

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

Кандидата физико-математических наук, старшего научного сотрудника лаборатории оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Рахлина Максима Владимировича

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

В представленной диссертационной работе реализован комплексный подход к исследованию фотоприемников инфракрасного диапазона на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов (ННК) InAs(P), выращенных на кремнии. Использование геометрии нитевидных нанокристаллов обеспечивает эффективную упругую релаксацию механических напряжений, что делает возможным их эпитаксиальный синтез на кремниевой подложке. Кроме того, применение твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ позволяет управлять шириной запрещенной зоны и тем самым повышать рабочие температуры приборов за счет подавления тепловой генерации носителей заряда. Необходимость детального изучения физических свойств подобных гетероструктур непосредственно связана с актуальными задачами современной оптоэлектроники, что определяет высокую **актуальность** диссертационной работы. Полученные результаты расширяют представления о свойствах структур $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}/\text{Si}$ и создают научно-технологическую основу для разработки устройств нового поколения.

Общая характеристика работы: диссертация Голтаева А.С. изложена на 125 страницах, включает введение, пять глав, заключение и библиографический список из 131 наименования. Структура и оформление работы полностью соответствуют стандартам, принятым для кандидатских диссертаций.

Во **введении** обоснована актуальность интеграции узкозонных соединений $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ с кремниевой платформой для создания неохлаждаемых фотодетекторов ближнего и среднего инфракрасного диапазона. Сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации результатов и публикациях автора.

В **первой главе** представлен обстоятельный анализ современного состояния исследований в области инфракрасных фотодетекторов. Автор убедительно показывает, что использование геометрии нитевидных нанокристаллов в сочетании с переходом к твердым растворам $\text{InAs}_{1-x}\text{P}_x$ является эффективным подходом к снижению темновых токов при сохранении высокого коэффициента оптического поглощения. Обоснован выбор метода

молекулярно-пучковой эпитаксии как базового подхода для реализации самоиндуцированного роста на кремнии.

Во второй главе изложены результаты численного моделирования. Автором предложен и реализован критерий оптимизации массивов нитевидных нанокристаллов на основе максимизации отношения сигнал/шум с учетом геометрического фактора. Такой подход позволил определить диапазон геометрических параметров массивов, обеспечивающих высокое поглощение излучения при существенно меньшем эквивалентном объеме материала по сравнению со сплошными структурами. Существенный интерес представляет также теоретическое обоснование преимуществ аксиальных $n-i-p$ -структур InAs на подложках p -Si.

В третьей главе представлены результаты эпитаксиального синтеза массивов НК InAs(P) на подложках кремния. Реализованы методики как самоорганизованного, так и упорядоченного роста. Методами электронной микроскопии и структурного анализа подтверждено формирование нанокристаллов с фазой вюрцита с высокой плотностью дефектов упаковки. Показано, что упорядоченные массивы НК могут выполнять функцию эффективных антиотражающих покрытий, демонстрируя крайне низкий коэффициент отражения в широком спектральном диапазоне.

Четвертая глава посвящена технологии изготовления приборных структур. Представлен оригинальный и технологически хорошо проработанный маршрут формирования контактов к массивам и одиночным НК, включающий планаризацию в полимере SU-8 и нанесение прозрачного проводящего слоя ИТО. Представленные результаты показывают, что технология изготовления приборных структур проработана, а формирование интерфейсов контролируется на всех основных этапах.

В пятой главе исследованы электрофизические и спектральные характеристики созданных приборов. Автором детально проанализированы физические причины возникновения темновых токов и продемонстрирована эффективность водородной пассивации гетерограницы InAs/Si. Ключевым практическим результатом является реализация фотодетекторов на основе НК InAs_{0,8}P_{0,2}, обеспечивающих фотоотклик до 2300 нм при комнатной температуре с внешней квантовой эффективностью до 19 %.

Научная новизна диссертационной работы заключается в получении ряда новых результатов, имеющих существенное значение для физики полупроводников и оптоэлектроники. В частности, показано, что упорядоченные массивы НК InAs, сформированные методом микросферной литографии, обеспечивают резкое подавление отражения в широком спектральном диапазоне. Численно исследованы фотодетекторы на основе аксиальных гетероструктур $n-i-p$ и $p-i-n$ и установлена асимметричная температурная зависимость их квантовой эффективности, обусловленная особенностями рекомбинации неосновных носителей вблизи гетерограницы. Впервые экспериментально установлено, что омический характер вольт-амперных характеристик радиальных систем p -InAs/ i -InAs/ n -Si связан с инверсией типа основных носителей на поверхности нанокристаллов вследствие пиннинга уровня Ферми в зоне проводимости. Кроме того, впервые продемонстрирована фоточувствительность гетероструктур на основе массивов НК InAs и твердого раствора InAs_{0,8}P_{0,2} на кремниевых подложках в спектральном диапазоне до 2300 нм при температурах вплоть до комнатной.

Теоретически обосновано и численно подтверждено, что геометрия массивов НК InAs(P) обеспечивает оптическое поглощение, количественно соответствующее поглощению сплошных пленок при уменьшении объема активной области, что позволяет снизить темновые токи на 1–3 порядка. Продemonстрирована роль водородной пассивации гетерограницы InAs/Si в минимизации темновых токов.

Практическая значимость работы определяется созданием экспериментальных образцов инфракрасных фотодетекторов на основе массивов НК InAs(P), синтезированных на кремниевых подложках, а также разработкой подходов к снижению темновых токов в таких структурах. Полученные результаты могут быть востребованы в исследованиях, направленных на развитие компонентной базы кремниевой оптоэлектроники.

Рекомендуется продолжить исследования в области разработки ИК-фотодетекторов на основе полупроводниковых структур $A^{III}B^V$. Полученные данные могут быть полезны научным группам, работающим с эпитаксиальным синтезом и разработкой компонентной базы кремниевой оптоэлектроники. Разработанные подходы к минимизации темновых токов и настройке спектрального отклика имеют прямое применение в промышленных технологиях создания компактных неохлаждаемых инфракрасных сенсоров. Кроме того, результаты исследования актуальны для телекоммуникационной отрасли, особенно в вопросах создания приемников для волоконно-оптических линий связи и систем дистанционного зондирования. Они также могут быть востребованы на площадках, занимающихся разработкой оптических газоанализаторов, оборудования для биомедицинской визуализации и систем машинного зрения.

Отмечая высокий научный уровень диссертационной работы, ее актуальность, научную новизну и практическую значимость, следует высказать ряд замечаний и вопросов:

1. В тексте диссертации недостаточно подробно раскрыт механизм влияния плотности поверхностных состояний на процессы разделения носителей заряда и электрофизические характеристики исследуемых структур InAs/Si. Представлялось бы полезным более детально пояснить, каким образом поверхностные состояния влияют на форму вольт-амперных характеристик и величину темнового тока.

2. На рисунке 3.10 приведены спектры низкотемпературной фотолюминесценции эпитаксиальных массивов НК InAs и $InAs_{0.8}P_{0.2}$. В тексте указано, что экспериментальное значение энергии максимума фотолюминесценции для $InAs_{0.8}P_{0.2}$ располагается между теоретическими значениями для фаз цинковой обманки и вюрцита, что свидетельствует о фазовом составе НК. Однако из рисунка следует, что энергия максимума ФЛ для $InAs_{0.8}P_{0.2}$ составляет около 560 мэВ, тогда как приведенные теоретические значения для цинковой обманки и вюрцита составляют около 420 и 475 мэВ, соответственно. Хотелось бы получить пояснение относительно причин данного расхождения.

3. На рисунке 3.12 приведены спектры оптического отражения для упорядоченного и самоорганизованного массивов НК InAs. Представляет интерес физическая интерпретация того факта, что для самоорганизованного массива в диапазоне 1500–2500 нм наблюдается рост коэффициента отражения, тогда как для упорядоченного массива, напротив, имеет место его снижение. Было бы полезно дополнительно обсудить роль упорядоченности массива и распределения размеров НК в формировании наблюдаемого различия спектральной зависимости коэффициента отражения.

4. Целесообразно было бы привести более подробные данные о воспроизводимости электрофизических характеристик изготавливаемых фотодетекторов по площади эпитаксиальной пластины, а также обсудить статистический разброс параметров темнового тока и фотоотклика для структур, изготовленных в рамках одной технологической серии.

Диссертационная работа Голтаева Александра Сергеевича представляет собой завершенное научно-квалификационное исследование, в котором получены новые результаты, имеющие существенное значение для развития физики полупроводников в области

инфракрасных фотодетекторов на основе гетероструктур нитевидных нанокристаллов InAs(P) на кремнии. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Она обеспечивается использованием современных методов численного моделирования, эпитаксиального роста, структурной и электрофизической характеристики, а также согласованностью теоретических и экспериментальных данных. Основные результаты работы апробированы на российских и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях. По теме диссертации опубликовано 6 работ в журналах, индексируемых в WoS и Scopus, получен 1 патент на полезную модель и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Диссертационная работа соответствует 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. Алфёрова Российской академии наук», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и её автор, Голтаев Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 — физика полупроводников.

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник лаборатории
оптики кристаллов и гетероструктур с
экстремальной двумерностью
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе РАН

Рахлин Максим Владимирович

« 21 » 04 2026 г.

Место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Адрес места работы: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

Сайт организации: www.ioffe.ru

Телефон: +7 921 405 9237

Электронная почта: maximrakhlin@mail.ru

Подпись Рахлина М.В. заверяю
Ученый секретарь
Физико-технического института
им. А.Ф. Иоффе РАН
кандидат физико-математических наук

Патров Михаил Иванович