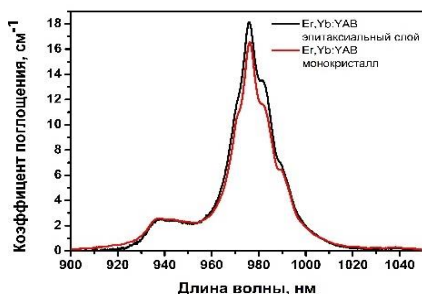


Рисунок 2 – Спектр поглощения эпитаксиального слоя Er,Yb:YAB в сравнении с монокристаллом

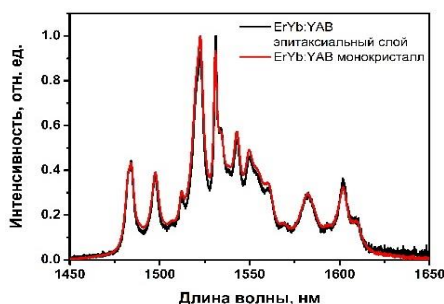


Рисунок 3 – Спектр люминесценции эпитаксиального слоя Er,Yb:YAB в сравнении с монокристаллом

Возбуждение люминесценции осуществлялось InGaAs лазерным диодом, излучающим на длине волны 975 нм. Излучение лазерного диода фокусировалось с помощью линзы на поверхность исследуемого образца, который был расположен под углом. Возбуждаемое излучение люминесценции, промодулированное механическим прерывателем светового потока с частотой ~650 Гц, собиралось с помощью широкоапертурной линзы на входной щели монохроматора (МДР-23). Излучение регистрировалось чувстви-

тельным фотоприемником (Hamamatsu G5851). Сигнал с фотоприемника обрабатывался синхронным усилителем (Stanford Research Systems SR810), на который также подавался опорный сигнал от модулятора. Управление процессом сканирования и регистрация сигнала осуществлялось с помощью компьютера. Спектры люминесценции эпитаксиальных пленок и кристаллов Er,Yb:YAB в области 1,5 мкм приведены на рис. 3. Спектры пленок в точности повторяют форму спектров кристаллов.

Исследование кинетики затухания люминесценции верхнего лазерного уровня $^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} на длине волны 1530 нм проводилось при возбуждении лазерными импульсами длительностью 20 нс с длиной волны 975 нм. Кривая затухания люминесценции хорошо аппроксимировалась моноэкспоненциальной зависимостью с характерным временем жизни 320 ± 15 мкс. Измерения кинетики люминесценции показали соответствие времен затухания возбужденных уровней пленок и соответствующих времен в кристаллических образцах.

Результаты исследований показывают, что эпитаксиальные монокристаллические слои Er,Yb:YAB обладают спектроскопическими свойствами близкими свойствам монокристаллов Er,Yb:YAB и перспективны для получения лазерной генерации.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-12-00235.

Литература

1. Leonyuk, N. I. Growth and characterization of $RM_3(BO_3)_4$ crystals / N. I. Leonyuk, L. I. Leonyuk // Prog. Cryst. Growth Charact. – 1995. – Vol. 31. – P. 179–278.
2. Volkova, E. A. Thin Films and Glass–Ceramic Composites of Huntite Borates Family: A Brief Review / E. A. Volkova, D. A. Naprasnikov, N. I. Leonyuk // Crystals. – 2010. – Vol. 10. – P. 487.
3. Tolstik, N. Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ – efficient 1.5 μm laser crystal / N. Tolstik [et al.] // Appl. Phys. – 2009. – Vol. 97(2). – P. 357–362.

УДК 621.375.826

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ Er,Yb:GdMgB₅O₁₀

Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Лазарчук А.И.¹, Митина Д.Д.², Мальцев В.В.², Копорулина Е.В.², Волкова Е.А.², Кулешов Н.В.¹

¹ Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Исследованы спектроскопические свойства кристаллов гадолиний-магниевого пентабората, легированных ионами Er^{3+} и Yb^{3+} . Определены спектры поперечных сечений поглощения. Исследованы кинетики люминесценции, определено время жизни энергетического уровня $^4I_{13/2}$ иона эрбия

Ключевые слова: спектроскопические свойства, кристалл, пентаборат, эрбий, иттербий.

SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF Er,Yb:GdMgB₅O₁₀ CRYSTALS
**Gorbachenya K.¹, Kisel V.¹, Lazartchuk A.¹, Mitina D.², Maltsev V.², Koporulina E.²,
 Volkova E.², Kuleshov N.¹**

Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus
Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract. Spectroscopic properties of Er³⁺,Yb³⁺:GdMgB₅O₁₀ were investigated. Absorption cross-section polarized spectra were determined. The luminescence kinetics was investigated, lifetime of erbium ⁴I_{13/2} was determined.

Key words: spectroscopic properties, crystal, pentaborate, erbium, ytterbium.

Адрес для переписки: Кисель В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: VEKisel@bntu.by

Лазерное излучение с длиной волны 1,5–1,6 мкм имеет ряд достоинств, интересных для широкого практического применения в лазерной дальнометрии, медицине, системах оптической локации. Основными требованиями, которые предъявляются к эрбий-иттербиевым материалам для получения эффективной лазерной генерации в области 1,5 мкм, являются:

- эффективное поглощение излучения накачки ионами иттербия и последующий эффективный перенос энергии от ионов иттербия к ионам эрбия;

- быстрая безызлучательная релаксация с уровня ⁴I_{11/2} ионов эрбия на верхний лазерный уровень ⁴I_{13/2};

- высокий квантовый выход люминесценции с уровня ⁴I_{13/2} [1].

Наиболее полно указанным требованиям соответствуют фосфатные стекла, легированные ионами эрбия и иттербия. Однако основным недостатком использования фосфатных стекол с ионами эрбия и иттербия в качестве лазерных сред является их низкая теплопроводность (0,85 Вт/м·К) и, как следствие, низкий порог теплового разрушения в лазерах с непрерывной накачкой. Поэтому поиск кристаллической матрицы с ионами эрбия и иттербия, удовлетворяющей приведенным спектроскопическим требованиям для получения эффективной лазерной генерации в спектральной области около 1,5 мкм и имеющей высокую теплопроводность, является актуальной задачей.

В данной работе представлены результаты исследований спектроскопических свойств кристаллов гадолиний-магниевого пентабората, легированных ионами эрбия и иттербия – Er³⁺,Yb³⁺:GdMgB₅O₁₀ (GMBO).

Монокристаллы Er,Yb:GMBO (Er = 2,0 ат.%, Yb = 11 ат.%) были выращены методом SGDS (solution growth on dipped seeds) из высокотемпературного раствора-расплава на основе тримоллибдата калия K₂Mo₃O₁₀ (ТМК) [2].

В ходе предварительных экспериментов оптимальное соотношение ТМК/GMBO определялась по таким показателям как температура кри-

сталлизации, выход и качество спонтанных кристаллов. Монокристаллы Er,Yb:GMBO выращивались в платиновых тиглях емкостью 250 мл также с использованием двух типов затравок – небольших, или «точечных», размером до 0,5×0,5×1,5 мм, и «объемных», более крупных – для определения температуры насыщения раствора-расплава. Эксперимент проводился в интервале температур 900–800°C со скоростями охлаждения 1–1,5°C/сут., в результате были получены монокристаллы Er,Yb:GMBO оптического качества с размерами ~ 20×20×10 мм (рис. 1).

Для исследований спектров поглощения в поляризованном свете из кристаллов Er,Yb:GMBO были изготовлены пластинки, ориентированные вдоль главных осей оптической индикатрисы кристалла *N_m*, *N_p*, *N_g*. Измерение производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5000 в двух спектральных областях: 850–1100 нм, соответствующей энергетическим переходам ²F_{7/2}→²F_{5/2} ионов иттербия и ⁴I_{15/2}→⁴I_{11/2} ионов эрбия, и 1400–1650 нм, соответствующей энергетическому переходу ⁴I_{15/2}→⁴I_{13/2} ионов эрбия.

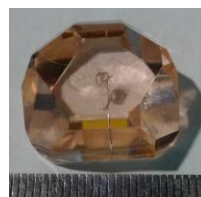


Рисунок 1 – Внешний вид кристалла Er,Yb:GMBO

На рис. 2 приведены спектры поперечных сечений поглощения кристалла Er,Yb:GMBO в спектральной области 850–1100 нм (переход ²F_{7/2}→²F_{5/2} ионов иттербия и переход ⁴I_{15/2}→⁴I_{11/2} ионов эрбия). Максимальное значение поперечного сечения поглощения составляет 1,5×10⁻²⁰ см² на длине волны 975 нм для поляризации E//*N_g*.

На рис. 3 представлены спектры поперечных сечений поглощения в спектральной области 1400–1650 нм. В спектре наблюдается ряд интенсивных полос поглощения с пиками на различных длинах волн в спектральной области 1400-

1650 нм с максимальным поперечным сечением поглощения до $1,1 \times 10^{-20}$ см² на длине волны 1515 нм для поляризации излучения E/N_m .

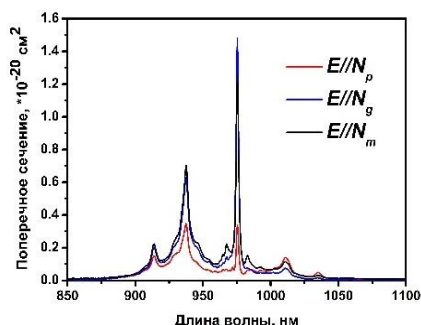


Рисунок 2 – Спектр поперечных сечений поглощения в области около 1 мкм

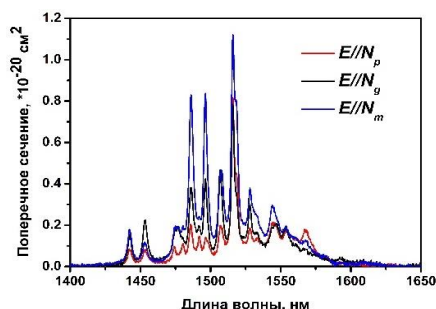


Рисунок 3 – Спектр поперечных сечений поглощения в области около 1,5 мкм

Целью проведения измерений кинетик люминесценции было определение времени жизни возбужденного состояния $^4I_{13/2}$ ионов эрбия в кристалле Er,Yb:GMBO. Для возбуждения люминесценции использовалась длина волны около 976 нм. Для всей серии измерений затухание люминесценции в области 1,5 мкм хорошо описывалось одноэкспоненциальной

функцией, время жизни уровня $^4I_{13/2}$ ионов эрбия составило 440 ± 20 мкс (рис. 4).

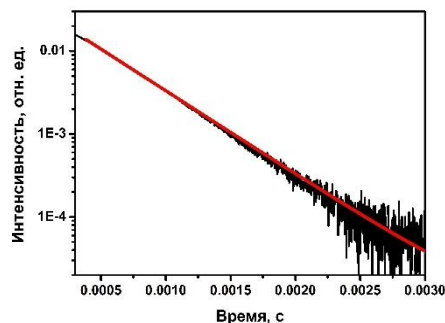


Рисунок 4 – Кинетика затухания люминесценции в области около 1.5 мкм

Проведенные исследования спектроскопических свойства кристаллов Er,Yb:GMBO свидетельствуют о перспективности их использования в качестве активной среды лазеров спектрального диапазона 1,5–1,6 мкм, работающих в непрерывном режиме генерации и режиме пассивной модуляции добротности.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 19-12-00235.

Литература

1. Gorbachena, K. N. High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser / K. N. Gorbachena // Opt. Lett. – 2013. – Vol. 38. – P. 2446–2448.
2. Спектрально-люминесцентные свойства кристаллов иттрий-магниевого пентабората, легированных ионами Er³⁺ и Yb³⁺ / К.Н. Горбаченя [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2020. – Т. 87, № 6. – С. 918–924.

УДК 528.8.042

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИЗМЕННОГО ДЕФЛЕКТОРА ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА

Гусаров И.Е.¹, Владимиров В.Д.¹, Калугин А.И.²

¹ ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН

Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Приведена методика расчета параметров призмного дефлектора (число граней, габаритные размеры). Выполнены расчеты призмных дефлекторов в зависимости от углов сканирования и числа граней. Установлены особенности разработки и применения призмных дефлекторов в устройствах лазерного сканирования.

Ключевые слова: лазерное сканирование, сканер, призмный дефлектор.

CALCULATION OF PARAMETERS OF PRISM DEFLECTOR FOR LASER SCANNER

Gusarov I.¹, Vladimirov V.¹, Kalugin A.²¹ Kalashnikov Izhevsk State Technical University² Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russia

Abstract. The method of calculating of the prism deflector parameters (number of faces, size of deflector) is given. Calculations of prism deflectors are performed depending on the scanning angles and the number of faces. The features of the development and application of prism deflectors in laser scanning devices are established.

Key words: laser scanning, scanner, prism deflector.

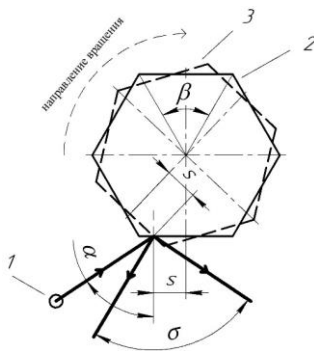
e-mail: gusarov789@yandex.ru

Одной из задач лазерного сканирования является последовательное зондирование сканируемого пространства с заданными угловыми размерами импульсным лазерным излучением. Наиболее простым методом для решения данной задачи является использование различных движущихся оптических элементов, называемых оптомеханическими сканерами.

Одним из самых распространенных оптомеханических элементов является призмный дефлектор (ПД), с помощью которого осуществляется заполнение сканируемого пространства по одной координате.

Призмный дефлектор представляет собой вращающуюся многогранную призму с отражающими гранями, выполненную из стекла или металла с технологическим отверстием для крепления элемента на ось вращения.

Основными параметрами дефлектора является количество отражающих граней m , относительная длительность цикла или коэффициент полезного использования грани C , угол подачи лазерного излучения на грань α , получаемый угол развертки строки сканирования σ и геометрические размеры элемента. Схема работы сканера с ПД приведена на рис. 1.



1 – лазер; 2 – ПД в начальном положении;
3 – ПД в конечном положении

Рисунок 1 – Схема работы сканера с ПД

Строка кадра формируется следующим образом. Излучение, направление которого перпендикулярно оси вращения, падает на грань ПД под углом α к нормали грани на расстоянии s от его оси. Дефлектор начинает свое движение в направ-

лении вращения из начального положения 2 и достигает конечного положения 3, при котором излучение от лазера вновь попадает на грань на расстоянии s от оси ПД. Важно отметить, что расстояние s определяется следующим образом:

$$s = R \cdot C \cdot \operatorname{tg} \frac{\beta}{2},$$

где $\beta = \frac{2\pi}{m}$ – угол развертки одной грани ПД, R – радиус вписанной в многогранник ПД окружности. Параметр C связывает диаметр лазерного пучка и длину грани призмного дефлектора [1]. Также можно выразить через число граней полигонального зеркала и угол развертки строки сканирования:

$$C = \frac{m \cdot \sigma}{4 \cdot \pi}. \quad (1)$$

Очевидно, что коэффициент C не может быть больше 1. Тогда количество граней должно удовлетворять следующему условию:

$$m < \frac{4 \cdot \pi}{\sigma}. \quad (2)$$

Таким образом, для определения параметров ПД, в частности числа граней, необходимо задаться необходимым углом развертки строки сканирования σ .

Следующим шагом будет определение длины грани ПД L и толщины ПД d . Они зависят от площади лазерного пятна на грани. Значение D' является наибольшим линейным размером проекции лазерного пучка, падающего на грань под углом α :

$$D' = \frac{D}{\cos(\frac{\alpha}{2})}. \quad (3)$$

С учетом (2) длину грани полигонального зеркала можно найти по формуле:

$$L = \frac{D'}{1 - C}. \quad (4)$$

Ширина грани полигонального зеркала можно вычислить по формуле

$$d = D \cdot K, \quad (5)$$

где K – коэффициент запаса, он выбирается из максимально допустимого смещения центра пучка относительно центра грани.

Далее, исходя из рассчитанных ранее величин L и m , можно найти радиус вписанной окружности R в полученный многоугольник:

$$R = \frac{L}{2 \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{m}\right)}. \quad (6)$$

Для крепления ПД на ось вращения следует выполнить в его центре технологическое отверстие, радиус которого равен [1]:

$$r = \frac{\left(\frac{N}{57,3} \cdot 32,16 \cdot S\right)^2}{W} - R^2, \quad (7)$$

где N – предельная частота вращения, S – предел текучести материала, W – плотность материала ПД.

Расчеты параметров ПД при угле развертки строки сканирования $\sigma = \frac{\pi}{2}$, угле подачи излучения $\alpha = \frac{\pi}{3}$, диаметре пучка $D = 2$ мм и коэффициенте запаса $K = 1,2$ приведены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что при приближении количества граней к максимальному значению, увеличивается коэффициент полезного использования грани, но одновременно с этим происходит увеличение габаритных размеров ПД. Коэффициент C определяет также время пере-

хода с одной грани на другую, то есть время перехода с одной строки сканирования на другую. При больших коэффициентах время перехода значительно сокращается, что может вызывать проблемы с кадровой разверткой. Другим недостатком такой системы является уменьшение коэффициента полезного использования грани с ростом угла развертки σ . С другой стороны, в отличие от других систем сканирования, ПД способен обеспечить большие углы σ и высокую скорость сканирования пространства.

Таблица 1. Результаты расчета параметров ПД

Количество граней ПД	Коэффициент полезного использования грани	Длина грани, мм	Радиус вписанной окружности, мм
3	0,375	3,695	1,067
4	0,5	4,619	2,309
5	0,625	6,158	4,238
6	0,75	9,238	8
7	0,875	18	19

Литература

1. Gerald, F. M. Handbook of Optical and Laser Scanning, Second Edition / Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. – Нью-Йорк : Marcel Dekker publishing, 2004. – P. 291.

УДК 535.24

ЭТАЛОННЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ РАДИОМЕТРОВ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СИЕ С

Данильчик А.В.¹, Луценко Е.В.¹, Никоненко С.В.¹, Тарасова О.Б.²

¹ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»

²РУП «Белорусский государственный институт метрологии»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработан компактный эталонный источник излучения УФ С на основе светодиода для калибровки УФ-радиометров. Источник обеспечивает плотность мощности излучения до 400 мкВт/см² на площади 3×3 мм с неоднородностью 1,5 %. Излучение источника с максимумом 265 нм сконцентрировано на 97 % в УФ С области спектра. Использование источника для лазерных диодов ComboSource 6310 позволило прецизионно стабилизировать инжекционный ток и температуру светодиода.

Ключевые слова: эталонный источник излучения УФ С, светодиоды УФ С, калибровка УФ-радиометров.

REFERENCE LED RADIATION SOURCES FOR CALIBRATION OF CIE C UV RADIOMETERS

Danilchik A.¹, Lutsenko E.¹, Nikanenka S.¹, Tarasova O.²

¹B.I. Stepanov Institute of Physics NAS of Belarus

²National Metrological Institute of the Republic of Belarus

Minsk, Belarus

Abstract. A compact reference UV C radiation source based on LED for calibration of radiometers has been developed. The source provides a power density of radiation up to 400 μW/cm² on area of 3×3 mm with inhomogeneity of 1.5 %. The radiation from source with a maximum of 365 nm is 97 % concentrated in the UV C region of the spectrum. The use of a source for laser diodes ComboSource 6310 made it possible to precisely stabilize the injection current and temperature of the LED.

Key words: reference UV C radiation source, UV C LEDs, calibration of UV-radiometers.

Адрес для переписки: Никоненко С.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220070, Республика Беларусь
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Пандемия коронавируса (COVID-19) вызвала острую необходимость в разработке новых и улучшении существующих методов и средств борьбы с распространением вирусной инфекции. Одним из наиболее успешных методов обеззараживания воды, воздуха и различных поверхностей является использование бактерицидных свойств ультрафиолетового (УФ) излучения в области от 200 до 280 нм, которая определяется СИЕ как диапазон излучения УФ С [1]. Для этого в последние годы начали интенсивно использовать светодиодные (СД) источники. Эффективность, качество и безопасность работ, выполняемых с использованием УФ-излучения (УФИ), во многом определяется качеством выполненных измерений и калибровки приборов. Однако в УФ-метрологии существует ряд проблем [2, 3]: существенное снижение точности передачи размера единиц величин от национальных эталонов оптических величин средствам измерения; необходимо использовать измеритель мощности с постоянной спектральной чувствительностью в УФ-диапазонах СИЕ и нулевой за его пределами, что проблематично из-за отсутствия качественных УФ-фильтров; точность измерения существенно снижается из-за различия спектральных распределений интенсивности излучения испытуемого и эталонного источников излучения.

Особенно значимое влияние эти проблемы оказывают на результаты измерений и калибровки в диапазоне УФИ СИЕ С. Наиболее распространенными на предприятиях Республики Беларусь являются УФ-радиометры ТКА-ПКМ, ТКА-АВС (ООО НТП «ТКА», Санкт-Петербург) и УФ-радиометры «Аргус-04», «Аргус-05» «Аргус-06» (ФГУП «ВНИИОФИ»). Метрологический контроль этих радиометров выполняется в БелГИМ на установке для поверки УФ-радиометров УПР-02 и составляет от 150 до 200 шт. поверяемых приборов год. Количество приборов, не прошедших поверку составляет примерно 30-40 %, при максимально выявленном превышении относительной погрешности 40 % (производители используют калибровку на линии 254 нм ртутного источника низкого давления). Во многом это обусловлено тем, что применяемые в приборах приемники излучения имеют крайне низкую чувствительность ближе к границе спектрального диапазона УФИ СИЕ С 280 нм, что подтверждается практически нулевой чувствительностью некоторых радиометров к излучению предлагаемого эталонного светодиодного источника (ЭСДИ) с максимумом излучения 265 нм [4]. Поэтому измерение современных СД источников УФ С диапазона спектра должно проходить, согласно рекомендациям СИЕ, с помощью УФ-радиометров калиброванных с помощью референсных (эталонных) СД источников излучения.

Ранее нами было разработано несколько эталонных источников УФИ на основе светодиодов (СД) [3]. Однако их плотность мощности СД в дальнем поле в УФИ СИЕ В и С была недостаточной для исследования динамического диапазона УФ-радиометров. Быстрый прогресс в разработке УФ СД привел к значительному увеличению их мощности и эффективности. В настоящее время появились СД с различными коллимирующими линзами и достаточно высокой плотностью мощности УФ излучения.

В этой работе мы рассматриваем новый ЭСДИ СИЕ С и его характеристики. Конструкция РСДИ подробно описана в [4]. Источник разработан на основе УФ СД с 30 градусной коллимирующей линзой и оптической мощностью 40 мВт при длине волны ~ 265 нм, что достаточно для исследования динамического диапазона УФ С радиометров и позволяет их калибровать. Излучение светодиода собирается дополнительной коллимирующей линзой и для увеличения однородности освещения в дальнем поле излучения рассеивается голографическим фильтром.

Из рисунка видно, что 97,0 % мощности излучения ЭСДИ приходится на диапазон УФ С, 2,7 % – УФ В и 0,3 % – УФ А. Это позволяет применять ЭСДИ для калибровки в диапазоне УФ С, без использования светофильтров.

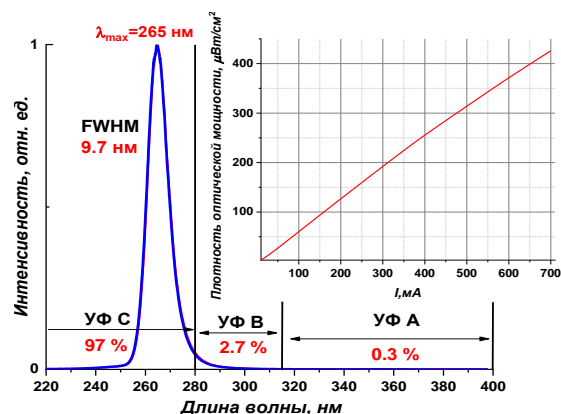


Рисунок 1 – Спектр излучения РСДИ. Вставка: плотность оптической мощности в зависимости от тока инжекции

Плотность оптической мощности УФ С – излучения ЭСДИ практически линейно зависит от тока инжекции (вставка рисунка). Максимальная плотность мощности составляет более 400 мкВт/см² в рабочей зоне радиометров (расстояние 600 мм от источника) при токе инжекции 700 мА. Максимальная квантовая эффективность источника УФ С наблюдается в диапазоне 200–500 мА. Мы рекомендуем использовать ЭСДИ УФ С именно в этом диапазоне инжекционных токов. В этом режиме работы обеспечивается наиболее эффективная излучательная комбинация электронов и дырок в активной об-

ласти СД, что сводит к минимуму тепловыделение из-за безызлучательной рекомбинации и, как следствие, увеличивает стабильность и срок службы СД источника.

Представленная конструкция ЭСДИ с голографическим фильтром (FWHM 0,5°) и дополнительной линзой обеспечивает равномерное ($\pm 1,5\%$) освещение рабочей области 30×30 мм на расстоянии 550 мм и более от источника, что обеспечивает удобство при калибровке. Рабочие расстояния 600–700 мм оптимальны для рутинных калибровок на калибровочной установке УФ-радиометров.

Показано, что тепловое равновесие ЭСДИ при рабочем токе 500 мА достигается через 600 секунд после включения (небольшое падение интенсивности на 1,5%). После этого интенсивность излучения медленно падает со скоростью 0,17% в час. Этот хороший результат получен благодаря как стабильности тока и температуры, обеспечиваемым источником питания Agroyo Instruments ComboSource 6310 (источник тока – стабильность < 10 ppm, 1 час, регулятор температуры – стабильность 0,002 °С, 1 час), так и в следствие очень медленной деградации УФ СД, что возможно только при малых температурах перегрева СД кристалла. Дополнительные измерения температуры СД кристалла с помощью

тепловизора показали, что, перегрев составил всего лишь 25 °С при токе 500 мА. Такие низкие температуры перегрева обеспечиваются особенностями конструкции СД.

Таким образом создан компактный эталонный светодиодный источник излучения УФ С для калибровки и поверки УФ-радиометров, что обеспечивает высокую точность измерения начинающих широко внедряться новых типов СД излучателей УФ С.

Литература

1. CIE Position Statement on the Use of Ultraviolet (UV) Radiation to Manage the Risk of COVID-19 Transmission, May 2020.
2. Broadband Radiometric LED Measurements / G. P. Eppeldauer [et al.] // Proc. of SPIE, 2016. – Vol. 9954. – P. 99540J-01–99540J-15.
3. Nikanenko, S. V. Compact reference UVC LED source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // Ukrainian Metrological Journal. – 2020. – № 3A. – P. 140–144.
4. Nikanenko, S. V. Reference UVC LED Source / S. V. Nikanenko, A. V. Danilchuk, E. V. Lutsenko // New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD 2021): Proc. 14th Internat. Conf., NIST, Boulder, USA, 21–24 June 2021. – Boulder: Local Organizing Committee, 2021. – P. 134–135.

УДК 621.3.038.825.2

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА Tb³⁺:YAl₃(BO₃)₄

Демеш М.П.¹, Горбаченя К.Н.¹, Кисель В.Э.¹, Волкова Е.А.², Мальцев В.В.², Копорулина Е.В.², Кулешов Н.В.¹

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
Москва, Российская Федерация

Аннотация. Детально исследованы лазерно-спектроскопические свойства кристалла Tb³⁺:YAl₃(BO₃)₄. Зарегистрированы спектры поглощения и люминесценции в поляризованном свете. Определено время жизни возбужденного состояния ⁵D₄. Рассчитаны коэффициенты ветвления люминесценции и спектры сечения стимулированного испускания.

Ключевые слова: тербий, ортоборат, поглощение, люминесценция.

SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF Tb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ CRYSTAL

Demesh M.¹, Gorbachenya K.¹, Kisel V.¹, Volkova E.², Maltsev V.², Koporulina E.², Kuleshov N.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus

²Lomonosov Moscow State University
Moscow, Russia

Abstract. Spectroscopic properties of Tb³⁺:YAl₃(BO₃)₄ crystal were investigated in detail. The polarized absorption and luminescence spectra were recorded, as well as a lifetime of the ⁵D₄ excited state is determined. Stimulated emission cross sections and luminescence branching ratios were found.

Key words: terbium, orthoborate, absorption, luminescence.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maxim.demesh@bntu.by

Развитие лазерных диодов как источников накачки, излучающих в синей области спектра, привело к увеличению интереса к исследованию лазеров, генерирующих в видимом спектральном диапазоне [1]. Неоспоримым преимуществом таких лазеров является отсутствие нелинейных преобразований: удвоения основной частоты излучения, а также параметрической генерации.

В текущем десятилетии была получена эффективная генерация на семействе кристаллов фторидов с ионами тербия [2] на переходах, указанных на рис. 1 (помечены кружком).

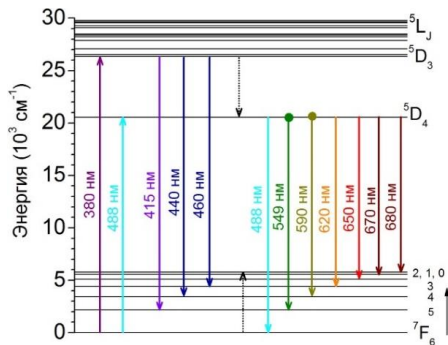


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней Tb³⁺

Кристаллы фторидов обеспечивают малую силу кристаллического поля [3], что особенно важно для получения генерации на ионах тербия. Среди всего многообразия оксидных кристаллов можно выделить группы тех, которые также обладают малым значением силы кристаллического поля. К таким материалам относятся кристаллы ортоборатов, в частности YAl₃(BO₃)₄ (YAB).

В данной работе представлены оптические свойства кристалла Tb(35 ат.%) :YAB, выращенного методом раствор-расплавной кристаллизации. Относительно высокое содержание ионов-активаторов обусловлено требованием к обеспечению эффективного поглощения в видимой области спектра ввиду запрещенных правилами отбора по спину переходов.

Спектры сечения поглощения исследуемого материала в видимой области спектра показаны на рис. 2. Кристаллы обладают выраженной анизотропией поглощения, причем более интенсивными являются полосы, соответствующие σ-поляризации

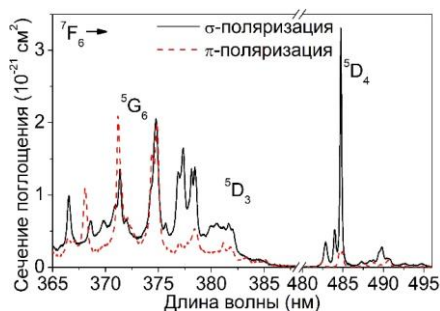


Рисунок 2 – Спектр поглощения кристалла Tb:YAB

На переходе ${}^7F_6 \rightarrow {}^5D_4$ пиковое значение сечения поглощения составляет $3,2 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ (σ-поляризация) и приходится на длину волны 484,7 нм. Данное значение на порядок превышает аналогичное для тербийсодержащих кристаллов фторидов. Это делает кристаллы Tb:YAB привлекательными лазерными средами при накачке InGaN лазерными диодами голубой области спектра.

Также накачка данных сред возможна в диапазоне 370–380 нм более доступными лазерными диодами ультрафиолетовой области спектра. Эффективное заселение верхнего лазерного уровня 5D_4 происходит благодаря процессу кросс-релаксации ${}^5D_3 \rightarrow {}^5D_4 : {}^7F_6 \rightarrow {}^7F_0$. Значения сечения поглощения в данном интервале длин волн не превышают $2 \times 10^{-21} \text{ см}^2$, однако в данном случае нет необходимости температурной стабилизации длины волны излучения источника накачки.

Спектры люминесценции кристалла Tb:YAB были зарегистрированы в поляризованном свете в диапазоне 470–700 нм при накачке ЛД на длине волны 488 нм. Полученные спектры были использованы для нахождения коэффициентов ветвления люминесценции β и расчета спектров сечений стимулированного испускания (СИ). Результаты расчетов для показаны на рис. 3.

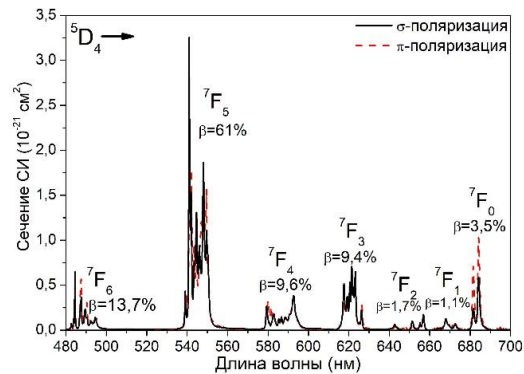


Рисунок 3 – Спектры сечения стимулированного испускания кристалла Tb:YAB

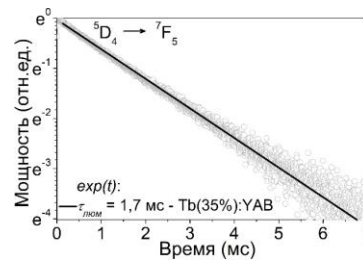


Рисунок 4 – Схема экспериментальной установки

Из представленного рисунка видно, что основная часть энергии, испускаемой с уровня 5D_4 , (около 60 %) приходится на зеленую область спектра ($\lambda \sim 545 \text{ нм}$). Наиболее интенсивный переход ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ характеризуется пиковым значением сечения СИ $3,4 \times 10^{-21} \text{ см}^2$ на длине волны 541 нм для σ состояния поляризации. Генерация возможна и на переходе ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_4$, однако она

полностью подавляется поглощение из возбужденного состояния для длин волн более 600 нм [2].

На рис. 4 показана кинетика затухания люминесценции кристалла Tb:YAF на переходе $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$. Возбуждение кристалла осуществлялось световыми импульсами наносекундной длительности на длине волны 488 нм, люминесценция регистрировалась на длине волны 545 нм. Кинетика затухания люминесценции хорошо аппроксимируется экспоненциальной функцией с постоянной времени затухания 1,7 мс. Учитывая излучательное время жизни метастабильного уровня 5D_4 , равное 1,83 мс [4], квантовый выход люминесценции составил около 93%. Достаточно высокое значение квантового выхода для кристалла с содержанием ионов тербия 35 ат.% обусловлено в первую очередь большим энергетическим зазором (около 14500 см^{-1}) между уровнем 5D_4 и верхним

уровнем мультиплета 7F_1 , а также отсутствием кросс-релаксационных процессов. Это указывает на то, что для лазерных применений можно использовать высококонцентрированные образцы (вплоть до 100 ат.%) без существенного сокращения жизни верхнего лазерного уровня.

Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.
2. Efficient continuous wave laser operation of Tb³⁺-doped fluoride crystals in the green and yellow spectral regions / P. W. Metz [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 335–344.
3. Dorenbos, P. The 5d level positions of the trivalent lanthanides in inorganic compounds / P. Dorenbos // *J. Lumin.* – 2000. – Vol. 91. – P. 155–176.
4. Transitions intensities and cross-sections of Tb³⁺ ions in YAl₃(BO₃)₄ crystal / M. Demesh [et al.] // *OSA Continuum.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

УДК 621.3.038.825.2

ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Pr:YLF ПРИ НАКАЧКЕ InGaN ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ

Демеш М.П.¹, Кисель В.Э.¹, Кулешов Н.В.¹,
Низамутдинов А.С.², Морозов О.С.², Кораблева С.Л.², Семашко В.В.²

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

²Институт физики, Казанский федеральный университет
Казань, Российская Федерация

Аннотация. На основе абсорбционно-люминесцентных свойств кристалла литий-иттриевого фторида, активированного ионами празеодима, определены требования к InGaN лазерным диодам, рассчитаны система фокусировки и резонатор Pr:YLF лазера, генерирующего на переходе $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$. Выходная мощность лазерного излучения составила 0,5 Вт.

Ключевые слова: празеодим, фторид, InGaN лазерный диод, лазер видимого диапазона.

Pr:YLF LASER PUMPED BY InGaN LASER DIODE

Demesh M.¹, Kisel V.¹, Kuleshov N.¹
Nizamutdinov A.², Morozov O.², Korableva S.², Semashko V.²

¹Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus

²Institute of Physics, Kazan Federal University
Kazan, Russia

Abstract. Based on the absorption-luminescence properties of praseodymium doped lithium-yttrium fluoride crystal the requirements for InGaN laser diodes are determined. The focusing system and resonator of a Pr: YLF laser generating at the $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$ transition are designed. An output power of 0.5 W was achieved.

Key words: praseodymium, fluoride, InGaN laser diode, visible laser.

Адрес для переписки: Демеш М.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: maxim.demesh@bntu.by

В последнее время наблюдается значительный интерес к лазерам, генерирующим в видимом спектральном диапазоне при непосредственной накачке источниками в видимой области спектра. Это стало возможным благодаря развитию InGaN лазерных диодов, а также оптически накачиваемых полупроводниковых лазеров, излучение которых лежит в фиолетово-

синей области спектра. В данной области лежат полосы поглощения ионов редкоземельных элементов (Pr^{3+} , Tb^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Eu^{3+}), используемых для получения видимой генерации [1]. Наиболее перспективным из перечисленных ионов представляется ион празеодима (Pr^{3+}) в кристаллах фторидов (в частности LiYF_4 (далее YLF)), как обладающих малой силой кристалли-

ческого поля и большим значением ширины запрещенной зоны. Энергетическая схема уровней данного иона показана на рис. 1 В данных материалах получена эффективная генерация в видимом диапазоне [2–4]. На определенном этапе развития лазеров видимой области спектра повышение выходной мощности излучения обеспечивалось мультиплексацией маломощных (до 1,5 Вт) лазерных диодов и (или) использованием двусторонней накачки активного элемента [4]. Появление на рынке одноэмиттерных лазерных диодов с выходной мощностью 5 Вт дало новый виток повышения выходной мощности данных лазеров.

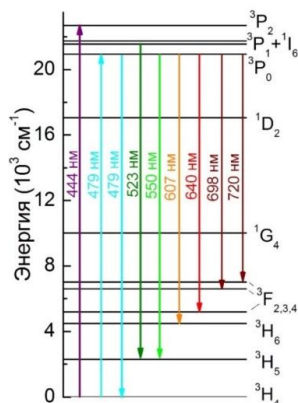


Рисунок 1 – Энергетическая схема уровней Pr^{3+}

Среди излучательных переходов (рис. 1) иона празеодима примечателен переход ${}^3P_1 \rightarrow {}^3H_5$, который соответствует длине волны излучения 522,6 нм. Выбор данного перехода обусловлен особым значением его второй гармоники для применений в медицине и биологии.

Требования к спектральному составу излучения диода накачки определялись на основе абсорбционных свойств кристалла Pr:YLF (рис. 2).

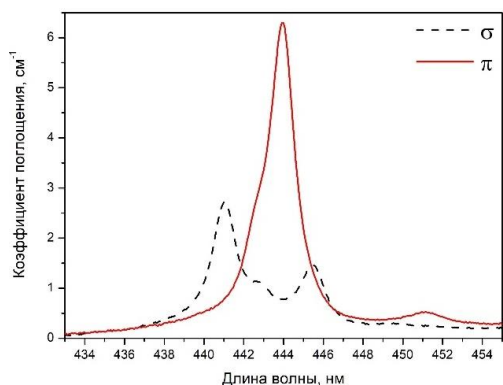


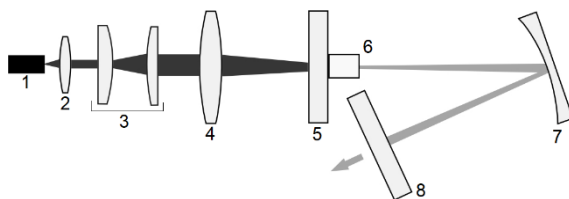
Рисунок 2 – Спектр поглощения кристалла Pr:YLF

Для лазерных экспериментов был изготовлен активный элемент из кристалла $\text{Pr}(0,3 \text{ ат.}\%):\text{YLF}$, вырезанный перпендикулярно кристаллографической оси a , с размерами $5 \times 3 \times 3$ мм, обеспечивающий поглощение излучения накачки около 90 %. Также при данной концентрации ионов-активаторов не сказываются эффекты концен-

трационного тушения люминесценции верхнего лазерного уровня. Активный элемент, обернутый в индиевую фольгу, закреплялся в пассивном медном теплоотводе.

Учитывая температурную (токовую) зависимость длины волны излучения лазерного диода, для ее оптимального спектрального перекрытия с полосой поглощения активного элемента необходима температурная стабилизация лазерного диода, реализуемая с помощью элемента Пельтье. Диод устанавливался таким образом, чтобы согласовать плоскость поляризации его излучения с оптической осью активного элемента.

Пространственные характеристики излучения лазерного диода измерялись CCD камерой для дальнейшего расчета системы фокусировки, схема которой представлена на рис. 3. Так как эмиттер лазерного диода 1 имеет прямоугольную форму с размером 1×50 мкм, то параметр качества пучка M^2 различается для двух взаимно перпендикулярных направлений и составляет $1,4 \times 1,5$, соответственно. Для улучшения пространственного перекрытия мод накачки и генерации между коллимирующей 2 и фокусирующей 4 линзами помещался цилиндрический телескоп 3 с увеличением $13 \times$ (рис. 3).



1 – лазерный диод, 2 – коллимирующая линза, 3 – цилиндрический телескоп, 4 – фокусирующая линза, 5 – входной зеркало, 6 – активный элемент, 7 – поворотное зеркало, 8 – выходное зеркало

Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки

Резонатор лазера имел полусферическую конфигурацию (рис. 3) и состоял из плоского зеркала 5, пропускающего около 98 % излучения накачки и отражающего более 99,9 % излучения генерации на длине волны около 523 нм, поворотного сферического зеркала 7 (радиус кривизны 100 мм) и плоского выходного зеркала. Излучение накачки фокусировалось в пятно диаметром 80 мкм.

При поглощенной мощности накачки 3,5 Вт мощность выходного излучения на длине волны 522,6 нм составила 0,5 Вт при пропускании выходного зеркала 3,2 %. Пространственное распределение излучения генерации показано на рис. 4. Эллиптичность пятна обусловлена наличием положительной термической линзы для π -поляризации излучения, что характерно для кристаллов YLF, активированных ионами редкоземельных элементов [5]. Параметр качества пучка $M^2 < 1,1$.

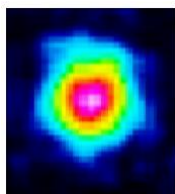


Рисунок 4 – Пространственное распределение интенсивности в лазерном пучке

Литература

1. Out of blue: semiconductor laser pumped visible rare-earth doped lasers / C. Kraenkel [et al.] // *Las. Photon. Rev.* – 2016. – Vol. 10, № 2. – P. 548–564.

2. High-power red, orange, and green Pr³⁺:YLiF₄ lasers / P. W. Metz [et al.] // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 3193–3196.

3. Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm / S. Luo [et al.] // *Opt. Commun.* – 2016. – Vol. 380. – P. 357–360.

4. Tanaka, H. High-power visibly emitting Pr³⁺:YLF laser end pumped by single-emitter or fiber-coupled GaN blue laser diodes / H. Tanaka, S. Fujita, F. Kannari // *App. Opt.* – 2018. – Vol. 57, № 21. – P. 5923–5928.

5. Energy-Transfer Upconversion and Thermal Lensing in High-Power End-Pumped Nd:YLF Laser Crystals / P. J. Hardman [et al.] // *IEEE J. Quantum. Electron.* – 1999. – Vol. 35, № 4. – P. 647–652.

УДК 53.082.53

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЛАМБЕРТОВА КРУГЛОГО ОТРАЖАТЕЛЯ Дерменжи И.А.¹, Барышникова С.Ю.¹, Кочурова Д.Н.², Калугин А.И.²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова

²Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Представлена теоретическая модель для расчета мощности лазерного излучения, принятой после отражения гауссова пучка от круглого ламбертова отражателя. Экспериментально получены мощности лазерного излучения, отраженного от пластиковых (поливинилхлорид) дисков различного радиуса, в зависимости от дистанции от фотоприемника до объекта. Установлено соответствие теоретической модели экспериментальным зависимостям.

Ключевые слова: гауссов пучок, лазерное излучение, ламбертов отражатель, лазерный дальномер, ЭПО.

MEASURING OF LASER RADIATION POWER REFLECTED FROM LAMBERT CIRCULAR REFLECTOR Dermenzhi I.¹, Baryshnikova S.¹, Kochurova D.², Kalugin A.²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University

²Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
Izhevsk, Russia

Abstract. A theoretical model for calculating the power of laser radiation received after reflection of a Gaussian beam from a circular Lambert reflector is presented. The power of laser radiation reflected from plastic (polyvinyl chloride) disks of various radii, depending on the distance from the photodetector to the object, was experimentally obtained. The correspondence of the theoretical model to the experimental dependences has been established.

Key words: Gaussian beam, laser radiation, Lambert reflector, laser rangefinder, LRCS.

e-mail: ackad1976@yandex.ru

В лидарных и дальнометрических системах важной задачей является определение величины мощности лазерного излучения, принятой после отражения или рассеяния от исследуемого объекта [1, 2]. Принятый фотоприемником лазерный сигнал зависит от многих параметров: характеристик объекта, конструктивных параметров зондирующей установки. В общем случае регистрируемый фотоприемником сигнал определяется пространственным и временным распределением плотности мощности излучаемого лазерного импульса, геометрической формой зондируемого объекта, его отражательными свойствами и характеристиками среды распространения излучения [3]. В условиях однопозиционной локации и нормального падения лазерного излучения на круглый объект радиусом

r_t , расположенного на расстоянии l от входного окна фотоприемника, и который отражает согласно закону Ламберта, легко получить следующее выражение для принятой мощности P :

$$P = P_l \cdot \frac{\sigma_d \eta \rho_t}{2\pi l^2} \left(1 - \exp\left(-\frac{r_t^2}{w^2}\right) \right), \quad (1)$$

где P_l – мощность испускаемого лазером излучения, σ_d – площадь входного зрачка приемной оптической системы, η – эффективность преобразования фотоприемником оптической энергии в электрический сигнал, ρ_t – коэффициент отражения материала объекта, w – ширина лазерного пучка в плоскости объекта. Ширина испускаемого гауссова пучка изменяется с расстоянием по закону:

$$w^2 = w_0^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda(z+l)}{\pi w_0^2} \right)^2 \right), \quad (2)$$

где w_0 – ширина пучка в перетяжке, λ – длина волны лазерного излучения, z – расстояние от перетяжки лазерного пучка до входного окна фотоприемника (в случае моностатической системы положение фотоприемника и излучателя совпадают).

Из выражения (1) эффективная площадь отражения (ЭПО) круглого ламбертова отражателя равна:

$$\sigma = \rho_t \cdot \pi w^2 \left(1 - \exp\left(-\frac{r_t^2}{w^2}\right) \right), \quad (3)$$

что согласуется с результатами [4, 5]. Из (2) и (3) следует, что ЭПО зависит от расстояния до объекта l и от соотношения радиуса диска и ширины пучка. При $r_t \gg w$ ЭПО определяется шириной пучка и равна $\sigma_w = \rho_t \cdot \pi w^2$. При этом ЭПО растет с увеличением дистанции l , тогда как измеряемая фотоприемником мощность P уменьшается пропорционально l^{-2} . В случае большой ширины пучка при $r_t \ll w$ ЭПО стремится к постоянному значению, равному $\sigma_r = \rho_t \cdot \pi r_t^2$, а мощность P уменьшается как l^{-4} .

С целью подтверждения теоретической зависимости (1) были выполнены экспериментальные измерения мощности отраженного лазерного излучения. Эксперимент проведен с использованием макета измерительного стенда, представленного в работе [6]. В качестве источника излучения использовался DPSS лазерный модуль CPS532 производства Thorlabs, Inc. Длина волны излучения модуля равна $\lambda = 532$ нм, а его мощность $P_l = 4,1$ мВт. Передающий объектив формирует пучок с углом расходимости 26 мрад и шириной перетяжки $w_0 = 6,3$ мкм. В качестве фотоприемного устройства был применен кремниевый фотодиодный детектор PH100-SI-NA-OD1-D0 производства GENTEC-EO, Inc. Его площадь $\sigma_d = 0,9$ см², а чувствительность 0,31 А/Вт.

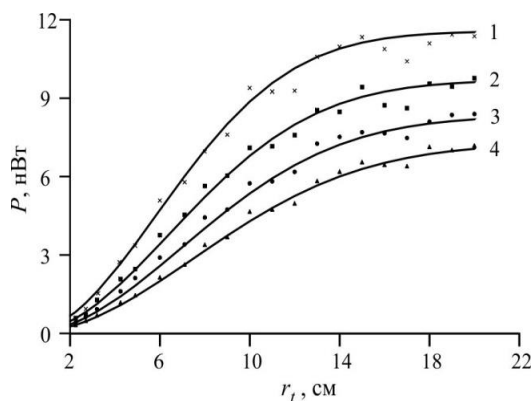


Рисунок 1 – Мощность P , отраженная от ПВХ дисков радиусом r_t , для расстояний $l = 325$ (1), 355 (2), 383 (3) и 410 см (4)

В качестве объектов зондирования были выбраны диски различного радиуса от 1,5 до 20 см, изготовленные из поливинилхлорида (ПВХ) с коэффициентом отражения $\rho_t = 0,67$ для длины волны излучения лазера. Измерения коэффициента отражения при разных углах падения излучения показало, что поверхности дисков можно считать ламбертовыми.

На рис. 1 представлены результаты измерений мощности, принятой после отражения от ПВХ дисков, в зависимости от их радиусов, при различном расстоянии до фотоприемного устройства. Сплошными линиями представлены теоретические зависимости (1), маркерами – экспериментальные данные. Ширина пучка в плоскости диска менялась согласно выражению (2) от 8,3 см при дистанции 325 см до 10,6 см при 410 см. Экспериментальные результаты хорошо аппроксимируются теоретическими кривыми. При этом из графика видно, что при увеличении расстояния до объекта мощность излучения, зафиксированная фотоприемником, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния при больших радиусах дисков. При этом с увеличением радиуса диска отраженная мощность возрастает и стремится к постоянной величине, пропорциональной $P \sim \frac{P_l}{l^2}$.

Таким образом, полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с приведенной теоретической моделью, что говорит о пригодности использования данной модели для расчета мощности, пришедшей на приемник после отражения от исследуемого объекта.

Литература

1. Основы импульсной лазерной локации: учеб. пособие для вузов / В. И. Козинцев [и др.] ; под ред. В. Н. Рождествина. – М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 512 с.
2. Steinvall, O. Effects of Target Shape and Reflection on Laser Radar Cross Sections / O. Steinvall // Applied optics. – 2000. – Vol. 39. – P. 4381–4391.
3. Кочурова, Д. Н. Моделирование временной формы лазерного импульса при лазерной локации / Д.Н. Кочурова // 14 международная конференция «Прикладная оптика-2020». – Санкт-Петербург. – 2020. – С. 114–118.
4. novel method for laser radar cross section calculation of complex laser targets with partial and gaussian beam irradiation / Q. Wang [et al.] // Laser Physics – 2018. – Vol. 28. – P. 126207–126219.
5. Laser radar cross-section estimation from high-resolution image data / G. R. Osche [et al.] // Applied Optics. Optical Society of America. – 1992. – Vol. 31, № 14. – P. 2452–2460.
6. Макет измерительного стенда для определения эффективной площади отражения объектов сложной формы / С. Ю. Барышникова [и др.] // 13 Международная научно-техническая конференция «Приборостроение-2020». – Минск, 2020. – С. 17–18.

УДК 535.33; 533.9; 543.423.1

УПРАВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ

Ермалицкая К.Ф.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Разработан метод управления плотностью мощности лазерного излучения при двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии металлов, позволяющих проводить послойный анализ функциональных и защитных покрытий с субмикронным разрешением слоя. Данный метод основывается на расфокусировке лазерного луча относительно поверхности образца, при этом за счет увеличения площади лазерной абляции в плазму поступает достаточное количество атомов для того, чтобы при дополнительном возбуждении их вторым импульсом из сдвоенных аналитический сигнал значительно превышал уровень шумов.

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, одноимпульсная и двухимпульсная лазерная абляция, послойный анализ покрытий.

POWER DENSITY CONTROL OF LASER RADIATION IN DOUBLE PULSE LASER ABLATION OF METALS

Ermalitskaia K.

*Belarussian State University
Minsk, Belarus*

Abstract. A method has been developed for controlling the power density of laser radiation in double pulse laser atomic emission spectroscopy of metals, which allows for layer-by-layer analysis of functional and protective coatings with a submicron layer resolution. This method is based on the defocusing of the laser beam relative to the sample surface, while due to the increase in the laser ablation area, a sufficient number of atoms enter the plasma so that, upon their additional excitation by the second pulse from the doubled ones, the analytical signal significantly exceeds the noise level.

Key words: laser atomic emission spectroscopy, single-pulse and double-pulse laser ablation, layer-by-layer analysis of coatings.

Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., пр. Независимости, 70, комн. 144, г. Минск 220113, Республика Беларусь, e-mail: ermалitskaia@gmail.com

Введение. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (ЛАЭС) обеспечивает высокую чувствительность, оперативность и возможность проведения исследования образцов с пространственным разрешением, лимитируемым размером сфокусированного лазерного пучка на образце. ЛАЭС позволяет быстро определить основные компоненты сырья и готовых изделий (например, для контроля и анализа поверхностных слоев, анализа бронзовых и медных сплавов). В настоящее время ЛАЭС развивается в связи с возможностью проводить многокомпонентный анализ с высоким пространственным разрешением по поверхности, причем деструкция образца не велика (диаметр кратера на поверхности до 1 мм, глубина – несколько десятков мкм), без какой-либо пробоподготовки (химической и механической), с небольшим количеством вещества необходимого для анализа (~10-10-10-11 г).

ЛАЭС преимущественно используется для элементного анализа массивных образцов, когда не предъявляется строгих требований к минимизации деструкции поверхности и снижению толщины испаряемого слоя при послойном анализе. Однако, в ряде случаев, необходимо существен-

но снизить толщину испаряемого слоя (вплоть до субмикронного диапазона). Одним из наиболее подходящих для этой цели подходов является снижение плотности мощности лазерного излучения на поверхности образца.

При управлении плотностью мощности необходимо контролировать аналитический сигнал (отношение сигнал/шум для зарегистрированных относительных интенсивностей спектральных линий по сравнению с фоном), как для основных компонентов сплавов, так и для «третьих» элементов, концентрация которых в образце, и в абляционной плазме не превышает единицы – десятые доли процента.

Одиночные лазерные импульсы используются как источники возбуждения эмиссионных спектров при качественном и количественном анализе. Для повышения чувствительности анализа и снижения погрешности применяется в качестве источника возбуждения спектра сдвоенные лазерные импульсы (СЛИ), сдвинутые относительно друг друга во времени.

Лазерный спектрометр ЛАЭС. Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭС

(производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭС:

- Источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов $f_l = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм.

- Длительность импульсов $t_l \approx 10$ нс.

- Межимпульсный интервал $\Delta t = 0-100$ мкс (шаг 1 мкс).

- Диапазон анализируемых длин волн $\Delta\lambda = 260-760$ нм.

- Энергия лазерного импульса $E_{\text{имп}} = 10-100$ мДж.

Количество испаряемого вещества определяется плотностью потока излучения q на поверхности образца. Величину q находят следующим образом: $q \approx E_{\text{имп}}/\tau S$, где $E_{\text{имп}}$ и τ – энергия и длительность лазерного импульса на полувысоте соответственно, S – площадь лазерного пятна.

Управление плотностью мощности, т.е. изменение q может проводиться тремя способами:

- уменьшение энергии импульса – при этом снижается температура, плотность и коэффициент поглощения излучения плазмой, что приводит к увеличению степени деструкции поверхности;

- основанный на использовании оптических светофильтров с различными коэффициентами поглощения лазерного излучения;

- метод расфокусировки лазерного луча – фокусировки на некотором расстоянии Δf от поверхности образца.

Использование светофильтров позволяет уменьшить плотность потока на поверхности образца без изменения площади пятна. При этом значительно снижается количество испаренного вещества и падает интенсивность спектральных линий элементов до уровня фона, что не позволяет использовать данный способ для управления плотностью мощности в аналитических целях.

При расфокусировке лазерного луча в плазму поступает больше вещества, чем при аналогичной плотности потока с использованием светофильтров, из-за увеличения площади испарения. Значение q изменялось путем увеличения диаметра лазерного пятна на поверхности объекта, т.е. в результате расфокусировки Δf лазерного луча при фиксированной мощности лазерного импульса. Расфокусировка осуществлялась с помощью поворота микровинта с шагом 1,0 мм. В зависимости от положения образца относительно точки фокуса лазерного луча выделяются три типа расфокусировки: нулевая ($\Delta f = 0$), положительная ($\Delta f > 0$) и отрицательная ($\Delta f < 0$) (рис. 1).

Для определения оптимального значения параметра расфокусировки Δf была исследована зависимость относительных интенсивностей наиболее сильной спектральной линии цинка, алюминия и свинца образцов чистых металлов от расфокусировки лазерного луча на поверхности объекта (рис. 2).

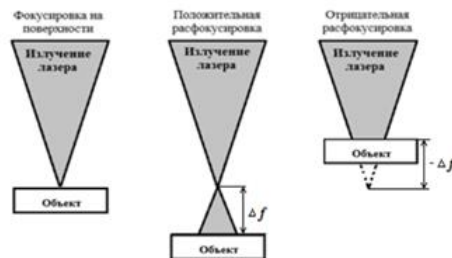


Рисунок 1 – Схематическое изображение различных схем фокусировки лазерного луча относительно поверхности объекта

Увеличение аналитического сигнала при расфокусировке лазерного излучения $\pm 1-15$, мм от поверхности, связано с уменьшением экранировки лазерного излучения передним фронтом распространяющейся плазмы из-за снижения ее плотности. Большее увеличение интенсивности при положительной расфокусировки объясняется тем, что распространяющаяся абляционная плазма будет испытывать дополнительное возбуждение при пролете через точку фокуса лазерного луча.

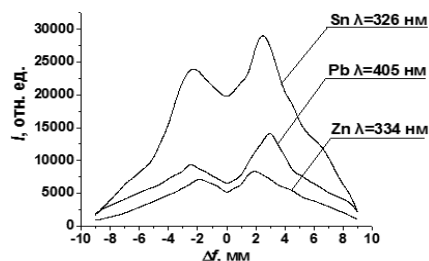


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности спектральных линий цинка, свинца и олова от параметра расфокусировки Δf при лазерной абляции двоекными лазерными импульсами с $\Delta t = 10$ мкс

Выводы. Использование метода расфокусировки лазерного излучения позволяет снижать толщину испаряемого лазерными импульсами слоя вещества путем снижения плотности мощности лазерного излучения.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воробай [и др.] // ЖПС. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

УДК 535.33; 533.9; 543.423.1

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ
В АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЕ С ПОМОЩЬЮ ДВУХИМПУЛЬСНОГО СПЕКТРОМЕТРА
ЛАЭМС**

Ермалицкая К.Ф.¹, Воропай Е.С.¹, Тарасов Д.С.²

¹Белорусский государственный университет

²НИИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. С помощью разработанного на кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ двухимпульсного лазерного спектрометра ЛАЭМС исследовано изменение механизма заселения возбужденных уровней при переходе от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции металлов и сплавов, приводящем к предпочтительному возбуждению других уровней, изменению в распределении заселенностей возбужденных состояний, как из-за возможного изменения температуры абляционной плазмы T и заселенности основного состояния N_0 .

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, лазерная абляция.

**SPECTRAL LINES EXCITATION MECHANISMS IN ABLATIVE PLASMA STUDY USING
DOUBLE PULSE LASER SPECTROMETER LAEMS**

Ermalitskaia K.¹, Voropay E.¹, Tarasov D.²

¹Belarussian State University

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU

Minsk, Belarus

Abstract. Using double-pulse laser spectrometer LAEMS (developed by the Department of Laser Physics and Spectroscopy of BSU), the change of the mechanism of population of excited levels during the transition from single-pulse to two-pulse laser ablation of metals and alloys, leading to the preferable excitation of other levels, a change in the distribution of the populations of excited states due to a possible change in the temperature T of the ablation plasma and the population of the ground state N_0 was investigated.

Key words: Laser induced breakdown spectroscopy, laser ablation.

Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., пр. Независимости, 70, комн. 144, г. Минск 220113, Республика Беларусь, e-mail: ermалitskaia@gmail.com

Введение. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия является одним из наиболее распространенных методов элементного анализа металлических образцов. Переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции за счет дополнительного возбуждения плазмы позволяет значительно повысить аналитический сигнал без существенного изменения деструкции поверхности. Однако в большинстве случаев в аналитических методиках, как при одноимпульсной, так и при двухимпульсной абляции используются одни и те же спектральные, т.е. предполагается, что при дополнительном возбуждении вторым импульсом первичной плазмы, заселение возбужденных уровней идет по той же схеме, как и при одноимпульсной абляции.

Целью данной работы было исследовать влияние двухимпульсного лазерного возбуждения абляционной плазмы металлов на изменение относительных интенсивностей спектральных линий элементов, вызванное изменением температуры парогазового облака и перераспределением заселенностей возбужденных уровней, как атомных, так и ионных.

Лазерный спектрометр ЛАЭМС.

Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре

ЛАЭМС (производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС:

- Источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов $f_{\text{л}} = 10$ Гц и длиной волны $\lambda = 1064$ нм.

- Длительность импульсов $t_{\text{л}} \approx 10$ нс.

- Межимпульсный интервал $\Delta t = 0-100$ мкс (шаг 1 мкс).

- Диапазон анализируемых длин волн $\Delta \lambda = 260-760$ нм.

- Энергия лазерного импульса $E_{\text{имп}} = 10-100$ мДж.

Специализированное программное обеспечение спектрометра ЛАЭМС позволяет задавать следующие параметры:

- Режим одиночных (временной сдвиг между импульсами 0 мкс, т.е. оба импульса воздействуют на поверхность образца одновременно) и сдвоенных лазерных импульсов (временной интервал между импульсами может изменяться в пределах от 1 до 100 мкс с шагом 1 мкс). Следует отметить что при использовании ЛАЭМС переход от одиночных к сдвоенным лазерным импульсам происходит без изменения суммарной энергии и мощности излучения.

– Количество импульсов в точку, при этом можно дополнительно задавать количество импульсов преобжига – импульсов, которые воздействуют на поверхность перед основными, но спектр от них не регистрируется. Использование импульсов преобжига необходимо при исследовании образцов, поверхность которых покрыта видимыми загрязнениями, окислами, ржавчиной, патиной.

– Энергию сдвоенных лазерных импульсов и частоту их следования.

– Программное обеспечение позволяет перемещать предметный столик с закрепленным образцом в двух плоскостях (вверх-вниз, влево-вправо). Режим «микроскоп» в совокупности со светодиодной подсветкой и прицельным лазером позволяет точно определить метод воздействия лазерного излучения на образец, что является необходимым при исследовании готовых промышленных изделий, предметов искусства и артефактов, ювелирных изделий, образцов, размеры которых не превышают нескольких мм.

Оптическая схема спектрометра ЛАЭМС приведена рис. 1.



Рисунок 1 – Оптическая схема спектрометра ЛАЭМС

Исследование механизмов возбуждения атомных и ионных спектральных спектральных линий при одноимпульсной и двухимпульсной лазерной абляции металлов.

Объектами исследования являлись образцы чистых металлов – меди, цинка, свинца и алюминия. Для каждого из образцов с помощью спектрометра ЛАЭМС были зарегистрированы их атомно-эмиссионные спектры как при одноимпульсной абляции, так при двухимпульсном воздействии (временной сдвиг между сдвоенными импульсами изменялся от 1 до 15 мкс с шагом 1 мкс). В каждом случае с помощью формулы Орнштейна рассчитывалась температура абляционной плазмы и по соотношению относительной интенсивности атомных и ионных линий оценивалась электронная плотность.

Для меди было обнаружено, что переход от одиночных лазерных импульсов к сдвоенным, при фиксированной суммарной энергии мощности приводит к росту аналитического сигнала:

– Для атомной линии 510 нм в 20,6 раз (от 0 до 2 мкс), от 2 до 8 мкс плавное увеличение ин-

тенсивности на 23,5 %. Далее от 10 до 14 мкс происходит плавное уменьшение интенсивности.

– Для ионной линии 490 нм в 14,5 раз (от 0 до 2 мкс), от 2 до 6 мкс увеличение интенсивности на 75 %. Далее от 8 до 14 мкс происходит плавное уменьшение интенсивности.

Атомная линия 510 нм соответствует переходу между уровнями с энергией 11202–30783 см⁻¹, конфигурации 3d⁹4s² (терм ²D) в 3d¹⁰4p (терм ²P⁰); ионная линия 490 нм соответствует переходу между уровнями с энергией 115586 – 135931 см⁻¹, конфигурации 3d⁹(²D_{5/2})4d (терм ²[9/2]) в 3d⁹(²D_{5/2})4f (терм ²[11/2]⁰). Таким образом, переход от одноимпульсного к двухимпульсному режиму не только приводит к росту аналитического сигнала, но и сильно влияет на процесс возбуждения атомов (многократно возрастает роль возбуждения по схеме 3d⁹4s² → 3d⁹(²D_{5/2})4d → 3d¹⁰4p), значительно увеличивает количество ионов, следовательно, электронов в плазме. Следует отметить, что при двухимпульсном воздействии, возбуждение уровней по схеме 3d⁹4s² → 3d⁹(²D_{5/2})4d → 3d¹⁰4p и 3d⁹4s² → 3d¹⁰4p, являются конкурирующими процессами, на что указывают сопоставимые значения относительной интенсивности.

Переход от одноимпульсной ($\Delta t = 0$ мкс) к двухимпульсной ($\Delta t = 2$ мкс) лазерной абляции ведет к увеличению температуры в образце меди с 7446 К до 7755 К (на 14,4 %), от 2 до 6 мкс происходит увеличение температуры на 10,1 %. После 6 мкс происходит плавное снижение температуры, в следствии того, что плазма становится менее плотной и дополнительное возбуждение вторым импульсом не происходит.

Аналогичные зависимости были получены и для остальных металлов – цинка, свинца и алюминия, что указывает.

Выводы. Переход от одноимпульсной к двухимпульсной лазерной абляции при неизменной суммарной энергии и мощности лазерного излучения, приводит не только к многократному увеличению относительной интенсивности спектральных линий металлов, но и дополнительному прогреву плазмы и росту электронной концентрации. Однако в большинстве случаев рост аналитического сигнала невозможно оценить по увеличению относительной интенсивности только одной спектральной линии, т.к. из-за дополнительного возбуждения и нагрева абляционной плазмы происходит изменение механизма заселения возбужденных уровней, и вырастает роль переходов на более высокорасположенные уровни и существенными становятся ионные линии.

Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воронин [и др.] // ЖПС. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.

УДК 681.5.08

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Залесский В.Б., Конойко А.И., Кравченко В.М., Кузьмицкая А.С.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В данной работе представлена методика измерения характеристик и технические параметры экспериментального образца термооптического преобразователя выполненного на базе интерферометра Фабри-Перо. Испытания проводились на измерительном оборудовании лаборатории фотоэлектроники ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» в соответствии с программой и методикой испытаний на спектрофотометре PV1251B.

Ключевые слова: термооптический преобразователь, инфракрасное излучение, спектральные характеристики, методика измерения.

PROCEDURE FOR MEASURING THE CHARACTERISTICS OF AN EXPERIMENTAL SAMPLE OF A THERMO-OPTICAL CONVERTER

Zalesky V., Konoiko A., Kravchenko V., Kuzmitskaya H.

*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
Minsk, Belarus*

Abstract. This paper presents a technique for measuring the characteristics and technical parameters of an experimental sample of a thermo-optical converter based on a Fabry-Perot interferometer. The tests were carried out on the measuring equipment of the photoelectronic laboratory of the State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” in accordance with the program and test procedure on the Spectrophotometer PV1251B.

Key words: thermo-optical converter, infrared radiation, spectral characteristics, measurement method.

Спектрофотометр PV 1251 представляет собой универсальный спектрофотометр широкой области применения с диапазон длин волн от 315 до 1100 нм. Он оснащен двойным монохроматором с дифракционными решетками 1200 штр/мм. В качестве источника света применяет галогенная лампа.



Рисунок 1 – Внешний вид спектрофотометра PV1251B и термопары

Для оценки технических параметров термооптического преобразователя требуется измерить спектральную зависимость коэффициента пропускания от длины волны $T(\lambda)$ при комнатной температуре (t_1). Выделить требуемый промежуток. Измерить $T(\lambda)$ на данном промежутке. Определить величину длины волны, соответствующую пику коэффициента пропускания на промежутке (λ_1).

Затем включить нагрев образца и дождаться повышения его температуры на 20°C, определить температуру после нагрева (t_2) и измерить $T(\lambda)$.

Измерить величину длины волны после нагрева, соответствующую пику коэффициента пропускания на промежутке λ_2 . Разность температур Δt и длин волн $\Delta \lambda$ определяются по формулам (1) и (2) соответственно:

$$\Delta t = t_2 - t_1. \quad (1)$$

$$\Delta \lambda = |\lambda_1 - \lambda_2|. \quad (2)$$

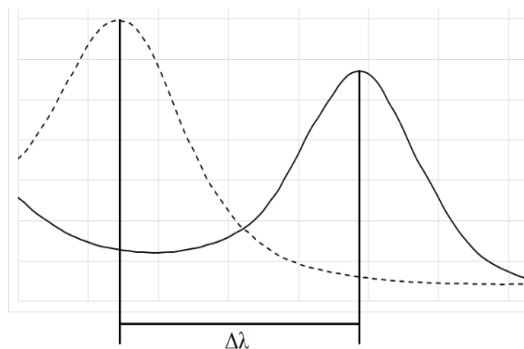


Рисунок 2 – Смещение пика зависимость пропускания от длины волны после нагрева образца

Коэффициент перестройки экспериментального образца ТООП k_T определяется смещение пика $T(\lambda)$ на 1 °С и находится по формуле:

$$k_T = \Delta \lambda / \Delta t. \quad (3)$$

Для оценки крутизна преобразования инфракрасного излучения требуется найти наиболее линейный участок на спаде графика спектра пропускания, как это показано на рис. 3.

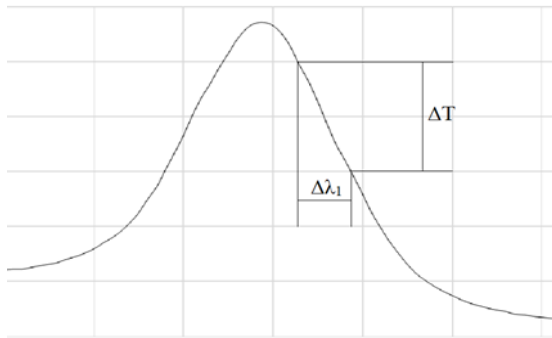


Рисунок 3 – Крутизна преобразования инфракрасного излучения по крутизне кривой спектра пропускания

Затем определить изменение длины волны $\Delta\lambda_1$ и величины коэффициента пропускания ΔT на данном участке. Крутизну преобразования инфракрасного излучения по крутизне кривой спектра пропускания k_p можно найти по формуле:

$$k_p = \frac{\Delta T k_T}{\Delta\lambda_1} k_c, \quad (4)$$

где k_c – коэффициент, учитывающий уменьшения интенсивности падающего излучения на рабочую поверхность ТОП из-за наличия под рабочей базой ТОП светонепроницаемой области имеющего размеры того же порядка, что сканирующий световой пучек (2×5 мм), по оценке $k_c = 3$.

В итоге были получены следующие техниче- ский параметры:

Таблица 1. Технические параметры эксперименталь- ного образца

Максимальный коэффициент пропускания микрорезонатора	0,7
Диапазон изменения рабочей температуры	20 °С
Температурный сдвиг полосы спектрального пропускания микрорезонатора	17,5 нм
Коэффициент перестройки экспериментального образца ТОП	0,875 нм/°С
Крутизна преобразования ИК-излучения	17,81 %/°С

Спектральные зависимости коэффициента пропускания экспериментального образца термооптического преобразователя (ТОП) при изменении температуры показаны на рис. 4.

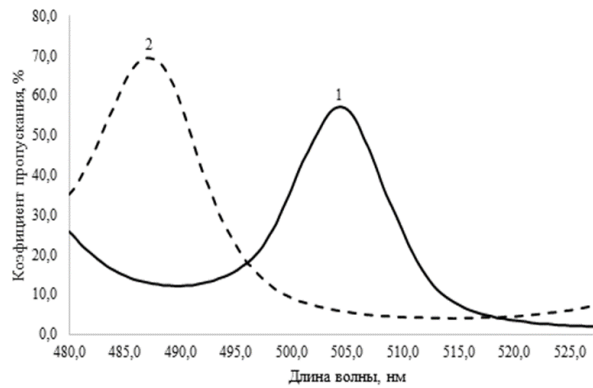


Рисунок 4 – Спектральные зависимости коэффициента пропускания экспериментального образца термооптического преобразователя при изменении температуры (1 – 25,9 °С, 2 – 45,9 °С)

Отношение смещения пика коэффициента пропускания к изменению температуры определяет коэффициент перестройки экспериментального образца ТОП, который составляет $k_T = 0,875$ нм/°С. Это значение в 14,53 раз превышает коэффициент перестройки фильтра, описанного в литературе [7], который составлял порядка 0,06 нм/°С

Литература

1. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков // М. : МИИГА и К. – 2011. – 84 с.
2. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; перевод с англ. С. Н. Бреус, А. И. Головашкин, А. А. Шубин ; под ред. Г. П. Мотулевич // М. : Наука, – 1973. – С. 719.
3. Smith, S. D. Design of Multilayer Filters by Considering Two Effective Interfaces / S. D. Smith // Journal of the optical society of America. – 1958. – Vol. 48, № 1. – P. 43–50.
4. Мустель, Е. П. Методы модуляции и сканирования света / Е. П. Мустель, В. Н. Парыгин // М. : Наука, 1970. – С. 296.
5. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах / А. Ярив, П. Юх; перевод с англ. С. Г. Кривошлыкова, Н. И. Петрова ; под ред. И. Н. Сисакяна // М. : Мир, - 1987. – С. 616.
6. Novel low-cost uncooled infrared camera / Ming Wu [et al.] // Infrared Technology and Applications XXXI. – 2005. – Vol. 5783 – P. 69401I-1.
7. Erdtmann, M. Uncooled dual-band MWIR/LWIR optical readout imager / M. Erdtmann, L. Zhang, G. Jin // SPIE Proc. – 2008. – Vol. 6940. – P. 694012-1-11.

УДК 681.785

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ
В КОЛЬЦЕВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ**

Зарипов М.Р.¹, Алексеев В.А.², Калугин А.И.¹, Куприянов А.А.², Антропова В.С.²

¹Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения РАН

²Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация

Аннотация. Поднимается проблема повышения энергетических характеристик автономных лазерных систем без увеличения потребляемой ими энергии питания. Рассматривается возможность решения этой проблемы путем синхронного сложения пучков от одиночного лазерного источника. Описываются структура и принцип действия экспериментальной установки, предназначенной для исследования синхронного сложения пучков в системе с кольцевой волоконно-оптической линией задержки.

Ключевые слова: синхронное сложение пучков, кольцевая линия задержки, экспериментальная установка, автономная лазерная система.

EXPERIMENTAL SETUP FOR LASER BEAM COMBINING IN RING FIBER DELAY LINE

Zaripov M.¹, Alekseev V.², Kalugin A.¹, Kuprijanov A.², Antropova V.²

¹Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the RAS

²Kalashnikov Izhevsk State Technical University
Izhevsk, Russian Federation

Abstract. The problem of increasing the energy characteristics of autonomous laser systems without increasing the consumed power supply is raised. The possibility of solving this problem by synchronous beam combining for single laser source is considered. The structure and the principle of operation of an experimental setup designed to study the synchronous beam combining in a system with a ring fiber delay line are described.

Key words: synchronous beam combining, ring delay line, experimental setup, autonomous laser system.

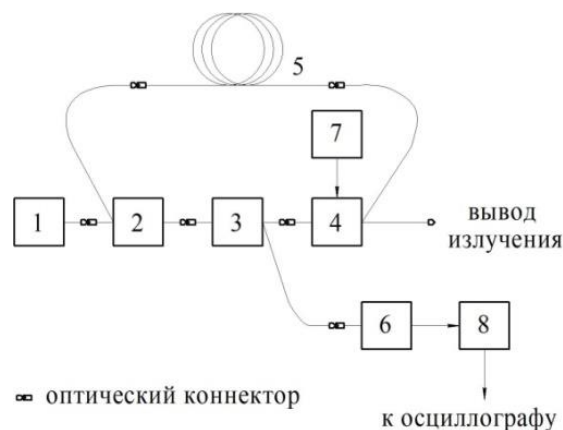
Адрес для переписки: Зарипов М.Р., ул. Школьная, 38-9, г. Ижевск, Российская Федерация
e-mail: zaripov.istu@gmail.com

В настоящее время остро встает задача расширения функций автономных лазерных систем, находящихся свое применение в геодезии, строительстве, медицине, экологическом мониторинге, освоении космоса и т.д. Ее решение предполагает увеличение выходной мощности или выходной энергии импульса лазерного излучения с сохранением прежней степени автономности всей системы в целом без возрастания потребляемой энергии.

К настоящему моменту известно несколько групп способов увеличения выходных энергетических параметров лазерных источников: использование методов компрессии лазерных импульсов [1], введение в состав лазера оптических усилителей [2], а также применение различных схем некогерентного [3] и когерентного [4] сложения лазерных пучков. Однако практическая реализация перечисленных решений сопряжена с возрастанием числа лазерных источников, с увеличением потребления энергии от внешнего источника питания, а также с ухудшением массогабаритных характеристик разрабатываемых лазерных изделий, что отрицательно сказывается на степени их автономности.

Эти недостатки могут быть устранены за счет применения предложенных авторами способов синхронного сложения лазерных пучков [5, 6], которые предполагают использование в составе своих схем одного лазерного источника и

включают необходимость увеличения энергии внешнего источника питания. При этом одной из наиболее простых в реализации является рассмотренная в [6] система с кольцевой волоконной линией задержки, не требующая, в отличие от системы [5], множества волоконно-оптических линий задержки, длины которых должны точно подгоняться для обеспечения синхронного суммирования лазерных пучков.



- 1 – лазерный источник; 2 – 2x1 волоконно-оптический сумматор; 3 – волоконный сплиттер 99:1;
- 4 – 1x2 волоконно-оптический коммутатор; 5 – отрезок волокна задержки; 6 – фотоприемное устройство;
- 7 – блок управления; 8 – блок приема

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В настоящем сообщении предлагается рассмотреть построение экспериментальной установки для исследования возможности сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки.

Изготовленная установка (рис. 1) по своему конструктивному исполнению соответствует варианту исполнения системы с кольцевой волоконной задержки, формируемой на основе 2x1 волоконно-оптического сумматора (далее – ВОС) и 1x2 волоконно-оптического коммутатора (далее – ВОК). Действие таких систем заключается в последовательном синхронном наложении пучков лазерного излучения, поступающих на вход кольцевой линии задержки. При этом пучок, совершивший обход, накапливает в себе за счет сложения энергию излучения с каждым обходом в линии задержки.

Установка действует следующим образом. Лазерный источник с волоконным выходом 1 соединен с первым входом ВОС 2, через который сформированный лазером исходный пучок излучения вводится в кольцевую волоконно-оптическую линию задержки. При этом ВОС в отличие от исходного конструктивного исполнения исследуемой системы подключается к входу ВОК 4 не напрямую, а через волоконный сплиттер 1x2 3. Сплиттер выполняет в установке функцию светоделительного элемента и разделяет пучок, поступивший на его вход, в соотношении 99:1. Причем 1% энергии пучка, вошедшего в сплиттер, отводится на фотоприемное устройство с волоконным вводом (далее – ФПУ) 6, а основная доля энергии остается в рабочей части установки. Выход сплиттера, выводящий 99 % энергии пучка, подключен к входу ВОК, вместе с тем лазерный пучок, поступивший в волоконное «кольцо», через первый выход ВОК проходит в отрезок волокна задержки 5 определенной длины, а затем вновь вводится в кольцевой волоконно-оптический элемент задержки через второй вход ВОС. Процесс накопления энергии излучения идет до тех пор, пока суммарный пучок в «кольце» не будет выведен через второй выход ВОК при его переключении по сигналу с блока управления 7. При этом ФПУ преобразует оптическое излучение в электрический сигнал, который после обработки и усиления в блоке приема 8 поступает на осциллограф для его измерения и последующего анализа. Причем при переключении ВОК на вывод излучения наружу из установки через его второй выход ФПУ позволит зарегистрировать сигнал, пропор-

циональный мощности излучения исходного пучка (далее – сигнал вывода). Вместе с тем переключение ВОК на циркуляцию излучения в волоконном «кольце» через его первый выход обеспечит регистрацию ФПУ сигнала, пропорционального мощности суммарного пучка (далее – сигнал циркуляции). Сравнение величин этих сигналов с помощью осциллографа позволит сделать вывод о возможности сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки.

В ходе проведения экспериментов на установке было замечено, что сигнал циркуляции случайным образом изменяет свою амплитуду за время, в течение которого происходит циркуляция пучка в кольцевой задержке. При этом сигнал вывода остается постоянным. Случайно изменяющаяся амплитуда сигнала циркуляции превышает амплитуду сигнала вывода, что уже может свидетельствовать о сложении мощностей исходных пучков в волоконном «кольце» при формировании суммарного пучка. Но, несмотря на это, необходимо обеспечить постоянство во времени амплитуды регистрируемого сигнала циркуляции для повышения достоверности проводимых на установке измерений. Для этого дальнейшая доработка установки должна пойти по пути, связанном с заменой одномодовых волоконных элементов циркуляции и вывода излучения на многомодовые. Такой способ доработки не потребует применения сложной аппаратуры контроля и согласования фаз полей исходного и суммарного пучков в случае обеспечения их когерентного сложения.

Литература

1. Exawatt-Zettawatt pulse generation and applications / G. A. Mourou [et al.] // *Optics Communications*, 2012. – Vol. 285. – P. 720–724.
2. Solid-state Yb: YAG amplifier pumped by a single-mode laser at 920 nm / I. V. Obionov [et al.] // *Quantum Electronics*, 2018. – Vol. 48, № 3. – P. 212–214.
3. Motes, A. Laser beam combining / A. Motes. – Rio-Rancho : AM Photonics, 2015. – 132 p.
4. Brignon, A. Coherent laser beam combining / A. Brignon. – Weinheim : Wiley-VCH, 2013. – 509 p.
5. Alekseev, V. A. Increasing the peak power of a pulsed laser source using optical delay lines / V. A. Alekseev, A. S. Perminov, S. I. Yuran // *J. Opt. Technol.* – 2018. – Vol. 85, iss. 12. – P. 746–751.
6. Energy-efficient source of pulsed laser radiation based on a ring delay line / V. A. Alekseev [et al.] // *J. Opt. Technol.* – 2021. – Vol. 88, iss. 7. – P. 360–363.

УДК 681.708; 535.231; 535.08

ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ Исаевич А.В.

*ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены методы измерения волнового фронта и измерительная установка для контроля формы волнового фронта в поперечном сечении лазерного пучка. Приводятся методы реконструкции волнового фронта и результаты исследования метрологических характеристик установки.

Ключевые слова: волновой фронт, измерительная установка, форма волнового фронта, лазерный пучок, датчик Шака-Гартмана.

MEASURING THE WAVE FRONT OF LASER RADIATION Isaevich A.

*B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. Methods of wavefront measurement and a measuring unit for monitoring the shape of the wavefront in the cross section of a laser beam are considered. The methods of reconstruction of the wavefront and the results of the study of the metrological characteristics of the unit are presented.

Keywords: wavefront, measuring unit, wavefront shape, laser beam, Shak-Hartman sensor.

*Адрес для переписки: Исаевич А.В., пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Республика Беларусь
e-mail: a.isaevich@ifanbel.bas-net.by*

Введение. Измерение волнового поля оптического излучения необходимо для решения широкого круга исследовательских и прикладных задач оптической метрологии, лазерной физики, медицины, адаптивной оптики, астрономии и многих других областей науки и техники. Прежде всего, такие задачи возникают в лазерной физике, где требуется контроль качества генерируемых лазерных пучков, а также при создании адаптивных оптических систем.

Методы измерения волнового фронта. Форма волнового фронта непосредственно связана с фазой волны, но в оптическом диапазоне фаза не может быть измерена непосредственно, в связи с этим необходимо трансформировать фазу волны в интенсивность. Поэтому методы измерений формы волнового фронта в оптике основаны на таком преобразовании исходного поля излучения, в результате которого появляется зависимость интенсивности оптического излучения на фотоприемнике от искомой фазовой функции. Устройства, измеряющие форму волнового фронта, можно разбить на два вида: интерферометрические и геометрические.

В интерферометрических датчиках используется интерференция двух пучков излучения, взятых от монохроматического источника, причем один из них служит опорным, а другой отличается от него на величину оптической разности хода, подлежащей измерению. На сегодняшний день интерферометры обладают наилучшими точностными характеристиками среди всех устройств, предназначенных для фазовых измерений в оптике. Однако в силу своих особенностей они применимы только для решения достаточно узкого круга задач и не могут являться

оптимальным решением задачи измерения волнового фронта излучения лазеров.

Другими широко распространенными устройствами для измерения фазы оптического волнового поля являются датчики, основанные на законах геометрической оптики и использующие метод Гартмана [1]. Исследуемый волновой фронт разбивается на отдельные пучки, для каждого из которых определяется направление его распространения, которое соответствует локальному наклону исходного волнового фронта в данной точке. По локальным наклонам волнового фронта восстанавливается распределение фазы исследуемого волнового поля. Основными преимуществами метода Гартмана являются простота реализации и интерпретации результатов, а также возможность измерить фазовый фронт на всей апертуре исследуемого волнового пучка за одно измерение. В то же время метод Гартмана обладает рядом серьезных недостатков.

Устранить недостатки метода Гартмана позволяет датчик Шака-Гартмана, в котором вместо диафрагмы используется растр из микролинз [2]. Волновой фронт исследуемого пучка излучения разбивается растром из микролинз на субапертуры. Каждый из образовавшихся пучков фокусируется соответствующей линзой, в результате чего в фокальной плоскости линз образуется массив фокальных пятен, по положению которых, зарегистрированному при помощи фотоприемника, определяют локальный наклон волнового фронта, падающего на каждую из микролинз. Когда проходящий волновой фронт плоский, все сфокусированные изображения расположены в правильной сетке, обусловленной расположением линз. Если падающая волна имеет какие-либо искаже-

ния, то изображения смещаются со своих номинальных значений. Изображение фокальных пятен называется гартманограммой. По ее виду можно судить об искривленности волнового фронта.

Измерительная установка. Основными элементами установки для контроля формы волнового фронта и пространственных характеристик излучения лазеров, созданной в Институте физики НАН Беларуси [3] являются датчики Шака-Гартмана производства фирмы Imagine Optic и анализаторы профиля лазерного пучка производства фирмы Ophir Optronics Solutions. Принцип работы измерительной установки основан на одновременном измерении распределений плотности мощности $E(x,y,z)$ [энергии $H(x,y,z)$ для импульсных лазеров] и фазы $\Phi(x,y,z)$ лазерного излучения в поперечном сечении пучка с координатой z . Для этого анализатор профиля лазерного пучка и датчик Шака-Гартмана помещается в положение с координатой z нормально к направлению распространения излучения или используется оптическая система, проецирующая изображение плоскости с координатой z на приемные площадки анализатора и датчика Шака-Гартмана.

С помощью специального программного обеспечения производится обработка изображений и определяются распределения плотности мощности (энергии) на основании которых рассчитываются пространственные характеристики лазерного излучения, а также положения пятен на детекторе датчика Шака-Гартмана. Эти положения затем выражаются как локальные наклоны с использованием расстояния между пикселями детектора и точного расстояния между матрицей микролинз, и приемной поверхностью детектора. Поверхность волнового фронта или волновой фронт получается в результате расчета, основанного на локальных наклонах, измеренных датчиком Шака-Гартмана. Реконструкция волнового фронта осуществляется двумя методами: прямого численного интегрирования (зональная реконструкция) и модальной аппроксимации с использованием полиномов Цернике или Лежандра. Преимущества зональной реконструкции волнового фронта: может адаптироваться к любой возможной форме зрачка. Ее концепция интегрирования сигналов локальных наклонов позволяет сохранить всю пространственную высокочастотную информацию. Недостатки: реконструированный волновой фронт чувствителен к любому шуму, присутствующему на локальных наклонах. При зональной реконструкции не вычисляются коэффициенты полиномов, которые часто полезны в оптической метрологии.

Преимущества модальной реконструкции заключается в обеспечении наилучшего определения низких пространственных частот волнового фронта. Эти низкие частоты часто представляют интерес для пользователей (наклоны, кривизна и

абберации третьего порядка). Этот метод вычисляет коэффициенты многочленов восстановления (Лежандра или Цернике). Многочлены Цернике часто используются в области оптической метрологии. Основным недостатком метода модальной реконструкции является то, что «он фильтрует» высокие пространственные частоты. Пространственные высокочастотные данные фильтруются во время реконструкции. Он также вводит ограничение: зрачок должен иметь простую форму (круглую или прямоугольную).

Возможности установки. Установка позволяет измерять в поперечном сечении лазерного пучка, перпендикулярном его распространению, пространственные характеристики излучения и распределения локальных градиентов волнового фронта непрерывных и импульсных лазеров, на основании которых рассчитываются в соответствии с требованиями СТБ ИСО 15367-2-2016 [5] следующие параметры лазерного излучения: измеренный и скорректированный волновой фронт, функция абберации волнового фронта, дефокус, нерегулярность волнового фронта, взвешенная среднеквадратическая деформация, коэффициенты полиномов (для модальной реконструкции волнового фронта), воспроизводимость волнового фронта и др.

Исследования метрологических характеристик установки показали, что она обеспечивает измерения локальных наклонов волнового фронта лазерного излучения, на основании которых осуществляется вычисление градиентов волнового фронта и последующая модальная и зональная реконструкция волнового фронта излучения в спектральном диапазоне от 350 до 1700 нм с пространственным разрешением 100 мкм. Максимальный наклон измеряемого волнового фронта излучения составляет $\pm 3^\circ$, минимальный наклон волнового фронта – 0,8 мкрад, минимальный радиус кривизны – 0,01 м, стандартная неопределенность абсолютных измерений волнового фронта не превышает 3 нм, относительных измерений – 1 нм.

Литература

1. Hartmann, J. Objectivuntersuchungen / J. Hartmann // Z. Instrum. – 1904, № 1. – P. 33–97.
2. Platt, B. C. History and principles of Shack-Hartmann wavefront sensing / B. C. Platt, R. Shack // J. Refract Surg. – 2001. – Vol. 17. – P. 573–577.
3. Длугунович, В. А. Установка для измерения волнового фронта излучения лазеров. / В. А. Длугунович, Д. О. Дунец, А. В. Исаевич // Метрология-2019: Тезисы докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27-28 марта 2019 г. / Под общ. ред. канд. техн. наук Гуревича В. Л. – Мн. : БелГИМ, 2019. – С. 89–93.
4. Лазеры и относящееся к лазерам оборудование. Методы испытаний для определения формы волнового фронта лазерного пучка. Часть 2. Датчики Шака-Гартмана : СТБ ISO 15367-2-2018. – Введ. 01.12.18. – Минск: Госстандарт, 2018. – 30 с.

УДК 681.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Киль И.А., Погорелов М.Г.

*Тульский государственный университет
Тула, Российская Федерация*

Аннотация. В докладе определены преимущества КВИК-диапазона технического зрения для его применения в составе оптико-электронных систем, осуществляющих обзор местности и объектов.

Ключевые слова: оптико-электронные системы, матричный приемник излучения, коротковолновый ИК-диапазон.

DETERMINING THE ADVANTAGES OF USING A SHORT WAVE INFRARED TECHNICAL VISION CHANNEL

Kil I., Pogorelov M.

Abstract. The report identifies the advantages of the SWIR-range of technical vision for its use in the composition of optoelectronic systems that review terrain and objects.

Key words: optoelectronic systems, matrix radiation detector, short-wave infrared range.

*Адрес для переписки: Киль И.А., пр. Ленина, 92, г. Тула 300000, Российская Федерация
e-mail: johnnykia@yandex.ru*

В настоящее время коротковолновый инфракрасный (КВИК) канал технического зрения все большее входит в состав новых оптико-электронных систем (ОЭС). Диапазон длин волн данного канала 0,9–1,7 мкм. КВИК-канал может использоваться для решения различных задач: для определения уровня влажности, для выявления степени увлажненности предметов; определение гнилых или испорченных зерен, овощей, ягод и фруктов; относительное содержание влаги в почве для выявления болотной местности. Так же, службы спасения применяют ОЭС с КВИК-диапазоном, чтобы найти центр возгорания в различной местности, или человека в разнообразных и неблагоприятных условиях затрудненной видимости, например, из-за сильного тумана.

Исследования в разработке и оптимизации ОЭС включающих в себя КВИК-канал технического зрения обладают высокой актуальностью, так как преимущество по энергетике над телевизионным может достигать от одного до нескольких раз в зависимости от метеорологических условий.

Для доказательства выше приведенного выполним расчет отношения сигнал шум по методике [3]. Рассмотрим дневное наблюдение объекта, с безоблачным небом в южной атмосфере двумя каналами технического зрения – КВИК и ТВ, параметры которых приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры каналов технического зрения

Параметр	ТВ	КВИК
Тип МПИ	КМОП	InGaAs
Формат МПИ, эл-тов	1280×1024	640×512
Размер пикселя, мкм	5,5	15
Фокусное расстояние, мм	100	100
Диаметр входного зрачка, мм	30	30
Коэффициент пропускания объектива	0,85	0,85

Стоит отметить, что в рассмотренном примере взяты одинаковые по габаритам оптические системы, но разные приемники излучения. Следовательно, и разрешение таких каналов будет разным, что необходимо учитывать при комплексной оценке возможности размещения того или иного типа канала в ОЭС.

Графики квантовой чувствительности матриц представлены на рис. 1, 2.

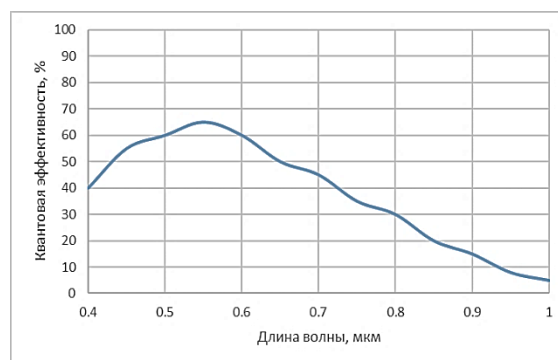


Рисунок 1 – квантовая чувствительность ТВ-канала

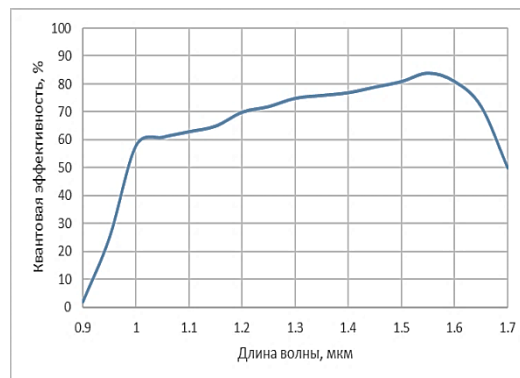


Рисунок 2 – квантовая чувствительность КВИК-канала

Графики пропускания атмосферы для метеорологической дальности видимости представлены на рисунках 3, 4 [2].

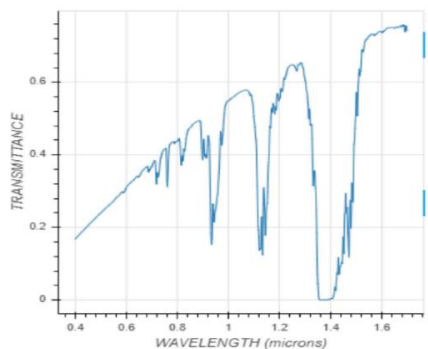


Рисунок 3 – Коэффициент пропускания воздуха в южной атмосфере ТВ-канала

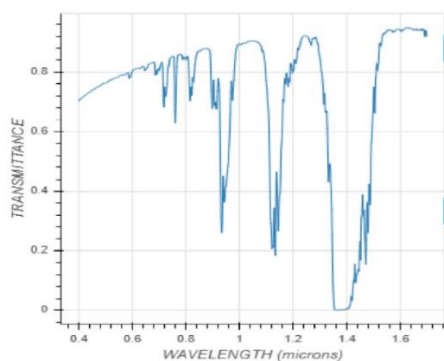


Рисунок 4 – Коэффициент пропускания воздуха в южной атмосфере КВИК-канала

Для описанных условий по методике, был выполнен расчет отношения сигнал/шум (рис. 5).

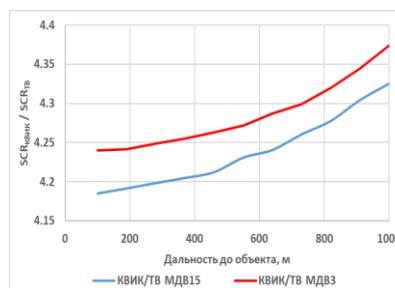


Рисунок 5 – отношения сигнал/шум для КВИК и ТВ каналов технического зрения

Как следует из расчетных данных, отношение сигнал/шум в КВИК-канале технического зрения выше отношения сигнал/шум в ТВ-канале приблизительно в четыре раза и с большей дальностью нахождения объекта – это значение становится больше.

Стоит также отметить, что в рассмотренном расчете были взяты одинаковые по размерам оптические системы, но разные матричные приемники излучения. Это означает, что и разрешение данных каналов технического зрения будет разным, что стоит учитывать при полном анализе возможности применения типа канала в ОЭС.

Литература

1. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко – М.: МИИГА и К, 2011. – 84 с.
2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.spectral.com.
3. Holst, G. C. Electro-optical imaging system performance / G. C. Holst // JCD Publishing and SPIE, 2017. – 408 с.

УДК 621.375.826

РОСТ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$

Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И., Кулешов Н.В.

Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Исследован процесс роста кристаллов александрита $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ с различной концентрацией трехвалентных ионов хрома. Измерены спектры поглощения образцов кристалла для состояния поляризации излучения параллельных кристаллографическим осям b и c.

Ключевые слова: рост кристаллов, спектры поглощения, кристалл, александрит, трехвалентные ионы хрома.

GROWTH AND SPECTROSCOPIC PROPERTIES OF $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ CRYSTALS

Kisel V., Gorbachenya K., Goman V., Kuleshov N.

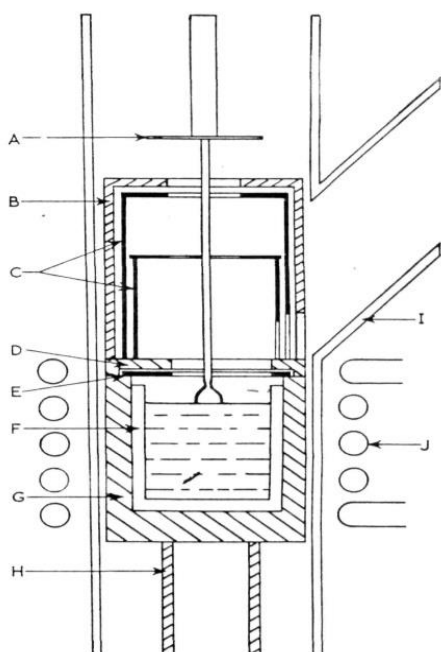
Center for Optical Materials and Technologies of BNTU
Minsk, Belarus

Abstract. Growth processes of alexandrite $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ crystals were investigated for different concentration of trivalent chromium ions. Absorption spectra of different crystal samples were measured with light polarizations parallel to the b and c axes.

Key words: crystal growth, absorption spectra, crystal, alexandrite, trivalent chromium ions.

Адрес для переписки: Кисель В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: VEKisel@bntu.by

Кристаллы александрита выращивались методом Чохральского в иридиевых тиглях. Для роста кристаллов BeAl_2O_4 материалом тиглей является иридий, который является единственным химически стойким материалом с температурой плавления 2410°C , что лишь немногим выше, чем температура плавления кристаллов александрита, что усложняет процесс роста, и получаемое качество кристаллов за счет возможного включения материала тигля в объем кристалла. Поэтому для уменьшения тепловой нагрузки на стенки тигля использовалась низкоградиентная тепловая схема роста. В процессе роста основное внимание уделено однородности стенок тигля, так как любая неоднородность, такая как уменьшение или увеличение толщины стенок тигля может вызывать недогрев либо локальный перегрев и проплавление тигля с соответствующим выходом расплавленных материалов исходной шихты.



A – отражающий диск Pt/20%Rh;
B – алюминиевый чехол; *C* – иридиевые экраны;
D – магниевая прокладка; *E* – иридиевое кольцо;
F – иридиевый тигель; *G* – магниевый чехол;
H – алюминиевое основание; *I* – кварцевая обшивка;
J – радиочастотный индуктор

Рисунок 1 – Установка для выращивания монокристаллов александрита методом вертикального вытягивания

В схему роста был введен иридиевый экран над тиглем, который позволил резко снизить радиальные градиенты в расплаве, что помогает предотвратить расплавление тигля и, в конечном итоге, позволяет улучшить качество выращенных кристаллов. Установлено, что верхние иридиевые экраны позволили снизить температурные градиенты в зоне охлаждения кристалла и, тем самым,

снизить внутренние напряжения в нем, что должно приводить к уменьшению искажения волнового фронта в лазерном элементе и улучшению качества пятна выходного излучения, излучаемого лазером за счет снижения величины внутренних кристаллических напряжений. Схема ростовой установки представлена на рис. 1.

В качестве атмосферы роста использовался азот высокой очистки с дополнительным добавлением в атмосферу роста кислорода (0.5 % к обьему азота).

Для измерения спектров поглощения в поляризованном свете из кристаллов $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ были изготовлены пластинки с ориентацией вдоль кристаллографической оси *c*, для записи спектров с поляризацией излучения параллельной осям *a* и *b* кристалла, наиболее интересным для конечных применений. Измерение производилось при комнатной температуре на двухлучевом спектрофотометре Varian CARY 5000 в спектральной области от 300 до 750 нм, соответствующей энергетическим переходам в поглощении трехвалентных ионов хрома.

На рис. 2 и рис. 3 приведены спектры коэффициентов поглощения кристалла $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ для *a* и *b* поляризаций излучения в кристалле.

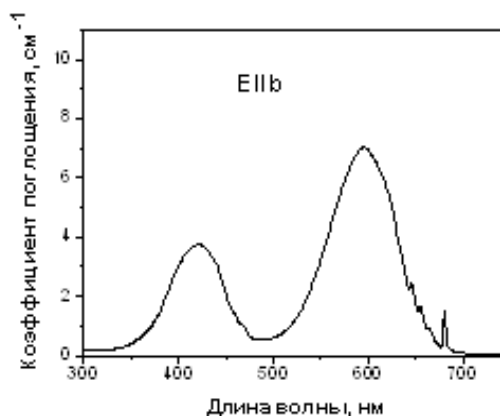


Рисунок 2 – Спектр поглощения кристалла $\text{Cr}^{3+}(0,135\%):\text{BeAl}_2\text{O}_4$ для E//b поляризации излучения

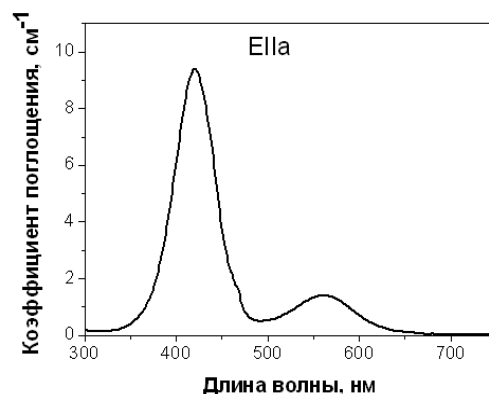


Рисунок 3 – Спектр поглощения кристалла $\text{Cr}^{3+}(0,135\%):\text{BeAl}_2\text{O}_4$ для E//a поляризации излучения

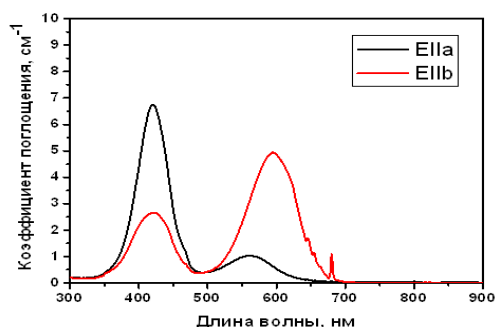


Рисунок 4 – Спектр поглощения кристалла $\text{Cr}^{3+}(0,1\%):\text{BeAl}_2\text{O}_4$ для E//a поляризации излучения

Для образцов, спектры которых представлены на рисунках, содержание ионов трехвалентного хрома составляло около 0,135 ат. %.

Две наиболее интенсивные полосы поглощения, интересные с точки зрения организации диодной накачки, наблюдаются на длине волны около 600 нм для поляризации излучения параллельной оси b кристалла с пиковым значением около 7 см^{-1} и на длине волны около 420 нм для

поляризации излучения параллельной оси a кристалла с пиковым значением около $9,4\text{ см}^{-1}$.

При снижении концентрации ионов Cr^{3+} до 0.1 ат.% наблюдается пропорциональное снижение коэффициентов поглощения в кристаллах. Поляризованные спектры поглощения образца представлены на рис. 4.

Для диодной накачки наибольший интерес представляет E//b поляризация, так как в данной области имеются коммерчески доступные источники полупроводниковой накачки с длинами волн генерации в области 638 нм на соединениях AlGaInP. Коэффициенты поглощения в данной спектральной области снижается до $2,9\text{ см}^{-1}$. Использование полосы поглощения в спектральной области около 420 нм ограничено отсутствием подходящих источников полупроводниковой накачки, а также значительным увеличением относительного Стоксового сдвига между длинами волн накачки и генерации, что существенно снижает максимальные эффективности генерации и увеличивает тепловую нагрузку в активном элементе.

УДК 621.375.826

КРИСТАЛЛЫ $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ: РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Кисель В.Э.¹, Горбаченя К.Н.¹, Руденков А.С.¹, Гурецкий С.А.², Кулешов Н.В.¹

¹Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ

²ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассмотрены особенности роста кристаллов двойных вольфраматов с высоким содержанием трехвалентных ионов иттербия. Исследована зависимость времени жизни возбужденного состояния $^2\text{F}_{5/2}$ ионов Yb^{3+} в зависимости от содержания активных центров в кристалле с учетом эффектов перепоглощения.

Ключевые слова: кристаллы двойных вольфраматов, трехвалентные ионы иттербия, кинетика затухания люминесценции.

HEAVILY-DOPED $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ CRYSTALS: GROWTH AND SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES

Kisel V.¹, Gorbachenya K.¹, Rudenkov A.¹, Guretskii S.², Kuleshov N.¹

¹Center for Optical Materials and Technologies of BNTU

²SSPA “Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus”

Minsk, Belarus

Abstract. Features of highly Yb^{3+} -doped double tungstate crystals growth were discussed. Lifetime measurements of $^2\text{F}_{5/2}$ upper laser level were investigated in dependence on Yb^{3+} content in the crystal taking into account reabsorption effects.

Key words: double tungstate crystals, trivalent ytterbium ions, luminescence decay kinetics.

Адрес для переписки: Кисель В.И., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

e-mail: VEKisel@bntu.by

Кристаллы калий-иттриевого ($\text{KY}(\text{WO}_4)_2$) вольфрамата относятся к ряду двойных калий-редкоземельных вольфраматов. Кристаллы являются моноклинными с пространственной группой симметрии $C_{2h}^6 - C2/c$. Параметры эле-

ментарной кристаллической ячейки: $a = 8,05\text{ \AA}$, $b = 10,33\text{ \AA}$, $c = 7,54\text{ \AA}$, $\beta = 94^\circ$. Ионы Yb^{3+} замещают в данных соединениях ионы Y^{3+} в позициях с локальной симметрией C_2 . Образцы монокристаллов были выращены путем кристаллиза-

ции из раствора в расплаве $K_2WO_4+WO_3$ модифицированным методом Чохральского. В качестве шихты использовался окисел редкоземельного элемента. Были получены образцы высокого оптического качества с содержанием ионов Yb^{3+} от 0,2 ат. % до 100 ат. % по отношению к ионам Y^{3+} . С оптической точки зрения кристаллы являются двуосными. Главные значения показателей преломления кристалла $Yb^{3+}:KY(WO_4)_2$ на длине волны 1030 нм составляют: $n_g = 2,017$, $n_m = 1,982$, $n_p = 1,946$ [1]. Теплопроводность кристаллов составляет около $3,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль оси оптической индикатрисы N_g , $3,0 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль N_m и $2,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}^{-1}$ вдоль N_p [2].

Спектры поглощения измерялись для кристалла $Yb:KY(WO_4)_2$ с содержанием ионов иттербия от 0,2 ат. % до 100 ат. % в области 850–1100 нм, для трех поляризаций излучения (соответствующих осям индикатрисы показателя преломления кристалла N_m , N_p , N_g) при комнатной температуре. Спектры для кристалла $Yb(5 \text{ ат. \%}):KY(WO_4)_2$ представлены на рис. 1. Измерения проводились на спектрофотометре CARY 5000, спектральное разрешение составляло 0,2–0,4 нм. В спектрах поглощения для поляризации $E//N_m$ наблюдается сильная полоса с максимумом на длине волны 981,2 нм, полушириной около 3,5 нм. Максимальный коэффициент поглощения для кристалла $Yb(5 \text{ ат. \%}):KY(WO_4)_2$ составлял около 50 см^{-1} . При снижении или повышении концентрации наблюдалось пропорциональное концентрации изменение коэффициентов поглощения.

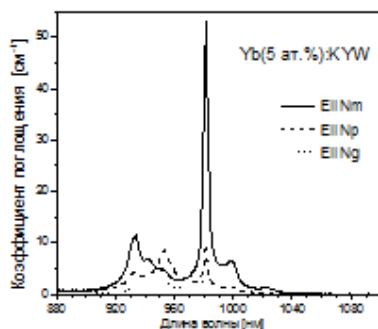


Рисунок 1 – Поляризованные спектры поглощения кристалла $Yb(5 \text{ ат. \%}):KYW$: $E//N_m$ (сплошная линия), $E//N_p$ (штриховая линия), $E//N_g$ (пунктирная линия)

Для записи кинетик затухания люминесценции с характерными временами более 100 нс использовалась экспериментальная установка, построенная на основе Nd:YAG лазера с модулированной добротностью, третьей гармоникой (355 нм) которого накачивался параметрический генератор света на основе нелинейных кристаллов ВВО. Длительность импульса возбуждения составляла около 15 нс. Излучение люминесценции собиралось объективом с поверхности образца и проходило через монохроматор МДР-12.

Регистрация сигнала проводилась InGaAs фотоприемником с постоянной времени $<5 \text{ нс}$ и цифровым осциллографом Tektronics TDS3052B с полосой пропускания 500 МГц. Данные собирались и усреднялись по 50-ти измерениям для каждого образца. Относительная погрешность измерений составила менее 5 %.

Перекрытие полос поглощения и люминесценции в материалах, легированных трехвалентными ионами иттербия приводит к необходимости корректного учета эффектов перепоглощения излучения люминесценции для получения достоверной информации о времени жизни возбужденного состояния ионов иттербия $^2F_{5/2}$ в различных матрицах [3, 4]. В работе измерения кинетик затухания люминесценции ионов Yb^{3+} проводилось с использованием кристаллического порошка, помещенного в иммерсионную жидкость для снижения влияния эффекта полного внутреннего отражения. В качестве иммерсионной жидкости использовался глицерин, являющийся прозрачным в спектральной области около 1 мкм и имеющий показатель преломления $n = 1,4633$ на длине волны $\lambda = 1030 \text{ нм}$. Размеры частиц порошка не превышали 5–70 мкм и были заведомо меньше длины поглощения ($1/\alpha$) в кристалле для конкретной длины волны возбуждающего излучения.

Измерения проводились с уменьшением весовой концентрации порошка в глицерине. Начиная с определенного содержания порошка в суспензии, время жизни возбужденного состояния ионов иттербия оставалось постоянным, что свидетельствовало об устранении влияния эффектов перепоглощения на измеренное значение времени жизни возбужденного состояния трехвалентных ионов иттербия. Зависимость времени затухания люминесценции для образцов $Yb(0,2 \text{ ат. \%}):KY(WO_4)_2$ и $Yb(100 \text{ ат. \%}):KY(WO_4)_2$ представлено на рис. 2.

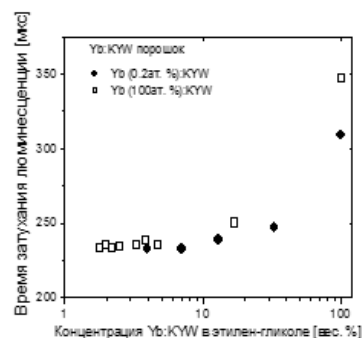


Рисунок 2 – Зависимость времени затухания люминесценции в порошке кристалла $Yb:KYW$ от весовой концентрации порошка в этиленгликоле

Видно, что при изменении концентрации от 0,2 ат. до самоактивированного кристалла $KYb(WO_4)_2$ время жизни верхнего лазерного состояния $^2F_{5/2}$ ионов Yb^{3+} остается постоянным, что свидетельствует об отсутствии эффектов концен-

трационного тушения люминесценции в кристаллах калий-иттриевого вольфрамата и, соответственно, о высоком качестве кристаллов в широком диапазоне концентраций активных центров.

Проведены кинетические измерения времени жизни возбужденного состояния трехвалентных ионов иттербия в кристаллах калий-иттриевого вольфрамата, установлено отсутствие концентрации тушения люминесценции для содержания ионов Yb^{3+} до 100 ат. % в кристалле.

Литература

1. Crystal growth, optical and spectroscopic characterisation of monoclinic $\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ co-doped with Er^{3+}

and Yb^{3+} / X. Mateos [et al.] // Optical Materials. – 2006. – Vol. 28, № 4. – P. 423–431.

2. Biswal, S. Thermo-optical parameters measured in ytterbium-doped potassium gadolinium tungstate / S. Biswal, S. P. O'Connor, S. R. Bowman // Appl. Opt. – 2005. – Vol. 44, № 15. – P. 3093–3097.

3. Sumida, D. S. Effect of radiation trapping on fluorescence lifetime and emission cross section measurements in solid-state laser media / D. S. Sumida, T. Y. Fan // Opt. Lett. – 1994. – Vol. 19, № 17. – P. 1343–1345.

4. Kühn, H. Model for the calculation of radiation trapping and description of the pinhole method / H. Kühn [et al.] // Opt. Lett. – 2007. – Vol. 32, № 13. – P. 1908–1910.

УДК 681.7.023.72

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнецик В.О., Павлюковец Е.Ю., Судников Г.А., Али-заде Э.Т.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена кинематика относительного движения инструмента и правильника без осцилляции верхнего звена, при этом скольжение сопряженных поверхностей имеет место благодаря вращению инструмента и правильника, установленных с определенным эксцентриситетом. Получено выражение для определения скорости скольжения в любой точке контакта сопряженных поверхностей.

Ключевые слова: схема обработки, регулировка движения, плоскостность инструмента, скорость скольжения, равномерное срабатывание.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF FORMATION OF A FLAT TOOL FOR PROCESSING CONICAL SURFACES

Kozeruk A., Diaz Gonzalez R., Kuznechik V., Pavlyukovets E., Sudnikov G., Ali-zade E.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. The kinematics of the relative movement of the tool and the straightener without oscillation of the upper link is considered, while the sliding of the mating surfaces takes place due to the rotation of the tool and straightener, installed with a certain eccentricity. An expression is obtained for determining the sliding speed at any point of contact of mating surfaces.

Key words: processing scheme, motion control, tool flatness, sliding speed, uniform response.

Адрес для переписки: Козерук А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kozeruk@bntu.by

Процесс формообразования конических поверхностей оптических деталей методом свободного притира основан на копировании заготовкой детали рабочей поверхности инструмента. Следовательно, для получения конических изделий надлежащего уровня качества должна быть организована непрерывная правка изборозжденной рабочей поверхности инструмента и обеспечена необходимая ее плоскостность. Для разработки инженерных методов управления процессом формообразования исполнительной поверхности инструмента требуется моделирование процесса формообразования плоских поверхностей.

Рассмотрим обработку плоских деталей без осцилляции верхнего звена (рис. 1). Относительное движение сопряженных поверхностей в этом случае имеет место благодаря вращению инструмента и правильника вокруг своих осей, установленных с эксцентриситетом e [1].

Пусть верхнее звено вращается с угловой скоростью ω_B , нижнее – ω_H . В зоне контакта инструмента и правильника выберем произвольную точку M (рис. 1, б) и проведем через нее окружности на рабочих поверхностях нижнего и верхнего звеньев радиусами r_H и r_B соответственно.

Векторы линейных скоростей \vec{v}_H и \vec{v}_B движения нижнего и верхнего звеньев в данной точке равны

$$\vec{v}_H = \vec{\omega}_H \vec{r}_H, \quad (1)$$

$$\vec{v}_B = \vec{\omega}_B \vec{r}_B. \quad (2)$$

Вектор скорости относительного скольжения \vec{v} в точке M представим в виде

$$\vec{v} = \vec{v}_H - \vec{v}_B, \quad (3)$$

или

$$\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_H. \quad (4)$$

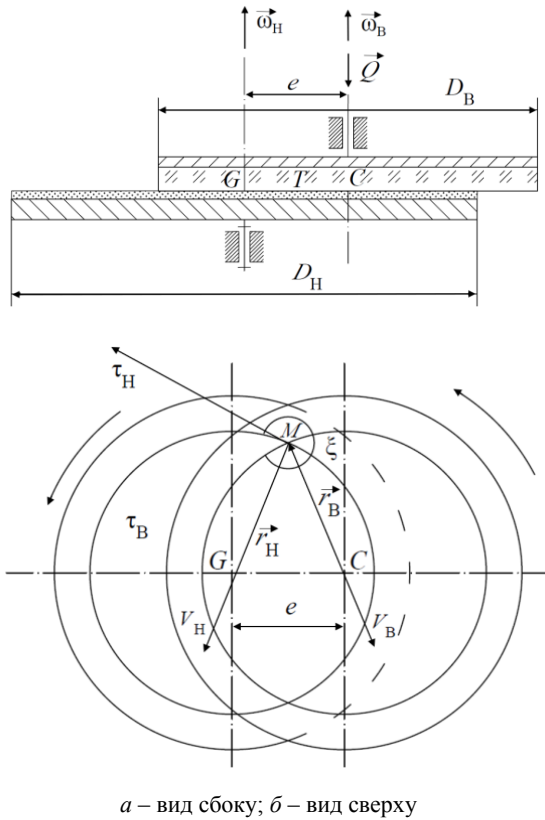


Рисунок 1 – Схема обработки плоских поверхностей без осцилляции верхнего звена:

Первая запись определяет скорость скольжения нижнего звена относительно верхнего, вторая – скорость верхнего относительно нижнего в точке M . Эти скорости равны по модулю, но противоположны по направлению. С учетом (1–4) можно записать:

$$\vec{v} = \vec{\omega}_H \vec{r}_H - \vec{\omega}_B \vec{r}_B. \quad (5)$$

Проекции векторов, входящих в (5), удобнее записывать в системах координат, связанных с естественными трехгранниками Френе [2].

Система координат $M\tau\nu\beta$, связанная с естественным трехгранником Френе, определяется следующим образом: ось $M\tau$ направлена по касательной к траектории в точке M , являющейся началом системы координат, в сторону движения этой точки; ось $M\nu$ направлена по главной нормали в сторону центра кривизны траектории; ось $M\beta$ – по бинормали так, что $\vec{\beta} = \vec{\tau} \times \vec{\nu}$, где $\vec{\tau}$, $\vec{\nu}$ и $\vec{\beta}$ единичные векторы (орты), направленные по осям $M\tau$, $M\nu$, $M\beta$.

Введем системы координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ и $M\tau_B\nu_B\beta_B$, первая из которых связана с естественным трехгранником Френе, построенном на траектории абсолютного движения точки нижнего звена, совпадающей в рассматриваемый момент времени с сопряженной точкой M , а вторая аналогичным образом связана с верхним звеном

(рис. 1). Оси $M\beta_H$ и $M\beta_B$ совпадают и направлены перпендикулярно рисунку.

В системе координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ векторы $\vec{\omega}_H$, \vec{r}_H , \vec{v}_H имеют следующие проекции:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_H &= (0 \quad 0 \quad \omega_H)^T \\ \vec{r}_H &= (0 \quad -r_H \quad 0)^T \\ \vec{v}_H &= (\omega_H r_H \quad 0 \quad 0)^T. \end{aligned}$$

Проекция вектора \vec{v}_H можно определить также из выражения (1) следующим образом:

$$\vec{v}_H = \vec{\omega}_H \times \vec{r}_H = \begin{pmatrix} \vec{\tau} & \vec{\nu} & \vec{\beta} \\ 0 & 0 & \omega_H \\ 0 & -r_H & 0 \end{pmatrix} = \omega_H r_H \vec{\tau} + 0\vec{\nu} + 0\vec{\beta}.$$

В системе координат $M\tau_B\nu_B\beta_B$ и для верхнего звена имеем:

$$\begin{aligned} \vec{\omega}_B &= (0 \quad 0 \quad \omega_B)^T, \\ \vec{r}_B &= (0 \quad -r_B \quad 0)^T, \\ \vec{v}_B &= (\omega_B r_B \quad 0 \quad 0)^T. \end{aligned}$$

Следовательно, определены проекции векторов \vec{v}_H и \vec{v}_B в своих системах координат. Чтобы найти проекции вектора \vec{v} , надо знать проекции его составляющих \vec{v}_H и \vec{v}_B в какой-нибудь одной системе координат, например, $M\tau_H\nu_H\beta_H$.

Поскольку система координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ получается из системы координат $M\tau_B\nu_B\beta_B$ поворотом последней вокруг оси $M\beta_B$ против часовой стрелки на угол ξ , то выражение для скорости относительного скольжения \vec{v} в координатной форме в системе координат $M\tau_H\nu_H\beta_H$ будет иметь вид

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} v_\tau \\ v_\nu \\ v_\beta \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \omega_H r_H \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_B r_B \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} \omega_H r_H - \omega_B r_B \cos \xi \\ \omega_B r_B \sin \xi \\ 0 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (6)$$

Получим выражение для угла ξ для произвольных точек расположенных в различных частях зоны контакта (рис.1):

$$\xi = \pm \arccos \frac{r_H^2 + r_B^2 - e^2}{2r_H r_B}. \quad (7)$$

Используя выражения (6) и (7), можно определить скорость скольжения в любой точке контакта сопряженных поверхностей по формуле

$$v = \sqrt{\omega_H^2 r_H^2 + \omega_B^2 r_B^2 - \omega_H \omega_B (r_H^2 + r_B^2 - e^2)}.$$

Полученная формула для скорости скольжения правильника относительно плоского инстру-

мента дает возможность рассчитать пути трения в той или иной зоне последнего при различных режимах работы технологического оборудования, что может быть положено в основу создания методики управления процессом формообразования конических оптических деталей на рычажных станках в зависимости от технологической наследственности заготовки.

УДК 681.7.023.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семченко А.Р., Гордейко Р.В., Жогла И.А.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложена схема разбиения притирающихся поверхностей плоского инструмента и детали на кольцевые зоны и сектора, в результате чего образуются элементарные площадки с опорными (расчетными) точками в их центре, для расчета координат которых получены аналитические выражения.

Ключевые слова: коническая поверхность, метод свободного притирания, сепаратор, технологическое оборудование.

SIMULATION OF THE WORKING AREA OF EQUIPMENT FOR PROCESSING TAPERED SURFACES

Kozeruk A., Diaz Gonzalez R., Kuznechik V., Semchenok A., Gordienko R., Zhogla I.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Annotation. A scheme is proposed for dividing the grinding surfaces of a flat tool and part into annular zones and sectors, as a result of which elementary areas with reference (calculated) points in their center are formed, for the calculation of the coordinates of which analytical expressions are obtained.

Key words: conical surface, free grinding method, separator, technological equipment.

*Адрес для переписки: Козерук А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kozeruk@bntu.by*

Детали с коническими поверхностями часто используются в машиностроении, где их получают в жестких осях на металлообрабатывающем станках. Такой метод обработки деталей данного класса для оптического приборостроения неприемлем, поскольку не обеспечивает требуемую точность на которую влияют вибрации технологического оборудования 1-го и 2-го рода (соответственно в системе «заготовка» и в системе «инструмент»).

Отмеченных недостатков лишена обработка деталей с коническими поверхностями по методу свободного притирания, когда заготовка самостанавливается по рабочей поверхности плоского вращающегося инструмента и совершает сложное перемещение по инструменту.

Перспективной является обработка конических поверхностей, при которой реализуется групповое их формообразование, позволяющее получать идентичные по геометрическим параметрам детали. При этом для поддержания необходимой плоскостности рабочей поверхности инструмента, с которой в процессе обработки контактирует образующая конуса, используется

Литература

1. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель ; под ред. М. Н. Семибратова. – М. : Машиностроение, 1985. – 368 с.

2. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск : ВУЗ – ЮНИТИ, 1997. – 176 с.

правильный сепаратор в виде стеклянной пластины с точной рабочей поверхностью и с отверстиями для конических заготовок.

Устройство для групповой обработки деталей с полной конической поверхностью содержит планшайбу 1 (рис. 1) с хвостовиком 2, на которой смонтированы механизмы регулирования угла при вершине конуса, включающие в себя неподвижный кронштейн 3, закрепленный на планшайбе 1, и шарнирно соединенный с ним посредством винта 4 (на рис.1 не показан) подвижный кронштейн 5 с жестко закрепленным лимбом 6 (на рис.1 не показан). На неподвижном кронштейне 3 имеется указатель 7 (на рис.1 не показан), а с подвижным кронштейном 5 соединена втулка 8. Во втулку 8 установлена с возможностью вращения ось 9 наклейной планшайбы 10, на которой неподвижно закреплена обрабатываемая деталь 11, расположенная на рабочей поверхности инструмента 12, смонтированного на шпинделе базового станка 13. Рабочее усилие на деталь сообщается посредством груза 14, расположенного на выходном звене исполнительного механизма базового станка 15,

которое с помощью поводка 16 находится в шарнирном соединении с хвостовиком 2. Правильный сепаратор на рис. 1 не показан.

Устройство работает следующим образом. Деталь 11 жестко закрепляют на наклейной планшайбе 10, ось 9 последней помещают во втулку 8, ослабляют винт 4 и по лимбу 6, используя указатель 7, устанавливают заданный угол α при вершине конуса детали. После этого зажимают винт 4 и планшайбу 1 вместе с деталями устанавливают на рабочую поверхность инструмента 12. В сферический наконечник хвостовика 2 помещают шаровой наконечник поводка 16, устанавливают груз 14 и включают вращение шпинделя базового станка 13 с инструментом 12, а также возвратно-вращательное движение выходного звена исполнительного механизма базового станка 15 с поводком 16, который через хвостовик 2 сообщает аналогичное движение планшайбе 1 с деталями 11 относительно рабочей поверхности инструмента 12.

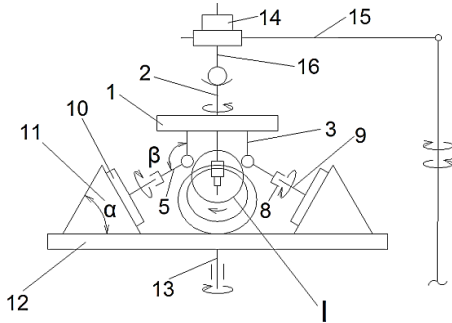


Рисунок 1 – Устройство для обработки конических деталей

Регулирование угла α при вершине конуса детали в процессе ее обработки производят посредством поворота на требуемую величину подвижного кронштейна 5 вместе с втулкой 8, осью 9, наклейной планшайбой 10 с деталью 11 относительно неподвижного кронштейна 3.

Для создания инженерно-управляемых методов обработки с гарантированным достижением требуемых параметров качества конической детали выполним математическое моделирование формообразования плоского инструмента на этом технологическом оборудовании.

Для оценки формы обработанной поверхности правильника (верхнее звено) и сработанной рабочей поверхности инструмента (нижне звено) необходимо выбрать на них достаточно большое количество точек, называемых в дальнейшем опорными, и определить срабатывание в этих точках.

С целью выбора опорных точек рабочую поверхность нижнего звена радиусом R_H разбиваем на n_H кольцевых зон размером Δr_H (рис. 2):

$$\Delta r_H = \frac{R_H}{n_H}$$

и пронумеруем их, начиная с центральной.

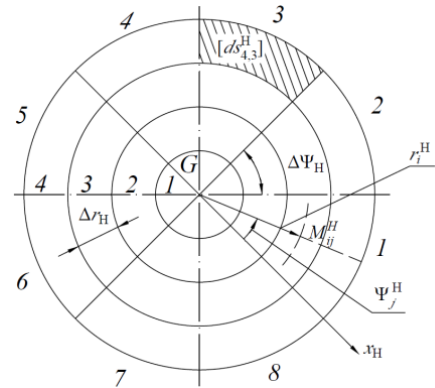


Рисунок 2 – Моделирование сопряженной поверхности нижнего звена

Далее поверхность разбиваем на m_H секторов, размер $\Delta \Psi_H$ которых определяется следующим образом:

$$\Delta \Psi_H = \frac{2\pi}{m_H}$$

Введем жестко связанную с нижним звеном полярную систему координат с полюсом в точке G и полярной осью x_H , направленной вдоль одного из лучей, ограничивающих секторы, которые пронумеруем, начиная от полярной оси, против часовой стрелки.

В результате рабочая поверхность разбилась на $m_H n_H$ элементарных площадок $[dS_{ij}^H]$, $i = \overline{1, n_H}$, $j = \overline{1, m_H}$. Площадка $[dS_{ij}^H]$ представляет собой пересечение кольцевой зоны с номером i с j -тым сектором.

На каждой элементарной площадке $[dS_{ij}^H]$ выберем в качестве опорной точку M_{ij}^H , расположенную на пересечении окружности, делящей пополам i -тую кольцевую зону, и луча, делящего пополам j -тый сектор. Положение этой точки определяется двумя координатами – полярными радиусом r_i^H и углом ψ_j^H .

$$M_{ij}^H = M_{ij}^H(r_i^H, \psi_j^H).$$

В соответствии с построением полярные радиусы для всех опорных точек, лежащих в одной и той же кольцевой зоне, и полярные лучи для всех точек, лежащих в одном и том же секторе, равны:

$$r_i^H = i\Delta r_H - \frac{\Delta r_H}{2} = \Delta r_H \left(i - \frac{1}{2} \right),$$

$$\psi_j^H = j\Delta \Psi_H - \frac{\Delta \Psi_H}{2} = \Delta \Psi_H \left(j - \frac{1}{2} \right).$$

Повторяя эти же рассуждения применительно к верхнему звену.

Предложенная схема разбиения притирающихся поверхностей плоского инструмента и правильника позволила получить аналитические выражения для определения координат опорных

точек на этих поверхностях, что необходимо при моделировании процесса обработки в условиях свободного притирания, обеспечивающего равномерное распределение путей трения по рабочей поверхности инструмента и гарантирующего стабильность ее плоскостности.

УДК 548.732

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кольчевская И.Н., Сацункевич А.Е., Петров П.В., Кольчевский Н.Н.

Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Разработана структурная схема программного комплекса для моделирования рентгенооптических систем, в приближении геометрической оптики методом Монте-Карло. Основная идея заключается в создании отдельных вычислительных модулей, взаимодействующих между собой по средствам файлов данных рентгеновских лучей. Применение данного программного комплекса позволяет задействовать вычислительные мощности многоядерных компьютеров, компьютерные сети и супер ЭВМ, что позволит осуществить когерентный расчет рентгенооптических систем.

Ключевые слова: рентгеновская оптика, численное моделирование, метод Монте-Карло.

SOFTWARE FOR SIMULATION OF X-RAY SYSTEMS

Kolchevskay I., Satsunkevich A., Petrov P., Kolchevsky N.

Belarusian State University
Minsk, Belarus

Abstract. Developed a structural scheme of the software package for simulation of X-ray optical systems, in the approximation of geometric optics using the Monte Carlo method. The main idea is to create separate calculation modules, interacting with each other by using X-ray data files. The use of this software complex allows to increase the computing capacity of multicore computers, computer networks and supercomputers, which will allow to make the coherent simulation of the X-ray optics systems.

Key words: X-ray optics, mathematical modeling, Monte Carlo method.

Адрес для переписки: Кольчевский Н.Н., ул. Курчатова, 1, к. 62, г. Минск 220045, Республика Беларусь
e-mail: kolchevsky@bsu.by

Использование преломляющей оптики в рентгеновской и гамма области спектра долгое время считалось невозможным из-за огромного фокусного расстояния и значительного поглощения излучения материалом линзы. Развитие источников излучения привело к появлению синхротронов 3 и 4 поколения (табл. 1), лазеров на свободных электронах (табл. 2) и нового вида преломляющей оптики, основанной на большом количестве преломляющих поверхностей.

Таблица 1. Синхротроны 3 и 4 поколения

Название	Местоположение	Год	Поколение	Энергия, ГэВ	Эмиттанс, нм*рад
Sirius	Бразилия, Сан-Паулу	2018	4	3	0,28
MAX IV	Швеция, Лунд	2016	4	3	0,33
NSLS-II	США, Брукхейвен	2015	3	3	0,55
SESAME	Иордания, Эль-Балка	2015	3	2,5	24,6
TPS	Китай, Синьчжу	2014	3	3	1,7
PLS-II	Корея, Пхохан	2012	3	3	5,8
ALBA	Испания, Барселон	2011	3	3	4,3
PETRA-III	Германия, Гамбург	2010	3	6	4
SPring-8	Япония, Хёго	1997	3	8	3
APS	США, Чикаго	1995	3	7	3
ESRF	Франция, Гренобль	1994	3	6	4

Таблица 2. Лазеры на свободных электронах

Название	Местоположение	Год запуска	Энергия, ГэВ	Яркость пиковая	Диапазон (Å)
XFEL	Германия, Гамбург	2017	17,5	$8,7 \cdot 10^{33}$	0,5–10
SWISS FEL	Швейцария, Филлиген	2016	2,1–5,8	$2,0 \cdot 10^{32}$	7–70; 1–7
FERMI	Италия, Триест	2016	1,5	$1,0 \cdot 10^{27}$ @ 32 нм $2,0 \cdot 10^{23}$ @ 4 нм	40–200; 200–1000
PAL FEL	Республика Корея, Пхохан	2016	3, 10	$5,0 \cdot 10^{31}$	10–100; 0,6–7
SACLA	Япония, Хёго	2011	5,1–8,5	–	0,63–2
LCLS	США, Стэнфорд	2009	2,2–15	$1,0 \cdot 10^{33}$	1,3–50
FLASH	Германия, Гамбург	2006	0,5–1,25	$2,0 \cdot 10^{30}$	41–450

Появились новые рентгенооптические элементы. Источники рентгеновского и гамма диапазона уникальные и дорогостоящие, тем самым проведение экспериментов с их использованием сложны в реализации. Таким образом возникает необходимость в моделировании экспериментов при помощи программных комплексов. Для решения задачи моделирования рентгенооптических систем предлагается использовать модульный принцип.

Модули представляют собой самостоятельные программы, входными и выходными данными для которых являются распределения полей. Элементарный вычислительный комплекс должен содержать программы: Источник, Детектор, Объект и Программы рентгенооптических элементов (щели, волноводы, линзы, отражатели) (рис. 1).

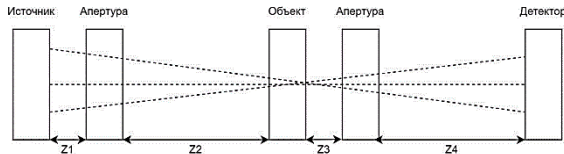


Рисунок 1 – Оптическая схема программного комплекса

Каждая программа должна иметь возможность удаленной загрузки данных и возможность удаленной передачи результатов расчета. Отдельные модули взаимодействуют посредством передачи данных, могут быть запущены параллельно на большом числе компьютеров, что позволит значительно увеличить вычислительную мощность и реализовать процесс оптимизации отдельных рентгенооптических элементов или рентгеновской исследовательской схемы.

В среде программирования Rad Studio 10.4.2. Delphi разработаны две модульные программы: источник «X-RAY TUBE» и волновод «WASXR». Файлы входных данных для программы волновода «WASXR», генерируются при помощи программы источника «X-RAY TUBE». Сгенерированные лучи программой источника сохраняются в текстовый файл, где каждая строка описывает один сгенерированный луч, а каждый элемент строки – это параметр луча.

Программа «Источник» – отдельный программный модуль. Генерирует лучи с заданными начальными параметрами, используя возможности параллельного вычисления компьютера (рис. 2).

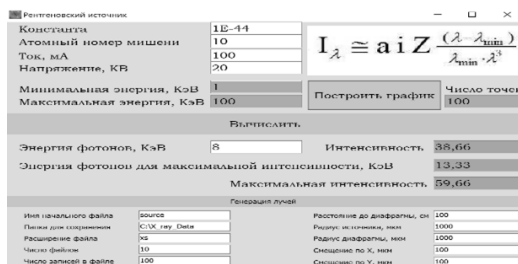


Рисунок 2 – Интерфейс программы «Источник»

Программа источника задает спектр тормозного рентгеновского излучения в приближении толстой мишени без учета самопоглощения (рис. 3), форму, размер и положение источника и выходной диафрагмы. Также есть возможность вывести на экран график интенсивности от энергии для сгенерированного набора лучей, вывести распределение точек на источнике (рис. 4) и лучей на диафрагме.

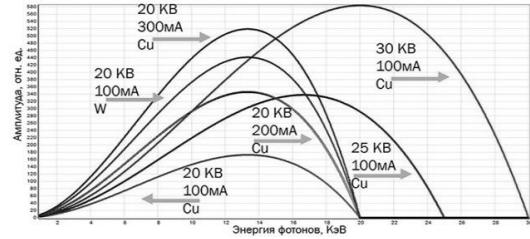


Рисунок 3 – Спектр тормозного рентгеновского излучения при разных начальных данных

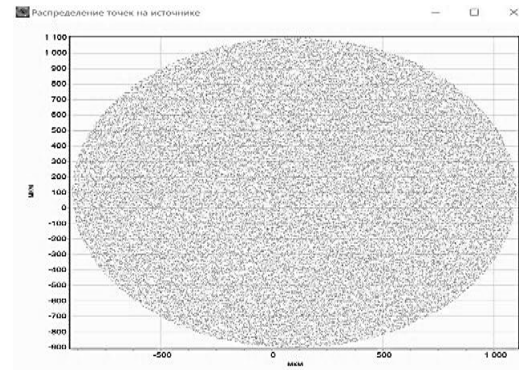


Рисунок 4 – Распределение точек на источнике



Рисунок 5 – Интерфейс программы « Волновод WASXR»

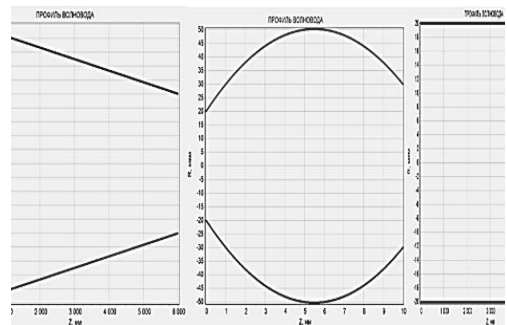


Рисунок 6 – Виды волноводов: конусообразный, параболический, цилиндрический

Расчет интенсивности происходит по формуле (1), где α – константа, i – ток электронов в трубке, Z – атомный номер мишени, λ – длина волны, λ_{MIN} – минимальная длина волны.

$$I = aiZ \frac{\lambda - \lambda_{\text{MIN}}}{\lambda^3 \lambda_{\text{MIN}}} \quad (1)$$

Программа “Волновод «WASXR»” – использует данные лучей для расчета распространение

лучей в волноводе в приближении геометрической оптики. Уравнение поверхности волновода, ориентация, материал определяют пространственное и угловое распределение лучей на выходе волновода, что сохраняется в текстовых файлах (рис. 5). В программе при помощи задания функции мы можем получить волноводы различной формы (рис. 6). При помощи модульной системы источника и волновода были проведены численные эксперименты, при различных изменениях источника. Программные модули позволяют исследовать возможности рентгено-оптических элементов и систем на их основе.

Литература

1. Dudchik, Yu. I., Kolchevsky N.N., Komarov F.F. Microcapillary X-ray lens as a novel design of the refractive lens / Yu. I. Dudchik, N. N. Kolchevsky, F. F. Komarov // SPIE Proceedings. – Vol. 4766–2002.
2. Ladd, M. Structure Determination by X-ray Crystallography. Analysis by X-ray and Neutrons / M. Ladd, R. Palmer. – Springer. – P. 784.
3. Attwood, D. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation / D. Attwood. – Cambridge. – 1999.
4. Мишетт, А. Оптика рентгеновского излучения / А. Мишетт. – М.: Мир, 1989. – 352 с.
5. Kumakhov, M. A. Optics of beams / M. A. Kumakhov. – 1993. – Vol. 1. – P. 3–17.

УДК 681.7.054.22

ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ СКЛЕЙКИ ЛИНЗ Кузнецов А.В.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приводятся результаты разработки универсального автоколлимационного прибора для контроля погрешностей центрирования оптических систем на базе СТ-41.

Ключевые слова: склейка линз, контроль, оптическая система.

DEVICE FOR CONTROLLING THE ACCURACY OF LENS FUSION Kuznetsov A.^{1,2}, Fedortsev R.¹

¹Belarusian National Technical University

²JSC “PELENG”

Minsk, Belarus

Abstract. The paper presents the results of the development of a universal autocollimation device for monitoring the centering errors of optical systems based on ST-41.

Key words: bonding lenses, control, optical system.

Адрес для переписки: Фёдорцев Р.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь

В наши дни развитие оптического приборостроения требует создания светосильных оптических систем, которые способны формировать изображение в пределах большого углового поля в пространстве предметов. Высокие требования к параметрам оптических систем и к качеству образованного ими изображения определяют сложность их конструкции. Объективы проекционной фотолитографии или объективы камер профессионального телевидения содержат десятки линз, к качеству изготовления которых предъявляются жесткие требования.

По определению центрированной оптической системой является оптическая система, в которой центры кривизны сферических поверхностей и центры симметрии асферических поверхностей расположены на одной прямой, называемой оптической осью системы. При изготовлении оптических систем неизбежно возникают погрешности центрирования. Они могут возникать непосредственно при формо-

образовании самой оптической детали, при склеивании оптических деталей, при установке оптических деталей в оправы, при сборке ряда оптических компонентов в единую оптическую систему.

Среди зарубежных приборов для контроля погрешностей центрирования на сегодняшний день можно выделить следующие:

1. Приборы серии OptiCentric фирмы Trioptics GmbH (Германия).

2. Приборы серии OTS фирмы OEG GmbH (Германия).

3. Прибор Point Source Microscope фирмы Davidson Optronics (США).

Изучение принципиальных схем данных приборов, а также анализ их возможностей и технических характеристик позволил определить требования и тенденции современного оптического производства.

Цель данной работы – повышение точности метода склейки линз и контроля качества выход-

ных параметров готового изделия посредством разработки автоматизированных средств установки и фиксации оптических деталей.

Разработка универсального автоколлимационного прибора для контроля погрешностей центрирования оптических систем на базе СТ-41 и анализ преимуществ зарубежных аналогов. В ходе работы были выявлены следующие недостатки прибора СТ-41:

1. Ламповая подсветка. На сегодняшний день это довольно устаревшая и небезопасная для глаз оператора технология. Ламповая подсветка ведет к уставанию глаз и обладает меньшей яркостью относительно светодиодной.

2. Отсутствует вывод изображения на монитор. Нет средств визуализации.

3. Из-за конструкции направляющей оператору неудобно выполнять вертикальное перемещение микроскопа, чтобы изменять рабочий отрезок микроскопа. Данная конструкция не позволяет выполнять перемещение при необходимости быстро.

4. При изменении подвижки на тубусе микроскопа возникает дрожание. Данное дрожание ведет к отклонению оси микроскопа от оси линзы.

Данный прибор достаточно устарел и не отвечает большинству требований предъявляемых приборам для центрирования линз и линзовых систем. Было принято решение усовершенствовать конструкцию СТ-41 и с учетом недостатков, на базе этого прибора, разработать новый прибор.

Проанализировав оборудование, которое используется в мире для контроля погрешностей центрирования линз, можно сформулировать основные принципы проектирования прибора:

1. Регистрация автоколлимационного изображения осуществляется с помощью многоэлементных матричных фотоприемных устройств.

2. Обеспечение точности контроля погрешностей центрирования реализуется не только за счет характеристик оптической схемы и входящих в нее узлов, но и за счет применения методов цифровой обработки автоколлимационных изображений.

3. Управление процессом измерения осуществляется с помощью управляющего программного обеспечения.

4. Прибор должен быть многоспектральным.

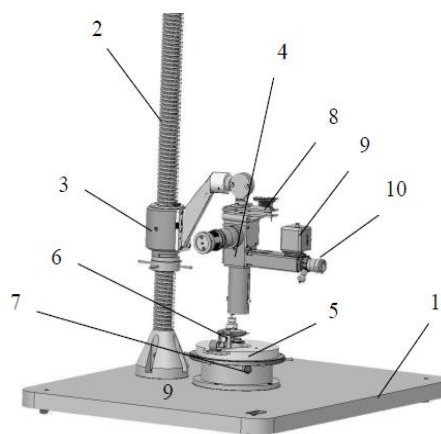
5. Габаритные размеры и масса прибора должны быть минимально возможными.

Прибор СТ-41-01. Модифицированному СТ-41 присвоено обозначение СТ-41-01.

В данном приборе имеется ряд усовершенствований. В частности, установлена ПЗС матрица и ламповое освещение заменено на светодиодное.

Общий вид базовой конструкции прибора показан на рис. 1.

На основании прибора 1 крепится стойка 2 для перемещения по ней кронштейна 3 с автоколлимационным микроскопом 4 и предметный столик 5 с опорным кольцом 6 для базирования проверяемой детали. Винтовые опоры 7 основания обеспечивают устойчивое положение прибора и возможность выставки базовой поверхности в горизонтальное положение. Стойка и кронштейн обеспечивают плавное прямолинейное перемещение микроскопа в вертикальной плоскости. На кронштейне предусмотрен узел с микроподвижками 8, позволяющий совместить оптическую ось микроскопа с осью вращения столика с опорным кольцом.



1 – основание; 2 – стойка; 3 – кронштейн; 4 – микроскоп автоколлимационный; 5 – предметный столик; 6 – кольцо опорное; 7 – опоры винтовые; 8 – механизм микроподвижки; 9 – излучатель; 10 – окуляр

Рисунок 1 – Прибор для контроля склейки линз

В качестве источника для подсветки перекрестия в автоколлимационном микроскопе используется излучатель 9. Наблюдение автоколлимационного изображения перекрестия на сетке микроскопа осуществляется как на мониторе телевизионной камеры (VBC-751), так и глазом через окуляр 10.

Основные технические данные прибора приведены в табл. 1.

Таблица 1

Наименование параметра, единица измерения	Величина параметра
Видимое увеличение микроскопа, крат	118
Фокусное расстояние объектива переменного увеличения, мм	40,6
Видимое увеличение объектива переменного увеличения, крат	0,886
Световой диаметр объектива микроскопа, мм	21,5
Фокусное расстояние окуляра, мм	16,95
Световой диаметр выходного зрачка, мм	0,7
Ширина линий внешнего квадрата сетки окуляра и лимба перекрестия, мм	0,05±0,01
Ширина линий измерительной сетки и шкал, мм	0,02±0,005
Габаритные размеры (дхшхв), мм	800х600х1017

На рис. 2 показано центрирование линзы с помощью усовершенствованного прибора СТ-41-01.

Несмотря на то, что данный прибор имеет усовершенствования, он сохранил ряд недостатков СТ-41.

Направляющие прибора не обеспечивают плавного вертикального перемещения, тубус микроскопа сохраняет дрожание, что ведет к разюстированию прибора.

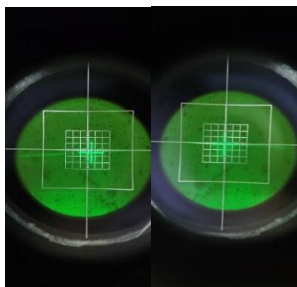


Рисунок 2 – «Биение» перекрестия автоколлиматора

Учитывая недостатки, были сформулированы конструкционные параметры узлов. Требуется выбрать конструкцию, при которой обеспечиваются требования.

Литература

1. Соколова, Н. С. О допусках на децентрировку линз / Н. С. Соколова // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – № 7. – С. 53–57.
2. Зверев, В. А. Влияние децентрировки поверхностей вращения на положение плоскости изображения / В. А. Зверев, Е. С. Рытова, И. Н. Тимошук // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 6. – С. 8–13.
3. Развитие новых направлений в отечественном оптическом и оптикоэлектронном приборостроении / В.А. Балоев [и др.] // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 8. – С. 75–80.
4. Способ центрировки линз объектива штабелной конструкции и оправы линз для его осуществления : пат. RU 2602419 / Латыев С.М., Буй Динь Бао, Белойван П.А., Табачков А.Г. – Опубл. 10.10.2016.

УДК 681.78

КОНТРОЛЬ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

Кунц А.В., Кузнецик В.О.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрена возможность модернизации стенда для проведения проверок лучевой прочности оптических покрытий на длине волны 1,5 мкм путем замены источника излучения и оптической системы стенда.

Ключевые слова: лучевая прочность, методы исследования лучевой прочности, стендовые испытания.

RADIATION STRENGTH CONTROL OF OPTICAL COATINGS

Kuntz A., Kuznechik V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The possibility of upgrading the stand for testing the radiation resistance of optical coatings at a wavelength of 1.5 microns by replacing the radiation source and the optical system of the stand is considered.

Key words: radiation strength, methods for studying radiation strength, bench tests.

*Адрес для переписки: Кузнецик В.О., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: kuznechik@bntu.by*

Лучевая прочность одна из основных характеристик оптических покрытий, применяемых как в лазерах, так и в оптико-электронных приборах и системах работающих совместно с лазерами, характеризующая способность материала оптических покрытий выдерживать кратковременное воздействие лазерного излучения и сохранять свои функции и параметры после этого воздействия.

Лучевая прочность зависит от физико-химических свойств материала, состояния поверхности оптических деталей, длины волны, длительности воздействия лазерного излучения,

величины плотности энергии на поверхности детали и других факторов.

Существуют различные методы исследования лучевой прочности, реализуемые с помощью стендов, позволяющие определить порог разрушения оптических материалов при определенных условиях [1].

В состав базовой установки для определения лучевой прочности любого оптического материала входит источник излучения (лазер), средство измерения энергии (мощности) в лазерном пучке и блок формирования эквивалентной площади воздействия на испытуемом образце. Эквива-

лентная площадь воздействия – это площадь лазерного пятна с равномерным распределением плотности энергии, равным максимальной плотности энергии в реальном пятне и содержащем такую же энергию.

За основу определения лучевой стойкости оптических материалов на модернизируемом стенде принят метод «1 на 1», который позволяет определить зависимость вероятности разрушения образца от плотности энергии падающего излучения.

Проверяемый образец устанавливается в фокусе (или вблизи него) фокусирующей системы. Изменяя энергию импульса излучателя, устанавливают минимальное значение плотности мощности, определенное по формуле:

$$F_{эфф} = \frac{8E_i}{\pi d_{0,86}^2},$$

где E_i – энергия импульса, $d_{0,86}$ – диаметр пятна излучения по уровню энергии 0,86, определяемый с помощью камеры.

Производят серию из 10 импульсов с одинаковой энергией излучения и фиксируют количество прогоревших точек. Регистрация разрушения образца осуществляется с помощью микроскопа. Определяют вероятность разрушения покрытия. Изменением энергии импульса излучателя, находят диапазон изменения плотностей энергий, при котором наблюдается нулевая и 100%-ая вероятность разрушения покрытия. По полученным значениям строят график зависимости вероятности разрушения от плотности энергии излучения (рис. 1).

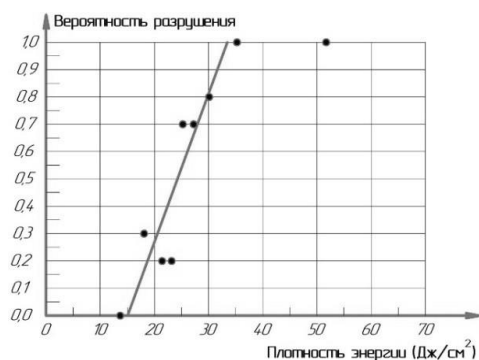


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости вероятности разрушения от плотности энергии излучения

Значение порога разрушения $F_{пор}$ определяется графически, как точка пересечения графика аппроксимирующей функции с осью значений плотности энергии F . Полученное значение порога разрушения должно быть меньшим (или равным) значению плотности энергии, при котором наблюдалась минимальная вероятность разрушения покрытия.

Полученные точки на графике аппроксимируются линейной зависимостью по формуле

$$y = kx + b.$$

Для обеспечения возможности проведения проверок лучевой прочности оптических диэлектрических покрытий в спектральной области около 1,5 мкм требовалась модернизация стенда.

В состав модернизированного стенда (рис. 2) входят:

- источник лазерного излучения и параметрический генератор света, обеспечивающие требуемую рабочую длину волны лазерного излучения;
- регулируемый аттенуатор, плавно понижающий интенсивность электромагнитных колебаний для обеспечения требуемой плотности энергии на исследуемом образце;
- светоделительная пластина, перераспределяющая энергию лазерного излучения между контролируемым образцом и системой контроля параметров лазерного пучка, причем основная часть энергии излучения попадает на образец;
- фокусирующая система, обеспечивающая требуемое распределение плотности излучения в пятне заданного диаметра на проверяемом образце;
- оптический клин, который предназначен для направления лазерного излучения на систему диагностики лазерного пучка;
- телескоп, с помощью которого уменьшается расходимость лазерного пучка и обеспечивается требуемый диаметр выходного пучка;
- фокусирующая система, обеспечивающая требуемый диаметр пучка на приемнике ПЗС-камеры;
- ПЗС-камера с помощью которой контролируется диаметр пучка лазера;
- измеритель энергии лазерного излучения.

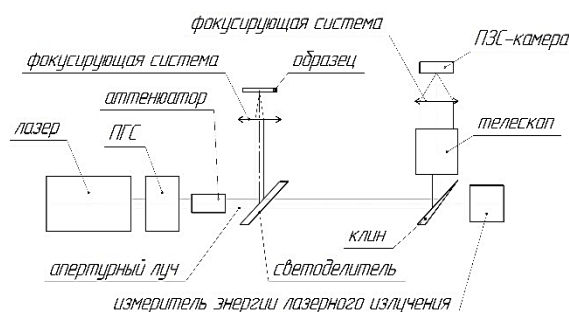
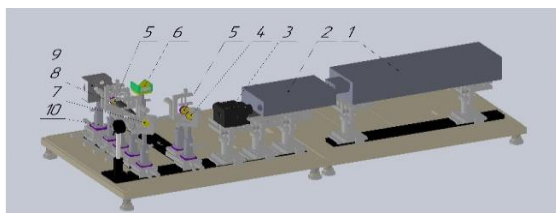


Рисунок 2 – Функциональная схема стенда контроля лучевой прочности

Все элементы стенда, кроме оптических являются покупными (рис. 3).

Расчет оптической системы стенда был выполнен в программах «OPAL» и «Zemax» с последующей оценкой качества всей системы и расчете каждого ее элемента.



- 1 – лазерный источник излучения;
 2 – параметрический генератор; 3 – аттенюатор;
 4 – светоделитель; 5 – фокусирующая система;
 6 – образец; 7 – оптический клин; 8 – телескоп;
 9 – ПЗС камера; 10 – измеритель энергии

Рисунок 3 – 3D-модель стенда контроля лучевой прочности

Для коллимации лазерного излучения была выбрана система Галилея, выполнен ее габаритный расчет, исходя из параметров источника лазерного излучения, а затем расчет конструктивных параметров оптической системы.

Диаметр фокусирующей системы был выбран исходя из диаметра лазерного пучка, который необходимо получить на исследуемом образце, и

с учетом того, что для уменьшения влияния сферической aberrации на качество изображения пятна диаметр фокусирующей системы должен быть в 2–3 раза больше диаметра пучка лазера.

С учетом требований к лазерной прочности материалов были подобраны покрытия для каждого компонента оптической системы и рассчитаны коэффициенты пропускания для каждой рабочей поверхности оптической системы в программной среде «Zemax», .

Таким образом с целью модернизации стенда была произведена замена источника излучения, изменена оптическая система рабочей и измерительной ветвей стенда, выполнен габаритный, светотехнический и энергетический расчет оптической системы стенда.

Литература

1. Лазеры и лазерное оборудование. Методы определения порога лазерного разрушения. Основные положения, термины и определения : ГОСТ Р 58369–2019 (ИСО 21254-1:2011). – Введ. 27.09.2019. – Москва : Стандарт-информ, 2019. – 19 с.

УДК 539.1.06

ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Малютина-Бронская В.В.¹, Сорока С.А.¹, Сенкевич Д.В.¹, Семченко А.В.²,
 Сидский А.В.², Тарасенко М.С.³

¹ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
 Минск, Республика Беларусь

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины
 Гомель, Республика Беларусь

³Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН
 Новосибирск, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе представлены результаты исследований оптических свойств неорганических оптических материалов: боросиликатного стекла и оксоселенида легированных редкоземельными элементами, полученных золь-гель методом, для использования их в качестве сцинтилляторов детекторов ионизирующих излучений.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, сцинтилляторы, люминесценция, золь-гель процесс

OPTICAL MATERIALS FOR REGISTRATION OF IONIZING RADIATIONS

Malyutina-Bronskaya V.¹, Soroka S.¹, Senkevich D.¹, Semchenko A.², Sidsky A.², Tarasenko M.³

¹SSPA of Optics, Optoelectronics and Laser Technology
 Minsk, Belarus

²F.Skorina Gomel State University
 Gomel, Belarus

³Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry SB RAS
 Novosibirsk, Russia

Abstract. The results of studies of the optical properties of inorganic optical materials: borosilicate glass and oxoselenide doped with rare earth elements, obtained by the sol-gel method, for their use as scintillators of ionizing radiation detectors are presented in this work.

Key words: ionizing radiation, scintillators, luminescence, sol-gel process

Адрес для переписки: Малютина-Бронская В.В., пр. Независимости, 68-1, г. Минск 220072, Республика Беларусь
 e-mail: malyutina@oelt.basnet.by

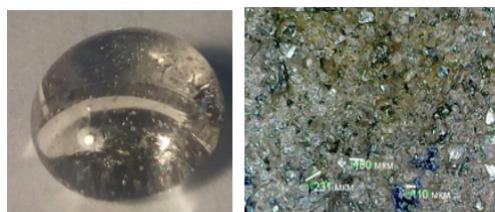
Введение. Основное назначение датчиков ионизирующих излучений заключается в обеспечении процесса взаимодействия потока ионизирующего излучения с длиной волны до 380 нм с

физической средой детектора излучения, и в преобразовании актов взаимодействия в электрические сигналы, которые могут быть зарегистрированы соответствующей измерительной

аппаратурой [1]. Одним из методов регистрации излучения является сцинтилляционный метод, основанный на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах при прохождении через них заряженных частиц [2].

Актуальность решаемой проблемы заключается в необходимости разработки новых материалов для оптоэлектроники, светотехники, бытовой техники, медицинских применений. Целью работы было исследование оптических и фотоэлектрических свойств сцинтиллирующих сред, полученных золь-гель методом, и определение возможности их применения в качестве детекторов ионизирующих излучений.

Технология получения. В рамках данной статьи рассматриваются свойства неорганических оптических материалов, полученных золь-гель методом. В первом случае – боросиликатные стекла (рис. 1, а). Золь-гель методом получены образцы боросиликатного стекла, легированного Eu^{3+} , солегированного ионами Y ($\text{Eu}^{3+}:\text{Y}$). Химический состав золя подобран экспериментальным путем. Температура отжига на воздухе составляла $900\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 60 мин. Полученные материалы представляют собой стекла, которые чувствительны к воздействию излучения, близкого к ультрафиолетовому ($\lambda \leq 400\text{ нм}$), и при облучении излучают ярко-розовое видимое свечение.



а

б

а – на основе: $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}$ (17 масс. %),
 б – на основе $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{Tb}$ (3 масс. %)

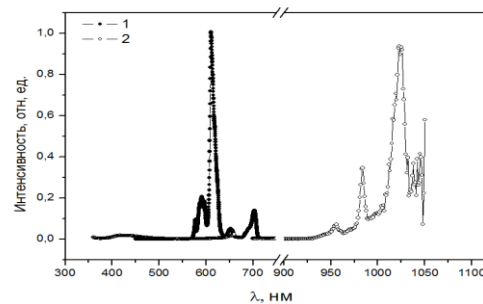
Рисунок 1 – Внешний неорганических оптических материалов для сцинтилляторов

Во втором случае, оксоселенид редкоземельных элементов легированный ионами Tb^{3+} . Порошок оксоселенида $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{Tb}^{3+}$ с размерами частиц от 50 мкм до 200 мкм помещался в золь-гель матрицу и наносился на стеклянные подложки. Полученные образцы отжигались на воздухе сначала при температуре $150\text{ }^\circ\text{C}$, затем при $300\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 30 мин. Получаемые образцы представляли собой непрозрачные пленки (рис 1, б).

Измерение фотолюминесценции (ФЛ) боросиликатного стекла проводилось с использованием HeCd лазера с длиной волны излучения 325 нм и мощностью $1,27\text{ Вт/см}^2$. Диаметр пучка лазера после прохождения диафрагмы и линзы составляет 1мм. Нормированные спектры фотолюминесценции оксоселенидов регистрировали

на спектрофлуориметре Fluorolog 3 (Horiba Jobin Yvon) с охлаждаемым блоком детектирования фотонов PC177CE-010, оснащенный фотоумножителем R20658. Длина волны возбуждающего излучения составила 380 нм.

Результаты исследований. На рис. 2 представлены спектры люминесценции оптических материалов для сцинтилляторов. У боросиликатного стекла наблюдается полосы излучения в видимой части диапазона (рис. 2, кривая 1). Можно выделить характерные полосы излучения в следующих интервалах длин волн: от 570 нм до 600 нм, от 600 нм до 625 нм, от 630 нм до 660 нм, от 660 нм до 725 нм. В интервале длин волн от 600 нм до 630 нм наблюдается максимум с узким распределением, связанный с переходами в электронных энергетических уровнях ионов Eu^{3+} . Уменьшение концентрации ионов европия приводит к уменьшению интенсивности фотолюминесценции всех максимумов ФЛ неорганических сцинтилляторов, содержащих ионы Eu^{3+} .



1 – боросиликатное стекло легированное $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}$ (17 масс. %), 2 – оксоселенид $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{Tb}$ (3 масс.%)

Рисунок 2 – Спектр фотолюминесценции оптических материалов для сцинтилляторов

Спектр фотолюминесценции оксоселенидов $\text{Y}_2\text{O}_2\text{Se}:\text{Tb}$ представлен на рис. 2 кривая 2. Характерные полосы излучения наблюдаются в следующих интервалах длин волн: от 950 нм до 960 нм, от 975 нм до 990 нм, от 1020 нм до 1040 нм. Эти пики могут быть связаны с излучением фонов от возбужденных пар Y-Se в матрице.

Рабочий спектральный диапазон фотоприемников для детекторов ионизирующего излучения лавинных фотодиодов (ЛФД) или кремнивого фотоумножителя (Si-ФЭУ) составляет от 400 нм до 1000 нм [3], что соответствует диапазону длин волн излучения исследуемых материалов. Определяющим фактором практического применения материалов для сцинтилляторов выступает максимум спектральной чувствительности и коэффициент лавинного умножения фотоприемника. Для ЛФД коэффициент лавинного умножения M составляет от 50 до 100, в то время как Si-ФЭУ M порядка 10^6 , что позволяет добиться большей эффективности детектирования более слабого сигнала порядка 10^{-10} Вт , а следо-

вательно, лучшего энергетического разрешения.

На рис. 2 приведены внешний вид в корпусе ЛФД или Si-ФЭУ со сцинтиляционным материалом (боросиликатное стекло легированное Eu^{3+}Y) залитым в колпачок – макет детектора ионизирующего излучения. Сцинтиллятор и детектор были прецизионно состыкованы друг с другом механическим способом, позволяющим быстро и надежно заменить как сцинтиляционный кристалл, так и сам детектор.



Рисунок 2 – Внешний вид корпусированных ЛФД или Si-ФЭУ с сцинтиляционным кристаллом (на основе боросиликатного стекла легированного Eu^{3+}Y) в колпачке корпуса при воздействии УФ-излучения

Заключение. Таким образом, были исследованы оптические свойства неорганических оптических материалов: боросиликатного стекла и оксиселенида легированных редкоземельными эле-

ментами, полученных золь-гель методом для использования их в качестве сцинтилляторов. Полученные результаты использованы для создания макетов детекторов ионизирующих излучений.

Благодарности. Работа частично выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект Ф20Р-256).

Литература

1. Марков, В. Ф. Технология тонкопленочных твердотельных сенсоров: учеб, пособие / В. Ф. Марков // Мин-во науки и высш, образования РФ. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2019. – С. 148.
2. Шендрик, Р. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Часть 3. Введение в физику сцинтилляторов : учебное пособие / Р. Ю. Шендрик. – Иркутск: издательство Иркутского государственного университета, 2013. – 110 с.
3. Кремниевые фотоприемники с внутренним усилением широкого спектра применения / В. Б. Залеский [и др.] // Приборостроение-2020 : материалы 13 международной науч.-техн. конф., 18–20 ноября 2020 г., Минск, Белорус. нац. техн. ун-т / редкол. : О.К. Гусев [и др.]. – Минск : БНТУ, 2020. – С. 393–394.

УДК 614.715:681.586

МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР МИКРОЧАСТИЦ ГАЗОВОЙ/ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ Мухуров Н.И., Ходин А.А.

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»
Национальная академия наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Представлен анализ основных параметров микрочастиц воздушной среды и их влияния на здоровье человека. Рассмотрены методы сепарации и детектирования переносимых воздухом/газом твердых микрочастиц с помощью оптических и фотоэлектрических элементов. Представлен прототип мультиспектрального детектора микрочастиц на основе алюмооксидной технологии для создания компактного Lab-on-chip сенсора.

Ключевые слова: микрочастицы, сепарация, мультиспектральный детектор, алюмооксидная технология.

MULTIWAVELENGTH SENSOR OF GAS/AIRBORNE MICROPARTICLES Mukhurov M., Khodin A.

*SSPA “Optics, Optoelectronics, and Laser Technology”
National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Belarus*

Abstract. The analysis of the airborne microparticles basic parameters and their effect on human health is presented. The methods of separation and detection of air/gasborne solid microparticles using optical and photoelectric elements are considered. The multiwavelength microparticle detector prototype based on alumina technology is presented to create a compact Lab-On-Chip sensor.

Key words: microparticles, separation, multiwavelength detector, alumina technology.

Адрес для переписки: Ходин А.А., Логойский тракт, 22, г. Минск 220090, Республика Беларусь
e-mail: aahodin@gmail.com

Качество воздушной среды. Чистый воздух является одной из основных задач охраны окружающей человека среды. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) [1], вредные для здоровья микрочастицы (PM) раз-

мером от десятков нанометров до микрометров глубоко проникают в легкие, в кровь и далее во внутренние органы, вызывая воспаление дыхательных путей, подавляя реакцию иммунной системы и снижая способность крови переносить

кислород. РМ оказывают негативное воздействие на большее число людей, чем какой-либо другой загрязнитель воздуха.

ВОЗ разработала «Руководящие принципы ВОЗ по качеству воздуха», определяющие пороговые и максимально допустимые уровни основных загрязнителей воздуха. В табл. 1 приведены основные характеристики и требования к качеству воздушной среды в отношении загрязнения РМ.

Технический комитет ISO/TC 146 «Качество воздуха» Международной организацией по стандартизации (ISO) разработал более 170 стандартов, определяющих допустимые уровни загрязнения воздуха и выбросов, а также оценку состояния воздушной среды на рабочем месте и в помещениях [2]. В частности, разработан межгосударственный стандарт ГОСТ ISO 16000-20-2017 «Воздух замкнутых помещений». Разработан также стандарт для новых технологий транспорта ISO 23274 «Транспорт дорожный гибридно-электрический. Измерение выхлопных газов и потребления топлива» и др.

Таблица 1. Нормативы ВОЗ для концентрации РМ в воздухе

	Класс микрочастиц	
	PM2.5	PM10
Рекомендуемый уровень	Среднегодовой 10 мкг/м ³ , среднесуточный 25 мкг/м ³	Среднегодовой 20 мкг/м ³ , среднесуточный 50 мкг/м ³
Воздействие	При размере < 2,5 мкм частицы преодолевают аэрогематический барьер, попадая в кровеносную систему	При размере < 10 мкм частицы способны проникать глубоко в легкие, осажаясь в них

Источником загрязнения воздуха микро-, наночастицами в городах являются, в частности, продукты износа тормозных систем и шин автомобилей. Например, в образцах дорожной пыли некоторых улиц Москвы аномально высокая концентрация Cu, Zn, Ag, Cd, Sn, Sb, Hg, Pb, Tl, Bi выявлена во фракции наночастиц с превышением над средними значениями до 450 раз [3].

Важной областью мониторинга переносимых воздухом и другими газами частиц являются промышленные предприятия. В частности, высокоточное производство полупроводниковых приборов, а также литиевых аккумуляторных батарей требует минимизировать загрязнение воздуха, как поступающего в чистые комнаты, так и образующегося в них при работе технологического оборудования.

Детектирование микрочастиц воздушной среды. Современные детекторы взвешенных в воздухе микро-, наночастиц включают элементы для сепарации, детектирования и количественного анализа концентрации частиц с помощью портативных сенсорных платформ. Особый интерес представляют компактные устройства микрофлюидики и микроэлектромеханики [4] Lab-on-chip типа.

В данной работе исследуются методы сепарации и детектирования микрочастиц в детекторах с использованием пленочных и мембранных элементов на основе алюмооксидной технологии.

Сепарация микрочастиц перед их детектированием позволяет повысить чувствительность и селективность детектора как по размеру, так и по материалу детектируемых частиц. Среди методов селекции микро-, наночастиц воздушной среды перед их регистрацией наиболее пригодны для интегрирования в приборе Lab-on-Chip типа следующие.

В *виртуальном импакторе* [5] воздушный микроструйный чип классифицирует микрочастицы по размеру с помощью инерциального сепаратора.

Действующие на микро-, наночастицы электрические силы при *диэлектрофорезе* (ДЭФ) являются эффективным инструментом для манипулирования с возможностью уменьшения размеров устройства до масштабов Lab-on-Chip. В частности, ДЭФ применяется для сепарации металлических и диэлектрических микрочастиц [6].

Детектирование микрочастиц классов PM1-PM10 осуществляется, как правило, с использованием оптической схемы светодиод/поток микрочастиц/фотоприемник. В компактных детекторах используется широкополосное излучение светодиода или излучение полупроводникового лазера в диапазоне длин волн 0,3–3,3 мкм. Соответственно, минимальный радиус детектируемых частиц не может быть меньше ~100 нм. Для повышения информативности измерений, в частности, для оценки распределения частиц по размерам, разработаны двухволновые оптические системы [7].

В данной работе исследуются методы сепарации микро-, наночастиц с помощью виртуального импактора, ДЭФ и их селективного мультиспектрального детектирования с применением дифракционной решетки [8] и спектральных фильтров на основе метаматериалов (рис. 1) для детектирования с помощью матрицы фотодиодов. Представленные решения позволяют повысить информативность измерений в отношении материалов и размеров детектируемых частиц с возможностью реализации полного измерительного цикла в компактном Lab-on-Chip приборе.



Рисунок 1 – Схематическое изображение принципа работы мультиспектрального детектора микрочастиц с использованием оптических фильтров на основе метаматериалов на плазмонных эффектах в сборке с матрицей фотодиодов

Литература

1. Загрязнение воздуха внутри жилых помещений и его влияние на здоровье. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>. – Дата доступа: 05.07.2021.
2. Стандарты ИСО помогут дышать легче. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/news/ref2397.html>. – Дата доступа: 2.07.2021.
3. Isolation and quantitative analysis of road dust nanoparticles / M. S. Ermolin [et al.] // J. Analyt. Chem. – 2017. – Vol. 72, № 5. – P. 520–532.
4. Ultrafine particle counter using a MEMS-based particle processing chip / H.-L. Kim [et al.] // 28th IEEE

Intl. Conf. on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). – Estoril, Portugal, 18-22 Jan. – 2015. – P. 559–562.

5. Electrically tunable airborne particle classifier using a virtual impactor / Y. H. Kim [et al.] // IEEE 21st Int. Conf. on Micro Electro Mech. Syst. (MEMS). – Wuhan, China, 13-17 Jan. – 2008. – P. 547–550.

6. Pesch, G. R. A review of dielectrophoretic separation and classification of non-biological particles / G. R. Pesch, F. Du // Electrophoresis – 2020. – Vol. 42, № 1–2. – P. 1–19.

7. Particle monitors and method(s) therefore : pat. US7551277B / M. T. Cole.

8. MEMS gratings and their applications / G. Zhou, [et al.] // Int. J. Optomechatronics. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 61–86.

УДК 535.234+621.373.826

ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ И ПРИНЦИП ДЕТАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ

Невдах В.В.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены физические процессы, протекающие в термодинамически равновесной системе, состоящей из молекул, моделируемых осцилляторами Герца, и их теплового излучения. Показано, что все электромагнитное излучение, создаваемое осцилляторами Герца, является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы. На основе принципа детального равновесия проанализированы излучательные переходы, дающие вклад в тепловое излучение термодинамически равновесной системы, и показано, что они являются детерминированными процессами, которые протекают со скоростями, зависящими от температуры. Установлено, что свойства равновесного теплового излучения не зависят от температуры рассматриваемой системы.

Ключевые слова: излучательный переход, термодинамически равновесная система, принцип детального равновесия, скорость излучательного перехода

RADIATIVE TRANSITIONS IN THERMODYNAMICALLY EQUILIBRIUM SYSTEMS AND THE PRINCIPLE OF DETAILED BALANCE

Nevdakh V.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. The physical processes occurring in a thermodynamically equilibrium system consisting of molecules modeled by Hertzian oscillators and their thermal radiation has been considered. All electromagnetic radiation generated by Hertzian oscillators is stimulated radiation, the properties of which are determined by the nature of the driving force has been shown. On the basis of the principle of detailed equilibrium, radiative transitions that contribute to the thermal radiation of a thermodynamically equilibrium system have been analyzed, and it has been shown that they are deterministic processes that proceed with rates depending on temperature. The properties of equilibrium thermal radiation do not depend on the temperature of the system under consideration has been found.

Key words: radiative transition, thermodynamically equilibrium system, detailed balance principle, radiative transition rate

*Адрес для переписки: Невдах В.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: nevdakh@bntu.by*

Принято считать, что простейшим источником электромагнитного излучения является осциллятор Герца – колеблющийся электрон. Энергия электромагнитного излучения, создаваемого колеблющимся электроном в единицу времени в одномерном случае колебаний вдоль оси X , дается известным выражением (см., например, [1]):

$$\delta\mathcal{E} = \frac{2e^2}{3c^3} \left| \frac{d^2x}{dt^2} \right|^2, \quad (1)$$

где e – заряд электрона, c – скорость света в вакууме.

Рассмотрим замкнутую систему, состоящую из резонаторов Герца и их теплового излучения,

находящуюся в состоянии термодинамического равновесия при температуре T . В такой системе будут происходить процессы взаимодействия резонаторов между собой вследствие их теплового движения, а также процессы взаимодействия резонаторов с тепловым излучением.

В соответствии с законом Ньютона, иметь отличное от нуля ускорение, т.е. колебаться, электрон может только под действием внешней вынуждающей силы. Без действия на электрон внешней силы он не может колебаться и создавать электромагнитное излучение. Поэтому процесс создания электромагнитного излучения осциллятором Герца всегда является вынужденным. Следовательно, все электромагнитное излучение, созданное колеблющимся электроном, является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы.

В рамках квантового подхода осцилляторам Герца можно сопоставить молекулы, имеющие дискретные энергетические уровни, в том числе и уровни m и n с энергиями E_m и E_n соответственно, причем $E_m - E_n = h\nu$. Рассмотрим систему, находящуюся в состоянии термодинамического равновесия при температуре T , и состоящую из молекул с плотностью N и теплового излучения с плотностью энергии $\rho(\nu, T)$ (здесь и далее рассматривается плотность энергии теплового излучения в единичном спектральном интервале). В такой системе будет происходить как взаимодействие молекул между собой, возникающее в результате их теплового движения, так и их взаимодействие с тепловым излучением. Это взаимодействие приводит к тому, что плотности населенности N_m и N_n молекул на рассматриваемых энергетических уровнях подчиняются распределению Больцмана $N_n = N_m e^{-\frac{h\nu}{kT}}$, а плотность энергии теплового излучения на частоте ν остается постоянной величиной, т.е. $\rho(\nu, T) = \text{const}$.

Процессы, возможные в рассматриваемой равновесной системе, будем представлять в виде реакций, по аналогии с химическими реакциями.

Молекула, находящаяся в состоянии с энергией E_m , в результате взаимодействия с другой молекулой может перейти в состоянии с энергией E_n , а разность энергии уровней $\Delta E = E_m - E_n$ может пойти на изменение кинетической энергии взаимодействующих молекул. Возможен и обратный процесс преобразования кинетической энергии взаимодействующих молекул в их внутреннюю энергию. В результате такого процесса молекула может перейти из состояния с энергией E_n в состоянии с энергией E_m . Это так называемые неоптические переходы, протекающие без участия электромагнитного излучения, и которые можно представить в виде:

$$M(E_m) + M' \leftrightarrow M(E_n) + M' + \Delta E. \quad (1)$$

Отметим, что если акты взаимодействия молекул, находящихся в определенном энергетическом состоянии, с другими молекулами или с тепловым излучением в термодинамически равновесной системе являются случайными событиями и поэтому имеют (носят) вероятностный характер, то состоявшиеся в результате такого взаимодействия переходы молекул в другие энергетические состояния – это детерминированные процессы, протекающие со своими скоростями.

Обозначим как $D_{mn}N_m$ скорость прямого процесса в (1), а $D_{nm}N_n$ – скорость обратного процесса, где D_{mn} и D_{nm} – константы скоростей этих процессов, соответственно.

Наряду с неоптическими переходами, взаимодействие молекул вследствие их теплового движения может стимулировать и оптические переходы, в ходе которых внутренняя энергия молекул преобразуется в энергию теплового излучения и, наоборот, энергия теплового излучения преобразуется во внутреннюю энергию молекул. Нет никаких физических ограничений на то, чтобы молекула, находящаяся в состоянии с энергией E_m , в результате взаимодействия с другой молекулой могла перейти в состояние с энергией E_n , уменьшив свою внутреннюю энергию на величину $\Delta E = E_m - E_n$ и увеличив при этом энергию теплового излучения на величину $h\nu = E_m - E_n$. Обратным процессом в этом случае будет поглощение теплового излучения молекулой, находящейся в состоянии с энергией E_n . Эти процессы можно представить в виде:

$$M(E_m) + M \leftrightarrow M(E_n) + M + h\nu. \quad (2)$$

Излучение, появляющееся в результате прямого процесса (II), назовем вынужденным тепловым излучением. Обозначим $A_{mn}^*N_m$ скорость прямого процесса, а $B_{nm}^*\rho(\nu, T)N_n$ – скорость обратного процесса (2), где A_{mn}^* и $B_{nm}^*\rho(\nu, T)$ – константы скоростей этих процессов, соответственно, B_{nm}^* – коэффициент пропорциональности.

Молекула, находящаяся в состоянии с энергией E_m , может также взаимодействовать с резонансным тепловым излучением на частоте ν и в результате совершить переход в состояние с энергией E_n , уменьшив свою внутреннюю энергию на величину $\Delta E = E_m - E_n$, увеличив при этом энергию теплового излучения на величину $h\nu = E_m - E_n$. И в этом случае обратным процессом будет процесс поглощения теплового излучения молекулой, находящейся в состоянии с энергией E_n . Эти процессы можно представить в виде:

$$M(E_m) + \rho(\nu, T) \leftrightarrow M(E_n) + \rho(\nu, T) + h\nu. \quad (3)$$

Излучение, появляющееся в результате прямого процесса (III), назовем вынужденным резонансным тепловым излучением. Обозначим скорость прямо-

го процесса (3) как $B_{mn}^* \rho(\nu, T) N_m$, где $B_{mn}^* \rho(\nu, T)$ – константа скорости процесса, B_{mn}^* – коэффициент пропорциональности.

Таким образом, взаимодействие между молекулами и взаимодействие молекул с тепловым излучением в термодинамически равновесной системе осуществляется посредством реакций типа (1–3).

Согласно принципу детального равновесия состояние термодинамического равновесия в системе реализуется только тогда, когда каждая из возможных реакций в этой системе поддерживает это равновесие – больцмановское распределение населенностей по уровням энергии и постоянную плотность энергии равновесного теплового излучения. Другими словами, в термодинамически равновесной системе число переходов в единицу времени, обусловленных прямым процессом в каждой возможной реакции, равняется числу переходов, обусловленных обратным процессом в этой же реакции (см., например, [2]). В противном случае в системе могут возникать направленные движения и потоки энергии, и система будет неравновесной.

В рассматриваемой системе состояние термодинамического равновесия с температурой T будет реализовано при выполнении следующих условий (для простоты рассматриваем невырожденные уровни):

$$\frac{D_{mn}}{D_{nm}} = \exp(h\nu/kT), \quad (2)$$

$$\frac{A_{mn}^*}{B_{nm}^* \rho(\nu, T)} = \exp(h\nu/kT), \quad (3)$$

$$\frac{B_{mn}^*}{B_{nm}^*} = \exp(h\nu/kT). \quad (4)$$

Из (4) видно, что отношение коэффициентов пропорциональности B_{nm}^* и B_{mn}^* является функцией температуры. Поэтому и каждый из этих коэффициентов, входящих в скорости поглощения и вынужденного резонансного излучения, также является функцией температуры.

Из (4) следует, что при высоких температурах (при $kT \gg h\nu$), когда $\exp(h\nu/kT) \rightarrow 1$, можно считать, что $B_{mn}^* \approx B_{nm}^*$.

С учетом (4) выражение (3) можно представить в виде:

$$\frac{A_{mn}^*}{B_{mn}^* \rho(\nu, T)} = 1. \quad (5)$$

Как известно, такую же равновесную систему рассматривал и Эйнштейн, когда вводил в физику понятия спонтанного и индуцированного излучения и соответствующих вероятностей переходов A_{mn} , $B_{mn} \rho(\nu, T)$ и $B_{nm} \rho(\nu, T)$ [3]. Условие равновесия он записал в виде

$$N_m [A_{mn} + B_{mn} \rho(\nu, T)] = N_n B_{nm} \rho(\nu, T), \quad (6)$$

откуда получил выражение для плотности энергии теплового излучения в виде

$$\rho(\nu, T) = \frac{A_{mn}/B_{mn}}{\frac{B_{nm}}{B_{mn}} e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (7)$$

Считая, что с ростом T должно быть $\rho \rightarrow \infty$, а при малых температурах из (7) должен получаться закон Вина, Эйнштейн получил соотношения между введенными коэффициентами

$$B_{mn} = B_{nm} \quad (8)$$

и

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}. \quad (9)$$

С учетом (8) выражение (7) можно записать в виде

$$\frac{A_{mn}}{B_{mn} \rho(\nu, T)} = \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что при малых температурах тепловое излучение в основном спонтанное, а при высоких температурах – стимулированное, или вынужденное. Но эти излучения, как известно, обладают разными свойствами. Никто не наблюдал, чтобы свойства теплового излучения зависели от температуры. Следовательно, условие (6), и выводы, сделанные на его основе, являются физически некорректными.

Таким образом, в настоящей работе установлено, что:

- все электромагнитное излучение, созданное его элементарным источником – колеблющимся электроном – является вынужденным излучением, свойства которого определяются природой вынуждающей силы;

- равновесное тепловое излучение – это вынужденное излучение. Оно состоит из излучения, получающегося при резонансном взаимодействии теплового излучения с возбужденными молекулами и излучения, получающегося в результате взаимодействия возбужденных молекул с другими молекулами при их тепловом движении;

- излучательные переходы, происходящие в молекулах, являются детерминированными процессами, которые протекают со своими скоростями;

- в термодинамически равновесной системе константы скоростей теплового излучательного перехода A_{mn}^* и резонансного излучательного перехода $B_{mn}^* \rho(\nu, T)$ всегда равны и являются функциями температуры;

- коэффициенты пропорциональности B_{nm}^* и B_{mn}^* в скоростях поглощения и вынужденного резонансного излучения и их отношение являются функциями температуры.

Литература

1. Ельяшевич, М. А. Атомная и молекулярная спектроскопия. – М. : Физматгиз, 1962. – 892 с.

2. Физическая энциклопедия. Т. 1. / гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва, Советская энциклопедия, 1988. – 507 с.

3. Эйнштейн, А. Собрание научных трудов. Т. 3. – М. : Наука, 1966. – 632 с.

УДК 621.373.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Nd:YAG С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Орехова В.Е.¹, Кисель В.Э.², Орехов К.А.¹

¹ОАО «Пеленг»

²Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Проведено сравнение результатов экспериментального моделирования выходных параметров для нескольких вариантов резонаторов лазерного излучателя на основе кристалла Nd:YAG с диодной накачкой для применения в системах измерения дальности. Разработан компактный квантрон. Проведен расчет его профиля распределения и эффективности накачки для различных рабочих температур. В результате экспериментального моделирования схем резонатора с разработанным квантроном показано, что на основе разработанной компактной системы накачки возможна генерация моноимпульсов лазерного излучения в режиме активной модуляции добротности с энергией от 70 мДж и расходимостью до 1,7 мрад для частоты следования до 20 Гц.

Ключевые слова: поперечная диодная накачка, Nd:YAG, расходимость.

EXPERIMENTAL STUDY OF A DIODE-PUMPED Nd:YAG LASER

Orekhova V.¹, Kisel V.², Orekhov K.¹

¹JSC «Peleng»

²Optical Materials and Technology Research Center of BNTU
Minsk, Belarus

Abstract. The comparative experimental simulation of the output parameters for several types of diode-pumped Nd:YAG laser resonators for rangefinding were performed. A compact pump chamber is developed. A pump radiation distribution profiles and pumping efficiencies of the developed pump chamber were calculated for different operating temperatures. Experimental simulation of resonators design using the developed pump chamber was carried out. It was shown that laser based on the developed compact pump chamber can generate over 77 mJ pulses in Q-Switched mode with 1.7 mrad output beam divergence and pulse repetition rates up to 20 Hz.

Key words: transverse diode pumping, Nd:YAG, beam divergence.

*Адрес для переписки: Орехова В.Е., ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: vikawatutsina@gmail.com*

Была разработана оптическая схема твердотельного лазерного излучателя для импульсного дальномера, применяемого для определения расстояний до удаленных объектов. Основные требования, предъявляемые к разрабатываемому излучателю, следующие:

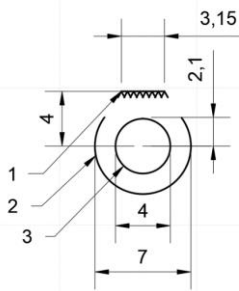
- энергия не менее 70 мДж;
- расходимость до 2 мрад;
- габариты корпусированного изделия не более 300×130×170 мм³;
- диапазон рабочих температур 0–+60 °С;
- устойчивость к вибрациям;
- способность работать в диапазоне частот следования импульсов от 0 до 20 Гц.

Основными критериями при разработке квантрона для обеспечения требуемой энергии импульса являлись высокий КПД, компактные размеры и эффективный отвод тепла от лазерного кристалла и матриц лазерных диодов. Отвод

тепла, возникающего во время работы в результате поглощения кристаллом излучения накачки, необходим для ослабления негативного влияния формирующейся динамической термолинзы, изменяющей модовый состав излучения, из-за чего ухудшается его пространственное качество и понижается выходная энергия [1]. Также предъявляются требования к равномерности профиля поглощения излучения накачки, обусловленные необходимостью избежания «горячих точек» [2] в кристалле, повышающих риск возникновения повреждений в резонаторе.

Была разработана односторонняя система накачки цилиндрического активного элемента диаметром 4 мм с относительной концентрацией ионов неодима 0,9 % и матированной боковой поверхностью, приведенная на рис. 1. Накачка обеспечивается тремя матрицами лазерных диодов с пиковой мощностью до 800 Вт расходимо-

стью 38° вдоль быстрой оси каждая. Каждая матрица имеет 8 линеек с, расположенных с шагом 0,38 мм вдоль боковой поверхности активного элемента. Цилиндрический отражатель имеет коэффициент диффузного отражения более 94 %.



1 – Матрицы лазерных диодов,
2 – Цилиндрический диффузный отражатель,
3 – Цилиндрический активный элемент

Рисунок 1 – Схема накачки

Результаты моделирования профиля распределения и эффективности поглощения излучения, полученные методом трассировки лучей с использованием ПО Zemax для различных температур, представлены на рис. 2 и в табл. 1 соответственно. Отвод тепла от лазерного кристалла при работе в цикле обеспечивается за счет контакта боковой поверхности кристалла, не используемой для накачки, с алюминиевым теплоотводом через слой индия толщиной 0,5 мм шириной 8 мм с обеих сторон активного элемента.

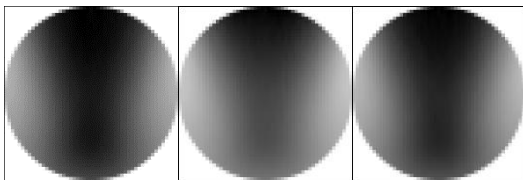


Рисунок 2 – Результаты численного моделирования профиля поглощения накачки для длин волн 804 нм (слева), 809 нм (середина), 811 нм (справа). Темным цветом выделены области наибольшего поглощения накачки, градации серого имеют свою нормировку для каждого профиля

Таблица 1. Расчетные эффективности накачки для квантрона 4 мм для ряда длин волн накачки λ , соответствующих различным температурам T

№	$T, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{нм}$	КПД накачки
1	+10	804	62%
2	+25	809	68%
3	+45	811	64%

Исследованы несколько типов оптических схем на основе рассмотренного квантрона с активной модуляцией добротности: линейные устойчивый и не-устойчивый резонаторы, а также система с задающим генератором и усилителем (далее – ЗГ-У).

Устойчивый резонатор имеет длину 300 и 450 мм и включает плоские глухое зеркало и выходное зеркало с коэффициентом отражения 24 %.

Неустойчивый резонатор имеет длину 260 мм и включает глухое вогнутое зеркало и выходное выпуклое зеркало в форме мениска с Гауссовым профилем поглощения с пиковым коэффициентом отражения 30 % и радиусом профиля по уровню $1/e^2$ 1,6 мм. Увеличение резонатора с учетом дифракции [3] равно 1,4.

Система ЗГ-У использует приведенный квантрон в качестве усилителя с двумя проходными для пучка поляризованного излучения диаметром 1,7 мм с энергией 15 мДж с расходимостью не более 1,5 мрад, пропускаемого через телескоп 2х. Второй проход излучения через усилитель обеспечивается внесением поляризационной оптики. Суммарная длина системы составляет 340 мм.

Результаты экспериментальных исследований устойчивого резонатора 300 мм и неустойчивого представлены в табл. 2. Для частот следования импульсов 1, 5, 10, 12,5 Гц измерения параметров проводились через 100 с после запуска, для частоты 20 Гц измерения проводились через 20 с после запуска. Для обоих резонаторов характерно небольшое ухудшение параметров при повышении частоты следования импульсов.

Таблица 2. Экспериментально полученные значения энергии и расходимости лазерных импульсов при различной частоте следования для устойчивых и неустойчивых резонаторов

Частота, Гц	Устойчивый резонатор		Неустойчивый резонатор	
	Энергия, мДж	Расходимость, мрад	Энергия, мДж	Расходимость, мрад
1	80	1.7	64	1.1
5	80	1.7	65	1.1
10	79	1.7	66	1.2
12.5	74	1.7	64	1.3
20	72	1.5	62	1.3

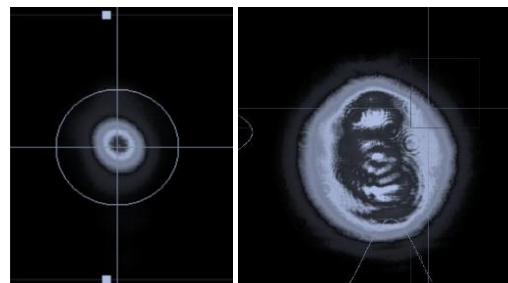


Рисунок 3 – Изображение излучения резонатора 450 мм в дальней зоне (слева), в ближней зоне (справа)

При увеличении длины устойчивого резонатора до 450 мм расходимость снижается до 1,2 мрад для частоты следования импульсов 5 Гц, энергия импульса составляет 79 мДж. Изображения излучения в дальней и ближней зонах приведены на рис. 3.

Выходная энергия и расходимость ЗГ-У при частоте следования импульсов 20 Гц составляют соответственно 74 мДж и 1 мрад.

Для расширения диапазона рабочих частот следования импульсов планируется повышение эффективности системы отвода тепла от активного элемента. Для снижения расходимости устойчивого резонатора необходимо увеличить его длину. Использование системы ЗГ-У прием-

лемо в случае, его увеличение габаритов и энергопотребления не критично.

Литература

1. Xie, S. Investigation of 100 mJ all solid state end-pumped 1064 nm Q-switched laser / S. Xie // Proc. SPIE, LIDAR Imaging Detection and Target Recognition. – 2017. – Vol. 106050.
2. Moon, H.-J. Operation Characteristics of Diode-Pumped, Bifocusing Compensated Two-Rod Nd:YAG Lasers with Diffusive Reflectors / H.-J. Moon // Journal of the Korean Physical Society. – 2001. – Vol. 39, № 5. – P. 881–885.
3. Morin, M. Graded reflectivity mirror unstable laser resonators / M. Morin // Optical and Quantum Electronics. – 1997. – Vol. 29. – P. 819–866.

УДК 620.183

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ

Палабугин М.В., Усольцев В.П.

*Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
Ижевск, Российская Федерация*

Аннотация. Произведен обзор: наиболее часто встречающихся дефектов в составе драгоценных камней, классификации методов по обнаружению несовершенств в структуре алмаза. Исследован метод, позволяющий проводить быструю и качественную оценку наличия дефектов в структуре кристалла. Проанализирован опыт, результаты которого подтвердили жизнеспособность предлагаемой идеи.

Ключевые слова: лазерное сканирование, драгоценные камни.

RESEARCH SYSTEM FOR ANALYSIS OF DEFECTS OF PRECIOUS STONES

Palabugin M., Usoltsev V.

*Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov
Izhevsk, Russia*

Abstract. A review is made of: the most common defects in the composition of gemstones, classification of methods for detecting imperfections in the structure of a diamond. A method has been investigated that makes it possible to quickly and qualitatively assess the presence of defects in the crystal structure. The experience is analyzed, the results of which have confirmed the viability of the proposed idea.

Key words: laser scanning device, precious stones.

*Адрес для переписки: Палабугин М.В., ул. Школьная 47А, г. Ижевск, Россия
e-mail: mr.kadochnikov777@mail.ru*

Введение. Каждый год злоумышленники изготавливают все более качественные подделки, которые с трудом могут выявить даже профессиональные ювелиры. Именно поэтому крайне важно создать установку, которая позволит безошибочно определить подлинность того или иного драгоценного камня [1].

Данный метод основан на запечатлении теневой картины, которая возникает при просвете драгоценного камня лазерным излучением. Известно, что каждый драгоценный камень уникален, нет другого, который бы был в точности на него похож. Подобное возникает из-за распределения внутри кристалла драгоценного камня определенных микро и макродефектов. Их сочетание, как раз-таки и дает уникальное распределение темных пятен разной формы и размеров на теневой картине. Эти данные впоследствии заносятся в паспорт изделия и по требованию пред-

являются, чтобы те или иные лица могли удостовериться в его подлинности [1].

Дефектный состав кристаллов алмаза. Под микродефектами понимаются такие дефекты, размеры которых сопоставимы с межатомными расстояниями. К ним относятся всевозможные точечные дефекты кристаллической решетки бриллианта, чьи размеры соизмеримы с межатомными расстояниями. Основные дефекты данного типа вызваны: примесными атомами внедрения (в основном это атомы углерода, азота, бора); изменением периодичности расположения атомов кристаллической решетки (в результате чего изменяются длины атомных связей в кристаллической решетке); вакансиями; примесными атомами замещения (обычно это водород и кремний). Дефекты в кристалле алмаза способны оказывать существенное влияние на

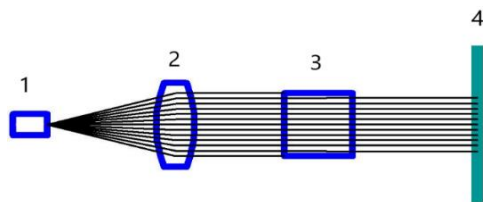
его физические и оптические свойства делая каждый камень уникальным [2].

Макродефекты – это те дефекты, которые возникают в алмазе на уровне кристаллической решетки, а также в результате внешних факторов при формировании или уже в сформированном виде (удары о породу при выходе на поверхность, сколы и трещины, возникшие при добычке и обработке). В основном, такие дефекты видны невооруженным глазом. Одними из таких дефектов являются дислокационные дефекты роста, двойникование, аномальное двупреломление, пластинчатые сегрегации [3].

Описание методики. Метод, предлагаемый в данной работе, является крайне простым, доступным и интуитивно понятным на фоне всех остальных. Его точность зависит от длины волны лазерного излучения, чем она меньше, тем выше точность.

Разработанная лазерная установка позволит производить сканирование каждого отдельного алмаза. Полученные данные будут заноситься в цифровой паспорт изделия, что позволит опознать тот или иной камень. На основании полученного анализа можно будет с определенной вероятностью подтвердить подлинности алмаза. Данное решение позволит проводить качественный мобильный и оперативный контроль за оборотом драгоценных камней. Для сканирования алмаза был выбран источник лазерного излучения высокой монохроматичности на длине волны 405 нм. На данной длине волны алмаз прозрачен, что позволяет проводить эффективные исследования его структуры с высокой точностью [4].

В состав оптической системы входит: источник лазерного излучения – 1; уширяющая пучок оптика – 2, которая уширяет пучок до размеров, сопоставимых с размерами исследуемого объекта – 3; ячеистый экран – 4, на который проецируется полученное теневое распределение дефектов 4. Функциональная схема оптической системы показана на рис. 1.



1 – лазер, 2 – оптическая система по расширению лазерного пучка, 3 – исследуемый объект, 4 – ячеистый экран

Рисунок 1 – Функциональная схема оптической системы

Описание проведенного эксперимента. Для подтверждения работоспособности установки, был проведен опыт по исследованию неоднород-

ностей структуры светоделительной призмы с соответствующими оптическими характеристиками. Источником когерентного излучения служил лазер с длиной волны 405 нм. В результате эксперимента были обнаружены дефекты в данном объекте.

Полученные теневые картины исследуемого объекта показаны на рис. 2 и 3.

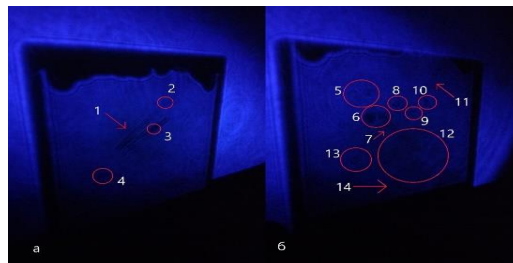


Рисунок 2 – Теневые карты граней 1 и 2 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 405 нм

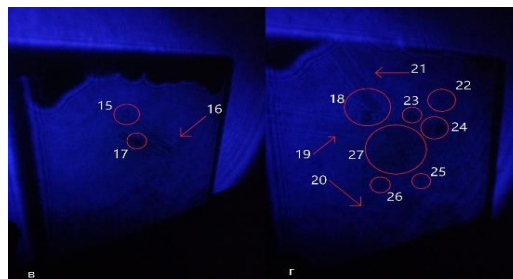


Рисунок 3 – Теневые карты граней 3 и 4 исследуемого объекта при использовании лазера с длиной волны 405 нм

Выводы. Данные, полученные при исследованиях, свидетельствуют о работоспособности рассмотренной лазерной установки для дефектоскопии драгоценных камней. Благодаря ей можно исследовать кристалл алмаза на наличие дефектов и создать их карту, а позже, по полученным сведениям, сформировать паспорт конкретного изделия.

Чтобы повысить эффективность идентификации драгоценных камней создана информационная база результатов исследования дефектов алмазов. Для удобства и быстроты поиска определенных дефектов, была предложена иерархическая структура классификации дефектов, в которой были учтены всевозможные формы и размеры встречающихся в кристаллах алмаза дефектов, а также их расположение. Если при сканировании отдельно взятого алмаза, полученная теневая картина совпадет с той, что уже находится в базе данных, то с определенной долей вероятности можно будет утверждать об идентичности.

Литература

1. Палабугин, М. В. Методы дефектоскопии кристаллов драгоценных камней / М. В. Палабугин, В. П. Усольцев // Актуальные вопросы и перспективы

развития науки, техники и технологии, 27 марта 2020 г. / ЧУДПО «НИОЦ» ; под общ. ред. Е. А. Назарова. – Казань: ЧУДПО «НИОЦ», 2020. – С. 64–69.

2. Орлов, Ю. Л. Минералогия алмаза. – Изд. 2-е. – Москва : Академия наук СССР Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана, 1984. – 170 с.

3. Lawrence S. Pan, Don R. Cania. Diamond: Electronic Properties and Applications. Kluwer Ac. Pub., 1994. – P. 176–192.

4. Новикова, Н. В. Свойства алмаза / Н. В. Новикова. – Киев : Наукова думка, 1987. – 120 с.

УДК 535.421

ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Полецук Н.Н., Рудницкий А.С.

*Белорусский государственный университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Получены численные решения строго поставленной двумерной задачи дифракции волнового поля на диэлектрическом стержне квадратного сечения. На их основе сформулированы условия образования фотонных наноструй в ближней зоне дифракционного волнового поля. Исследованы зависимости амплитудных и фазовых характеристик фотонных наноструй от структуры экспонирующего поля.

Ключевые слова: дифракция, фотонная наноструя, диэлектрическая частица, суперпозиция плоских волн, интерференционный параметр.

PHASE STRUCTURE OF PHOTONIC NANOJETTS IN DIFFRACTION WAVE FIELDS OF ISOLATED DIELECTRIC PARTICLES

Poleschuk N., Rudnitsky A.

*Belarusian State University
Minsk, Belarus*

Abstract. Rigorous two-dimensional numerical solutions are obtained for the fields of wave diffraction by an infinite dielectric rod of square cross section. These solutions provide the opportunity to formulate the conditions for the photonic nanojets generation in the near zone of diffraction field. Amplitude and phase characteristics of photonic nanojets are investigated in dependence of the exposing field structure.

Key words: diffraction, photonic nanojet, dielectric particle, plane waves superposition, interference parameter.

*Адрес для переписки: Полецук Н.Н., ФРФУКТ, пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Республика Беларусь
e-mail: polestchuk@bsu.by*

На эффект формирования фотонных наноструй (ФНС) впервые было обращено внимание в работе [1] при изучении пространственной структуры ближнего поля рассеяния светового пучка на прозрачном кварцевом цилиндре микронных размеров. Спецификой ФНС является достаточно высокая пространственная локализация волнового поля в поперечном к направлению распространения падающего излучения сечении, что приводит к субволновым размерам фотонного потока. Это свойство ФНС и представляет интерес для практического применения их в нанопотонике, биологии, медицине, наноэлектронике, системах хранения данных и в других областях науки и техники. Сообщается о возможности создания сенсоров высокого пространственного разрешения (нанометровый масштаб) [2], оптического скальпеля для прецизионной хирургии, оптического пинцета для манипулирования нанообъектами; возможна разработка устройств хранения данных с ультравысокой плотностью записи информации и технологии

безмасочного (прямого) нанесения нанощаблонов на поверхность фотосенсоров [3].

Большинство известных теоретических результатов исследования ФНС относятся к цилиндрическим и сферическим частицам и получены на основе соответствующих аналитических решений дифракционных задач. В работе [4] на их основе показано, что, варьируя оптический контраст оболочек сферической частицы, можно управлять параметрами ФНС. При исследовании фотонных наноструй на частицах более сложной формы используются численные методы [5]. В работе [6] показано, что при экспонировании диэлектрической частицы суперпозицией плоских волн наблюдается эффект формирования нескольких фотонных наноструй.

В данной работе исследуется зависимость прежде всего фазовых параметров ФНС от структуры падающего волнового поля на примере двумерной задачи дифракции суперпозиции двух плоских волн на диэлектрическом стержне квадратного сечения. Размеры сечения в длинах

волн равны $1 \leq x \leq 2, 1 \leq z \leq 2$. Падающее волновое поле запишем в виде

$$u_0(x, z) = A_1 u_1(x, z) + A_2 u_2(x, z),$$

$$u_1(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta - \gamma) + z \sin(\theta - \gamma))], \quad (1)$$

$$u_2(x, z) = \exp[-ikx(\cos(\theta + \gamma) + z \sin(\theta + \gamma))].$$

Компоненты магнитного поля не выписываются. Исходное интегральное уравнение представим в виде

$$u(r) = u_0(r) + \int_S u(r') K(r, r') dr', \quad (2)$$

$$K(r, r') = -0,25k^2(\varepsilon - 1) i H_0^{(2)}(k|r - r'|).$$

Искомой величиной является дифракционное волновое поле. Его характеристики зависят от входящих в интегральное уравнение параметров: формы S , диэлектрической проницаемости ε и падающего волнового поля u_0 . При выполнении численных расчетов полагали $A_1 = A_2 = 0,5$, $\theta = \frac{\pi}{4}$, диэлектрические проницаемости материалов внутри и вне частицы равны 2 и 1 соответственно. Экспонирующая волна распространяется вдоль диагонали $x = z$ с периодически изменяющейся в ортогональном направлении амплитудой. Взаимосвязь между угловым параметром γ и нормированной на длину волны шириной интерференционных полос d определяется соотношением

$$d = \frac{1}{2 \sin \gamma}. \quad (3)$$

Исследованы распределения интенсивности и фазы дифракционного волнового поля внутри частицы и вне ее на расстоянии длины волны от поверхности для трех значений интерференционного параметра γ . На рисунках представлены распределения интенсивности и фазы дифракционного волнового поля при значении интерференционного параметра $\gamma = \pi/8$.

Из рисунков следует, что при распространении экспонирующей волны по диагонали квадратной частицы с диэлектрической проницаемостью равной 2 и с размерами порядка длины волны область повышенной интенсивности волнового поля формируется вблизи вершины угла с внешней стороны на острие поверхности. Линии равных фаз в этой области вытянуты поперечно к направлению распространения экспонирующего поля. Это означает, что градиент эйконала волнового поля параллелен или отклонен на небольшой угол к направлению распространения, то есть от диагонали частицы. Лучи ориентированы в том же направлении.

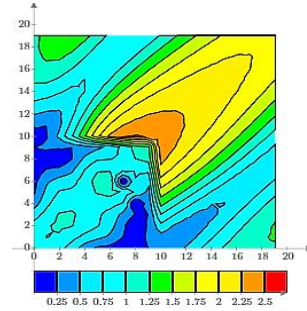


Рисунок 1 – Распределение амплитуды волнового поля в ближней зоне дифракции

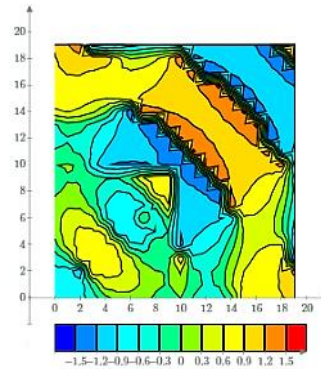


Рисунок 2 – Распределение фазы волнового поля в ближней зоне дифракции

Литература

1. Chen, Z. Potonicnanojet enhancement of backscattering of light by nanoparticles / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2004. – № 12(7). – P. 1214–1220.
2. Chen, Z. Optical analysis of nanoparticles via enhanced backscattering facilitated by 3-D photonic nanojets / Z. Chen, A. Taflove, V. Backman // Optics Express. – 2005. – № 13. – P. 526–533.
3. Сойфер, В. А. Дифракционная нанофотоника и перспективные информационные технологии / В. А. Сойфер // Вестн. РАН. – 2014. – Т. 84, № 1. – С. 11–22.
4. Гейнц, Ю. Э. Эффект фотонных наноструй в многослойных микронных сферических частицах / Ю. Э. Гейнц, А. А. Землянов, Е. К. Панина // Квантовая электроника. – 2011. – Т. 41, № 6. – С. 520–525.
5. Минин, И. В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий / И. В. Минин, О. В. Минин // Вестник Новосибир. гос. ун-та. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.
6. Полещук, Н. Н. Численное моделирование фотонных наноструй в дифракционных полях диэлектрических частиц / Н. Н. Полещук, А. С. Рудницкий // «Приборостроение–2020»: материалы 13-й МНТК, 18–20 ноября 2020 г., Минск, Республика Беларусь. – Минск: БНТУ, 2020. – С. 290.

УДК 621.372.8

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА Поляков А.В.¹, Ксенофонтов М.А.²

¹Белорусский государственный университет

²НИИ «Институт прикладных физических проблем им. А.Н.Севченко» БГУ
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Предложена конструкция чувствительного элемента квазираспределенной волоконно-оптической измерительной системы рециркуляционного типа для определения концентрации газообразного кислорода. Структура состоит из магнитострикционного материала «металлическое стекло» и волоконного световода, помещенных в однородное магнитное поле. Принцип работы датчика основан на парамагнитных свойствах кислорода. Получены зависимости относительной погрешности метода измерения устройства от длины и радиуса чувствительного элемента, а также от площади сечения магнитострикционной полосы. Установлено, что подбором размеров чувствительного элемента достигается величина относительной погрешности измерений концентраций 0,6 % для чистого кислорода и 2,5 % для воздушной смеси.

Ключевые слова: концентрация кислорода, волоконно-оптический датчик, частота рециркуляции, погрешность измерений.

FIBER-OPTIC OXYGEN CONCENTRATION SENSOR

Polyakov A.¹, Ksenjfontov M.²

¹Belarusian State University

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of BSU
Minsk, Belarus

Abstract. The design of the sensitive element of the quasi-distributed fiber-optic recirculation measuring system for determining the concentration of gaseous oxygen is proposed. The structure consists of a magnetostrictive “metallic glass” material and optical fiber, placed in a uniform magnetic field. The principle of the sensor operation is based on the paramagnetic properties of oxygen. The dependences of the relative error of the measuring method device on the length and radius of the sensitive element, as well as on the cross-sectional area of the magnetostrictive strip are obtained. It has been established that the selection of the size of the sensitive element achieves a relative measurement error of 0.6% for pure oxygen and 2.5% for an air mixture.

Key words: oxygen concentration, fiber optic sensor, recirculation frequency, measurement error.

*Адрес для переписки: Поляков А.В., пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Республика Беларусь
e-mail: polyakov@bsu.by*

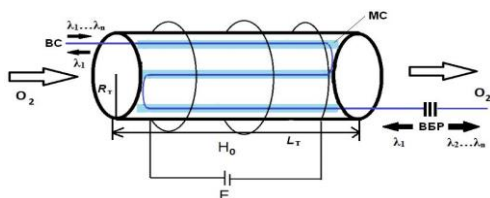
Непрерывное развитие самостоятельного направления в индустрии – кислородной промышленности – обуславливает все возрастающие требования к точности и динамизму измерений при производстве и использовании кислорода. Существует необходимость измерения концентрации кислорода в таких отраслях как металлургия, фармацевтика, электростанции, службы, отвечающие за охрану окружающей среды, медицина и нефтепромышленность. Большинство традиционных электрических датчиков для измерения кислорода основаны на изменении их сопротивления и емкости, которые могут быть легко нарушены с помощью электрического или магнитного поля, кроме того, они будут создавать проблемы безопасности, если они используются в легко воспламеняемых или взрывоопасных случаях. Оптоволоконные датчики газа имеют такие характеристики, как высокая точность, защищенность от воздействия электрических и магнитных полей, пожаро- и взрывобезопасность, устойчивость к агрессивным средам. Проведенный анализ конструктивных решений волоконно-оптических датчиков (ВОД) концен-

трации кислорода, основанных на поглощении, флюоресценции, фосфоресценции [1, 2], показал, что в них оптическое волокно используется, как правило, только как канал передачи информации. Однако современные тенденции развития оптоволоконных измерительных устройств свидетельствуют о том, что волокно может применяться одновременно и в качестве чувствительного элемента и как информационный тракт.

Одним из вариантов воплощения такой концепции является предложенный в работе [3] оптоволоконный измеритель, построенный по схеме интерферометра Фабри-Перо. В основу метода измерений положены парамагнитные свойства молекулярного кислорода. При нахождении в постоянном магнитном поле молекулы O₂ намагничиваются и изменяют магнитное поле, которое приводит к изменению длины магнитострикционного материала и соответственно к изменению длины жестко связанного с ним волоконного световода (ВС). В результате за счет смещения интерференционной картины происходит изменение фототока, протекающего через фотодетектор. Однако, данная схема изме-

рительной системы обладает рядом недостатков: 1. Как любая интерференционная схема, она очень чувствительна к механическим воздействиям, вибрациям и т.п. В результате чего такие структуры не нашли широкого применения на производстве. 2. Отсутствует возможность на одной магнестрикционной полосе уложить большое число витков ВС, поскольку достаточно малый радиус изгиба ВС ведет к дополнительным оптическим потерям и механическим повреждениям волокна. 3. Предложенная структура является точечным измерителем, в то время как сейчас предпочтение отдается распределенным или квазираспределенным датчикам.

Для того, чтобы исключить указанные недостатки, нами предложен новый тип квазираспределенного волоконно-оптического магнестрикционного датчика, принцип измерения которого основан на регистрации изменения частоты рециркуляции одиночных оптических импульсов на различных длинах волн, распространяющихся в замкнутом оптоволоконном контуре [4]. Волоконный световод разделен на секции волоконными брэгговскими решетками, являющимися спектрально-селективными элементами. В качестве чувствительного элемента использовалось стандартное телекоммуникационное одномодовое волокно 9/125 мкм фирмы Corning, имеющее толщину защитного полиимидного покрытия 65 мкм и полный наружный диаметр $d_b = 255$ мкм. Внутри измерительной трубки (рис. 1) размещены полосы из магнестрикционного материала, называемым «металлическим стеклом».



ВС – волоконный световод; МС – полосы магнестрикционного материала; R_T – радиус измерительной трубки; L_T – длина измерительной трубки; ВБР – волоконная брэгговская решетка

Рисунок 1 – Схема чувствительного элемента волоконно-оптического датчика рециркуляционного типа

На этих полосках расположено достаточно жестко закрепленное оптическое волокно (цианоакрилатом). Поверх этой конструкции навита электрическая катушка для формирования постоянного магнитного поля H_0 во внутреннем объеме трубки. При изменении величины магнитного поля происходит изменение длины магнестрикционных полос, и, следовательно, дли-

ны ВС и как следствие, частоты рециркуляции. Минимально допустимый радиус изгиба ВС определяется исходя из механических свойств волокна. Если волокно изогнуто столь сильно, что поверхностные напряжения превысят 0,2%, то весьма вероятно, что в процессе эксплуатации в нем могут возникнуть значительные трещины. Для того, чтобы этого не произошло, должно выполняться следующее условие: $d > 500D_{bc} - 2h_1$, где D_{bc} – диаметр оболочки ВС (125 мкм), h_1 – толщина слоя защитного покрытия ($h_1 = 65$ мкм), т. е. $d > 6$ см. Данная структура хорошо согласуется с трубопроводами различного диаметра.

Погрешность измерений ВОД рециркуляционного типа определяется условием, что относительное изменение частоты рециркуляции, вызванное воздействием на ВС, должно превышать максимальную величину относительной долговременной нестабильности частоты рециркуляции χ_{max} для выбранной длины ВС, которая обусловлена влиянием не связанных с измеряемой физической величиной внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Проведенные экспериментальные исследования показали, что для длин ВС $L > 100$ м величина χ_{max} не превышала $2 \cdot 10^{-6}$ [4]. Разработана математическая модель, описывающая принцип работы измерительной системы, позволяющая провести оценку разрешающей способности датчика. Показано, что при длине чувствительного элемента $L_T = 1,5$ м, радиусе $R_T = 0,6$ м и площади сечения магнестрикционной полосы $S_m = 35 \cdot 10^{-6}$ м² относительная погрешность метода измерений не превышает 0,6 % для кислорода и 2,5 % для воздушной смеси. Для достижения данной погрешности интерференционным датчиком [3] необходимо осуществлять регистрацию изменения тока на уровне 0,6 мкА, что является достаточно сложной технической задачей выделения таких малых сигналов на уровне шумов.

Литература

1. Hasumoto, H. Use of an optical oxygen sensor to measure dissolved oxygen in seawater / H. Hasumoto [et al.] // Journal of Oceanography. – 2006. – Vol. 62. – P. 99–103.
2. Preparation and properties of sensing membrane for fiber optic oxygen sensor / J. Deshen [et al.] // Journal of Wuhan University of Tehnology – 2002. – Vol. 17, № 2. – P. 51–53.
3. Липатов, Н. И. Волоконно-оптический магнестрикционный датчик концентрации свободного кислорода / Н. И. Липатов, В. В. Саханова // Измерительная техника. – 2004. – № 7. – С. 50–53.
4. Поляков, А. В. Рециркуляционные оптоволоконные измерительные системы / А. В. Поляков. – Минск : БГУ, 2014. – 208 с.

УДК 666.1.01

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$: ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА

Прусова И.В.¹, Прихач Н.К.¹, Акиншев К.А.²

¹Белорусский национальный технический университет

²ГНУ «Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Золь-гель методом синтезированы кварцевые стекла, легированные Eu и Al. Установлено, что в отсутствие Al европий встраивается в матрицу в степени окисления +3 независимо от окислительно-восстановительных условий синтеза. В солегированном стекле имеет место формирование сложных Eu–Al-центров в которых возможно практически полное восстановление Eu^{3+} до Eu^{2+} .

Ключевые слова: золь-гель метод, кварцевое стекло, ионы европия, люминесценция, сложные оптические центры.

SPECTRAL-LUMINESCENT PROPERTIES OF $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$ SYSTEM GLASSES: INFLUENCE OF SYNTHESIS CONDITION

Prusava I.¹, Prykhach N.¹, Akinshau K.²

¹Belarusian National Technical University

²B.I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus

Minsk, Belarus

Abstract. Silica glasses doped with Eu and Al were synthesized by the sol-gel method. It was found that in the absence of Al europium is embedded in the matrix in the oxidation level +3 regardless of the redox conditions of synthesis. In co-doped glass, the formation of complex Eu–Al-centers occurs, in which almost complete reduction of Eu^{3+} to Eu^{2+} is possible.

Key words: sol-gel method, silica glass, europium ions, luminescence, complicated optical centers.

Адрес для переписки: Прусова И.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: bntu@bntu.by

Ионы Eu^{3+} давно и широко используются в качестве люминесцентного активатора и спектроскопического зонда [1], благодаря достаточно высокому квантовому выходу люминесценции и относительно простой схеме уровней, см. рис. 1. Однако из-за большого «спектроскопического потенциала» таких ионов поток публикаций, посвященных исследованию Eu-содержащих оптических материалов, согласно поисковику Scopus, последние 20 лет ежегодно возрастает в среднем на 10 научных статей. За неполный 2021 г. уже имеется 48 публикаций (см., например, [2, 3]). К настоящему времени накоплено достаточно информации о параметрах редкоземельных ионов, люминесценция которых обусловлена запрещенными по четности $f-f$ переходами, в то время как для активаторов, у которых излучательными являются состояния смешанной электронной конфигурации $4f^65d^1$ (Eu^{2+}), сведения об эффективности свечения немногочисленны. Вместе с тем кварцевые стекла с Eu^{2+} являются перспективными с точки зрения использования их в качестве катодолуминофоров и детекторов ионизирующего излучения.

Основной целью данной работы были определение и оценка влияния алюминия на спектрально-люминесцентные свойства ионов европия в кварцевом гель-стекле.

Образцы синтезировались золь-гель методом по методике [4] с различной концентрацией алюминия и европия в исходных золях. Спекание ксерогелей осуществлялось на воздухе, отжиг – на воздухе и в водороде. Регистрация спектров поглощения осуществлялась на спектрофотометре Cary-500, спектров люминесценции – на спектрофлуориметре CM2203 (ЗАО «СОЛАР»). Полученные спектры люминесценции корректировались на спектральную чувствительность системы регистрации и выражались в виде числа квантов на единичный спектральный интервал.

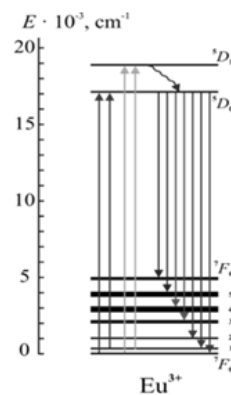


Рисунок 1 – Схема энергетических состояний и оптических переходов ионов Eu^{3+}

Показатель преломления стекол определялся иммерсионным методом (n_D), а плотность ρ – методом гидростатического взвешивания.

Окончательная концентрация ингредиентов в стеклах определялась с помощью рентгеновского микроанализатора Camebax. Для пересчета значений C (масс %) в N (ионы/см³) использовалась следующая формула:

$$N = 0,001 N_A \rho C n_x / M, \quad (1)$$

где N_A – число Авогадро; n_x и M – количество искомых элементов в окисле и его молярная масса соответственно.

Вероятность радиационного распада люминесцентного состояния (5D_0) ионов Eu^{3+} на низколежащие уровни 7F_0 (заселен на 63 % от полной концентрации Eu^{3+}) и 7F_1 (заселен на 33 %) определялась из спектров поглощения по формуле

$$A(^5D_0 \rightarrow ^7F_{0,1}) = [g(^7F_{0,1})/g(^5D_0)] \times \\ \times [g(^7F_{1,2})8\pi cn^2 \int k(\lambda) d\lambda] / [g(^5D_0)N(^7F_{0,1})\lambda^4] \quad (2)$$

где g – степень вырождения соответствующего уровня, c – скорость света в вакууме, λ – длина волны соответствующего перехода, n – показатель преломления.

Вероятности люминесцентных переходов на слабозаселенные уровни 7F_3 и 7F_4 определялись по соотношению интенсивностей в спектре люминесценции искомого перехода и перехода с известным значением A . Полная вероятность радиационного распада состояния 5D_0 определялась как сумма полученных значений парциальных вероятностей и составила 890 мкс.

В результате проведенных исследований было установлено, что в спеченном на воздухе кварцевом гель-стекле европий реализуется лишь в состоянии окисления $\text{Eu}(\text{III})$, независимо от окислительно-восстановительных условий отжига. Однако при дополнительном легировании этого стекла алюминием и последующем отжиге в водороде можно добиться практически полного перевода $\text{Eu}(\text{III})$ в $\text{Eu}(\text{II})$, что можно связать с формированием сложных Eu-Al -центров, о чем свидетельствует многократно большая относительная интенсивность перехода $^5D_0 \rightarrow ^7F_0$ и низкая интенсивность перехода $^5D_0 \rightarrow ^7F_1$ (рис. 2) по сравнению с интенсивностью этих переходов в Eu -содержащем кварцевом гель-стекле [5]. Вероятность радиационного распада метастабильного состояния ионов Eu^{3+} в таких центрах составляет 890 мкс.

Спектры люминесценции и ее возбуждения отожженного в водороде Eu-Al -содержащего стекла приведены на рис. 3. Неизменность положения и формы разрешенной по четности $4f^6 5d \rightarrow 4f^7$ полосы люминесценции Eu^{2+} ($\lambda_{\text{макс}} \approx 450$ нм)

при сканировании $\lambda_{\text{возб}}$ указывает на сохранение высокой однородности структуры Eu-Al -центров при восстановлении активатора путем насыщения стекла водородом. Практически полное отсутствие в этом спектре $f-f$ -полос ионов Eu^{3+} свидетельствует о переводе подавляющей части ионов активатора в двухзарядное состояние и малой вероятности безызлучательного переноса возбуждения от Eu^{2+} к остаточной примеси Eu^{3+} .

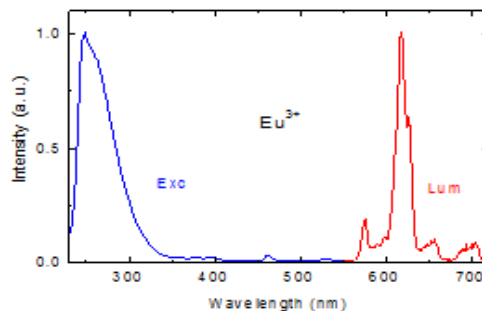


Рисунок 2 – Спектры люминесценции и ее возбуждения Eu-Al -содержащего стекла, синтезированного в окислительных условиях

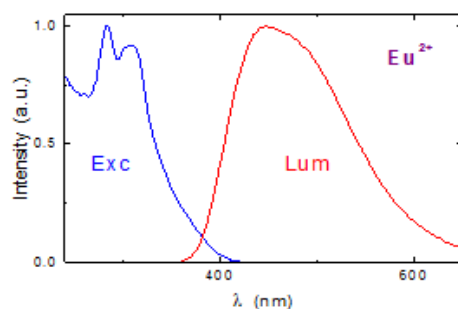


Рисунок 3 – Спектры люминесценции и ее возбуждения Eu-Al -содержащего стекла, синтезированного в восстановительных условиях

Литература

1. Гайдук, М. И. Спектры люминесценции европия / М. И. Гайдук, В. Ф. Золин, Л. С. Гайгерова. – М. : Наука, 1974. – 195 с.
2. Luminescence and structural properties of Eu^{3+} -doped calcium fluoride-bismuth oxide-phosphate glasses / F. Jiang [et al.] // *Ceramics International*, 2021. – Vol. 47, iss. 10. – P. 13776–13782.
3. Evaluation of photoluminescence and scintillation properties of Eu -doped $20\text{CsCl}-20\text{BaCl}_2-60\text{ZnCl}_2$ glasses by a melt quenching method / G. Ito [et al.] // *Journal of Materials Science : Materials in Electronics*. – 2021. – Vol. 32, iss. 7. – P. 8725–8732.
4. Malashkevich, G. E. Optical centers of cerium in silica gel-glasses obtained by the sol-gel process / G. E. Malashkevich // *J. Non-Cryst. Solids*. – 1995. – Vol. 188. – P. 107–117.
5. Спектрально-люминесцентные свойства и структура оптических центров Eu - и Ce-Eu -содержащих кварцевых гель-стекол / Г. Е. Малашкевич [и др.] // *ФТТ*. – 1999. – Т. 41, № 2. – С. 229–234.

УДК 681.78

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННО-ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИБОРА-ДАЛЬНОМЕРА
Павленко В.К., Сафонов В.В., Шкадаревич А.П.**

*УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе описана модернизация многоканального оптического прибора для увеличения дальности обнаружения объектов наблюдения и диапазона измерения дальности в связи с необходимостью применения его в местах с прямой дальностью видимости более 4500 метров.

Ключевые слова: модернизация, прибор-дальномер, дальность обнаружения, диапазон измерения дальности.

**MODERNIZATION OF TELEVISION-THERMALVISION DEVICE-RANGEFINDER
Pavlenko V., Safonau U., Shkadarevich A.**

*Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk, Belarus*

Abstract. The paper describes the modernization of a multichannel optical device to increase the detection range of objects of observation and the range of measuring the range in connection with the need to use it in places with a line of sight more than 4500 meters.

Key words: modernization, device-rangefinder, detection range, range of measuring range.

*Адрес для переписки: Сафонов В.В., ул. Макаенка 23, корп.1, г. Минск 220114, Республика Беларусь
e-mail: safonov1993saf@mail.ru*

В связи с постоянным техническим прогрессом и быстрым развитием технологий приборы, разработанные несколько лет назад, требуют модернизации и улучшения технических характеристик для того, чтобы оставаться конкурентоспособными. Основное направление модернизации «Телевизионно-тепловизионного наблюдательного прибора-дальномера «Капонир» - увеличение дальности обнаружения целей и диапазона измерения дальности до них, а так же улучшение точностей измерения азимутального угла и расчета координат цели.

Для слежения за фоно-целевой обстановкой (визуальное обнаружение наземных целей типа «человек, автомобиль», измерение дальности до целей и определение их координат) применяются многоканальные оптические приборы и системы, позволяющие проводить наблюдение в любое время суток, в условиях пониженной освещенности и меняющейся метеорологической обстановки. К такому классу изделий относится «Телевизионно-тепловизионный прибор-дальномер «Капонир» (далее – прибор «Капонир»).

Общий вид прибора «Капонир» представлен на рис. 1.



Рисунок 1 – Общий вид прибора «Капонир»

В табл. 1 представлены основные технические характеристики прибора «Капонир».

Прибор «Капонир» разрабатывался для работы на местности с прямой дальностью видимости до 4500 метров (лесисто-болотистая местность).

Поставлена задача модернизации прибора «Капонир» для работы на местности с прямой дальностью видимости более 4500 метров (степи, пустыни).

Таблица 1. Основные технические характеристики прибора «Капонир»

Телевизионный канал	
Дальность обнаружения цели типа «танк» (боковая проекция)	Не менее 4500 м
Тепловизионный канал	
Дальность обнаружения цели типа «танк» (боковая проекция)	Не менее 4500 м
Дальномерный канал	
Диапазон измерений дальности	От 50 до 4500 м
Среднеквадратическая ошибка измерения дальности	Не более 5 м
Угломерное устройство	
Диапазон определения угла ориентации в горизонтальной плоскости (азимута)	От 0 до 360°
Среднеквадратическое отклонение измерения угла ориентации в горизонтальной и вертикальной плоскостях	Не более 0,5°
Масса и габаритные размеры	
Масса прибора	Не более 5,45 кг
Габаритные размеры прибора	Не более 300 × 300 × 145 мм

Для увеличения диапазона измерения дальности и уменьшения среднеквадратической ошибки

измерения дальности диодный лазерный дальномер с длиной волны 905 нм заменен на твердотельный лазерный дальномер с ламповой накачкой с воздушным охлаждением и длиной волны генерации 1064 нм. Данное решение позволило в 4 раза увеличить диапазон измерения дальности и обеспечить высокий уровень устойчивости к внешним воздействующим факторам (туман, дождь, снег). Применение импульсного лазерного дальномера так же обеспечило возможность измерения дальности до объектов с переменным диффузным коэффициентом (дымы, облака, восходящие потоки и т.п.).

Для увеличения дальности обнаружения целей в тепловизионном канале тепловизионный объектив прибора «Капонир» с фокусным расстоянием 100 мм заменен на объектив с фокусным расстоянием 150 мм и относительным отверстием 1,0.

Дальность обнаружения целей в телевизионном канале увеличена за счет перехода на модульную видеокамеру нового поколения и усовершенствования алгоритмов обработки сигналов, поступающих от видеокамеры.

Замена тепловизионного объектива и видеокамеры позволила в 2,2 раза увеличить дальность обнаружения целей в различное время суток.

Одна из приоритетных задач прибора «Капонир» – определение координат целей. Основным параметр, влияющий на точность определения координат цели – среднеквадратическое отклонение измерения азимутального угла ориентации. Для обеспечения высокой точности определения координат цели во всем увеличенном диапазоне дальности обнаружения целей принято решение о замене угломерного устройства, основанного на электронном магнитном компасе, на угломерное устройство на основе абсолютного углового энкодера с точностью измерения угла 16 бит. При этом точность измерения азимутального угла на цель была повышена в 10 раз.

Для увеличения жесткости конструкции, в связи с необходимостью замены основных частей на менее компактные, полностью переработан корпус прибора «Капонир», что повлияло на массогабаритные характеристики.

На рис. 2 показан общий вид модернизированного изделия «Переносной телевизионно-тепловизионный наблюдательный прибор-дальномер «Капонир-М» (далее – прибор «Капонир-М»).



Рисунок 2 – Общий вид прибора «Капонир-М»

В таблице 2 представлены основные технические характеристики прибора «Капонир-М».

Таблица 2. Основные технические характеристики прибора «Капонир-М»

Телевизионный канал	
Дальность обнаружения цели типа «танк» (боковая проекция)	не менее 10000 м
Тепловизионный канал	
Дальность обнаружения цели типа «танк» (боковая проекция)	не менее 10000 м
Дальномерный канал	
Диапазон измерений дальности	от 50 до 18000 м
Среднеквадратическая ошибка измерения дальности	не более 3 м
Угломерное устройство	
Диапазон определения угла ориентации в горизонтальной плоскости (азимута)	от 0 до 360 °
Среднеквадратическое отклонение измерения угла ориентации в горизонтальной плоскости	не более 0,06 °
Среднеквадратическое отклонение измерения угла ориентации в вертикальной плоскости	не более 0,5 °
Масса и габаритные размеры	
Масса прибора	не более 10 кг
Габаритные размеры прибора	не более 300×400×210 мм

Указанные характеристики подтверждены успешными лабораторными и полевыми испытаниями прибора «Капонир-М».

УДК 528.8

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА

Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приводится сравнительная оценка критериев информативности данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Классификация дистанционных методов зондирования Земли из космоса основана на типе источника сигнала для исследования объекта – активном или пассивном.

Ключевые слова: зондирование Земли, критерий информативности данных, измерительная система.

COMPARATIVE EVALUATION OF THE INFORMATION CRITERIA FOR THE DATA OF REMOTE SENSING OF THE EARTH FROM SPACE

Romanov D., Fedortsev R.

Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus

Abstract. The paper provides a comparative assessment of the criteria for the information content of Earth remote sensing data from space. The classification of remote sensing methods for Earth sensing from space is based on the type of signal source for object research – active or passive.

Key words: earth sounding, criterion of data informativity, measuring system.

Классификация дистанционных методов зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса основана на типе источника сигнала для исследования объекта – активном или пассивном.

В пассивном ДЗЗ из космоса применяется оптико-электронная аппаратура (ОЭА), которая выполняет съемку подстилающей поверхности Земли, преобразование изображения в цифровой код, сжатие, формирование целевой информации (ЦИ), запоминание, хранение и выдачу ЦИ в высокоскоростную радиолинию (ВРЛ) космического аппарата (КА) для передачи на наземные пункты приема для последующей первичной и тематической обработки данных.

Основными техническими характеристиками ОЭА, определяющими сферу применения, являются следующие параметры: геометрическое пространственное разрешение (проекция пиксела на Землю) (GSD), ширина полосы захвата, отношение сигнал/шум (SNR), функция передачи модуляции (ФПМ), спектральный диапазон, точность геопривязки. Совокупность значений данных параметров определяют критерий ОЭА по возможной сфере применения данных ДЗЗ. Таким критерием является линейное разрешение на местности (ЛРМ) (термин применяется в странах СНГ) и уровень NIIRS (термин применяется в зарубежных странах). Эти параметры характеризуют возможность различать «мелкие» детали на полученных снимках.

ЛРМ – усредненная величина полупериода произвольно ориентированной трехшпальной квадратной миры, каждая шпала которой при известных значениях альбедо фона, контраста миры, угла визирования, обнаруживается наблюдателем на получаемом изображении с вероятностью не менее заданной.

Методика предварительной оценки ЛРМ основана на определении предельно-разрешаемой пространственной частоты элемента прямоугольной стандартной трехшпальной миры, путем решения сквозного частотно-энергетического уравнения.

Искомое ЛРМ в продольном и поперечном направлениях, вычисляются по формулам:

$$ЛРМ_x = D_n / [2v_{пред,x} F \cos(Uv)],$$

$$ЛРМ_y = D_n / [2v_{пред,y} F \cos(Uv)],$$

где D_n – наклонная дальность наблюдения, км (в расчетах, в соответствии с зачетными условиями, выбирается высота орбиты КА); F – фокусное

расстояние объектива, мм; U_v – угол визирования, град; $v_{пред}$ – предельно-разрешаемая пространственная частота элемента прямоугольной штриховой миры, при наблюдении изображения которой, воспринимаемое оператором эффективное (визуальное) отношение сигнал-шум на ее отдельном штрихе будет составлять пороговое значение, обеспечивающее требуемую вероятность его распознавания по принятому критерию дешифрируемости.

NIIRS используется аналитиками изображений для присвоения числа, которое указывает на интерпретируемость данного изображения. Концепция NIIRS позволяет напрямую связать качество изображения с задачами интерпретации, для которых оно может быть использовано. NIIRS обеспечивает систематический подход к измерению качества цифровых изображений.

Общее уравнение качества снимков:

$$NIIRS = c_0 + c_1 \log_{10}(GSD) + c_2 \times \log_{10}(RER) + c_3 \frac{G}{SNR} + c_4 H,$$

где c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 – коэффициенты, значения которых приведены в справочных таблицах; GSD – проекция пиксела на Землю в дюймах; RER – среднегеометрическое значение величины переходной функции изображения резкого края с учетом функции передачи модуляции (ФПМ) аппаратуры (объектива и фотоприемника), ФПМ атмосферы, ФПМ смаза.

SNR – отношение сигнал/шум для Ламбертовского источника с коэффициентами отражения 7 % и 15 %.

Таблица 1. Соответствие уровней NIIRS к ЛРМ

Видимый объект	GSD, м	Уровень NIIRS	ЛРМ, м
Идентификация по общему типу гусеничных машин, полевой артиллерии, группы транспортных средств	1,2–2,5	4	1,56–3,25
Обнаружение автомобиля на стоянке	0,75–1,2	5	0,97–1,56
Различаемость моделей малых/средних вертолетов	0,4–0,75	6	0,56–0,97
Идентификация железнодорожных путей	0,2–0,4	7	0,28–0,56

Для сопоставления ЛРМ и уровней NIIRS было проведено исследование по моделированию вышеуказанных параметров. По разработанной математической модели оптико-электронного тракта задавались параметры ОЭА с последующим расчетом ЛРМ и уровня NIIRS (см. таблицу 1). Расчет проводился для ОЭА среднего и высокого разрешения с высоты орбиты 500 км для следующих зачетных условий:

- съемка в надир;
- высота Солнца над местным горизонтом – не менее 30 град;
- коэффициент пропускания атмосферы – не менее 0,85 (интегральный) или метеорологическая дальность видения (МДВ) не хуже – 20 км;
- минимальный коэффициент отражения подстилающей поверхности 0,1;
- максимальный коэффициент отражения тест – объекта 0,4;
- альbedo фона 0,07;
- вероятность обнаружения не менее 0,8.

На основе полученных результатов были определены требования к ОЭА по критериям ЛРМ и уровню NIIRS для различных сфер применения (табл. 2).

Таблица 2. Сфера применения

Сфера применения	ЛРМ, м	Уровень NIIRS
Военное дело	0,28–0,97	6, 7
Гражданский сектор	0,97–1,56	5
Сельское хозяйство	1,56–3,25	4
МЧС	1,56–3,25	4

В ходе проведенного расчета и последующего анализа было определено соответствие друг другу уровней NIIRS и ЛРМ. На основе расчетных данных и в зависимости от поставленных задач по применению ОЭА можно сформировать технический облик аппаратуры для потенциального пользователя.

Литература

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://irp.fas.org/imint/niirs.htm>. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса. Качество данных дистанционного зондирования Земли из космоса. Перечень показателей качества данных дистанционного зондирования Земли из космоса, получаемых с космических аппаратов оптико-электронного наблюдения в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне : ГОСТ Р 59475-78.

УДК 681.772

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ Свибович И.В., Шкадаревич А.П.

*УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. В работе приведен краткий обзор современных тенденция оптического приборостроения в области тепловизионной техники. Рассмотрено применение тепловизионных матриц с различным разрешением и размером пикселей, их влияние на тактико-технически характеристики изделий. Показаны преимущества и недостатки применения различных видов калибровки тепловизионного изображения (тепловизионные модули с механическим затвором и без него). Затронута тематика использования атермализованных объективов в современных приборах наблюдения и тепловизионных прицелах.

Ключевые слова: тепловизионный модуль, атермализованный объектив, калибровка.

CURRENT TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THERMAL IMAGING DEVICES BASED ON UNCOOLED BOLOMETRIC MATRICES Svibovich I., Shkadarevich A.

*Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk Belarus*

Annotation. The paper provides a brief overview of modern trends in optical instrumentation in the field of thermal imaging technology. The use of thermal imaging matrices with different resolution and pixel size, their influence on the tactical and technical characteristics of products is considered. The advantages and disadvantages of using various types of thermal image calibration (thermal imaging modules with and without a mechanical shutter) are shown. The topic of the use of materialized lenses in modern surveillance devices and thermal imaging sights is touched upon.

Keywords: thermal imaging module, materialized lens, calibration.

*Адрес для переписки: Свибович И.В., ул. Макаенка, 23, корп. 1, 220113, Республика Беларусь
e-mail: ilya_svibovich@mail.ru*

В данной статье при упоминании микроболометрических модулей будут иметься в виду тепловизионные матрицы дальнего ИК-диапазона (8–14 мкм).

Развитие электроники и усовершенствование технологии производства болометрических приемников излучения стало причиной появления большого количества коммерчески доступных

тепловизионных модулей, имеющих сравнительно небольшую стоимость, малые габариты и при этом хорошие характеристики.

До 2015 года основная часть тепловизионных модулей имело разрешение 384×288 пикселей и размер пикселя 25 мкм. Но начиная с 2015 года технология производства позволила уменьшить размер пикселя до 17 мкм. Тепловизионные модули с таким размером пикселя и сегодня занимают основной объем поставок на рынке данного вида продукции. В 2020 году на рынке появились коммерчески доступные тепловизионные модули с размером пикселя 12 мкм. Их доля в общем производстве пока не большая, но в ближайших нескольких лет они вытеснят свои аналоги с размером пикселя в 17 мкм. При этом стандарт разрешения остался прежним, это модули с разрешением 384×288 и 640×512 мкм. Выпускаются модули с разрешением 1024×768 пикселей, но их стоимость гораздо выше, а прирост в характеристиках готовых оптико-электронных приборов в сегменте приборов наблюдения и тепловизионных прицелов не значительный, поэтому далее их мы рассматривать не будем.

Для примера ниже приведена таблица, в которой показан прирост в одной из основных характеристик тепловизионного прибора (дальности обнаружения объекта размером 1,7×0,5 метра) при использовании тепловизионных модулей с размером пикселя 12, 17 и 25 мкм соответственно. При этом остальные параметры (разрешение, фокусное расстояние объектива) для них оставим неизменными. Дальность обнаружения объекта при использовании тепловизионного модуля с размером пикселя 25 мкм возьмем за 1 (100 %).

Таблица 1. Прирост в характеристике

Размер пикселя	Дальность обнаружения (объект 1,7×0,5 м), м	Прирост, %
25 мкм	2250	0
17 мкм	3309	47
12 мкм	4688	108

Из данного примера можно сделать следующие основные выводы:

1. Уменьшение размера пикселя в тепловизионных модулях приводит к значительному увеличению дальности обнаружения различных объектов.

2. Использование тепловизионных модулей с меньшим размером пикселя дает возможность значительного уменьшения массы и габаритов тепловизионных приборов, за счет использования тепловизионных объективов с меньшим фокусным расстоянием, при этом тактико-технические характеристики такого прибора остаются на прежнем уровне. Это очень важно для оптико-электронных приборов, предназна-

ченных для ношения и/или установки на стрелковое оружие.

Следующим важным параметром, характеризующим тепловизионные модули, является материал, на основе которого изготовлена матрица.

В 2021 году основными материалами для микроболометрических матриц являются оксид ванадия (VOx, примерно 68 % тепловизионных матриц изготавливаются с его использованием) и аморфный кремний (α -Si). Существует еще одна технология производства матриц – BST, но сегодня, приборы, выполненные на сегнето-электрическом эффекте, практически не изготавливаются. Поэтому в дальнейшем мы ее касаться не будем.

Одним из самых важных параметров данных микроболометрических матриц является способ их калибровки для компенсации ошибок сенсора. Точность определения сенсором температурной разницы изучаемой сцены падает со временем, поскольку накопленный матрицей тепловой сигнал начинает вносить свои собственные коррективы. Для компенсации таких искажений, а также при запуске матрицы, требуется обнулить значение получаемого сигнала при отсутствии внешнего воздействия. Наиболее эффективным и зарекомендовавшим себя методом является калибровка при помощи затвора. Применение механического затвора для калибровки не всегда удобно, поэтому как альтернатива – калибровка с использованием компенсационных калибровочных таблиц.

Если говорить о плюсах и минусах двух способов калибровки, то в конечном итоге калибровка по затвору, дает больший температурный контраст изображения, что действительно заметно. Это связано с тем, что компенсационные калибровочные таблицы со временем теряют свою актуальность, и для получения достоверного изображения требуется определение новых коэффициентов; сделать это можно только силами производителя. Это в свою очередь потребует демонтаж и долговременную транспортировку до завода-изготовителя и обратно. Поэтому для приборов наблюдения использование матриц с калибровкой по затвору является более предпочтительным.

Однако в сфере применения тепловизионных модулей для прицелов, калибровка с использованием компенсационных калибровочных таблиц все же выигрывает. Это связано с тем, что при калибровке по затвору, тепловизионное изображение замирает на время закрытия затвора, иногда это время достигает одной секунды. А в условиях быстро изменяющейся боевой обстановки одна секунда может стоить очень дорого. В итоге более рационально пожертвовать качеством изображения.

Итак, выбор технологии изготовления микроболометра, равно как и применение затвора зависит от специфики применения прибора.

Отдельно поговорим о тепловизионных объективах. Самым распространенным, но не единственным материалом для изготовления объективов тепловизионных приборов является монокристаллический германий. В той или иной степени, пропускной способностью в MWIR и LWIR – диапазонах обладают также сапфир, селенид цинка, кремний и полиэтилен. Для изготовления объективов тепловизионных приборов применяют также халькогенидные стекла.

Но для применения в приборах большой интерес вызывают атермализованные объективы и их преимущества и недостатки по сравнению с объективами, подразумевающими фокусировку.

Атермализованный объектив имеет «автоматическую» температурную компенсацию. Это означает, что он не требует перефокусировки при изменении температуры окружающей среды (в диапазоне температур от минус 40 до плюс 80 °С). С точки зрения конструкции это означает, что у него нет механических элементов в виде кольца фокусировки, что снижает габариты и вес всего объектива в целом. К примеру вес объектива с

ручной фокусировкой и объектива атермализованного (с одинаковым фокусным расстоянием) может отличаться в два раза.

К минусам атермализованного объектива следует отнести уменьшение качества изображения по сравнению с объективом без атермализации (это связано с технологией производства).

Вывод. Современные технологии производства тепловизионных матриц и объективов позволяют производить на предприятии НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО весь спектр современных тепловизионных приборов наблюдения и прицелов. Это малогабаритные приборы наблюдения (весом до 400 грамм, при использовании модулей с размером пикселя 12 мкм, калибровкой без затвора и атермализованных объективов), которые отлично работают на дистанциях до 1000 метров. Либо приборы, требующие повышенного качества изображения (матриц с размером пикселя 12 мкм, механическим затвором для калибровки и объективами с ручной фокусировкой собственного производства), и дистанция наблюдения свыше 5000 м.

УДК 621.37.535

ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ДВУХЧАСТОТНОМ ГАЗОВОМ ЛАЗЕРЕ СО СЛАБО АНИЗОТРОПНЫМ РЕЗОНАТОРОМ Свирина Л.П.

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Для различных типов анизотропии резонатора и различных переходов между рабочими уровнями активной среды на основе разработанной и экспериментально апробированной теоретической модели проведено исследование влияния отстройки частоты генерации от центра контура усиления на работу двухчастотного газового лазера. Обнаружена поляризационная мультистабильность: возможность одновременного существования стационарных одночастотных режимов генерации, поляризация которых задается резонатором, и автоколебательных двухчастотных режимов с периодическими колебаниями интенсивностей, азимутов и эллиптичностей, а также с колебаниями интенсивностей и эллиптичностей и с вращением азимутов генерируемых волн.

Ключевые слова: поляризация излучения лазера, автоколебания, мультистабильность.

POLARISATION MULTISTABILITY IN A TWO-FREQUENCY GAS LASER WITH WEAKLY ANISOTROPIC CAVITY Svirina L.

*Belarusian National Technical University
Minsk, Belarus*

Abstract. On the basis of developed and experimentally tested theoretical model the influence of the line center tuning on the dynamical behavior of a two-frequency gas laser with a weakly anisotropic cavity has been studied at different cavity anisotropies and different transitions between the working levels. The polarization multistability has been revealed, which appears as a coexistence of one-frequency steady state regimes with polarization of light given by the empty cavity conditions and two-frequency spontaneous pulsations with periodic oscillations of intensities, ellipticities and azimuths, as well as with oscillations of intensities and ellipticities and rotation of azimuths.

Key words: vector-field laser, spontaneous pulsations, multistability.

*Адрес для переписки: Свирина Л.П., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: lpsvirina@bntu.by*

Для различных типов анизотропии резонатора и различных переходов между рабочими уровнями среды на основе разработанной и экс-

периментально апробированной теоретической модели [1] в области значений фазовой анизотропии резонатора, где возникает поляризацион-

ная неустойчивость (лазер со слабо анизотропным резонатором), проведено исследование влияния отстройки частоты генерации от центра контура усиления x на работу двухчастотного газового лазера.

Было обнаружено, что помимо двухчастотных автоколебательных режимов генерации, возможны также и одночастотные режимы с ортогональными состояниями поляризации, задаваемыми резонатором, при этом режим работы лазера зависит от начальных условий, т.е. имеет место поляризационная мультистабильность.

Рис. 1–3 иллюстрируют эффект поляризационной мультистабильности для различных собственных состояний поляризации резонатора (показаны схематически наверху каждой колонки) и различных переходов между рабочими уровнями активной среды ($J_1 \rightarrow J_2$); параметры среды и резонатора типичны для He-Ne лазера, работающего на длине волны $\lambda = 0,63$ мкм. Треугольниками показаны двухчастотные автоколебания интенсивностей $I_{1,2}$, эллиптичностей $\zeta_{1,2}$ и азимутов $\gamma_{1,2}$ генерируемых волн 1 и 2.

Поляризационная мультистабильность для линейной фазовой анизотропии резонатора $\psi = 1$ мрад и перехода $J_1 = 1 \rightarrow J_2 = 2$ схематически представлена на рис.1 при отсутствии (слева $H = 0$) и при наличии (справа $H = 1$ Э) магнитного поля.

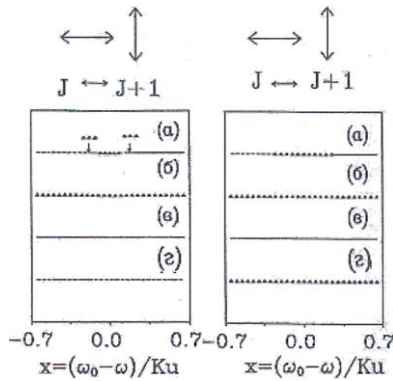


Рисунок 1 – поляризационная мультистабильность в лазерах с линейной поляризацией мод резонатора

Численное интегрирование уравнений генерации проведено при следующих начальных условиях:

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_1^0 = 0, \gamma_2^0 = \pi/2 \text{ (a)},$$

$$I_{1,2}^0 = 0, \zeta_{1,2}^0 = \pm 1 \text{ (б)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_{1,2}^0 = 0 \text{ (в)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = 0, \gamma_{1,2}^0 = \pi/2 \text{ (г)}.$$

Сплошные и пунктирные линии обозначают одночастотные режимы генерации волн 1 и 2 с

линейными ортогональными состояниями поляризации, задаваемой резонатором.

На рис. 2 показана поляризационная мультистабильность для эллиптических состояний поляризации мод резонатора, возникающих при наличии линейной ψ и циркулярной ϕ фазовой анизотропии. Для малых значений эллиптичности (слева $\psi = 1$ мрад, $\phi = 0,25$ мрад, переход $J_1 = 1 \rightarrow J_2 = 2$) и для больших значений эллиптичности (справа $\psi = 1$ мрад, $\phi = 1$ мрад, переход $J_1 = 2 \rightarrow J_2 = 2$).

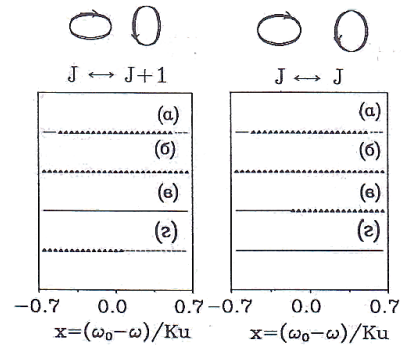


Рисунок 2 – поляризационная мультистабильность в лазерах с эллиптической поляризацией мод резонатора

В качестве начальных условий выбирались: левая колонка:

$$I_{1,2}^0 = \gamma_1^0 = 0, \gamma_2^0 = \pi/2, \zeta_{1,2}^0 = \pm 0,24 \text{ (a)},$$

$$I_{1,2}^0 = 0, \zeta_{1,2}^0 = \pm 1 \text{ (б)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_{1,2}^0 = 0 \text{ (в)},$$

$$I_{1,2}^0 = 0, \zeta_{1,2}^0 = +1 \text{ (г)};$$

правая колонка:

$$I_{1,2}^0 = \gamma_1^0 = 0, \gamma_2^0 = \pi/2, \zeta_{1,2}^0 = \pm 0,4 \text{ (a)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_1^0 = 0, \gamma_2^0 = \pi/2 \text{ (б)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_{1,2}^0 = 0 \text{ (в)},$$

$$I_{1,2}^0 = 0, \zeta_{1,2}^0 = +1 \text{ (г)}.$$

Сплошные и пунктирные линии обозначают стационарные одночастотные режимы с эллиптической поляризацией, задаваемой резонатором.

Поляризационная мультистабильность для циркулярной фазовой анизотропии резонатора показана на рис.3 для $\phi = 1$ мрад, переход $J_1 = 2 \rightarrow J_2 = 2$. Сплошные и пунктирные линии обозначают режимы генерации волн с правой и левой круговой поляризацией. Расчеты проведены при следующих начальных условиях:

$$I_{1,2}^0 = 0, \zeta_{1,2}^0 = \pm 1 \text{ (a)},$$

$$I_{1,2}^0 = \zeta_{1,2}^0 = \gamma_1^0 = 0, \gamma_2^0 = \pi/2 \text{ (б)},$$

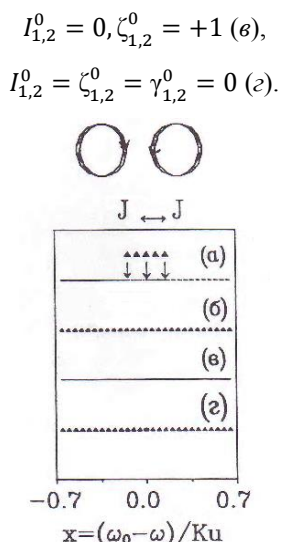


Рисунок 3 – поляризационная мультистабильность в лазере с циркулярной поляризацией мод резонатора

В случае ортогональных циркулярно поляризованных в начальный момент волн (рис. 3, а) переход от волны с правоциркулярной поляризацией к волне с левоциркулярной поляризацией осуществляется через область отстройек с поляризационной неустойчивостью, где имеет место двухчастотный режим с вращением азимутов при постоянных интенсивностях и эллиптичностях генерируемых волн. Такое поведение поляризации при изменении отстройки обнаружено экс-

периментально в работе [2]. В случае ортогональных эллиптически поляризованных мод резонатора (рис 2, а, левая колонка) аналогичный переход от одной волны к другой сопровождался колебаниями интенсивностей и эллиптичностей и вращением азимутов волн генерации, что подтверждено экспериментально в работе [3]. Двухчастотные режимы генерации с периодическими колебаниями всех трех переменных возникают только в случае линейных ортогональных состояний поляризации мод резонатора в отсутствие магнитного поля (рис. 1, левая колонка).

Явления нелинейной поляризационной динамики: поляризационная неустойчивость и мультистабильность, нарушение поляризационной симметрии, поляризационный хаос – создают предпосылки для формировании новой области исследований – поляризационной информатики.

Литература

1. Svirina, L. P. A two-frequency gas laser with weakly anisotropic cavity / L. P. Svirina // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 111, № 2. – P. 380–390.
2. Cotteverte, J. C. Dynamics of circularly polarized eigenstates in lasers with nonweak atomic coupling / J. C. Cotteverte, F. Bretenaker, Le Floch A. // Opt. Lett. – 1991. – Vol. 16, № 8. – P. 572–574.
3. Svirina, L. P. Spontaneous pulsations in gas class-A lasers with weakly anisotropic cavities / L. P. Svirina, V. G. Gudelev, Yu. P. Zhurik // Phys. Rev. A – 1997. – Vol. 56, № 6. – P. 5053–5065.

УДК 628.971.85:629.113

ФАНТОМНЫЙ ЭФФЕКТ В СИГНАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И СПОСОБЫ ЕГО МИНИМИЗАЦИИ

Сернов С.П., Балохонов Д.В.

Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Рассматриваются причины появления фантомного эффекта в светотехническом оборудовании транспортных средств и предлагаются рекомендации по ликвидации фантомного эффекта с помощью деталей вторичной оптики.

Ключевые слова: светотехническое оборудование транспортных средств, фантомный эффект.

PHANTOM EFFECT IN AUTOMOTIVE LIGHTING DEVICES AND WAYS TO ELIMINATE IT USING SECONDARY OPTICS

Sernov S., Balokhonov D.

Belarusian national technical university

Minsk, Belarus

Abstract. Phantom effect in automotive lighting devices and ways to eliminate it using secondary optics pieces are discussed.

Key words: automotive lighting devices, phantom effect.

Адрес для переписки: Балохонов Д.В., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
e-mail: balokhonov@bntu.by

Фантомный эффект – явление, при котором свет солнца или иного внешнего источника света, попадая на светоизлучающую поверхность светотехнического оборудования и отражаясь от нее создает видимость работоспособного состояния. Первоначально эта проблема

возникла на железнодорожном транспорте при засветке мачтовых светофоров солнечным светом или мощными прожекторами локомотивов, что отрицательно влияло на однозначность зрительного восприятия цветовых сигналов машинистами в условиях когда яркость отра-

женного света была сравнима с яркостью света огней светофора.

Данный эффект ранее наблюдался в основном в светофорах различных типов, оснащенных лампами накаливания и оборудованных светофильтрами с рефлекторами, формирующими узкое (половинный угол до 10°) распределение силы света при условии, что в светофор попадали прямые лучи солнца или фар транспортных средств [1]. Этот эффект может быть причиной опасной дорожной ситуации, когда светофор может ложно «показать» все свои сигналы сразу. В результате в ТНПА появились требования по контролю фантомного эффекта для всех типов дорожных светофоров, а в качестве контролируемого параметра используется коэффициент, определяемый по формуле

$$F_{ph} = L_s/L_{ph}, \quad (1)$$

где L_s – средняя яркость светового сигнала, L_{ph} – яркости воздействующего солнечного света.

Для имитации солнечного излучения используют прожекторы с источником света, имеющим коррелированную цветовую температуру в диапазоне 4500К–6500 К и обеспечивающими освещенность светоизлучающей поверхности оптического элемента $E = 40000$ лк.

В настоящее время (особенно в современных автомобилях) фантомный эффект может наблюдаться в светотехническом оборудовании транспортных средств при условии, что это оборудование снабжено светофильтрами с рефлекторами, расположенными сразу за ними [2]. Этому благоприятствует узкое распределение силы света сигнального светотехнического оборудования (стоп-сигналы всех категорий S1–S4, указатель поворота категорий 2, *a* и 2, *b*, габаритные огни категорий R2 и др.). Этот эффект проявляется особенно сильно при небольшой высоте солнца над горизонтом при условии, что солнце светит на светотехническое оборудование, а также при небольшой высоте посадки водителя при движении по наклонной дороге.

Использование светодиодных источников света и отсутствие светофильтров в конструкции светофоров минимизировало влияние фантомного эффекта в настоящее время.

В светосигнальном светотехническом оборудовании транспортных средств продолжают использоваться светофильтры и расположенные за ними рефлекторы даже при условии применения светодиодов. Это обусловлено высоким коэффициентом отражения металлизированных пластиковых рефлекторов при их небольшой массе, что позволяет уменьшать массу фонаря в целом; а также стремлением производителей транспортных средств показать место расположения сигналов на транспортном средстве даже в выключенном состоянии по эстетическим причинам. Поэтому для них нормируются значение F_{ph} больше 3, для дорожных знаков не менее 5.

В отличие от рефлекторов, монолитные линзы, которые неспособны создавать фантомный эффект, имеют большую массу и не могут так же эффективно (без потерь света на отражение при преломлении) создать узкое распределение силы света. Поэтому их используют в основном в проекционных фарах транспортных средств.

Для снижения вероятности появления фантомного эффекта в светосигнальном светотехническом оборудовании транспортных средств предлагается использовать следующие рекомендации:

1. В качестве источника света применять светодиоды, координаты цветности которых полностью соответствуют стандартам для сигнального оборудования транспортных средств, что позволит не использовать цветные светофильтры, минимизировать вероятность возникновения фантомного сигнала и улучшить эффективность несменных источников света.

2. В качестве деталей вторичной оптики применять асферические неизображающие охватывающие линзы или т. наз. рефлекторы полного внутреннего отражения. Это позволит повысить коэффициент отражения, уменьшить его деградацию от времени (так как такой рефлектор не окисляется), и обеспечить принципиальную невозможность фантомного эффекта: такая деталь вторичной оптики рассеивает все лучи, которые попали в нее под нештатным углом, а при применении ее в «обратном включении» собирает эти лучи в точке, где находится светодиод. Металлизированный рефлектор, наоборот, отражает все лучи, в том числе и рассеянные, что способствует появлению фантомного эффекта.

3. При абсолютной необходимости использования рефлектора (например, очень широкое распределение силы света по горизонтали, но узкое по вертикали) он должен выполнять вспомогательную функцию и находиться возможно дальше от выходного отверстия фонаря. В этом случае разумно использовать рефлекторы простейшей формы (например, конус или плоскость), а окончательную настройку распределения силы света выполнять с помощью неизображающих линз, например, линз Френеля.

4. Широко применять светопоглощающие и светорассеивающие покрытия внутренних частей светотехнического оборудования транспортных средств, а также надежно разделять их секции, что позволит избежать «совместного включения» соседних секций комбинированных фонарей.

Литература

1. Woolley, G. F. Phantom Indications in Color-Light Signals / G. F. Woolley // *Railway Signaling*. – 1929. – № 2. – P.86–88.
2. Hann, N. The phantom light effects in rear signaling lamp combinations of modern vehicles / N. Hann, K. Karsten, K. Manz // UNECE [Electronic resource]. – 2021. – Mode of access: <https://unece.org/DAM/trans/doc/2009/wp29gre/ECE-TRANS-WP29-GRE-61-01e.pdf>.

УДК 628.97:749.25

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ЖИЛОГО ПОМЕЩЕНИЯ

Соснина Л.А.^{1,2}, Фёдорцев Р.В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО»

Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В данной статье представлены результаты выбора эффективных световых приборов, обладающих необходимым светораспределением и нужным конструктивным исполнением, расчета источников света с помощью программного обеспечения, применения высокоэффективных источников света, а также автоматизированных систем управления освещением, сокращающим бесполезное использование искусственного освещения и позволяющим увеличить срок службы источников света.

Ключевые слова: управление освещением, программное и аппаратное управление.

SOFTWARE AND HARDWARE MEASURING THE LIGHTING OF THE RESIDENTIAL SPACE

Sosnina L.^{1,2}, Fedortsev R.¹

¹Belarusian National Technical University

²JSC "PELENG"

Minsk, Belarus

Abstract. This article presents the results of the selection of effective lighting devices with the necessary light distribution and the required design, the calculation of light sources using software, the use of highly efficient light sources, as well as automated lighting control systems that reduce the useless use of artificial lighting and increase the service life of light sources.

Key words: lighting control, software and hardware control.

Излучения всей оптической области спектра – видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов – участвуют в биологических процессах организма, необходимы для человека и оказывают благоприятное влияние на здоровье в достаточно широких пределах интенсивностей [1]. При проектировании освещения актуальной проблемой является несоблюдение энергетических и светотехнических параметров источников освещения, что приводит к возникновению проблем с физическим и психическим здоровьем.

В данной статье представлены результаты выбора эффективных световых приборов, обладающих необходимым светораспределением и нужным конструктивным исполнением, расчета источников света с помощью программного обеспечения, применения высокоэффективных источников света, а также автоматизированных систем управления освещением, сокращающим бесполезное использование искусственного освещения и позволяющим увеличить срок службы источников света.

Объектом для разработки проекта внутреннего освещения является жилое помещение с площадью исследуемой комнаты 12,1 м² (рис. 1).

По результатам предварительного расчета освещения помещения по методу удельной мощности было выяснено, что полученные значения освещенности данного помещения не соответствуют требуемым параметрам освещения, регламентируемым СН 2.04.03-2020 «Естественное и искусственное освещение» [2]. Согласно СН, требования к системам освещения для данного вида помещений: норма освещенности 150 Лк,

коэффициенты отражения: потолок – 0,5, стены – 0,4, пол – 0,3, коэффициент эксплуатации светильников – 0,71.

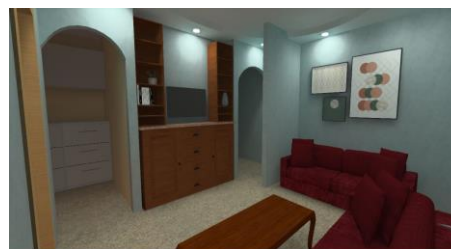


Рисунок 1 – 3D-модель исходного состояния жилого помещения



Рисунок 2 – 3D-модель жилого помещения с использованием новой осветительной установки

На основании практических расчетов была выбрана новая осветительная установка со светодиодными источниками света. В качестве общего света выбран светильник DesignLed WL-BQ фирмы SWG [3], световой поток которого 660 лм, мощность 9 Вт, цветовая температура 3000 К. В качестве дополнительной подсветки выбрана светодиодная лента фирмы Arlight [4], мощность которой 12 Вт, световой поток 1020 лм.

В программном комплексе DIALux Evo [5] была построена трехмерная модель исследуемого помещения, выполнен расчет освещенности с учетом необходимых элементов помещения (текстуры, цвета и материалов поверхностей, мебели, новой осветительной установки, коэффициентов отражения поверхностей) (рис. 2).

Для удобного беспроводного управления существует несколько возможных вариантов передачи управляющих сигналов:

- аналоговое радиоволновое вещание;
- цифровые беспроводные системы передачи данных.

В связи с ростом вычислительных возможностей техники и их миниатюризацией, в последнее время стало распространено беспроводное управление при помощи компьютера или смартфона. Основой таких устройств служат готовые модули беспроводной связи, которые представлены двумя протоколами связи: Bluetooth и Wi-Fi. Данные модули существуют во всех современных портативных системах, начиная с ноутбуков и компьютеров и заканчивая смартфонами.

При проектировании изначально были рассмотрены следующие модели Bluetooth модулей: HC-06, RN4677, HM-10. Данные модули являются готовым решением с распайкой всех необходимых для работы компонентов.

Для проверки работы вышеприведенных модулей в связке с системой управления освещением была собрана и проанализирована схема управления освещением.

В основе принципа управления освещением лежит широтно-импульсная модуляция (ШИМ), которая позволяет плавно регулировать уровень освещения. Так как регулируемое напряжение является переменным, то для корректной работы необходимо отслеживать моменты времени, в которые уровень питающего напряжения равен 0. Для этой цели используется оптопара U1. Таким образом контроллер точно знает в какой момент времени происходит изменение фазы напряжения сети на противоположное и начинает расчет ширины управляющего импульса именно с этого момента.

Так же для автоматического регулирования освещения в схеме предусмотрены оптические датчики освещенности. Их сопротивление меняется в зависимости от интенсивности света в помещении, где они установлены. Для исключения ложного срабатывания в схеме предусмотрены конденсаторы фильтра C10 и C11.

Микроконтроллер управляется по UART интерфейсу от внешнего устройства в качестве которого может выступать компьютер, другой микроконтроллер или модуль связи.

Таким образом, возможно подключение схемы к вышеперечисленным Bluetooth модулям.

Однако уже на данном этапе заметны следующие недостатки:

- в схеме используется несколько управляющих модулей, что увеличивает габариты и стоимость;
- управление возможно лишь в пределах действия модуля связи, так как отсутствует доступ в сеть.

Решением обеих проблем является использование микроконтроллера с наличием модуля радиопередачи в качестве периферийного устройства. Кроме того, необходимо, чтобы данный контроллер имел возможность прошивки и открытый исходный код с документацией. Общим требованием полностью удовлетворяет программируемый Wi-Fi модуль ESP8266, либо его более мощная версия ESP32, которые позволяют не только связываться с устройством через WiFi, но и размещать всю управляющую программу непосредственно в них. Кроме того они очень компактны (размер модуля 13,3x19,2 мм) и имеют малое потребление (60 мА в режиме ожидания и 180 мА в режиме передачи данных). Такие модули позволяют сделать управление полностью беспроводным, реализовать на их основе датчики автоматического включения и отключения по таймеру либо движению, умную авторегулировку уровня освещения в зависимости от естественной освещенности. А при использовании современных цветных адресных лент появляется возможность формировать любые оттенки и тона цветовой палитры.

Оба модуля являются микроконтроллерами с готовым Wi-Fi передатчиком. Они очень компактные и имеют малое энергопотребление (порядка 20 мА). Так же поддерживают режим работы в качестве bluetooth.

Как видно из рисунка, схема стала более компактной, но при этом получила гораздо больший функционал, которого хватит и для дальнейшего расширения системы управления.

Литература

1. Справочная книга по светотехнике / под ред. Ю. Б. Айзенберга. – Изд. 3-е перераб. и доп. – М.: Знак, 2006. – 972 с.
2. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы : СН 2.04.03-2020. – Утверждены и введены в действие постановлением Министерства архитектуры и строительства от 30 октября 2020 г. № 70.
3. Производитель светодиодных светильников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://swgshop.ru/catalog/svetilniki/potolochnye/vstraivaemye-svetilniki/potolochnye_led_vstraivaemye_svetilniki_wl/bq009109-wh-ww/. – Дата доступа: 04.10.2021.
4. Производитель светодиодных светильников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arlight.by/catalog/svetodiodye-lenty-100002>. – Дата доступа: 04.10.2021.
5. Программа DiaLux [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dialux.com/en-GB/download>. – Дата доступа: 04.10.2021.

УДК 001.891.572+537.874.72

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОМОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛ

Терехова М.С., Рудиков С.И., Шкадаревич А.П.

УП НТЦ «ЛЭМТ» БелОМО
Минск, Республика Беларусь

Аннотация. В работе приведены две модели, построенные в программных пакетах Matlab и Comsol, описывающие теплофизическую составляющую процесса воздействия лазерного излучения (далее – ЛИ) на материал. Разработанные модели учитывают различные действующие факторы (влияние системы лазера, среды распространения, характеристик материала) и являются первым приближением. Модели сходятся между собой, что подтверждает правильность сделанных допущений в описываемых условиях.

Ключевые слова: моделирование, лазерное излучение, обработка поверхности.

MODELING OF HIGH ENERGY LASER INFLUENCE ON MATERIAL

Terekhova M., Rudikov S., Shkadarevich A.

Unitary Enterprise STC "LEMT" of the BelOMO
Minsk Belarus

Abstract. Here we define two models (Matlab and Comsol based) which describe thermophysical part of laser radiation interaction on the material and which is the first approximation of the interaction. Different factors are considered in the models (impacts of laser system, propagation medium and material characteristics). Those models are convergent *inter se*, which confirms accuracy of assumptions in described conditions.

Key words: modelling, laser radiation, surface treatment

Адрес для переписки: Терехова М. С., ул. Макаенка, 23, корп. 1, 220113, Республика Беларусь
e-mail: terekhova.m.s@yandex.by

Высокомощное лазерное излучение широко применяется в промышленных специальных технологиях. Одно из перспективных разрабатываемых направлений – осуществление дистанционного реза, очистки и обезвреживания объекта. Примером таких устройств являются установки для дистанционной резки труб при авариях на газодобывающих предприятиях [1], очистка поверхности материала (бетона, металла) от внешних загрязнений (радиоактивное загрязнение, коррозия, краска и т.д.) [2], дистанционное обезвреживание объектов и взрывоопасных предметов [3]. Преимуществом использования лазера в перечисленных случаях является большая экономичность и технологичность воздействия по сравнению с традиционными средствами, точность и дальность действия, относительная безопасность и экологичность. В то же время разработка подобных устройств является сложной технической и технологической задачей. Целью данной работы является сравнение моделей для предварительной оценки требуемых параметров устройств дистанционного лазерного воздействия на материал.

Действие лазерного излучения (ЛИ) на материал приводит к появлению оптических, электрических и тепловых эффектов, которые имеют нелинейный характер при плотности мощности ЛИ 10^8 – 10^{10} Вт/см². При более низких плотностях мощности можно пренебречь зависимостью параметров материала от интенсивности излучения и температуры. Тогда работу устройств лазерного разрушения материала

можно описать с помощью теплофизических, механических и химических процессов, таких как плавление, абляция, растяжение, окисление, возгорание и др. [4].

Для того, чтобы установить необходимые и достаточные параметры разрабатываемого лазерного устройства требуется провести моделирование процесса воздействия ЛИ на материал. Для этого можно выделить следующие действующие факторы:

1. Влияние системы лазера (параметры ЛИ (длина волны, мощность, параметр качества пучка), размер выходной оптической апертуры, характеристики телескопа, вибрация платформы, на которой установлен лазер, ошибка наведения и ошибка слежения (при работе с движущимися объектами воздействия)).

2. Влияние среды распространения ЛИ (распределение аэрозолей в воздухе, турбулентность, плотность воздуха и перепад температур, ветер, влажность и т.д.).

3. Влияние теплофизических и оптических характеристик материала (вид материала, коэффициент поглощения, отражения, пропускания света).

Расчет энергии, необходимой для эффективного воздействия на материал, определяется в соответствии с первым началом термодинамики: энергия, переданная объекту, расходуется на нагрев, плавление и испарение материала или на нагрев и последующую абляцию материала. Доля поглощенной энергии определяется с одной стороны коэффициентом поглощения поверхности, а с другой коэффициентом ослабления в ат-

мосфере. Поскольку ЛИ при распространении в открытом пространстве испытывает поглощение и аэрозольное и молекулярное рассеяние долю энергии, доходящей до объекта, можно оценить по закону Бугера-Ламберта-Бера. В то же время часть поглощенной энергии расходуется на тепловое излучение. Следовательно, общее выражение для определения времени воздействия (τ), т.е. времени, необходимого для разрушения слоя вещества, может быть определено следующим образом:

$$Q = cm(T_{melt} - T_0) + L_{melt}m,$$

$$P_{rad} = \varepsilon\sigma S(T_{melt}^4 - T_0^4),$$

$$\tau = \frac{Q}{P \cdot \alpha \cdot e^{-\tilde{\epsilon}L} - P_{rad}},$$

где c – удельная теплоемкость, m – масса области материала, на которую приходится воздействия пучка, T_{melt} – температура плавления материала, T_0 – начальная температура материала, L_{melt} – удельная теплота плавления, $\tilde{\epsilon}$ – коэффициент экстинкции, α – коэффициент поглощения поверхности, ε – коэффициент излучения поверхности, σ – константа Стефана-Больцмана, S – площадь излучающей поверхности, P – мощность ЛИ.

Размер пучка определяется вкладами первого и второго перечисленных выше факторов. Параметры оптической системы и дифракционные ограничения апертуры позволяют определить расчетное значение диаметра пучка (радиус Эйри). Влияние турбулентности, возникающей в атмосфере, учитывается с помощью структурного показателя преломления C_n (в данном приближении он считается постоянным). Тогда конечный радиус пучка определяется следующими выражениями:

$$\langle r_{total}^2 \rangle = r_{diff}^2 + r_{turb}^2 + r_{jitter}^2.$$

На основании изложенного были проведены вычисления в программном пакете Matlab. Расчетное время воздействия ЛИ мощностью 3 кВт (дистанция 2 км) на объект (белый конструкционный пенопласт толщиной 2 мм) составляет 0,14 с для атмосферы с параметром турбулентности $C_n=10^{-7.5}$ (высокая турбулентность) [5].

Моделирование процесса воздействия ЛИ на материал может быть также выполнено с помощью программного пакета Comsol Multiphysics с привлечением модулей Heat transfer in solids и Deformed geometry. Лазерное излучение моделируется с помощью введения потока энергии, распределенной по Гауссу, через одну из границ. Тепловой поток зависит от поглощающей способности материала. Свойства материала при этом изменяются скачком при достижении температуры плавления. Влияние атмосферы учитывается при определении радиуса пучка и мощно-

сти излучения, достигающей поверхности. Скорость движения профиля верхней границы материала при плавлении прямо пропорциональна потоку энергии и обратно пропорциональна удельной теплоте плавления. Движение верхней границы не учитывает процесс выброса вещества из образующегося кратера. Таким образом, модель, построенная в Comsol, позволяет воспроизвести изменение профиля поверхности материала за установленное время. В данном случае расчетное время воздействия ЛИ мощностью 3 кВт на белый конструкционный пенопласт составляет 0,38 с при тех же параметрах атмосферы.

Значения времени воздействия ЛИ на материал, полученные двумя программными пакетами, различаются. Это объясняется тем, что расчет в среде Matlab является первым приближением и учитывает только факт поглощения энергии, не рассматривая теплообмен внутри материала и излучение всей поверхностью. Однако модели можно считать сходящимися (одинаковый порядок величин), что подтверждает правильность выбранных допущений в рамках первого приближения и позволяет использовать их независимо для определения параметров разрабатываемой системы. Значения, полученные с помощью каждой модели, не являются конечными, требуют экспериментальной проверки и оценки соответствующих поправочных коэффициентов в каждом конкретном случае.

Вывод. На основе моделей, разработанных в программных пакетах Matlab и Comsol с использованием условия теплового равновесия, получены сходящиеся результаты, которые положены в основу разработки экспериментального образца мощного лазерного источника на основе 3кВт волоконного лазера. Корректность результатов моделирования будет проверена на экспериментальных данных.

Литература

1. Гвоздев, С. В. Прохождение лазерного излучения сквозь пламя углеводородов и дистанционная лазерная резка материалов / С. В. Гвоздев. – Москва : Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, 2020. – 102 с.
2. Anthofer, A. Laser decontamination of epoxy painted concrete surfaces in nuclear plants / A. Anthofer, W. Lippmann, A. Hurtado // Opt. Laser Technol. – 2014. – Vol. 57. – P. 119–128.
3. Horkovich, J. Directed Energy Weapons: Promise & Reality / J. Horkovich // 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference: 37th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference / American Institute of Aeronautics and Astronautics. – San Francisco, California, 2006.
4. Взаимодействие лазерного излучения с веществом: силовая оптика / В.П. Вейко [и др.] – Москва : Физматлит, 2008.
5. Nielsen, P. E. Effects of directed energy weapons / P. E. Nielsen. – Institute for National Strategic Studies, 1994. – 368 p.

УДК 535.15

СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ 3D-МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Федоров И.В.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет
Томск, Российская Федерация

Аннотация. Человек является источником теплового излучения. Предлагаемая в статье оптическая система, используя и анализируя инфракрасное излучение человеческого тела, пассивно управляет построением математической 3D-модели человека.

Ключевые слова: инфракрасное излучение, приемное устройство, спектральная селекция, 3D-моделирование.

CREATING A MATHEMATICAL 3D HUMAN MODEL USING INFRARED RADIATION

Fedorov I.

National Research Tomsk Polytechnic University
Tomsk, Russia

Abstract. Human being is a source of thermal radiation. The optical system proposed in the article passively controls the construction of a mathematical 3D model of a person using and analyzing the infrared radiation of the human body.

Key words: infrared radiation, receiving device, spectral selection, 3D-modeling.

Адрес для переписки: Федоров И.В., ул. Усова, 15Б, г. Томск 634034, Российская Федерация
e-mail: ivf6@tpu.ru

Целью работы является создание методов для разработки математической 3D-модели человека на компьютере, пригодной для дальнейшего использования, путем обработки инфракрасного излучения человеческого тела.

Человек как биологическое тело, имеющее температуру в интервале от 31 до 42 °С, является источником преимущественно инфракрасного (теплового) излучения. Основная часть собственного теплового излучения кожи человека приходится на диапазон волн с длиной от 4 до 50 мкм [1].

Было принято решение по созданию оптической системы, работающей в инфракрасном (тепловом) диапазоне волн. Такая оптическая система может формировать мнимый сигнал управления, обеспечивающий пассивное построение 3D-модели.

Оптическая система представляет собой оптическое приемное устройство, которое решает такие задачи, как:

- пространственная селекция человеческого тела;

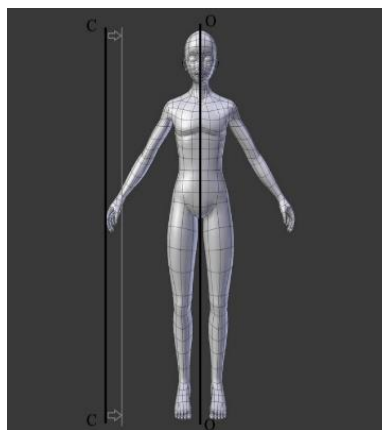
- спектральная селекция инфракрасного излучения человеческого тела и фоновых помех, а также защита от них;

- преобразование инфракрасного излучения тела человека в математический сигнал Δ_{axis} , пропорциональный рассогласованию в пространстве главной вертикальной оси человека и вертикальной боковой (боковой) оси (рис. 1), которая в дальнейшем будет постепенно совмещаться с главной осью (1).

$$\Delta_{axis} \rightarrow 0 \quad (1)$$

Задача спектральной селекции инфракрасного излучения человеческого тела, фоновых помех и

защита от них решается путем двухканального приема инфракрасного излучения тела и помех.



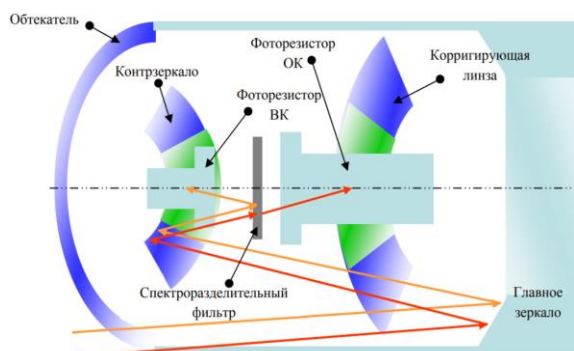
ОО – главная вертикальная ось;
СС – боковая вертикальная ось

Рисунок 1 – Создание осей в соответствии с видимой плоскостью человеческого тела

Приемное устройство при этом обязано содержать в объективе оптические полосовые фильтры, позволяющие выделить из основного потока энергии инфракрасное излучение человеческого тела и фоновых помех, а также образовать в оптической системе основной (для излучения тела) и второстепенный (для помех) спектральный канал. Уровни сигналов в этих каналах сравниваются, и на этом строится логика защиты от помех.

Задача преобразования инфракрасного излучения тела человека в математический сигнал решается фокусировкой теплового излучения в фокальных плоскостях двух спектральных каналов.

В предложенном оптическом устройстве реализована **зеркально-линзовая система**, созданная по принципу, схожему с принципом системы Шмидта-Кассегрена [2, 3]. Она состоит из обтекателя (слабая отрицательная рассеивающая линза), главного зеркала, корректирующей линзы (афокальная линза), контрзеркала (фокусирующий элемент) и **спектроразделительного фильтра**, отражающего сигналы с длиной волны, не входящей в диапазон собственного теплового излучения кожи человека (рис. 2).



ОК – основной канал;
ВК – второстепенный канал

Рисунок 2 – Прохождение оптических сигналов

Сперва оптический поток отражается от главного зеркала. Затем через корректирующую линзу он проходит на контрзеркало, где устраняются aberrации. Отразившись же от контрзеркала, оптический поток проходит на спектроразделительный фильтр. Благодаря ему инфракрасное излучение фоновых помех, от которых устройство должно защитить, не фокусируется в фокальной плоскости основного спектрального канала, потому что отразится от фильтра. Фокусироваться на ней будут все точки, лежащие на вертикальной боковой оси. Происходить это будет непрерывно, как и плавное приближение боковой оси к главной (рис. 1).

Важное условие установки фоторезистора основного канала состоит в том, что он должен сохранять свою спектральную чувствительность на фоне тепловых помех (с минимумом 4–5 мкм). Фоторезистор вспомогательного канала, напро-

тив, чувствителен к излучению помех (с максимумом 2–3 мкм).

Для этого фоторезистор основного спектрального канала **охлаждается** до температуры, зависящей от принципа работы системы охлаждения. Было принято решение об установке азотной системы охлаждения с понижением температуры до $t_{кип} = 77 \text{ K} = -196 \text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, азот переходит из газообразного в жидкое состояние и охлаждает фоторезистор за считанные секунды для достижения необходимой спектральной чувствительности на фоне помех [4]. Сигнал же с фоторезистора второстепенного спектрального канала не передается в системы дальше.

Были подробно описаны действия, связанные с приемом инфракрасного излучения одного объектива. Для правильного функционирования системы, вокруг человека, 3D-модель которого предлагается создать, устанавливается 4 объектива. Дополнительные объективы могут располагаться сверху и внизу главной оси тела человека.

На выходе работы оптического устройства получается комбинация контуров человеческого тела с минимум четырех 2D-плоскостей, чего достаточно для отрисовки 3D-модели.

Полученная модель, например, может сразу же конвертироваться в формат STL-файла, загружаться в слайсер 3D-принтера и быть воспроизведена «вживую».

Литература

1. Излучение тела человека. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://studopedia.ru/3168161_izluchenie-tela-cheloveka.html. – Дата доступа: 01.10.2021.
2. Зеркально-линзовые телескопы // IPML Оптические системы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ipml.ru/teleskopy>. – Дата доступа: 02.10.2021.
3. Телескоп Шмидта – Кассегрена - Schmidt-Cassegrain telescope [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://wikichi.ru/wiki/Schmidt-Cassegrain_telescope. – Дата доступа: 02.10.2021.
4. Системы охлаждения — от радиатора до жидкого азота! Часть 2 // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://habr.com/ru/post/64166/>. – Дата доступа: 04.10.2021).

УДК 621.375.826

СКОРОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДОНОР-АКЦЕПТОРНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В СРЕДАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
Ясюкевич А.С., Гусакова Н.В., Кулешов Н.В.

*Научно-исследовательский центр оптических материалов и технологий БНТУ
 Минск, Республика Беларусь*

Аннотация. Предложено обобщение системы скоростных уравнений, описывающих донор-акцепторный перенос энергии в средах, активированных ионами редкоземельных элементов. Приведены результаты расчетов для кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW.

Ключевые слова: скоростные уравнения, донор-акцепторный перенос энергии, спектроскопические свойства кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW.

**RATE EQUATIONS FOR SIMULATION OF THE DONOR-ACCEPTOR ENERGY TRANSFER
 IN RARE-EARTH IONS-DOPED MEDIA**
Yasukevich A., Guskova N., Kuleshov N.

*Centre for Optical Materials and Technologies of BNTU
 Minsk, Belarus*

Abstract. Generalization of rate equations for the donor-acceptor energy transfer in rare-earth-doped media was proposed. Modelling results for the crystals Tm:KYW и Tm:KLuW were reported.

Key words: rate equations, donor-acceptor energy transfer, spectroscopic properties of the crystals Tm:KYW и Tm:KLuW.

*Адрес для переписки: Ясюкевич А.С., пр. Независимости, 65, г. Минск 220113, Республика Беларусь
 e-mail: anamol@bntu.by*

Изучение межионных взаимодействий, которое сопровождается переносом энергии от возбужденных ионов, доноров, к ионам, находящимся в основном состоянии, акцепторам, имеет достаточно долгую историю, и результаты представлены в многочисленных статьях.

В данной работе мы ограничимся рассмотрением только мультипольных, парных, донор-акцепторных ($D-A$) взаимодействий, которые представляют наибольший интерес для твердотельных лазерных материалов.

При импульсном возбуждении доноров обычно выделяют три временных этапа распада донорных возбужденных состояний: (i) экспоненциальный статический перенос энергии возбуждения на ближайшие акцепторы, (ii) этап неэкспоненциального распада, обусловленный статической передачей энергии на акцепторы, расположенные на удаленном расстоянии от донора, (iii) экспоненциальный этап распада, когда миграция энергии по подсистеме доноров ускоряет доставку энергии возбуждения к акцепторам [1].

Вероятность того, что донор с номером « i » (D_i) в момент времени t находится в возбужденном состоянии $P_{D_i}(t)$ определяется уравнением

$$\frac{dP_{D_i}(t)}{dt} = - \left[\frac{1}{\tau_{D_0}} + \sum_{j=1}^{N_A} W_{DA}^{ij} \right] P_{D_i}(t), \quad (1)$$

где τ_{D_0} – внутрицентровое время жизни D_i в возбужденном состоянии, W_{DA}^{ij} – вероятность безызлучательного переноса энергии возбуждения от

D_i к акцептору с номером « j » A_j , суммирование проводится по всем акцепторам в образце.

Решения (1) могут быть усреднены по объему образца и получено следующее выражение для средней населенности возбужденного уровня донора $N_D(t)$ в момент времени t при возбуждении коротким импульсом [2, 3]

$$N_D(t) = N_D^0 \exp \left[-\frac{t}{\tau_{D_0}} - \gamma_S t^{3/S} - Wt \right]. \quad (2)$$

$N_D^0 = N_D(t=0)$. γ_S описывает распад донорных возбужденных состояний на этапе (ii). S – параметр мультипольности. Третий член в показателе экспоненты введен дополнительно, для описания этапа (iii). Уравнение (2) широко используется на практике для нахождения параметров переноса энергии.

Нами впервые были получены скоростные уравнения для средних по объему $N_D(t)$ и $N_A(t)$ на основе (1), что позволило установить соответствие между параметрами, входящими в дифференциальные скоростные уравнения и в (2).

Конкретный вид уравнений в нормированных величинах был записан для тулий-содержащих сред, где донорами являются ионы Tm^{3+} на уровне 3H_4 , а акцепторами – на уровне 3H_6 .

$$\frac{dn_4}{dt} = r_4 - \frac{n_4}{\tau_4} - \frac{3}{S} \gamma_S t^{\frac{3}{S}-1} n_4 - W n_1 n_4, \quad (3)$$

$$\frac{dn_2}{dt} = -\frac{n_2}{\tau_2} + 2 \frac{3}{S} \gamma_S t^{\frac{3}{S}-1} n_4 + 2W n_1 n_4, \quad (4)$$

$$n_1 + n_2 + n_4 \approx 1, \quad (5)$$

здесь n_i ($i = 1, 2, 4$) – населенности уровней ${}^3\text{H}_6$, ${}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{H}_4$, соответственно, отнесенные к концентрации ионов тулия, τ_4 (см. (1) τ_{D_0}) и τ_2 – внутрицентровые времена жизни ионов тулия на уровнях ${}^3\text{H}_4$ и ${}^3\text{F}_4$, соответственно, r_4 – скорость накачки уровня ${}^3\text{H}_4$. Для тулиевых сред D-A взаимодействие реализуется как кросс-релаксация по схеме ${}^3\text{H}_4 + {}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{F}_4 + {}^3\text{F}_4$.

Рассмотрим некоторые частные случаи для системы уравнений (3–5).

При возбуждении коротким импульсом и при $n_1 \approx 1$ из (3) следует

$$\frac{dn_4}{dt} = -\frac{n_4}{\tau_4} - \frac{3}{S} \gamma_S t^{\frac{3}{S}-1} n_4 - W n_4, \quad (6)$$

что дает решение (2). На заключительных стадиях затухания люминесценции доноров второй член в правой части (6) стремится к нулю, т.к. $3/S - 1 < 0$ для $S = 6, 8$, или 10 . Это приводит к экспоненциальному затуханию люминесценции доноров при $t \rightarrow \infty$.

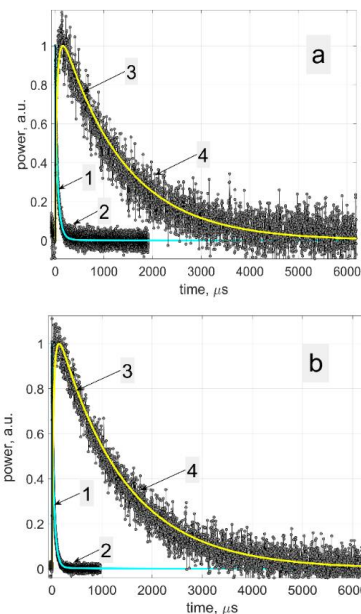
Полученные результаты позволяют установить физический смысл слагаемых, входящих в уравнения (3–5). Члены вида n_i/τ_i , ($i = 2, 4$) описывают внутрицентровую релаксацию возбужденных уровней доноров и акцепторов, $\frac{3}{S} \gamma_S t^{\frac{3}{S}-1} n_4$ отвечают за статический, неупорядоченный, прямой, донор-акцепторный перенос энергии, $W n_1 n_4$ описывают миграционно-ускоренный распад возбужденных донорных уровней энергии.

Система уравнений (3–5) была применена для анализа процессов возбуждения и дезактивации уровней энергии ${}^3\text{H}_4$ (возбужденные уровни энергии доноров) и ${}^3\text{F}_4$ (возбужденные уровни энергии акцепторов) кристаллов $\text{Tm}^{3+}(3.9\text{at}\%):\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ (Tm:KYW) и $\text{Tm}^{3+}(3.0\text{at}\%):\text{KLu}(\text{WO}_4)_2$ (Tm:KLuW) [4]. Затем, полученные параметры были использованы для описания кинетик затухания люминесценции на переходе ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ для этих же материалов.

Результаты расчетов представлены на рис. 1.

Таким образом, в данной работе предложено обобщение системы скоростных уравнений для моделирования возбуждения и дезактивации доноров и акцепторов за счет внутрицентровой релаксации, прямой, статической, неупорядоченной D–A передачи энергии и миграционно-ускоренной релаксации донорных возбужденных уровней энергии.

Процедура подгонки на основе полученных уравнений была успешно применена для анализа возбуждения и затухания люминесценции на переходах ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ для кристаллов Tm:KYW и Tm:KLuW. Подобные скоростные уравнения могут быть применены и для других донор-акцепторных пар.



1 – расчетные кривые, 2 – экспериментальные данные) и ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ (3 – расчетные кривые, 4 – экспериментальные данные)

Рисунок 1 – Моделирование кривых люминесценции для Tm:KLuW (a) и Tm:KYW (b) на переходах ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_4$

Литература

1. Nature of nonradiative excitation energy relaxation in condensed media with a high activator concentration / Yu. K. Voronko [et al.] // Sov. Phys. JETP. – 1976. – Vol. 44, № 2. – P. 251–261.
2. Vega-Duran, J. T. Exact solution to the general non-radiative energy transfer master equations in crystalline materials / J. T. Vega-Duran [et al.] // J. Lumin. – 2000. – Vol. 91(3–4). – P. 233–241.
3. B. Di Bartolo. Energy transfer among ions in solids, in Energy transfer processes in condensed matter / B. Di Bartolo. – 1984. – Vol. 114. – P. 696.
4. Mechanisms of the energy transfer between thulium ions in tungstate and molybdate crystals / N. V. Gusakova [et al.] // J. Belarus. St. Univ. Physics. – 2021. – № 1. – P. 33–40.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

<i>Стасилович В.А., Шишкин И.П., Шкадаревич А.П.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗВИТИИ СНАЙПЕРСКИХ ПРИЦЕЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ КРАТНОСТИ.....	5
<i>Матвеев В.В.</i> ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП С ПОЗИЦИОННЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ.....	7
<i>Волынец А.С.</i> ВЫСОКОТОЧНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ И СОЗДАНИЕ ЭТАЛОНА НА ИХ ОСНОВЕ.....	9
<i>Лебедев А.Н.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЗАЩИТЫ ДАННЫХ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ПРИБОРОСТРОЕНИЮ.....	11
<i>Степаненко Д.А., Бунчук К.А.</i> ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ И ИНЖЕНЕРНЫЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ТИПОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ТЕХНИКЕ И МЕДИЦИНЕ.....	13
<i>Сервачинский И.Ю., Свистун А.И.</i> К ИСТОРИИ СОЗДАНИЯ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА БЕЛОРУССКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА.....	15

Секция 1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА БЕЗОПАСНОСТИ

<i>Алексеев В.А., Юран С.И., Усольцев В.П.</i> СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЕСТЕСТВЕННЫХ ВОДОЕМОВ МИКРОЧАСТИЦАМИ.....	17
<i>Антошин А.А., Безлюдов А.А., Галузо В.Е.</i> ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА «RANDOM FOREST» К РАСПОЗНАВАНИЮ ТИПА ГОРЕНИЯ ХЛОПКА.....	19
<i>Антошин А.А., Галузо В.Е., Мельничук В.В., Пинаев А.И.</i> ОСОБЕННОСТИ ПОЖАРНОЙ СИГНАЛИЗАЦИИ И ПОЖАРОТУШЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ.....	21
<i>Антошин А.А., Лодято А.П.</i> ВЛИЯНИЕ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ ДЫМОВЫХ ПОЖАРНЫХ ИЗВЕЩАТЕЛЕЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ.....	23
<i>Ардашев Д.С., Москалёва А.В., Савлевич В.А., Романчук Д.И., Микитевич В.А., Пантелеев К.В.</i> МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ДИЭЛЕКТРИКОВ.....	25
<i>Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И.</i> ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ «УМНОЙ» АУДИТОРИИ.....	27
<i>Борисенок С.В., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жуковский П.В., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С ВЫСОКОЙ ЛИНЕЙНОСТЬЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	29
<i>Борисенок С.В., Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Колтунович Т.Н., Шадурская Л.И.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ С УПРАВЛЯЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.....	31
<i>Булатов О.В.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРОВ КОРПУСА ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ТОЛЩИНОМЕРА С ЦЕЛЬЮ МИНИМИЗАЦИИ КРАЕВОГО ЭФФЕКТА.....	33
<i>Булатов О.В.</i> ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ НАМАГНИЧЕННОСТИ ИНФОРМАТИВНОЙ ЗОНЫ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ И ЕГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ТОЛЩИНЕ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ ОТ ТОЛЩИН СТенок СТАЛЬНОГО КОРПУСА.....	35

<i>Бумай Ю.А., Васьков О.С., Нисс В.С.</i> АППАРАТУРА И МЕТОД АНАЛИЗА ПЕРЕХОДНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ МОЩНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ.....	37
<i>Бурак В.А., Короткевич З.М., Коровицкий В.А.</i> ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА НА ПОЛЕВЫЕ МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЯЧЕКАТАННОЙ СРЕДНЕУГЛЕРОДИСТОЙ КОНСТРУКЦИОННОЙ СТАЛИ.....	39
<i>Бусько В.Н.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ШУМА ПРИ ИЗУЧЕНИИ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ.....	41
<i>Владимиров М.Ю., Клочко Т.Р.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ТЕРМОПАРЫ ПРИ РАЗНЫХ ВЕЛИЧИНАХ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРОДОВ.....	43
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский А.К., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И.</i> ФОТОПРИЕМНИК С ПЕРЕКЛЮЧАЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ.....	45
<i>Воробей Р.И., Гусев О.К., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Шадурская Л.И., Пилипенко В.А.</i> СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ГЕТТЕРИРУЮЩЕГО СКРЫТОГО СЛОЯ.....	47
<i>Воронин В.В., Зотин Н.А.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО PORTABLE DATA LOADER (PDL).....	49
<i>Галузо В.Е., Калита Е.В., Мельничук В.В., Пинаев А.И.</i> ДЫМОУДАЛЕНИЕ В ЗАКРЫТЫХ ГАРАЖАХ-СТОЯНКАХ.....	51
<i>Глинская Е.В.</i> ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА БЕЗОПАСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....	52
<i>Гончаренко И.А., Ильюшонок А.В., Рябцев В.Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОГЛОЩЕННОЙ ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	54
<i>Горин А.В.</i> КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ ОТ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЯ СИГНАЛА.....	56
<i>Дудчик Ю.И., Хилько Г.И., Субач А.А.</i> ПОЛУЧЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В РЕНТГЕНОВСКИХ ЛУЧАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ 2-D КАМЕРЫ.....	58
<i>Ефименко С.А., Кособуцкая Н.В.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ МЕТОДА ТЕСТИРОВАНИЯ МОЩНОЙ ИНТЕГРАЛЬНОЙ МИКРОСХЕМЫ ИЛИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА В ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР.....	60
<i>Жуков И.И., Свистун А.И., Тявловский К.Л., Ковель С.Г.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАБИЛИТАЦИИ СПОРТСМЕНОВ С БЕССТУПЕНЧАТЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАГРУЗКИ.....	62
<i>Здоровцев С.В., Кушнеров Д.П., Сушко В.А.</i> ЦИФРОВЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МОДУЛИ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОГО СОСТАВА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	64
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С КВАЗИНУЛЕВОЙ КОНТРАСТНОСТЬЮ.....	66
<i>Иванов В.И., Иванов Н.И.</i> КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ЛИДАРНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ СВЕРХСЛАБЫХ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ.....	68
<i>Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Ерошеня Т.С., Черняк А.С.</i> УВЕЛИЧЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ.....	71
<i>Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Сушко А.С., Черняк А.С.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ТОКУ ХОЛОСТОГО ХОДА.....	73
<i>Камышан А.С., Пилько В.В. (ст.), Пилько В.В.</i> РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО МОДУЛЯ УСКОРИТЕЛЯ AN 2500 ДЛЯ ВЫСОКОЛОКАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СОСТАВА МАТЕРИАЛОВ АВТОФОКУСИРОВАННЫМ ИОННЫМ ПУЧКОМ.....	76
<i>Карташова Ж.К.</i> СПЕЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЗАЩИТЫ ОТ УТЕЧКИ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ (ВОЛС).....	78

<i>Ковыньёв Н.В.</i> СИГНАТУРА БЛИЗКОЙ ЦВЕТОВОЙ ПАРЫ В СТЕГОАНАЛИЗЕ.....	80
<i>Кольчевская М.Н., Парфимович И.Д., Комаров Ф.Ф.</i> КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СИСТЕМ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	81
<i>Комаров Ф.Ф., Романов И.А., Власукова Л.А., Пархоменко И.Н., Моховиков М.А., Цивако А.А., Ковальчук Н.С.</i> МЕМРИСТОРНАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ.....	83
<i>Коробко Ю.С., Кравченко А.А.</i> ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ.....	85
<i>Крень А.П., Гнутенко Е.В., Кутепов А.Ю., Протасеня Т.А.</i> ОЦЕНКА ТОЛЩИНЫ И ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЯХ.....	87
<i>Кулуев Р.Р.</i> РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	89
<i>Лебедев А.Н., Завадская Т.Е.</i> ЗАЩИТНОЕ КОДИРОВАНИЕ ДАННЫХ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ БИРЖЕВЫХ ТОРГОВ.....	91
<i>Лебедев А.Н., Карондеев А.М., Козлов А.А.</i> ЛЕГКОВЕСНЫЙ АЛГОРИТМ ЗАЩИТНОГО КОДИРОВАНИЯ – NASH.....	93
<i>Лебедев А.Н., Кокорин А.О.</i> НОВЫЙ ПРОТОКОЛ ВЫРАБОТКИ ОБЩЕГО СЕКРЕТА – DHFL.....	95
<i>Левко И.А.</i> НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПАССИВНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ.....	96
<i>Лемешко Д.В.</i> НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ФАКТОРАМИ АУТЕНТИФИКАЦИИ, И НЕОБХОДИМОСТЬ ВЫРАБОТКИ НОВЫХ ФАКТОРОВ АУТЕНТИФИКАЦИИ.....	99
<i>Линкевич О.С., Гуревич В.Л.</i> АКУСТИКА И ЗВУК. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МИКРОФОНЫ КАК ЧАСТЬ СИСТЕМЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ.....	100
<i>Линкевич О.С., Гуревич В.Л.</i> АКУСТИКА И ЗВУК. АУДИОМЕТРИЯ КАК ЧАСТЬ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ.....	102
<i>Лисенков Б.Н., Гришкова И.А.</i> МАТРИЧНЫЙ МОДУЛЬ КОММУТАЦИИ.....	104
<i>Марченков С.Д., Лебедев А.Н.</i> ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАСШИРЕННОГО АЛГОРИТМА ОБМЕНА КЛЮЧАМИ В СРЕДСТВАХ КРИПТОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ.....	106
<i>Медведев Н.В.</i> ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ КОМПЛЕКСА БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ГРАЖДАНСКОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА НА БАЗЕ ОТКРЫТОЙ СЕТЕВОЙ АРХИТЕКТУРЫ.....	108
<i>Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Жарин А.Л.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕГРАДАЦИИ ЛАКОКРАСОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ ЗОНДОВЫМ ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ МЕТОДОМ.....	110
<i>Мисюкевич Н.С.</i> ОПИСАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРЕ.....	112
<i>Мороз А.С., Тявловский А.К.</i> ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ НОРМИРУЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СИГНАЛОВ ТЕРМОПАР.....	114
<i>Невдах В.В.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЖАРА В ОГРАЖДЕНИЯХ С ЕСТЕСТВЕННОЙ ВЕНТИЛЯЦИЕЙ.....	116
<i>Рацены Н.А., Астапенко Г.Ф., Кучинский П.В., Новик М.И.</i> ПОРТАТИВНЫЙ ЗАЩИЩЕННЫЙ КОММУНИКАЦИОННЫЙ МОДУЛЬ.....	118
<i>Рогожников Р.А., Терещенко Н.Ф.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА МАГНИТОТЕРАПИИ С ПЕРСОНАЛЬНЫМ КОНТРОЛЕМ.....	121
<i>Рудой А.Д., Терещенко Н.Ф.</i> АНАЛИЗ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ РЕНТГЕНОВСКИМИ ЛУЧАМИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБАХ МОНИТОРИНГА.....	123
<i>Савкова Е.Н., Кудина А.В., Чжан Ю., Сипачев И.В.</i> РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ-АНАЛИЗАТОРА РИСКА АККРЕДИТОВАННОЙ ЛАБОРАТОРИИ.....	125

<i>Савкова Е.Н., Чжан Ю., Баранов П.О.</i> ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ЕДИНИЦЫ И ИХ МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТЬ.....	127
<i>Сопряков В.И., Головня К.Ч.</i> ФОТОЕМКОСТНОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИМЕСЕЙ И ДЕФЕКТОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ.....	129
<i>Тимофеев А.М., Злобина Ю.В., Чупина А.Л.</i> ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИИ В КВАНТОВО-КРИПТОГРАФИЧЕСКОМ КАНАЛЕ СВЯЗИ.....	131
<i>Таратын И.А., Кернасовский Ю.М., Филатов С.А.</i> ШИРОКОДИАПАЗОННЫЕ MEMS ДАТЧИКИ ТЕПЛОвого ПОТОКА.....	133
<i>Тявловский А.К., Жарин А.Л., Пантелеев К.В., Свистун А.И., Самарина А.В., Петлицкий Н.Н., Мухуров Н.И.</i> МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ И СТАБИЛИЗАЦИИ ВЕЛИЧИНЫ ЗАЗОРА ЗОНД-ОБРАЗЕЦ В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ НА ОСНОВЕ ЗОНДА КЕЛЬВИНА.....	134
<i>Тявловский К.Л., Свистун А.И., Воробей Р.И., Гусев О.К., Жарин А.Л., Микитевич В.А., Пантелеев К.В., Тявловский А.К.</i> ОСНАЩЕНИЕ УМНОЙ АУДИТОРИИ.....	136
<i>Цедик В.А., Шахлевич Г.М.</i> ОСНОВНЫЕ СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЗАДАЮЩИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ.....	139

Секция 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

<i>Астапович А.А., Серенков П.С.</i> СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССНОГО И ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОДХОДОВ К СОЗДАНИЮ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА НА РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПАХ ЕЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА.....	141
<i>Багдюн А.А., Иващенко Д.В., Соломахо В.Л.</i> СТАНДАРТНЫЕ ОБРАЗЦЫ КАК ОСНОВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИАМЕТРОВ НАНОЧАСТИЦ.....	143
<i>Белова Е.А., Скуратов А.Г.</i> ЦИФРОВАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ В СИСТЕМЕ ГОССТАНДАРТА. ОТ АВТОМАТИЗАЦИИ К ЦИФРОВИЗАЦИИ.....	146
<i>Бережных Е.В., Лось А.А., Серенков П.С.</i> ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЕТИ ПРОЦЕССОВ НА ЭТАПЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА.....	147
<i>Бринкевич Д.И., Бумай Ю.А., Киевицкая А.И., Кийко А.Н.</i> РАДИОНУКЛИДЫ В СМЕННЫХ ДЕТАЛЯХ КОММЕРЧЕСКИХ ЦИКЛОТРОНОВ.....	150
<i>Бручковский И.И., Гуляева С.И., Литвинович Г.С.</i> КАЛИБРОВКА ФОТОМЕТРИЧЕСКОЙ СФЕРЫ ПО СПЭЯ КОМПАРАТОРОМ SOLAR M150.....	152
<i>Воронова Т.С., Серенков П.С., Ермак А.О.</i> ЭКСПЕРТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ КОНСТРУИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ НА МОДУЛЬНОМ ПРИНЦИПЕ.....	154
<i>Гавриленкова Е.В.</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА В ЦИРКУЛЯРНОЙ ЭКОНОМИКЕ.....	156
<i>Гавриленкова Е.В., Ленкевич О.А.</i> ВНЕДРЕНИЕ КОНЦЕПЦИИ БЕРЕЖЛИВОГО ПРОИЗВОДСТВА С УЧЕТОМ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ.....	158
<i>Гайдук Ю.С., Коробко Е.В., Журавский Н.А., Усенко А.Е., Свито И.А., Паньков В.В.</i> ФЕРРИМАГНИТНЫЕ НАПОЛНИТЕЛИ ДЛЯ МАГНИТОРЕОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	160
<i>Гуляева С.И., Литвинович Г.С., Бручковский И.И.</i> ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ОТКЛИКА СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ АЛГОРИТМА КОРРЕКЦИИ ДИФРАКЦИИ ВТОРОГО ПОРЯДКА.....	162
<i>Гуревич В.Л., Ефремова Н.Ю.</i> ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ О СООТВЕТСТВИИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ.....	164
<i>Джежора А.А., Завацкий Ю.А., Коваленко А.В., Рубаник О.Е.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИНДИКАТОРА КАЧЕСТВА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО МАСЛА.....	166

<i>Длугунович В.А., Жумарь А.Ю., Механиков А.В.</i> МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДОВОЙ ДИСПЕРСИИ В ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ.....	168
<i>Длугунович В.А., Исаевич А.В., Круплевич Е.А.</i> МЕЖДУНАРОДНЫЕ СЛИЧЕНИЯ НАЦИОНАЛЬНЫХ ЭТАЛОНОВ ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	170
<i>Домасевич А.А., Здитовецкая С.В.</i> АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИБОРА PH-МЕТРА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ АКТУАЛЬНОЙ КИСЛОТНОСТИ ТОРФА И ТОРФЯНОГО СУБСТРАТА ПОТЕНЦИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ.....	172
<i>Дудяк А.И., Хвасько В.М., Сахнович А.Д.</i> ДЕФОРМАЦИИ И НАПРЯЖЕНИЯ В КОНСОЛЬНОЙ БАЛКЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ ТОРЦЕВ КОНСОЛИ.....	174
<i>Дупляк И.О., Терещенко Н.Ф.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОЙ ИНГАЛЯЦИИ.....	175
<i>Евсюк Е.А., Гуревич В.Л., Серенков П.С.</i> ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ АНТЕННЫ, ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПРИМЕНЕНИЕ.....	177
<i>Коновалов И.А., Чесноков А.А., Дмитриев С.М., Хробостов А.Е., Баринев А.А., Зырянова Т.К.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПОТОКОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ.....	179
<i>Кравцова В.С., Габец В.Л.</i> ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ САТУРАЦИИ.....	181
<i>Коробко Ю.С., Кравченко А.А.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО МЕСТА КАЛИБРОВКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	183
<i>Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижижик С.А., Хабарова А.В., Трухан Р.Э.</i> МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КЕРАМИКИ.....	184
<i>Литвинович Г.С., Бручковский И.И.</i> ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ SO ₂ В ВУЛКАНИЧЕСКИХ ВЫБРОСАХ.....	186
<i>Михейчик А.В., Серенков П.С.</i> МЕТОДОЛОГИЯ «SIX SIGMA» КАК ИНСТРУМЕНТ АНТИКРИЗИСНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	188
<i>Михейчик А.В., Серенков П.С.</i> PSCR-МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ И СООТВЕТСТВИЕМ ПРОДУКЦИИ. ИНСТРУМЕНТ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ПРОДУКЦИИ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ.....	190
<i>Песляк И.Е., Серенков П.С.</i> АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМНОМ МЕНЕДЖМЕНТЕ.....	192
<i>Попко В.В., Сентемова Д.В., Ярмолевич М.А.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ, СБОРА, ПЕРЕДАЧИ, ОБРАБОТКИ И ОТОБРАЖЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ НАПРЯЖЕНИЯ – ВОЛЬТА.....	195
<i>Протасеня Т.А., Крень А.П., Мацулевич О.В.</i> ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МЕТОДА ДИНАМИЧЕСКОГО ИНДЕНТИРОВАНИЯ К ИЗМЕНЕНИЮ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО SLA-ТЕХНОЛОГИИ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОТВЕРЖДАЕМОГО СЛОЯ.....	199
<i>Романчук В.М., Лапто П.М.</i> О НОВОЙ ТЕОРИИ ИЗМЕРЕНИЙ (ТЕОРИЯ РЕЙТИНГОВ).....	201
<i>Самохвал П.М., Василевская А.А., Нехаева М.А., Сапранкова А.А.</i> КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ОСАНКИ В ПОЛОЖЕНИИ СИДЯ.....	203
<i>Самохвал П.М., Воронова Т.С., Кошель И. В., Пархомчук О.В.</i> КОНЦЕПЦИЯ УСТРОЙСТВА МОНИТОРИНГА ПОЗЫ ЧЕЛОВЕКА С НАРУШЕНИЯМИ ОПОРНО-ДВИГАТЕЛЬНОГО АППАРАТА.....	205
<i>Сергиевич О.А., Дятлова Е.М., Колонтаева Т.В., Попов Р.Ю.</i> ВЛИЯНИЕ ОКСИДОВ-МОДИФИКАТОРОВ НА ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -TiO ₂	207

<i>Серенков П.С., Белов П.С. АНАЛИЗ НОВЫХ ТРЕБОВАНИЙ В РАМКАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПОТРЕБИТЕЛЯ</i>	209
<i>Серенков П.С., Воронова Т.С., Рутковский С.В. МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ</i>	211
<i>Серенков П.С., Герасимчик Е.Е. ФОРМИРОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОЙ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАО «АЛТИМЕД»</i>	213
<i>Серенков П.С., Герасимчик Е.Е. СОПРОВОЖДЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ ШЕРОХОВАТОСТИ ОТВЕТСТВЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ МЕДИЦИНСКИХ ИМПЛАНТОВ</i>	215
<i>Серенков П.С., Песляк И.Е. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РОБАСТНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛОЖЕНИЙ ТЕОРИИ НЕКОРРЕКТНЫХ ЗАДАЧ</i>	217
<i>Серенков П.С., Чурак Н.В. ДИСТАНЦИОННОЕ ОБУЧЕНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТИ ПЕРСОНАЛА ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА</i>	219
<i>Серенков П.С., Чурак Н.В. ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ СРЕДЫ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ ПО ВОПРОСАМ СИСТЕМНОГО МЕНЕДЖМЕНТА</i>	221
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В., Колонтаева Т.В., Тадэуш Н.Н., Коничева Л.М. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ГРАБЕСА ДЛЯ АНАЛИЗА ВЫБОРОК СОСТАВНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕЖЛАБОРАТОРНЫХ СЛИЧЕНИЙ</i>	224
<i>Сидоров К.А. МЕТОДЫ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДЕФИБРИЛЛЯТОРОВ. МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ ДЕФИБРИЛЛЯТОРОВ</i>	225
<i>Соколовский С.С., Гома М.А., Янчиленко А.С. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫБОРА МЕТОДИК ВЫПОЛНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ</i>	228
<i>Соломахо В.Л., Соколовский С.С., Цитович Б.В. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ОСНОВА МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ ОБЪЕКТОВ КАСТОМИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА</i>	230
<i>Спесивцева Ю.Б., Данильчик В.Д., Бабанюк Д.С. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОТЫ ОТДЕЛА СТАНДАРТИЗАЦИИ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ</i>	231
<i>Спесивцева Ю.Б., Утлая О.В., Артюхевич Е.А. ОЦЕНКА РИСКОВ И ВОЗМОЖНОСТЕЙ В РАМКАХ САМООЦЕНКИ ОРГАНИЗАЦИИ</i>	233
<i>Станкевич М.А. ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РОБОТИЗИРОВАННЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ</i>	236
<i>Трефилов Д.А., Хабибуллин А.Р., Антонов Е.А., Калугин А.И. АНАЛИЗ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ</i>	238
<i>Трухан Р.Э., Хабарова А.В., Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Чижиж С.А., Торская Е.В., Муравьёва Т.И., Мерзин А.М., Самардак В.Ю. ОСОБЕННОСТИ НАНОСКРЕТЧ-ТЕСТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ</i>	239
<i>Хвистик М.Д., Серенков П.С. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ СИСТЕМЫ МЕНЕДЖМЕНТА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ISO/IEC 27001:2013</i>	242
<i>Шавилков Э.С. СОЗДАНИЕ НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДАВЛЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА</i>	243

Секция 3. ФИЗИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ, МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

<i>Yemets A., Barandych K., Gladskiy M. REENGINEERING DETAILS BY ADDITIVE TECHNOLOGIES</i>	246
<i>Акула И.П., Маркевич М.И., Малышко А.Н., Чекан Н.М., Щербакова Е.Н. МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МАГНИТОРЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СМЕСОВОЙ ТКАНИ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ КЛАСТЕРАМИ ТИТАНА</i>	248

<i>Андрухович И.М., Гасенкова И.В., Денисюк С.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И СОСТАВА СВЕТОПОГЛОЩАЮЩЕГО ПОКРЫТИЯ СЕЛЕКТИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ.....	250
<i>Бобученко Д.С.</i> ОТРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ ОТ ГРАНИЦЫ РАЗДЕЛА СРЕД ПРИ НАЛИЧИИ НА НЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА.....	252
<i>Бойцправ О.В., Бозуш Н.В., Лыньков Л.М.</i> ГИБКИЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ ФОЛЬГИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	254
<i>Бокуть Л.В., Деев Н.А.</i> ПОДАВЛЕНИЕ ПОМЕХ В БЕСПРОВОДНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ.....	256
<i>Бринкевич Д.И., Просолович В.С., Черный В.В.</i> ОСОБЕННОСТИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ R ⁺ , V ⁺ И Sb ⁺ В ПЛЕНКИ ПОЗИТИВНОГО ФОТОРЕЗИСТА ФП9120 НА КРЕМНИИ.....	258
<i>Выдумчик С.В., Васильева В.С., Гавриленко О.О., Горохов С.Л., Павлюкевич Т.Г., Понарядов В.В.</i> КОНЦЕПЦИЯ СОЗДАНИЯ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО СМЕСИТЕЛЬНО-ДОЗИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ МУЛЬТИКОМПОНЕНТНЫХ ПОЛИМЕРОВ.....	260
<i>Гундина М.А.</i> РАЗДАТОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ПО ВЫСШЕЙ МАТЕМАТИКЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ.....	262
<i>Гундина М.А., Кондратьева Н.А., Юхновская О.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЯ В WOLFRAM MATHEMATICA.....	264
<i>Гундина М.А., Юхновская О.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА, ПОДВЕРЖЕННОГО ДАВЛЕНИЮ В УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОМ СЛУЧАЕ.....	266
<i>Гундина М.А., Юхновская О.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРА, ПОДВЕРЖЕННОГО ДАВЛЕНИЮ В УПРУГОМ СЛУЧАЕ.....	268
<i>Гусакова О.В., Шепелевич В.Г., Гусакова С.В.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭВТЕКТИЧЕСКОГО СОСТАВА СПЛАВА Al-Si ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ЗАТВЕРДЕВАНИИ.....	269
<i>Гусев А.П., Загорский И.Е., Полоневич А.А.</i> ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРУТКОВ АРМАТУРЫ ПРИ ОДНОПОЛЮСНОМ И ДВУХПОЛЮСНОМ НАМАГНИЧИВАНИИ ПОСТОЯННЫМ ПОЛЕМ МАГНИТОВ.....	271
<i>Дятлова Е.М., Гундилович Н.Н., Попов Р.Ю., Бука А.В., Колонтаева Т.В.</i> СИНТЕЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ФЕРРИТА ВИСМУТА.....	274
<i>Василевич Л.Н., Ермакович О.Л., Лисовский Г.А.</i> МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАССЫ И ЗОЛЬНОСТИ БУМАЖНОГО ПОЛОТНА ПОСРЕДСТВОМ РАССЕЯННОГО И ТРАНЗИТНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	276
<i>Жевняк О.Г., Борздов В.М., Борздов А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ТОКА В КОРОТКОКАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРАХ.....	278
<i>Зерница Д.А., Шепелевич В.Г.</i> СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ФОРМИРОВАНИЕ ТЕКСТУРЫ В БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГАХ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ ОЛОВО-ЦИНК.....	280
<i>Имомов Н.Б., Мирзоалиев И., Мамадназарова М.С., Амонов С.Т.</i> УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ШАРИКОВ ИЗ САМОЦВЕТНЫХ КАМНЕЙ.....	282
<i>Канафьев О.Д.</i> АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ХИМИЧЕСКОЙ ПОЛИРОВКИ КОВАРА.....	284
<i>Козерук А.С., Филонова М.И., Макаренко М.С., Ларионов Н.П.</i> СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ МИКРОШАРИКОВ.....	286
<i>Колесникова Е.А., Углов В.В., Тетеруков Е.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЛЕНОК АНТИМОНИДА ИНДИЯ (InSb), ОБЛУЧЕННЫХ ГАММА-КВАНТАМИ.....	288
<i>Кондратьева Н.А., Вансович Д.И.</i> ИНФОРМАТИЗАЦИЯ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА СТУДЕНТОВ ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНОГО ФАКУЛЬТЕТА.....	290

<i>Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Хабарова А.В., Чижевский С.А., Вархолински Б., Гилевич А., Трухан Р.Э.</i> МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ Al-Cr-N С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ Al	291
<i>Кулуев Р.Р., Матякубова П.М.</i> РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЕМКОСТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ВЛАЖНОСТИ ЗЕРНА	293
<i>Ланин В.Л., Мишечек А.А.</i> МОНТАЖ КРИСТАЛЛОВ В КОРПУСА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ	296
<i>Луговой В.П.</i> МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭСТЕТИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ЮВЕЛИРНЫХ КАМНЕЙ	298
<i>Луговая И.С., Луговой В.П.</i> ВЯЗАННЫЕ И ПЛЕТЕННЫЕ ЮВЕЛИРНЫЕ УКРАШЕНИЯ ИЗ ПРОВОЛОКИ	300
<i>Манего С.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРНОЕ СОВЕРШЕНСТВО ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ I n P	302
<i>Маркевич М.И., Малышко А.Н., Журавлева В.И., Щербакова Е.Н.</i> ПОЛУЧЕНИЕ НАНОЧАСТИЦ АЛЮМИНИЯ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ	304
<i>Мельникова Г.Б., Лапицкая В.А., Хабарова А.В., Кузнецова Т.А., Чижевский С.А.</i> ФОРМИРОВАНИЕ ПЛЕНОК НА ОСНОВЕ ПЕРФТОРИРОВАННЫХ АМФИФИЛЬНЫХ КИСЛОТ МЕТОДОМ ЛЕНГМЮРА–БЛОДЖЕТТ	306
<i>Мирзоалиев А.И., Мирзоалиев И., Мамадназарова М.С., Имомов Н.Б.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГАЛТОВКИ ОТ УСЛОВИЯ ОБРАБОТКИ	308
<i>Монич С.Г., Бобоев А.</i> АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ СТОМАТОЛОГИЧЕСКИХ ИМПЛАНТАТОВ ПОСЛЕ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ	310
<i>Монич С.Г., Есьман Г.А., Галаваченко П.О.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ОБРАТНОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СВЯЗИ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ГЕНЕРАТОРА	312
<i>Монич С.Г., Саяб А., Галаваченко П.О.</i> УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ГЕНЕРАТОР	314
<i>Николаева Т.А., Таратын И.А., Чижевский С.А.</i> ЭЛЛИПТИЧЕСКИЙ ЕМКОСТНОЙ МИКРОДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ	316
<i>Оджаев В.Б., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Ковальчук Н.С., Филипья В.А., Черный В.В., Шестовский Д.В., Явид В.Ю., Янковский Ю.Н.</i> ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИОННО-РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ОБЛАСТИ ОБЕДНЕНИЯ p-i-n-ФОТОДИОДОВ	318
<i>Петровская А.С., Радюкевич Д.Л., Мельникова Г.Б., Чижевский С.А., Сапсальев Д.В.</i> ПОЛУЧЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРАСТВОРИМЫХ ПОЛИМЕРОВ И НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ МЕТОДОМ СПИН-КОАТИНГА	320
<i>Петровская А.С., Мельникова Г.Б., Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Чижевский С.А., Зыкова А.В., Сафонов В.И., Трухан Р.Э.</i> ГИДРОФИЛЬНЫЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОКРЫТИЙ ОКСИДОВ, НИТРИДОВ ТАНТАЛА И АЛЮМИНИЯ	322
<i>Петухов И.Б., Кипарин И.Н.</i> УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ЦИКЛА ФОРМИРОВАНИЯ ПРОВОЛОЧНОГО МЕЖСОЕДИНЕНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ МИКРОСВАРКИ	324
<i>Попов Р.Ю., Дятлова Е.М., Самсонова А.С., Шабурова М.А.</i> ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗУЮЩИХ ДОБАВОК НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ СИНТЕТИЧЕСКОГО ВОЛЛАСТОНИТА	326
<i>Реутская О.Г.</i> ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ МУЛЬТИСЕНСОРНЫХ МИКРОСИСТЕМ	328
<i>Ризнооккая Н.Н., Касьямин В.Ю., Матвиевич В.Г.</i> ДИНАМИКА ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА С ОПОРОЙ НА ОДИН ШАРИК НА ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АКТИВНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ КАПИЛЛЯРНЫХ СИЛ	330
<i>Савич В.В.</i> ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ: ОТ ШКОЛЬНЫХ ОПЫТОВ ПО ФИЗИКЕ ДО НОВЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ	332

<i>Савченко А.Л., Мальцев Д.В., Муминбоев А., Скурковина Л.Е.</i> РЕЦИРКУЛЯТОР ВОЗДУХА ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ УЧРЕЖДЕНИЙ.....	335
<i>Савченко А.Л., Минченя В.Т., Rogovцова А.С.</i> СВАРКА НИТИНОЛОВОЙ ПРОВОЛОКИ С УЛЬТРАЗВУКОМ.....	337
<i>Сандомирский С.Г.</i> ПОВЫШЕНИЕ ЛОКАЛЬНОСТИ НАМАГНИЧЕННОГО УЧАСТКА ИЗДЕЛИЯ ПРИ ЕГО НАМАГНИЧИВАНИИ МЕТОДОМ «ТОЧЕЧНОГО ПОЛЮСА».....	339
<i>Сапсалёв Д.В., Петровская А.С., Мельникова Г.Б., Аксющц А.В., Котов Д.А., Радюкевич Д.Л., Чижиж С.А.</i> НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ НИКЕЛЕВЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ.....	341
<i>Степаненко Д.А., Бунчук К.А., Жуков В.И., Rogovцова А.С.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ГАРМОНИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДЛЯ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ УПРУГИХ КОЛЕБАНИЙ.....	343
<i>Счастный А.С., Пиунов В.Д., Осипов А.А.</i> ОБ УЧЕТЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	345
<i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> КОНТРОЛЬ СТРУКТУРЫ ИЗОЛЯЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	347
<i>Сычик В.А., Уласюк Н.Н.</i> МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ.....	348
<i>Таратын И.А., Козуля А.А., Рысик А.Н.</i> ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ГАЗОВЫЙ СЕНСОР С НАГРЕВАТЕЛЕМ ИЗ ОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ.....	351
<i>Телеш Е.В., Данилович С.В., Гутенко Н.Д.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННЫХ ПУЧКОВ МЕДИ.....	353
<i>Телеш Е.В., Точеный В.А.</i> ИОННО-ЛУЧЕВОЕ РАСПЫЛЕНИЕ МИШЕНИ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА.....	356
<i>Тихон О.И., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Достанко А.П., Лях А.С., Жаворонок И.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СВЧ МОЩНОСТИ В ПЛАЗМЕННОМ ОБЪЕМЕ ПРИ КВАЗИПОСТОЯННОМ РЕЖИМЕ ЕЕ ГЕНЕРАЦИИ.....	357
<i>Трухан Р.Э., Хабарова А.В., Кузнецова Т.А., Лапицкая В.А., Чижиж С.А., Торская Е.В., Муравьёва Т.И., Мерзин А.М., Самардак В.Ю.</i> ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ, ОПРЕДЕЛЕННЫЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ.....	359
<i>Францкевич А.В., Францкевич Н.В., Мартинович В.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СФЕРАОБРАЗНЫХ НАНОСТРУКТУР, СФОРМИРОВАННЫХ В ОБЪЕМЕ ПЛАСТИН МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ.....	361
<i>Хабарова А.В., Лапицкая В.А., Кузнецова Т.А., Куприн А.С., Чижиж С.А., Трухан Р.Э., Конеру А.</i> ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВАКУУМНО-ДУГОВОГО НИКЕЛЕВОГО ПОКРЫТИЯ, ЛЕГИРОВАННОГО ФОСФОРОМ.....	363
<i>Чернышёв А.В., Шарандо В.И., Кременькова Н.В.</i> ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ.....	365
<i>Шабура М.А., Колонтаева Т.В.</i> ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ МАТЕРИАЛА С СЕГНЕЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ.....	367
<i>Шабура М.А., Колонтаева Т.В.</i> ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ТИТАНАТА БАРИЯ ОТ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК.....	369
<i>Шарандо В.И., Чернышёв А.В., Кременькова Н.В., Полоневич А.А.</i> ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ СТАЛИ 12Х18Н10Т С ПОМОЩЬЮ МАГНИТОДИНАМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ.....	371
<i>Шепелевич В.Г., Гусакова С.В., Гольцев М.В., Гусакова О.В.</i> ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА СПЛАВА $Bi_{17}In_{25}Sn_{59}$	373
<i>Ширяева В.Д., Щербакоев Е.Н.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ В КОРПУСАХ ИС С ПОМОЩЬЮ АНАЛИЗАТОРА МКМ-1.....	374
<i>Юценко Е.В., Терещенко Н.Ф.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ВАКУУМНОЙ АБСОРБЦИИ И ЛЕЧЕНИЯ РАНЕНИЙ.....	376

Секция 4. ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ, ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Glazunov I., Malyarevich A., Yumashev K., Dymshits O., Alekseeva I., Zhilin A.</i> NON-LINEAR OPTICAL PROPERTIES OF TRANSPARENT GLASS-CERAMICS BASED ON $\text{Co}^{2+}:\text{Zn}(\text{Al,Ga})_2\text{O}_4$ SPINEL NANOCRYSTALS.....	379
<i>Gusakova N., Gorbachenya K., Kisel V., Yasukevich A., Guretskii S., Trukhanova E., Kravtsov A., Karpinsky D., Ozen Y., Ozcelik S., Kuleshov N.</i> SPECTROSCOPY OF $\text{Tm}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ CRYSTAL GROWN BY THE MODIFIED CZOCHRALSKI METHOD.....	381
<i>Yumashev K., Malyarevich A., Vilejshikova E., Goman V., Pavlovski L.</i> THERMO-OPTIC PROPERTIES OF ORTHORHOMBIC $\text{BeAl}_6\text{O}_{10}$ CRYSTAL.....	383
<i>Алексеев В.А., Усольцева А.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МРАМОРА.....	385
<i>Артюхина Н.К., Шарко Д.С., Чергейко С.В.</i> ВАРИООБЪЕКТИВ ДЛЯ СИСТЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.....	387
<i>Бельман О.И., Стельмах Н.В.</i> АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СОРТИРОВКИ ОТХОДОВ НА БАЗЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ОПТИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОРТИРУЕМОГО МАТЕРИАЛА.....	389
<i>Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Баранов П.О., Степаненко А.И., Шишурич Д.А.</i> АППРОКСИМАЦИЯ КРИВЫХ СИЛЫ СВЕТА RGB СВЕТОДИОДОВ.....	391
<i>Гацкевич Е.И., Ивлев Г.Д., Малевич В.Л.</i> ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННЫЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ГЕРМАНИЙ-КРЕМНИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ.....	393
<i>Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Лазарчук А.И., Волкова Е.А., Копорулина Е.В., Мальцев В.В., Кулешов Н.В.</i> РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ $\text{Er, Yb:YAl}_3(\text{VO}_3)_4$	395
<i>Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Лазарчук А.И., Митина Д.Д., Мальцев В.В., Копорулина Е.В., Волкова Е.А., Кулешов Н.В.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Er, Yb:GdMgB}_5\text{O}_{10}$	397
<i>Гусаров И.Е., Владимиров В.Д., Калугин А.И.</i> РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРИЗМЕННОГО ДЕФЛЕКТОРА ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА.....	399
<i>Данильчик А.В., Луценко Е.В., Никоненко С.В., Тарасова О.Б.</i> ЭТАЛОННЫЙ СВЕТОДИОДНЫЙ ИСТОЧНИК ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ РАДИОМЕТРОВ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ СИЕ С.....	401
<i>Демеш М.П., Горбаченя К.Н., Кисель В.Э., Волкова Е.А., Мальцев В.В., Копорулина Е.В., Кулешов Н.В.</i> СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛА $\text{Tb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{VO}_3)_4$	403
<i>Демеш М.П., Кисель В.Э., Кулешов Н.В., Низамутдинов А.С., Морозов О.С., Кораблева С.Л., Семашко В.В.</i> ЛАЗЕР НА КРИСТАЛЛЕ Pr:YLF ПРИ НАКАЧКЕ InGaN ЛАЗЕРНЫМ ДИОДОМ.....	405
<i>Дерменжи И.А., Барышников С.Ю., Кочурова Д.Н., Калугин А.И.</i> ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ОТРАЖЕННОГО ОТ ЛАМБЕРТОВА КРУГЛОГО ОТРАЖАТЕЛЯ.....	407
<i>Ермалицкая К.Ф.</i> УПРАВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ.....	409
<i>Ермалицкая К.Ф., Воронай Е.С., Тарасов Д.С.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ В АБЛЯЦИОННОЙ ПЛАЗМЕ С ПОМОЩЬЮ ДВУХИМПУЛЬСНОГО СПЕКТРОМЕТРА ЛАЭМС.....	411
<i>Залесский В.Б., Конойко А.И., Кравченко В.М., Кузьмицкая А.С.</i> МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ТЕРМООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ.....	413
<i>Зарипов М.Р., Алексеев В.А., Калугин А.И., Куприянов А.А., Антропова В.С.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СЛОЖЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ В КОЛЬЦЕВОЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ЗАДЕРЖКИ.....	415
<i>Исаевич А.В.</i> ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ИЗЛУЧЕНИЯ ЛАЗЕРОВ.....	417

<i>Киль И.А., Погорелов М.Г.</i> ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕИМУЩЕСТВ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО КАНАЛА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ.....	419
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Гоман В.И., Кулешов Н.В.</i> РОСТ И СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛОВ $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$	420
<i>Кисель В.Э., Горбаченя К.Н., Руденков А.С., Гурецкий С.А., Кулешов Н.В.</i> КРИСТАЛЛЫ $\text{Yb:KY}(\text{WO}_4)_2$ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ИОНОВ ИТТЕРБИЯ: РОСТ И СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.....	422
<i>Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Павлюковец Е.Ю., Судников Г.А., Али-заде Э.Т.</i> МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛОСКОГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	424
<i>Козерук А.С., Диас Гонсалес Р.О., Кузнечик В.О., Семченко А.Р., Гордейко Р.В., Жогла И.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	426
<i>Кольчевская И.Н., Сацункевич А.Е., Петров П.В., Кольчевский Н.Н.</i> ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕНТГЕНООПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	428
<i>Кузнецов А.В., Фёдорцев Р.В.</i> ПРИБОР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТОЧНОСТИ СКЛЕЙКИ ЛИНЗ.....	430
<i>Куниц А.В., Кузнечик В.О.</i> КОНТРОЛЬ ЛУЧЕВОЙ ПРОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ.....	432
<i>Малютина-Бронская В.В., Сорока С.А., Сенкевич Д.В., Семченко А.В., Сидский А.В., Тарасенко М.С.</i> ОПТИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ.....	434
<i>Мухуров Н.И., Ходин А.А.</i> МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР МИКРОЧАСТИЦ ГАЗОВОЙ/ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ.....	436
<i>Невдах В.В.</i> ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ РАВНОВЕСНЫХ СИСТЕМАХ И ПРИНЦИП ДЕТАЛЬНОГО РАВНОВЕСИЯ.....	438
<i>Орехова В.Е., Кисель В.Э., Орехов К.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛА Nd:YAG С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ.....	441
<i>Палабугин М.В., Усольцев В.П.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДЕФЕКТОВ ДРАГОЦЕННЫХ КАМНЕЙ.....	443
<i>Полецук Н.Н., Рудницкий А.С.</i> ФАЗОВАЯ СТРУКТУРА ФОТОННЫХ НАНОСТРУЙ В ДИФРАКЦИОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЯХ ИЗОЛИРОВАННЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ.....	445
<i>Поляков А.В., Ксенофонов М.А.</i> ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА.....	447
<i>Прусова И.В., Прихач Н.К., Акиншиев К.А.</i> СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА СТЕКОЛ СИСТЕМЫ $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Eu}_2\text{O}_3$: ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА.....	449
<i>Павленко В.К., Сафонов В.В., Шкадаревич А.П.</i> МОДЕРНИЗАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННО-ТЕПЛОВИЗИОННОГО ПРИБОРА-ДАЛЬНОМЕРА.....	451
<i>Романов Д.В., Фёдорцев Р.В.</i> СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КРИТЕРИЕВ ИНФОРМАТИВНОСТИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА.....	452
<i>Свибович И.В., Шкадаревич А.П.</i> СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ НА ОСНОВЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ БОЛОМЕТРИЧЕСКИХ МАТРИЦ.....	454
<i>Свирина Л.П.</i> ПОЛЯРИЗАЦИОННАЯ МУЛЬТИСТАБИЛЬНОСТЬ В ДВУХЧАСТОТНОМ ГАЗОВОМ ЛАЗЕРЕ СО СЛАБО АНИЗОТРОПНЫМ РЕЗОНАТОРОМ.....	456
<i>Сернов С.П., Балохонов Д.В.</i> ФАНТОМНЫЙ ЭФФЕКТ В СИГНАЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И СПОСОБЫ ЕГО МИНИМИЗАЦИИ.....	458
<i>Соснина Л.А., Фёдорцев Р.В.</i> ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ОСВЕЩЕННОСТИ ЖИЛОГО ПОМЕЩЕНИЯ.....	460

<i>Терехова М.С., Рудиков С.И., Шкадаревич А.П.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСОКОМОЩНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МАТЕРИАЛ.....	462
<i>Федоров И.В.</i> СОЗДАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ 3D-МОДЕЛИ ЧЕЛОВЕКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	464
<i>Ясюкевич А.С., Гусакова Н.В., Кулешов Н.В.</i> СКОРОСТНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДОНОР-АКЦЕПТОРНОГО ПЕРЕНОСА ЭНЕРГИИ В СРЕДАХ, АКТИВИРОВАННЫХ ИОНАМИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.....	466

Научное издание

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ-2021

Материалы
14-й Международной научно-технической конференции

17–19 ноября 2021 года
Минск, Республика Беларусь

Ответственный за выпуск *К.В. Пантелеев*
Оформление и компьютерная верстка *О.Л. Чабарова*

Подписано в печать 11.11.2021. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 55,80. Уч.-изд. л. 21,82. Тираж 150. Заказ 637.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.