
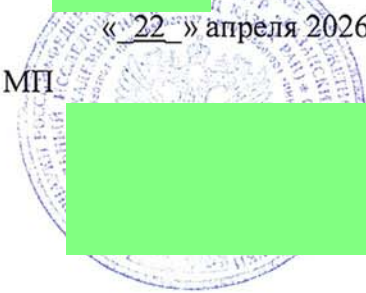


«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФИЦ КазНЦ РАН
чл.-корр. РАН  А.А. Калачев

« 22 » апреля 2026 г.

МП



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию

Ивановой Марии Михайловны «**Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Диссертация Ивановой М.М. представляет собой законченное и логически стройное исследование, имеющее высокую научную и прикладную значимость в области радиационной физики полупроводников и кремниевой оптоэлектроники.

Актуальность темы обусловлена растущими требованиями к надежности электронных компонентов в условиях повышенной радиации – в ядерной энергетике, космосе и оборонном комплексе. При этом существующие инфракрасные (ИК) фотоприемники на основе A_3B_5 соединений плохо совместимы с кремниевой платформой, что ограничивает их интеграцию. В диссертационной работе Ивановой М.М. рассмотрены варианты решения этой фундаментальной проблемы через комплексное исследование фотоэлектрических свойств и радиационной стойкости фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных оригинальными, разработанными в НИФТИ ННГУ, низкотемпературными эпитаксиальными методами. Применение таких методов, в качестве альтернативы высокотемпературным методам молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии (МЛЭ, ГФЭ), открывает возможности для интеграции указанных структур с излучающими кремниевыми структурами в рамках КМОП-технологии. При этом следует отметить повышенную радиационную стойкость выращенных гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001) по сравнению с объёмными материалами, что повышает перспективы их дальнейшего использования.

Исследуемые в диссертационной работе задачи соответствуют приоритетному направлению стратегии научно-технологического развития Российской Федерации в части

«Перехода к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создания систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта», а также стратегии развития электронной и радиоэлектронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года.

Структура и содержание диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 150 страниц. Список цитируемой литературы содержит 135 наименований, что свидетельствует о глубокой проработке автором проблематики рассматриваемой темы.

В *первой главе* диссертации проведён обосновывающий актуальность и новизну данной работы всесторонний анализ современного состояния исследований как российских, так и зарубежных научных коллективов в области кремниевой оптоэлектроники, направленных на создание интегрированных оптоэлектронных компонентов с расширенным в ближний ИК-диапазон функционалом. Подчёркнута необходимость развития именно низкотемпературных методов создания оптоэлектронных компонентов для их интеграции в кремниевые интегральные схемы. Показано, что для перспективных платформ, а именно гетеро(нано)структур на основе слоёв GeSi, как с самоформирующимися наноостровками, так и со сплошными слоями германия в матрице кремния, выращенных низкотемпературными методами, отсутствуют системные исследования, особенно в условиях внешних воздействующих факторов, в том числе в условиях радиации.

Во *второй главе* описывается методология проведённых исследований. Используемые в работе комбинированный метод сублимационной МЛЭ кремния и ГФЭ германия при низком давлении и метод газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити (HWCVD) позволили вырастить два типа SiGe-структур - с наноостровками GeSi и со сплошными слоями Ge - на оригинальной установке, разработанной в НИФТИ ННГУ. Следует отметить, что эти методы являются низкотемпературными ($T \approx 350$ °C), что открывает широкие возможности их применения в интегральной оптоэлектронике. На основе выращенных структур были сформированы фотодиоды и оптоэлектронные пары. Диагностика исследуемых образцов была проведена комплексно с использованием взаимодополняющих методов (метод атомно-силовой микроскопии, рентгеновской дифрактометрии, просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, метод ямок травления, методы измерения удельного сопротивления и эффекта Холла, измерения вольтамперных и вольтфарадных характеристик, спектроскопии фотоЭДС и фототока),

дающих информацию о морфологии, кристаллической структуре и дефектности, электрофизических, фотоэлектрических и оптоэлектронных свойствах. Это позволяет с уверенностью говорить о высоком методологическом уровне выполненной работы и достоверности полученных результатов. Применённое в работе импульсное гамма-нейтронное (γ -n) облучение выращенных структур для исследования их радиационной стойкости проводилось на моделирующих установках ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», что позволило приблизить воздействие к возможным реальным условиям эксплуатации оптоэлектронных компонентов.

В *третьей главе* представлены результаты комплексных исследований фотоэлектрических свойств выращенных структур.

Для структур с наноструктурами GeSi изучены зависимости спектров фоточувствительности от условий их эксплуатации (температуры и обратного смещения на диодах на базе таких структур), а также от параметров наноструктур (размера и состава материала). Автором теоретически и экспериментально показано, что указанные зависимости определяются соотношением скорости эмиссии фотовозбужденных дырок из наноструктур и скорости рекомбинации фотовозбужденных носителей в островках. Данный факт вынесен в первое положение защищаемой работы.

Для второго вида структур - со сплошными слоями германия в матрице кремния, изучение спектров фоточувствительности позволило сформулировать второе положение защищаемой работы о том, что низкая плотность прорастающих дислокаций толстых эпитаксиальных слоев германия обусловлена образованием достаточно тонкого (~ 10 нм) переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия.

В данной главе также показана принципиальная возможность использования в оптоэлектронных парах в качестве приёмников оптического излучения фотодиодов на базе исследуемых структур, как с наноструктурами, так и со сплошными слоями германия.

Экспериментальные результаты по γ -n облучению исследуемых структур, приведенные в *четвертой главе* диссертации, позволили объяснить причину того, что фоточувствительность кремниевых p-n фотодиодов с наноструктурами GeSi в ОПЗ p-n перехода в спектральной области межзонного оптического поглощения в наноструктурах изменяется слабее после облучения, чем собственная фоточувствительность кремния, а также фоточувствительность фотодиодов на базе эпитаксиальных слоев Ge/Si(001) в области собственной фоточувствительности германия. Эффект объясняется особенностью процесса генерации электронно-дырочных пар преимущественно в наноструктурах (пространственной

локализацией области фотогенерации электронно-дырочных пар в островках GeSi). Данный факт отражён в третьем положении защищаемой работы.

Регистрация автором оптопарного эффекта с использованием исследуемых структур, облученных до высоких уровней импульсного γ -n воздействия, убедительно свидетельствует о сохранении рабочих параметров выращенных структур.

В *Заключении* приводятся основные выводы и результаты работы.

Полученные Ивановой М.М. результаты обладают **научной новизной**, которая заключается:

- в разработке теоретической модели, позволившей связать квантовую эффективность фотодиодов на базе кремниевых p—n структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi с составом материала островков, приложенным обратным напряжением смещения к фотодиоду и его рабочей температурой. Модель количественно описывает пороговый характер зависимости квантовой эффективности и позволяет прогнозировать условия достижения 100% эмиссии дырок из островков. Полученные оценки рекомбинационного времени жизни дырок в наноструктурах по разработанной модели удовлетворительно согласуются с известными литературными данными;

- в получении образцов фотодетекторов на базе эпитаксиальных слоёв германия с низкой плотностью прорастающих дислокаций, соответствующих уровню лучших мировых аналогов. Важным обстоятельством является тот факт, что, в отличие от приведённых в литературе данных, в диссертации такие структуры получены низкотемпературным методом без применения высокотемпературного циклического отжига;

- в подтверждении радиационной стойкости кремниевых p—n фотодиодов с наноструктурами GeSi к импульсному γ -n облучению с уровнями (флюенс $n \approx 10^{14} \text{ см}^{-2}$, доза $\gamma \approx 4 \text{ кГр}$), на которых в работах других научных исследовательских групп (например, ИФМ РАН, г. Нижний Новгород) наблюдалась заметная деградация оптических и электрических параметров кремниевых структур с наноструктурами GeSi.

Практическая значимость полученных в работе результатов определяется:

- технологически проработанной основой, открывающей возможности интегрирования в кремниевые интегральные схемы SiGe-фотодиодов с расширенным рабочим спектральным диапазоном (до 1.9 мкм) для применения в условиях повышенной радиации;

- сформулированным рекомендованным режимом эксплуатации SiGe p—n фотодиодов при обратном смещении $U_b \geq 2 \text{ В}$ для обеспечения 100% сбора дырок, особенно при низких температурах;

- показанными перспективами создания радиационно-стойких оптических интерфейсов для систем гальванической развязки в ядерной энергетике и спецтехнике.

Соответствие диссертации паспорту специальности ВАК

Диссертация по поставленным целям, решённым задачам и полученным результатам соответствует п.п. 2, 4, 7, 11, 13 паспорта специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Публикации и личный вклад

Материал диссертации Ивановой М.М. широко обсуждался на ряде научных конференций российского уровня с международным участием. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 20 научных работах, из них 14 — в материалах российских и международных конференций и 6 — в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ, что соответствует требованиям к кандидатским диссертациям. Положения о научной новизне и пункты практической значимости полностью и достоверно отражены в этих публикациях, что подтверждает полноту изложения основных результатов диссертации в опубликованных работах. Все статьи опубликованы в соавторстве, однако в тексте диссертации отмечена степень участия соавторов.

Следует отметить определяющий личный вклад Ивановой М.М. в получение основные научных результатов диссертации. Анализ литературных данных, планирование экспериментов, проектирование образцов для исследований, интерпретация полученных результатов и формулирование выводов выполнены автором самостоятельно. Все выводы обсуждались с научным руководителем, но их содержание и логика определялись лично соискателем. Таким образом, научные работы, вошедшие в диссертацию, выполнены соискателем самостоятельно.

В качестве *замечаний* по диссертации следует отметить следующие моменты:

1. в диссертации присутствуют ошибки в использовании русского языка (орфографические и синтаксические ошибки);
2. в диссертации недостаточно полно описана методика гамма-нейтронного облучения исследуемых образцов и её возможное влияние на трансмутацию кремния;
3. используемые в положениях, новизне и практической значимости диссертации термины «стойкость» и «радиационная стойкость» используются без указания конкретных параметров образцов, к которым они применяются;
4. в третьей главе (стр. 103) при указании литературных данных по значениям квантовой эффективности лазерного диода и квантового выхода фотодиода на базе германия не приведены соответствующие ссылки.

Сделанные замечания, в основном, имеют характер пожеланий или относятся к форме представления материала и не снижают общей оценки работы.

Заключение

По актуальности решаемых задач, объёму выполненных исследований, уровню их обсуждения и научной значимости диссертация М.М. Ивановой является цельным и законченным научным исследованием. Научные положения и результаты диссертации обоснованы. Автореферат и опубликованные работы полно и правильно отражают содержание диссертации, её результаты и выводы. Результаты работы вносят вклад в развитие физики радиационных эффектов в низкоразмерных полупроводниковых системах, в частности — в понимание роли пространственной локализации носителей заряда как механизма повышения радиационной стойкости.

Таким образом, актуальность проведённых исследований, новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов **диссертационной работы Ивановой Марии Михайловны ««Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)»** не вызывают сомнений. Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК Российской Федерации к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в том числе критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, а автор диссертации, Иванова Мария Михайловна, заслуживает присуждения ей степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

Диссертация была заслушана и обсуждена 15 апреля 2026 г. на расширенном заседании Отдела радиационных воздействий на материалы и Учёного совета (протокол №11 от 15.04.2026) Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского – обособленного структурного подразделения Федерального исследовательского центра «Казанский научный центр Российской академии наук» (КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН). Отзыв обсуждался и утверждён на открытом заседании Ученого совета КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН 22 апреля 2026 года (протокол № 12 от 22.04.2026).

Текст отзыва составлен руководителем Лаборатории интенсивных радиационных воздействий КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН, старшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников» Баталовым Рафаэлем Ильясовичем.

Баталов Рафаэль Ильясович

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

рук. Лаб. ИРВ КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН,

420029 г. Казань, ул. Сибирский тракт, 10/7,

тел.: (843) [REDACTED]

e-mail: ba [REDACTED] u

[REDACTED] Р.И. Баталов

Подпись Баталова Р.И. заверяю



Подпись *Баталова Р.И.*
Заверяю: зав. канцелярией КФТИ - обособленное
структурное подразделение ФИЦ КазНЦ РАН
[REDACTED] Куркина Н.Г.

Руководитель КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН



С.М. Хантимеров

22 апреля 2026 г.

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

420111 Казань, ул. Лобачевского, 2/31

тел: (843) 231-90-00

Факс: (843) 272-77-45

www.knc.ru

e-mail: presidium@knc.ru