



Планарная фотоника ближнего инфракрасного диапазона на основе сверхлегированного кремния: перспективы

М. С. Ковалев¹, И. М. Подлесных^{1,2}, К. Э. Певчих³,
С. И. Кудряшов^{1,2}

¹ Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН,
Москва, Россия

² НИУ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

³ АО «ЗНТЦ», Зеленоград, Москва, Россия

Появление кремниевой фотоники за последние два десятилетия создало условия для того, чтобы кремний стал предпочтительной платформой для фотонной интеграции. В этом обзоре мы предлагаем наш взгляд на растущую область интегральной фотоники ближнего инфракрасного диапазона на кремнии и перспективные технологии обеспечения этого роста. Представлен комплексный обзор современного состояния таких ключевых фотонных устройств, как волноводы, источники света и детекторы.

Ключевые слова: сверхлегированный кремний, интегральная фотоника инфракрасного диапазона, импульсный лазерный отжиг, прямая лазерная запись, оптоэлектроника

Статья получена: 21.02.2024

Статья принята: 13.03.2024

ВВЕДЕНИЕ

Диапазон ближнего инфракрасного (БИК) излучения, охватывающий длины волн от 0,78 до 3 мкм [1], является важной технологической областью для различных приложений: микроэлектроники, телекоммуникаций и оптоэлектроники. Технические характеристики устройств, входя-

Near-Infrared Planar Photonics Based on Hyperdoped Silicon: Prospects

М. S. Kovalev¹, I. M. Podlesnykh^{1,2}, К. E. Pevchikh³,
S. I. Kudryashov^{1,2}

¹ P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² National Research University "Bauman Moscow State Technical University", Moscow, Russia

³ Zelenograd Nanotechnology Center JSC, Zelenograd, Moscow, Russia

The development of silicon photonics over the past two decades has made silicon the preferential platform for photonic integration. In this paper, we offer our views toward the increasing field of integrated silicon-based near-infrared photonics. A comprehensive overview of the state-of-the-art key photonic devices is given, including the waveguides, light sources, and detectors.

Keywords: hyperdoped silicon, integrated infrared photonics, pulsed laser annealing, direct laser beam writing, optoelectronics.

Article received: 21.02.2024

Article accepted: 13.03.2024

INTRODUCTION

The near-infrared (NIR) range, covering the wavelengths from 0.78 μm to 3 μm [1], is an important technological area for various applications: microelectronics, telecommunications, and optoelectronics. The technical specifications of devices included in the optoelectronic systems and complexes operating in the NIR range are often subject to deterioration due to the increased sensitivity to the thermal fluctuations. Such effects require the development of systems that ensure stable cooling, especially for the radiation receivers used in such systems. The up-to-date commercial NIR-sensitive infrared photodetectors are mostly based on narrow-band-gap semiconductors such as Ge (0.7–1.8 μm), InGaAs (1.1–1.7 μm), and InAs (0.9–3.5 μm), as well as other materials. However,



щих в оптико-электронные системы и комплексы, работающие в диапазоне БИК, часто подвержены ухудшению из-за повышенной чувствительности к тепловым колебаниям. Такие эффекты требуют разработки систем обеспечения стабильного охлаждения, особенно для применяемых в таких системах приемников излучения. Современные коммерческие инфракрасные фотодетекторы, чувствительные в БИК-диапазоне, в большинстве своем основаны на узкозонных полупроводниках, таких как Ge (0,7–1,8 мкм), InGaAs (1,1–1,7 мкм) и InAs (0,9–3,5 мкм), а также других материалах. Однако производство таких фотодетекторов дорогостоящее, к тому же технологии их создания несовместимы с КМОП-процессом на основе кремния (Si), что ограничивает их интеграцию в Si-оптоэлектронику. При этом кремний является наиболее распространенным и экономически выгодным полупроводниковым материалом. Но ширина его запрещенной зоны в 1,12 эВ (при 300 К) ограничивает поглощение фотонов ИК-диапазона с длиной волны более 1,1 мкм.

Методы и подходы Si-фотоники в БИК-диапазоне с использованием КМОП-технологии позволяют интегрировать множество оптических элементов на одном чипе [2]. Подобная технология также открывает возможность создания субмикронных волноводов и компактной упаковки оптических элементов на поверхности чипа, что отражается на доступности соответствующих продуктов на рынке и подтверждает их потенциальную пригодность для различных областей техники. Несмотря на эти преимущества, существует ряд технических ограничений в интеграции лазерных источников, оптических усилителей и изоляторов, а также приемников на Si-платформе.

В данной статье мы представляем наше видение растущей области интегральной фотоники БИК-диапазона. Si, используемый в качестве подложки, обладает уникальным сочетанием самых разных характеристик: больших размеров, прочности, химической и термической стабильности, доступности и низкой стоимости. Также он характеризуется высоким показателем преломления и обладает окном прозрачности в рассматриваемом диапазоне, что позволяет использовать его в качестве пассивного оптического материала. Тем не менее, интеграция новых материалов, «гибридно-интегрированных» с Si, является необходимым условием для создания интегральных фотонных систем БИК-диапазона. Эта тенденция аналогична использованию новых материалов в микроэлектронной промышленности. Цель этой

such photodetectors are expensive to be produced and their technology is not compatible with the silicon-based (Si) CMOS process, thus limiting their integration into the Si-optoelectronics. Moreover, silicon is the most common and cost-effective semiconductor material. However, its band gap with the width of 1.12 eV (at 300K) limits the IR photon absorption with the wavelengths of more than 1.1 μm .

The methods and approaches of Si-photonics in the NIR range using the CMOS technology make it possible to integrate a lot of optical elements into a single chip [2]. Moreover, such a technology opens up potential for developing submicron waveguides and packed placement of optical elements on the chip surface that affects the market availability of relevant products and confirms their potential suitability for various fields of technology. Despite these advantages, there are a number of technical limitations in the integration of laser sources, optical amplifiers and insulators, and receivers onto the Si platform.

In this article, we present our views toward the developing field of integrated NIR range photonics. Silicon, used as a substrate, has a unique combination of various specifications, such as large dimensions, strength, chemical and thermal stability, availability and low cost. It is also specified by a high refractive index and has a transmission window in the considered range that allows it to be used as a passive optical material. However, the integration of new materials that are hybrid-integrated with Si is a prerequisite for the integrated NIR photonic systems. This trend is similar to the application of new materials in the microelectronics industry. The purpose of this article is to provide an overview of the state-of-the-art NIR devices that are integrated using the Si-based technologies, including both monolithic and hybrid approaches, as well as a consideration of relevant material technologies beyond the area of silicon.

WAVEGUIDES AND PASSIVE DEVICES

The passive components made from the optically transparent materials play a key role in the photonic integrated circuits. The material transparency in the NIR range begins at the wavelength corresponding to the occurrence of phonon absorption. The material transmission window expansion in this range provides for the replacement of lighter elements with the heavier ones to reduce the typical phonon frequency. This trend is illustrated by Fig. 1 that shows the transmission windows of various optical materials determined as the spectral regions where absorption is <1 dB/cm [3]. This figure demonstrates the ability to make a solid choice of a passive material platform in

статьи – представить обзор современных устройств БИК-диапазона, которые интегрированы с использованием технологий на основе Si, включая как монолитные, так и гибридные подходы, а также рассмотрение соответствующих технологий материалов, выходящих за рамки Si.

ВОЛНОВОДЫ И ПАССИВНЫЕ УСТРОЙСТВА

Пассивные компоненты, изготовленные из оптически прозрачных материалов, играют ключевую роль в фотонно-интегральных схемах. В БИК-диапазоне непрозрачность материалов начинается на длине волны, соответствующей началу поглощения фононов. Расширение окна прозрачности материала в данном диапазоне подразумевает замену более легких элементов на более тяжелые для снижения характерной фоновой частоты. Эта тенденция проиллюстрирована рис. 1, где представлены окна прозрачности различных оптических материалов, определяемых как спектральные области, в которых поглощение составляет <1 дБ/см [3]. Рисунок демонстрирует возможность обоснованного выбора платформы из пассивных материалов в различных частях БИК-диапазона. И для длин волн короче 2 мкм стандартными технологиями являются кремний на изоляторе (КНИ) и нитрид кремния (Si_3N_4).

Существуют другие фотонные платформы, не включенные в перечисленные выше. Одна из стратегий предполагает замену оболочки из оксида кремния, имеющего потери, другими материалами, например, нитридом кремния [4] или нитридом германия. Другой вариант – использование германия на кремнии (Ge-on-Si или SiGe-on-Si), что обеспечивает совместимость с КМОП-процессами обработки Si, так как высококачественный германий может быть эпитаксиально выращен на Si [5]. Кроме того, высокий коэффициент преломления Ge означает, что

various parts of the NIR range. For the wavelengths shorter than $2 \mu\text{m}$, the standard technologies are silicon-on-insulator (SOI) and silicon nitride (Si_3N_4).

There are other photonic platforms not listed above. One strategy involves the replacement of lossy silicon oxide cladding with other materials, such as silicon nitride [4] or germanium nitride. Another option is to use germanium-on-silicon (Ge-on-Si or SiGe-on-Si) that provides compatibility with the Si-processing CMOS processes, since the high-quality germanium can be epitaxially grown on Si [5]. In addition, the high refractive index of Ge implies that the Si substrate can be used as a lower cladding. On the other part, the IR-trans-

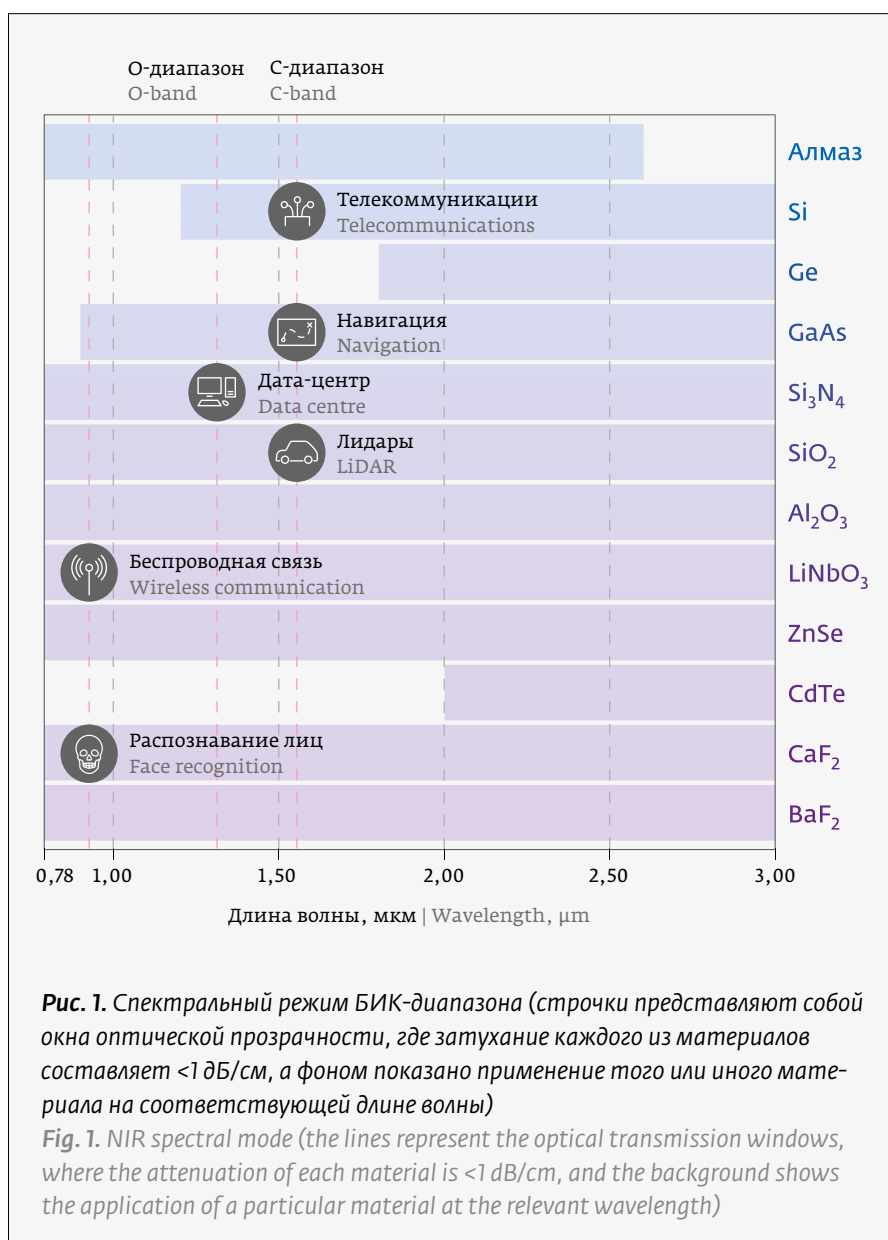


Рис. 1. Спектральный режим БИК-диапазона (строчки представляют собой окна оптической прозрачности, где затухание каждого из материалов составляет <1 дБ/см, а фоном показано применение того или иного материала на соответствующей длине волны)

Fig. 1. NIR spectral mode (the lines represent the optical transmission windows, where the attenuation of each material is <1 dB/cm, and the background shows the application of a particular material at the relevant wavelength)



Si-подложка может выполнять роль нижней оболочки. С другой стороны, халькогениды и галогениды, прозрачные для ИК-излучения, могут быть монолитно нанесены на Si- или диэлектрические подложки путем термического испарения или распыления, при этом волноводы формируются из двух композиций с различными коэффициентами преломления в качестве сердцевины и оболочки. По сравнению с Si- или Ge-слоями недостатком этого подхода является то, что обычно халькогениды и галогениды считаются не совместимыми с КМОП-процессами. Однако недавние публикации об интеграции халькогенидных устройств с Si-волноводами указывают на то, что такая гибридная конфигурация может обеспечить плавную интеграцию нетрадиционных материалов со стандартной платформой Si-фотоники [6].

Сегодня известно, что легирование представляет собой простую и эффективную технологию, позволяющую изменять свойства полупроводников, что значительно расширяет области их применения, в том числе в фотонно-интегральных схемах [7]. Легирование Si мелкими акцепторными (B) или донорными (P, As, Sb) примесями III и V группы периодической системы позволяет придавать ему необходимый тип и степень проводимости, что находит широкое применение в оптоэлектронике для создания разнообразных устройств. Однако возникает потребность в расширении функциональных возможностей Si в области ближнего и среднего ИК-излучения (0,78-10 мкм), где базовыми материалами для оптоэлектроники являются узкозонные полупроводники типа A_3B_5 (InAs, InSb) и CdHgTe. Тем не менее, технология обработки таких материалов плохо совместима с традиционной Si-технологией. Перспективным подходом для увеличения поглощения Si в области длин волн 0,78-10 мкм является его сверхлегирование (hyperdoping) – внедрение глубоких примесей (S, Se, Te, Ti, V, Fe, Co, Ni, Ag, Au) с энергией ионизации 0,1-0,5 эВ. При сверхлегировании концентрация примесей превышает 10^{19} см^{-3} , что существенно (на несколько порядков) выше равновесной растворимости этих примесей в Si (10^{15} - 10^{16} см^{-3}) и приводит к формированию примесных зон [8]. Присутствие таких зон способствует поглощению фотонов с низкой энергией. Недавние исследования по сверхлегированию Si уже показали перспективные результаты по высокому уровню оптического поглощения Si в области длин волн 0,78-10 мкм (до 50%), а также получению фотоотклика на фотодиодных структурах до 500 мА/Вт на длинах волн 1,31 и 1,55 мкм.

parent chalcogenides and halides can be deposited monolithically on the Si or dielectric substrates by thermal evaporation or sputtering, while the waveguides consist of two compositions with various refractive indices as the core and cladding. When comparing to the Si or Ge layers, the disadvantage of this approach is that chalcogenides and halides are generally considered incompatible with the CMOS processes. However, the recent publications devoted to the integration of chalcogenide devices with the Si waveguides indicate that such a hybrid configuration can enable smooth integration of alternative materials with a standard Si photonics platform [6].

At present, it is well-known that doping is a simple and efficient technology that allows to change the properties of semiconductors that significantly expands the scope of their application, including in the photonic integrated circuits [7]. The silicon doping with the acceptor (B) or donor (P, As, Sb) impurities from groups III and V of the periodic table allows it to be provided with the required conductivity type and degree that is widely used in optoelectronics to produce a variety of devices. However, there is a need to expand the silicon functionality in the near and mid-IR range (0.78-10 μm), where the base materials for optoelectronics are the narrow-band-gap semiconductors of the A_3B_5 type (InAs, InSb) and CdHgTe. However, the processing technology for such materials is poorly compatible with the conventional Si technology. A promising approach to increase the Si absorption in the wavelength range of 0.78-10 μm is its hyperdoping, namely introduction of deep level impurities (S, Se, Te, Ti, V, Fe, Co, Ni, Ag, Au) with the ionization energy of 0.1-0.5 eV. In the case of hyperdoping, the impurity concentration exceeds 10^{19} cm^{-3} that is significantly (by several orders of magnitude) higher than the equilibrium solubility of these impurities in Si (10^{15} - 10^{16} cm^{-3}) and leads to the development of impurity zones [8]. The availability of such zones promotes the absorption of low-energy photons. The recent studies devoted to Si hyperdoping have already shown promising results in terms of the high level of Si optical absorption in the wavelength range of 0.78-10 μm (up to 50%), as well as obtaining a photoresponse on the photodiode structures up to 500 mA/W at the wavelengths of 1.31 and 1.55 microns.

Table 1 demonstrates the various passive platforms available for the Si-based integrated NIR photonics, including the best results in low loss performance achieved in each category.



Табл. 1 демонстрирует различные пассивные платформы, доступные для интегральной фотоники в БИК-диапазоне на основе Si, включая наилучшие результаты по производительности с низкими потерями, достигнутые в каждой категории.

ТЕХНОЛОГИЯ СВЕРХЛЕГИРОВАНИЯ КРЕМНИЯ

Одним из основных условий для обеспечения внутризонного поглощения света в сверхлегированных Si-образцах является создание высоких концентраций глубоких примесей (с энергией ионизации около 0,5 эВ). Обычно предел равновесной растворимости таких примесей не превышает 10^{16} см^{-3} . Однако данной концентрации недостаточно для формирования промежуточной разрешенной зоны в полупроводнике, которая возникает при концентрациях около 10^{19} см^{-3} . Поэтому при сверхлегировании Si используют неравновесные методы внедрения примеси в полупроводник [17].

На рис. 2 представлены различные методы сверхлегирования, которые стали популярными в среде исследователей в последние десятилетия [18]. Один из самых перспективных методов – ионная имплантация с последующим импульс-

SILICON HYPERDOPING TECHNOLOGY

One of the main conditions for ensuring intermediate-band light absorption in the hyperdoped Si samples is development of the high concentrations of deep level impurities (with an ionization energy of about 0.5 eV). Typically, the equilibrium solubility limit for such impurities does not exceed 10^{16} cm^{-3} . However, this concentration is not enough to generate an intermediate-band in a semiconductor that occurs at the concentrations of about 10^{19} cm^{-3} . Therefore, when silicon is hyperdoped, the nonequilibrium methods of impurity introduction into the semiconductor are applied [17].

Figure 2 provides various hyperdoping methods that have become popular among the researchers in recent decades [18]. One of the most promising methods is the ion implantation followed by the pulsed laser melting when the pulse duration ranges from 1 ns to 1000 ns. This method makes it possible to develop a hyperdoped layer with the thickness of up to several hundred nanometers and the required impurity concentration (Fig. 2a). It is important to note that subsequent pulsed laser irradiation leads to restoration of the sample crystal structure and reduction in the radiation-induced defects resulting from the ion implantation. Another method to

Таблица 1. Пассивные устройства, доступные для интегральной фотоники в БИК-диапазоне на основе Si-платформы
Table 1. Passive devices available for integrated photonics in the NIR range based on the Si platform

Компонент Component	Конфигурация Configuration	Материал Material	Длина волны для минимальных потерь, мкм Wavelength for minimum losses, μm	Показатели эффективности Performance indicators	Литература References
Волновод Waveguide	Strip Strip	Si_3N_4 на оксиде Si_3N_4 on oxide	2,60	0,16 дБ/см 0.16 dB/cm	[9]
Волоконно-оптический волновод Fiber optic waveguide	Grating coupler Grating coupler	Suspended Si Suspended Si	2,70	6 дБ dB	[10]
		Suspended Ge Suspended Ge	2,37	11 дБ dB	[11]
	Inverse taper Inverse taper	КНИ SOI	2,50	9 дБ dB	[12]
Разветвитель Splitter	Y-разветвитель Y-splitter	AlN на оксиде AlN on oxide	2,60	–	[13]
Резонатор Resonator	Микро-кольцевой / микро-дисковый Micro-ring / micro-disc	Suspended Si Suspended Si	2,75	$Q=8100$	[14, 15]
		Si_3N_4 на оксиде Si_3N_4 on oxide	2,50	$Q=10^6$	[9]
	Photonic crystal cavity Photonic crystal cavity	Suspended Ge Suspended Ge	2,33	$Q=400$	[16]

ным лазерным плавлением, где длительность импульса составляет от 1 нс до 1000 нс. Этот метод позволяет создавать сверхлегированный слой толщиной до нескольких сотен нанометров с требуемой концентрацией примеси (рис. 2а). Важно отметить, что последующее импульсное лазерное облучение приводит к восстановлению кристаллической структуры образцов и снижению радиационно-наведенных дефектов, возникающих в результате ионной имплантации. Другим методом уменьшения радиационно-наведенных дефектов является отжиг, который осуществляется с использованием импульсной лампы (рис. 2б) и характеризуется быстрым нагревом и охлаждением полупроводника. Длительность воздействия лампы составляет от 1 мкс до 1 мс, и этот метод относится к способам твердофазной эпитаксии. Несмотря на то, что отжиг лампой приводит к незначительной диффузии примеси и неполному восстановлению кристаллической структуры Si, данный метод является альтернативой для уменьшения радиационно-наведенных дефектов. Наконец, более простой технологически метод предполагает предварительное осаждение на поверхность Si тонкой пленки материала примеси и последующее импульсное лазерное плавление этой системы (рис. 2с). В результате процесса плавления, сопоставимого по времени с длительностью импульса, происходит жидкофазная диффузия примесных атомов в полупроводник, что позволяет обеспечить как их высокую концентрацию, так и хорошую кристалличность сверхлегированного слоя. Однако при высокоинтенсивном лазерном воздействии значительная часть материала примеси аблируется, поэтому толщина слоя зачастую не превышает нескольких сотен нанометров.

ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Интеграция источников света на Si представляет собой значительную проблему из-за существующей у Si непрямой запрещенной зоны. Несмотря на это, в настоящее время существуют три потенциальных подхода к решению этой проблемы: гетерогенная интеграция каскадных и полупроводниковых лазеров, нелинейная частотная генерация или конверсия и гетероэпитаксия узкозонных полупроводниковых соединений на Si. Все эти методы были экспериментально апробированы.

С момента изобретения в 1990-х годах квантово-каскадных лазеров (ККЛ) и межзонных

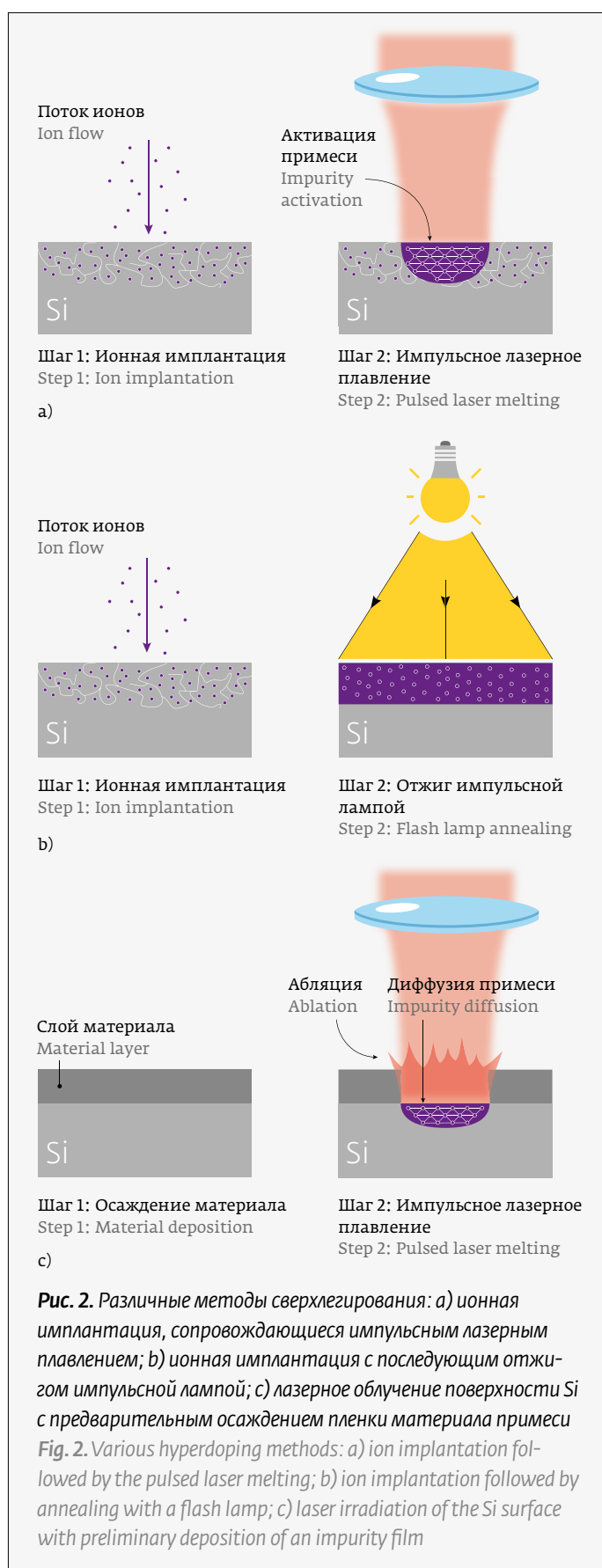


Рис. 2. Различные методы сверхлегирования: а) ионная имплантация, сопровождающиеся импульсным лазерным плавлением; б) ионная имплантация с последующим отжигом импульсной лампой; в) лазерное облучение поверхности Si с предварительным осаждением пленки материала примеси
Fig. 2. Various hyperdoping methods: а) ion implantation followed by the pulsed laser melting; б) ion implantation followed by annealing with a flash lamp; в) laser irradiation of the Si surface with preliminary deposition of an impurity film



каскадных лазеров значительно продвинулись технологии их изготовления. Хотя гетерогенная интеграция ККЛ с Si-фотоникой была продемонстрирована Споттом [19] на 4,8 мкм с использованием пластины кремний-на-нитриде-на-изоляторе, разработка ККЛ, работающих при комнатной температуре в БИК-диапазоне, еще не достигнута. В данном случае хорошую альтернативу предлагают классические полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур типа-I или типа-II. Так, известны работы, в которых было предложено несколько примеров гетерогенной интеграции ИК-диодных лазеров и усилителей III-V с кремниевыми волноводами, включая лазеры Фабри-Перо и DFB на базе InP, излучающие в диапазоне 2,0 мкм [20] и 2,3 мкм [21], лазер Фабри-Перо на базе GaSb, работающий на 2,38 мкм [22], и оптический усилитель на базе InP при 2,0 мкм [23]. Также известна структура лазера на мультиквантовых ямах на основе InP на кремнии, излучающего на 2,3 мкм, который служит примером большого класса гетерогенно интегрированных лазеров III-V [21].

Гетероэпитаксия, то есть выращивание некремниевых материалов на Si, открывает возможности для интеграции устройств на основе Si с улучшенными оптоэлектронными свойствами. В телекоммуникационном диапазоне гетероэпитаксиальный рост достиг наилучшего уровня в создании лазерных источников с электрической накачкой на Si на основе p-легированного Ge [24] и квантовых точек InAs/GaAs [25]. Также генерация в ближнем ИК-диапазоне также была достигнута с использованием GaSb, GeSn и соединений свинца. Однако лазеры на соединениях свинца имеют ограничения в оптической накачке и используют внешние резонаторы в свободном пространстве, за исключением фотонно-кристаллических поверхностно-излучающих лазеров. Материал GaSb-on-Si, вероятно, является наиболее перспективным с точки зрения разработки лазерных устройств, представляя непрерывную генерацию с электрической накачкой при комнатной температуре. Однако структура лазера выращивается на обрезанной пластине Si из-за проблем с образованием противофазных доменов. Также необходимо развитие технологий интеграции лазеров с другими элементами планарных фотонных схем.

В последние годы были предприняты значительные усилия для исследования и разработки лазеров на основе Si. Несмотря на то, что Si обладает непрямой полупроводниковым переходом и обычно не применяется в оптических устрой-

reduce the radiation-induced defects is annealing that is performed using a flash lamp (Fig. 2b) and is specified by the rapid semiconductor heating and cooling. The duration of lamp exposure is about 1 μ s - 1 ms, and this method belongs to the solid-phase epitaxy methods. Although the lamp annealing results in negligible diffusion of impurities and incomplete restoration of the Si crystal structure, this method is an alternative for reducing the radiation-induced defects. Finally, a technologically simpler method involves the preliminary deposition of a thin film of impurity material on the Si surface and subsequent pulsed laser melting of this system (Fig. 2c). As a result of the melting process, comparable in time to the pulse duration, the liquid-phase diffusion of impurity atoms into the semiconductor is occurred that makes it possible to ensure both their high concentration and good crystallinity of the hyperdoped layer. However, in the case of high-intensity laser irradiation, a significant part of the impurity material is ablated, therefore the layer thickness often does not exceed several hundred nanometers.

LIGHT SOURCES

The light source integration on Si poses a significant challenge due to the Si's existing indirect band-gap. However, there are currently three prospective approaches to solve this issue: heterogeneous integration of cascade and semiconductor lasers, nonlinear frequency generation or conversion, and heteroepitaxy of narrow-band-gap semiconductor compounds on silicon. All these methods have been experimentally tested.

Since the invention of quantum cascade lasers (QCLs) and intermediate-band cascade lasers in the 1990s, their production technology has been significantly advanced. Although the heterogeneous integration of QCLs with Si photonics was demonstrated by Spott [19] at 4.8 μ m using a silicon-nitride-on-insulator wafer, the development of QCLs operating at the room temperature in the NIR region has not yet been achieved. In this case, the traditional semiconductor lasers based on type I or type II heterostructures are a good alternative. Thus, there are some papers where several examples of heterogeneous integration of IR diode lasers and III-V amplifiers with the silicon waveguides have been proposed, including InP-based Fabry-Perot and DFB lasers emitting in the range of 2.0 μ m [20] and 2.3 μ m [21], a GaSb-based Fabry-Perot laser operating at 2.38 μ m [22], and an InP-based optical amplifier operating at 2.0 μ m [23]. The structure of an InP-

ствах, в литературе приведены примеры использования Si для создания рамановских лазеров и лазеров, использующих квантово-каскадные эффекты. Недавно [26, 27] разработали Si-лазер, демонстрирующий непрерывное излучение при комнатной температуре на длине волны 1,3 мкм. Типичные значения плотности порогового тока для лазерных колебаний составили 1,1-2,0 кА/см², отношение мощностей в ТЕ-поляризации и ТМ-поляризации во время колебаний – 8:1, оптическая выходная мощность 50 мкВт (при токе 60 мА) и внешняя дифференциальная квантовая эффективность 1%. Однако некоторые параметры у таких лазеров – рабочая температура, эффективность, длина волны – пока не соответствуют требованиям практического использования. В табл. 2 приведены основные характеристики лазерных структур.

ВОЛНОВОДНО-ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ФОТОДЕТЕКТОРЫ

Фотодетекторы играют важную роль в преобразовании оптических сигналов в электронную форму и являются неотъемлемой частью интегральных фотонных схем [33]. Интеграция приемников на таких схемах обеспечивает ряд значительных преимуществ. Во-первых, интеграция способствует улучшению отношения сигнал/шум (ОСШ) за счет подавления шума. Это обусловлено тем, что различные виды шумов (дробовой шум, шум Джонсона и шум рекомбинации генерации), которые часто ограничивают ОСШ детектора, линейно зависят от активного объема детектора. Когда свет направляется в детектор через волновод (с пока-

based silicon multiquantum well laser emitting at 2.3 μm is also well-known that is used as an example of a large group of heterogeneously integrated III-V lasers [21].

Heteroepitaxy, that is, the growth of non-silicon materials on Si, opens up potential for the integration of Si-based devices with the improved optoelectronic properties. In the telecommunications range, heteroepitaxial growth has reached its best level in the development of electrically pumped silicon laser sources based on n-doped Ge [24] and InAs/GaAs quantum dots [25]. Moreover, generation in the near-IR region has also been achieved using GaSb, GeSn and lead compounds. However, the lead compound lasers have limitations in optical pumping and use the external free-space resonators, except for the photonic crystal surface-emitting lasers. The GaSb-on-Si material is probably the most promising in terms of laser device development, while providing the electrically pumped continuous lasing at the room temperature. However, the laser structure is grown on a cut silicon wafer due to the issues with the formation of antiphase domains. It is also necessary to develop the laser integration technologies with other elements of the planar photonic circuits.

In recent years, significant efforts have been made to research and develop the Si-based lasers. Although silicon has an indirect semiconductor junction and is not typically used in the optical devices, there are several examples in the literature devoted to the silicon application to develop the Raman and quantum cascade lasers. Recently [26, 27] a Si laser demonstrating continuous emission at the room tempera-

Таблица 2. Лазерные структуры БИК-диапазона, монолитно выращенные на Si методом гетероэпитаксии
Table 2. NIR laser structures monolithically grown on Si by the heteroepitaxy method

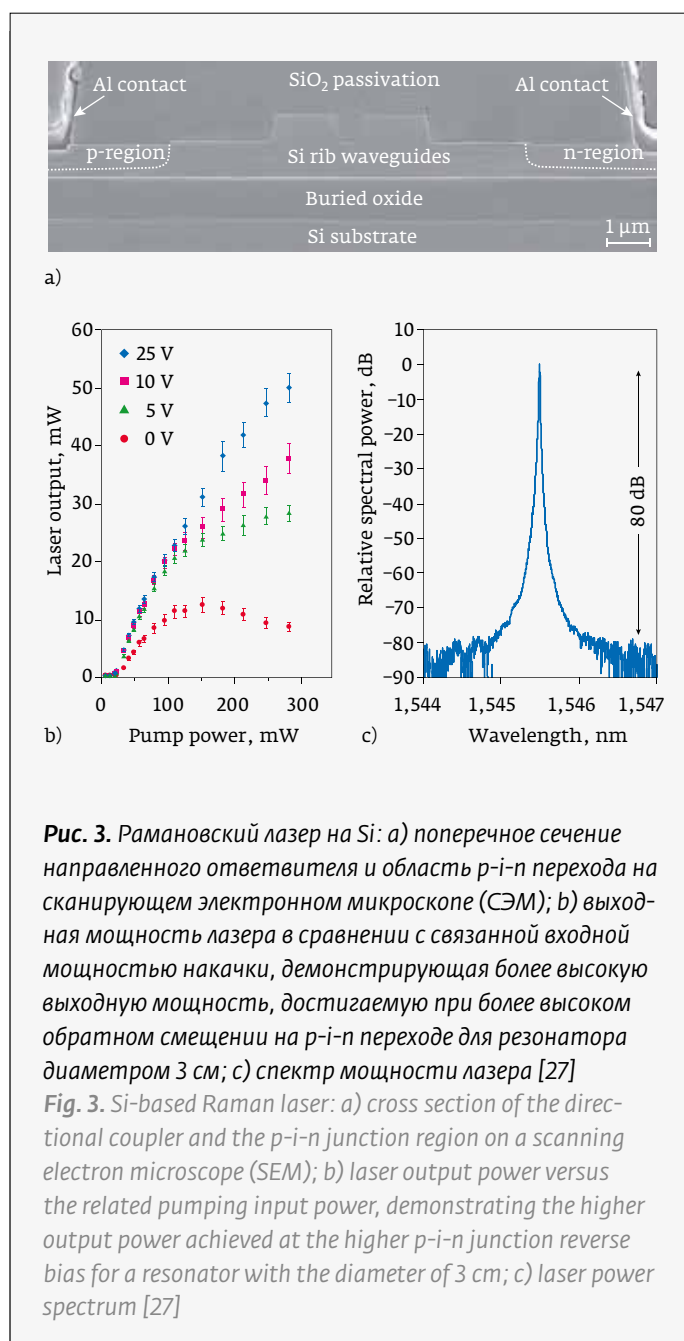
Активная среда Active medium	Длина волны, мкм Wavelength, μm	Вид накачки Type of pumping	Режим генерации Generation mode	Максимальная рабочая температура, К Maximum operating temperature, K	Литература References
GaInAsSb	2,25	Электрическая Electric	Импульсный Pulsed	>300	[28]
	2,00		Непрерывный Continuous	308	[29]
GeSn	2,25	Оптическая Optical	Импульсный Pulsed	90	[30]
	2,40–2,50			130	[31]
	2,50			110	[32]
Si	1,54		Непрерывный Continuous	–	[27]

зателем преломления сердцевины n), а не из свободного пространства, активный объем детектора и, следовательно, шум могут быть уменьшены примерно в n^2 раз без потери оптического поглощения. Это имеет важное значение для детекторов в БИК-диапазоне, изготовленных из узкозонных полупроводников, страдающих от более высокого уровня собственных шумов. Во-вторых, детекторы, интегрированные в волноводы, могут обеспечить более широкую полосу пропускания, чем их аналоги в свободном пространстве. Уменьшение объема детектора также уменьшает RC-задержку и время прохождения несущей в фотоэлектрических детекторах. Наконец, детекторы, интегрированные в волноводы, избегают компромисса между оптическим поглощением и сбором носителей заряда, что часто характерно для детекторов в свободном пространстве. Это облегчает обеспечение высокой квантовой эффективности без ущерба для эффективности сбора носителей заряда и временных ограничений переноса заряда. Таким образом, детекторы со встроенным волноводом предлагают возможность избежать этого компромисса, поскольку оптический путь и путь сбора носителей ортогональны, в то время как в детекторах в свободном пространстве эти пути часто совпадают.

В БИК-области спектра были продемонстрированы четыре класса детекторов, интегрированных в волновод, где активный материал детектора включает (1) гибридные узкозонные полупроводники, (2) монократно нанесенные или выращенные узкозонные полупроводники, (3) узкозонные полупроводники или полуметаллы Ван-дер-Ваальса, или (4) ионно-имплантированный Si с намеренно введенными примесями. В табл. 3 сравниваются встроенные в волноводы детекторы БИК-диапазона, основанные на последней технологии.

С 1950-х годов проводятся активные исследования, направленные на увеличение чувствительности Si в ИК-области спектра. Одним из методов является создание глубоких примесей, акцепторных или донорных уровней которых находятся близко к середине запрещенной зоны Si (с энергией ионизации около 0,5 эВ), и их концентрация превышает равновесные значения растворимости в Si (более 10^{19} см $^{-3}$; для равновесной растворимости около 10^{15} – 10^{16} см $^{-3}$). Это приводит к получению сверхлегированного Si, материал с примечательными фотоэлектрическими свойствами на длинах волн более 1,1 мкм и поглощением около 10^3 см $^{-1}$ на длине волны 1,55 мкм. Такой подход обладает низкими затратами и простотой про-

cedure at a wavelength of 1.3 μm has been developed. The typical values of threshold current density for laser oscillations were 1.1–2.0 kA/cm 2 , the power ratio in TE polarization and TM polarization during oscillations was 8:1, the optical output power was 50 μW (at a current of 60 mA) and the external differential quantum efficiency was 1%. However, some parameters of such lasers, such as operating temperature, efficiency, and wavelength, do not yet meet the requirements for practical application. Table 2 shows the main specifications of laser structures.



цесса без необходимости использования нетрадиционных материалов. Неравновесные технологии, ионная имплантация и импульсное лазерное легирование также сыграли значительную роль в развитии Si-микронэлектроники и дали возможность достичь требуемых высоких концентраций примеси с низкой растворимостью, что было невозможно при использовании классических методов, например, термодиффузии. Однако обработка Si с использованием технологий ионной имплантации и импульсного лазерного легирования может вызывать образование радиационно-наведенных дефектов, которые увеличивают вероятность безызлучательной рекомбинации носителей заряда. Этот эффект нежелателен для фотодиодов. Поэтому после обработки требуется постобработка для восстановления кристаллической структуры материала и активации легирующих примесей. Для этого используют, например, импульсный лазерный отжиг кремния, который позволяет частично или полностью восстановить поврежденный слой, превращая аморфную фазу в квазимонокристаллическую или поликристаллическую структуру с высокой концентрацией примеси.

Криогенно охлаждаемые внешние Si- и Ge-детекторы, использующие электронные переходы из состояний мелких примесей в зону проводимости или валентную зону, в том числе детекторы с заблокированной примесной зоной, широко используют для измерений сигналов ИК-диапазона. Исследования продемонстрировали работу КНИ-детекторов (рис. 4) с имплантацией ионов Zn и S при комнатной температуре за счет использования преимуществ относительно глубоких уровней, связанных с примесями Zn и S [34]. Волнообразные детекторы КНИ с имплантатами Si^+ и Ar^+ также были рассмотрены. Данные детекторы полностью совместимы со стандартным КМОП-производством и позволяют избежать использования посторонних материалов в Si-платформе. Однако основным недостатком этих детекторов является их низкая

Таблица 3. Характеристики детекторов БИК-диапазона, основанных на технологии сверхлегированного кремния

Table 3. Specifications of NIR detectors based on the hyperdoped Si technology

Примесный элемент Impurity element	Спектральная чувствительность, мА/Вт или квантовая эффективность, о. е. Spectral response, mA/W or quantum efficiency, a. u.	Длина волны, мкм Wavelength, μm	Напряжение смещения, В Bias voltage, V	Литература References
Ag	504 мА/Вт mA/W	1,31	-3	[35]
	65 мА/Вт mA/W	1,55		
Ar	975 мА/Вт mA/W	1,31	-12	[36]
	1 280 мА/Вт mA/W	1,55		
Au	$2,8 \cdot 10^{-4}$ о. е. a. u.	1,31	-5	[18]
	$9,3 \cdot 10^{-5}$ о. е. a. u.	1,55		
N	5,3 мА/Вт mA/W	1,31	-10	[37]
S	450 мА/Вт mA/W	1,06	-5	[38]
Se	2410 мА/Вт mA/W	1,06	-12	[39]
Te	43,9 мА/Вт mA/W	1,30	-5	[40]
	56,8 мА/Вт mA/W	1,55		

WAVEGUIDE-INTEGRATED PHOTODETECTORS

The photodetectors play an important role in converting optical signals into the electronic form while being an integral part of photonic integrated circuits [33]. The receiver's integration into such circuits provides a number of significant advantages. First, the integration helps improve the signal-to-noise ratio (SNR) by noise suppression. It is achieved due to the fact that various types of noise (fluctuation noise, Johnson noise, and lasing recombination noise) that often limit the detector's SNR depend linearly on the active detector's volume. When light is sent to the detector through a waveguide (with the core refractive index n) rather than from free space, the active detector's volume, and hence its noise, can be reduced by about n^2 times without any loss of optical absorption. It has important implications for the NIR detectors made from the narrow-band-gap semiconductors that suffer from the higher intrinsic noise levels. Second, the waveguide-integrated detectors can provide higher bandwidth than their free-space analogues. The detector's volume decrease also reduces the RC delay and carrier propagation

чувствительность, присутствующая из-за слабой концентрации примеси или поглощения, опосредованных уровнями дефектов. Работа устройства при высоком напряжении смещения в лавинном режиме может значительно повысить его фоточувствительность, однако это сопровождается ухудшением показателей шума. В табл. 3 сравниваются характеристики встроенных в волновод детекторов БИК-диапазона, созданных на основе технологии сверхлегированного кремния.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Следует отметить, что большинство описанных примеров ключевых оптоэлектронных устройств для оптико-электронных систем – волноводов, излучателей и детекторов излучения, перспективных для использования в ближнем ИК-диапазоне, выбраны из обширного объема литературы, опубликованной за последнее десятилетие. Анализ современного состояния технологий создания таких устройств на основе Si-платформы показывает перспективность их фотонной интеграции в БИК-диапазоне и выделение нового направления в кремниевой технологии – технологии создания фотонных элементов на кремнии. Интеграция нескольких материалов, выходящих за рамки традиционных материалов на основе кремния, является ключевым фактором прогресса в области создания элементов для БИК-диапазона. Развитие интеграции играет важную роль в преодолении технологических ограничений, а переход от оптимизации отдельных фотонных устройств к интеграции на системном уровне открывает большие возможности для фотоники в БИК-диапазоне.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Результаты получены в рамках выполнения государственного задания № FSN-2024-0019.

REFERENCES

- ISO 20473:2007. *Optics and photonics. Spectral bands.*
- D. X. Xu, J. H. Schmid, G. T. Reed, G. Z. Mashanovich, D. J. Thomson, M. Nedeljkovic, X. Chen, D. V. Thourhout, S. Keyvaninia, S. K. Selvaraja. Silicon Photonic Integration Platform – Have We Found the Sweet Spot? *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014; 20(4): 189–205. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2299634.
- Minh A. Tran, Chong Zhang, Theodore J. Morin, Lin Chang, Sabyasachi Barik, Zhiqian Yuan, Woonghee Lee, Glenn Kim, Aditya Malik, Zeyu Zhang, Joel Guo, Heming Wang, Boqiang Shen, Lue Wu, Kerry Vahala, John E. Bowers, Hyundai Park & Tin Komljenovic. Extending the spectrum of fully integrated photonics to submicrometre wavelengths. *Nature*. 2022; 610: 54–60. DOI: 10.1038/s41586-022-05119-9.
- Saeed Khan, Jeff Chiles, Jichi Ma, Sasan Fathpour. Silicon-on-nitride

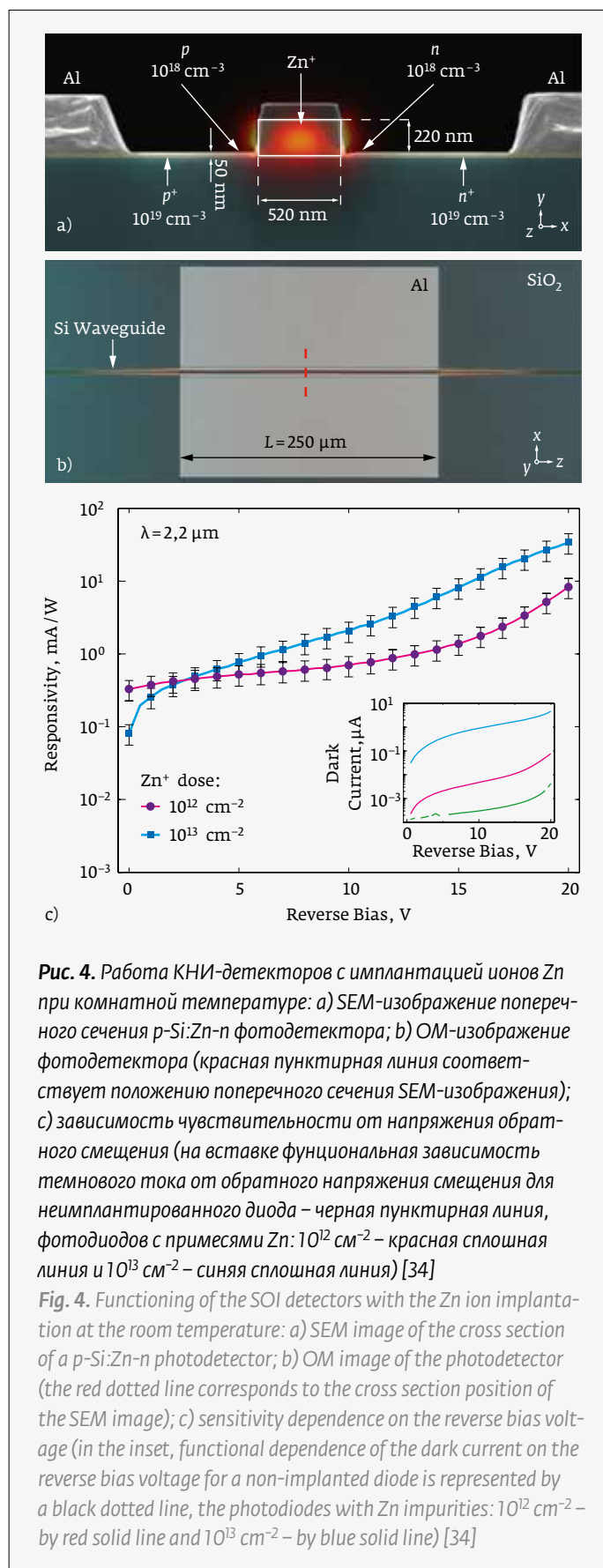


Рис. 4. Работа КНИ-детекторов с имплантацией ионов Zn при комнатной температуре: а) SEM-изображение поперечного сечения p-Si:Zn-n фотодетектора; б) OM-изображение фотодетектора (красная пунктирная линия соответствует положению поперечного сечения SEM-изображения); в) зависимость чувствительности от напряжения обратного смещения (на вставке функциональная зависимость темнового тока от обратного напряжения смещения для неимплантированного диода – черная пунктирная линия, фотодиодов с примесями Zn: 10^{12} cm^{-2} – красная сплошная линия и 10^{13} cm^{-2} – синяя сплошная линия) [34]

Fig. 4. Functioning of the SOI detectors with the Zn ion implantation at the room temperature: а) SEM image of the cross section of a p-Si:Zn-n photodetector; б) OM image of the photodetector (the red dotted line corresponds to the cross section position of the SEM image); в) sensitivity dependence on the reverse bias voltage (in the inset, functional dependence of the dark current on the reverse bias voltage for a non-implanted diode is represented by a black dotted line, the photodiodes with Zn impurities: 10^{12} cm^{-2} – by red solid line and 10^{13} cm^{-2} – by blue solid line) [34]



Зеленоградский
нанотехнологический
центр

МУЛЬТИПЛЕКСОР

16

каналов



Уже в продаже

МОДУЛЬ СПЕКТРАЛЬНОГО УПЛОТНЕНИЯ

● **Скорость** ● **Емкость** ● **Безопасность**

- Оптический мониторинг инженерных объектов
 - Оптические системы измерений (геофизика, сейсмоанализ, биомедицина)
 - Центры данных (ЦОД)
 - Телекоммуникационное оборудование и системы связи
- 100 ГГц**
Шаг спектральной сетки
- 0,4...0,6 нм**
Ширина полосы пропускания (-3 дБ)
- <6,5 дБ**
Минимальные потери при передаче

Зеленоградский Нанотехнологический Центр – надежный поставщик инноваций

- Производство полного цикла
- Экспертиза фотонных интегральных схем
- Центр интегральной фотоники
- Фотонная компонентная база собственной разработки



sales@zntc.ru; +7 (499) 720-69-73

www.zntc.ru



- waveguides for mid- and near-infrared integrated photonics. *Applied Physics Letters*. 2013; 102: 121104. DOI: 10.1063/1.4798557.
5. **M. Nedeljkovic, J. S. Penadés, C. Mitchell, A. Khokhar, S. Stankovic, T. Domínguez Bucio, C. Littlejohns, F. Gardes, G. Mashanovich.** Surface-Grating-Coupled Low-Loss Ge-on-Si Rib Waveguides and Multimode Interferometers. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2015; 27(10): 1040–1043. DOI: 10.1109/LPT.2015.2405611.
 6. **Hongtao Lin, Lan Li, Yi Zou, Sylvain Danto, J David Musgraves, Kathleen Richardson, Stephen Kozacik, Maciej Murakowski, Dennis Prather, Pao T Lin, Vivek Singh, Anu Agarwal, Lionel C Kimerling, Juejun Hu.** Demonstration of high-Q mid-infrared chalcogenide glass-on-silicon resonators. *Optics Letters*. 2013; 38(9): 1470–2. DOI: 10.1364/OL.38.001470.
 7. **Hongtao Lin, Zhengqian Luo, Tian Gu, Lionel C. Kimerling, Kazumi Wada, Anu Agarwal and Juejun Hu.** Mid-infrared integrated photonics on silicon: a perspective. *Nanophotonics*. 2017; 7(2): 393–420. DOI: 10.1515/nanoph-2017-0085.
 8. **Kudryashov S., Nastulyavichus A., Krasin G., Khamidullin K., Boldyrev K., Kirilenko D., Yachmenev A., Ponomarev D., Komandin G., Lebedev S., Prikhod'ko D., Kovalev M.** CMOS-compatible direct laser writing of sulfur-ultrahyperdoped silicon: Breakthrough pre-requisite for UV-THz optoelectronic nano/microintegration. *Optics & Laser Technology*. 2023; 158: 108873. DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108873.
 9. **Luke K., Okawachi Y., Lamont M. R. E., Gaeta A. L., Lipson M.** Broadband mid-infrared frequency comb generation in a Si₃N₄ microresonator. *Optics Letters*. 2015; 40: 4823–6. DOI: 10.1364/OL.40.004823.
 10. **Cheng Z. Z., Chen X., Wong C. Y.** Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane waveguide. *Optics Letters*. 2012; 37: 1217–9. DOI: 10.1364/OL.37.001217.
 11. **Kang J., Cheng Z., Zhou W.** Focusing subwavelength grating coupler for mid-infrared suspended membrane germanium waveguides. *Optics Letters*. 2017; 42: 2094–7. DOI: 10.1364/OL.42.002094.
 12. **Griffith A. G., Lau R. K., Cardenas J.** Silicon-chip mid-infrared frequency comb generation. *Nature Communications*. 2015; 6: 6299. DOI: 10.1038/ncomms7299.
 13. **Lin P. T., Jung H., Kimerling L. C., Agarwal A., Tang H. X.** Low-loss aluminium nitride thin film for mid-infrared microphotonics. *Laser & Photonics Reviews*. 2014; 8: L23–8. DOI: 10.1002/lpor.201300176.
 14. **Xia Y., Qiu C., Zhang X., Gao W., Shu J., Xu Q.** Suspended Si ring resonator for mid-IR application. *Optics Letters*. 2013; 38: 1122–4. DOI: 10.1364/OL.38.001122.
 15. **Cheng Z. Z., Chen X., Wong C. Y., Xu K., Tsang H. K.** Mid-infrared suspended membrane waveguide and ring resonator on silicon-on-insulator. *IEEE Photonics Journal*. 2012; 4: 1510–1519. DOI: 10.1109/JPHOT.2012.2210700.
 16. **Xiao T.-H., Zhao Z., Zhou W.** Mid-infrared germanium photonic crystal cavity. *Optics Letters*. 2017; 42: 2882–5. DOI: 10.1364/OL.42.002882.
 17. **Michael Kovalev, Alena Nastulyavichus, Ivan Podlesnykh, Nikita Stsepuro, Victoria Pryakhina, Evgeny Greshnyakov, Alexey Serdobintsev, Iliya Gritsenko, Roman Khmel'nitskii and Sergey Kudryashov.** Au-Hyperdoped Si Nanolayer: Laser Processing Techniques and Corresponding Material Properties. *Materials*. 2023; 16(12): 4439. DOI: 10.3390/ma16124439.
 18. **Jonathan P. Mailoa, Austin J. Akey, Christie B. Simmons, David Hutchinson, Jay Mathews, Joseph T. Sullivan, Daniel Recht, Mark T. Winkler, James S. Williams, Jeffrey M. Warrender, Peter D. Persans, Michael J. Aziz & Tonio Buonassisi.** Room-temperature sub-band gap optoelectronic response of hyperdoped silicon. *Nature Communications*. 2014; 5: 3011. DOI: 10.1038/ncomms4011.
 19. **Alexander Spott, Michael Davenport, Jon Peters, Jock Bovington, Martijn J R Heck, Eric J Stanton, Igor Vurgaftman, Jerry Meyer, John Bowers.** Heterogeneously integrated 2.0 μm CW hybrid silicon lasers at room temperature. *Optics Letters*. 2015; 40(7): 1480–1483. DOI: 10.1364/OL.40.001480.
 20. **Ruijun Wang, Stephan Sprengel, Aditya Malik, Anton Vasilev, Gerhard Boehm, Roel Baets, Markus-Christian Amann, Gunther Roelkens.** Heterogeneously integrated III–V-on-silicon 2.3x μm distributed feedback lasers based on a type-II active region. *Applied Physics Letters*. 2016; 109: 221111. DOI: 10.1063/1.4971350.
 21. **Ruijun Wang, Stephan Sprengel, Gerhard Boehm, Muhammad Muneeb, Roel Baets, Markus-Christian Amann, Gunther Roelkens.** 2.3 μm range InP-based type-II quantum well Fabry-Perot lasers heterogeneously integrated on a silicon photonic integrated circuit. *Optics Express*. 24(18):21081–21089. DOI: 10.1364/OE.24.021081.
 22. **Roel Roelkens, Utsav Dave, Alban Gassenq, Nannicha Hattasan, Chen Hu, Bart Kuyken, Francois Leo, Aditya Malik, Muhammad Muneeb, Eva Ryckeboer, Dorian Sanchez, Sarah Uvin, Ruijun Wang, Zeger Hens, Roel**

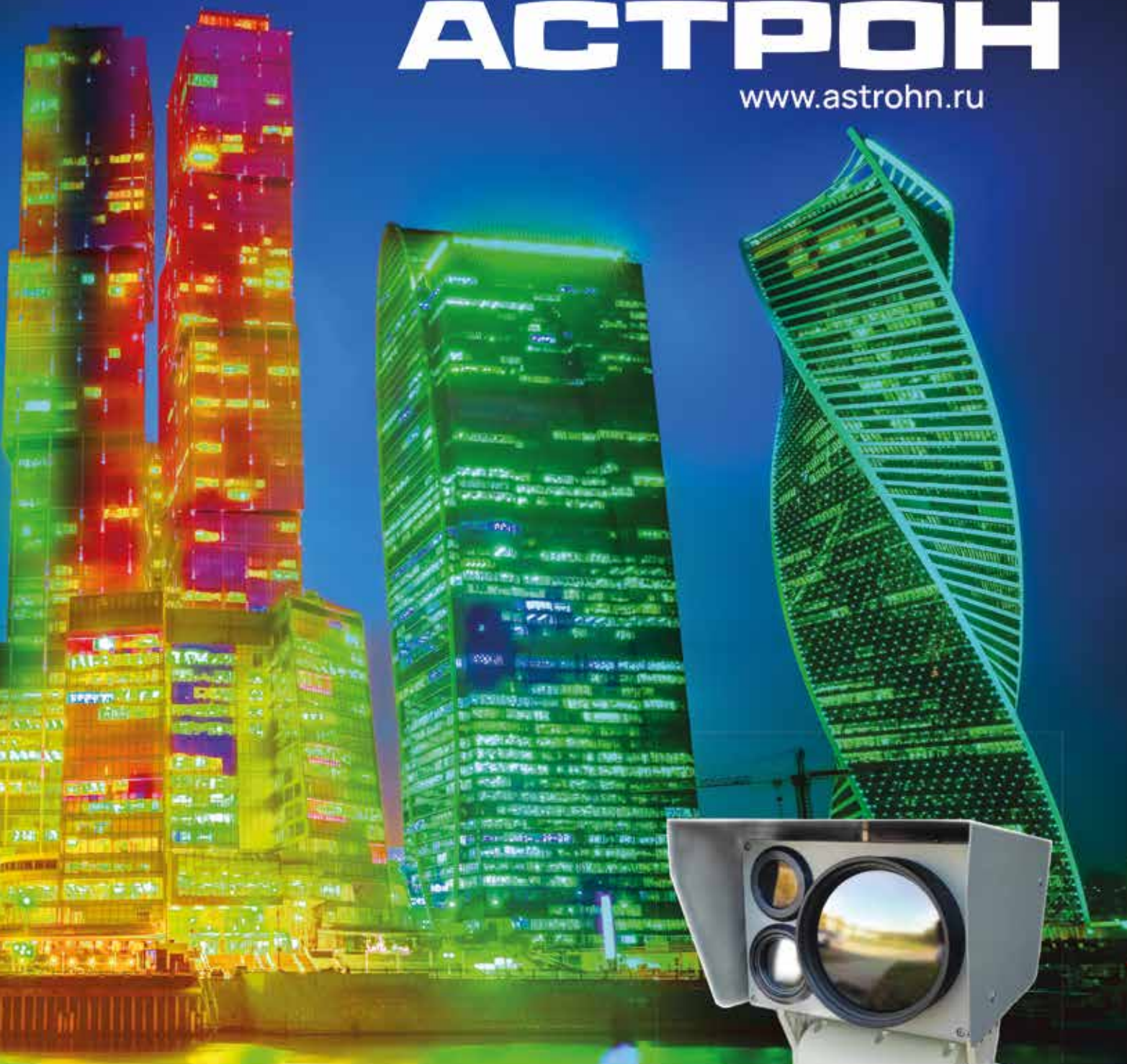
time in the photoelectric detectors. Finally, the waveguide-integrated detectors avoid the compromise between optical absorption and charge carrier collection that is often typical for the free-space detectors. This makes it easier to achieve high quantum efficiency without sacrificing the charge carrier collection efficiency and time constraints of the charge transfer. Thus, the waveguide detectors offer the opportunity to avoid this compromise since the optical path and carrier collection path are orthogonal, whereas these paths often coincide in the free-space detectors.

Four grades of waveguide-integrated detectors have been shown in the NIR range, when the detector active material includes the following: (1) hybrid narrow-band-gap semiconductors, (2) monolithically deposited or grown narrow-band-gap semiconductors, (3) narrow-band-gap semiconductors or van der Waals semimetals, or (4) ion-implanted Si with the intentionally introduced impurities. Table 3 compares the waveguide-integrated NIR detectors based on the latest technology.

Since the 1950s, active researches have been performed aimed at increasing the silicon sensitivity in the IR region. One of the methods is the development of deep level impurities, the acceptor or donor levels of which are close to the middle of the Si band gap (with an ionization energy of about 0.5 eV), when their concentration exceeds the equilibrium solubility values in Si (more than 10^{19} cm^{-3} ; for equilibrium solubility it is about $10^{15}\text{--}10^{16} \text{ cm}^{-3}$). It results in the hyperdoped silicon, namely a material with remarkable photovoltaic properties at the wavelengths of more than 1.1 μm and an absorption of about 10^3 cm^{-1} at a wavelength of 1.55 μm. This approach is low cost and simple to be performed without the need for unconventional materials. The nonequilibrium technologies, ion implantation and pulsed laser doping, have also played a significant role in the development of silicon microelectronics and made it possible to achieve the required high concentrations of low-solubility impurities that was impossible when using standard methods, for example, thermal diffusion. However, silicon processing using the ion implantation and pulsed laser doping technologies can cause generation of the radiation-induced defects that increase the likelihood of non-radiative recombination of charge carriers. This effect is undesirable for photodiodes. Therefore, after processing, the post-processing procedure is required to restore the material crystalline structure and activate the dopant impurities. For this purpose, for example, the pulsed laser anneal-

АСТРОН

www.astrohn.ru



Оптико-механическое конструкторское бюро

- Тепловизионная и терагерцовая техника
- Мультиспектральные оптико-электронные системы
- Неохлаждаемые микроболометры на оксиде ванадия
- Охлаждаемые фотоприемные устройства на основе «кадмий-ртуть-теллур»
- Микрохолодильники на основе обратного цикла Стирлинга

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д 1 тел.: +7 (495) 215-13-82 info@astrohn.ru



- Baets, Yosuke Shimura, Federica Genzarelli, Benjamin Vincent, Roger Loo, Joris van Campenhout, Laurent Cerutti, Jean-Baptiste Rodriguez, Eric Tournié, Xia Chen, Milos Nedeljkovic, Goran Z. Mashanovich, Li Shen, Noel Healy, Anna C. Peacock, Xiaoping Liu, Richard Osgood, William M. J. Green. Silicon-Based Photonic Integration Beyond the Telecommunication Wavelength Range. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 2014; 20(4): 820151. DOI: 10.1109/JSTQE.2013.2294460.
23. Nicolas Volet, Alexander Spott, Eric J. Stanton, Michael L. Davenport, Lin Chang, Jon D. Peters, Travis C. Briles, Igor Vurgaftman, Jerry R. Meyer, John E. Bowers. Semiconductor optical amplifiers at 2.0- μm wavelength on silicon. *Laser & Photonics Reviews*. 2017; 11(2): 1600165. DOI: 10.1002/lpor.201600165.
 24. Rodolfo E Camacho-Aguilera I, Yan Cai, Neil Patel, Jonathan T Bessette, Marco Romagnoli, Lionel C Kimerling, Jurgen Michel. An electrically pumped germanium laser. *Optics Express*. 20(10):11316–11320. DOI: 10.1364/OE.20.11316.
 25. Siming Chen, Wei Li, Jiang Wu, Qi Jiang, Mingchu Tang, Samuel Shutts, Stella N. Elliott, Angela Sobiesierski, Alwyn J. Seeds, Ian Ross, Peter M. Smowton & Huiyun Liu. Electrically pumped continuous-wave III–V quantum dot lasers on silicon. *Nature Photonics*. 2016; 10: 307–311. DOI: 10.1038/nphoton.2016.21.
 26. T. Kawazoe, M. Ohtsu, K. Akahane & N. Yamamoto. Si homojunction structured near-infrared laser based on a phonon-assisted process. *Rapid Communication*. 2012; 107: 659–663. DOI: 10.1007/s00340-012-5053-2.
 27. Di Liang & John E. Bowers. Recent progress in lasers on silicon. *Nature Photonics*. 2010; 4: 511–517. DOI: 10.1038/nphoton.2010.167.
 28. Rodriguez J., Cerutti L., Grech P., Tournié E. Room-temperature operation of a 2.25 μm electrically pumped laser fabricated on a silicon substrate. *Applied Physics Letters*. 2009; 94: 061124. DOI: 10.1063/1.3082098.
 29. Reboul J.-R., Cerutti L., Rodriguez J.-B., Grech P., Tournié E. Continuous-wave operation above room temperature of GaSb-based laser diodes grown on Si. *Applied Physics Letters*. 2011; 99: 21113. DOI: 10.1063/1.3644983.
 30. Wirths S., Geiger R., Von Den Driesch N. Lasing in direct-bandgap GeSn alloy grown on Si. *Nature Photonics*. 2015; 9: 88–92. DOI: 10.1038/nphoton.2014.321.
 31. Stange D., Wirths S., Geiger R. Optically pumped GeSn microdisk lasers on Si. *ACS Photonics*. 2016; 3: 1279–1285. DOI: 10.1021/acsp Photonics.6b00258.
 32. Al-Kabi S., Ghetmiri S. A., Margetis J. An optically pumped 2.5 μm GeSn laser on Si operating at 110 K. *Applied Physics Letters*. 2016; 109: 171105. DOI: 10.1063/1.4966141.
 33. Antoni Rogalski. Progress in focal plane array technologies. *Progress in Quantum Electronics*. 2012; 36(2–3): 342–473. DOI: 10.1016/j.pquantelec.2012.07.001.
 34. Grote, Richard R., Souhan, Brian, Ophir, Noam, Driscoll, Jeffrey B., Bergman, Keren, Bahkru, Hassaram, Green, William M. J., Osgood, Richard M. Extrinsic photodiodes for integrated mid-infrared silicon photonics. *Optica*. 2014; 1(4): 264. DOI: 10.1364/OPTICA.1.000264.
 35. Qiu X. D., Wang Z. J., Hou X. T. Visible-blind short-wavelength infrared photodetector with high responsivity based on hyperdoped silicon. *Photonics Research*. 2019; 7(3): 351–358. DOI: 10.1364/PRJ.7.000351.
 36. Li C., Zhao J. H., Liu X. H., Ren Z. Y., Yang Y., Chen Z. G., Chen Q. D., Sun H. B. Record-Breaking-High-Responsivity Silicon Photodetector at Infrared 1.31 and 1.55 μm by Argon Doping Technique. *IEEE Transactions on Electron Devices*. 2023; 70(5): 2364–2369. DOI: 10.1109/TED.2023.3261823.
 37. Li C. H., Wang X. P., Zhao J. H. Black silicon IR photodiode supersaturated with nitrogen by femtosecond laser irradiation. *IEEE Sensors Journal*. 2018; 18(9): 3595–3601. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2812730.
 38. Wang K., Yang H. G., Wang X. Y. 1064 nm photoresponse enhancement of femtosecond-laser-irradiated Si photodiodes by etching treatment. *Applied Physics Express*. 2018; 11: 062203. DOI: 10.7567/APEX.11.062203.
 39. Du L. Y., Wu Z. M., Li R. Near-infrared photoresponse of femtosecond-laser processed Se-doped silicon n⁺-n photodiodes. *Optics Letters*. 2016; 41(21): 5031–5034. DOI: 10.1364/OL.41.005031.
 40. Jia Z. X., Wu Q., Jin X. R. Highly responsive tellurium-hyperdoped black silicon photodiode with single-crystalline and uniform surface microstructure. *Optics Express*. 2020; 28(4): 5239–5247. DOI: 10.1364/OE.385887.

АВТОРЫ

М. С. Ковалев, к. т. н., с. н. с., ФИАН им. П. Н. Лебедев, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-5074-0718

И. М. Подлесных, стажер-исследователь, ФИАН им. П. Н. Лебедев, инженер МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-3381-2972

ing of silicon is used that makes it possible to partially or completely restore the damaged layer, while transforming the amorphous phase into a quasi-monocrystalline or polycrystalline structure with a high impurity concentration.

The cryogenically cooled external Si and Ge detectors that use the electronic transitions from the impurity states to the conduction band or valence band, including the blocked impurity band detectors, are widely applied for the infrared signal measurement. The studies have demonstrated the performance of SOI detectors (Fig. 4) with implantation of Zn and S ions at the room temperature by taking advantage of the relatively deep levels related to the Zn and S impurities [34]. The waveform SOI detectors with Si⁺ and Ar⁺ implants have also been considered. These detectors are fully compatible with the standard CMOS production and avoid application of foreign materials in the Si platform. However, the main disadvantage of these detectors is their low sensitivity occurred due to the weak impurity concentration or absorption mediated by the defect levels. The device operation at the high bias voltage in the avalanche mode can significantly improve its photosensitivity, but this is accompanied by deterioration in the noise performance. Table 3 compares the specifications of waveguide-integrated NIR detectors based on the hyperdoped silicon technology.

CONCLUSION

It should be noted that most of the described examples of key optoelectronic devices for optoelectronic systems, namely the waveguides, emitters and radiation detectors promising for use in the near-infrared range, are selected from the vast body of references published over the last decade. An analysis of the modern state of production technology for such devices based on the Si platform demonstrates the prospects of their photonic integration in the NIR range and occurrence of a new area in silicon technology, namely the production technology of silicon-based photonic elements. The integration of multiple materials beyond the traditional silicon-based materials is a key to progress in the NIR element design. The integration advances play an important role in overcoming technological limitations, and the transition from optimization of individual photonic devices to the system-level integration opens up great prospects for NIR photonics.

FUNDING

The results have been obtained as a part of the implementation of state assignment No. FSN-2024-0019.

- К. Э. Певчих, к. т. н., руководитель технологического направления интегральной фотоники, АО «Зеленоградский нанотехнологический центр», Зеленоград, Москва, Россия
- С. И. Кудряшов, д. ф.-м. н., в. н. с., ФИАН им. П. Н. Лебедева, в. н. с., МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия.
ORCID: 0000-0001-6657-2739
- М. С. Ковалев, к. т. н., с. н. с. ФИАН.
ORCID: 0000-0001-5074-0718
- И. М. Подлесных, стажер-исследователь ФИАН, инженер МГТУ имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
ORCID: 0000-0003-3381-2972
- К. Э. Певчих, к. т. н., рук. направления интегральной фотоники, АО «ЗНТЦ», Зеленоград, Москва, Россия.
- С. И. Кудряшов, д. ф.-м. н., в. н. с. ФИАН, в. н. с. МГТУ имени Н. Э. Баумана.
ORCID: 0000-0001-6657-2739

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТ В АВТОРСКОМ КОЛЛЕКТИВЕ

М. С. Ковалев: идея проведения исследования, обсуждение результатов, написание и написание рукописи; И. М. Подлесных: сбор материалов и обработка результатов; К. Э. Певчих: предложения по выбору направлений, написание и редактирование рукописи; С. И. Кудряшов: организация работы, обсуждение результатов и редактирование рукописи

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов. Каждый член авторского коллектива дополнил рукопись в своей части работы, в обсуждении результатов приняли участие все члены авторского коллектива.

AUTHORS

- M. S. Kovalev, Ph.D. in technical sciences, senior researcher, Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-5074-0718
- I. M. Podlesnykh, research assistant, Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences, engineer of the Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-3381-2972
- K. E. Pevchikh, Ph.D. in technical sciences, head of the technological area of integrated photonics, Zelenograd Nanotechnology Center JSC, Zelenograd, Moscow, Russia.
- S. I. Kudryashov, doctor of physical and mathematical sciences, senior researcher, Lebedev Physical Institute of the Academy of Sciences, lead researcher, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0001-6657-2739

DISTRIBUTION OF FUNCTIONS BETWEEN THE AUTHORS

M. S. Kovalev: idea of the study, discussion of the results, preparation and writing of the manuscript; I. M. Podlesnykh: material collection and processing of results; K. E. Pevchikh: suggestions for area selection, writing and editing of the manuscript; S. I. Kudryashov: work arrangement, discussion of results and editing of the manuscript.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest. Each member of the team of authors has supplemented the manuscript in his own part of the work, and all team members have taken part in the discussion of results.



БЕЛОМО
оптик

ОАО «Завод «Оптик»



крупная оптическая компания, основанная в 1970 г. За время своей деятельности предприятие зарекомендовало себя как надёжный производитель и поставщик высококачественных оптических изделий. На предприятии функционирует система менеджмента качества, соответствующая требованиям ISO 9001:2015.

- прецизионная оптика: линзы, призмы, зеркала, пластины, аксиконы и др.;
- волоконно-оптические изделия: пластины, фоконы, гибкие осветительные жгуты;
- монокристаллы калий гадолиниевый вольфрамат, активированные неодимом (Nd:KGW) и лазерные активные элементы из них;
- фокусирующая оптика к газовым лазерам на основе солевых кристаллов (КСИ);
- стёкла гнутые фигурные для средств индивидуальной защиты;
- асферические линзы для осветительных целей;
- трубки и штабики оптически обработанные для изготовления микроканальных пластин, измерительной и специальной техники;
- изделия медицинского назначения

[комплект офтальмоскопа зеркального, линзы офтальмологические 3-х и 4-х зеркальные, комплекты линеек скаскопических, линзы для непрямой офтальмоскопии].

Продукция изготавливается по техническим требованиям и спецификациям заказчика.




ОАО «Завод «Оптик», Республика Беларусь,
г. Лида, ул. Машерова, 10
Тел.: +375 154 61 12 25, +375 154 61 12 18/20
факс: +375 154 61 12 43
optic@mail.lida.by www.opticlida.by