

В диссертационный совет АУ 02.01 созданного на базе
федерального государственного бюджетного
учреждения высшего образования и науки «Санкт-
Петербургский национальный исследовательский
Академический университет имени Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника, заведующего лабораторией физики полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток ИФМ РАН — филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова Российской академии наук»

Морозова Сергея Вячеславовича

на диссертационную работу Голтаева Александра Сергеевича

на тему «Разработка, создание и исследование инфракрасных фотодетекторов на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов InAs(P) на кремнии»

по специальности 1.3.11. – физика полупроводников

Актуальность разработки фотоприемников для коротковолнового инфракрасного диапазона во многом обусловлена их критической значимостью для систем пассивного ночного видения. Приемники данного типа способны эффективно регистрировать отраженное гидроксильное свечение ночного неба, что обеспечивает высококонтрастную идентификацию объектов и их теней в условиях отсутствия видимого освещения, делая такие системы принципиально более информативными по сравнению с традиционной тепловизионной техникой. В связи с потребностями современной оптоэлектроники, в представленной диссертации реализованы инфракрасные фотоприемники на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов (ННК) InAs(P) на кремнии. Полученные данные об их электрофизических и спектральных характеристиках расширяют физические представления о свойствах структур $A^{III}B^V$ на кремнии и закладывают базу для создания устройств нового поколения, что дополнительно подтверждает **актуальность** диссертационной работы.

Таким образом, цель и задачи представленной диссертации, включая разработку и создание высокочувствительных инфракрасных фотодетекторов на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов InAs(P) на кремнии, а также исследование их свойств, являются актуальными и имеют как фундаментальное, так и несомненное прикладное значение.

Общая характеристика работы: Диссертация Голтаева А.С. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем работы составляет 125 страниц, библиографический список включает 131 наименование. Работа имеет логичную, выверенную структуру, а ее оформление в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Во введении традиционно обоснована актуальность выбранного направления, сформулированы цель и задачи исследования, обозначена научная новизна и практическая значимость. Приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен качественный и исчерпывающий аналитический обзор состояния исследований в области инфракрасных фотодетекторов. Соискателем убедительно аргументирована необходимость перехода от объемного InAs, требующего глубокого криогенного охлаждения, к комбинированному технологическому подходу. Логично обосновано использование геометрии нитевидных нанокристаллов (ННК) для уменьшения объема активной области при сохранении поглощения, а также применение твердых растворов $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ для подавления термогенерации. Также показана необходимость использования самоиндуцированного механизма роста методом МПЭ для прямой интеграции структур с кремниевой платформой.

Вторая глава посвящена численному моделированию оптических и электрофизических процессов в гетероструктурах. Автором предложен физически обоснованный критерий оптимизации массивов ННК, заключающийся в достижении баланса между максимизацией поглощения и минимизацией объема, генерирующего темновой ток. На основе данного подхода определены оптимальные геометрические параметры (диаметр 250–370 нм, период 1250–2000 нм, высота от 1,5 мкм), обеспечивающие поглощение ИК-излучения на уровне 71–91 % при использовании лишь малой доли (до 0,7–35 %) эквивалентного объема полупроводника. Большую практическую ценность имеют выводы о необходимости использования p-Si подложки, а также теоретическое обоснование преимуществ аксиальной n-i-p конфигурации и применения твердого раствора $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$ для подавления темновых токов.

В третьей главе изложены результаты эпитаксиального синтеза и комплексной характеристики структур InAs(P) на кремнии. В работе реализованы как спонтанный рост, так и формирование упорядоченных массивов с применением микросферной фотолитографии. Структурный анализ достоверно подтверждает кристаллизацию ННК в фазе вюрцита с характерным проявлением политипизма. Важным оптическим результатом является экспериментальная демонстрация того, что упорядоченные массивы обеспечивают подавление коэффициента отражения до уровня менее 1,7 % в широком диапазоне длин волн, что более чем в 18 раз превосходит показатели объемного InAs на длине волны 1550 нм.

Четвертая глава имеет технологическую направленность и описывает оригинальный маршрут создания тестовых приборных структур. В диссертации детально проработаны технологии создания контактов как для массивов ННК (с использованием планаризации SU-8 и прозрачного верхнего контакта ИТО), так и для одиночных структур, что требует применения прецизионных методов литографии. Представленные схемы и СЭМ-изображения свидетельствуют о высоком методическом уровне подготовки образцов.

В пятой главе проведено исследование электрофизических и спектральных характеристик созданных приборов, что является кульминацией всей работы. Автором детально проанализированы механизмы токопереноса и показана роль водородной пассивации для структур с ОПЗ на гетерогранице. Наиболее значимым практическим результатом диссертации является демонстрация работоспособности структур на основе ННК $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x=0,2$): оптимизированные фотодетекторы (серия «В») демонстрируют фотоотклик в диапазоне 1000–2300 нм при комнатной температуре с внешней квантовой эффективностью до 19 %. Данный результат неоспоримо подтверждает физическую обоснованность перехода к твердому раствору $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ и перспективность использования данного материала в форме низкоразмерных структур для создания неохлаждаемых ИК-детекторов на кремнии.

Научная новизна работы определяется следующими результатами:

Впервые показано, что упорядоченные массивы ННК InAs подавляют коэффициент отражения более чем в 18 раз по сравнению с пленками, достигая минимума ~0,4 %.

Впервые выполнено сравнительное численное моделирование аксиальных гетероструктур n-i-p и p-i-n типов. Установлено, что при охлаждении до 150 К квантовая эффективность n-i-p структуры возрастает до 80 %, тогда как для p-i-n рост ограничен 60 % из-за большей чувствительности к уменьшению диффузионной длины и усиленной рекомбинации дырок вблизи гетерограницы.

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

Впервые исследованы фотодетекторы на основе радиальных гетероструктур n-InAs/i-InAs/p-InAs на кремнии в температурном диапазоне 100–300 К.

Впервые продемонстрирована фоточувствительность детекторов на основе ННК твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ ($x=0,2$) на кремнии в диапазоне 1000–2300 нм при комнатной температуре.

Теоретическая и практическая значимость работы определяется следующими результатами:

Численно установлено, что массивы ННК InAs обеспечивают поглощение, эквивалентное тонкой пленке, при использовании 0,7–35 % от объема полупроводникового материала (в зависимости от длины волны).

Теоретически обосновано, что уменьшение объема активной области в геометрии ННК позволяет снизить темновой ток на 1–3 порядка при сохранении исходного уровня поглощения.

Доказано, что водородная пассивация гетерограницы InAs/Si эффективно подавляет темновой ток.

Показано, что в радиальных гетероструктурах p-InAs/i-InAs/n-Si происходит смена типа основных носителей на поверхности ННК, что выражается в шунтировании p-n перехода.

Определена минимальная высота ННК InAs (1500 нм), необходимая для обеспечения поглощения ИК-излучения (1550 нм) на уровне не ниже 63 %.

Численно показано, что формирование фотодиодных структур на основе ННК InAs(P) требует использования кремниевой подложки дырочного типа с уровнем легирования не ниже 10^{16} см^{-3} .

Создан фотодетектор на основе массива радиальных гетероструктур n-InAs/i-InAs/p-InAs на p-Si, демонстрирующий фоточувствительность в диапазоне 1000–2300 нм с внешней квантовой эффективностью не менее 0,25 % при 100 К.

Реализованы фотодетекторы на основе ННК $\text{InAs}_{0,8}\text{P}_{0,2}$ на кремниевых подложках, продемонстрировавшие чувствительность в ближнем ИК-диапазоне (1100–2300 нм) при комнатной температуре.

Рекомендации по использованию диссертационной работы.

Целесообразно продолжение исследований в области разработки инфракрасных фотодетекторов на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов InAs(P) на кремнии, с акцентом на управление поверхностными состояниями, оптимизацию геометрии массивов ННК и совершенствование гетероинтерфейсов. Полученные в диссертации результаты представляют значительный интерес для научных коллективов, занимающихся эпитаксиальным синтезом полупроводниковых гетероструктур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ и разработкой компонентной базы кремниевой оптоэлектроники. Предложенные подходы к снижению коэффициента отражения, уменьшению

объема активной области при сохранении эффективного поглощения, а также подавлению темновых токов имеют прямое прикладное значение при создании высокочувствительных фотоприемников ближнего и коротковолнового ИК диапазона. Разработанные решения могут быть востребованы в технологиях волоконно-оптической связи, системах пассивного ночного видения, спектроскопии, дистанционного зондирования, а также при создании интегрированных оптоэлектронных устройств, совместимых с кремниевой платформой.

Отмечая высокий научный уровень работы, следует обратить внимание на ряд спорных моментов и сделать следующие замечания:

1. В главе 3 приводятся результаты исследований спектров низкотемпературной фотолюминесценции (ФЛ) массивов ННК. Однако в работе отсутствует детальное описание экспериментальной методики данных измерений. Соискателю следовало бы уточнить параметры используемого спектрального оборудования, условия возбуждения и способ регистрации сигнала.
2. В разделе, посвященном исследованию структурных и оптических свойств ННК InAs(P), приведены подробные данные электронной микроскопии и фотолюминесценции. Тем не менее, соискателю следовало бы пояснить, чем обусловлено формирование единого пика фотолюминесценции при наличии в ННК различных кристаллических фаз WZ и ZB, а также раскрыть физические причины наблюдаемого уширения спектральных линий.
3. Как было показано в третьей главе, исследуемые структуры обладают смешанным фазовым составом. Автор утверждает, что самоиндуцированный рост ННК без металлического катализатора предпочтителен для изготовления функциональных структур. При этом, как известно, существует ряд сложностей в управлении фазой и химическим составом тройных растворов при таком методе роста. Чем оправдан выбор именно этого подхода?
4. При обсуждении характеристик фотодиодов в пятой главе не рассматриваются эффекты поверхностного обеднения и поверхностной рекомбинации. Соискателю предлагается пояснить причины такого подхода.
5. В разделе, посвященном исследованию спектральных характеристик (глава 5), недостаточно подробно описаны параметры измерительной системы. Соискателю целесообразно уточнить спектральное разрешение используемого монохроматора и шаг сканирования, а также пояснить методику учета атмосферного поглощения (паров воды и CO₂) в исследуемом ИК-диапазоне.

Диссертация является законченным научным исследованием, внесшим значимый вклад в физику полупроводников при создании ИК-фотодетекторов на основе гетероструктур ННК InAs(P) на кремнии. Полученные результаты достоверны, основные выводы аргументированы и в полной мере опубликованы в рецензируемых научных изданиях. Работа отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Голтаев Александр Сергеевич, заслуживает присуждения

ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. — физика полупроводников.

Даю согласие на обработку моих персональных данных.

Официальный оппонент

д. ф.-м. н., в. н. с., зав. лаборатории 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»

Морозов Сергей Вячеславович

«27» апреля 2026 года

Подпись Морозова Сергея Вячеславовича заверяю.
Ученый секретарь ФИЦ ИПФ РАН, к.ф.-м.н.
Корюкин И.В.

Контактные данные оппонента:

Место работы: Институт физики микроструктур РАН - филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИФМ РАН)

Фактический адрес: ул. Академическая, д. 7, д. Афонино, г. Нижний Новгород, Россия

Почтовый адрес: ГСП-105, Нижний Новгород, 603951, Россия

Телефон: +7 (831) 417-94-82

e-mail: more@ipmras.ru

www.ipmras.ru