

Физика конденсированного состояния

Научная статья

УДК 621.383.52

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18201>

ФОТОДЕТЕКТОРЫ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ НИТЕВИДНЫХ НАНОКРИСТАЛЛОВ InAsP НА КРЕМНИИ

А. С. Голтаев¹ , С. В. Федина^{1,2}, В. В. Фёдоров^{1,2},
А. М. Можаров^{1,2}, К. Н. Новикова^{1,2}, А. А. Максимова¹,
А. И. Баранов¹, А. К. Кавеев^{1,3}, А. В. Павлов^{1,2}, Д. В. Минив¹,
Р. В. Устименко², М. Я. Винниченко², И. С. Мухин^{1,2}

¹ Академический университет им. Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия;

³ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

 goltaev@goltaev.ru

Аннотация. В работе представлена усовершенствованная технология формирования эпитаксиальных массивов нитевидных нанокристаллов (ННК) InAsP, синтезированных на подложках кремния методом молекулярно-пучковой эпитаксии; исследованы оптические и электрофизические свойства этих ННК. На основе выращенных структур создан прототип фотодиода коротковолнового инфракрасного диапазона (1,2 – 1,9 мкм). Промоделированы зонные диаграммы фотодиода. Экспериментально исследованы температурные зависимости вольтамперных характеристик и спектральной чувствительности этого прототипа. Установлено, что внешняя квантовая эффективность фотопреобразования излучения с длиной волны 1380 нм составила примерно 0,25 % при температуре 100 К.

Ключевые слова: InAsP, кремниевая подложка, молекулярно-пучковая эпитаксия, нитевидный нанокристалл, фотодетектор, квантовая эффективность

Финансирование: А. В. Павлов благодарит Российский научный фонд (соглашение №23-72-01091) за финансовую поддержку при расчете зонной диаграммы InAsP. Работы по эпитаксиальному синтезу, созданию прототипов ИК-фотодиодов и их характеризации выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках Государственного задания на проведение фундаментальных исследований (код темы FSEG-2023-0007).

Для цитирования: Голтаев А. С., Федина С. В., Фёдоров В. В., Можаров А. М., Новикова К. Н., Максимова А. А., Баранов А. И., Кавеев А. К., Павлов А. В., Минив Д. В., Устименко Р. В., Винниченко М. Я., Мухин И. С. Фотодетекторы инфракрасного диапазона на основе эпитаксиальных нитевидных нанокристаллов InAsP на кремнии // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2025. Т. 18. № 2. С. 9–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18201>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18201>

INFRARED PHOTODETECTORS BASED ON InAsP EPITAXIAL NANOWIRES ON SILICON

A. S. Goltaev¹ , **S. V. Fedina**^{1,2}, **V. V. Fedorov**^{1,2}, **A. M. Mozharov**^{1,2},
K. N. Novikova^{1,2}, **A. A. Maksimova**¹, **A. I. Baranov**¹, **A. K. Kaveev**^{1,3},
A. V. Pavlov^{1,2}, **D. V. Miniv**¹, **R. V. Ustimenko**², **M. Ya. Vinnichenko**²,
I. S. Mukhin^{1,2}

¹ Alferov University of RAS, St. Petersburg, Russia;

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia;

³ Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia

 goltaev@goltaev.ru

Abstract. In the paper, the upgraded technology of forming the epitaxial arrays of InAsP nanowires (NWs) synthesized on silicon substrates using molecular beam epitaxy has been presented. The optical and electrophysical properties of the NWs were studied. Based on the grown structures, a prototype of a short-wave infrared photodiode for a range from 1.2 μm to 1.9 μm was fabricated. Its band structures were numerically simulated. The temperature dependencies of the current-voltage characteristics and the spectral sensitivity of the photodetector prototype based on the NWs were experimentally studied. The external quantum efficiency of photoconversion of radiation with a wavelength of 1380 nm was found to be about 0.25% at 100 K.

Keywords: InAsP, silicon substrate, molecular beam epitaxy, nanowires, photodetector, quantum efficiency

Funding: A. V. Pavlov thanks the Russian Science Foundation (Agreement No. 23-72-01091) for financial support in calculating the InAsP zone diagram. The work on epitaxial synthesis, prototyping of IR photodiodes and their characterization was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the State Assignment for Fundamental Research (subject code FSEG-2023-0007).

For citation: Goltaev A. S., Fedina S. V., Fedorov V. V., Mozharov A. M., Novikova K. N., Maksimova A. A., Baranov A. I., Kaveev A. K., Pavlov A. V., Miniv D. V., Ustimenko R. V., Vinnichenko M. Ya., Mukhin I. S., Infrared photodetectors based on InAsP epitaxial nanowires on silicon, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 18 (2) (2025) 9–21. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.18201>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Введение

На сегодняшний день гетероструктуры на основе узкозонных полупроводников (их ширина запрещенной зоны составляет менее 1 эВ) находят широкое применение в области инфракрасной (ИК) оптоэлектроники [1, 2]. Практическая значимость работ в данном направлении определяется возможностью создания мультиспектральных ИК радиометров и тепловизоров для систем разведки и опознавания, а также сенсоров химического состава, применяемых в системах обнаружения и идентификации взрывчатых веществ. Наиболее востребованной материальной платформой для ИК детекторов является арсенид индия InAs. Выбор узкозонного (ширина запрещенной зоны E_g составляет 0,35 эВ при температуре 300 К) полупроводникового материала InAs продиктован высокой подвижностью носителей заряда (более $10^4 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$) и большим временем жизни неосновных носителей.

Однако дальнейшее развитие технологии производства детекторов ограничивается двумя основными факторами. Во-первых, малая ширина запрещенной зоны неизбежно ведет к ускорению темпов термогенерации и сопровождается безызлучательной рекомбинацией носителей заряда, что приводит к высоким значениям темнового тока, повышению уровня шумов и снижению чувствительности фотопреобразующих структур [3]. Во-вторых, проблема согласования параметров кристаллических решеток слоев планарной гетероструктуры A^3B^5 и подложки существенно ограничивает возможности управления зонным профилем гетероструктур [4].

Для улучшения приборных характеристик фотодетекторных структур имеется возможность перехода от планарных структур к структурам с развитой поверхностью, а именно – к массивам нитевидных нанокристаллов (ННК) [5]. В этом случае можно за счет развитой боковой поверхности ННК выращивать наноструктуры высокого кристаллического совершенства на подложках, рассогласованных с ними по параметру кристаллической решетки, в частности, на кремниевых. Более того, массивы ННК характеризуются более интенсивным поглощением падающего светового потока, по сравнению с поглощением света планарными слоями того же состава и эквивалентной толщины [6, 7]. Добавление фосфора P в твердый раствор InAsP вызывает увеличение ширины запрещенной зоны, а значит – снижение темновых токов и соответствующих шумов фотоприемников, работающих в коротковолновом ИК-диапазоне (1,0 – 3,5 мкм) [8].

В настоящей работе предложен усовершенствованный технологический подход к созданию фотодетекторов ближнего и коротковолнового ИК-диапазонов (1,3 – 1,9 мкм), в качестве активной области которых используются массивы ННК InAsP, эпитаксиально выращенные на подложках кремния. Эффекты локализации и резонансного усиления электромагнитного поля ИК-диапазона в ННК позволяют существенно улучшить характеристики таких фотодетекторов:

- уменьшить объем их активной области, сохранив при этом их чувствительность;
- снизить их темновой ток;
- повысить быстродействие устройств на их основе [9].

Материалы и методы

Гетеропереход InAsP/Si представляет собой переход II типа с частичным перекрытием зон, что определяет выбор полярности диода. Как следует из зонной диаграммы (рис. 1),

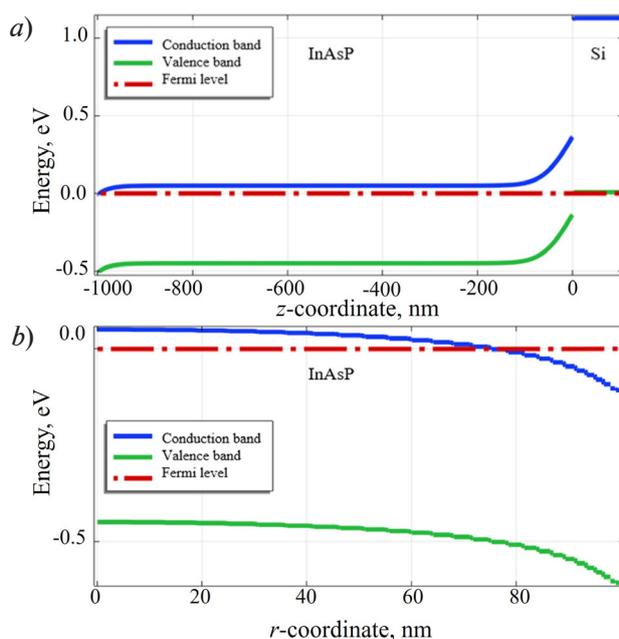


Рис. 1. Зонная структура фотодиода n -InAsP/ p -Si в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

для работы структуры в качестве фотодиода возможна только комбинация InAsP с электронным типом проводимости и кремниевая подложка Si с дырочным типом проводимости (n -InAsP/ p -Si). Противоположная комбинация (p -InAsP/ n -Si) будет приводить к формированию барьеров для носителей заряда. Таким образом, встроенное поле формируется на гетеропереходе n -InAsP/ p -Si (см. рис. 1, а). Как известно, поверхностные состояния ННК сильно влияют на энергетическую зонную диаграмму наноструктур.

С учетом вышеизложенного, в рассматриваемой модели для ННК InAsP на боковую поверхность были добавлены дефекты, наличие которых в случае материала InAsP с шириной запрещенной зоны примерно до 600 – 650 мэВ приводит к принудительной инжекции электронов с уровней дефектов, изгибу зон вблизи поверхности (см. рис. 1, б) и дополнительному вкладу в процесс разделения носителей заряда при работе фотодиода.

Формирование эпитаксиальных массивов НК InAsP осуществлялось на подложках кремния, легированных до *p*-типа проводимости (дырочный кремний, легированный бором (КДБ) Si (111)). Подложки имели диаметр 3 дюйма, были разориентированы на 4° к (111), обладали удельным сопротивлением 0,4 – 0,6 Ом·см.

Используемая установка молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) Veeco GEN III была оснащена эффузионной ячейкой индия, а также молекулярными источниками фосфора P_2 и мышьяка As_4 кречерного типа с игольчатыми клапанами. Интенсивность молекулярных потоков элементов V и III групп считалась пропорциональной давлению, измеренному с помощью ионизационного вакуумметра Байярда – Альперта. Температура подложки (ростовая температура) измерялась термопарой, откалиброванной по температуре фазового перехода поверхностной реконструкции Si (111) $7 \times 7 \leftrightarrow 1 \times 1$. Контроль процесса зарождения и анализ кристаллической структуры НК осуществлялся *in situ* методом дифракции быстрых электронов на отражение.

Основные этапы процесса формирования массивов НК на кремнии представлены на рис. 2. Предварительно перед началом процесса МПЭ НК подложки кремния очищались по модифицированному методу Ширази [10]. На заключительном этапе очистки она осуществлялась методом мокрого химического окисления в кипящем водном растворе аммиака и перекиси водорода ($NH_4OH : H_2O_2 : H_2O$) с соотношением компонентов 1 : 1 : 3. В результате процедуры на поверхности кремния формировался тонкий (около 1,5 нм) слой окисла SiO_x (см. рис. 2, *a*).

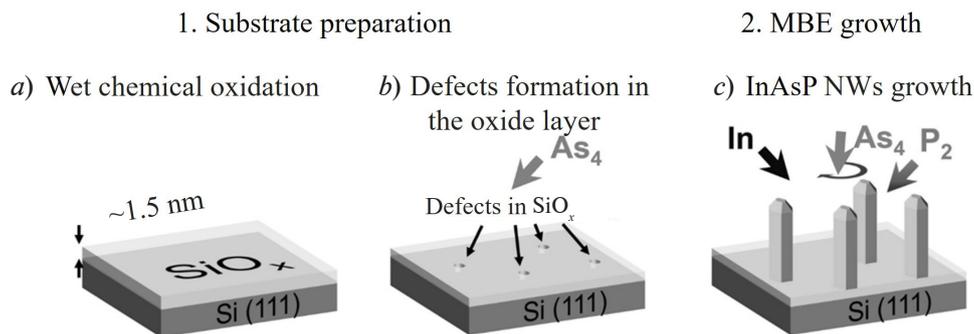


Рис. 2. Основные этапы процесса формирования эпитаксиальных массивов НК InAsP на кремнии:

1 – подготовка подложки, 2 – выращивание материала методом молекулярно-пучковой эпитаксии; *a* – очистка методом мокрого химического окисления, *b* – формирование дефектов в оксидном слое SiO_x ; *c* – рост указанных массивов

Непосредственно перед началом этапа эпитаксиального роста кремниевые подложки подвергались термическому отжигу в условиях сверхвысокого вакуума в течение 30 мин при температуре $780^\circ C$, что приводило к образованию дефектов в слое поверхностного окисла кремния, служащих центрами нуклеации НК (рис. 2, *b*) [11, 12]. Затем в процессе охлаждения подложки до ростовой температуры в потоке мышьяка As_4 , в дефектных областях поверхностного слоя SiO_x стабилизировалась As-замещенная поверхность кремния (рис. 2, *b*) [13]. Формирование НК инициировалось путем вывода источников V группы на необходимые рабочие потоки и открытия шторки молекулярного источника индия (рис. 2, *c*). Для обеспечения равномерного распределения молекулярных потоков в процессе роста подложка вращалась со скоростью 5 об/мин. В целом, варьирование ростовых потоков V группы позволяет регулировать встраивание атомов фосфора и мышьяка в НК InAsP, управляя тем самым шириной запрещенной зоны НК для обеспечения заданной спектральной чувствительности фотодетекторов на их основе.

Исследуемые массивы НК выращивались при температуре подложки $520^\circ C$ в течение 60 мин и соотношении потоков P/As, равном 1. Легирования InAsP НК в процессе роста не осуществлялось, при этом с учетом большого количества поверхностных состояний на боковой поверхности НК, синтезируемые наноструктуры характеризовались проводимостью *n*-типа. Дополнительно были выращены референсные образцы НК InAs.

Важно отметить, что особенностью применяемого метода самоиндуцированного формирования массивов ННК является возможность достижения чрезвычайно высокой поверхностной плотности ННК (≥ 10 мкм⁻²), что существенно снижает рассеяние света и проявляется в виде матово-черной поверхности образца. Для создания фотодетекторных структур в данной работе использовались выращенные ННК InAsP диаметром 110 ± 41 нм, длиной 900 ± 300 нм и поверхностной плотностью $5,5$ мкм⁻². Морфология синтезированных массивов исследовалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), микроскопом Zeiss SUPRA 25-30-63. (см. далее СЭМ-изображение на вставке рис. 4, а).

Исследования кристаллической структуры ННК методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали, что ось роста ННК совпадает с осью [0001]. При этом в ННК наблюдается большое число дефектов упаковки по плоскости роста (0001) [14, 15].

Исследования фотолюминесцентных (ФЛ) свойств массивов ННК проводились на вакуумном ИК-Фурье спектрометре Bruker Vertex 80v, оснащенный светоделителем из бромида калия KBr и германиевыми оптическими окнами. Разрешение спектров фотолюминесценции составляло около 8 мэВ. Для низкотемпературных измерений применялся криостат замкнутого цикла (Janis PTSM-4-7, США) с окнами из селенида цинка. Для возбуждения фотолюминесцентного отклика использовался непрерывный твердотельный Nd:YAG лазер с диодной накачкой ($\lambda = 1064$ нм). Измерения проводились при p -поляризации и угле падения излучения накачки в 45° . Для модуляции лазерного излучения использовался оптико-механический модулятор с частотой 340 Гц. Сигнал ФЛ регистрировался фотодиодом на основе антимолида индия, охлаждаемым жидким азотом, и детектировался синхронным усилителем SR830 DSP.

Для моделирования электрооптических свойств твердых растворов применялось приближение виртуальных кристаллов (*англ.* Virtual-Crystal Approximation (VCA)). Для представления волновых функций использовался базис плоских волн; при оптимизации геометрии использовался вид обменно-корреляционной энергии PBEsol [16]; для корректного описания электронных свойств и при построении зонных диаграмм использовался meta-GGA потенциал TB09 [17]. Расчет проводился с учетом спин-орбитального взаимодействия. В соответствии с результатами расчетов (см. рис. 4, б), наблюдаемый сдвиг положения максимума ФЛ соответствует составу $\text{InAs}_{0,81}\text{P}_{0,19}$.

Электрофизические характеристики и спектральная зависимость эффективности фотопреобразования исследуемой структуры измерялись на четырехзондовой станции, смонтированной на холодном пальце азотного криостата. В качестве перестраиваемого источника монохроматического излучения использовалась галогеновая лампа и монохроматор (SOLAR Laser Systems M266-IV). Измерение фототока проводилось с использованием токового предусилителя Stanford Research System SR570 и синхронного детектора Stanford Research System SR830. Для калибровки применялся реперный фотодиод с известными характеристиками в спектральном диапазоне 600–2000 нм.

Создание мезоструктур фотодетектора

Для исследования функциональных характеристик приборных структур, на основе выращенных эпитаксиальных массивов ННК InAsP на Si методами постростовых технологий были созданы мезоструктуры фотодетектора. На рис. 3 схематически представлены этапы процесса формирования и упрощенная конструкция фотодетектора на основе ННК.

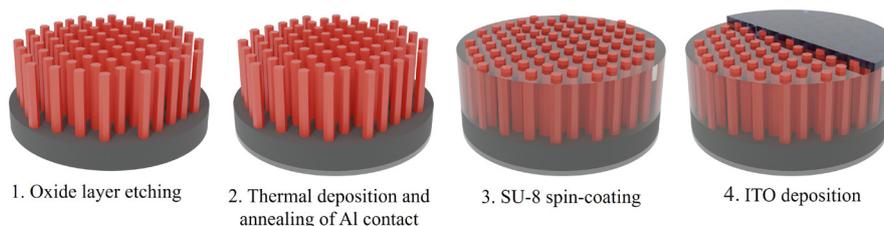


Рис. 3. Процесс формирования и конструкция фотодетектора на основе ННК InAsP на кремниевой подложке:

пассивация H^+ и удаление оксидного слоя с тыльной стороны подложки (1); термическое осаждение и последующее вжигание Al-контакта (2); планаризация массива ННК слоем эпоксидной смолы SU-8 (3); формирование верхнего прозрачного контакта из ITO (4)

На первом этапе была проведена пассивация водородной плазмой H^+ под давлением 500 мТорр, при разрядной мощности 20 Вт, в течение 5 мин; эта обработка необходима для подавления поверхностных состояний и центров рекомбинации на гетерогранице НК InAs/Si [18]. После удаления оксидного слоя, методами вакуумного термического испарения (нагрев мишени электронным пучком) и быстрого термического отжига ($300\text{ }^\circ\text{C}$) формировался тыльный омический контакт (алюминиевый, толщиной 200 нм) к кремниевой подложке. Для частичной планаризации массива НК, на лицевую сторону структуры методом центрифугирования наносился слой эпоксидной смолы (фоторезист SU-8), заполняющий свободное пространство между НК в массиве. Толщина наносимого слоя фоторезиста, которая контролировалась методом СЭМ, обеспечивала формирование лицевого контакта к вершинам НК (см. рис. 3). Для удаления поверхностного окисла с вершин НК, структуры предварительно обрабатывались в водном растворе соляной кислоты с концентрацией 1 : 3 (HCl : H_2O). Верхним прозрачным контактом служил слой оксида индия-олова (ИТО) толщиной 200 нм, осаждаемый через теньевую маску методом высокочастотного магнетронного распыления; для его создания применялась установка Voc Edwards Auto 500 RF 10 (Великобритания).

Результаты и их обсуждение

Характерные спектры ФЛ, полученные при температуре 5 К от массивов референсных НК InAs и НК твердого раствора InAsP представлены на рис. 4, *a*. Видно, что положение максимума НК InAsP смещено в область более высоких энергий примерно на 120 мэВ относительно НК InAs; это есть следствие большей ширины запрещенной зоны твердого раствора InAsP.

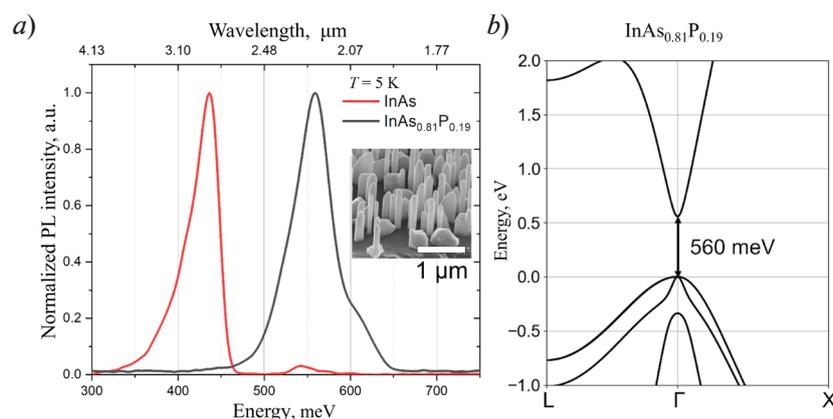


Рис. 4. Спектры низкотемпературной ФЛ от эпитаксиальных массивов НК InAs и InAsP на кремнии (*a*) и расчетная зонная диаграмма $InAs_{0.81}P_{0.19}$ со сфалеритной кристаллической структурой (*b*).
На вставке: СЭМ-изображение НК InAsP

Чтобы оценить концентрацию фосфора в рассматриваемом образце, результаты измерений низкотемпературной ФЛ сравнивались с результатами моделирования в рамках теории функционала плотности (см. рис. 4, *b*). Расчет проводился в программе ABINIT [19].

На рис. 5, *a* представлены измеренные и расчетная темновые вольтамперные характеристики (ВАХ) при различных температурах. Численный расчет показывает, что в идеальном случае при отрицательном смещении должна наблюдаться постоянная величина тока. Это означает, что основной вклад в систему вносят только термогенерированные носители заряда. Прямая ветвь отражает экспоненциальную зависимость, что соответствует процессу инжекции дырок из кремниевой подложки в структуру InAsP.

Полученная экспериментально ВАХ (зависимость обратного тока от величины обратного смещения) указывает на наличие токов утечки в исследуемой структуре, связанных с безызлучательной рекомбинацией. Последняя вызвана захватом носителей заряда на состояния ловушек, формирующихся вблизи интерфейса структуры InAsP/Si.

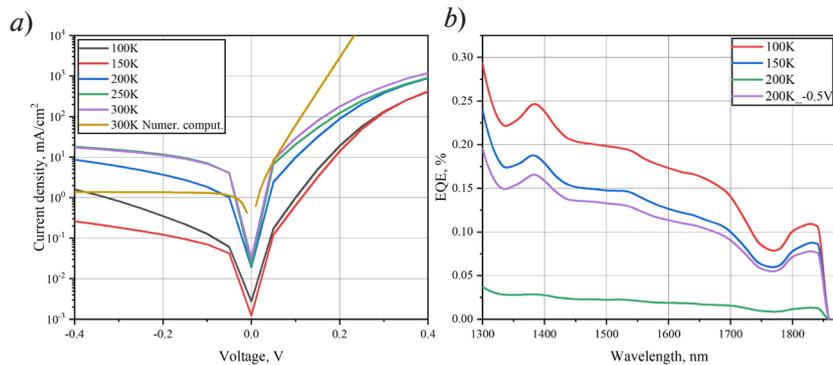


Рис. 5. Электрофизические и спектральные температурно-зависимые характеристики фотодиода: *a* – зависимости плотности тока, нормированного на площадь массива ННК в мезе, от напряжения; *b* – спектры внешней квантовой эффективности (EQE)

При этом уменьшение рабочей температуры ведет к замедлению темпов как термогенерации носителей, так и их рекомбинации через дефекты, что проявляется в понижении обратного тока. Помимо этого, наблюдается рост напряжения открытия диода, вызванный увеличением ширины запрещенной зоны соединения InAsP при понижении температуры. Прямая ветвь имеет характерный изгиб, связанный с наличием последовательного сопротивления в измерительной схеме, даваемого, в частности, верхним токособирающим контактом.

Для исследуемой фотодетекторной структуры были экспериментально получены спектральные зависимости внешней квантовой эффективности фотопреобразования (*англ.* External Quantum Efficiency (EQE)) при нулевом смещении в диапазоне длин волн 1300 – 1900 нм. Эти спектры EQE приведены на рис. 5, *b*. Следует отметить, что фотоотклик для длин волн менее 1300 нм, обусловленный поглощением в кремниевой подложке, в данном исследовании не рассматривался. Так, вне диапазона поглощения кремния, при температуре 200 К и выше (без приложения внешнего электрического смещения) фотоотклик отсутствует, что свидетельствует о высоком темпе рекомбинации фотогенерируемых носителей заряда. При уменьшении температуры ниже 200 К, фототок в длинноволновой области спектра начинает возрастать. При температуре 100 К значение EQE на длине волны 1380 нм доходит до значения 0,25 %.

Можно предположить, что такое поведение EQE вызвано изменением механизма транспорта носителей в активной области наноструктуры при снижении температуры. Для проверки этого предположения была оценена длина экранирования Дебая в рассматриваемой структуре. Установлено, что при 300 К расчетное значение длины Дебая для InAsP составляет около 150 нм (концентрация частиц $n_i = 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), что существенно короче длины ННК. Поэтому термогенерированные носители заряда эффективно экранируют встроенное электрическое поле, и в активной области структуры осуществляется преимущественно диффузионный транспорт носителей. Вследствие малого латерального размера и развитой поверхности ННК, такой тип транспорта оказывается малоэффективным, что приводит к преимущественной рекомбинации фотогенерируемых носителей на поверхностных состояниях.

При снижении температуры длина Дебая возрастает, а область экранирования увеличивается. В области неполного экранирования основным механизмом транспорта выступает дрейф носителей во встроенном электрическом поле между *p*-Si и *n*-InAsP, возникающим ввиду разницы энергетического расположения уровней Ферми в материалах.

Из вышеизложенного можно заключить, что длина диффузии фотогенерируемых носителей в исследуемых структурах при $T \geq 200 \text{ К}$ оказывается недостаточной для эффективного разделения носителей заряда. Это, вероятно, связано с высокой плотностью дефектов упаковки в ННК, снижающих подвижность носителей заряда.

Анализ наблюдаемой неравномерности спектральной зависимости фотоотклика структуры приводит к заключению, что эффективность поглощения света сильно зависит от

диаметра и поверхностной плотности ННК в массиве [20]. Расчетные данные и учет морфологии массива ННК (диаметр ННК составляет около 110 нм, поверхностная плотность – около $5,5 \text{ мкм}^{-2}$) позволяют заключить, что коэффициент поглощения излучения с длиной волны 1300 нм в исследуемой структуре не превышает 5 – 7 %.

Следовательно, для того чтобы в дальнейшем повысить чувствительность ИК-фотодетектора на основе ННК InAsP, необходимо оптимизировать параметры морфологии массива ННК путем увеличения их диаметра до 400 – 500 нм и поверхностной плотности до 10 мкм^{-2} и более.

Заключение

В работе проведено комплексное исследование процессов формирования массивов ННК InAsP, а также их оптических и электрофизических свойств. Разработаны соответствующие постростовые технологии и изготовлены прототипы фотодетекторов на основе массивов ННК InAsP на поверхности кремниевой подложки Si (111). Изучены температурные зависимости их спектральной чувствительности и электрофизических характеристик. Установлено, что экспериментально измеренная внешняя квантовая эффективность исследуемой системы достигает 0,25% для ИК-диапазона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Abrand A., Baboli M. A., Fedorenko A., Polly S. J., Manfreda-Schulz E., Hubbard S. M., Mohseni P. K.** Localized self-assembly of InAs nanowire arrays on reusable Si substrates for substrate-free optoelectronics // *ACS Applied Nano Materials*. 2022. Vol. 5. No. 1. Pp. 840– 851.
2. **Song C., Wang P., Qian Y., Zhou G., Nötzel R.** Enhanced terahertz radiation from InAs (100) with an embedded InGaAs hole blocking layer // *Optics Express*. 2020. Vol. 28. No. 18. Pp. 25750–25756.
3. **Зи С. М.** Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир. 1973, 456 с.
4. **Martyniuk P., Antoszewski J., Martyniuk M., Faraone L., Rogalski A.** New concepts in infrared photodetector designs // *Applied Physics Reviews*. 2014. Vol. 1. No. 4. P. 041102.
5. **Mårtensson T., Svensson C. P. T., Wacaser B. A., Larsson M. W., Seifert W., Deppert K., Gustafsson A., Wallenberg L. R., Samuelson L.** Epitaxial III–V nanowires on silicon // *Nano Letters*. 2004. Vol. 4. No. 10. Pp. 1987–1990.
6. **LaPierre R. R., Robson M., Azizur-Rahman K. M., Kuyanov P.** A review of III–V nanowire infrared photodetectors and sensors // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2017. Vol. 50. No. 12. P. 123001.
7. **Li Z., He Z., Xi C., Zhang F., Huang L., Yu Y., Tan H.H., Jagadish C., Fu L.** Review on III–V semiconductor nanowire array infrared photodetectors // *Advanced Materials Technologies*. 2023. Vol. 8. No. 13. P. 2202126.
8. **Robson M., Azizur-Rahman K. M., Parent D., Wojdylo P., Thompson D. A., LaPierre R. R.** Multispectral absorptance from large-diameter InAsSb nanowire arrays in a single epitaxial growth on silicon // *Nano Futures*. 2017. Vol. 1. No. 3. P. 035001.
9. **Wang B., Leu P. W.** Tunable and selective resonant absorption in vertical nanowires // *Optics Letters*. 2012. Vol. 37. No. 18. Pp. 3756–3758.
10. **Ishizaka A., Shiraki Y.** Low temperature surface cleaning of silicon and its application to silicon MBE // *Journal of the Electrochemical Society*. 1986. Vol. 133. No. 4. P. 666.
11. **Koblmüller G., Hertenberger S., Vizbaras K., Bichler M., Bao F., Zhang J-P., Abstreiter G.** Self-induced growth of vertical free-standing InAs nanowires on Si(111) by molecular beam epitaxy // *Nanotechnology*. 2010. Vol. 21. No. 36. P. 365602.
12. **Fedorov V. V., Berdnikov Y., Sibirev N. V., et al.** Tailoring morphology and vertical yield of self-catalyzed GaP nanowires on template-free Si substrates // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11. No. 8. P. 1949.
13. **Tomioka K., Motohisa J., Hara S., Fukui T.** Control of InAs nanowire growth directions on Si // *Nano Letters*. 2008. Vol. 8. No. 10. Pp. 3475–3480.
14. **Fedorov V., Vinnichenko M., Ustimenko R., et al.** Non-uniformly strained core–shell InAs/InP nanowires for mid-infrared photonic applications // *ACS Applied Nano Materials Journal*. 2023. Vol. 6. No. 7. Pp. 5460–5468.

15. Kaveev A. K., Fedorov V. V., Dvoretckaya L. N., Fedina S. V., Mukhin I. S. Formation of single and heterostructured nanowires based on $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ solid solutions on Si (111) // *Semiconductors*. 2024. Vol. 58. No. 4. Pp. 327–330.
16. Perdew J. P., Ruzsinszky A., Csonka G. I., Vydrov O. A., Scuseria G. E., Constantin L. A., Zhou X., Burke K. Generalized gradient approximation for solids and their surfaces // *Physical Review Letters*. 2008 arXiv:0707.2088 [cond-mat.other]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0707.2088>.
17. Tran F., Blaha P. Accurate band gaps of semiconductors and insulators with a semilocal exchange-correlation potential // *Physical Review Letters*. 2009. Vol. 102. No. 22. P. 226401.
18. Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., Fedorov V. V., Uvarov A. V., Kudryashov D. A., Mikhailovskii V. Yu., Cirilin G. E., Mukhin I. S. GaN nanowires/*p*-Si interface passivation by hydrogen plasma treatment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1537. No. 1. P. 012012.
19. Gonze X., Amadon B., Antonius G., et al. The Abinit project: Impact, environment and recent developments // *Computer Physics Communications*. 2020. Vol. 248. March. P. 107042.
20. Dvoretckaia L., Mozharov A., Pavlov A., Polozkov R., Mukhin I. Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP NWs // *Scripta Materialia*. 2023. Vol. 226. 15 March. P. 115246.

REFERENCES

1. Abrand A., Baboli M. A., Fedorenko A., et al., Localized self-assembly of InAs nanowire arrays on reusable Si substrates for substrate-free optoelectronics, *ACS Appl. Nano Mater.* 5 (1) (2022) 840–851.
2. Song C., Wang P., Qian Y., et al., Enhanced terahertz radiation from InAs (100) with an embedded InGaAs hole blocking layer, *Opt. Express*. 28 (18) (2020) 25750–25756.
3. Sze S. M., *Physics of semiconductor devices*, 1st Edition, John Willey & Sons Inc., Chichester, UK, 1969.
4. Martyniuk P., Antoszewski J., Martyniuk M., et al., New concepts in infrared photodetector designs, *Appl. Phys. Rev.* 1 (4) (2014) 041102.
5. Mårtensson T., Svensson C. P. T., Wacaser B. A. et al., Epitaxial III–V nanowires on silicon, *Nano Lett.* 4 (10) (2004) 1987–1990.
6. LaPierre R. R., Robson M., Azizur-Rahman K. M., et al., A review of III–V nanowire infrared photodetectors and sensors, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 50 (12) (2017) 123001.
7. Li Z., He Z., Xi C., et al., Review on III–V semiconductor nanowire array infrared photodetectors, *Adv. Mater. Technol.* 8 (13) (2023) 2202126.
8. Robson M., Azizur-Rahman K. M., Parent D., et al., Multispectral absorptance from large-diameter InAsSb nanowire arrays in a single epitaxial growth on silicon, *Nano Futures*. 1 (3) (2017) 035001.
9. Wang B., Leu P. W., Tunable and selective resonant absorption in vertical nanowires, *Opt. Lett.* 37 (18) (2012) 3756–3758.
10. Ishizaka A., Shiraki Y., Low temperature surface cleaning of silicon and its application to silicon MBE, *J. Electrochem. Soc.* 133 (4) (1986) 666.
11. Koblmüller G., Hertenberger S., Vizbaras K., Self-induced growth of vertical free-standing InAs nanowires on Si (111) by molecular beam epitaxy, *Nanotechnol.* 21 (36) (2010) 365602.
12. Fedorov V. V., Berdnikov Y., Sibirev N. V., et al., Tailoring morphology and vertical yield of self-catalyzed GaP nanowires on template-free Si substrates, *Nanomater.* 11 (8) (2021) 1949.
13. Tomioka K., Motohisa J., Hara S., Fukui T., Control of InAs nanowire growth directions on Si, *Nano Lett.* 8 (10) (2008) 3475–3480.
14. Fedorov V., Vinnichenko M., Ustimenko R., et al., Non-uniformly strained core–shell InAs/InP nanowires for mid-infrared photonic applications, *ACS Appl. Nano Mater.* 6 (7) (2023) 5460–5468.
15. Kaveev A. K., Fedorov V. V., Dvoretckaya L. N., et al., Formation of single and heterostructured nanowires based on $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ solid solutions on Si (111), *Semicond.* 58 (4) (2024) 327–330.
16. Perdew J. P., Ruzsinszky A., Csonka G. I., et al., Generalized gradient approximation for solids and their surfaces, *Phys. Rev. Lett.* 2008. arXiv:0707.2088 [cond-mat.other]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0707.2088>.
17. Tran F., Blaha P., Accurate band gaps of semiconductors and insulators with a semilocal exchange-correlation potential, *Phys. Rev. Lett.* 102 (22) 2009 226401.

18. Shugurov K. Yu., Mozharov A. M., Bolshakov A. D., et al., GaN nanowires/*p*-Si interface passivation by hydrogen plasma treatment, J. Phys.: Conf. Ser. 1537(1). (2020) 012012.

19. Gonze X., Amadon B., Antonius G., et al., The Abinit project: Impact, environment and recent developments, Comput. Phys. Commun. 248 (March) (2020) 107042.

20. Dvoretckaia L., Mozharov A., Pavlov A., et al., Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP NWs, Scr. Mater. 226 (15 March) (2023) 115246.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ГОЛТАЕВ Александр Сергеевич – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

goltaev@goltaev.ru

ORCID: 0000-0001-8179-3169

ФЕДИНА Сергей Викторович – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

fedina.serg@yandex.ru

ORCID: 0000-0001-7521-3754

ФЁДОРОВ Владимир Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, старший научный сотрудник высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

burunduk.uk@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5547-9387

МОЖАРОВ Алексей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Центра приоритетных направлений науки и технологий Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

alex000090@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8661-4083

НОВИКОВА Кристина Николаевна – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, инженер-исследователь научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3

novikova_k@spbau.ru

ORCID: 0000-0001-8440-494X

МАКСИМОВА Алина Андреевна – инженер лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
deer.blackgreen@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3503-7458

БАРАНОВ Артем Игоревич – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
baranov_art@spbau.ru
ORCID: 0000-0002-4894-6503

КАВЕЕВ Андрей Камильевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории мощных полупроводниковых приборов Физико-технического института имени А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
kaveev@mail.ioffe.ru
ORCID: 0000-0002-3640-677X

ПАВЛОВ Александр Валерьевич – кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории эпитаксиальных наноструктур соединений A^3B^5 на кремнии Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
a.pavlov@physics.spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-1125-6653

МИНИВ Дмитрий Владимирович – лаборант лаборатории возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
dimin46@mail.ru
ORCID: 0009-0006-3064-4175

УСТИМЕНКО Ратмир Владленович – аспирант Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
ustimenko_rv@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4123-4375

ВИННИЧЕНКО Максим Яковлевич – кандидат физико-математических наук, заместитель директора Института электроники и телекоммуникаций, доцент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29
mvin@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-6118-0098

МУХИН Иван Сергеевич – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии Санкт-Петербургского академического университета имени Ж. И. Алфёрова РАН, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

194021, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, 8, к. 3
imukhin@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-9792-045X

THE AUTHORS

GOLTAEV Aleksandr S.

Alferov University of RAS
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
goltaev@goltaev.ru
ORCID: 0000-0001-8179-3169

FEDINA Sergey V.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
fedina.serg@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-7521-3754

FEDOROV Vladimir V.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
burunduk.uk@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5547-9387

MOZHAROV Alexey M.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
alex000090@gmail.com
ORCID: 0000-0002-8661-4083

NOVIKOVA Kristina N.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
novikova_k@spbau.ru
ORCID: 0000-0001-8440-494X

MAKSIMOVA Alina A.

Alferov University of RAS
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
deer.blackgreen@yandex.ru
ORCID: 0000-0002-3503-7458

BARANOV Artem I.

Alferov University of RAS
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
baranov_art@spbau.ru
ORCID: 0000-0002-4894-6503

KAVEEV Andrey K.

Alferov University of RAS
Ioffe Institute of RAS
26 Polytekhnicheskaya St., St. Petersburg, 194021, Russia
kaveev@mail.ioffe.ru
ORCID: 0000-0002-3640-677X

PAVLOV Alexander V.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
a.pavlov@physics.spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-1125-6653

MINIV Dmitry V.

Alferov University of RAS
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
dimin46@mail.ru
ORCID: 0009-0006-3064-4175

USTIMENKO Ratmir V.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
ustimenko_rv@spbstu.ru
ORCID: 0000-0003-4123-4375

VINNICHENKO Maksim Ya.

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia
mvin@spbstu.ru
ORCID: 0000-0002-6118-0098

MUKHIN Ivan S.

Alferov University of RAS
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
8 Khlopin St., St. Petersburg, 194021, Russia
imukhin@yandex.ru
ORCID: 0000-0001-9792-045X

Статья поступила в редакцию 19.11.2024. Одобрена после рецензирования 16.12.2024.
Принята 16.12.2024.
Received 19.11.2024. Approved after reviewing 16.12.2024. Accepted 16.12.2024.