

Роман К. Можаяев¹, Александр А. Печенкин², Арсений А. Балуюев³,
Олег Б. Маврицкий⁴, Андрей Н. Егоров⁵

¹⁻⁵Акционерное общество «Экспериментальное научно-производственное объединение
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ»,

Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия,

¹⁻⁵Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
Каширское ш., 31, Москва, 115409, Россия,

¹e-mail: rkmozh@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4769-7365>

²e-mail: aapech@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8215-6196>

³e-mail: aabal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4025-8247>

⁴e-mail: obmavr@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8606-6235>

⁵e-mail: egorov@pico.mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6750-3938>

ОБЗОР ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09>

Аннотация. Развитие высокотехнологичных отраслей современной промышленности и повсеместное использование изделий микроэлектроники предъявляют повышенные требования к качеству и надежности микросхем. Одним из наиболее эффективных методов повышения надежности электронных систем является применение набора методологий, включая диагностический неразрушающий контроль (НК) и выборочное разрушающее тестирование в особых случаях. Исследования с использованием визуального осмотра и электрических испытаний, состоящие из функционального и параметрического контроля, не дают достаточно информации для выявления скрытых дефектов (например, макродефектов в слоях SiO₂ в КМОП микросхемах) и выявления подделок. Поддельная интегральная схема (ИС) может содержать не декларированные функции, называемые аппаратными закладками. Распространенными инструментами исследования структуры ИС являются системы на основе микрофокусных рентгеновских источников излучения (ИИ), сканирующих акустических микроскопов, оптических и растровых электронных микроскопов, рентгенофлуоресцентных спектроскопов. Необходимость отсутствия разрушения изделия является принципиальным моментом, например, для контроля технологического процесса на кристалльном производстве, где для оценки глубины легирования прибегают к разрушению дорогостоящих пластин. Исследование ИС с помощью светового микроскопа – один из наиболее доступных и распространенных методов НК микросхем. Сканирование структуры со стороны приборного слоя микросхем ограничено экранирующим действием металлизации, поскольку металл непрозрачен для света. Но данное ограничение преодолевается проведением исследований ИС со стороны подложки кристалла с помощью лазерных источников в ближнем ИК диапазоне. В данной работе приведен обзор основных методов, используемых в лазерной сканирующей микроскопии для анализа структур, откликов и особенностей режимов работ полупроводниковых схем. Описаны основные преимущества и ограничения в использовании оптических методов, а также какую информацию об изделии можно получить в результате лазерного сканирования.

Ключевые слова: лазерная сканирующая микроскопия, ИК-излучение, фемтосекундное излучение, анализ отказов, визуализация полупроводниковых структур.

Для цитирования: МОЖАЕВ, Роман К. и др. ОБЗОР ЛАЗЕРНЫХ СКАНИРУЮЩИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР. Безопасность информационных технологий, [S.l.], т. 29, № 4, с. 105–125, 2022. ISSN 2074-7136. URL: <http://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1458>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09>.

Roman K. Mozhaev¹, Alexander A. Pechenkin², Arseniy A. Baluev³,
Oleg B. Mavritskii⁴, Andrey N. Egorov⁵

¹⁻⁵Joint Stock Company “Experimental Research and Production Association
SPECIAL ELECTRONIC SYSTEMS”,

Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia

¹⁻⁵National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute),
Kashirskoe shosse, 31, Moscow, 115409, Russia,

¹e-mail: rkmzh@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4769-7365>

²e-mail: aapech@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8215-6196>

³e-mail: aabal@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4025-8247>

⁴e-mail: obmavr@spels.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8606-6235>

⁵e-mail: egorov@pico.mephi.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6750-3938>

Review of laser scanning methods for microelectronic semiconductor structures investigation

DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09>

Abstract. The development and widespread of high-tech microelectronic products impose increased requirements on the quality and reliability of microcircuits. The most effective methods for reliability improvement of electronic systems include diagnostic non-destructive testing (NDT) methods and selective destructive testing in special cases. Studies using visual inspection and electrical testing, consisting of functional and parametric testing, do not provide enough information to detect latent defects (for example, macro-defects in SiO₂ layers in CMOS chips) and to detect fakes and counterfeits. A fake integrated circuit (IC) may contain an undeclared malicious modification of the circuit, called hardware bugs. The common ICs studying tools are systems based on microfocus X-ray sources, scanning acoustic microscopes, optical and scanning electron microscopes, and X-ray fluorescence spectroscopes. Products destruction avoidance is a fundamental point, for example, for the technological process control in crystal manufacturing. Investigation of ICs using a light microscope is one of the most accessible and widespread method of microchip NDT. Semiconductor ICs structure scanning from the side of the device layer is limited by the shielding effect of metallization, since the metal is opaque for light. This limitation can be overcome by an alternative approach to microchip scanning based on irradiating the IC from the side of the substrate with laser sources in the near-IR range. This paper provides a brief overview of the major methods used in laser scanning microscopy to analyze the structures, responses, and features of the operating modes of semiconductor circuits. The main advantages and limitations in the use of optical methods are described, as well as what information about the product can be obtained as a result of laser scanning.

Keywords: laser scanning microscopy, infrared radiation, femtosecond laser pulses, failure analysis, semiconductor structure visualization.

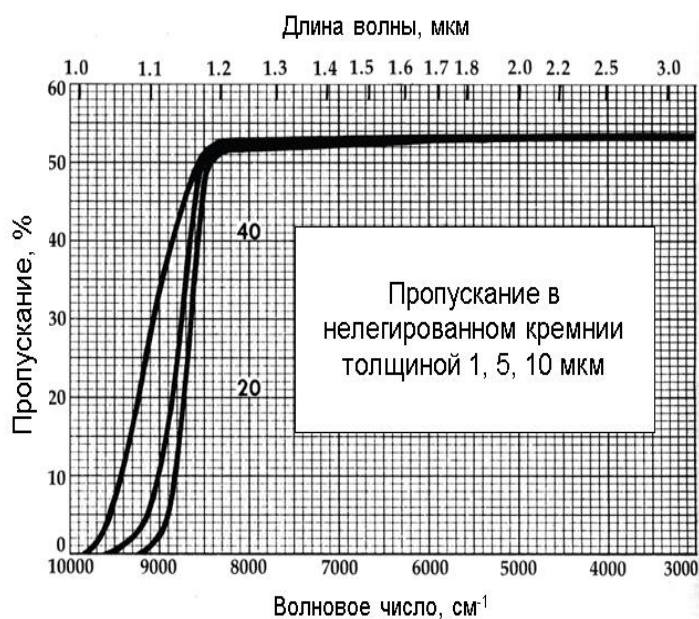
For citation: MOZHAEV, Roman K. et al. Review of laser scanning methods for microelectronic semiconductor structures investigation. *IT Security (Russia)*, [S.l.], v. 29, no. 4, p. 105–125, 2022. ISSN 2074-7136. URL: <https://bit.spels.ru/index.php/bit/article/view/1458>. DOI: <http://dx.doi.org/10.26583/bit.2022.4.09>.

Введение

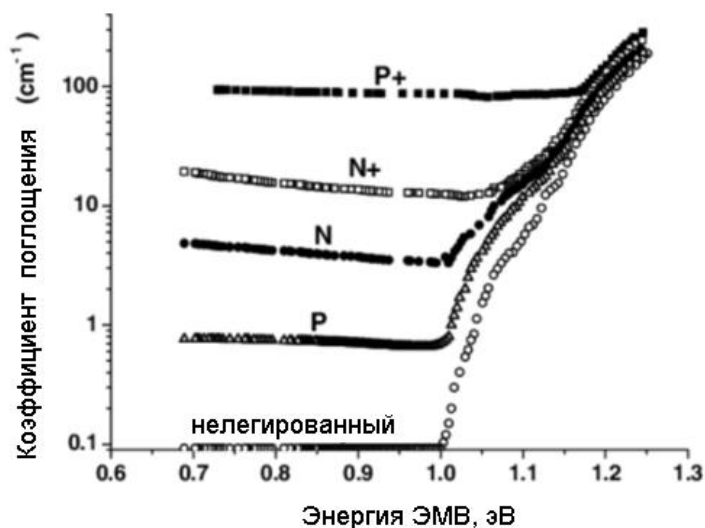
Существуют различные методы анализа микроэлектронных полупроводниковых структур [1–4]. Для анализа могут использоваться акустические волны, сфокусированный ионный или электронный пучок, фотоэмиссия исследуемого объекта, ИК-микроскопия и, в частности, ИК-микроскопия с использованием источников лазерного излучения. Возможность применения оптических методов для современных ИС основана на прозрачности кремния для ИК-излучения (рис. 1), что позволяет проводить исследования кремниевых изделий и пластин со стороны подложки [5, 6].

В зависимости от длины волны воздействующего лазерного излучения по физике эффектов, проявляющихся в полупроводнике, воздействия и основанные на них методы исследований можно разделить на две глобальные разновидности:

- методы на основе локального нагрева при воздействии лазерного излучения с длиной волны 1,3 мкм и более (вероятность генерации электронно-дырочных пар мала, а поглощение происходит с преобразованием света в тепло);
- методы на основе фотоэлектрического эффекта (как правило используется излучение с длиной волны 1,064 мкм).



a)



b)

Рис. 1. Оптическая прозрачность нелегированного кремния в ближнем ИК диапазоне (a), коэффициент поглощения в Si с различными типами легирования (b) [5, 6]
Fig. 1. Optical transparency of undoped silicon in the near-IR range (a), absorption coefficient in Si with various types of doping (b) [5, 6]

В некоторых случаях используются одновременно разные длины волн (рис. 2) для получения дифференцированного сигнала. По соотношению оптических сигналов можно определить свойства материала исследуемой области.

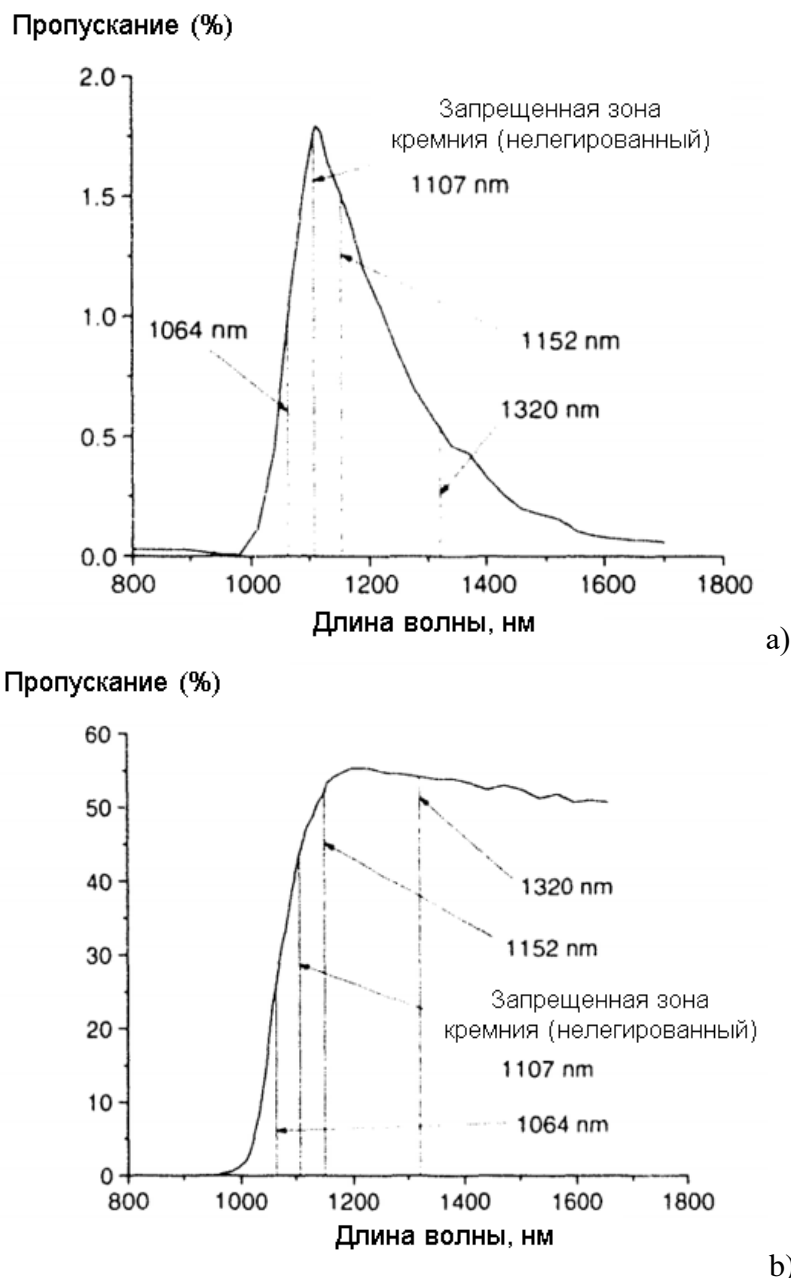


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения кремния от длины волны при различных уровнях легирования: P+ кремний (а), P- кремний (б) [7, 8]

Fig. 2. The dependence of the absorption coefficient of silicon on the wavelength at different doping levels: P+ silicon (a), P- silicon (b) [7, 8]

1. Методы лазерной сканирующей ИК-микроскопии

В зарубежной литературе помимо термина «Laser Scanning Microscopy» (лазерная сканирующая микроскопия – LSM) встречается термин «Laser Signal Injection Microscopy» (микроскопия с лазерным наведением сигнала – LSIM). Первый термин в большей мере определяет техническую часть исследовательской установки, второй термин описывает

действие установки на исследуемый объект, приводящее к определенному изменению его свойств. В особенностях воздействия и разновидностях регистрируемых вследствие воздействия сигналов состоят различия в существующих методах лазерной сканирующей микроскопии.

Базовый сканирующий микроскоп должен включать в себя лазерный источник, создающий сфокусированное световое пятно микронных размеров, которым сканируется исследуемый образец. В ходе сканирования проводится наблюдение и регистрация определенных свойств, изменений и эффектов исследуемой полупроводниковой структуре. Это свойство (или набор свойств) используется для создания «карты эффектов» по мере сканирования пятна [9]. Сканирование может быть достигнуто путем перемещения образца или светового пятна. Результатом сканирования является двумерная (в ряде случаев трехмерная) карта исследуемого объекта с установленными областями проявления данных эффектов [10, 11].

В табл. 1 представлены основные методы лазерного сканирующего анализа полупроводниковых структур с использованием двух типовых длин волн. Подробнее методы разобраны в последующих разделах.

Таблица 1. Основные лазерные сканирующие методы

λ , мкм	Физический эффект	Метод	Принцип метода
1,064	Образование электрон-дырочных пар ($E > E_g$)	OBIC	Измерение тока, образованного при лазерном воздействии
		TOBIC	Измерение тока, образованного при лазерном воздействии (двухфотонный метод)
		LIVA	Измерение изменения напряжения при лазерном воздействии
1,34	Локальный микро-нагрев ($E < E_g$)	TIVA	Измерение изменения напряжения при термическом лазерном воздействии
		OBIRCH	Измерение изменения сопротивления при термическом лазерном воздействии
		SEI	Визуализация эффектом Зеебека
1,064 + 1,34	Образование электрон-дырочных пар (λ_1), локальный микро-нагрев (λ_2)	CIM	Визуализация по спектру отраженного оптического сигнала
		PEM	Фотоэмиссия при лазерном воздействии

2. Метод индукции тока оптический лучом (Optical Beam Induced Current-OBIC)

Если энергия фотона падающего света больше ширины запрещенной зоны полупроводника, то при проникновении светового излучения в объем полупроводника образуют электрон-дырочные пары. Эта энергия составляет порядка 1,1 эВ для кремния. Пары обычно рекомбинируют случайным образом. Однако, если происходит образование пар вблизи области пространственного заряда (ОПЗ), до рекомбинации носители разделены потенциалом перехода и возникает ток [12]. Такой ток, образующийся в интегральной схеме или полупроводниковом образце можно контролировать и визуализировать по мере сканирования кристалла (рис. 3).

На рис. 4 показано расположение диффузионных областей на образце, выполненном по КМОП-технологии, при наблюдении за сигналом OBIC через линии V_{DD} и V_{SS} [13, 14].

Методом ОВІС регистрируются мгновенные токи смещения для визуализации и является действенным подходом в анализе отказов.

Во время оптического сканирования физического повреждения объекта не происходит. Если во время ОВІС-сканирования исследуется изделие в активном электрическом режиме, то воздействие может инициировать тиристорный эффект или «Snapback» [16–19]. Ущерб от данных эффектов можно избежать путем ограничения тока потребления и аппаратно-программными методами парирования данных эффектов.

Типовыми областями применения описанного метода является: локализация скрытых (захороненных) диффузионных слоев, выявление дефектных/поврежденных р-п переходов, поиск коротких замыканий в слое подзатворного диэлектрика (после предварительного удаления вышележащих слоев) и других областей с локальными изменениями уровня Ферми.

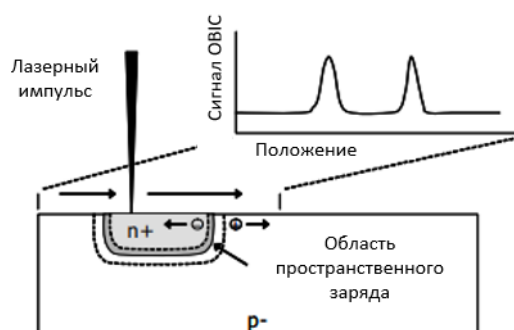


Рис. 3. Принцип создания электрического сигнала в полупроводнике методом ОВІС [10]
Fig. 3. The principle of creating an electrical signal in a semiconductor using the OBIC method [10]

Сфокусированное ультракороткое импульсное лазерное излучение является достаточно удобным методом моделирования в микроэлектронных устройствах одиночных радиационных эффектов (ОРЭ), вызванных тяжелыми заряженными частицами (ТЗЧ) в реальных условиях космического пространства [23–26]. Формально, метод получения фотооткликов при сфокусированном ультракоротком лазерном воздействии является разновидностью метода ОВІС.

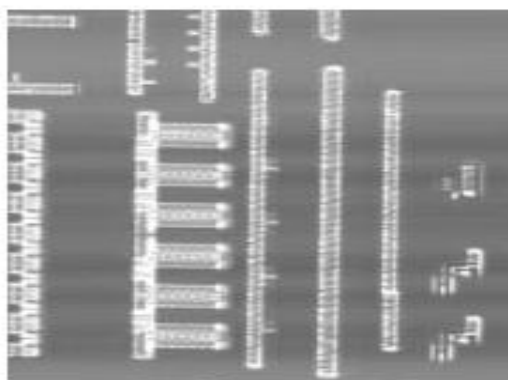


Рис. 4. ОВІС-изображение КМОП-изделия в пассивном режиме с наблюдаемым током между линиями VDD и VSS [11, 12]

Fig. 4. OBIC image of a CMOS device in passive mode with observed current between the VDD and VSS lines [11, 12]

3. Метод индукции тока оптический лучом в режиме двухфотонного поглощения (Two-photon optical beam induced current-TOBIC)

Если энергия фотона лазерного излучения меньше ширины запрещенной зоны, но превышает ее половину, то главным механизмом генерации заряда является двухфотонное поглощение (ДФП). Его вероятность нелинейно (квадратично) зависит от интенсивности лазерного излучения, что приводит к локализации неравновесного заряда вблизи фокуса лазерного луча, и тем самым дает возможность получить реальное 3D-разрешение. Поскольку однофотонное поглощение (ОФП) в данном случае отсутствует, это позволяет передавать энергию лазерного импульса через толстую полупроводниковую подложку без существенного затухания и индуцировать ток, что делает метод двухфотонного поглощения привлекательным при облучении устройства со стороны полупроводниковой подложки.

Данный механизм генерации неравновесных носителей эффективно работает только при высоких плотностях энергии лазерного излучения (несколько ГВт/см²), поэтому исследования методом TOBIC возможны только с использованием лазерных импульсов с фемтосекундной длительностью импульса.

При сканировании, используя интерполяцию, можно определить положение фокуса, соответствующее пиковому фототоку, и записать его для каждой точки изображения, чтобы построить карту глубины фокуса пикового фототока по точкам. Пример этого типа изображения представлен на рис. 5 [27] с поперечными сечениями в каждом направлении вдоль исследуемой области кристалла.

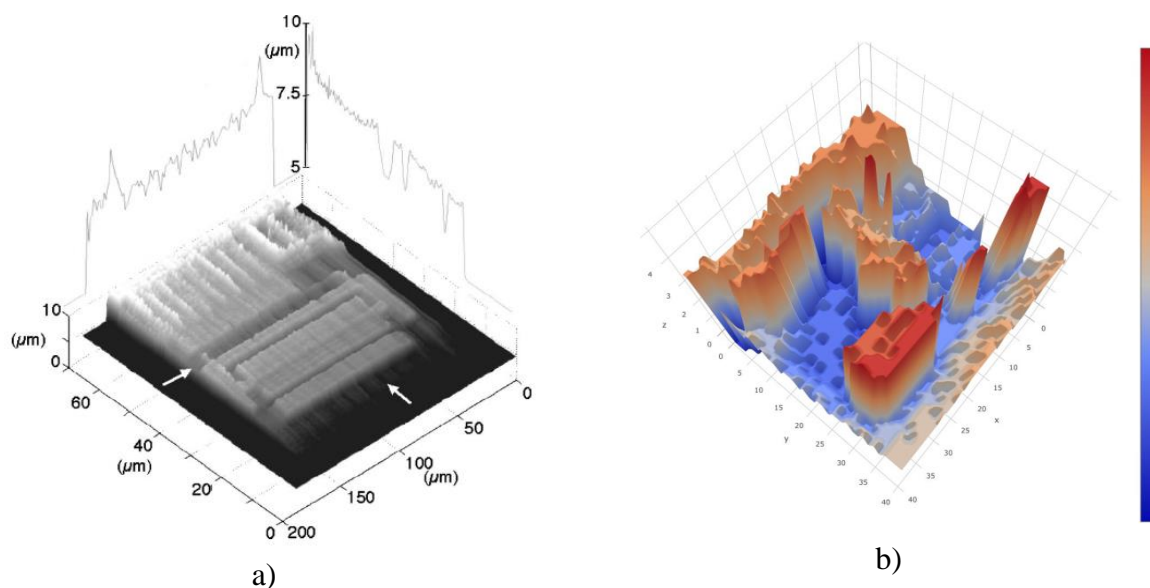


Рис. 5. Трехмерное представление глубины, соответствующей максимальному сигналу TOBIC с сечением по направлениям, указанным стрелками. Элементы, находящиеся на диаграмме расположены ближе к задней стороне кристалла (a) и построенное изображение области сканирования 10×10 мкм с шагом сканирования по осям X/Y/Z $0.25/0.25/0.5$ мкм (b) [27]
Fig. 5. Three-dimensional representation of the depth corresponding to the maximum TOBIC signal with a cross-section along the directions indicated by the arrows. The elements in the diagram are located closer to the rear side of the crystal (a) and the constructed image of the scan area is 10×10 μm with a scanning step along the X/Y/Z axes of $0.25/0.25/0.5$ μm (b) [27]

Данный метод также действенен в части исследования параметров радиационной стойкости при определении параметров чувствительности к паразитным тиристорным эффектами (ТЭ).

На рис. 6 представлены полученные карты ТЭ для двух различных энергий лазерного импульса: 2,5 нДж (белые области) и 1 нДж (черные области). Установлено, что чувствительная область ТЭ представляет собой длинную полосу шириной 3–5 мкм, поэтому можно ожидать влияния этой ширины на результаты измерений зависимостей ТЭ J_{th} от расстояния z при использовании метода локального лазерного облучения с использованием однофотонного поглощения, как это описано в [27].

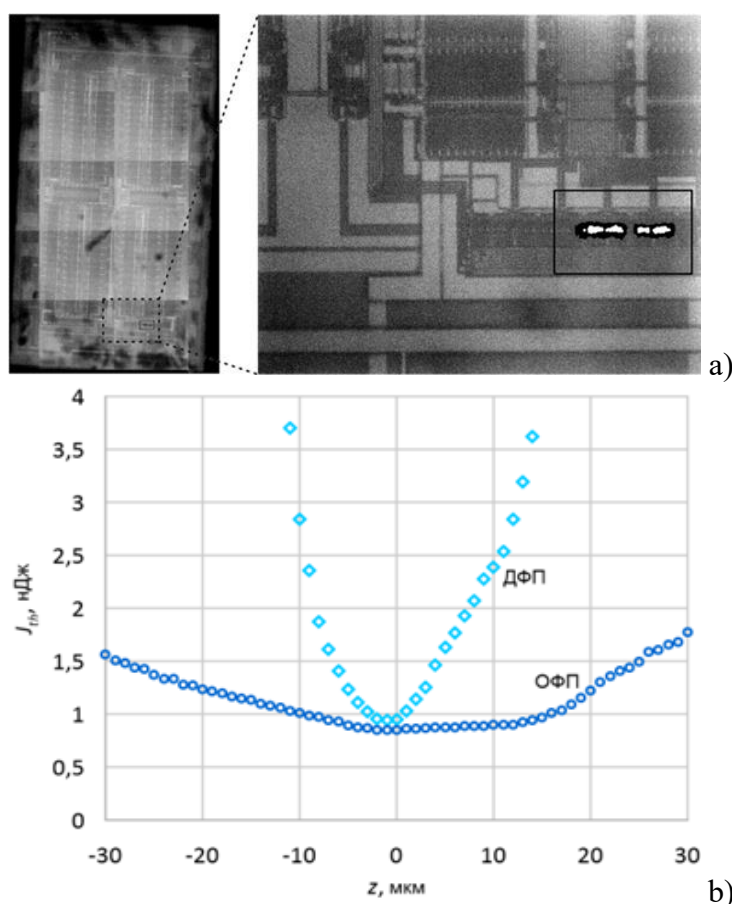


Рис. 6. Результаты детальной локализации ТЭ в области 2 (черный прямоугольник) (а).
Зависимости порога ТЭ J_{th} от расстояния до положения перетяжки z для ОФП и ДФП (б)
Fig. 6. Results of detailed localization of SEL in region 2 (black rectangle) (a).
Dependences of the SEL threshold J_{th} on the distance to the waist position Z for single-photon absorption
and two-photon absorption (b)

Таким образом, ДФП-методика (ТОВИС) позволяет получить карту ОРЭ в исследуемом микроэлектронном устройстве с микронным пространственным разрешением, а также дает возможность оценить глубину чувствительной области, что невозможно при использовании однофотонного поглощения.

4. Метод изменения напряжения оптическим лучом (Light-Induced Voltage Alteration – LIVA)

LIVA – метод сканирующей оптической микроскопии, предназначенный для исследования кристалла ИС с помощью изменения напряжения наведенным оптическим лучом, позволяет локализовать диффузии тока, связанные с дефектами ИС. Как и в ОВИС, используются электронно-дырочные пары, генерируемые фотонами, для получения функциональной информации ИС и информации о дефектах. Во время исследования на микросхему подается питание с помощью источника постоянного тока [30, 31]. Изображения LIVA создаются путем отслеживания изменений напряжения в источнике питания во время сканирования. Сдвиги напряжения происходят, когда ток рекомбинации увеличивает или уменьшает энергопотребление ИС.

Измерение методом LIVA и визуализация сдвигов напряжения по сравнению с непосредственным наблюдением фототоков имеет два преимущества. Во-первых, ИС будет действовать как собственный усилитель, генерирующий гораздо больший сигнал напряжения LIVA, чем сигнал фототока. Во-вторых, напряжения ИС намного проще измерить, чем токи, поскольку ИС может иметь ограничение по току потребления, тогда как небольшие изменения напряжения легко измерить с помощью усилителя со связью по переменному току, невосприимчивого к постоянным напряжениям.

В [20] продемонстрирован пример локализации дефекта с помощью метода LIVA на примере радиационно-стойкой версии микроконтроллера Intel 80C51. Для получения изображений использовался лазер с длиной волны 1152 нм. На изображении LIVA на рис. 7(a) показан небольшой сигнал в правом нижнем углу.

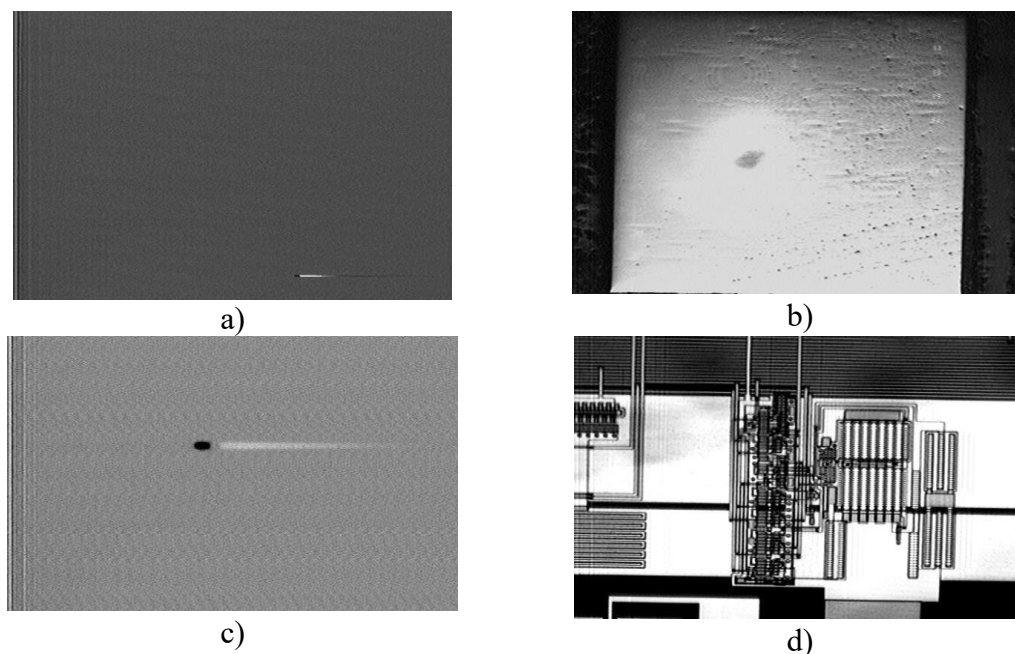


Рис. 7. Анализ дефекта микроконтроллера методом LIVA со стороны подложки:
a) область открытого контакта с кремнием; b) отраженное изображение со стороны подложки; c) увеличенное изображение дефекта; d) место дефекта, полностью закрытое шиной питания со стороны приборного слоя [20]

Fig. 7. Analysis of the microcontroller defect by the LIVA method from the side of the substrate:
a) area of open contact with silicon; b) reflected image from the side of the substrate; c) an enlarged image of the defect; d) the place of the defect, completely covered by the power bus from the side of the device layer [20]

Рис. 7(b) представляет собой изображение в отраженном свете, показывающее то же поле зрения (в этом поле зрения исследуется вся ИС). На рис. 7(c) и 7(d) представлены изображения LIVA с большим увеличением и изображением области в отраженном свете, обозначенной на рис. 7(a) и 7(b). Анализ показал, что сигнал LIVA вызван открытым контактом металла с кремнием. Стоит отметить, что открытая контактная площадка полностью закрыта силовой шиной, что не позволяет наблюдать дефект со стороны приборного слоя [20].

5. Изменение сопротивления оптическим лучом (Optical Beam Induced Resistance Change – OBIRCH), изменение напряжения тепловым воздействием (Thermally-Induced Voltage Alteration – TIVA) и визуализация эффекта Зеебека (Seebeck Effect Imaging – SEI)

Методы OBIRCH, TIVA и SEI представляют собой различные подходы сканирующей оптической микроскопии, разработанные для локализации обрывов (методом SEI) и коротких замыканий (методами OBIRCH и TIVA) на ИС, используя локальный нагрев, также известный как «термическая лазерная стимуляция» (Thermal Laser Stimulation – TLS). Высокая селективность данных подходов позволяет исследовать весь кристалл ИС на одном необработанном изображении при использовании длин волн более 1,1 мкм. Сканирование можно проводить как со стороны приборного слоя ИС, так и со стороны подложки.

A. OBIRCH

Сопротивление локального участка ИС изменяется за счет лазерного нагрева. В случае, когда участок является проводником, сопротивление будет увеличиваться, если же участок представляет собой полупроводник, сопротивление будет уменьшаться с повышением температуры. По мере того, как сопротивление локального участка изменяется, потребляемая мощность ИС изменяется, если предположить, что на локальном участке есть градиент напряжения. Метод OBIRCH позволяет анализировать такой эффект локализованного нагрева при коротких замыканиях ИС с последующими изменениями потребляемой мощности ИС.

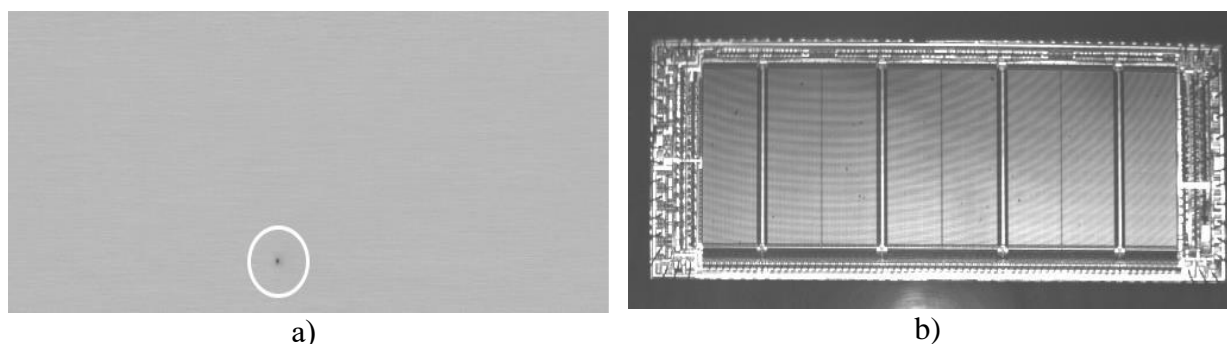
B. TIVA

В этом методе лазерный луч с длиной волны ниже ширины запрещенной зоны полупроводника служит активным зондом для сканирования и локального нагрева интегральных схем, а затем повышение температуры в ИС создает локальные изменения сопротивления. Источник постоянного тока обеспечивает смещение, что приводит к тепловому градиенту, а затем к изменению напряжения при изменении сопротивления.

Такие изменения сопротивления фиксируются при отслеживании изменений напряжения на выводах питания постоянного тока. Визуализация изменения напряжения в зависимости от положения сфокусированного лазерного луча создает TIVA-изображение и может показать дефекты короткого замыкания. Следовательно, можно обнаружить обрыв/короткое замыкание в устройстве с аномалиями тока.

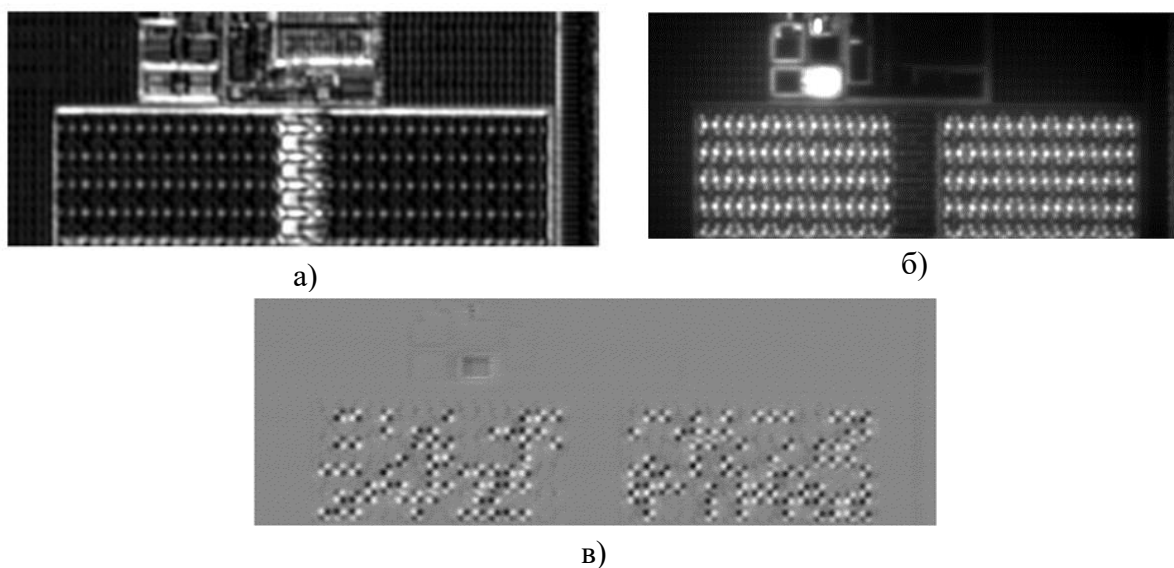
Лазерная установка для метода TIVA может быть оснащена двумя длинами волн: 1,34 мкм для кремниевых ИС и 1,064 мкм для материалов III-V.

На рис. 8(a) показана SRAM объемом 1 МБ в изображении TIVA [32–34]. Малый участок короткого замыкания был локализован в изображении TIVA. Рис. 8(b) представляет собой изображение того же поля зрения в отраженном свете.



а)
б)
*Рис. 8. Изображение TIVA: а) местоположение короткого замыкания;
б) изображение в отраженном свете того же поля зрения [32, 33]*
*Fig. 8. Image TIVA: a) the location of the short circuit;
b) image in reflected light of the same field of view [32, 33]*

На рис. 9 представлены примеры изображений, полученные с использованием метода TIVA. На рис. 9(а) представлено изображения ячеек памяти в ИК диапазоне сквозь подложку. На рис. 9(б) TIVA-изображение со случайным ключом, 9(в) - разница TIVA изображений двух случайных ключей.



а)
б)
в)
Рис. 9. Анализ методом TIVA: (а) – ИК изображение сквозь подложку, (б) – TIVA-изображение со случайным ключом, (в) – Разница TIVA изображений двух случайных ключей
Fig. 9. TIVA analysis: (a) – IR image through the substrate, (b) – TIVA image with a random registers combination key, (c) – Difference of TIVA images of two random registers combination key

Среди методов термической лазерной стимуляции также можно встретить метод XIVA (обычно с XIVA™). Концептуально данный метод является разновидностью метода TIVA, также основан на измерении изменения напряжения при термическом лазерном воздействии с некоторыми аппаратно-программными опциями, включенными в стенд разработчиков XIVA-сканирующего микроскопа. Данный метод видится скорее маркетинговым ходом.

C. SEI

Локальный нагрев также можно использовать для обнаружения оборванных участков проводника с помощью эффекта Зеебека (SEI). Температурные градиенты в проводниках генерируют градиенты электрического потенциала с типичными значениями порядка мВ/К. Если проводник ИС электрически исправен и не имеет разрывов, градиент потенциала, создаваемый локальным нагревом, легко компенсируется транзистором или силовой шиной, управляющей проводником, и сигнал практически не генерируется. Однако, если проводник электрически изолирован от управляющего транзистора или силовой шины, потенциал проводника изменится в следствие эффекта Зеебека. Это изменение потенциала проводника влияет на состояние смещения транзисторов, чьи затворы подключены к электрически оборванному проводнику, изменяя состояние насыщения транзисторов и рассеиваемую мощность. Максимальный температурный градиент может быть около 30°C, при этом в большинстве случаев изменения температуры составляет 10°C или меньше. Возникающие в результате небольшие изменения потенциала оборванного проводника требуют очень чувствительной регистрирующей аппаратуры для обнаружения дефектов.

На рис. 10(a) показано изображение SEI оборванного проводника, созданного методом ионной резки. Рис. 10(b) представляет собой изображение в отраженном свете. Виден оборванный проводник, а также сильный контраст на межсоединениях металла и поликремния. Повышенный контраст возникает из-за разницы термо-ЭДС двух разных материалов (поликремния и металлического проводника) [32].

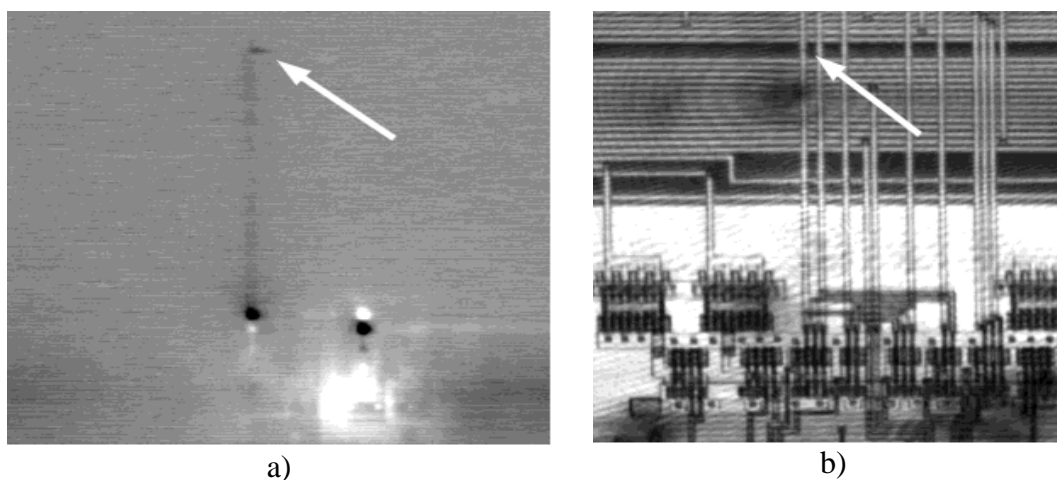


Рис. 10. Изображение SEI: а) обратная сторона с открытым проводником, образовавшийся в результате разреза сфокусированным ионным пучком; б) изображение в отраженном свете [32]
Fig. 10. Image of SEI: a) the reverse side with an open conductor, as a result of a cut with a focused ion beam; b) reflection image [32]

6. Метод конфокальной инфракрасной микроскопии (Confocal Infrared Microscopy — CIM)

Разница в оптической прозрачности материалов позволяет по спектру отраженного сигнала идентифицировать материал. При использовании лазерного источника достаточно измерять амплитуду отраженного сигнала сканирующего сигнала. В конфокальной оптической системе (рис. 11) в объектив поступает только та часть сканируемой области, которая находится в фокусе изображения, в связи с чем изображение, пройдя через конфокальную диафрагму отличается высокой контрастностью и разрешением.

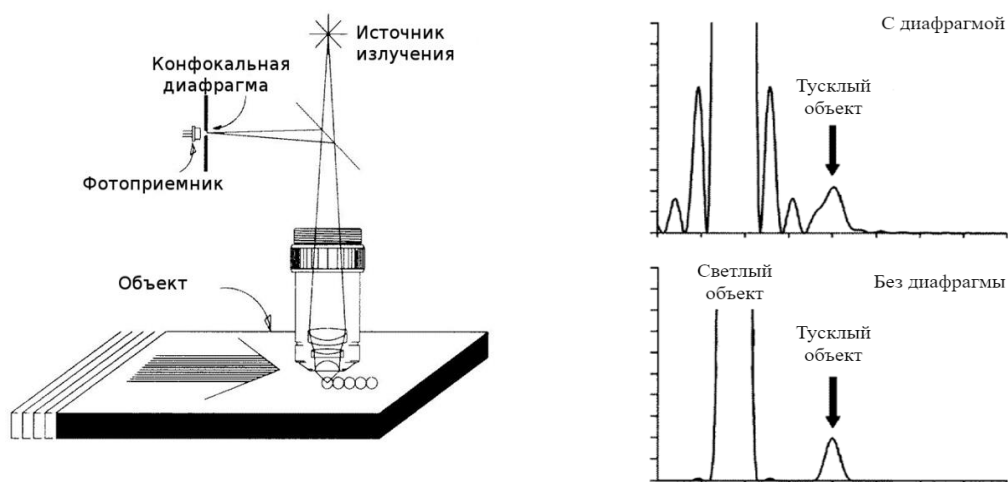


Рис. 11. Структурная схема конфокального лазерного сканирования и спектр отраженного оптического сигнала с и без диафрагмы
 Fig. 11. Structural diagram of confocal laser scanning and the spectrum of the reflected optical signal with and without a diaphragm

При смещении фокуса вглубь материала (при сканировании со стороны подложки) мы также получаем изображение (значение интенсивности отраженного сигнала) на выбранной глубине. Данным методом можно получить 2 набора информации. Первый – это послойные ИК-снимки малой сканируемой области по глубине XY-осей сканирования. Второй набор – спектральное распределение интенсивностей в определенной точке на определенной глубине. По взаимному соотношению отраженных сигналов с разных длин волн можно получить упрощенный спектральный состав материала в точке фокусировки и на основе этого определить тип материала. В случае полупроводника это позволяет различить типы легирования и концентрации. После обработки информации об отраженных сигналах в каждой точке можно восстановить 3D-модель области объемного сканирования (рис. 12) [36, 37].

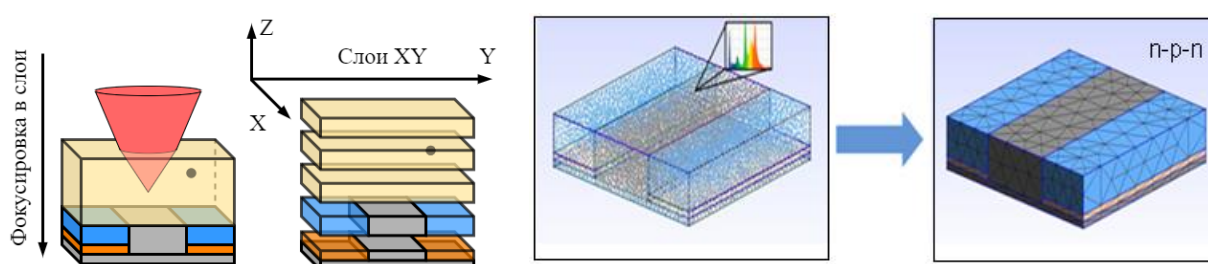


Рис. 12. Реконструкция исследуемого объекта по результатам лазерного конфокального сканирования.

- 1) Послойное сканирование по X, Y, Z;
- 2) Составление 3D-карты с информацией об интенсивности и спектре;
- 3) Реконструкция объемного изображения по результатам обработки

Fig. 12. Reconstruction of the object under study based on the results of laser confocal scanning.

- 1) Layered scanning in X, Y, Z;
- 2) 3D map with intensity and spectrum information;
- 3) Reconstruction of a three-dimensional image based on the processing results

Важным техническим отличием между методом ТОВИС и СИМ является отсутствие необходимости использования фемтосекундного лазерного источника для метода в случае СИМ. Для сканирующего микроскопа по методу СИМ достаточно лазерных источников непрерывного режима мощностью 50–100 мВт. Таким образом, для задач визуализации строения полупроводникового материала или структуры интегральной схемы метод [38] конфокальной микроскопии является оптимальным.

Пример качественного определения слоев полупроводниковой структуры приведен на рис. 13. Исследование проводилось с помощью источника непрерывного излучения в составе стенда «РАДОН-18Ф» [25] с длиной волны 1064 нм. В качестве приемника использовался фотодиодный преобразователь сигнала. Сканирование проводилось только по оси Z исследуемого участка образца.

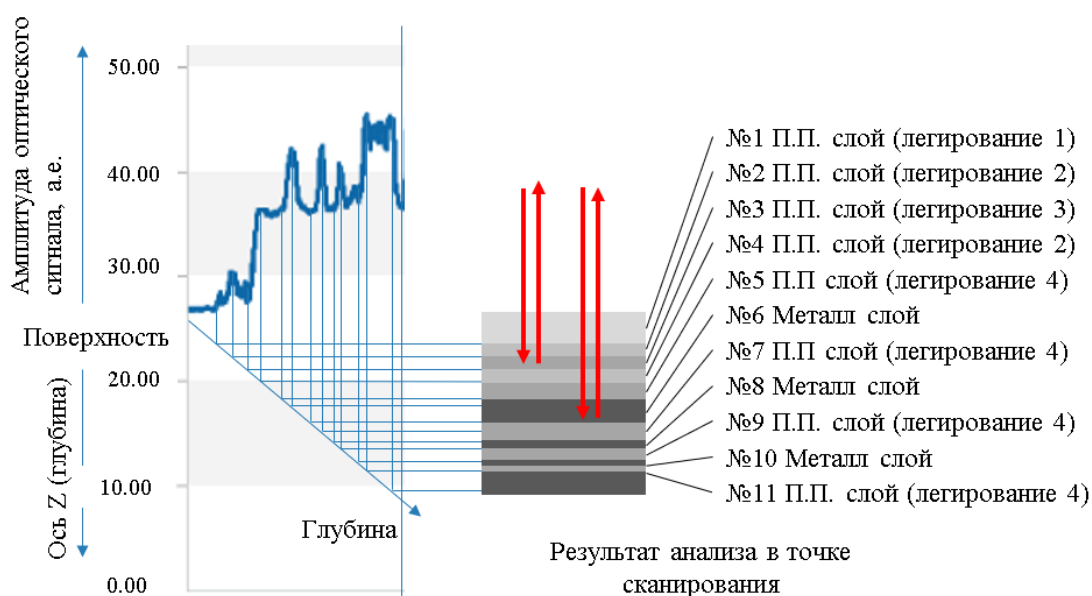


Рис. 13. Принцип определения материалов при сканировании вглубь микросхемы методом СИМ со стороны подложки

Fig. 13. The principle of material layers determination during scanning deep into the microcircuit by the CIM method from the side of the substrate

Важно отметить, что метод СИМ не дает информации об областях и размерах паразитных индуцируемых воздействием структур. Методом СИМ можно дополнить другие методы для точного определения интересующих участков.

7. Фотоэмиссионная микроскопия (Photoemission microscopy – PEM)

Фотоэмиссионная микроскопия (PEM) – это неразрушающий, бесконтактный метод локализации дефектов, который оказался одним из самых успешных инструментов для локализации и характеристики сбоев в режиме активного электрического функционирования ИС, а также сбоев в работе устройств [39]. Специфической характеристикой PEM является электролюминесценция, эффект, основанный на излучении света на границе PN-перехода.

Кремний является полупроводником с непрямой запрещенной зоной, поэтому излучение фотонов из нелегированного кремния труднодостижимо. Люминесценция может возникать только при переходе дырок или электронов из одной энергетической зоны в другую. Большинство переходов приводит только к образованию фононов, потому что

частицы в большинстве квантовых состояний имеют различные векторы в К-пространстве. Большинство электронно-дырочных пар не могут рекомбинировать напрямую без помощи фононов [40, 41]. Для прямой рекомбинации электронно-дырочных пар требуются носители высокой энергии («горячие носители»), такие как высокоэнергетические дырки и высокоэнергетические электроны.

Одним из возможных объяснений межзонного взаимодействия является электрон-электронное рассеяние. На рис. 14 и 15 схематично пояснена структура энергетической зоны кремния и вызванное электрон-электронным рассеянием световое излучение в кремнии. Черные кружки представляют электроны в начальном состоянии рассеяния. Серые и белые изображают промежуточное и конечное состояния рассеяния соответственно. Волнистая стрелка представляет фононную связь, прямая – рассеяние.

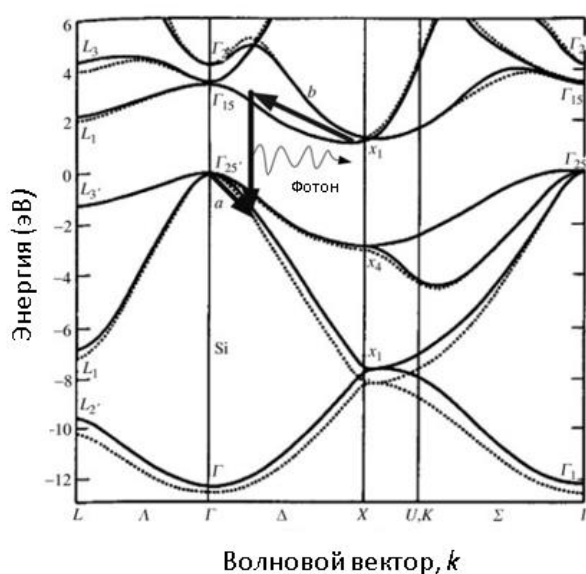


Рис. 14. Диаграмма запрещенной зоны кремния [40]
 Fig. 14. Si band gap diagram [40]

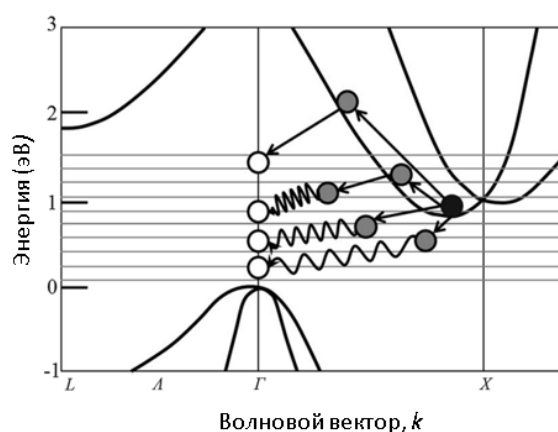


Рис. 15. Зонная диаграмма кремния с моделью, описывающей световую эмиссию в кремнии [41]
 Fig. 15. Band diagram of silicon with a model describing light emission in silicon [41]

Строго говоря, для наблюдения данного эффекта не требуется сканирующая лазерная система, излучение происходит само по себе в активном режиме функционирования исследуемого изделия. Так, например, на рис. 16 [42] показаны

активные области топологии интегральной схемы, задействованные в активном режиме и, соответственно, испускающие фотоны. Данный метод позволяет визуально оценить какие ячейки, блоки, регистры и элементы топологии микросхемы задействованы непосредственно в интересующем режиме.

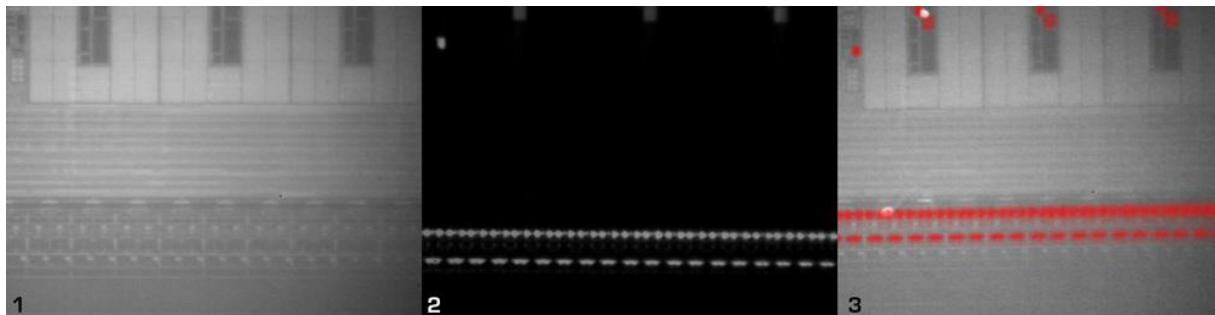


Рис. 16. Определение активных областей интегральной схемы по фотоэмиссии [42]

1 – Стандартное инфракрасное изображение через подложку;

2 – Съемка в фотоэмиссионном режиме;

3 – Наложение фотоэмиссионного изображения на ИК-изображение

Fig. 16. Definition of active regions of the integrated circuit by photoemission [42]

1 – Standard infrared image through the substrate;

2 – Shooting in photoemission mode;

3 – Superposition of the photoemission image on the IR image

Фотоэмиссия может наблюдаться и без внешнего лазерного воздействия, однако в задачах локализации областей и возможных путей распространения паразитного тиристорного эффекта данный метод может обеспечить визуализацию области повышенного протекания тока [43].

На рис. 17 представлен участок топологии ПЛИС Xilinx Virtex-5, исследуемый на установке сфокусированного лазерного излучения «Фемто-Т» [15]. При воздействии лазерным импульсом в чувствительной области микросхемы наблюдался скачкообразный рост тока и его протекание через индуцированную воздействием паразитную структуру. При этом протекание тока в структуре сопровождалось свечением в ИК диапазоне, что наглядно демонстрирует уязвимый участок микросхемы.

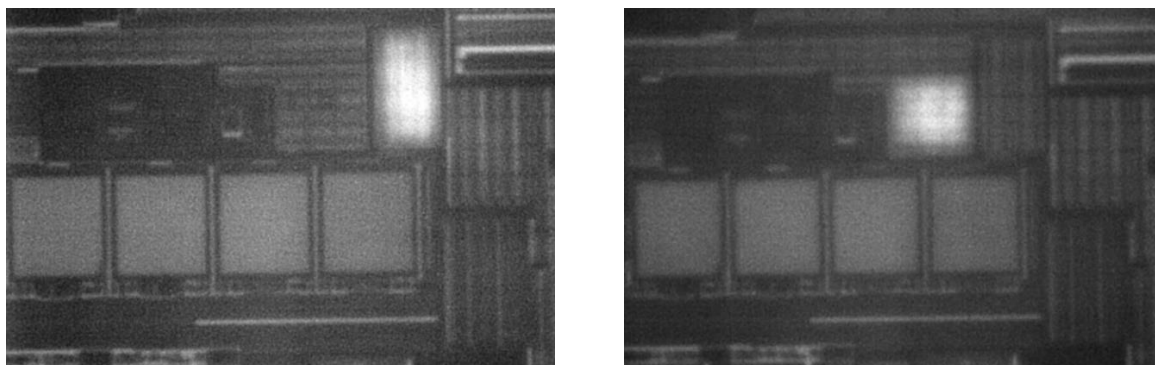


Рис. 17. Свечение различных элементов топологии Virtex-5 при активации паразитной тиристорной структуры, вызванной воздействием импульсного лазерного излучения

Fig. 17. Electroluminescence of two separate elements of the Virtex-5 topology upon activation of a parasitic thyristor structure by exposure to pulsed laser radiation

Таким образом метод РЕМ позволяет локализовать и оценить, насколько локально стационарен данный эффект, и, если происходит токовая миграция, то по какому пути распространяется по микросхеме.

Заключение

Лазерная сканирующая инфракрасная микроскопия является доступным инструментом в оценке широкого перечня параметров интегральных схем. Основными эффектами, используемыми для диагностики, является фотоэффект, тепловой нагрев и модуляция отраженного лазерного излучения. Сканирующие лазерные методы диагностики полупроводниковых структур являются мощным неразрушающим инструментом для анализа внутренней структуры, выявления и локализации дефектов, и внесения искажений в работу микроэлектронного устройства.

Пространственное разрешение, глубина резкости, простота использования, доступность и локализуемость взаимодействия сфокусированного лазерного луча с микроэлектронными технологиями сделали аналитические подходы на основе сфокусированного лазерного излучения действенными для анализа отказов ИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Becker G.T., Regazzoni F., Paar C. et al. Stealthy dopant-level hardware Trojans: extended version. *J Cryptogr Eng* 4, 2014, p. 19–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13389-013-0068-0>.
2. Martin A. Green, Mark J. Keevers. Optical properties of intrinsic silicon at 300 k, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 3. 1995, p. 189–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/PIP.4670030303>.
3. Sood A., Zeller J. SiGe focal plane array detector technology for nearinfrared imaging, *International Journal of Engineering Research and Technology* 10. 2017, p. 81–103. URL: https://www.researchgate.net/publication/318111138_SiGe_Focal_Plane_Array_Detector_Technology_for_Near-Infrared_Imaging (дата обращения: 20.10.2022).
4. Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 k including temperature coefficients, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92. 2008, p. 1305–1310. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.009>.
5. Azzini G.A., Arman G., Montangero P. The scanning optical microscope: A powerful tool for failure analysis of electronic devices, *Microelectronics Reliability*. 1992, vol. 32, Issue 11, p. 1599–1604, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90461-s](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(92)90461-s).
6. Cemine Vernon Julius, Buenaobra Bernardino, Blanca Carlo, Saloma Caesar (2007). Localization and Imaging of Integrated Circuit Defect Using Simple Optical Feedback Detection. *Science Diliman*. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/277152404_Localization_and_Imaging_of_Integrated_Circuit_Defect_Using_Simple_Optical_Feedback_Detection (дата обращения: 20.10.2022).
7. Soref R.A. and Bennett B.R. Electrooptical effects in silicon. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1987, vol. 23, no. 1, p. 123–129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JQE.1987.1073206>.
8. Light Induced Voltage Alteration. URL: <https://www.semitracks.com/reference-material/failure-and-yield-analysis/failure-analysis-die-level/light-induced-voltage-alteration.php> (дата обращения: 20.10.2022).
9. Laird J.S., Chen Y., Vo T., Edmonds L., Scheick L., Adell P. Temperature dependence of spatially resolved picosecond laser induced transients in a deep submicron CMOS inverter. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2009, vol. 56, no. 1, p. 220–228. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.2010939>.
10. Gordienko A.V., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V. Ultrashort pulsed laser tools for testing of semiconductor elements hardness to single event effects, caused by cosmic heavy charged particles. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2015, vol. 9355, art. no. 93551C. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2079758>.
11. Mavritskii, O.B., Chumakov, A.I., Egorov, A.N. et al. Laser equipment for hardness evaluation of semiconductor elements exposed to heavy charged particles (Review). *Instrum Exp Tech*. 2016, 59, p. 627–649 DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S0020441216050122>.
12. Park H. et al. Laser-Induced Current Transients in Strained-Si Diodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Dec. 2009, vol. 56, no. 6, p. 3203–3209. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2033361>.
13. Aw S.E., Tan H.S., Ong C.K. (1991). Optical absorption measurements of band-gap shrinkage in moderately and heavily doped silicon. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 3(42), 8213–8223. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/3/42/016>.

14. Falk R.A. Near IR Absorption in Heavily Doped Silicon - An Empirical Approach. Proceedings of the 26th ISTFA, 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/237452116_Near_IR_Absorption_in_Heavily_Doped_Silicon_-_An_Empirical_Approach (дата обращения: 20.10.2022).
15. Rowlette J.A., Varner E.B., Seidel S. and Bailon I.C. Hot carrier emission from 50 nm n- and p-channel MOSFET devices. The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2003., vol. 2, p. 740–741. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LEOS.2003.1253013>.
16. Согоян А.В., Чумаков А.И., Смолин А.А. Оценка частоты одиночных радиационных эффектов для современных СБИС. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем. С. 170–176. DOI: <http://dx.doi.org/10.31114/2078-7707-2018-4-170-176>.
17. Chumakov A.I. Interrelation of equivalent values for linear energy transfer of heavy charged particles and the energy of focused laser radiation. Russ Microelectron. 2011, 40, p. 149–155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739711030036>.
18. Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Pechenkin A.A. et al. Single-event-effect sensitivity characterization of LSI circuits with a laser-based and a pulsed gamma-ray testing facilities used in combination. Russ Microelectron 41, 221–225 (2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739712040051>.
19. Savchenkov D.V. et al. Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques. 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013, p. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937411>.
20. Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L. and Yanenko A.V. Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs. 12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. 2011, p. 449–453. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2011.6131420>.
21. Chumakov A.I. et al. Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation. 14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS). 2013, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937390>.
22. Gordienko A.V. et al. Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation. Quantum Electronics. 2014, 44(12): 1173. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QE2014v044n12ABEH015519>.
23. Стойкость-2020: тезисы докладов 23 Всероссийской научно-практической конференции по радиационной стойкости электронных систем, Лыткарино, 22–23 сентября 2020 года председатель оргкомитета Таперо К.И.; Научно-исследовательский институт приборов. Лыткарино: Научно-исследовательский институт приборов, 2020. – 173 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44928221&selid=44930460> (дата обращения: 20.10.2022). – EDN MILEHO.
24. Печенкин А.А., Егоров А.Н., Маврицкий О.Б. и др. Расширение возможностей лазерной установки «Фемто-Т» для облучения кремниевых ИС сквозь подложку. 22-я Всероссийская научно-техническая конференция «Радиационная стойкость электронных систем» – «Стойкость-2019». 2019. – 262 с. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012096118/ (дата обращения: 20.10.2022).
25. Печенкин А.А., Савченков Д.В., Маврицкий и др. Оценка параметров чувствительности КМОП БИС по одиночным тиристорным эффектам при лазерном воздействии со стороны подложки. Микроэлектроника. 2015, т. 44, № 1, с. 41–48. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S054412691501007X>. – EDN TJCWP.
26. Melinger J.S. et al. Critical evaluation of the pulsed laser method for single event effects testing and fundamental studies. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1994, vol. 41, no. 6, p. 2574–2584. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/23.340618>.
27. Ramsay E. & Reid D. & Wilsher K. Three-dimensional imaging of a silicon flip chip using the two-photon optical-beam induced current effect. Applied Physics Letters. 2002, 81, p. 7–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1491301>.
28. Wu C. et al. A novel and low-cost method to detect delay variation by dynamic thermal laser stimulation. International Reliability Physics Symposium, 2011, p. FA.1.1–FA.1.5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IRPS.2011.5784574>.
29. Edward I. Beam-Based Defect Localization Techniques. Microelectronics Failure Analysis Desk Reference, Sixth Edition. 2011, p 246 URL: https://www.researchgate.net/publication/255245776_Beam-based_defect_localization_techniques (дата обращения: 20.10.2022).
30. Lawrence C. Wagner. Failure Analysis of Integrated Circuits: Tools and Techniques. 1999. 255 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4919-2>.

31. Felix Beaudoin, Edward Cole, Jr. *Physics of Laser-Based Failure Analysis*, Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference, 7th ed., Edited by Tejinder Gandhi, ASM International. 2019, p. 196–208. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110196>.
32. Cole E.I., Jr.; Tangyuyong P.; Benson D.A.; Barton D.L. TIVA and SEI developments for enhanced front and backside interconnection failure analysis. *Microelectron. Reliab.* 1999, vol. 39, p. 991–996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714\(99\)00136-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714(99)00136-5).
33. Reissner M. Fault localization at high voltage devices using thermally induced voltage alteration (TIVA). *Microelectron. Reliab.* 2007, vol. 47, Issues 9–11, p. 1561–1564. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2007.07.016>.
34. Processes of the Reliability and Degradation Mechanism of High-Power Semiconductor Lasers. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12060765>.
35. Boit C. Fundamentals of Photon Emission (PEM) in Silicon – Electroluminescence for Analysis of Electronic Circuit and Device Functionality. In: *Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference Fifth Edition* (ASM International). 2004, p. 356–368. URL: https://www.researchgate.net/publication/288257293_Fundamentals_of_photon_emission_PEM_in_silicon_-_Electroluminescence_for_analysis_of_electronic_circuit_and_device_functionality (дата обращения: 20.10.2022).
36. Baluev A.A., Ukolov D.S., Pechenkin A.A. and Mozhaev R.K. Application of Confocal Microscopy Methods for Research and Non-destructive Examination of Semiconductor Structures and Integrated Circuits. *IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL)*. 2021, p. 135–138. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIEL52794.2021.9569106>.
37. Ukolov D., Baluev A., Gromova P., Pechenkin A. and Mozhaev R. Laser scanning confocal IR microscopy for non-destructive testing of semiconductors. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2022, p. 1–3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802329>.
38. Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nastulyavichus A.A., Pechenkin A.A., Smirnov N.A., Chumakov A.I. NIR Microscopy Possibilities for the Visualization of Silicon Microelectronic Structure Topology through the Substrate. *Physics Procedia*. 2015, vol. 73, p. 183–188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.152>.
39. Dong Z, Wang W, Huang B J et al. A 630dpi dynamic LED display array in standard Si-based CMOS technology. *Sci China Inf Sci*. 2012, 55, 2409–2416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11432-011-4498-y>.
40. Kim J. H., Kawazoe T., & Ohtsu M. Dependences of emission intensity of Si light-emitting diodes on dressed-photon–phonon-assisted annealing conditions and driving current. *Applied Physics A*. 2017, 123, 606. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-017-1215-8>.
41. Boit C., Beyreuther A., Herfurth N. Photon Emission in Silicon Based Integrated Circuits. In: *Microelectronics failure analysis: Desk reference* 2019, p. 180–195. DOI: <http://dx.doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110180>.
42. Photoemission optical bench. URL: <https://www.alphanov.com/en/products-services/photoemission-optical-bench> (дата обращения: 20.10.2022).
43. Mozhaev R., Pechenkin A. and Gorbunov M. Near-Infrared Electroluminescence of Silicon Thyristor Structure and Its Possible Applications. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2022, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802395>.

REFERENCES:

- [1] Becker G.T., Regazzoni F., Paar C. et al. Stealthy dopant-level hardware Trojans: extended version. *J Cryptogr Eng* 4, 2014, p. 19–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13389-013-0068-0>.
- [2] Martin A. Green, Mark J. Keevers. Optical properties of intrinsic silicon at 300 k, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 3. 1995, p. 189–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/PIP.4670030303>.
- [3] Sood A., Zeller J. Sige focal plane array detector technology for nearinfrared imaging, *International Journal of Engineering Research and Technology* 10. 2017, p. 81–103. URL: https://www.researchgate.net/publication/318111138_SiGe_Focal_Plane_Array_Detector_Technology_for_Near-Infrared_Imaging (accessed: 20.10.2022).
- [4] Green M.A. Self-consistent optical parameters of intrinsic silicon at 300 k including temperature coefficients, *Solar Energy Materials and Solar Cells* 92, 2008, p. 1305–1310. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.06.009>.
- [5] Azzini G.A., Arman G., Montangero P. The scanning optical microscope: A powerful tool for failure analysis of electronic devices, *Microelectronics Reliability*. 1992, vol. 32, Issue 11, p. 1599–1604, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714\(92\)90461-s](http://dx.doi.org/10.1016/0026-2714(92)90461-s).
- [6] Cemine Vernon Julius, Buenaobra Bernardino, Blanca Carlo, Saloma Caesar (2007). Localization and Imaging of Integrated Circuit Defect Using Simple Optical Feedback Detection. *Science Diliman*. 16. URL: https://www.researchgate.net/publication/277152404_Localization_and_Imaging_of_Integrated_Circuit_Defect_Using_Simple_Optical_Feedback_Detection (accessed: 20.10.2022).

- [7] Soref R.A. and Bennett B.R. Electrooptical effects in silicon. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1987, vol. 23, no. 1, p. 123–129. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JQE.1987.1073206>.
- [8] Light Induced Voltage Alteration. URL: <https://www.semitracks.com/reference-material/failure-and-yield-analysis/failure-analysis-die-level/light-induced-voltage-alteration.php> (accessed: 20.10.2022).
- [9] Laird, J.S., Chen, Y., Vo, T., Edmonds, L., Scheick, L., Adell, P. Temperature dependence of spatially resolved picosecond laser induced transients in a deep submicron CMOS inverter. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2009, vol. 56, no. 1, p. 220–228. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2008.2010939>.
- [10] Gordienko A.V., Mavritskii O.B., Egorov A.N., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V. Ultrashort pulsed laser tools for testing of semiconductor elements hardness to single event effects, caused by cosmic heavy charged particles. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 2015, vol. 9355, art. no. 93551C. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.2079758>.
- [11] Mavritskii, O.B., Chumakov, A.I., Egorov, A.N. et al. Laser equipment for hardness evaluation of semiconductor elements exposed to heavy charged particles (Review). *Instrum Exp Tech*. 2016, 59, p. 627–649. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S0020441216050122>.
- [12] Park H. et al. Laser-Induced Current Transients in Strained-Si Diodes. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. Dec. 2009, vol. 56, no. 6, p. 3203–3209. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2009.2033361>.
- [13] Aw S.E., Tan H.S., Ong C.K. (1991). Optical absorption measurements of band-gap shrinkage in moderately and heavily doped silicon. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 3(42), 8213–8223. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/3/42/016>.
- [14] Falk R.A. Near IR Absorption in Heavily Doped Silicon - An Empirical Approach. *Proceedings of the 26th ISTFA*, 2000. URL: https://www.researchgate.net/publication/237452116_Near_IR_Absorption_in_Heavily_Doped_Silicon_-_An_Empirical_Approach (accessed: 20.10.2022).
- [15] Rowlette J.A., Varner E.B., Seidel S. and Bailon I.C. Hot carrier emission from 50 nm n- and p-channel MOSFET devices. *The 16th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, LEOS 2003.*, vol. 2, p. 740–741. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LEOS.2003.1253013>.
- [16] Sogoyan A.V., Chumakov A.I., Smolin A.A. Single Event Rate Evaluation for Modern ICs. *Problems of advanced micro- and nanoelectronic systems development*. 2018, p. 170–176. DOI: <http://dx.doi.org/10.31114/2078-7707-2018-4-170-176> (in Russian).
- [17] Chumakov A.I. Interrelation of equivalent values for linear energy transfer of heavy charged particles and the energy of focused laser radiation. *Russ Microelectron*. 2011, 40, p. 149–155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739711030036>.
- [18] Chumakov A.I., Vasil'ev A.L., Pechenkin A.A. et al. Single-event-effect sensitivity characterization of LSI circuits with a laser-based and a pulsed gamma-ray testing facilities used in combination. *Russ Microelectron* 41, 221–225 (2012). DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063739712040051>.
- [19] Savchenkov D.V. et al. Study of SEL and SEU in SRAM using different laser techniques. *14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*. 2013, p. 1–5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937411>.
- [20] Chumakov A.I., Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Tararaksin A.S., Vasil'ev A.L. and Yanenko A.V. Local laser irradiation technique for SEE testing of ICs. *12th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems*. 2011, p. 449–453. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2011.6131420>.
- [21] Chumakov A.I. et al. Compendium of SEE comparative results under ion and laser irradiation. *14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)*. 2013, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/RADECS.2013.6937390>.
- [22] Gordienko A.V. et al. Correlation of the ionisation response at selected points of IC sensitive regions with SEE sensitivity parameters under pulsed laser irradiation. *Quantum Electronics*. 2014, 44(12): 1173. DOI: <http://dx.doi.org/10.1070/QE2014v044n12ABEH015519>.
- [23] Stoicost-2020: abstracts of the 23rd All-Russian Scientific and Practical Conference on Radiation Resistance of Electronic Systems, Lytkarino, September 22–23, 2020 Chairman of the Organizing Committee Tapero K.I.; Research Institute of Instruments. Lytkarino: Research Institute of Instruments, 2020. – 173 p. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44928221&selid=44930460> (accessed: 20.10.2022) (in Russian). – EDN MILEHO.
- [24] Pechenkin A.A., Egorov A.N., Mavriczkij O.B. et al. Expanding the capabilities of the Femto-T laser installation for irradiating silicon ICs through the substrate. *22nd All-Russian Scientific and Technical Conference «Radiation Resistance of Electronic Systems» – «Stoicost-2019»*, 2019. – 262 p. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_RU_NLR_BIBL_A_012096118/ (accessed: 20.10.2022).

- [25] Pechenkin A.A., Savchenkov D.V., Mavriczkij O.B. et al. Evaluation of CMOS BIS sensitivity parameters by single thyristor effects under laser exposure from the substrate. *Microelectronics*. 2015, vol. 44, no. 1, p. 41–48. DOI: <http://dx.doi.org/10.7868/S054412691501007X> (in Russian). – EDN TCJCWP.
- [26] Melinger J.S. et al. Critical evaluation of the pulsed laser method for single event effects testing and fundamental studies. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 1994, vol. 41, no. 6, p. 2574–2584. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/23.340618>.
- [27] Ramsay E. & Reid D. & Wilsher K. Three-dimensional imaging of a silicon flip chip using the two-photon optical-beam induced current effect. *Applied Physics Letters*. 2002, 81, p. 7–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1491301>.
- [28] Wu C. et al. A novel and low-cost method to detect delay variation by dynamic thermal laser stimulation. *International Reliability Physics Symposium*, 2011, p. FA.1.1–FA.1.5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/IRPS.2011.5784574>.
- [29] Edward I. Beam-Based Defect Localization Techniques. *Microelectronics Failure Analysis Desk Reference, Sixth Edition*. 2011, p. 246. URL: https://www.researchgate.net/publication/255245776_Beam-based_defect_localization_techniques (accessed: 20.10.2022).
- [30] Lawrence C. Wagner. *Failure Analysis of Integrated Circuits: Tools and Techniques*. 1999. 255 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4919-2>.
- [31] Felix Beaudoin, Edward Cole, Jr. *Physics of Laser-Based Failure Analysis, Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference, 7th ed.*, Edited by Tejinder Gandhi, ASM International. 2019, p. 196–208. DOI: <https://doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110196>.
- [32] Cole E.I., Jr.; Tangyunyong P.; Benson D.A.; Barton D.L. TIVA and SEI developments for enhanced front and backside interconnection failure analysis. *Microelectron. Reliab.* 1999, vol. 39, p. 991–996. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714\(99\)00136-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0026-2714(99)00136-5).
- [33] Reissner M. Fault localization at high voltage devices using thermally induced voltage alteration (TIVA). *Microelectron. Reliab.* 2007, vol. 47, Issues 9–11, 1561–1564. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.microrel.2007.07.016>.
- [34] Processes of the Reliability and Degradation Mechanism of High-Power Semiconductor Lasers. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst12060765>.
- [35] Boit C. Fundamentals of Photon Emission (PEM) in Silicon – Electroluminescence for Analysis of Electronic Circuit and Device Functionality. In: *Microelectronics Failure Analysis: Desk Reference Fifth Edition* (ASM International). 2004, p. 356–368. URL: https://www.researchgate.net/publication/288257293_Fundamentals_of_photon_emission_PEM_in_silicon_-_Electroluminescence_for_analysis_of_electronic_circuit_and_device_functionality (accessed: 20.10.2022).
- [36] Baluev A.A., Ukolov D.S., Pechenkin A.A. and Mozhaev R.K. Application of Confocal Microscopy Methods for Research and Non-destructive Examination of Semiconductor Structures and Integrated Circuits. *IEEE 32nd International Conference on Microelectronics (MIEL)*. 2021, p. 135–138. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MIEL52794.2021.9569106>.
- [37] Ukolov D., Baluev A., Gromova P., Pechenkin A. and Mozhaev R. Laser scanning confocal IR microscopy for non-destructive testing of semiconductors. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2022, p. 1–3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802329>.
- [38] Mavritskii O.B., Egorov A.N., Nastulyavichus A.A., Pechenkin A.A., Smirnov N.A., Chumakov A.I. NIR Microscopy Possibilities for the Visualization of Silicon Microelectronic Structure Topology through the Substrate. *Physics Procedia*. 2015, vol. 73, p. 183–188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.152>.
- [39] Dong Z, Wang W, Huang B J et al. A 630dpi dynamic LED display array in standard Si-based CMOS technology. *Sci China Inf Sci*. 2012, 55, 2409–2416. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11432-011-4498-y>.
- [40] Kim J. H., Kawazoe T., & Ohtsu M. Dependences of emission intensity of Si light-emitting diodes on dressed-photon-phonon-assisted annealing conditions and driving current. *Applied Physics A*. 2017, 123, 606. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-017-1215-8>.
- [41] Boit C., Beyreuther A., Herfurth N. Photon Emission in Silicon Based Integrated Circuits. In: *Microelectronics failure analysis: Desk reference* 2019, p. 180–195. DOI: <http://dx.doi.org/10.31399/asm.tb.mfadr7.t91110180>.
- [42] Photoemission optical bench. URL: <https://www.alphanov.com/en/products-services/photoemission-optical-bench> (accessed: 20.10.2022).
- [43] Mozhaev R., Pechenkin A. and Gorbunov M. Near-Infrared Electroluminescence of Silicon Thyristor Structure and Its Possible Applications. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. 2022, p. 1–4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MWENT55238.2022.9802395>.

*Поступила в редакцию – 05 октября 2022 г. Окончательный вариант – 14 ноября 2022 г.
Received – October 05, 2022. The final version – November 14, 2022.*