

ISSN 1561-8358 (print)

УДК 621.357.74

Поступила в редакцию 07.04.2017

Received 07.04.2017

Д. И. Тишкевич¹, Ю. В. Богатырев¹, С. С. Грабчиков¹, С. Б. Ластовский¹,
Л. С. Цыбульская², В. С. Шендюков², С. С. Перевозников², С. К. Позняк², А. В. Труханов¹

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем
Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ВИСМУТА И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Аннотация. Современные изделия микроэлектронной техники широко применяются в ракетно-космической, авиационной, военной и атомной технике. Однако данные изделия весьма чувствительны к воздействию различных ионизирующих излучений (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы, рентгеновское и гамма-излучения). В настоящее время спектр синтезируемых материалов достаточно широк, ряд из них может быть перспективен для использования в качестве экранов радиационной защиты. В качестве материала экранов, эффективно поглощающих высокоэнергетические излучения, обычно используют тяжелые элементы. Наиболее широко применяемый тяжелый металл – свинец, но он имеет ряд недостатков. Висмут является нетоксичным и обладает невысокой стоимостью, а широкие технологические возможности получения делают его весьма актуальным для применения в качестве материала для радиационной защиты.

Исследованы условия электрохимического осаждения и структура покрытий висмута, а также влияние на них различных органических добавок. Показано, что покрытия на основе висмута имеют ромбоэдрический тип кристаллической решетки, а введение в электролит ряда органических добавок приводит к изменению текстуры роста покрытий. Установлено, что с ростом толщины покрытий микроструктура изменяется от дендритной, крупнокристаллической, – к мелкодисперсной.

Изучена эффективность радиационной защиты экранов на основе висмута при облучении электронами с энергией 1,6–1,8 МэВ. Эффективность ослабления электронного потока оценивалась по изменению вольтамперных характеристик тестовых МОП-транзисторных структур, расположенных за экранами и без экранов. Установлено, что оптимальными с точки зрения эффективности защиты и массогабаритных параметров являются экраны из висмута характеризующиеся значениями приведенной толщины 2 г/см² и коэффициентом ослабления, равным 156.

Ключевые слова: электрохимическое осаждение, экранирование, радиационная защита, висмут, облучение электронами

Для цитирования. Электрохимически осажденные покрытия на основе висмута и эффективность их защиты от электронного излучения / Д. И. Тишкевич [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 3. – С. 19–29.

D. I. Tishkevich¹, Y. V. Bogatyrev¹, S. S. Grabchikov¹, S. B. Lastovskii¹, L. S. Tsybulskaya², V. S. Shendyukov²,
S. S. Perevnikov², S. K. Poznyak², A. V. Trukhanov¹

¹Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Belarus

ELECTROCHEMICAL DEPOSED BISMUTH COATINGS AND THE EFFICIENCY OF THEIR PROTECTION FROM ELECTRON IRRADIATION

Abstract. Microelectronic products are widely used in aerospace, aviation, military and nuclear engineering. However, they are very sensitive to various ionizing radiations (electrons, protons, heavy charged particles, X-ray and gamma radiation). The common used material for radiation protection is lead. In recent years, bismuth deposition has become an interesting subject for the electrochemical community because of bismuth's unique electrical, physical and chemical properties. There is a limited number of authors dealing with continuous bismuth films onto metallic substrates by electrodeposition.

The conditions of electrochemical deposition of bismuth and the structure of coatings were examined. Electrochemical deposition with the inputted various organic additives and without them was carried out. It is shown that bismuth coatings have a rhombohedral lattice, and that adding of a number of organic additives into the electrolyte results changing in a coatings growth texture.

The protection efficiency of shields based on bismuth under 1.6–1.8 MeV electron irradiation energy was measured. The electron beam attenuation efficiency was estimated by changing of current-voltage characteristics of semiconductor test structures

which were located behind the shields and without them. It has been determined that bismuth shields with 2 g/cm² reduced thickness and attenuation coefficient of 156 have optimal protection effectiveness and mass dimensional parameters.

Keywords: electrochemical deposition, shielding, radiation protection, bismuth, electron irradiation

For citation. Tishkevich D. I., Bogatyrev Y. V., Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Tsybul'skaya L. S., Shendyukov V. S., Perevoznikov S. S., Poznyak S. K., Trukhanov A. V. Electrochemical deposited bismuth coatings and the efficiency of their protection from electron irradiation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 3, pp. 19–29 (in Russian).

Введение. Современные изделия полупроводниковой и микроэлектронной техники широко применяются в ракетно-космической, авиационной, военной и атомной технике. Однако они весьма чувствительны к воздействию различных ионизирующих излучений (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы, рентгеновское и гамма-излучения) [1]. В связи с этим проблема обеспечения эксплуатационной надежности радиоэлектронных приборов и аппаратуры в условиях радиационных воздействий стоит перед многими инженерами и разработчиками техники, эксплуатируемой как в наземных условиях, так и в условиях космического пространства.

Основные методы обеспечения радиационной стойкости изделий электроники условно можно разделить на две группы – методы, использующие схемотехнические и конструкторские решения, либо методы защиты с помощью радиационных экранов. Первый путь имеет значительные ограничения по причине невысокой радиационной стойкости основного количества элементов электронных приборов и микросхем, возможностей конструктивно-схемотехнического решения этой проблемы. Второй путь может быть более предпочтителен, поскольку он определяется радиационными свойствами используемых материалов экранов и не накладывает ограничений на схемотехнические и конструкционные возможности разработчиков. Такой подход получил условное название ЛОЗА (Локальная ЗАщита) в Российской Федерации [2] и RAD-COAT [3], RAD-PAK [4] – за рубежом.

В настоящее время спектр синтезируемых материалов достаточно широк, ряд из них может быть перспективен для использования в качестве экранов радиационной защиты [5–7]. С целью защиты от электронного, рентгеновского и гамма-излучений используют алюминий, железо, медь, вольфрам, свинец, силикатное стекло и др. В качестве материала экранов, эффективно поглощающих высокоэнергетические излучения, применяют, как правило, тяжелые элементы. Наиболее широко используемый тяжелый металл – свинец. Это высокотоксичный материал с высокими значениями плотности ($\rho = 11,35 \text{ г/см}^3$). Применение его создает значительные трудности для экологической обстановки при производстве и утилизации изделий радиационной защиты. Висмут относится к рассеянным элементам с содержанием $2 \cdot 10^{-5} \%$ в земной коре и обладает рядом необычных физико-химических свойств. Он является диамагнетиком, имеет один из самых низких коэффициентов теплопроводности и высокий магниторезистивный эффект, характеризуется низким поперечным сечением для тепловых нейтронов и сравнительно высокой химической стойкостью к окислению, нерастворим в соляной кислоте в отсутствие кислорода. Нетоксичность и невысокая стоимость висмута, широкие технологические возможности его получения делают весьма актуальным применение висмута в качестве материала для радиационной защиты. Так, стекла на основе оксида висмута Bi_2O_3 используют в качестве экранов от гамма-излучения [8]. Текстильные материалы с частицами Bi_2O_3 применяют при изготовлении спецодежды для медицинского персонала, работающего на рентгеновских и гамма-установках [9]. При нанесении оксида висмута на легкие ткани можно обеспечить степень ослабления рентгеновского излучения аналогичную, как и в случае свинцовой одежды [10]. Использование многослойных структур, содержащих слои на основе легких (Sn, Sb, Ba) и тяжелых (W и Bi) элементов, на полимерной подложке обеспечивает ослабление, эквивалентное случаю чистого свинца, но с более низкими (на 25 %) массогабаритными параметрами [11]. При этом многослойные структуры обеспечивают в 5 раз более высокое ослабление, чем свинцовая защита, при напряжении на рентгеновской трубке 50 кВ. Но этот эффект постепенно уменьшается и при напряжении 150 кВ исчезает [12].

Необходимо также отметить, что для создания эффективной радиационной защиты толщина экранов должна составлять порядка 1 мм и более. В связи с этим в настоящей работе исследованы

условия электрохимического осаждения и структура покрытий висмута толщиной 100–2700 мкм, ряд физико-технических свойств и эффективность ослабления потоков электронного излучения.

Методика эксперимента. Осаждение покрытий висмута производили из перхлоратного электролита висмутирования [13] при следующих условиях и составах раствора: висмут (III) гидроксид – 45 г/л, концентрированная 65%-ная хлорная кислота – 225 мл/л, желатин – 0,3–0,5 г/л, вода дистиллированная – до 1 л, температура – 20–25 °С, рабочая плотность тока – 2,4–3,0 А/дм². Анод – висмутовые стержни. В качестве источника тока использовался потенциостат ПИ-50.01. Для улучшения адгезии висмутового покрытия с алюминиевой подложкой перед осаждением висмута наносили подслоя химически осажденного Ni-P. Осаждение подслоя осуществлялось из кислого раствора следующего состава: NiCl₂ – 25 г/л, CH₃COONa – 10 г/л, NH₂NH₂·H₂O – 10 г/л, NaH₂PO₄·H₂O – 25 г/л. Его производили при температуре 80–90 °С в течение 20–30 мин, толщина подслоя химического Ni-P равнялась 3–5 мкм.

Изготовлено две партии экспериментальных образцов экранов: первая партия для исследования структурных свойств покрытий – шесть образцов с толщинами висмута 100, 200, 300, 400, 500 и 600 мкм (№ 1–6); вторая партия для определения коэффициентов ослабления электронов – шесть образцов висмута с толщинами 972, 1340, 1598, 1952, 2236, 2640 мкм (№ 7–12). В качестве подложек применялись алюминиевые пластины размерами 40×40×0,4 мм.

Для улучшения качества висмутовых покрытий (снижение внутренних напряжений, повышение пластичности) использован ряд органических добавок – резорцин, крезол, красители (акридиновый желтый и сафраниновый фиолетовый RV), оксиэтилированные спирты (синтанол ДС-10, тритон X-100), желатин. Добавки вводились в электролит в концентрации 1 г/л, как по отдельности, так и в сочетании друг с другом.

Исследование морфологии поверхности и микроструктуры висмута проводили на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) LEO 1455VP. Перед исследованиями экспериментальные образцы подвергали очистке в ультразвуковой ванне и полировке. Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре PanAnalytical Emperean с использованием монохроматизированного Cu K α -излучения. Фазовый анализ проводился при съемке со скоростью детектора 2 градуса в минуту. Для определения параметров решетки осуществлялась прецизионная запись дифракционных линий, расположенных в дальней угловой области с целью уменьшения погрешности измерения, со скоростью детектора 0,125 градуса в минуту.

Толщину покрытий висмута (d) определяли гравиметрическим методом [13]. Приведенную толщину экранов ($d_{пр}$) рассчитывали по формуле

$$d_{пр} = d\rho_{Bi}, \quad (1)$$

где ρ_{Bi} – плотность висмута.

Облучение образцов проводилось на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-4. Номинальная энергия электронов после окна вывода составляла $E_e = 4$ МэВ, флюенс $\Phi = (0,5 \div 50) \cdot 10^{13}$ см⁻². Плотность потока электронов контролировалась с помощью цилиндра Фарадея и составляла $4 \cdot 10^{11}$ см⁻²с⁻¹.

Как известно [14], при радиационном воздействии коэффициент ослабления излучения веществом (по поглощенной дозе) существенно зависит от энергетического спектра излучения. Для приближения характеристик спектра электронов ускорителя ЭЛУ-4 к спектру электронов радиационного пояса Земли (РПЗ) между мишенью и окном вывода электронов устанавливалась дюралюминиевая пластина толщиной 5 мм (рис. 1). Пучок электронов, выходящий из окна вывода ускорителя, падает на замедляющий дюралюминиевый экран и далее

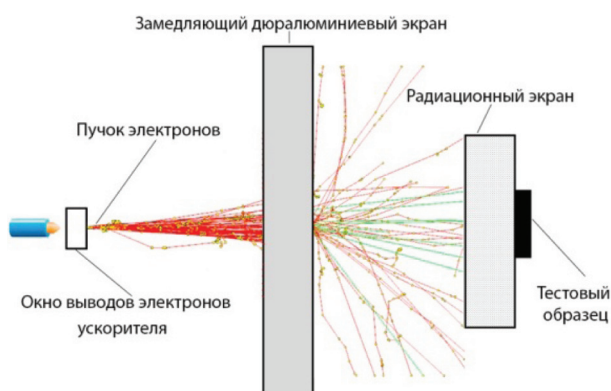


Рис. 1. Схема испытаний радиационных экранов

Fig. 1. Testing scheme of radiation shields

с энергией 1,6–1,8 МэВ и сопутствующим тормозным излучением направляется на исследуемый радиационный (защитный) экран, за которым установлен тестовый образец. Расстояние от окна вывода электронов до замедляющего экрана составляло 0,5 м, а до радиационного экрана – 1 м.

Коэффициент ослабления потоков электронов радиационными экранами определяли из отношения флюенсов падающего на экран и прошедшего через экран потока электронов [15]. В качестве тестовых структур использовались транзисторные МОП-структуры (элементы логических КМОП ИМС IN74AC04N производства ОАО «Интеграл»). Данный метод определения поглощенной дозы излучения основан на изменении радиационно-чувствительных параметров МОП-транзисторов (МОПТ) и достаточно удобен с точки зрения практической реализации [16–18]. Измерения сток-затворных вольтамперных характеристик (ВАХ) тестовых р-МОПТ-структур проводились до и после каждой дозы облучения с помощью измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6.

Радиационные изменения характеристик МОП-транзисторов связаны, во-первых, с захватом свободных носителей заряда на глубокие центры в объеме диэлектрика и, во-вторых, с образованием поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик–полупроводник. Захват носителей заряда в объеме SiO_2 и на уровне поверхностных состояний вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности поверхностных состояний приводит к дополнительному рассеянию подвижных носителей заряда и уменьшению крутизны сток-затворной ВАХ [6, 19].

Поглощенная доза определялась по величине сдвига ВАХ – изменению падения порогового напряжения (ΔU) при токах утечки $I_c = 10^{-7}$ А для р-МОПТ. Для каждой дозы электронного облучения использовалась отдельная микросхема. Значения ΔU усреднялись по шести транзисторам. Для нахождения поглощенной дозы прошедшего защитный экран излучения рассчитывалось значение ΔU для р-МОПТ, защищенной экраном, а для поглощенной дозы падающего на защитный экран излучения – микросхемы, не защищенной экраном.

Эффективность экранирования определялась по изменению ВАХ, а именно – порогового напряжения для р-МОПТ, расположенных за экраном и без экрана. Значения коэффициента экранирования (коэффициента ослабления) (K_s) определяли из соотношения

$$K_s = \Phi/\Phi_0, \quad (2)$$

где Φ – флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу тестовой приборной структуры, защищенной экраном; Φ_0 – флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу тестовой приборной структуры без экрана.

Параметрический отказ фиксировался при изменении порогового напряжения $\Delta U = 0,05$ В.

Результаты и обсуждение

Структура покрытий висмута. Висмут является тяжелым элементом с порядковым номером 83, массовым числом 208,98 и плотностью 9,747 г/см³. На рис. 2 приведены рентгеновские спектры покрытий висмута различной толщины (партия I), полученных из электролита, не содержащего органических добавок. С увеличением толщины покрытия количество рефлексов увеличивается, однако их интенсивность падает, что свидетельствует о формировании кристаллитов различной ориентации. Согласно проведенным оценкам толщина слоя, участвующего в формировании дифракционной картины, составляет приблизительно 5 мкм. По данным рентгеновской дифракции структура всех образцов покрытий висмута характеризовалась ромбоэдрическим типом кристаллической решетки. Важно отметить, что покрытия висмута, полученные из электролита без добавок, имеют ярко выраженную текстуру <012>. Данная текстура сохраняется и при введении в электролит органических добавок – крезол, резорцина, желатина, синтанола.

Сформировавшиеся покрытия висмута толщиной 100 мкм обладают крупнозернистым строением (рис. 3, а). Зерна в виде дендридов размерами от 10 до 30 мкм имеют ограненную форму и резкие границы. Поскольку продольные размеры зерен сопоставимы с толщиной покрытий, по-видимому, можно полагать, что на рис. 3, а представлен первый слой висмута, выращенный

на алюминиевой подложке. С увеличением толщины покрытия характер морфологии поверхности значительно меняется. При толщинах 300 и 600 мкм покрытия висмута лишены дендритов (рис. 3, *b, c*). СЭМ-изображения поверхности представляют собой совокупность крупномасштабной составляющей с овальными образованиями размерами от 80 до 120 мкм и мелкозернистой составляющей с кристаллитами размерами от 4 до 12 мкм. В работе [20] при изучении висмутовых покрытий, осажденных на медные подложки из электролита, содержащего $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ и HNO_3 , также при толщинах более 100 мкм наблюдалось прекращение дендритного роста кристаллитов в покрытиях.

Изучение морфологии поверхности образцов, осажденных из перхлоратного электролита, содержащего и не содержащего органические добавки, методом СЭМ показало, что без добавок формируются крупнокристаллические пленки с размером зерен в десятки микрон (рис. 3, *a*). При введении в электролит таких добавок, как резорцин, крезол, желатин и синтанол, наблюдается заметное уменьшение размера кристаллитов, что в ряде случаев сопровождается повышением пластичности осажденного покрытия. Особенно сильно размер кристаллитов уменьшается до $2 \div 6$ мкм при комбинированном введении в электролит добавок; эффективны следующие ком-

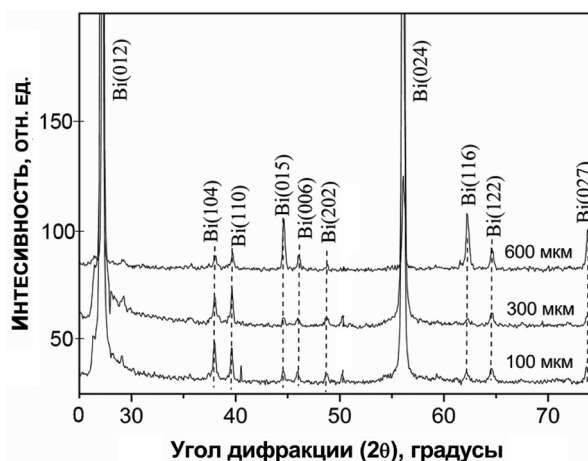


Рис. 2. Спектры рентгеновской дифракции покрытий висмута толщиной 100, 300 и 600 мкм

Fig. 2. X-ray diffraction spectra of bismuth coatings with a thickness of 100, 300 and 600 μm

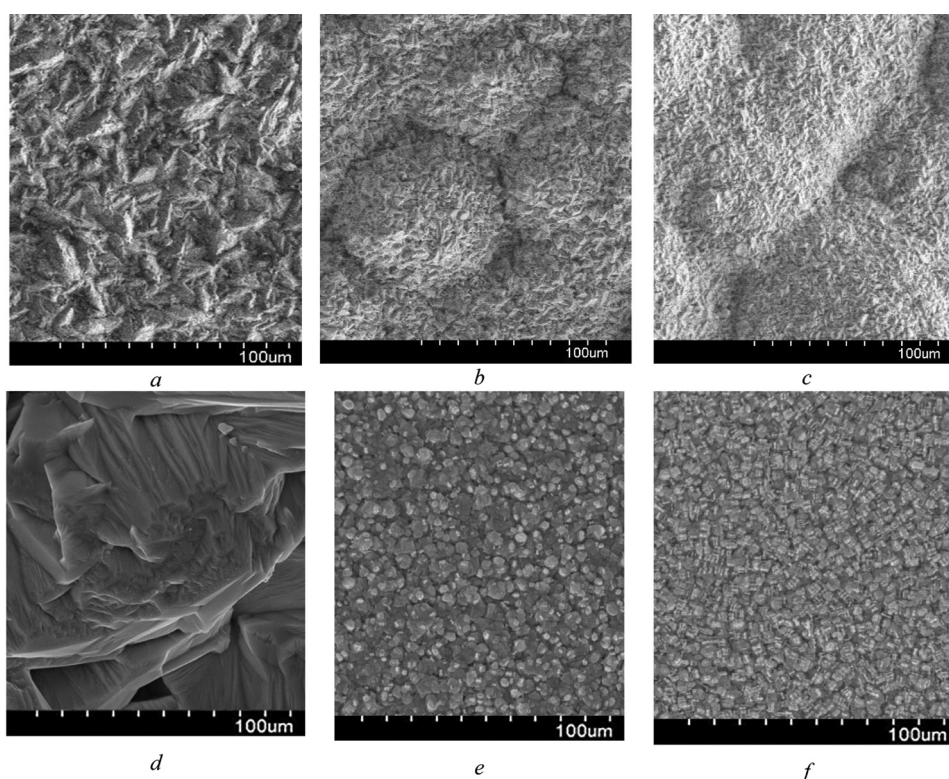


Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности образцов с покрытиями висмута толщиной 100 мкм (*a*), 300 мкм (*b*) и 600 мкм (*c*), полученные из перхлоратного электролита без добавок и с добавками различной природы (толщина 100 мкм): добавка RV(*d*), желатин + резорцин (*e*), желатин + крезол (*f*)

Fig. 3. SEM-images of surface of samples with thickness of bismuth coatings 100 μm (*a*), 300 μm (*b*) and 600 μm (*c*), which were obtained from perchlorate electrolyte without additives and with various additives (bismuth thickness 100 μm): RV additive (*d*), gelatin + resorcinol (*e*), gelatin + cresol (*f*)

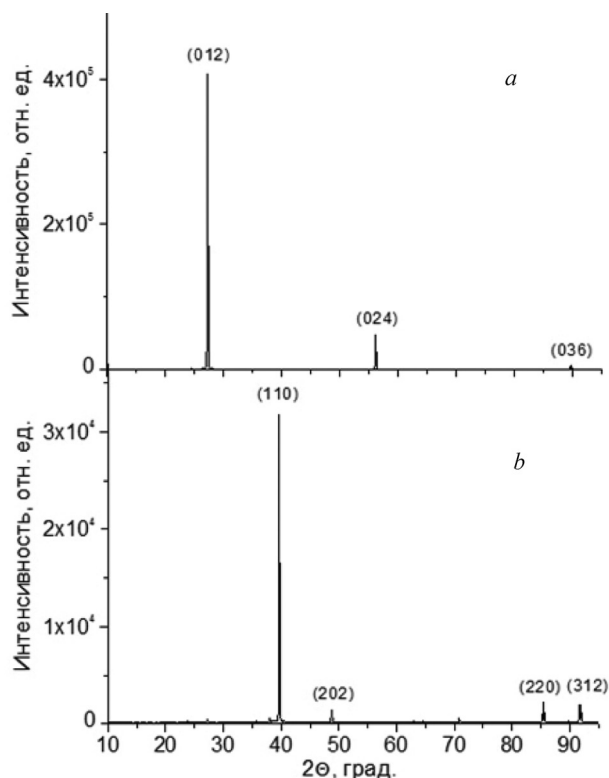


Рис. 4. Рентгенограммы висмутовых покрытий, осажденных из электролита без добавок (а) и с добавкой RV (5 г/л) (b)
 Fig. 4. XRD patterns of bismuth coatings, deposited from the electrolyte without additives (a) and with the RV additive (5 g/l) (b)

ник. Захват носителей заряда в объеме SiO_2 и на уровне поверхностных состояний вызывает сдвиг пороговых напряжений, а увеличение плотности поверхностных состояний приводит к дополнительному рассеянию подвижных носителей заряда и уменьшению крутизны сток-затворной ВАХ МОПТ [17–19]. Рост токов утечки р-МОПТ с увеличением флюенса обусловлен соответствующим ростом токов утечки защитных диодов на входе и выходе микросхем.

На рис. 5, а представлена зависимость сдвига порогового напряжения ΔU (по абсолютной величине) от флюенса электронного облучения незащищенной экраном тестовой структуры. Из полученных результатов был определен флюенс электронов, при котором наступает параметрический отказ незащищенного экраном р-МОПТ. Фиксируемому значению параметрического отказа $\Delta U = 0,05$ В соответствует флюенс электронов порядка $\Phi_0 = 2,3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$.

На рис. 5, b показаны зависимости сдвига порогового напряжения при облучении электронами р-МОПТ, защищенных экранами на основе висмута. Для всех защищенных экранами МОПТ наблюдается рост ΔU во всем исследуемом диапазоне флюенсов электронного облучения. Однако при одних и тех же значениях флюенса электронов изменения порогового напряжения существенно меньше для защищенных образцов по сравнению с незащищенными. При этом данный эффект усиливается с увеличением толщины висмутового экрана. Из результатов, представленных на рисунке 5, b, следует, что все используемые экраны обладают достаточно высокими значениями коэффициентов ослабления. Оценим из соотношения (2) величину K_3 для тестовых структур при условии параметрического отказа при $\Delta U = 0,05$ В. Результаты расчетов значений K_3 образцов экранов № 7–12 на основе висмута в зависимости от приведенной толщины приведены в таблице.

бинации: синтанол + резорцин, желатин + крезол, желатин + резорцин (рис. 3, e, f).

В присутствии некоторых органических добавок, таких как RV, акридиновый желтый, при осаждении формируются крупнокристаллические покрытия висмута, содержащие совокупность вытянутых зерен со сложной формой и резкими гранями (рис. 3, d).

При этом текстура роста покрытий висмута изменяется с ориентации $\langle 012 \rangle$ на ориентацию $\langle 110 \rangle$ (рис. 4). Характерно, что такое изменение текстуры наблюдается только для покрытий, полученных с применением добавки RV в достаточно узком диапазоне плотностей тока от 1,5 до 2,0 А/дм².

Радиационно-защитные свойства покрытий висмута. Общим в изменении сток-затворных характеристик ВАХ тестовых структур р-МОПТ при облучении электронами является сдвиг в сторону отрицательных значений напряжения с ростом дозы облучения. Наблюдается также несколько нехарактерный для р-МОПТ рост токов утечки с увеличением флюенса. Изменения характеристик транзисторов связаны с захватом свободных носителей заряда на глубокие центры в объеме диэлектрика с образованием поверхностных состояний на границах раздела диэлектрик–полупроводник.

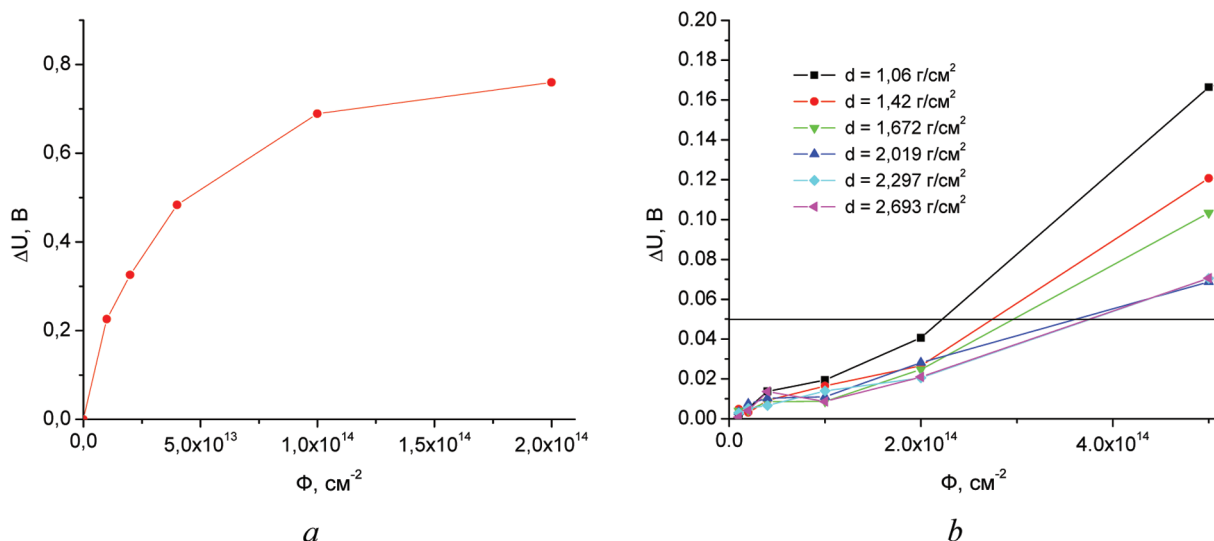


Рис. 5. Изменение порогового напряжения ΔU для p-МОПТ при облучении электронами микросхемы, не защищенной экраном (a) и защищенной экранами на основе висмута с различной приведенной толщиной (b)

Fig. 5. p-MOS transistor threshold voltage changing ΔU under electron irradiation of a chip without shield (a) and with shield based on bismuth with different reduced thickness (b)

Флюенс электронов, соответствующий параметрическому отказу ($\Delta U = 0,05$ В) тестовой приборной структуры, и значения коэффициента эффективности экранирования K_3 образцов экранов на основе висмута с различной приведенной толщиной

Electron fluence corresponding to the parametric failure ($\Delta U = 0.05$ V) of the test device structure, and the shielding efficiency coefficient K_3 of the bismuth-based shields with different reduced thickness

Номер экрана	Приведенная толщина экрана, г/см ²	Значение Φ , см ⁻²	$K_3 = \Phi/\Phi_0$
7	1,1	$2,2 \cdot 10^{14}$	95
8	1,4	$2,7 \cdot 10^{14}$	117
9	1,7	$3,0 \cdot 10^{14}$	130
10	2,0	$3,6 \cdot 10^{14}$	156
11	2,3	$3,8 \cdot 10^{14}$	162
12	2,7	$3,8 \cdot 10^{14}$	165

Как видно из данных таблицы, значения K_3 увеличиваются с ростом приведенной толщины экранов. При этом увеличение толщины висмута до значений $d_{пр} = 2,0$ г/см² значительно сильнее отражается на изменении K_3 , чем при $d_{пр} > 2,0$ г/см². В целом зависимости $K_3(d_{пр})$ можно аппроксимировать полиномом второй степени:

$$K_3 = A + B_1 d_{пр} + B_2 d_{пр}^2, \tag{3}$$

где $A = -28,046$; $B_1 = 137,15884$; $B_2 = -23,9592$.

Анализ полученных результатов показывает, что уже при приведенной толщине экрана $d_{пр} = 1,7$ г/см² достигается ослабление накопленной образцом дозы в 130 раз. Чрезмерное наращивание толщины висмута не дает явного выигрыша в радиационно-защитных свойствах экранов. Можно заключить, что оптимальными для защиты от электронов с точки зрения массогабаритных параметров являются экраны с толщинами висмута порядка $1,7 \div 2,0$ г/см².

Наблюдаемый в эксперименте характер зависимостей $K_3(d_{пр})$ обусловлен взаимодействием электронов и тормозного излучения с веществом. При увеличении толщины экранов в диапазоне значений $d_{пр} \leq 2,0$ г/см² эффективно снижает вклад электронной составляющей в поглощенную

дозу защищаемого образца, что и наблюдается в эксперименте (см. рис. 5, *b* и таблицу). При значениях $d_{\text{пр}} \approx 2,0 \text{ г/см}^2$ все электроны рассеиваются материалом экрана. В этом случае и при $d_{\text{пр}} > 2,0 \text{ г/см}^2$ вклад в поглощенную дозу вносят вторичные виды излучений, преобладающим из которых является тормозное излучение. Последнее обладает высокой проникающей способностью, и защита от него изделий электронной техники с помощью экранов локальной защиты становится малоэффективной. Поэтому при достижении определенных значений приведенной толщины экранов ($d_{\text{пр}} \approx 2 \text{ г/см}^2$) и дальнейшем ее росте ход зависимостей $\Delta U = \Delta U(\Phi)$ для $d_{\text{пр}} = 2,0; 2,3$ и $2,7 \text{ г/см}^2$ практически совпадает (см. рис. 5, *b*) и значения K_3 незначительно отличаются друг от друга (см. таблицу).

Заключение. Исследования условий электрохимического осаждения и структуры покрытий висмута показали следующее:

структура покрытий висмута имеет ромбоэдрический тип кристаллической решетки, с ростом толщины от 100 до 600 мкм, микроструктура изменяется от дендритной, крупнокристаллической с размерами зерен от 10 до 30 мкм, к мелкодисперсной с размерами зерен от 4 до 12 мкм; введение в перхлоратный электролит органических добавок – RV, акридинового желтого – приводит к изменению текстуры с ориентации $\langle 012 \rangle$ на ориентацию $\langle 110 \rangle$;

введение в перхлоратный электролит органических добавок – резорцина, крезола, желатина и синтанола – способствует измельчению микроструктуры, размер зерен составляет от 2 до 6 мкм, что сопровождается повышением пластичности покрытий.

Исследования радиационно-защитных свойств экранов на основе висмута при облучении тестовых структур р-канальных МОПТ (элементов КМОП ИМС) электронами с энергией 1,6–1,8 МэВ и экспозиционными дозами до $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ показали, что с ростом значений приведенной толщины $d_{\text{пр}}$ от 1,1 до $2,7 \text{ г/см}^2$ величина коэффициента эффективности экранирования K_3 возрастает от 95 до 165. Зависимость K_3 от $d_{\text{пр}}$ можно описать полиномом второй степени. Оптимальными, с точки зрения массогабаритных параметров, являются значения $d_{\text{пр}}$ порядка $1,7 \div 2,0 \text{ г/см}^2$. Увеличение приведенной толщины экранов более 2 г/см^2 не ведет к существенному росту K_3 , что обусловлено преимущественным вкладом в поглощенную дозу защищаемых образцов тормозного излучения.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Наноматериалы и нанотехнологии», задание 2.34, а также Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т17М-046).

Acknowledgements

The work was carried out with financial support of State Program of Scientific Research “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” Subprogram “Nanomaterials and Nanotechnologies”, task 2.34 and Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Grant No. T17M-046).

Список использованных источников

1. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation / J. P. Spratt [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Vol. 44, iss. 6. – P. 2018–2025.
2. Ефремов, Г. А. Новые материалы для локальной радиационной защиты / Г. А. Ефремов // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 33–37.
3. RAD-COAT protection [Electronic resource] / Space Electronics. – Mode of access: www.spaceelectronics.com. – Date of access: 20.03.2017.
4. RAD-PAK protection [Electronic resource] / Maxwell Technologies, INC. – Mode of access: www.maxwell.com/products/microelectronics. – Date of access: 20.03.2017.
5. Борц, Б. В. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал / Б. В. Борц, И. Г. Марченко, П. Н. Бездверный // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – № 4. – С. 175–177.
6. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
7. Nikiforov, A. Y. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts / A. Y. Nikiforov, A. I. Chumakov // Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Dordrecht: Springer, 2004. – Vol. 176. – P. 165–184.

8. Gamma radiation shielding and optical properties measurement of zinc bismuth borate glasses / P. Yasaka [et al.] // *Annals of Nuclear Energy*. – 2014. – Vol. 68. – P. 4–9.
9. Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding / Huda Ahmed Maghrabi [et al.] // *Textile Res. J.* – 2015. – Vol. 86, iss. 6. – P. 649–658.
10. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments / J. P. McCaffrey [et al.] // *Med. Phys.* – 2007. – Vol. 34, N 2. – P. 530–537.
11. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses / H. Schlattl [et. al.] // *Med. Phys.* – 2007. – Vol. 34, N 11. – P. 4270–4280.
12. McCaffrey, J. P. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers / J. P. McCaffrey, E. Mainegra-Hing, H. Shen // *Med. Phys.* – 2009. – Vol. 36, N 12. – P. 5586–5594.
13. Гальванотехника : справочник / под ред. А. М. Гинберга [и др.]. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.
14. Особенности оценки радиационной стойкости микросхем в специализированных защитных корпусах / А. В. Уланова [и др.] // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС-2012) : сб. тр. / под общ. ред. А. Л. Стемповского. – М.: ИПИМ РАН, 2012. – С. 584–587.
15. Математическое моделирование свойств неоднородных структур для систем радиационной защиты / Н. П. Чирская [и др.] // Тр. 21-й Междунар. конф. «Радиационная физика твердого тела». – Севастополь, 2011. – С. 436–443.
16. Дозиметрический контроль на борту космических аппаратов с помощью МДП-дозиметров / О. В. Мещуров [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. – 2002. – Вып. 4. – С. 34–38.
17. August, L. S. Estimating and reducing errors in MOS dosimeters caused by exposure to different radiations / L. S. August // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 1982. – Vol. 29, N 6. – P. 2000–2003.
18. Пономарев, В. Н. Измерение спектра быстрых электронов с использованием МОП транзисторов / В. Н. Пономарев, В. Д. Попов, Е. А. Яшков // Научная сессия МИФИ-2005 : сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2005. – Т. 1. – С. 87–88.
19. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
20. Electrodeposition of bismuth from nitric acid electrolyte / E. Sandnes [et. al.] // *Electrochimica Acta*. – 2007. – Vol. 52, N 21. – P. 6221–6228.

References

1. Spratt J. P., Passenheim B.C., Leadon R. E., Clark S., Strobel D. J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, iss. 6, pp. 2018–2025. Doi: 10.1109/23.658984
2. Efremov G. A. The new materials for the local radiation protection. *Fizika i khimiia obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2003, no. 1, pp. 33–37 (in Russian).
3. RAD-COAT protection. Available at: <http://www.spaceelectronics.com> (accessed 20.03.2017).
4. RAD-PAK protection. Available at: <http://www.maxwell.com/products/microelectronics> (accessed 20.03.2017).
5. Borc B. V., Marchenko I. G., Bezverniy P. N. Simulation of electron transport through the stratified composit material. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie = Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of Radiation Effects and Radiation Materials Science*, 2009, no. 94, pp. 175–177 (in Russian).
6. Pershenkov V. S. *Surface radiation effects in the integrated microcircuits elements*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 256 p. (in Russian).
7. Nikiforov A.Y., Chumakov A. I. Simulation of Space Radiation Effects in Microelectronic Parts. Daglis I. A. (ed.). *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure. NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. Vol. 176*. Springer, Dordrecht, 2004, pp. 165–184. Doi: 10.1007/1-4020-2754-0_9
8. Yasaka P., Pattanaboonmee N., Kim H. J., Limkitjaroenporn P., Kaewkhao J. Gamma radiation shielding and optical properties measurement of zinc bismuth borate glasses. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, vol. 68, pp. 4–9. Doi: 10.1016/j.anucene.2013.12.015
9. Huda Ahmed Maghrabi, Arun Vijayan, Pradip Deb, Lijing Wang. Bismuth oxide-coated fabrics for X-ray shielding. *Textile Research Journal*, 2015, vol. 86, iss. 6, pp. 649–658. Doi: 10.1177/0040517515592809
10. McCaffrey J. P., Shen H., Downton B., Mainegra-Hing E. Radiation attenuation by lead and nonlead materials used in radiation shielding garments. *Medical Physics*, 2007, vol. 34, no. 2, pp. 530–537. Doi: 10.1118/1.2426404
11. Schlattl H., Zankl M., Eder H., Hoeschen C. Shielding properties of lead-free protective clothing and their impact on radiation doses. *Medical Physics*, 2007, vol. 34, no. 11, pp. 4270–4280. Doi: 10.1118/1.2786861
12. McCaffrey J. P., Mainegra-Hing E., Shen H. Optimizing non-Pb radiation shielding materials using bilayers. *Medical Physics*, 2009, vol. 36, no. 12, pp. 5586–5594. Doi: 10.1118/1.3260839
13. Ginberg A. M. *Galvanotechnics*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987. 736 p. (in Russian).
14. Ulanova A. V., Sogoian A. V., Chumakov A. I., Nikiforov A. Iu., Petrov A. G. Features of the evaluation of the radiation resistance of microcircuits in specialized protective enclosures. *Problemi razrabotki perspektivnih micro-*

i nanoelectronic system (MES-2012) [Problems of development of perspective micro- and nanoelectronic systems (MES-2012)]. Moscow, Institute for Design Problems in Microelectronics of Russian Academy of Sciences, 2012, pp. 584–587 (in Russian).

15. Chirskaya N. P., Voronin E. N., Mileev V. N., Novikov L. S., Sinolic V. V. Mathematical modeling of heterogeneous structures properties for radiation protection systems. *Trudy 21 Mezhdunarodnoy konferencii "Radiacionnaya fizika tverdogo tela"* [Proceedings of 21st International Conference "Radiation Solid State Physics"], Sevastopol', 2011, pp. 436–443 (in Russian).

16. Meshurov O. V., Tapero K. I., Emel'yanov V. V., Ulimov V. N. The onboard dosimetric control of space apparatus by using MOS-dosimeters. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya: Fizika radiatsionnogo vozdeistviia na radioelektronnuu apparaturu = Problems of Atomic Science and Technology. Series: Physics of radiation effects on radio-electronic equipment*, 2002, iss. 4, pp. 34–38 (in Russian).

17. August L. S. Estimating and Reducing Errors in MOS Dosimeters Caused by Exposure to Different Radiations. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1982, vol. 29, iss. 6, pp. 2000–2003. Doi: 10.1109/TNS.1982.4336486

18. Ponomarev V. N., Popov V. D., Yashkov E. A. The spectrum of fast electrons measurement by using MOS transistors. *Naychnaya sessiya MIFI: sbornik nauchnykh trudov. T. I* [Scientific Session MEPhi-2005. Collection of scientific papers. Vol. 1]. Moscow, Moscow Engineering Physics Institute, 2005, pp. 87–88 (in Russian).

19. Korshunov F. P., Bogaturev U. V., Vavilov V. A. *The radiation influence on integrated circuits*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1986. 254 p. (in Russian).

20. Sandnes E., Williams M. E., Bertocci U., Vaudin M. D., Stafford G. R. Electrodeposition of bismuth from nitric acid electrolyte. *Electrochimica Acta*, 2007, no. 52, no. 21, pp. 6221–6228. Doi: 10.1016/j.electacta.2007.04.002

Информация об авторах

Тишкевич Дарья Ивановна – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@physics.by

Грабчиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Цыбульская Людмила Сергеевна – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tsybul@bsu.by

Шендюков Владислав Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: shendi@mail.ru

Information about the authors

Daria I. Tishkevich – Junior Researcher at Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Yrii V. Bogatyrev – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher at Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@physics.by

Sergey S. Grabchikov – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher at Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Stanislav B. Lastovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head at Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Ludmila S. Tsybul'skaya – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher at Thin Films Chemistry Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tsybul@bsu.by

Vladislav S. Shendukov – Junior Researcher at Thin Films Chemistry Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: shendi@mail.ru

Sergey S. Perevoznikov – Researcher at Thin Films Chemistry Laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: perevoznikov@bsu.by

Перевозников Сергей Сергеевич – научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: perevoznikov@bsu.by

Позняк Сергей Кондратьевич – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории химии тонких пленок, Научно-исследовательский институт физико-химических проблем Белорусского государственного университета (ул. Ленинградская 14, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: poznyak@bsu.by

Труханов Алексей Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: truhanov86@mail.ru

Sergey K. Poznyak – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher at Thin Films Chemistry laboratory, Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University (14, Leningradskaya Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: poznyak@bsu.by

Aleksei V. Truhanov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at Physics of Magnetic Films laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: truhanov86@mail.ru