

*На правах рукописи*



Голтаев Александр Сергеевич

РАЗРАБОТКА, СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ  
ФОТОДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР НИТЕВИДНЫХ  
НАНОКРИСТАЛЛОВ InAs(P) НА КРЕМНИИ

1.3.11. Физика полупроводников

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2026

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

**Можаров Алексей Михайлович**

К. ф. - м. н., с. н. с. лаборатории возобновляемых источников энергии Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук»

**Официальные оппоненты:**

**Морозов Сергей Вячеславович**, д. ф. - м. н., в. н. с., зав. лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток института физики микроструктур РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук».

**Рахлин Максим Владимирович**, к. ф.-м. н., с. н. с. лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук.

**Ведущая организация:**

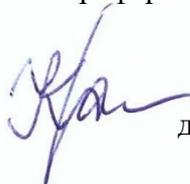
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина).

Защита диссертации состоится «14» мая 2026 г. в 16:00 ч. на заседании диссертационного совета АУ 02.01 СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова и на сайте университета [www.srbau.ru](http://www.srbau.ru) в разделе «Диссертационный совет» - «Информация о защитах».

Отзывы на автореферат в одном экземпляре, заверенные печатью учреждения, просьба направлять по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А на имя ученого секретаря диссертационного совета АУ 02.01

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 года.



Ученый секретарь  
диссертационного совета АУ 02.01  
к.ф.-м.н. Шубина К. Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы исследования

Полупроводниковые гетероструктуры  $A^3B^5$  являются ключевыми материалами для создания высокоэффективных фотодетекторов, применяемых в телекоммуникационных системах и оптоэлектронных устройствах [1]. В настоящее время все более актуальной становится разработка фотодетекторов, работающих в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне [2], востребованном в ряде областей: от химического и геологического анализа [2,3] до биомедицинской визуализации [4,5]. В частности, низкое рэлеевское рассеяние в атмосферных окнах прозрачности делает ИК-детекторы перспективными для приложений детектирования света и определения дальности [6,7]. В биомедицине использование этого диапазона обеспечивает более эффективную регистрацию сигнала при визуализации, по сравнению с излучением, традиционно используемым во флуоресцентной микроскопии (650 – 950 нм) [8].

Среди соединений  $A^3B^5$ , арсенид индия (InAs) выделяется высокой подвижностью электронов ( $\mu \leq 4 \cdot 10^4 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ) и малой шириной запрещенной зоны ( $E_g \approx 0,354 \text{ эВ}$ , при  $T = 300 \text{ К}$ ), что теоретически позволяет перекрыть диапазон детектирования до  $\sim 3,5 \text{ мкм}$ . Однако узкая  $E_g$  способствует повышенной термогенерации носителей, что приводит к увеличению темнового тока и снижению отношения «сигнал/шум».

Эффективным решением является переход к твердым растворам  $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ . Введение фосфора позволяет варьировать ширину запрещенной зоны от значения InAs до уровня InP ( $E_g \approx 1,34 \text{ эВ}$ ). Это обеспечивает экспоненциальное снижение собственной концентрации носителей и, как следствие, подавление темнового тока [9]. Увеличение  $E_g$  сопровождается смещением длинноволновой границы фотоотклика, что позволяет настраивать рабочий спектральный диапазон [10].

Поскольку скорость термогенерации также пропорциональна объему активной области, дальнейшим подходом к снижению темнового тока является минимизация этого объема, которая возможна при использовании массивов

нитевидных нанокристаллов (ННК). Благодаря геометрии в ННК проявляются волноводные и резонансные эффекты, что приводит к увеличению эффективного сечения оптического захвата [11,12]. Это также способствует снижению уровня темнового тока при сохранении фоточувствительности.

Кроме того, малая площадь контакта ННК с подложкой обеспечивает эффективную релаксацию упругих напряжений, позволяя интегрировать  $A^3B^5$  структуры на дешевые кремниевые подложки [13–15]. При этом критически важным является выбор метода синтеза: для совместимости с кремниевыми технологиями необходимо исключить использование золотого катализатора. Золото может образовывать глубокие ловушки в кремнии [16], встраиваться в решетку ННК [17] и вызывать непреднамеренное легирование ННК кремнием [18]. Это требование накладывает ограничения на использование традиционного для ИК-диапазона материала InGaAs, поскольку выращивание безкаталитических ННК сопряжено со значительными трудностями в управлении стехиометрией. В связи с этим альтернативным направлением является разработка фотоприемных структур на основе ННК InAs(P), выращиваемых по самоиндуцированному механизму [19,20]. Согласно моделированию [9], массивы ННК InAsP демонстрируют обнаружительную способность, сопоставимую с лучшими тонкопленочными структурами InGaAs. В случае метаморфных эпитаксиальных структур в длинноволновом диапазоне (1,6 – 2,3 мкм) интегральная спектральная чувствительность фотодетектора на основе InAsP на 15 % выше, чем у InGaAs [21].

Таким образом, использование массивов ННК InAs(P), выращенных по самоиндуцированному механизму на Si подложках, в качестве активной области является перспективным направлением для создания ИК-фотодетекторов нового поколения.

## **Цель работы**

Целью диссертационной работы является разработка, теоретическое и экспериментальное исследование оптоэлектронных свойств фотодетекторов на основе вертикально ориентированных массивов нитевидных нанокристаллов InAs(P), выращенных на кремниевых подложках.

## **Задачи работы**

1. Численное моделирование оптических свойств упорядоченных вертикально ориентированных массивов ННК InAs на Si подложке с целью определения оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих максимальное поглощение излучения в рабочем спектральном диапазоне.

2. Численное моделирование процессов разделения носителей заряда в фотодетекторах на основе ННК InAs(P) на Si подложке. Оценка величин темнового тока и квантовой эффективности структур.

3. Исследование морфологических, структурных и оптических характеристик массивов ННК InAs(P) на Si подложках.

4. Разработка технологического маршрута и изготовление экспериментальных образцов фотодетекторов на основе вертикальных массивов ННК InAs(P) на Si подложках.

5. Комплексное исследование электрофизических и спектральных характеристик фотодетекторов на основе вертикальных массивов ННК InAs(P) на Si подложках при различных температурах.

## **Научная новизна работы**

1. Впервые показано, что упорядоченные массивы ННК InAs (период 1,5 мкм), сформированные методом микросферной литографии, обеспечивают подавление коэффициента отражения более чем в 18 раз относительно пленочных структур, достигая минимума  $\sim 0,4\%$  (при  $\lambda=2000$  нм).

2. Впервые выполнено сравнительное численное моделирование фотодетекторов на основе аксиальных гетероструктур ННК n- InAs/i-InAs/p-Si (n–

i-p) и p-InAs/i-InAs/n-Si (p-i-n). Установлено, что при понижении температуры с 300 К до 150 К квантовая эффективность n-i-p структуры возрастает с 40% до 80%. В то же время, рост квантовой эффективности p-i-n структуры ограничен диапазоном 40–60%, что объясняется ее большей чувствительностью к уменьшению диффузионной длины носителей, а также усиленной рекомбинацией дырок вблизи гетерограницы из-за наличия обогащенной электронами области.

3. Впервые экспериментально установлено, что омический характер ВАХ радиальных гетероструктур p-InAs/i-InAs/n-Si обусловлен сменой типа основных носителей на поверхности ННК вследствие пиннинга уровня Ферми в зоне проводимости.

4. Впервые созданы и исследованы в диапазоне 100–300 К фотодетекторы на основе радиальных гетероструктур n-InAs/i-InAs/p-InAs на подложке p-Si.

5. Впервые созданы фотодетекторы на основе ННК твердого раствора InAs<sub>0,8</sub>P<sub>0,2</sub> на Si подложках и продемонстрирована их фоточувствительность в ближнем ИК-диапазоне (1000–2300 нм) при комнатной температуре.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов**

1. На основании численного моделирования установлены закономерности влияния геометрических параметров массивов ННК InAs на спектральные характеристики поглощения и отражения в ближнем ИК-диапазоне. Показано, что за счет эффектов локализации света эквивалентное тонкой пленке поглощение достигается при меньшем объеме полупроводникового материала, составляющем от 0,7% до 35% объема пленки (в зависимости от длины волны).

2. Теоретически обосновано, что использование геометрии ННК InAs позволяет при сохранении уровня поглощения, сопоставимого с тонкой пленкой, существенно уменьшить объем активной области, что обеспечивает снижение темнового тока на 1–3 порядка.

3. Установлено, что применение водородной пассивации гетерограницы InAs/Si является эффективным методом подавления темнового тока в

фотодетекторах на основе ННК. Данный результат показывает, что величина темнового тока в исследуемых структурах зависит от плотности состояний на гетерогранице.

4. Интерпретирован механизм формирования омических вольт - амперных характеристик в радиальных гетероструктурах p- InAs/i- InAs/n- Si. Установлено, что причиной отсутствия выпрямляющего эффекта является смена типа основных носителей заряда на поверхности ННК, приводящая к шунтированию p-n перехода поверхностными каналами проводимости.

5. На основании численного расчета установлено, что минимальная высота ННК InAs, обеспечивающая поглощение ближнего ИК-излучения ( $\lambda = 1550$  нм) на уровне не ниже 63%, составляет 1500 нм.

6. В результате численного моделирования установлено, что для формирования фотодиодной структуры на основе ННК InAs(P) необходимо использовать кремниевую подложку дырочного типа проводимости с уровнем легирования не ниже  $10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

7. Фотодетектор на основе самоорганизованного массива вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов с радиальной гетероструктурой p-InAs/i-InAs/p-InAs, со средним диаметром  $0,2 \pm 0,04$  мкм, высотой  $2,7 \pm 0,6$  мкм и поверхностной плотностью  $2,12 \pm 0,42$  мкм<sup>-2</sup>, эпитаксиально выращенный на подложке p-Si, демонстрирует фоточувствительность в спектральном диапазоне 1000 – 2300 нм с максимумом внешней квантовой эффективностью не менее 0,25% при температуре 100 К.

8. Созданы фотодетекторы на основе ННК InAs<sub>0.8</sub>P<sub>0.2</sub> на кремниевых подложках, продемонстрировавшие работоспособность и чувствительность в ближнем ИК-диапазоне ( $\lambda = 1100 - 2300$  нм) при комнатной температуре.

## **Методология и методы исследования**

1. Численное моделирование в среде COMSOL Multiphysics: анализ оптических свойств массивов ННК и электрофизических характеристик фотодиодов на их основе.
2. Молекулярно-пучковая эпитаксия: рост массивов нитевидных нанокристаллов InAs(P) на Si (111) подложках;
3. Структурная характеристика: сканирующая и просвечивающая электронные микроскопии, рентгеновская дифракция, низкотемпературная фотолюминесценция, энергодисперсионный анализ;
4. Постростовая обработка: фотолитография и вакуумные методы осаждения для формирования контактов и диэлектрических покрытий.
5. Низкотемпературные измерения: исследование вольт-амперных характеристик, спектральной чувствительности и квантовой эффективности в широком температурном диапазоне.

## **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты численного моделирования показывают, что гексагонально упорядоченный массив вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов InAs, расположенный на подложке Si и характеризующийся диаметром  $0,42 \pm 0,15$  мкм, периодом следования  $1,4 \pm 0,35$  мкм и высотой не менее 1,5 мкм, обеспечивает поглощение инфракрасного излучения при нормальном падении в спектральном диапазоне 1,5 – 2,0 мкм на уровне не менее 71%.
2. Массив упорядоченных вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов InAs с диаметром  $0,28 \pm 0,06$  мкм, высотой  $7,7 \pm 1,8$  мкм и периодом  $1,54 \pm 0,02$  мкм, эпитаксиально выращенный на подложке Si, обладает коэффициентом отражения не более 1,7% при нормальном падении в спектральном диапазоне длин волн 700 – 2500 нм.
3. Фотодетектор на основе самоорганизованного массива вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  со средним диаметром

$0,32 \pm 0,13$  мкм, высотой  $3,60 \pm 0,85$  мкм и поверхностной плотностью  $1,5 \pm 0,3$  мкм<sup>2</sup>, эпитаксиально выращенного на подложке p-Si по самоиндуцированному механизму, демонстрирует фоточувствительность в спектральном диапазоне 1 – 2,3 мкм с максимумом внешней квантовой эффективности 19 % при комнатной температуре.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием апробированных методик проведения экспериментальных и теоретических исследований. Экспериментальные измерения, выполненные с применением современного высокоточного оборудования, были многократно воспроизведены на серии образцов, что обеспечивает их повторяемость. Наблюдается согласованность между расчетными и экспериментальными данными. Основные результаты работы представлены на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях, индексируемых в базах данных РИНЦ, ВАК, Scopus и Web of Science.

### **Апробация работы**

Материалы диссертации были представлены на международных и российских конференциях:

1. Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники (с участием иностранных ученых) ФОТОНИКА 2021, 4-8 октября 2021 г., ИФП СО РАН им. А.В.Ржанова, Новосибирск
2. IV Международная научная конференция "Наука будущего - наука молодых" Москва 17.11.2021 - 20.11.2021
3. XXIII Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, Санкт - Петербург, 22.11.2021-26.11.2021

4. 9th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures May, 24-27, 2022
5. 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures May, 23-26, 2023
6. Молодежная Школа по физике конденсированного состояния (Школа ФКС-2024) 11 - 15 марта 2024 года, Ленинградская область»

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 6 работ в журналах, индексируемых в WoS и Scopus, в том числе 2 научные работы в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ, получен 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

### **Личный вклад**

Личный вклад автора является определяющим: все результаты работы получены либо лично автором, либо при его непосредственном участии. В частности, автор обосновал актуальность и научную новизну исследования, сформулировал его цель и задачи, разработал методологию их решения, осуществил анализ и систематизацию экспериментальных данных, выполнил все этапы постростовой обработки при создании ИК-фотодетекторов на основе НК InAs(P), провел комплекс электрофизических и оптических измерений образцов, а также осуществил анализ и интерпретацию полученных результатов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, благодарности и списка используемых источников. Работа содержит 125 страниц машинописного текста, включая 54 рисунка, 3 таблицы и библиографию из 131 наименования.

## Краткое содержание работы

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель работы и определены задачи исследования. Представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации работы, а также о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** «Детекторы инфракрасного излучения: развитие и современные решения» проведен анализ современного состояния исследований в области инфракрасных (ИК) фотодетекторов. В работе обоснована актуальность создания фотодетекторов ближнего ИК-диапазона для применений вне телекоммуникаций, включая химический анализ, биовизуализацию и дистанционное зондирование. Показано, что перспективный для этого диапазона материал InAs из-за узкой запрещенной зоны характеризуется высокими темновыми токами. Для снижения из уровня и достижения высокой обнаружительной способности детекторы на основе InAs требуют криогенного охлаждения (до 80-100 К). В связи с этим предложен комбинированный подход для решения этой проблемы: использование твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$  для увеличения ширины запрещенной зоны и экспоненциального снижения термогенерации и применение геометрии нитевидных нанокристаллов (ННК) для уменьшения объема активной области при сохранении высокого коэффициента поглощения за счет резонансных оптических эффектов. Обоснован выбор самоиндуцированного механизма роста ННК методом МПЭ, что позволяет исключить использование золотого катализатора и обеспечивает рост на кремниевых подложках. Показано, что данный материал является конкурентоспособной альтернативой традиционным структурам на основе InGaAs, представляя собой перспективную основу для создания ИК-фотодетекторов нового поколения.

**Во второй главе** диссертации «Численное моделирование оптических и электрофизических свойств гетероструктур на основе ННК InAs на Si подложке»

проведено численное моделирование оптических свойств упорядоченных вертикально ориентированных массивов ННК InAs на Si подложке с целью определения геометрических параметров (диаметр, высота, период), обеспечивающих максимальное поглощение излучения в рабочем спектральном диапазоне. На основе введенной метрики G-SNR (отношение поглощения к объему, генерирующему шум) определены параметры, обеспечивающие баланс между чувствительностью и темновым током. Для спектрального диапазона 1550 - 2250 нм оптимальные параметры: диаметр 250 - 370 нм; период 1250 - 2000 нм; высота не менее 1,5 мкм.

Анализ двумерных карт распределения поглощенной и отраженной мощности (рис. 1) позволил выявить зависимость эффективности поглощения от диаметра и периода. Установлено, что при диаметре ННК  $0,42 \pm 0,15$  мкм, периоде следования  $1,4 \pm 0,35$  мкм и высоте не менее 1,5 мкм обеспечивается поглощение ближнего ИК-излучения на уровне 71 - 91% в диапазоне 1,5 - 2,0 мкм. Для сопоставления эффективности поглощения света в массивах ННК и тонких пленках был рассчитан эквивалентный объем полупроводника, приходящийся на единицу площади подложки. Полученное значение сопоставлялось с объемом плёнки, обеспечивающим тот же уровень поглощения согласно закону Бугера–Ламберта–Бера. Расчет показал, что для достижения аналогичного поглощения объем материала в массиве ННК составляет всего 0,7-8% от объема тонкой пленки для  $\lambda = 2000$  нм, а для  $\lambda = 1550$  нм и  $\lambda = 2500$  нм — 1,6-21% и 2,8-35%, соответственно.

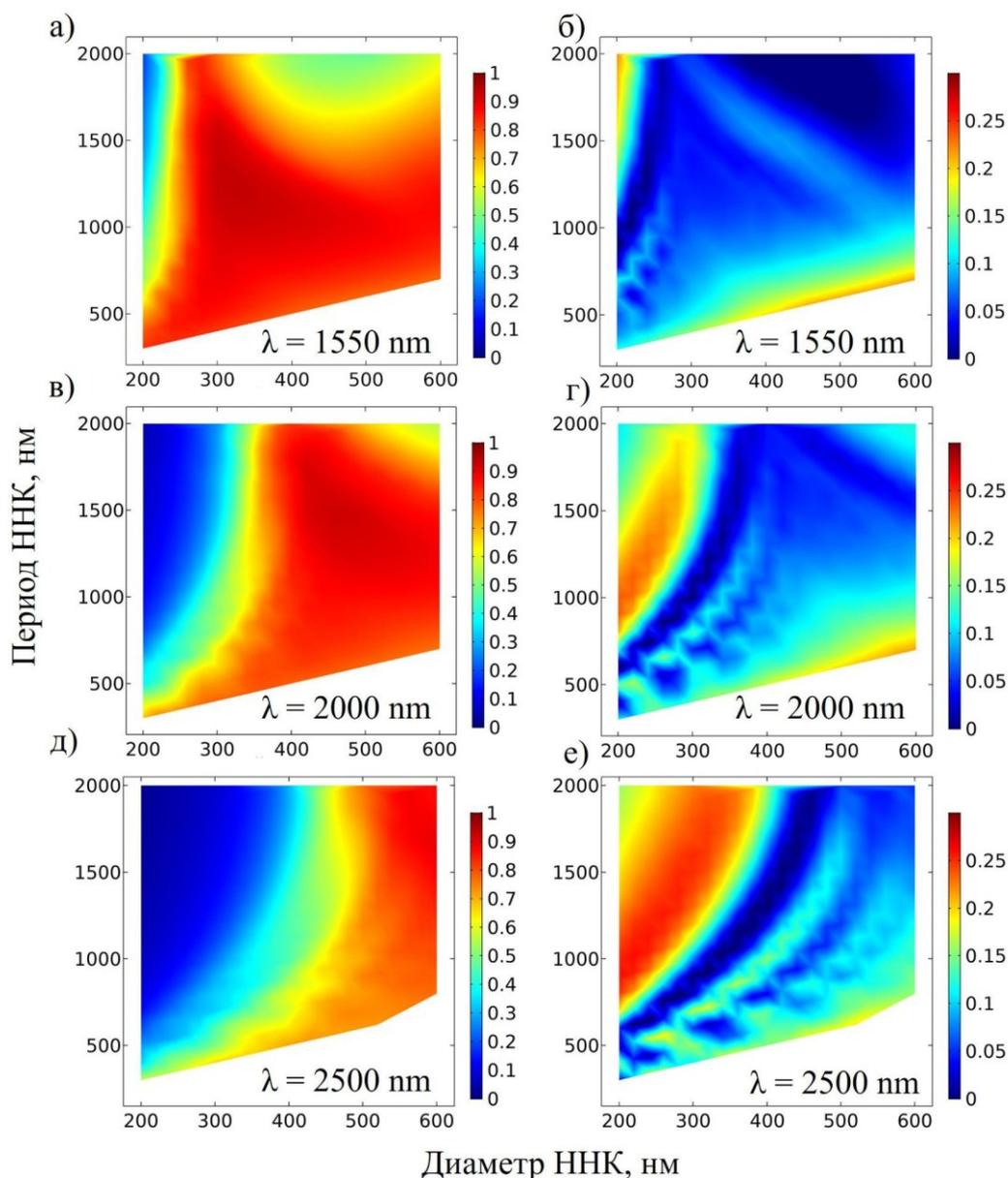


Рисунок 1 — Двумерные карты распределения доли поглощенной (а, в, д) и отраженной (б, г, е) мощности в массивах ННК InAs при различных диаметрах и периодах расположения ННК для трех характерных длин волн: 1550, 2000 и 2500 нм.

В разделе, посвященном моделированию электрофизических параметров, рассматривались следующие типы структур ННК на подложке: InAs/p-Si, n-InAs/i-InAs/p-Si (аксиальная конфигурация n-i-p), p-InAs/i-InAs/n-Si (аксиальная конфигурация p-i-n) и InAsP/p-Si.

Установлено, что для формирования фотодиодной структуры на основе ННК InAs(P) необходимо использовать кремниевую подложку дырочного типа проводимости. Установлено, что увеличение концентрации акцепторов в кремнии с  $10^{16}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> приводит к пятикратному росту темнового тока (при  $T = 200$  К). Для структуры InAs/Si показано, что преднамеренное n-легирование ННК слабо влияет на свойства прибора из-за эффекта пиннинга уровня Ферми в зоне проводимости, который обеспечивает высокую электронную проводимость по поверхности.

Анализ темновых ВАХ показал, что в фотодиодах на основе ННК уровень темнового тока на 1–3 порядка ниже (в зависимости от температуры) по сравнению с тонкопленочными аналогами. Данное снижение существенно превосходит геометрический фактор уменьшения объема активной области (составляющий около 25 раз для рассматриваемой геометрии).

Проведено сравнение аксиальных n–i–p и p–i–n конфигураций ННК InAs. Структура p–i–n характеризуется коэффициентом идеальности диода  $n = 1,1$ , однако ее эффективность сбора при охлаждении до  $T = 150$  К не превышает 60% вследствие уменьшения диффузионной длины носителей. Структура n–i–p демонстрирует  $n = 2,1$ , но при этом ее квантовая эффективность при  $T = 150$  К возрастает до 80% за счет более эффективного подавления поверхностной рекомбинации на гетерогранице. Обе структуры обеспечивают снижение темнового тока на порядок по сравнению с гетероструктурой InAs/Si.

Моделирование фотодиода на основе ННК InAsP/Si показало, что использование твердого раствора InAs<sub>0,8</sub>P<sub>0,2</sub> обеспечивает снижение темнового тока на 3 порядка при 300 К по сравнению с гетероструктурой ННК InAs/Si.

**В третьей главе** «Эпитаксиальный рост и характеристика массивов ННК InAs(P)» представлены результаты формирования и характеристики ННК InAs(P), синтезированных на Si подложках методом молекулярно-пучковой эпитаксии. В работе реализованы два технологических подхода: самоорганизованный рост (для гетероструктур InAs/p-Si (#1), InAsP/p-Si (#2), а также радиальных p–i–n (#3) и n–i–p (#4) конфигураций) и селективный рост массивов ННК на структурированных

подложках с применением микросферной фотолитографии. Схема исследуемых структур представлена на рисунке 2.

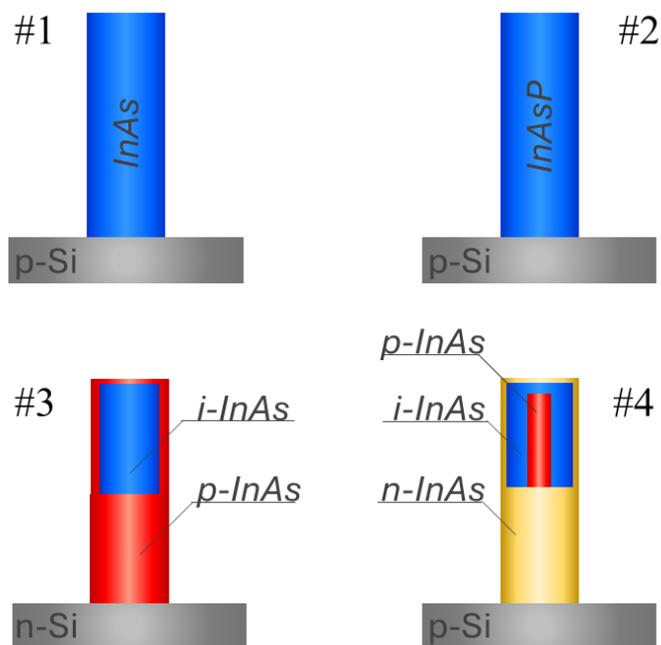


Рисунок 2 – Схематическое изображение исследуемых гетероструктур: #1 InAs/p-Si, #2 InAsP/p-Si, #3 p-InAs/i-InAs/n-Si, #4 n-InAs/i-InAs/p-InAs/p-Si

Экспериментально подтверждено формирование твердого раствора  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  на кремниевых подложках. Стехиометрический состав материала установлен методом рентгеновской дифракции с использованием закона Вегарда. Структурный анализ (рис. 3, а) подтвердил, что ННК кристаллизуются в фазе вюрцита (WZ) и обладают правильной гексагональной огранкой (область 2), как и ННК InAs. При этом выявлено неоднородное распределение дефектов: нижняя часть ННК характеризуется более высоким кристаллическим совершенством (четкие рефлексы на дифракционной картине области 4), тогда как в верхней части наблюдаются широкие размытые полосы (область 3), указывающие на высокую плотность упорядоченных дефектов упаковки. Экспериментальное энергетическое положение пика фотолюминесценции ННК InAs, лежащее в интервале между теоретическими значениями ширины запрещенной зоны для чистых WZ и ZB фаз

(рис. 3, б), указывает на смешанный фазовый состав (политипизм), что полностью согласуется с данными рентгеновской дифракции.

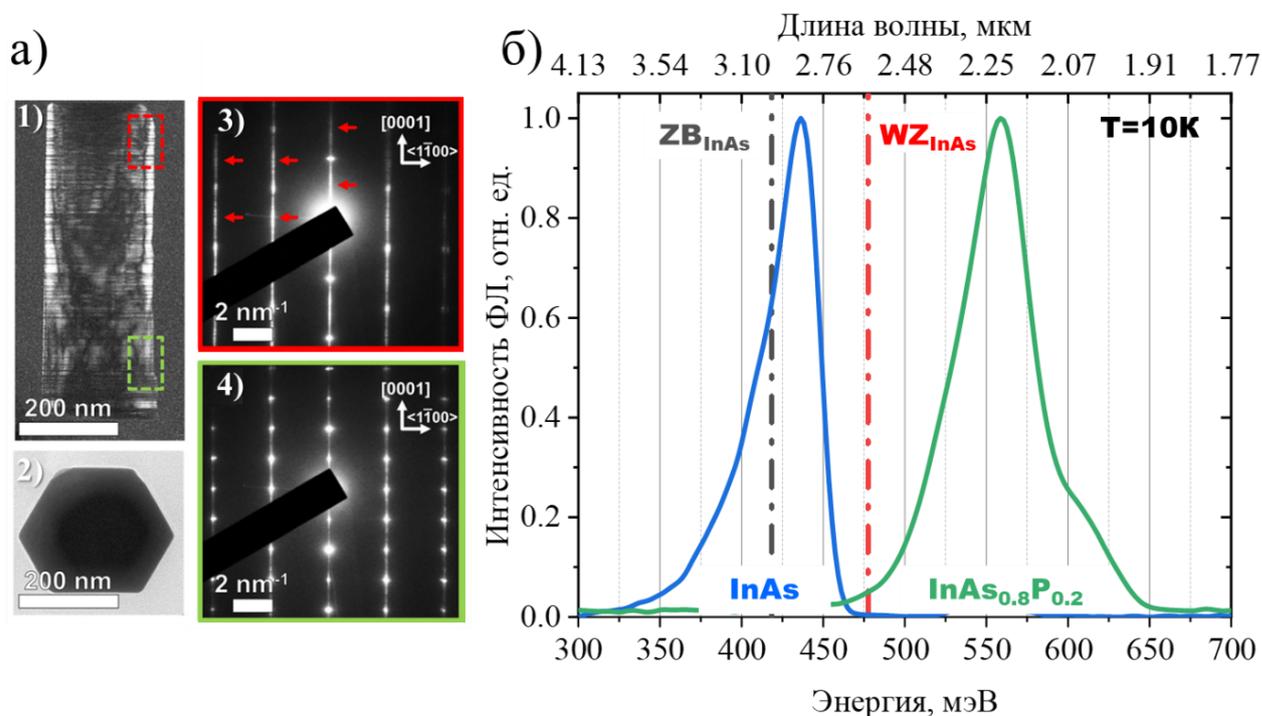


Рисунок 3 – а) ПЭМ-изображения ННК  $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ : (1) темнопольные при ориентации электронного пучка вдоль направления  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ ; (2) светлопольные при ориентации пучка вдоль оси роста ННК  $[0001]$ ; (3), (4) картины электронной микродифракции, полученные вдоль зонной оси  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ , б) спектры ФЛ от эпитаксиальных массивов ННК  $\text{InAs}$  и  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  (пунктирными линиями обозначено расчетное положение энергии запрещенной зоны для кубической и гексагональной фаз  $\text{InAs}$  ННК)

Для твердого раствора  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  наблюдается сдвиг максимума ФЛ на 120 мэВ относительно  $\text{InAs}$ , что подтверждает формирование более широкозонного материала.

Установлено, что технология создания упорядоченных массивов методами микросферной литографии и селективной эпитаксии позволяет прецизионно контролировать диаметр и период ННК. На рисунке 4 представлены спектры оптического отражения в диапазоне 0,5-2,5 мкм для упорядоченных и

самоорганизованных массивов НК InAs на кремнии. В качестве образца сравнения приведен расчетный спектр отражения от объемного InAs.

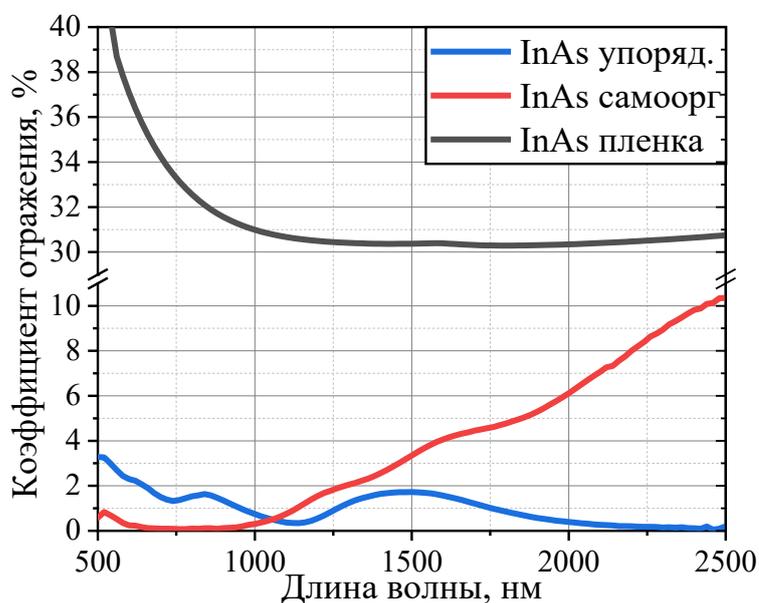


Рисунок 4 – Спектры оптического отражения для упорядоченного и самоорганизованного массивов НК InAs на Si, в сравнении с расчетным спектром отражения InAs

Спектральное положение минимума отражения (600-950 нм) для самоорганизованного массива НК определяется средним диаметром, который задает условия возбуждения фундаментальной оптической моды. В длинноволновой области отражение возрастает, так как диаметр становится недостаточным для эффективного захвата света, а разупорядоченность исключает вклад дифракционных эффектов. Упорядоченные массивы за счет диаметра и строгой периодичности обеспечивают снижение коэффициента отражения в широком диапазоне 700-2500 нм до уровня менее 1,7%. На длине волны  $\lambda = 1550$  нм отражение уменьшается более чем в 18 раз относительно объемного InAs, достигая минимума 0,4% вблизи 2000 нм, что коррелирует с результатами численного моделирования.

**Четвертая глава** «Технология изготовления фотодетекторов на основе массивов ННК InAs(P)» посвящена экспериментальной реализации фоточувствительных структур на основе массивов ННК InAs и InAsP. Разработана конструкция фотодетекторов ближнего и среднего ИК-диапазона, предназначенная для фронтальной засветки через прозрачный верхний контакт ITO. Гетероструктуры формировались на кремниевых подложках с дырочным ( $p > 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) либо электронным ( $n > 5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) типом проводимости. Для снижения плотности состояний на гетерогранице ННК/Si проведена пассивация в водородной плазме. Планаризация массива осуществлялась с использованием фоторезиста SU-8, обеспечивающим диэлектрическую изоляцию, с последующим плазмохимическим вскрытием вершин ННК для создания омического контакта. На рисунке 5 представлено схематическое изображение (а) и СЭМ-изображение поперечного сечения (б) фотодетектора на основе массива ННК InAs(P)/Si.

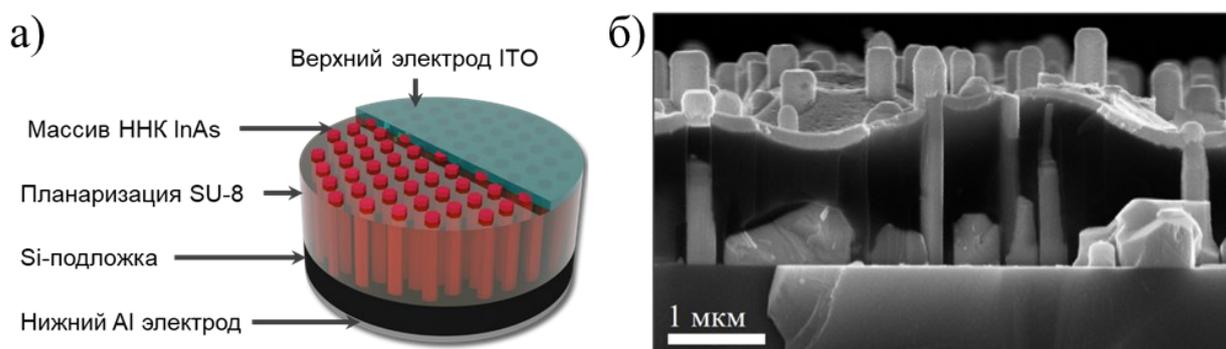


Рисунок 5 — Фотодетектор на основе массива ННК InAs(P)/Si: а) схематическое изображение, б) СЭМ-изображение поперечного сечения исследуемой структуры

**В пятой главе** «Исследование вольт-амперных и спектральных характеристик фотодетекторов на основе ННК InAs(P)» приведены экспериментальные данные для структур, сформированных на основе вертикально ориентированного массива ННК.

Установлено, что обработка в водородной плазме оказывает существенное влияние на параметры приборов, в которых ОПЗ формируется на гетерогранице ННК/подложка. Для структур InAs/Si такая пассивация снижает уровень темнового тока не менее чем в 30 раз и значительно повышает коэффициент выпрямления диода. ВАХ контрольного и пассивированного образцов представлены на рисунке 6.

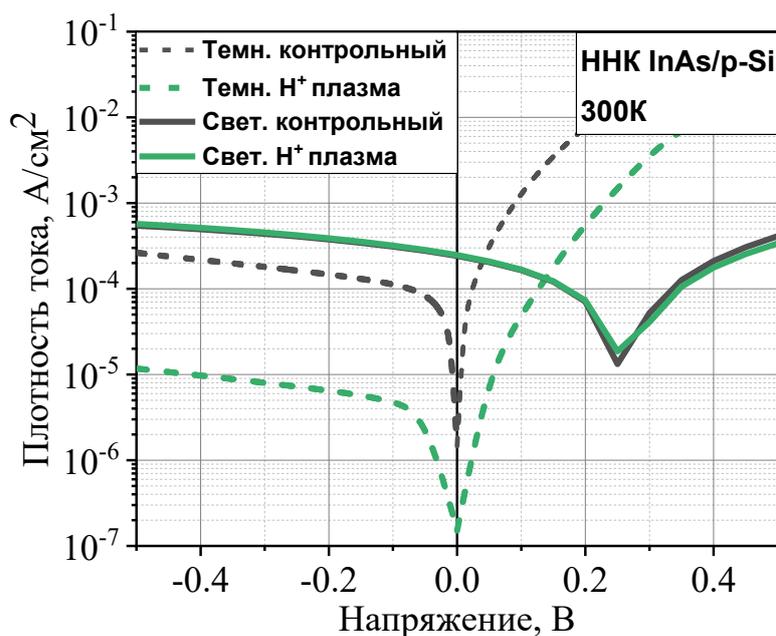


Рисунок 6 – ВАХ гетероструктуры InAs/Si для контрольного и пассивированного образцов в полулогарифмическом масштабе.

В то же время, в структурах с ОПЗ, расположенной внутри объема ННК (радиальная n-i-p InAs), эффект пассивации выражен слабо.

Исследованы электрофизические свойства гетероструктуры InAs/p-Si в диапазоне 150-250 К (рис. 7). Анализ ВАХ в темновом режиме (рис. 7, а) показывает, что охлаждение образца приводит к снижению концентрации термогенерированных носителей заряда, что обеспечивает подавление темнового тока при обратном смещении.

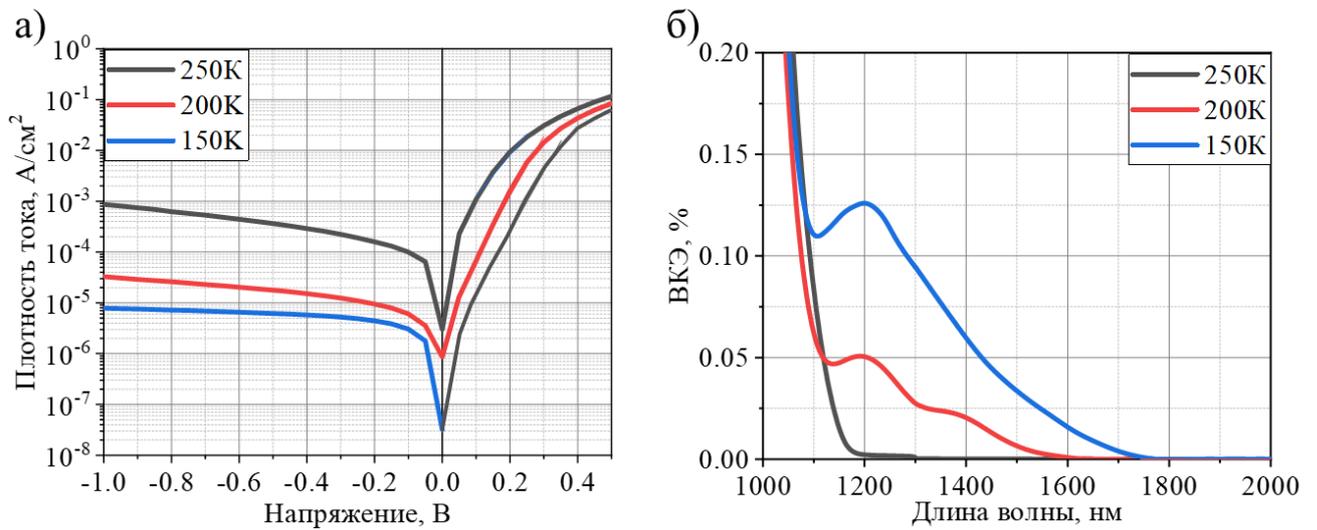


Рисунок 7 – Вольт-амперные (а) и спектральные (б) характеристики структуры InAs/p-Si.

Анализ спектра внешней квантовой эффективности (ВКЭ) (рис. 7, б) подтверждает, что при 250 К фотосигнал отсутствует вследствие экранирования встроенного электрического поля высокой плотностью термогенерированных носителей. Снижение температуры до 200 К ограничивает их генерацию, восстанавливая протяженность области пространственного заряда (ОПЗ) и дрейфовый механизм разделения (отклик до ~1500 нм). Дальнейшее охлаждение до 150 К способствует расширению ОПЗ вглубь ННК, повышая эффективность сбора носителей и сдвигая границу фоточувствительности до ~1800 нм.

Была изготовлена и исследована гетероструктура p-InAs/i-InAs/n-Si. Вольт-амперные характеристики при 300 К (рис. 8) демонстрируют линейную зависимость, что свидетельствует об омическом характере проводимости.

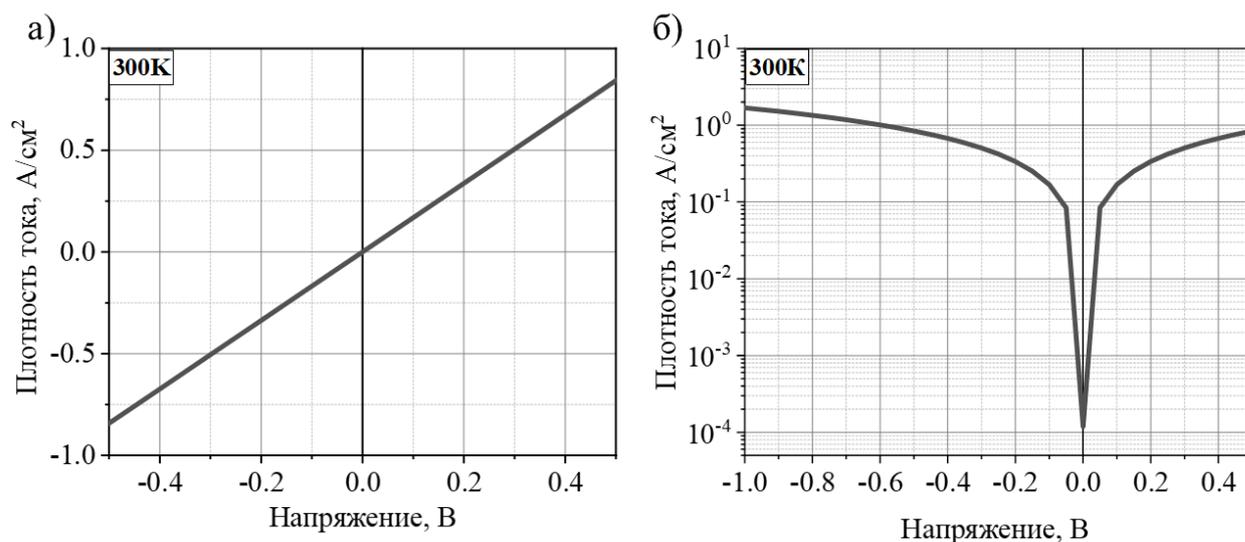


Рисунок 8 – ВАХ структуры p-InAs/i-InAs/n-Si в темновом режиме при 300 К в линейном (а) и полулогарифмическом масштабах (б)

Данный эффект обусловлен сменой типа основных носителей заряда на поверхности ННК, что приводит к формированию сквозного шунтирующего канала между подложкой и верхним электродом. Это препятствует образованию встроенного потенциального барьера и является причиной отсутствия выпрямления. Установлено, что данная конфигурация не может функционировать как фотодиод без пассивации поверхности (например, оболочкой InP толщиной ~20 нм) для восстановления диодных свойств.

На рисунке 9 представлены температурные зависимости ВАХ в темновом режиме структуры n-i-p InAs (#4), измеренные в диапазоне 100–300 К. Аналогично базовой структуре InAs/Si, при снижении температуры наблюдается рост порогового напряжения при прямом смещении.

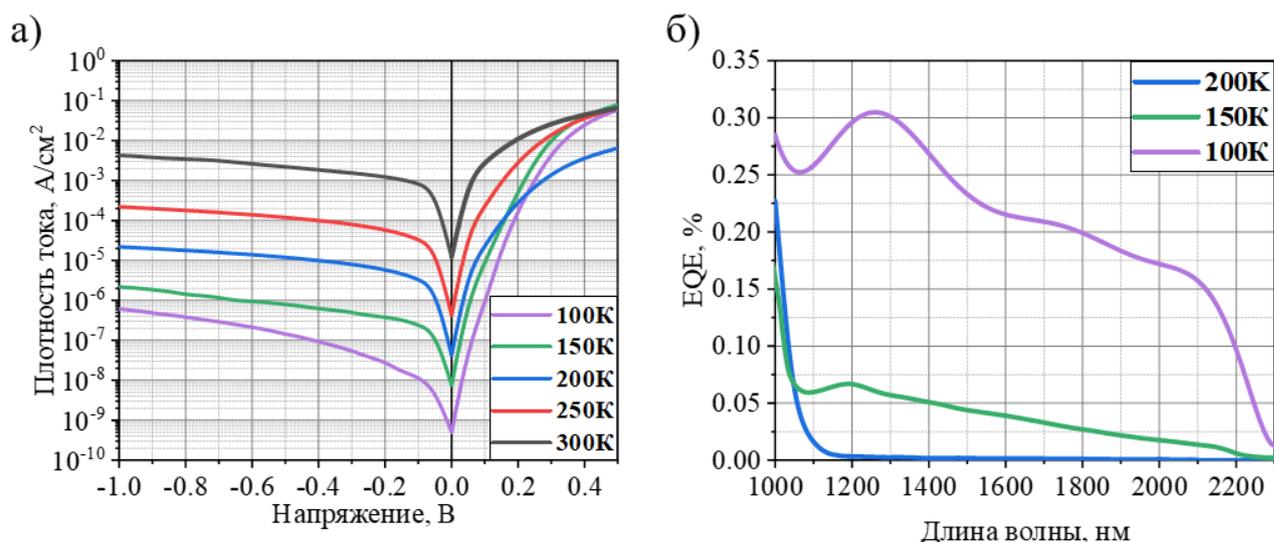


Рисунок 9 – Вольт-амперные и спектральные характеристики структуры n-i-p InAs/p-Si при различных температурах

Установлено, что при 150 К плотность обратного тока в структуре #4 в 3,5 раза ниже, чем в контрольной структуре #1. В последней (InAs/Si) более высокий уровень утечки обусловлен высокой плотностью состояний на интерфейсе ННК/подложка, способствующей интенсивному туннелированию с участием ловушек (ТАТ-механизм). Локализация ОПЗ внутри i-области ННК позволяет изолировать активную область от дефектной гетерограницы, что снижает рекомбинационные потери. Это объясняет более высокую ВКЭ данной структуры по сравнению с базовой InAs/p-Si и подтверждает преимущества использования радиальной n-i-p конфигурации.

На рисунке 10 (а) представлены температурные зависимости ВАХ в темновом режиме структуры на основе ННК InAsP/p-Si (образец “А”) в диапазоне 100-300 К. Установлено, что при 150 К темновой ток в данной структуре на порядок превышает значения для InAs/p-Si, несмотря на меньший объем активной области. Это указывает на то, что токоперенос определяется высокой плотностью дефектов, а также геометрическими особенностями структуры. Полученные спектры ВКЭ (рис. 10, б) показали наличие фотоотклика в диапазоне до ~1840 нм, ограниченном рабочим диапазоном референсного детектора.

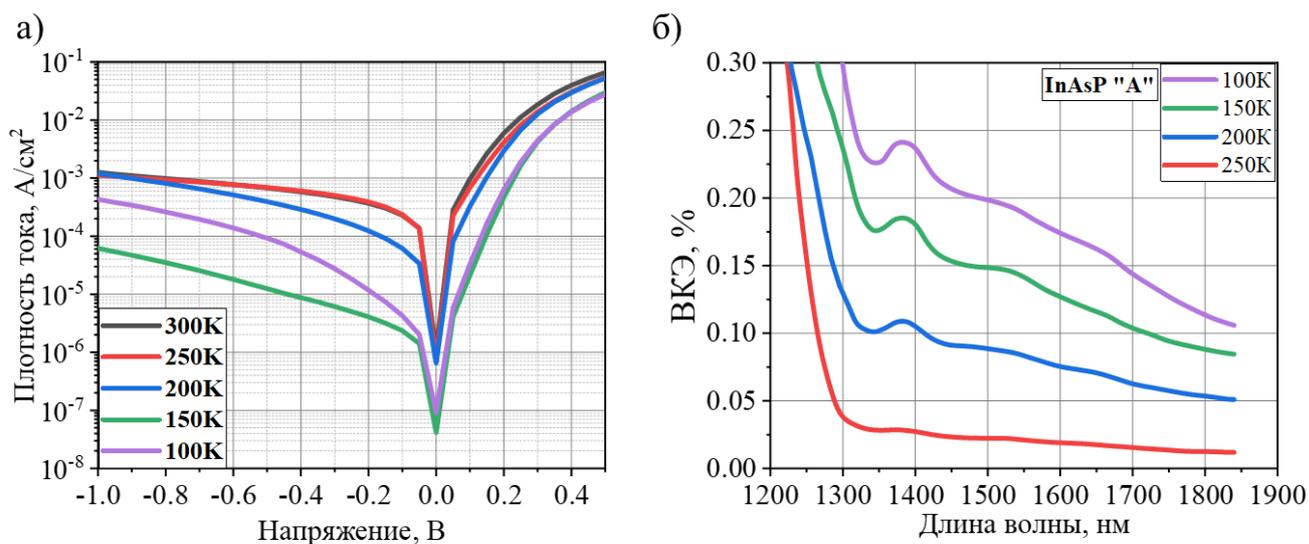


Рисунок 10 – Вольт-амперные и спектральные характеристики структуры InAsP/p-Si при различных температурах

Сравнительный анализ выявил преимущества использования твердого раствора InAs(P). В структуре n-i-p InAs (рис. 9) при 200 К сигнал падает до уровня шума, ограничивая рабочий диапазон температурами ниже 150 К. Напротив, фотодетектор на основе InAs(P) при 200 К сохраняет ВКЭ на уровне 0,15-0,18% (что сопоставимо с InAs при 100 К), а фотоотклик регистрируется вплоть до 250 К. Такая эффективность достигнута при существенно меньшем объеме активной области по сравнению с чистым InAs. Увеличение ширины запрещенной зоны позволило подавить тепловую генерацию носителей и повысить предельную рабочую температуру фотодетектора на 50-70 К.

Учитывая температурную стабильность, продемонстрированную на образце с малым объемом активной области (серия «А»), дальнейшие исследования были направлены на повышение абсолютной интегральной чувствительности детекторов. В развитие работы была синтезирована структура InAsP/p-Si «В» с целенаправленно увеличенным объемом активной области, за счет формирования более крупных ННК. Анализ ВАХ (рис. 11, а) выявил высокий уровень токов утечки и отсутствие выраженного диодного выпрямления, что обусловлено

формированием в процессе роста паразитного двумерного слоя InAsP. Несмотря на это, спектр ВКЭ (рис. 11, б) демонстрирует резкий рост фотоотклика в диапазоне 1000-2300 нм при комнатной температуре с максимумом 19%, что свидетельствует о попадании в область эффективного резонансного поглощения.

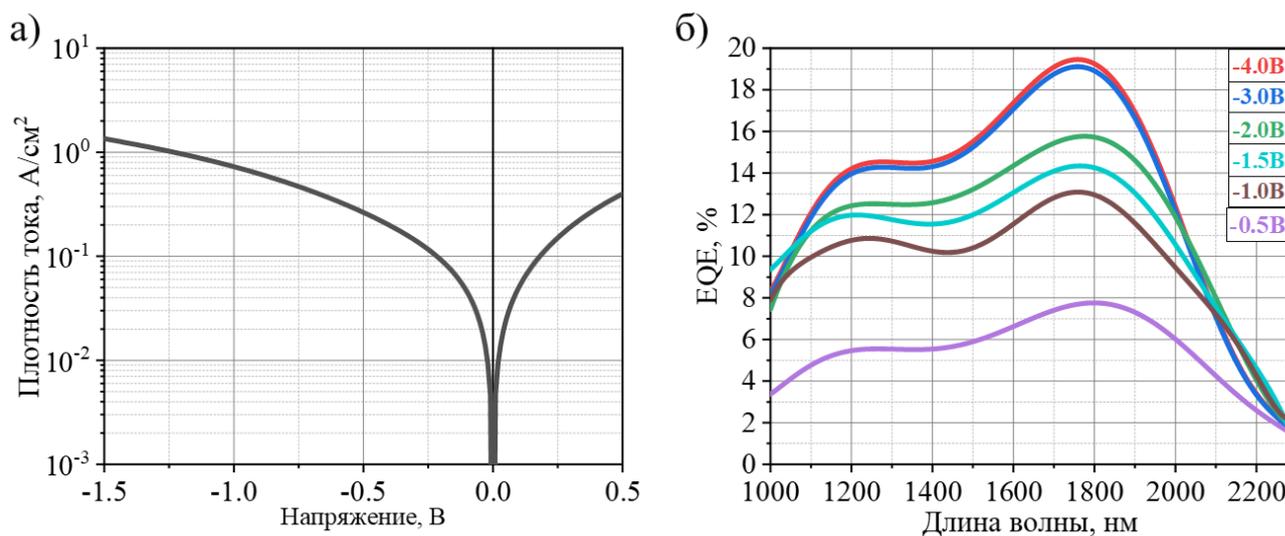


Рисунок 11 – Вольт-амперные и спектральные характеристики структуры InAsP «В» /p-Si при 300 К

Зависимость фототока от смещения показывает насыщение при  $|V| \approx 3$  В, что указывает на фотодиодный механизм сбора носителей и исключает доминирование фотопроводимости. Достигнутое значение ВКЭ, существенно превышающее показатели предыдущих серий, подтверждает эффективность генерации в НК InAsP и перспективность создания на их основе ИК-детекторов на кремнии, работающих при комнатной температуре.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы были получены следующие основные результаты:

- На основе численного моделирования установлено, что с учетом объема активной области максимальная эффективность поглощения ( $\lambda = 1,55$  мкм) для массива ННК InAs с высотой не менее 1,5 мкм достигается при диаметрах 250–370 нм и периоде массива 1250–2000 нм.

- Численно установлено, что массив ННК InAs с диаметром  $0,42 \pm 0,15$  мкм и периодом  $1,4 \pm 0,35$  мкм обеспечивает эффективное поглощение в диапазоне 1,55 – 2,0 мкм не ниже 71%, что позволяет уменьшить объем активной области в 16 – 40 раз (для  $\lambda=1,5$  мкм и  $\lambda=2,0$  мкм, соответственно) по сравнению с тонкопленочными аналогами без потери поглощения.

- Определено, что для формирования фотодиодной структуры на основе ННК InAs(P) необходимо использовать кремниевую подложку дырочного типа проводимости (p-Si). Установлено, что увеличение концентрации легирующей примеси в подложке с  $10^{16}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> приводит к росту темнового тока в 5 раз при 200 К.

- Согласно расчетам, гетероструктура на основе ННК InAs демонстрирует подавление темнового тока на 1–3 порядка относительно тонкопленочных аналогов. Это позволяет при температуре 100 К регистрировать сигналы с плотностью мощности порядка 10 нВт/м<sup>2</sup>, что соответствует улучшению предела обнаружения на 3 порядка.

- В результате численного расчета установлено, что в аксиальной гетероструктуре ННК n-i-p InAs (на подложке p-Si с концентрацией  $10^{19}$  см<sup>-3</sup>) квантовая эффективность возрастает от 40% до 80% при снижении температуры InAs от 300 до 150 К. Коэффициент идеальности составляет 2,1. В структуре ННК p-i-n InAs рост эффективности ограничен диапазоном 40–60% из-за большей чувствительности к уменьшению диффузионной длины носителей. Коэффициент идеальности составляет 1,1. Показано, что при комнатной температуре в обеих

структурах происходит экранирование электрического поля, поэтому для работы фотодиодов необходимо охлаждение ниже 200 К.

- В результате моделирования установлено, что формирование активной области на основе твердого раствора  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$  ( $E_g = 0,5$  эВ) обеспечивает снижение темнового тока на 3 порядка по сравнению с аналогичными структурами на основе  $\text{InAs}$ .

- Методами молекулярно-пучковой эпитаксии по самоиндуцированному механизму были выращены гетероструктуры НК:  $\text{InAs}/\text{Si}$ ,  $\text{InAsP}/\text{Si}$ , а также n-i-p и p-i-n  $\text{InAs}/\text{Si}$ . Комплексная характеристика (СЭМ, ПЭМ, XRD, EDX, ФЛ) подтвердила формирование твердого раствора  $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$  ( $x=0,2$ )

- Упорядоченные массивы НК  $\text{InAs}$ , полученные методом микросферной литографии и селективной эпитаксии, демонстрируют выраженный антиотражающий эффект и резонансные особенности спектров, что обеспечивает снижение коэффициента отражения более чем в 18 раз при  $\lambda = 1500$  нм по сравнению с тонкопленочным  $\text{InAs}$ , достигая минимума  $\sim 0,4\%$  в области 2000 нм. Полученные экспериментальные данные согласуются с численным расчетом.

- Разработана комплексная постростовая технология формирования структур на основе одиночных НК и двухконтактных схем с использованием метода взрывной фотолитографии и вакуумного термического напыления  $\text{Ti}/\text{Au}$ , а также фоточувствительных мезоструктур на основе вертикально ориентированных массивов НК  $\text{InAs}(\text{P})$ .

- Экспериментально показано, что водородная пассивация приводит к снижению темнового тока не менее чем в 30 раз в структурах, где область пространственного заряда формируется вблизи интерфейса  $\text{InAs}/\text{Si}$ .

- Экспериментально установлено, что массив НК  $\text{InAs}$  (радиус  $65 \pm 20$  нм, высота  $1,9 \pm 0,3$  мкм, фактор заполнения 7,9%) демонстрирует при температуре 150 К плотность темнового тока  $7,86 \cdot 10^{-6}$  А/см<sup>2</sup> и фоточувствительность в диапазоне до 1800 нм.

- Экспериментально исследованы фотодетекторы на основе вертикально ориентированных массивов радиальных гетероструктур НК p- $\text{InAs}/\text{i-InAs}$  на

подложке n-Si. Установлено, что инверсия типа проводимости поверхностного слоя InAs препятствует формированию потенциального барьера. В результате оба контакта оказываются электронно-проводящими, что указывает на существенный вклад поверхностных состояний и определяет роль пассивации поверхности ННК для данной конфигурации.

- Экспериментально установлено, что массив радиальных гетероструктур ННК n-InAs/i-InAs/p-InAs (радиус  $100 \pm 20$  нм, высота  $2,7 \pm 0,6$  мкм, фактор заполнения 7,3%) на подложке p-Si обеспечивает снижение темнового тока в 3,5 раза (при 150 К) по сравнению с ННК InAs/Si и фоточувствительность в диапазоне до 2300 нм.

- Экспериментально показано, что массив ННК  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}/\text{Si}$  (радиус  $55 \pm 21$  нм, высота  $900 \pm 300$  нм, фактор заполнения 5,8%) обладает более высокой квантовой эффективностью (в пересчете на единицу объема активной области) по сравнению со структурами InAs/Si.

- В структуре  $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}/\text{Si}$  увеличение геометрических параметров ННК до расчетных значений (радиус  $160 \pm 63$  нм, высота  $3600 \pm 850$  нм, фактор заполнения 13,3%) привело к росту внешней квантовой эффективности (до 19 % при  $U = -3$  В), за счет попадания в резонансную область поглощения. Оценка улучшения соотношения сигнал/шум с учетом нормировки на активную область, составляет  $\sqrt{6} \approx 2,4$  раза по сравнению с тонкопленочными структурами.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Охранные документы интеллектуальной собственности:

1. Гетероструктурный фотодиод для ближнего и среднего ИК-диапазона на основе нитевидных нанокристаллов арсенида-фосфида-висмута индия на подложках кремния : патент на полезную модель 220600 U1 Российская Федерация / Можаров А. М., Голтаев А. С., Мухин И. С., Федоров В. В., Кавеев А. К., Новикова К. Н., Павлов А. В., Баранов А. И. ; правообладатель ФГБУ ВО «Академический университет им. Ж.И. Алфёрова». — № 2023115456; заявл. 13.06.2023; опубл. 25.09.2023, Бюл. № 27.

2. Программа для расчета внешней квантовой эффективности солнечных элементов: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024685877 Российская Федерация / Голтаев А. С.; правообладатель ФГБУ ВО «Академический университет им. Ж.И. Алфёрова». — № 2024684985; заявл. 28.10.2024; опубл. 02.11.2024, Бюл. № 11.

### Публикации в международных изданиях, индексируемых в базе данных WoS и Scopus:

1. 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. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2025. Т. 18, № 2. С. 9–21.

2. Goltaev, A. S., Novikova, K.N., Dvoretckaya, L.N., Fedorov, V.V., Kaveev, A.K. and Mozharov, A.M. Study of Resonant Light Absorption in Hexagonally Ordered InAs NWs // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2024. Т. 18, № Suppl 1. С. S180–S185.

3. Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Goltaev A. S., Fedorov V. V., Mukhin I. S. NUMERICAL SIMULATION OF OPERATING MODES OF

HETEROSTRUCTURAL PHOTODIODES BASED ON INDIUM ARSENIDE NANOWIRES ON THE SILICON SUBSTRATES // St. Petersburg State Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2024. T. 17, № 1. C. 38–46.

4. Fedina S. V., Fedorov V. V., Kaveev A. K., Goltaev A. S., Miniv D. V., D. A. Kirilenko D. V., Mukhin I. S. Formation and Relaxation of Elastic Stress in Radial InAs/InP Nanoheterostructures. Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2025. T. 19, № 5. C. 1080–1087.

5. Kaveev A. K., Fedorov V. V., Pavlov A. V., Miniv D. V., Ustimenko R. V., Goltaev A.S., Dvoretckaia L. N., Mozharov A. M., Fedina S. V., Kirilenko D. A., Vinnichenko, M. Ya., Mynbaev K. J., Mukhin I. S. Growth, Crystal Structure, and Photoluminescent Properties of Dilute Nitride InAsN Nanowires on Silicon for Infrared Optoelectronics // ACS Appl Nano Mater. American Chemical Society, 2024. T. 7, № 3. C. 3458–3467.

6. Kaveev, A.K., Fedorov, V.V., Pavlov, A.V., Miniv, D.V., Kirilenko, D.A., Nadtochiy, A., Goltaev, A. S., Malenin, A.P., Ustimenko, R.V., Karaulov, D.A. Self-induced MBE-grown InAsP nanowires on Si wafers for SWIR applications // J Mater Chem C Mater. 2025. T. 13, № 12. C. 6063–6072.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Alferov Z. I. Nobel Lecture: The double heterostructure concept and its applications in physics, electronics, and technology // *Rev. Mod. Phys.* 2001. Т. 73, № 3. С. 767–782.
2. Angelopoulou T. и др. Remote Sensing Techniques for Soil Organic Carbon Estimation: A Review // *Remote Sens. (Basel)*. 2019. Т. 11, № 6. С. 676.
3. van der Meer F. D. и др. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012. Т. 14, № 1. С. 112–128.
4. Thimsen E., Sadtler B., Berezin M. Y. Shortwave-infrared (SWIR) emitters for biological imaging: a review of challenges and opportunities // *Nanophotonics*. 2017. Т. 6, № 5. С. 1043–1054.
5. Wilson R. H. и др. Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization // *J. Biomed. Opt.* 2015. Т. 20, № 3. С. 030901.
6. Flannigan L., Yoell L., Xu C. Mid-wave and long-wave infrared transmitters and detectors for optical satellite communications—a review // *Journal of Optics*. 2022. Т. 24, № 4. С. 043002.
7. Hadfield R. H. и др. Single-photon detection for long-range imaging and sensing // *Optica*. 2023. Т. 10, № 9. С. 1124.
8. Shi L. и др. Transmission in near-infrared optical windows for deep brain imaging // *J. Biophotonics*. 2016. Т. 9, № 1–2. С. 38–43.
9. Dvoretckaia L. и др. Numerical study of detectivity for near-IR photodetectors based on InAsP NWs // *Scr. Mater. Pergamon*, 2023. Т. 226. С. 115246.
10. Ren P. и др. Band-Selective Infrared Photodetectors with Complete-Composition-Range InAs<sub>x</sub>P<sub>1-x</sub> Alloy Nanowires // *Advanced Materials*. 2014. Т. 26, № 44. С. 7444–7449.
11. Li Z. и др. Investigation of light–matter interaction in single vertical nanowires in ordered nanowire arrays // *Nanoscale*. 2022. Т. 14, № 9. С. 3527–3536.

12. Li X., Zhan Y. Enhanced external quantum efficiency in rectangular single nanowire solar cells // *Appl. Phys. Lett.* 2013. Т. 102, № 2. С. 21101.
13. Mårtensson T. и др. Epitaxial III–V Nanowires on Silicon // *Nano Lett.* 2004. Т. 4, № 10. С. 1987–1990.
14. Li Z. и др. Review on III–V Semiconductor Nanowire Array Infrared Photodetectors // *Adv. Mater. Technol.* 2023. Т. 8, № 13.
15. LaPierre R. R. и др. A review of III–V nanowire infrared photodetectors and sensors // *J. Phys. D Appl. Phys.* 2017. Т. 50, № 12. С. 123001.
16. Wang Y. и др. Epitaxial growth of silicon nanowires using an aluminium catalyst // *Nat. Nanotechnol.* 2006. Т. 1, № 3. С. 186–189.
17. Perea D. E. и др. Three-Dimensional Nanoscale Composition Mapping of Semiconductor Nanowires // *Nano Lett.* 2006. Т. 6, № 2. С. 181–185.
18. Okamoto H., Massalski T. B. The Au–Si (Gold-Silicon) system // *Bulletin of Alloy Phase Diagrams.* 1983. Т. 4, № 2. С. 190–198.
19. Hertenberger S. и др. Growth kinetics in position-controlled and catalyst-free InAs nanowire arrays on Si(111) grown by selective area molecular beam epitaxy // *J. Appl. Phys.* 2010. Т. 108, № 11.
20. Isakov I. и др. InAs<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub> nanowires grown by catalyst-free molecular-beam epitaxy // *Nanotechnology.* 2013. Т. 24, № 8. С. 085707.
21. Park S. и др. Toward Ga-Free Wavelength Extended 2.6 μm InAsP Photodetectors with High Performance // *Adv. Funct. Mater.* 2024. Т. 34, № 9.