



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19>

Оригинальная статья

Original paper

УДК 538.91, 539.143.5

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ МЕЖСОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

С. К. ЛАЗАРУК, В. П. БОНДАРЕНКО, В. Е. БОРИСЕНКО, Н. В. ГАПОНЕНКО,
Г. Г. ГОРОХ, А. А. ЛЕШОК, Д. Б. МИГАС, Е. Б. ЧУБЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 31.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Обобщены результаты научных исследований, выполненных в научных подразделениях кафедры микро- и наноэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники в области разработки перспективных оптических и электронных внутричиповых и межчиповых соединений элементов кремниевых интегральных микросхем. Представлены примеры использования наноструктурированных материалов для предложенных, интегрированных с монокристаллическим кремнием, источников и детекторов света (Si), а также волноводов (Al_2O_3/TiO_2). Развита и опробована стратегия применения межчиповых вставок – интерпозеров – для обеспечения оптических и электронных соединений в объемных (2,5D и 3D) сборках кристаллов интегральных микросхем. Приведены результаты поиска новых материалов и структур для источников света, волноводов, оптически прозрачных проводников и защиты от СВЧ-излучения.

Ключевые слова: оптическое межсоединение, электронное межсоединение, микросхема, интерпозер, наноматериал, наноструктура.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № T23MЭ-018. Авторы работы благодарны академику В. А. Лабуну за стимулирующие дискуссии по темам проводимых исследований.

Для цитирования. Перспективные оптические и электронные межсоединения элементов интегральных микросхем / С. К. Лазарук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 7–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19>.

PERSPECTIVE OPTICAL AND ELECTRONIC INTERCONNECTS OF INTEGRATED CIRCUIT ELEMENTS

SERGEI K. LAZAROUK, VITALY P. BONDARENKO, VIKTOR E. BORISENKO,
NIKOLAI V. GAPONENKO, GENNADII G. GOROKH, ANDREI A. LESHOK,
DMITRI B. MIGAS, EUGENE B. CHUBENKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.01.2024

Abstract. The recent results of the investigations performed in the research units of the Department of Micro- and Nanoelectronics of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics in the field of the development of perspective optical and electronic intra-chip and inter-chip interconnections of silicon integrated circuits are summarized. Examples of the use of nanostructured materials for the proposed light sources and detec-

tors (Si) as well as light guides ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$) integrated with monocrystalline silicon are presented. The strategy of an application of inter-chip interposers for optical and electronic connections in bulk (2.5D and 3D) packages of integrated circuits was promoted and tested. Novel materials and structures promising for light sources, optically transparent electrical conductors and protectors against microwave electromagnetic radiation are demonstrated.

Keywords: optical interconnect, electronic interconnect, integrated circuit, interposer, nanomaterial, nanostructure.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was carried out with the financial support of the project of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research No T23ME-018. The authors of the work are grateful to Academician V. A. Labunov for stimulating discussions on the topics of the research.

For citation. Lazarouk S. K., Bondarenko V. P., Borisenko V. E., Gaponenko N. V., Gorokh G. G., Leshok A. A., Migas D. B., Chubenko E. B. (2024) Perspective Optical and Electronic Interconnects of Integrated Circuit Elements. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 7–19. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-7-19> (in Russian).

Введение

На современном этапе развития интегральной электроники особое внимание уделяется межсоединениям элементов как внутри самой микросхемы, так и между микросхемами. В частности, из-за резистивно-емкостных задержек быстродействие микропроцессорных устройств (чипов) ограничено пределом на уровне единиц гигагерц (5–8 ГГц). Чтобы преодолеть данное ограничение, необходимо использовать принципиально другой (отличный) способ передачи сигнала, когда носителями информации становятся фотоны. Именно оптические (оптоволоконные) системы используются как для связи между континентами, так и на бытовом уровне для высокоскоростного интернета. Замена «медленных» электронов «быстрыми» фотонами позволит не только повысить быстродействие всей системы, но и увеличить помехоустойчивость, степень защищенности передаваемого сигнала, что, в конечном счете, приведет к существенному количественному росту передаваемой и обрабатываемой информации.

Для реализации системы оптических межсоединений необходимы следующие компоненты: источник светового сигнала, световод (волновод), фотодетектор. Если фотодетекторы и световоды давно изготавливаются на кремниевых чипах, то создание источников света, в частности светодиодов на кремнии, связано с фундаментальными ограничениями. Кремний, будучи основным материалом при производстве интегральных микросхем, является непрямозонным полупроводником, что не позволяет создавать на его основе эффективные светоизлучающие диоды. Также осаждение пленок других прямозонных полупроводников типа нитрида галлия затруднено из-за разницы параметров решетки и коэффициентов объемного расширения при нагреве, что приводит к нежелательным эффектам отслаивания осаждаемых пленок во время последующих технологических операций.

Разработкой перспективных оптических и совершенствованием электронных межсоединений элементов интегральных микросхем, позволяющих преодолеть названные ограничения, успешно занимается кафедра микро- и нанoeлектроники и лаборатории научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). При этом основное внимание уделяется как разработке оптимальных конструктивных решений на основе традиционных для кремниевой микроэлектроники материалов, так и поиску новых материалов и наноструктур, перспективных для создания источников света, а также пленочных структур, выполняющих функции волноводов, оптически прозрачных проводников и защиты от СВЧ-излучения. Результаты научных исследований и разработок, выполненных в БГУИР, кратко обобщены в данной статье.

Оптические межсоединения элементов интегральных микросхем

Перспектива изготовления источников света на кремнии появилась после обнаружения эффективной фотолюминесценции наноструктурированного пористого кремния [1]. За счет эффекта квантового ограничения удалось при уменьшении размеров кремниевого «скелета» получить светоизлучение с эффективностью несколько процентов, что было принципиально невозможно в случае объемного монокристаллического кремния. Важно отметить, что в то время пористый кремний исследовался лишь в нескольких научных лабораториях в мире, среди которых была проблемная лаборатория БГУИР (тогда МРТИ). Опыт работы с пористым кремнием позволил создать на его основе светоизлучающие диоды, излучающие свет при обратном смещении [2–4].

По эффективности и стабильности светоизлучения эти светодиоды превосходили известные аналоги, что отмечено публикациями в журнале Nature [5, 6]. На основе вышеупомянутых исследований были разработаны лавинные светодиоды на базе наноструктурированного кремния, первое упоминание о которых сделано в 2000 г. [7]. Далее последовали работы, позволившие улучшить параметры лавинных светодиодов, в частности быстродействие [8]. Анализ литературных источников показывает, что после 2004 г. лавинные кремниевые светодиоды активно исследуются учеными США, Европы (Нидерланды, Франция, Дания, Швейцария, Россия, Хорватия), Азии (Япония, Китай, Израиль, Иран), ЮАР и Австралии [9].

На рис. 1 представлены схемы функционирования внутри- и межчиповых оптических межсоединений. В обоих случаях световой сигнал генерируется лавинными светодиодами (LED – Light Emitting Diodes), использующими наноструктурированный кремний в качестве источника света. Далее световой сигнал (на рисунке показан стрелками) распространяется либо по световоду (рис. 1, *a*) внутри чипа, либо через оптический интерпозер (рис. 1, *b*) между чипами. Затем световой сигнал регистрируется фотоприемниками (PD – Photodetectors).

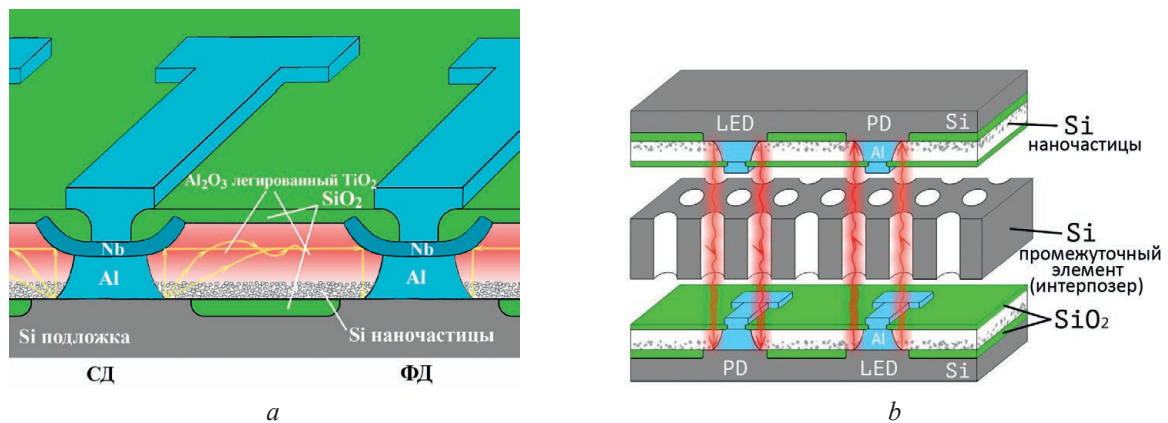


Рис. 1. Схемы функционирования внутричиповых (*a*) и межчиповых (*b*) оптических межсоединений
Fig. 1. Functional principles of intra-chip (*a*) and inter-chip (*b*) optical interconnects

Светодиоды функционируют за счет барьера Шоттки между алюминиевыми электродами и кремниевой подложкой, на поверхности которой сформирован слой кремниевых наночастиц, что схематично показано на рис. 1. Во внутричиповых оптических межсоединениях сверху алюминиевых электродов расположены ниобиевые отражатели (рис. 1, *a*), при помощи которых световой сигнал перенаправляется в нужную сторону по световоду. Роль световода (волновода) выполняет пленка анодного оксида алюминия, ее внутренний слой легирован оксидом титана. Этот слой является сердцевиной волновода, по которой происходит распространение светового сигнала за счет более высокого значения показателя преломления [8, 10].

Световой сигнал в межчиповых оптических межсоединениях после его генерации светодиодом проходит через оптический интерпозер [11], представляющий собой микроканальную пластину со сквозными отверстиями, что позволяет свету распространяться только в вертикальном направлении, как это схематично показано на рис. 1, *b*. Функции фотоприемников выполняют те же диоды, используемые в качестве источников светового сигнала. Отличие их функционирования заключается в том, что если светоизлучение имеет место при электрическом смещении диодов свыше напряжений, при которых происходит лавинное умножение носителей заряда, т. е. лавинный пробой, то режим фотоприемника имеет место при смещении диодов менее напряжения лавинного пробоя [12]. Благодаря универсальности конструкции светодиодов и фотоприемников удастся реализовать микросистемы оптических межсоединений на минимальной площади кремниевых чипов.

Высокое быстродействие лавинного умножения носителей заряда обеспечивает еще одно важное преимущество разработанных микросистем оптических межсоединений. Если в оптоволоконной оптической связи кроме вышеотмеченных компонент используется оптический модулятор, необходимый для управления световым сигналом, то в предлагаемых авторами микросистемах используется внутренняя модуляция светового сигнала за счет модуляции света при изменении напряжения смещения светодиодов, высокое быстродействие которых обеспечивает функционирование систем в гигагерцовом диапазоне частот, что не могут обеспечить альтернативные устройства. Изготовление разработанных конструкций соответствует традиционной технологии

производства кремниевых КМОП интегральных микросхем, что позволяет интегрировать оптические межсоединения с классическими металлическими межсоединениями на едином кремниевом чипе [13]. Кроме этого, разработанные конструкции могут быть интегрированы с новыми элементами интегральной электроники. В частности, следует отметить разработки в области спинтроники, где пористые анодные оксиды с упорядоченной структурой пор используются в качестве формозадающих матриц (темплатов) при формировании новых наноструктурированных материалов и устройств на их основе. При изготовлении таких матриц была достигнута рекордная величина коэффициента регулярности пористого оксида алюминия 96 % [14], что позволило создать переключающиеся магниторезистивные элементы [15–19].

Перспективные материалы для интегральных источников света

Актуальными задачами в разработке оптических межсоединений элементов интегральных микросхем являются поиск и исследование новых материалов для светоизлучающих структур, которые могли бы составить конкуренцию традиционно используемым нитридным полупроводникам и полупроводниковым соединениям группы A^{III}B^V. Один из таких материалов – графитоподобный нитрид углерода ($g\text{-C}_3\text{N}_4$), имеющий, как и графен, гексагональную кристаллическую решетку и обладающий полупроводниковыми свойствами ($E_g \sim 2,7$ эВ). Наряду с перспективами его использования в оптоэлектронике, он уже продемонстрировал свою эффективность при фотокаталитической очистке воды от органических загрязнений и бактерий, преобразовании и накоплении энергии, включая генерацию водорода фотокаталитическим разложением воды и фотосинтез углеводов из воды и углекислого газа, а также при создании новых элементов сенсорики. В исследованиях этого материала [20–25], выполненных в 2019–2023 гг., основной акцент сделан на поиске возможностей управления его оптическими, в первую очередь люминесцентными, свойствами и на разработке методов формирования пленок из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ [26–28]. Получены тонкие пленки $g\text{-C}_3\text{N}_4$ методами химического осаждения из газовой фазы в двухзонном реакторе в инертной атмосфере [27] и на воздухе в муфельной печи (рис. 2) [28].

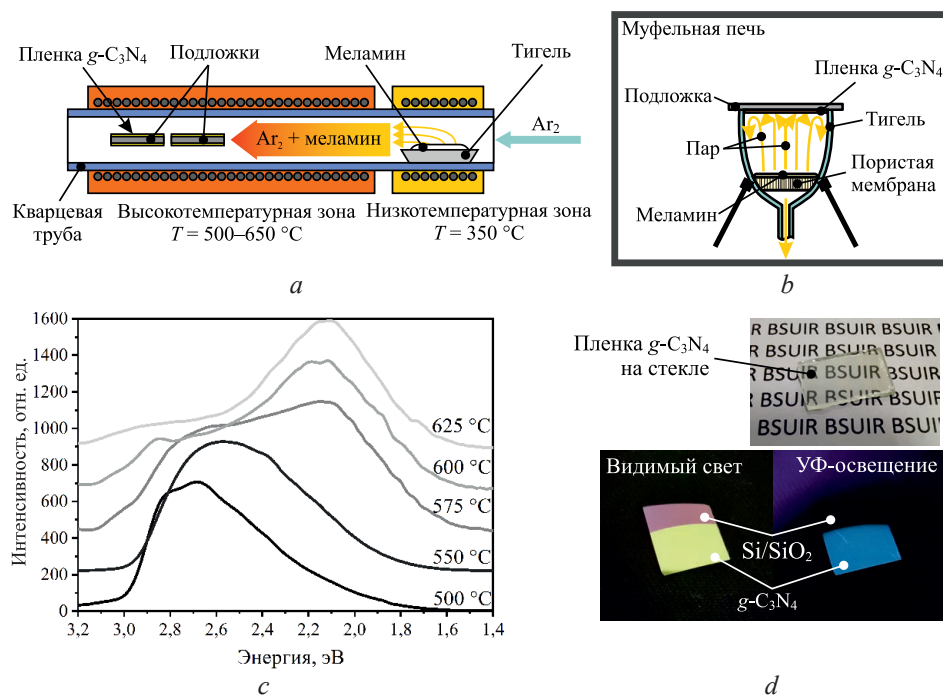


Рис. 2. Синтез пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ методом химического осаждения из газовой фазы в двухзонном реакторе (а) и быстрым осаждением в муфельной печи (b), спектры фотолюминесценции $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (с) при различных температурах, и внешний вид пленок $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (d), полученных на стеклянных и кремниевых подложках при различном освещении

Fig. 2. Synthesis of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ films by chemical vapor deposition in a two-zone reactor (a) and by rapid deposition in a muffle furnace (b), photoluminescence spectra of $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (c) at different temperatures and photos of the films $g\text{-C}_3\text{N}_4$ (d) of glass and silicon substrate at different light illumination

Второй способ дает возможность получить гомогенные покрытия из $g\text{-C}_3\text{N}_4$ всего за 3–5 мин [28], что не менее чем на порядок быстрее аналогичных технологических процессов. Показано, что управление люминесцентными характеристиками формируемых таким образом пленок осуществляется простым изменением температуры синтеза в пределах 500–625 °С, что обеспечивает сдвиг положения максимума фотолюминесценции. Композитные материалы, включающие помимо $g\text{-C}_3\text{N}_4$ также полупроводниковые оксид цинка и/или сульфид цинка, обеспечивают получение источников белого света с различной цветовой температурой [23, 25].

Еще одним исследованным авторами статьи материалом, представляющим интерес для создания светоизлучающих приборов, интегрированных с кремниевыми структурами, является оксид цинка (ZnO). Это широкозонный полупроводник, демонстрирующий эффективную экситонную и примесную люминесценцию. Он может быть легирован различными металлами для придания электропроводящих свойств и модификации оптических характеристик [29–31]. Методом химического гидротермального осаждения с использованием зародышевых слоев, нанесенных на поверхность кремниевой подложки методом послойного атомного осаждения, и электрохимическим методом получены тонкие пленки ZnO, легированного никелем, кобальтом и медью. Изменение концентрации названных примесей позволяет контролировать электропроводность и люминесцентные свойства полученных пленок (рис. 3).

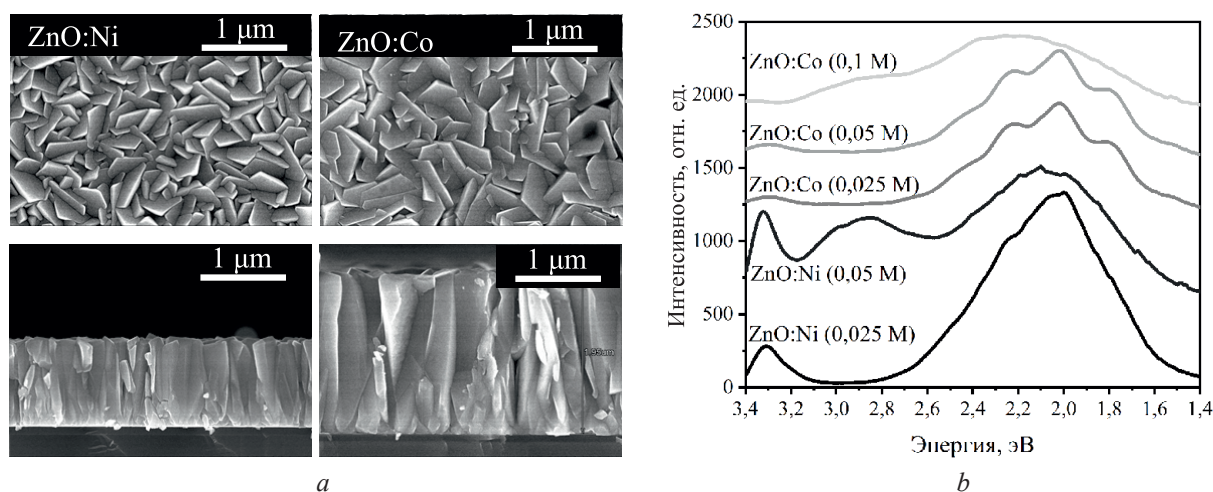


Рис. 3. Поверхность и поперечное сечение тонких пленок ZnO, легированного переходными металлами (а), и их спектры люминесценции (b)
Fig. 3. Surface and cross-sectional view of thin films ZnO doped by metals (a) and their photoluminescence spectra (b)

Исследованные материалы – $g\text{-C}_3\text{N}_4$ и ZnO – представляют интерес не только для создания светоизлучающих элементов в составе оптоэлектронных пар в интегральном исполнении, но и для дискретных источников света и фотокатализаторов.

Функциональные оптические материалы и структуры

Фотонные кристаллы сегодня рассматривают в качестве перспективных структур для оптической обработки информации. В процессе исследований в этом направлении авторами статьи разработаны золи для формирования пленок и порошков титаната бария золь-гель-методом. На подложках кремния и кварцевого стекла получены образцы легированных лантаноидами многослойных структур с периодически изменяющимся показателем преломления $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ – фотонных кристаллов и микрорезонаторов, демонстрирующих усиление стоксовой и ап-конверсионной люминесценции лантаноидов [32–34]. В этих структурах наблюдается ап-конверсионная люминесценция трехвалентных ионов эрбия для длины волны возбуждения 980 нм. Она проявляется наличием полос люминесценции в видимом диапазоне в области 500–700 нм. В некоторых экспериментах интенсивность ап-конверсионной люминесценции удалось увеличить более чем в 300 раз в микрорезонаторе, состоящем из 13–17 чередующихся слоев контролируемой толщины $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$, по сравнению с первоначально полученными пленками ксерогелей на кремнии. Это достигнуто за счет оптимизации соотношения эрбия и иттербия в титанате бария, выбора режимов термообработки и оптимизации самой структуры многослойного микрорезонатора. По-

казано, что в микрорезонаторах интенсивность ап-конверсионной люминесценции уменьшается при повышении температуры образца, однако сохраняется даже при 170 °С.

Кроме элементов планарной оптоэлектроники, разработанные структуры фотонных кристаллов представляют интерес для удаленного оптического мониторинга окружающей среды, поскольку на изменение люминесценции и спектров отражения фотонных кристаллов и микрорезонаторов влияют такие внешние факторы, как температура, влажность, напряженность электрического поля и др. Получены первые образцы прозрачных покрытий на стекле, демонстрирующие ап-конверсионную люминесценцию. Образцы испытаны в качестве преобразователей излучения для расширения спектрального диапазона чувствительности кремниевых фотоэлектронных умножителей, разрабатываемых ОАО «Интеграл», за счет преобразования возбуждающего ИК-излучения в видимое.

Важной проблемой при эксплуатации электронных изделий, использующих микросхемы, является их защита от электромагнитного излучения СВЧ-диапазона. Эта проблема решается за счет прозрачно-проводящих покрытий, способных пропускать сигнал видимого и инфракрасного диапазонов и экранировать СВЧ-излучение (длина волны более 100 мкм). Разработанные экраны на основе алюминиевых сеток [35], встроенных в анодный оксид алюминия, обеспечивают пропускание оптического сигнала на уровне 90 %. При этом слои сопротивления покрытия составляет 1 Ом/квадрат, что меньше, чем у известных аналогов из альтернативных материалов.

Авторами статьи проводятся исследования и других прозрачно-проводящих материалов. Одним из перспективных в качестве проводящих проводников является дисилицид кальция (CaSi_2). Теоретические и экспериментальные исследования электронных и оптических характеристик CaSi_2 [36, 37] показывают, что этот силицид имеет свойства бесщелевого полупроводника с двумя типами подвижных носителей заряда (электроны и дырки с концентрацией порядка 10^{21} см^{-3}) в районе уровня Ферми. Анализ коэффициентов оптического поглощения и отражения указывает на окно прозрачности в ближнем и среднем ИК-диапазонах. Установлено, что пленки CaSi_2 сохраняют низкое электрическое сопротивление при комнатной температуре – порядка 6,6 Ом/квадрат, что важно для создания полупрозрачных и проводящих контактов.

Еще одним материалом, перспективным в качестве прозрачных проводников, является субстехиометрический оксид вольфрама $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ ($\text{WO}_{2.722}$). Известно, что высший оксид вольфрама (WO_3) представляет собой широкозонный полупроводник. В то же время $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ – это выроджденный полупроводник с *n*-типом проводимости, шириной запрещенной зоны около 2 эВ и концентрацией свободных электронов порядка 10^{22} см^{-3} [38]. Анализ оптических свойств $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$ показал полосу пропускания в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Альтернативным способом защиты электронных изделий от нежелательных воздействий является разработка ученых БГУИР по защите микросхем от несанкционированного доступа. Радикальным способом защиты информации в электронных изделиях от несанкционированного доступа является их уничтожение. Авторы предлагают эту задачу решать, используя тепловой эффект от быстрого окисления наноструктурированного кремния в специализированном чипе-актюаторе [39, 40]. Так, в случае обнаружения несанкционированного проникновения к электронному устройству подается электрический либо оптический сигнал к чипу-актюатору, что инициирует процесс самоуничтожения всего электронного устройства.

Электронные межсоединения элементов интегральных микросхем

Обеспечение надежного быстродействующего электронного соединения отдельных чипов, смонтированных на печатной плате, актуально для современной электроники. Если раньше решение рисунка проводников печатной платы было достаточным для монтажа на ней различных интегральных микросхем, таких как схемы памяти, логические и другие специализированные схемы, то сейчас с ростом количества выводных электродов интегральных схем, да и самого количества микросхем, возможности двумерной интеграции на печатных платах ограничены.

Для изготовления конечных электронных изделий на основе современных микросхем между печатной платой и микросхемами помещают промежуточную пластину – интерпозер. Он обеспечивает вертикальное соединение внешних электрических выводов микросхемы с контактными областями печатной платы, как это показано на рис. 4. Таким образом, интерпозер выполняет функции интерфейса, обеспечивающего электрическую коммутацию микросхем и печатной пла-

ты (PCB – Printed Circuit Board) за счет сквозных проводников (TSV – Through Silicon Via) внутри него и шарообразных контактов (Bump) на концах этих проводников. В связи с тем, что в данном случае появляется еще одно пространственное направление межсоединений, такую интеграцию называют 2,5D-интеграцией, когда используется один интерпозер, либо 3D-интеграцией, когда используется два или более интерпозеров, как это показано на рис. 4.

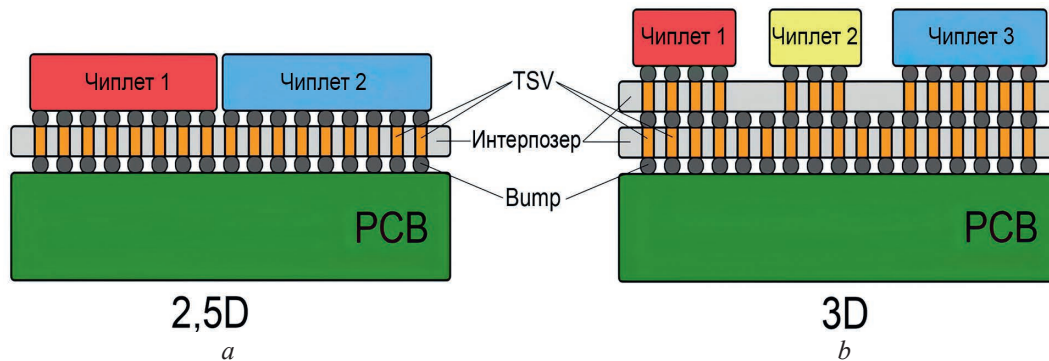


Рис. 4. Схематическое изображение 2,5D- и 3D-интеграции чиплетов через интерпозер
Fig. 4. Schematic views of 2.5D and 3D chiplet integration via interposer

Журнал Массачусетского технологического института MIT Technology Review составил список из 10 прорывных технологий, которые могут изменить мир в 2024 г. [41]. На шестое место поставлена технология чиплетов – небольших интегральных микросхем с определенным функционалом, которые соединяются при помощи 3D-интерпозеров, чтобы выполнить те же функции, как и большинство интегральных микросхем. В этом случае уменьшается себестоимость конечного изделия и расширяются его функциональные возможности. Таким образом, использование интерпозеров при изготовлении электронных устройств открывает новые перспективы 3D-интеграции специализированных микросхем.

Формирование интерпозеров начинается с изготовления микроканальных пластин. В качестве исходного рабочего материала в основном используется кремний, иногда силикатное или органическое стекло. В [42] предложена оригинальная технология изготовления интерпозеров на основе кремния или анодного оксида алюминия. В качестве исходных образцов используются алюминиевые пластины. Сквозные отверстия в них формируются при помощи операций электрохимического анодирования с последующим заполнением этих отверстий металлом [43, 44]. На рис. 5 представлены фотографии готовых микроканальных пластин из кремния (рис. 5, а) и анодного оксида алюминия (рис. 5, б). Диаметр сквозных отверстий в них составляет от 5 до 40 мкм при толщине пластин от 50 до 200 мкм.

Интерпозеры на основе кремния и анодного оксида алюминия обладают значимым преимуществом в сравнении с аналогами, изготовленными из альтернативных материалов. За счет высоких значений коэффициента теплопроводности данных материалов они эффективно рассеивают выделяющееся при работе микросхем тепло, что повышает надежность функционирования всей микросборки. Таким образом, использование интерпозеров для электронной коммутации микросхем позволяет увеличить возможности интеграции специализированных компонентов в конечных электронных изделиях. В частности, разработанные сенсоры движения на основе наноструктурированного кремния [45, 46], биосенсоры [47, 48], газовые [49–51] и температурные [52–54] сенсоры могут быть соединены со специализированными схемами управления в единое устройство благодаря 3D-интеграции с помощью интерпозеров.

При формировании интерпозеров для коммутации специализированных микросхем необходимо принимать во внимание способы корпусирования микросхем и микросборок, а также защиту конечных электронных изделий от внешних воздействий. Проблемы корпусирования микросхем обострились в последние годы из-за санкционной политики ряда стран. ОАО «Интеграл» активизировал работу по импортозамещению материалов и компонент, используемых при изготовлении корпусированных микросхем. В 2020 г. «Интеграл» объявил международный тендер по формированию антиотражающих покрытий на поверхности корпусов микросборок, используемых в космических аппаратах для дистанционного зондирования поверхности Земли. В конкурсе разработок антиотражающих покрытий участвовало несколько белорусских организаций. По результатам проведения тендера победителем была объявлена разработка БГУИР, после чего

выполнено несколько хозяйственных договоров по формированию антиотражающих покрытий на корпусах микросборок для дистанционного зондирования поверхности Земли. Сформированные покрытия имеют ряд преимуществ перед известными аналогами, среди которых – высокий коэффициент конформности, низкий коэффициент отражения и высокая надежность покрытия при испытаниях контрастными температурами [55].

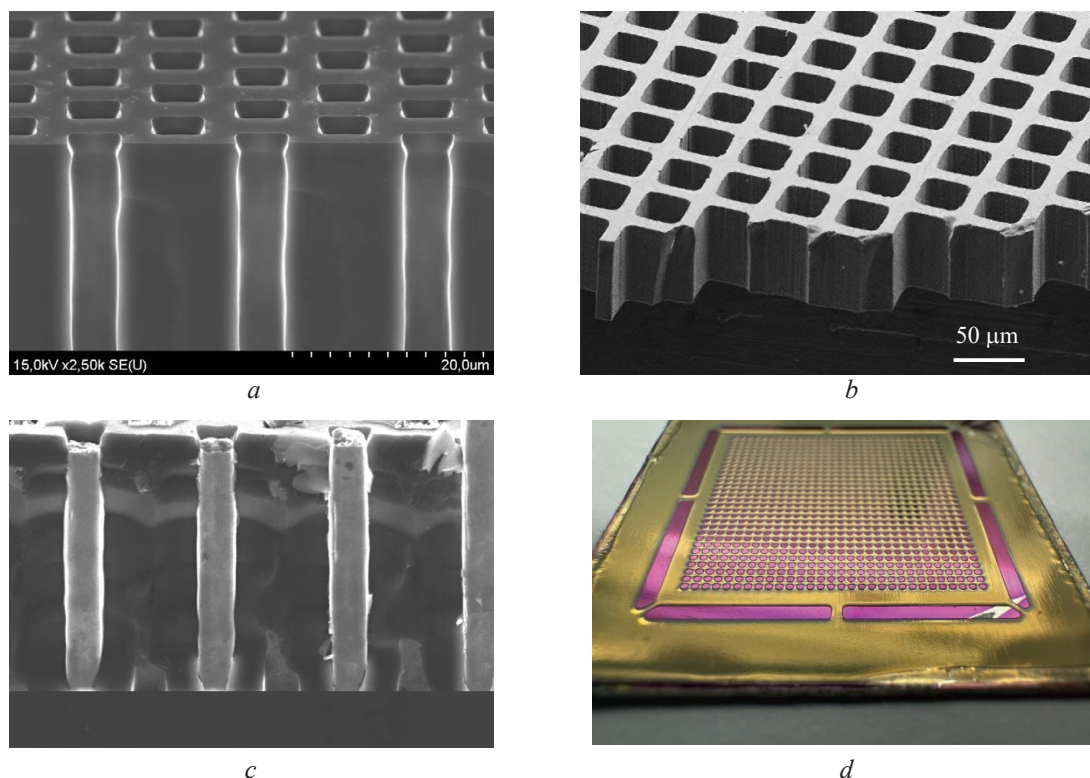


Рис. 5. Микроканальные пластины из кремния (*a*) и анодного оксида алюминия (*b*) и интерпозеры на их основе со сквозными металлическими электродами (*c, d*)

Fig. 5. Microchannel plates made of silicon (*a*) and aluminum oxide (*b*) and interposers based on them with through metal electrodes (*c, d*)

Заключение

1. Представленные результаты исследований и разработок оптических и электронных межсоединений элементов интегральных микросхем по ряду достигнутых параметров соответствуют уровню лучших мировых аналогов. Среди таких параметров – коэффициент передачи по току и рабочая частота функционирования. Следует отметить оригинальность конструкции ряда разработок отдельных компонентов интегральной фотоники: светодиодов, световодов, оптических интерпозеров, резонаторов, фотоприемников.

2. Разработанные интерпозеры позволяют интегрировать в единую микросборку различные специализированные чипы-микросхемы за счет 2,5D- и 3D-интеграции. Исследованные новые наноструктурированные функциональные покрытия открывают перспективы в совершенствовании этого направления.

Список литературы

1. Canham, L.T. Silicon Quantum Wire Array Fabricaiton by Electrochemical Dissolution of Wafers / L. T. Canham // Applied Physics Letters. 1990. Vol. 57, No 10. P. 1046–1048.
2. Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate N-Type Silicon / S. Lazarouk [et al.] // MRS Online Proceedings Library. 1994. Vol. 358. P. 659–664.
3. Stable Electroluminescence from Reverse Biased N-Type Porous Silicon-Aluminum Schottky Junction Device / S. Lazarouk [et al.] // Applied Physics Letters. 1996. Vol. 68. P. 2108–2110.
4. Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped N-Type Polysilicon / S. Lazarouk [et al.] // Thin Solid Films. 1996. Vol. 276. P. 296–298.

5. Hirschman, K. D. Silicon-Based Visible Light-Emitting Devices Integrated into Microelectronic Circuits / K. D. Hirschman, L. Tsybeskov, S. P. Duttagupta // *Nature*. 1996. Vol. 384. P. 338–341.
6. Miller, A. B. Silicon Integrated Circuits Shine / A. B. Miller // *Nature*. 1996. Vol. 384. P. 307–308.
7. Avalanche Porous Silicon Light Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects / S. Lazarouk [et al.] // *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 2001. P. 41–44. http://dx.doi.org/10.1142/9789812810861_0009.
8. Эффективность лавинных светодиодов на основе пористого кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, № 1. С. 149–152. <http://dx.doi.org/10.1134/1.1852663>.
9. Лавинные светодиоды на основе наноструктурированного кремния для оптических межсоединений / Ле Динь Ви [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 3. С. 63–71. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-3-63-71>.
10. Si-Based Optoelectronic Couple / P. Jaguiro [et al.] // *Physica E*. 2009. Vol. 41. P. 1094–1096.
11. 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer / S. K. Lazarouk [et al.] // *International Journal of Nanoscience*. 2019. Vol. 18. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219581X1940091X>.
12. Фоточувствительные свойства лавинных светодиодов на основе наноструктурированного кремния / С. К. Лазарук [и др.] // *Опто, микро- и СВЧ-электроника*. 2022. С. 175–185.
13. Влияние анодного оксида алюминия, используемого в качестве разделительного диэлектрика кремниевых лавинных светодиодов, на их характеристики / Ле Динь Ви [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2019. № 7–8. С. 165–172.
14. Формирование пористого оксида алюминия с трубчатой структурой в различных электролитах / С. К. Лазарук [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 2 т.* Минск: Физ-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси, 2022. Т. 1. Материаловедение. С. 163–172.
15. Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films / T. N. Anh Nguyen [et al.] // *Applied Surface Science*. 2018. Vol. 427. P. 649–655.
16. Enhanced Perpendicular Exchange Bias in Co/Pd Antidot Arrays / T. N. Anh Nguyen [et al.] // *Journal of Electronic Materials*. 2019. Vol. 48, No 3. P. 1492–1497.
17. Complex Magnetic Ordering in Nanoporous [Co/Pd]5-IrMn Multilayers with Perpendicular Magnetic Anisotropy and its Impact on Magnetization Reversal and Magnetoresistance / W. Wu [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 22, No 6. P. 3661–3674. <http://dx.doi.org/10.1039/C9CP05947D>.
18. Correlation of Magnetic and Magnetoresistive Properties of Nanoporous Co/Pd Thin Multilayers Fabricated on Anodized TiO₂ Templates / T. N. A. Nguyen [et al.] // *Scientific Reports*. 2020. Vol. 10.
19. Influence of Interfacial Magnetic Ordering and Field-Cooling Effect on Perpendicular Exchange Bias and Magnetoresistance in Nanoporous IrMn/[Co/Pd] Films / W. Wu [et al.] // *J. Appl. Phys.* 2020. Vol. 127.
20. Синтез легированного кислородом графитоподобного нитрида углерода из тиомочевины / Н. М. Денисов [и др.] // *Письма в журнал технической физики*. 2019. Т. 45, вып. 3. С. 49–51.
21. Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride / A. V. Baglov [et al.] // *Semiconductors*. 2020. Vol. 54, No 2. P. 228–232.
22. Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature / E. B. Chubenko [et al.] // *Cryst. Res. Technol.* 2020. Vol. 55, Iss. 3.
23. Chubenko, E. B. One-Step Synthesis of Visible Range Luminescent Multicomponent Semiconductor Composites Based on Graphitic Carbon Nitride / E. B. Chubenko, A. V. Baglov, V. E. Borisenko // *Advanced Photonics Research*. 2020. Vol. 1.
24. Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Appl. Spectrosc.* 2020. Vol. 87, No 1. P. 9–14.
25. Broad Band Photoluminescence of g-C₃N₄/ZnO/ZnS Composite Towards White Light Source / E. B. Chubenko [et al.] // *Mater. Sci. Eng. B*. 2021. Vol. 267.
26. Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass / E. B. Chubenko [et al.] // *Int. J. Nanosci.* 2019. Vol. 18, No 3–4.
27. Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized g-C₃N₄ Layered Films / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Phys. Chem.* 2022. Vol. 126, No 9. P. 4710–4714.
28. Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films / E. B. Chubenko [et al.] // *Materialia*. 2023. Vol. 28.
29. Янушкевич, К. О. Формирование и оптические свойства осажденного электрохимическим методом легированного никелем оксида цинка / К. О. Янушкевич, Е. Б. Чубенко, В. Е. Борисенко // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 2. С. 37–44. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-2-37-44>.
30. Формирование электрохимическим методом композитных материалов на основе оксида цинка и меди / Н. М. Ткачёнок, Е. Б. Чубенко, В. П. Бондаренко // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 5. С. 17–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-17-25>.
31. Optical Properties of Hydrothermally Deposited Ni and Co Doped Nanostructured ZnO Thin Films as Scintillating Coatings for Beta-Particles Detection / E. B. Chubenko [et al.] // *J. Lumin.* 2022. Vol. 247.

32. Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived BaTiO₃/SiO₂ Multilayer Cavity Structure / N. V. Gaponenko [et al.] // *Optical Materials*. 2019. Vol. 96.
33. Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO₃ Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium / E. I. Lashkovskaya [et al.] // *Gels*. 2022. Vol. 8. <http://dx.doi.org/10.3390/gels8060347>.
34. Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO₃ Film Structures and the Target Form / N. V. Gaponenko [et al.] // *Photonics*. 2023. Vol. 10, No 4.
35. Оптические свойства прозрачных проводящих покрытий на основе алюминиевой решетки, встроенной в анодный оксид алюминия / С. К. Лазарук [и др.] // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сб. науч. тр. В 2 кн. Минск: Физ.-техн. ин-т Нац. акад. наук Беларуси, 2023. Кн. 1: Материаловедение. С. 168–176.*
36. Conductive CaSi₂ Transparent in the Near Infra-Red Range / N. G. Galkin [et al.] // *J. Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 770, No 2. P. 710–720.
37. Ca Silicide Films-Promising Materials for Silicon Optoelectronics / N. G. Galkin [et al.] // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2023. Vol. 62.
38. Migas, D. B. Effects of Bipolarons on Oxidation States, and the Electronic and Optical Properties of W₁₈O₄₉ / D. B. Migas, A. B. Filonov, N. V. Skorodumova // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2021. Vol. 23.
39. Быстрые экзотермические процессы в пористом кремнии / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2005. Т. 39, вып. 8. С. 917–919.
40. Использование процессов горения и взрыва наноструктурированного пористого кремния в микро-системных устройствах / С. К. Лазарук [и др.] // *Физика и техника полупроводников*. 2007. Т. 39. С. 1130–1134.
41. 10 Breakthrough Technologies [Electronic Resource] // MIT Technology Review. Mode of access: <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/#chipllets>. Date of access: 23.01.2024.
42. Method of Making Multilevel Interconnections of Electronic Parts: United States Patent No 5,880,021 / V. A. Labunov [et al.]. March 9, 1999.
43. Электрохимическое заполнение TSv-отверстий на реверсированном токе / Л. К. Кушнер [и др.] // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: матер. Междунар. науч.-техн. конф. INTERMATIC-2018*. 2018. Т. 18, № 1. С. 179–182.
44. Lazarouk, S. K. High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask / S. K. Lazarouk // *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 2013. P. 355–358.
45. Self-Powered Acoustic Sensor Based on Triboelectric Nanogenerator for Smart / Y. Li [et al.] // *Acoustics Australia*. 2022. Vol. 50. P. 383–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s40857-022-00275-4>.
46. A Micro-Airflow Sensor Sustem Enabled by Triboelectric Nano-Generator for Lab Safety and Human-Computer Interaction / X. Wang [et al.] // *IEEE Sensors Journal*. 2024. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350707>.
47. A Highly Sensitive Silicon Nanowire Array Sensor for Joint Detection of Tumor Markers CEA and AFP / K. Lu [et al.] // *Biomaterials Science*. 2022. Vol. 10, No 14. P. 3823–3830.
48. A Supersensitive Silicon Nanowire Array Biosensor for Quantitating Tumor Marker ctDNA / L. Dujuan [et al.] // *Biosensors and Bioelectronics*. 2021. Vol. 181.
49. Spatially Ordered Matrix of Nanostructured Tin-Tungsten Oxides Nanocomposites Formed by Ionic Layer Deposition for Gas Sensing / G. Gorokh [et al.] // *Sensors*. 2021. Vol. 21. P. 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21124169>.
50. A Micropowered Chemosensitive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and Sn_xBi_kMo_yO_z Nanocomposite / G. Gorokh [et al.] // *Sensors*. 2022. Vol. 22.
51. Heater Topology Influence on the Functional Characteristics of Thin-Film Gas Sensors Made by MEMS-Silicon Technology / G. Gorokh [et al.] // *Chemosensors*. 2023. Vol. 11. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11080443>.
52. A New Approach for Producing of Film Structures Based on Si_{1-x}Ge_x / I. M. Gavrilin [et al.] // *Mater. Lett.* 2022. Vol. 313.
53. Germanium Electrodeposition into Porous Silicon for Silicon-Germanium Alloying / N. Grevtsov [et al.] // *Materialia*. 2022. Vol. 26.
54. Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices / N. Grevtsov [et al.] // *Materials Today Communications*. 2024. Vol. 38.
55. Лазарук, С. К. Формирование наноструктурированных антиотражающих покрытий на титановых элементах оптических устройств / С. К. Лазарук, Д. А. Сасинович, С. В. Гранько // *Мокеровские чтения: сб. тр. 12-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технол. наногетероструктурной СВЧ-электроники, 2021. С. 127–128.*

References

1. Canham L. T. (1990) Silicon Quantum Wire Array Fabricaiton by Electrochemical Dissolution of Wafers. *Applied Physics Letters*. 57 (10), 1046–1048.

2. Lazarouk S., Bondarenko V., Pershukevich P., La Monica S., Maiello G., Ferrari A. (1994) Visible Electroluminescence from Al-Porous Silicon Reverse Bias Diodes Formed on the Base of Degenerate N-Type Silicon. *MRS Online Proceedings Library*. 358, 659–664.
3. Lazarouk S., Jaguiro P., Katsouba S., Masini G., La Monica S., Maiello G., et al. (1996) Stable Electroluminescence from Reverse Biased N-Type Porous Silicon-Aluminum Schottky Junction Device. *Appl. Phys. Lett.* 68, 2108–2110.
4. Lazarouk S., Bondarenko V., La Monica S., Maello G., Masini G., Pershukevich P., et al. (1996) Electroluminescence from Aluminum-Porous Silicon Reverse Bias Schottky Diodes Formed on the Base of Highly Doped N-Type Polysilicon. *Thin Solid Films*. 276, 296–298.
5. Hirschman K. D., Tsybeskov L., Duttagupta S. P. (1996) Silicon-Based Visible Light-Emitting Devices Integrated into Microelectronic Circuits. *Nature*. 384, 338–341.
6. Miller A. B. (1996) Silicon Integrated Circuits Shine. *Nature*. 384, 307–308.
7. Lazarouk S., Jaguiro P., Leshok A., Borisenko V. (2001) Avalanche Porous Silicon Light Emitting Diodes for Optical Intra-Chip Interconnects. *Microelectronics, Microsystems and Nanotechnology*. World Scientific. 41–44. http://dx.doi.org/10.1142/9789812810861_0009.
8. Lazarouk S. K., Leshok A. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Efficiency of Avalanche Light-Emitting Diodes Based on Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (1), 149–152 (in Russian).
9. Le Dinh Vi, Leshok A. A., Dolbik A. V., Perko S. L., Lazarouk S. K. (2020) Avalanche LEDs Based on Nanostructured Silicon for Optical Interconnects. *Doclady BGUIR*. 18 (3), 63–71 (in Russian).
10. Jaguiro P., Katsuba P., Lazarouk S., Moore S., Smirnov A. (2009) Si-Based Optoelectronic Couple. *Physica E*. 41, 1094–1096.
11. Lazarouk S., Leshok A., Kozlova T., Dolbik A., Le Dinh V., Ilkov V., et al. (2019) 3D Silicon Photonic Structures Based on Avalanche LED with Interconnections through Optical Interposer. *International Journal of Nanoscience*. 18. <http://dx.doi.org/10.1142/S0219581X1940091X>.
12. Lazarouk S. K., Dudich V. V., Klyutsky A. Y., Dolbik A. V., Leshok A. A., Dudarenko V. N., et al. (2022) Photosensitive Properties of Avalanche Leds Based on Nanostructured Silicon. *Opto, Micro- and Microwave Electronics*. 175–185 (in Russian).
13. Le Dinh Vi, Klyutsky A. Y., Dolbik A. A., Leshok A. A., Lazarouk S. K. (2019) The Influence of Anodic Aluminum Oxide Used as a Separating Dielectric of Silicon Avalanche LEDs on Their Characteristics. *Doclady BGUIR*. (7–8), 165–172 (in Russian).
14. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Orekhovskaya T. I., Kupreeva O. V., Korotkevich A. V., Dudich V. V., et al. (2022) Formation of Porous Aluminum Oxide with a Tubular Structure in Various Electrolytes. Book 1: Materials Science. *Modern Methods and Technologies for Creating and Processing Materials, a Collection of Scientific Papers*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 163–172 (in Russian).
15. Anh Nguyen T. N., Fedotova J., Kasiuk J., Bayev V., Kupreeva O., Lazarouk S., et al. (2018) Effect of Flattened Surface Morphology of Anodized Aluminum Oxide Templates on the Magnetic Properties of Nanoporous Co/Pt and Co/Pd Thin Multilayered Films. *Applied Surface Science*. 427, 649–655.
16. Anh Nguyen T. N., Fedotova J., Kasiuk J., Wu W.-B., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2019) Enhanced Perpendicular Exchange Bias in Co/Pd Antidot Arrays. *Journal of Electronic Materials*. 48 (3), 1492–1497.
17. Wu W., Kasiuk J., Nguyen T. N. A., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Complex Magnetic Ordering in Nanoporous [Co/Pd]5-IrMn Multilayers with Perpendicular Magnetic Anisotropy and its Impact on Magnetization Reversal and Magnetoresistance. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 22 (6), 3661–3674. <http://dx.doi.org/10.1039/C9CP05947D>.
18. Nguyen T. N. A., Wu W., Kasiuk J., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Correlation of Magnetic and Magnetoresistive Properties of Nanoporous Co/Pd Thin Multilayers Fabricated on Anodized TiO₂ Templates. *Scientific Reports*. 10.
19. Wu W., Kasiuk J., Nguyen T. N. A., Fedotova J., Przewoznik J., Kapusta C., et al. (2020) Influence of Interfacial Magnetic Ordering and Field-Cooling Effect on Perpendicular Exchange Bias And Magnetoresistance in Nanoporous IrMn/[Co/Pd] Films. *J. Appl. Phys.* 127.
20. Denisov N. M., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., Borisenko V. E. (2019) Synthesis of Oxygen-Doped Graphite-Like Carbon Nitride from Thiourea. *Technical Physics Letters*. 45 (3), 49–51 (in Russian).
21. Baglov A. V., Chubenko E. B., Hnitsko A. A., Borisenko V. E., Malashevich A. A., Uglov V. V. (2020) Structural and Photoluminescence Properties of Graphite-Like Carbon Nitride. *Semiconductors*. 54 (2), 228–232.
22. Chubenko E. B., Denisov N. M., Baglov A. V., Bondarenko V. P., Uglov V. V., Borisenko V. E. (2020) Recovery Behavior of the Luminescence Peak from Graphitic Carbon Nitride as a Function of the Synthesis Temperature. *Cryst. Res. Technol.* 55 (3).
23. Chubenko E. B., Baglov A. V., Borisenko V. E. (2020) One-Step Synthesis of Visible Range Luminescent Multicomponent Semiconductor Composites Based on Graphitic Carbon Nitride. *Advanced Photonics Research*. 1.
24. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leonenya M. S., Yablonskii G. P., Borisenko V. E. (2020) Structure of Photoluminescence Spectra of Oxygen-Doped Graphitic Carbon Nitride. *Journal of Applied Spectroscopy*. 87 (1), 9–14.

25. Chubenko E. B., Baglov A. V., Leania M. S., Urmanov B. D., Borisenko V. E. (2021) Broad Band Photoluminescence of $g\text{-C}_3\text{N}_4/\text{ZnO}/\text{ZnS}$ Composite Towards White Light Source. *Materials Science and Engineering B*. 267.
26. Chubenko E. B., Baglov A. V., Lisimova E. S., Borisenko V. E. (2019) Synthesis of Graphitic Carbon Nitride in Porous Silica Glass. *International Journal of Nanoscience*. 18 (3–4).
27. Chubenko E. B., Kovalchuk N. G., Komissarov I. V., Borisenko V. E. (2022) Chemical Vapor Deposition of 2D Crystallized $g\text{-C}_3\text{N}_4$ Layered Films. *J. Phys. Chem. C*. 126 (9), 4710–4714.
28. Chubenko E. B., Maximov S. E., Bui C. D., Pham V. T., Borisenko V. E. (2023) Rapid Chemical Vapor Deposition of Graphitic Carbon Nitride Films. *Materialia*. 28.
29. Yanushkevich K. O., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. (2020) Formation and Optical Properties of Nickel-Doped Zinc Oxide Deposited by Electrochemical Method. *Doklady BGUIR*. 18 (2), 37–44 (in Russian).
30. Tkachenok N. M., Chubenko E. B., Bondarenko V. P. (2020) Formation of Composite Materials Based on Zinc and Copper Oxide by Electrochemical Method. *Doklady BGUIR*. 18 (5), 17–25 (in Russian).
31. Chubenko E. B., Alhamd M. W., Bondarenko V. P. (2022) Optical Properties of Hydrothermally Deposited Ni and Co Doped Nanostructured ZnO Thin Films as Scintillating Coatings for Beta-Particles Detection. *J. Lumin.* 247.
32. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Raichenok T. F., Prislowski S. Ya. (2019) Enhanced Luminescence of Europium in Sol-Gel Derived $\text{BaTiO}_3/\text{SiO}_2$ Multilayer Cavity Structure. *Optical Materials*. 96.
33. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., et al. (2022) Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO_3 Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium. *Gels*. 8. <http://dx.doi.org/10.3390/gels8060347>.
34. Gaponenko N. V., Staskov N. I., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Karnilava Y. D., et al. (2023) Upconversion Luminescence from Sol-Gel-Derived Erbium- and Ytterbium-Doped BaTiO_3 Film Structures and the Target Form. *Photonics*. 10 (4).
35. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Zavadsky S. M., Golosov D. A., Meledina M. V., Dolbik A. V., et al. (2023) Optical Properties of Transparent Conductive Coatings Based on an Aluminum Grid Embedded in Anodic Aluminum Oxide. Book 1: Materials Science. *Advanced Methods and Technologies of Materials Development and Processing*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. 168–176 (in Russian).
36. Galkin N. G., Galkin K. N., Goroshko D. L., Dotsenko S. A., Kropachev O. V., Chernev I. M., et al. (2019) Conductive CaSi_2 Transparent in the Near Infra-Red Range. *J. Alloys and Compounds*. 770 (2), 710–720.
37. Galkin N. G., Galkin K. N., Goroshko D. L., Dotsenko S. A., Kropachev O. V., Chernev I. M., et al. (2023) Ca Silicide Films-Promising Materials for Silicon Optoelectronics. *Jpn. J. Appl. Phys.* 62.
38. Migas D. B., Filonov A. B., Skorodumova N. V. (2021) Effects of Bipolarons on Oxidation States, and the Electronic and Optical Properties of $\text{W}_{18}\text{O}_{49}$. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 23.
39. Lazarouk S. K., Dolbik A. V., Zhagirop P. V., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2005) Fast Exothermic Processes in Porous Silicon. *Semiconductors*. 39 (8), 917–919 (in Russian).
40. Lazarouk S. K., Dolbik V. A., Labunov V. A., Borisenko V. E. (2007) Combustion and Explosion of Nanostructured Silicon in Microsystem Devices. *Semiconductors*. 39, 1130–1134 (in Russian).
41. 10 Breakthrough Technologies. *MIT Technology Review*. Available: <https://www.technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/#chipllets> (Accessed 23 January 2024).
42. Labunov V. A. (1999) *Method of Making Multilevel Interconnections of Electronic Parts*. United States Patent No 5,880,021.
43. Kushner L. K., Stepanova L. I., Kuzmar I. I., Khmyl A. A., Lazarouk S. K., Dolbik A. V. (2018) Electrochemical Filling of TSv-Holes on Reverse Current. *Fundamental Problems of Radio-Electronic Instrument Making: Materials of the International Scientific and Technical Conference "INTERMATIC-2018"*. 18 (1), 179–182 (in Russian).
44. Lazarouk S. K. (2013) High Field Porous Anodization of Aluminium Films with a Photolithographic Mask. *Physics, Chemistry and Application of Nanostructures*. 355–358 (in Russian).
45. Li Y., Liu C., Hu S., Sun P., Fang L., Lazarouk S., et al. (2022) Self-Powered Acoustic Sensor Based on Triboelectric Nanogenerator for Smart. *Acoustics Australia*. 50, 383–391. <http://dx.doi.org/10.1007/s40857-022-00275-4>.
46. Wang X., Li Y., Liu C., You W., Zou H., Yue C., et al. (2024) A Micro-Airflow Sensor System Enabled by Triboelectric Nano-Generator for Lab Safety and Human-Computer Interaction. *IEEE Sensors Journal*. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2024.3350707>.
47. Lu K., Liu C., Wang G., Yang W., Fan K., Lazarouk S., et al. (2022) A Highly Sensitive Silicon Nanowire Array Sensor for Joint Detection of Tumor Markers. *CEA and AFP Biomaterials Science*. 10 (14), 3823–3830.
48. Li D., Chen H., Fan K., Labunov V., Lazarouk S., Yue X., et al. (2021) A Supersensitive Silicon Nanowire Array Biosensor for Quantitating Tumor Marker ctDNA. *Biosensors and Bioelectronics*. 181.
49. Gorokh G., Bogomazova N., Taleb A., Zhylinski V., Galkovsky T., Zakhlebayaeva A., et al. (2021) Spatially Ordered Matrix of Nanostructured Tin-Tungsten Oxides Nanocomposites Formed by Ionic Layer Deposition for Gas Sensing. *Sensors*. 21, 1–14. <https://doi.org/10.3390/s21124169>.

50. Gorokh G., Zakhlebayaeva A., Taratyn I., Lozovenko A., Zhylnski V., Iji M., et al. (2022) A Micropowered Chemoresistive Sensor Based on a Thin Alumina Nanoporous Membrane and $\text{Sn}_x\text{Bi}_k\text{Mo}_y\text{O}_z$ Nanocomposite. *Sensors*. 22.
51. Gorokh G., Taratyn I., Fiadosenka U., Reutskaya O., Lozovenko A. (2023) Heater Topology Influence on the Functional Characteristics of Thin-Film Gas Sensors Made by MEMS-Silicon Technology. *Chemosensors*. 11. <https://doi.org/10.3390/chemosensors11080443>.
52. Gavrilin I. M., Grevtsov N. L., Pavlikov A. V., Dronov A. A., Chubenko E. B., Bondarenko V. P., et al. (2022) A New Approach for Producing of Film Structures Based on $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. *Mater. Lett.* 313.
53. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S. (2022) Germanium Electrodeposition into Porous Silicon for Silicon-Germanium Alloying. *Materialia*. 26.
54. Grevtsov N., Chubenko E., Bondarenko V., Gavrilin I., Dronov A., Gavrilov S., et al. (2024) Composition-Adjustable Silicon-Germanium Alloy Films Based on Porous Silicon Matrices. *Materials Today Communications*. 38.
55. Lazarouk S. K., Sasinovich D. A., Granko S. V. (2021) Formation of Nanostructured Anti-Reflection Coatings on Titanium Elements of Optical Devices. *The 12th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructural Microwave Electronics*. 127–128 (in Russian).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Лазарук С. К., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Бондаренко В. П., канд. техн. наук, доц., зав. науч.-исслед. лаб. «Материалы и структуры нанoeлектроники» НИЧ, БГУИР

Борисенко В. Е., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Гапоненко Н. В., д-р физ.-мат. наук, проф., проф. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Горох Г. Г., канд. техн. наук, зав. науч.-исслед. лаб. «Нанотехнологии» НИЧ, БГУИР

Лешок А. А., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Мигас Д. Б., д-р физ.-мат. наук, доц., зав. каф. микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Чубенко Е. Б., канд. техн. наук, доц., доц. кафедры микро- и нанoeлектроники, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Лазарук Сергей Константинович

Information about the authors

Lazarouk S. K., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Bondarenko V. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Scientific Research Laboratory “Materials and Structures of Nanoelectronics” of R&D Department, BSUIR

Borisenko V. E., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Gaponenko N. V., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Professor, Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Gorokh G. G., Cand. of Sci., Head of the Scientific Research Laboratory “Nanotechnologies” of R&D Department, BSUIR

Leshok A. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Migas D. B., Dr. of Sci. (Phis. and Math.), Associate Professor, Head of the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-88-69
E-mail: serg@nano.bsuir.edu.by
Lazarouk Sergei Konstantinovich