



СПБГЭТУ «ЛЭТИ»
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

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

ул. Профессора Попова, д.5, литера Ф, Санкт-Петербург, 197022
Телефон: (812) 234-46-51; факс: (812) 346-27-58; e-mail: info@etu.ru; <https://etu.ru>
ОКПО 02068539; ОГРН 1027806875381; ИНН/КПП 7813045402/781301001

10.04.2026 № 100206/0729

на №

от

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной и инновационной
деятельности СПБГЭТУ "ЛЭТИ"
им. В.И. Ульянова (Ленина), д.т.н., профессор

А.А. Семенов

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

Голтаева Александра Сергеевича

**«Разработка, создание и исследование инфракрасных фотодетекторов
на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов InAs(P) на кремнии»,**
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.11 – физика полупроводников

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время фотоприемники коротковолнового ИК-диапазона (SWIR, 1–3 мкм) высоко востребованы для задач детектирования объектов в условиях слабой видимости, поскольку излучение в этом окне прозрачности атмосферы обладает пониженным рэлеевским рассеянием, а получаемое изображение сохраняет тени и контраст, необходимые для надежной идентификации. Однако подавляющее большинство существующих SWIR-детекторов изготавливается методом сложной гибридной сборки (бондинга) чувствительного элемента $A^{III}B^V$ с кремниевой КМОП-схемой считывания, что обуславливает их высокую стоимость, дефектность части массива пикселей и ограничение форм-фактора. В связи с этим **актуальность** диссертационной работы определяется необходимостью разработки методов монолитной интеграции узкозонных полупроводников непосредственно на кремниевую платформу. Использование метода самоорганизованного эпитаксиального роста массивов нитевидных нанокристаллов (ННК) решает фундаментальную проблему рассогласования параметров кристаллических решеток за счет упругой релаксации напряжений. При этом контролируемое добавление фосфора при синтезе ННК с формированием твердого раствора $InAs_{1-x}P_x$ выступает эффективным инструментом для настройки спектрального окна чувствительности и снижения темновых токов. Подобный комплексный подход создает

технологическую основу для разработки эффективных ИК-фотодетекторов, обеспечивающих высокое отношение сигнал/шум при работе в условиях комнатной температуры.

Научная новизна исследований и полученных результатов заключается в следующем:

1. Выполнено численное моделирование фотодетекторов на основе аксиальных гетероструктур НК $n\text{-InAs}/i\text{-InAs}/p\text{-Si}$ ($n\text{-}i\text{-}p$) и $p\text{-InAs}/i\text{-InAs}/n\text{-Si}$ ($p\text{-}i\text{-}n$). Установлено, что при понижении температуры с 300 до 150 К квантовая эффективность $n\text{-}i\text{-}p$ структуры возрастает с 40 до 80%. В то же время, рост квантовой эффективности $p\text{-}i\text{-}n$ структуры менее заметен, что объясняется ее большей чувствительностью к уменьшению диффузионной длины носителей заряда, а также усиленной рекомбинацией дырок вблизи гетерограницы из-за наличия обогащенной электронами области.

2. Показано, что упорядоченные массивы НК InAs, сформированные методом микросферной литографии, обеспечивают подавление коэффициента отражения более чем в 18 раз относительно пленочных структур, достигая минимума на длине волны 2 мкм.

3. Экспериментально установлено, что омический характер ВАХ радиальных гетероструктур $p\text{-InAs}/i\text{-InAs}/n\text{-Si}$ обусловлен сменой типа основных носителей заряда на поверхности НК вследствие пиннинга уровня Ферми.

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

5. Созданы фотодетекторы на основе НК твердого раствора $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$ на Si подложках и продемонстрирована их фоточувствительность в ближнем ИК-диапазоне (1000–2300 нм) при комнатной температуре.

Теоретическая и практическая значимость полученных результатов:

1. На основании численного моделирования установлены закономерности влияния геометрических параметров массивов НК 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 НК 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 НК. 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 $p\text{-InAs}/i\text{-InAs}/n\text{-Si}$. Установлено, что причиной отсутствия выпрямляющего эффекта является смена типа основных носителей заряда на поверхности НК, приводящая к шунтированию $p\text{-}n$ перехода поверхностными каналами проводимости.

5. На основании численного расчета установлено, что минимальная высота НК 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^{-3} .

7. Фотодетектор на основе самоорганизованного массива вертикально ориентированных нитевидных нанокристаллов с радиальной гетероструктурой $n\text{-InAs}/i\text{-InAs}/p\text{-InAs}$, со средним диаметром $0.2 \pm 0.04 \text{ мкм}$, высотой $2.7 \pm 0.6 \text{ мкм}$ и поверхностной плотностью $2.12 \pm 0.42 \text{ мкм}^{-2}$, эпитаксиально выращенный на подложке $p\text{-Si}$, 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 $\text{InAs}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ на кремниевых подложках, продемонстрировавшие чувствительность и работоспособность в ближнем ИК-диапазоне ($\lambda = 1100 - 2300 \text{ нм}$) при комнатной температуре.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертационная работа А.С. Голтаева состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 125 страницах и содержит список цитируемой литературы из 131 источника. Оформление работы соответствует требованиям ВАК.

Во введении обоснованы актуальность и новизна представленных исследований, поставлена цель работы и определены задачи для ее достижения.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области инфракрасных фотодетекторов диапазона 1–3 мкм, рассмотрены принципиальные проблемы объемных фотодетекторов на узкозонном InAs и предложено применение геометрии нитевидных нанокристаллов для уменьшения объема активной области при сохранении высокого коэффициента поглощения. Здесь же обоснован выбор самоиндуцированного механизма роста ННК методом молекулярно-пучковой эпитаксии, что позволило исключить использование золотого катализатора и обеспечило рост ННК на кремниевых подложках.

Во второй главе приведены результаты численного моделирования оптических свойств упорядоченных вертикально ориентированных массивов ННК InAs на кремниевой подложке. В расчете определены параметры, обеспечивающие баланс между чувствительностью и темновым током среди которых диаметр ННК 250–370 нм, высота – не менее 1.5 мкм. В результате анализа установлено, что для формирования фотодиодной структуры на основе ННК InAs(P) необходимо использовать Si подложку дырочного типа проводимости. Здесь же проведено сравнение аксиальных $n\text{-}i\text{-}p$ и $p\text{-}i\text{-}n$ конфигураций ННК InAs. Описаны преимущества и недостатки представленных конструкций. Показана бóльшая эффективность структуры $n\text{-}i\text{-}p$ за счёт подавления поверхностной рекомбинации на гетерогранице.

В третьей главе представлены результаты формирования и характеристики ННК InAs(P), синтезированных на кремниевых подложках методом МПЭ. Представлены два технологических подхода: рост самоорганизованных массивов ННК и формирование упорядоченных массивов ННК на структурированных подложках с применением микросферной литографии. Дано подробное описание выращенных и исследованных образцов. Структурный анализ показал, что ННК InAs(P) кристаллизуются в фазе вюрцита. Для твёрдого раствора $\text{InAs}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ наблюдался сдвиг максимума фотолуминесценции на 120 мэВ относительно InAs. Измерения спектров отражения демонстрировали, что упорядоченные массивы ННК за счёт строгой периодичности обеспечивают снижение коэффициента отражения в широком диапазоне длин волн до уровня менее 1.7%.

В четвертой главе описана экспериментальная реализация фоточувствительных структур на основе массивов ННК. Здесь представлены конструкции фотодетекторов ближнего и среднего ИК-диапазона, предназначенных для фронтальной засветки через прозрачный верхний контакт ИТО. Кроме того, представлены подробные схематические изображения и СЭМ-изображения поперечного сечения изготовленных фотодетекторов на основе массива ННК InAs(P) на Si.

В пятой главе представлены результаты исследования электрофизических и спектральных характеристик синтезированных гетероструктур. Сначала рассмотрены базовые структуры InAs/*p*-Si и проанализированы их темновые вольтамперных характеристик и спектры внешней квантовой эффективности при различных температурах. В частности, для структур *p*-InAs/*i*-InAs/*n*-Si, обнаружена смена типа основных носителей заряда на поверхности ННК.

Далее были исследованы гетероструктуры на основе твердых растворов InAs_{1-x}P_x/*p*-Si. Установлено, что переход к более широкозонному материалу InAsP эффективно подавляет тепловую генерацию. Показано, что дальнейшее улучшение параметров достигается за счет изменения морфологии ННК: использование массивов с оптимальной геометрией позволило повысить рабочие температуры фотодетектора вплоть до комнатной температуры. При этом фотоотклик данных приборов регистрируется вплоть до 2300 нм. Полученные результаты и достигнутые значения внешнего квантового выхода подтверждают перспективность предложенных подходов для создания инфракрасных детекторов на кремниевой платформе.

Рекомендации по использованию диссертационной работы

Считаем целесообразным продолжить работу в направлении решения задачи повышения эффективности ИК-фотодетекторов на основе нитевидных нанокристаллов InAs(P) и оптимизации методов пассивации их поверхности. Результаты работы могут быть использованы группами, занимающимися исследованиями и эпитаксиальным синтезом гетероструктур A^{III}B^V на кремнии, а также разработкой наноразмерных оптоэлектронных приборов. Установленные в диссертации закономерности оптического поглощения и подавления отражения в массивах ННК могут быть использованы в промышленной технологии создания высокоэффективных антиотражающих структур для фотоприемных матриц. Также данные результаты будут важны для полупроводниковой промышленности, связанной с созданием компонентной базы кремниевой фотоники. В том числе результаты могут быть использованы на площадках, занимающихся разработкой высокочувствительных сенсоров для систем оптической связи, газоанализа и спектроскопии в ближнем ИК-диапазоне (включая такие организации, как ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФП СО РАН, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», НИУ «МИЭТ»).

Замечания по диссертационной работе:

1. Новизной диссертационной работы является исключение традиционного использования золотого катализатора и реализация «самоиндуцированного» механизма роста нитевидных нанокристаллов InAs(P). Насколько воспроизводима данная технология, имея в виду рост на хаотически возникающих поверхностных дефектах? Какие дефекты являются источником нуклеации, и как можно управлять плотностью этих дефектов на поверхности подложки?
2. В работе используется термин «самоиндуцированный рост». Просьба уточнить используемую терминологию и пояснить, в чем заключается принципиальная физическая разница между механизмами «самоиндуцированного» и «самокаталитического» роста нитевидных нанокристаллов в контексте вашего исследования.
3. В п. 3 научной новизны работы утверждается, что смена типа основных носителей заряда с дырочного на электронный на поверхности радиальных ННК происходит из-за пиннинга

- уровня Ферми в зоне проводимости. В связи с этим, что (какие ловушки и какой концентрации) может вызвать этот пиннинг?
4. Следует более подробно пояснить методику и достоверность измерения локального состава твердого раствора по высоте синтезированных ННК InAsP. Как недостаток стилистического характера отметим, что аббревиатуру метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии в тексте целесообразнее приводить на латинице (EDX).
 5. Следует обосновать отсутствие в работе прямой оценки величины фонового тока исследуемых фотоприемных структур, а также пояснить, каким образом учитывалось влияние фонового излучения при определении их рабочих характеристик.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки выполненного исследования.

Заключение

Диссертационная работа представляет собой завершённое научное исследование, выполненное на высоком уровне и посвящённое актуальной задаче современной физики полупроводников и оптоэлектроники. Полученные соискателем результаты характеризуются существенной научной новизной и вносят значимый вклад в развитие физики полупроводниковых гетероструктур и инфракрасной фотоники. Сформулированные в работе научные положения являются обоснованными и достоверно подтверждены совокупностью экспериментальных и теоретических данных. Основные результаты диссертации отражены в 6 публикациях в рецензируемых научных изданиях и апробированы на профильных научных конференциях. На основании изложенного можно заключить, что диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова РАН», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Доклад по диссертационной работе Голтаева Александра Сергеевича заслушан и обсужден 26 марта 2026 г. на научном семинаре кафедры микро- и нанoeлектроники федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)». Отзыв обсужден и одобрен 08 апреля 2026 г. на заседании кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (протокол № 04/26). Присутствовало на заседании 37 чел. Результаты голосования: «за» – 37, «против» – 0, «воздержались» – 0 чел.

Отзыв составил: профессор, доктор физ.-мат. наук, профессор
кафедры микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Телефон: +7 812 2343164

Адрес электронной почты: vizubkov@etu.ru

Заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники СПбГЭТУ
«ЛЭТИ», доктор физ.-мат. наук, доцент

Телефон: +7 812 2343164

Адрес электронной почты: oskomkov@etu.ru

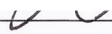
В.И. Зубков

О.С. Комков

Ученый секретарь кафедры микро- и наноэлектроники
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», кандидат физ.-мат. наук, доцент

Телефон: +7 812 2343164


Адрес электронной почты: oaaleksandrova@etu.ru


О.А. Александрова

Подписи В.И. Зубкова, О.С. Комкова, О.А. Александровой
заверяю:

Ученый секретарь

диссертационных советов СПбГЭТУ «ЛЭТИ»


Т.Л. Русяева

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

им. В.И. Ульянова (Ленина)

Адрес: 197022, Россия, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф.

Телефон: +7 (812) 234-46-51

Электронная почта: info@etu.ru

Сайт: <https://etu.ru>