

ОТЗЫВ

официального оппонента 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

Работа М.М. Ивановой направлена на решение одной из ключевых технологических задач современной кремниевой оптоэлектроники — создание Si-совместимых ИК-фотоприёмников, устойчивых к импульсному γ -n облучению и пригодных для интеграции в постпроцессные КМОП-технологии.

Актуальность исследования обусловлена тем, что существующие решения на основе A^3B^5 -соединений не только дороги, но и принципиально несовместимы с кремниевой платформой. В то же время, использование низкоразмерных Ge(Si)/Si-структур, выращенных низкотемпературными методами, открывает путь к монолитной интеграции фотоники и электроники. Однако, к началу работы отсутствовали системные данные о влиянии условий роста на дефектную структуру, морфологическую стабильность при облучении и практическую реализуемость таких структур в промышленных процессах.

Диссертация логически выстроена и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (135 источников) и перечня публикаций. Общий объём работы - 150 стр.

Первая глава посвящена критическому анализу методов получения гетероструктур Ge(Si)/Si(001). Особое внимание уделено сравнению высокотемпературных (МЛЭ, ГФЭ при ~ 1000 °C) и низкотемпературных (СМЛЭ-ГФЭ, HWCVD при ≤ 600 °C) подходов. Автор обосновывает выбор последних как единственно возможных для постпроцессной интеграции в КМОП-платформу. При этом подчёркивается, что именно низкотемпературные режимы остаются слабо изученными в контексте радиационной стойкости, особенно при импульсном γ -n воздействии, что и определяет актуальность работы.

Во второй главе подробно описана экспериментальная база: оригинальная установка СМЛЭ-ГФЭ и модификация HWCVD. Автор демонстрирует глубокое владение технологией: показано, как за счёт низкой температуры роста (350–600 °С) удаётся избежать диффузии примесей и получить структуры с контролируемой морфологией. Особое внимание уделено комплексной диагностике: АСМ использовалась для морфологии, ПЭМ и рентгеновская дифрактометрия — для оценки кристаллического качества, метод подсчета ямок травления — для определения плотности прорастающих дислокаций. Это обеспечивает высокую достоверность данных.

Третья глава содержит результаты комплексного исследования фотоэлектрических свойств фотодиодов на основе гетероструктур двух типов:

- Si p–n структур с наноструктурами GeSi, для которых установлено, что ФЧ в ИК-диапазоне определяется балансом между эмиссией дырок из островков и их рекомбинацией внутри островка. Определены условия достижения 100% эмиссии дырок из островков (напряжение на диоде, температура).

- фотодиоды на основе толстых (~1 мкм) эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001), выращенных методом HWCVD. Установлено, что формирование переходного слоя с высокой плотностью дислокаций у границы Ge/Si «закрывает» дефекты и предотвращает их прорастание в активный объём, что и обеспечивает низкую плотность дислокаций (~10⁵ см⁻²) в толще слоев Ge.

В четвертой главе автор на основании проведенных экспериментальных исследований не просто констатирует факт радиационной стойкости фотодиодов с наноструктурами GeSi, а количественно сравнивает поведение наноструктурных и объёмных структур при облучении ($n \approx 10^{14}$ см⁻², $\gamma \approx 4$ кГр):

- в наноструктурах деградация ФЧ <5%,
- в матрице Si — до 50%.

Это позволяет сделать вывод о технологическом преимуществе наноструктурирования как способа повышения надёжности. Дополнительно продемонстрирована работоспособность оптопар после облучения, что подтверждает готовность решений к практическому применению.

Работа М.М. Ивановой вносит существенный вклад в развитие низкотемпературных технологий выращивания кремниевых гетероструктур с наноструктурами GeSi и толстыми слоями Ge, ориентированных на интегральную оптоэлектронику.

Автором впервые установлены закономерности фотоэлектрического отклика кремниевых p-n фотодиодов с наноструктурами GeSi, выращенными комбинированным методом СМЛЭ-ГФЭ. Показано, что спектральная чувствительность в ИК-диапазоне определяется не только составом островков, но и соотношением скоростей эмиссии и рекомбинации дырок, что позволяет количественно прогнозировать условия достижения 100% сбора носителей.

Важным технологическим достижением является демонстрация возможности получения толстых (~1 мкм) монокристаллических слоёв Ge на Si при рекордно низкой температуре подложки (350 °C) без высокотемпературного отжига. Установлено, что аномально низкая плотность прорастающих дислокаций (~10⁵ см⁻²) обусловлена формированием переходного слоя с высокой концентрацией дефектов несоответствия, который эффективно замыкает дислокации несоответствия и предотвращает их прорастание в активный объём.

Наиболее значимым результатом с точки зрения прикладной радиационной физики является экспериментальное подтверждение повышенной стойкости именно к импульсному γ -n облучению — режиму, критически важному для спецтехники. Показано, что деградация ФЧ в спектральной области межзонного оптического поглощения островков не превышает 5%, тогда как в области собственной ФЧ Si она достигает 30–50%. Этот эффект напрямую связан с технологически контролируемой морфологией наноструктур, обеспечивающей пространственную локализацию фотогенерации избыточных носителей заряда в объёме, малом для образования радиационных дефектов.

Таким образом, новизна работы заключается не только в получении новых структур, но и в установлении технологических принципов, позволяющих совмещать низкотемпературный рост, высокое кристаллическое качество и

повышенную радиационную стойкость — три параметра, ранее считавшиеся взаимоисключающими.

Результаты диссертационной работы обладают чёткой практической направленностью и открывают реальные пути интеграции Si-совместимых ИК-фотоприёмников в современные радиоэлектронные системы с повышенной радиационной стойкостью.

Установленные закономерности эмиссии фотовозбуждённых носителей из nanoостровков GeSi позволяют рекомендовать режим эксплуатации Si p-n фотодиодов при напряжении обратного смещения выше оределенного порока. Такой подход обеспечивает практически полную (100%) эмиссию дырок даже при низких температурах, что критически важно для стабильной работы приборов в условиях космоса или ядерных установок.

Разработанные режимы выращивания методом HWCVD при температуре подложки 350 °C обеспечивают получение монокристаллических эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) толщиной ~1 мкм с плотностью прорастающих дислокаций ~10⁵ см⁻² и шероховатостью поверхности ≤0,4 нм. Эти параметры соответствуют мировому уровню, но главное — достигаются без высокотемпературного отжига, что делает технологию совместимой с постпроцессной интеграцией в КМОП-платформу.

Экспериментально подтверждена радиационная стойкость фотодиодов с nanoостровками GeSi в спектральной области 1,1–1,6 мкм к импульсному γ-n облучению (флюенс $n \approx 10^{14}$ см⁻²). Деграция фоточувствительности не превышает 5%, что создаёт основу для разработки Si-совместимых ИК-фотоприёмников, устойчивых к экстремальным радиационным воздействиям.

Наконец, продемонстрирована работоспособность оптоэлектронных пар на базе GeSi-фотоприёмников после облучения. Это подтверждает готовность предложенных решений к использованию в качестве радиационно-стойких оптических интерфейсов для систем гальванической развязки в атомной энергетике и спецтехнике.

Достоверность представленных в диссертации результатов обеспечена прежде всего высокой воспроизводимостью технологических процессов выращивания гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001). Все серии образцов были получены на одной и той же оригинальной установке СМЛЭ-ГФЭ в НИФТИ ННГУ при строго фиксированных режимах: температура подложки, давление германа, время напуска и скорость роста контролировались с точностью, достаточной для обеспечения повторяемости морфологических и электрофизических характеристик.

Диагностика структур выполнена комплексно и адекватно целям работы. Особо следует отметить, что радиационные испытания выполнены на моделирующих установках РФЯЦ-ВНИИЭФ при уровнях флюенса и дозы, соответствующих реальным условиям эксплуатации аппаратуры спецназначения. Повторяемость результатов облучения на разных сериях подтверждает, что наблюдаемая стойкость — не случайный эффект, а следствие целенаправленного управления морфологией и составом активных слоёв.

Таким образом, достоверность результатов основана не на теоретической экстраполяции, а на практической воспроизводимости технологических и измерительных процедур.

Несмотря на высокий уровень проработки диссертации, имеется ряд замечаний:

1. В разделе 2.2 не приведено количественное обоснование выбора температуры подложки 350 °С при HWCVD-росте эпитаксиальных слоёв Ge. Представляется целесообразным указать, какие именно технологические ограничения КМОП-процессов определяют верхнюю границу этой температуры, и почему не были рассмотрены режимы роста при 400–450 °С, которые также считаются совместимыми с постпроцессной интеграцией.

2. В главе 3 не рассмотрено влияние шероховатости поверхности эпитаксиальных слоёв Ge ($\leq 0,4$ нм) на адгезию и последующую металлизацию. Учитывая, что омические контакты формируются методом термического

испарения, даже нанометровая шероховатость может влиять на надёжность контактов и уровень темнового тока.

3. Для фотодиодов с наноструктурами GeSi убедительно показана малая относительная деградация fotocувствительности после облучения, однако абсолютные метрологические параметры приёмников (квантовая эффективность, удельная обнаружительная способность D^* , NEP, спектральная чувствительность в А/Вт) сопоставлены с современными Ge/Si- и GeSi-QD-фотодиодами недостаточно полно. Это затрудняет оценку прикладной конкурентоспособности структур при переходе от лабораторных образцов к приборным прототипам.

4. Для фотодиодов на базе эпитаксиальных слоёв Ge/Si(001) и для оптоэлектронных пар практически не обсуждены скоростные параметры (ёмкость, время нарастания/спада, RC-ограничение, полоса пропускания). Учитывая, что современные Ge-on-Si фотодиоды оцениваются не только по fotocувствительности, но и по сочетанию темнового тока, полосы пропускания и спектральной чувствительности, такое обсуждение было бы полезно для обоснования пригодности структур в оптических интерфейсах.

5. Радиационные испытания проведены при ограниченном наборе воздействий; в работе недостаточно прослежена дозовая/флюенсная зависимость деградации и не разделены вклады γ - и нейтронной компонент. Для квалификации элементной базы как радиационно-стойкой важно показать не только итоговую сохранность fotocувствительности при выбранном флюенсе, но и динамику изменения темнового тока, ВФХ/ВАХ и fotocувствительности при варьировании дозы, флюенса и условий смещения.

Сделанные замечания, однако, не искажают общего положительного впечатления от диссертации, которая, безусловно, является законченной научно-исследовательской работой. Основные результаты, представленные в работе, полно отражены в шести публикациях в высокорейтинговых тематических журналах: «Физика и техника полупроводников», «Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования», «Успехи прикладной физики». Данные журналы рекомендованы ВАК и соответствуют выбранной

специальности. Результаты работы докладывались на Всероссийских и международных научных конференциях в период с 2012 по 2025 год. Личный вклад автора как в опубликованных статьях, так и в проведенных в рамках диссертации исследованиях является определяющим и не вызывает сомнения.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

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.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников»

заведующий кафедрой физики твердого тела и наноструктур физического факультета

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет»

адрес места работы: г. Воронеж, Университетская пл., 1, корпус 1

Тел. +747 [REDACTED]

E-mail: paiv@phys.vsu.ru

 Павел Владимирович Середин

«04» 05 2026 г.

Подпись Середина П.В. заверяю

