

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
АВТОМАТИКИ ИМ. Н.Л. ДУХОВА»
(ФГУП «ВНИИА»)**

Отзыв

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

Диссертационная работа Ивановой М.М. посвящена вопросам применения наноразмерных полупроводниковых структур, в частности, гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами, для повышения эксплуатационных характеристик, включая радиационную стойкость, оптоэлектронных приборов, применяемых в устройствах военной, авиационной и космической техники.

Исследование, представленное в диссертационной работе Ивановой М.М., связано с решением **актуальной задачи** создания Si-совместимых ИК-фотоприёмников, устойчивых к высокоинтенсивному импульсному γ -п облучению, и пригодных для интеграции в КМОП-технологии. Традиционные A^3B^5 -фотоприемники не обеспечивают монокристаллическую интеграцию в кремниевые оптоэлектронные микросхемы, а существующие решения по созданию Ge/Si-структур требуют высокотемпературных режимов роста (порядка 1000 °C), которые плохо совместимы с процессами КМОП-технологий. Предложенный автором низкотемпературный подход позволяет получить низкоразмерные Ge(Si)/Si-структуры, характеристики которых сопоставимы с мировым уровнем.

Наибольший практический интерес представляет экспериментальное подтверждение повышенной радиационной стойкости Ge(Si)/Si-структур с наноструктурами: деградация фоточувствительности фотодиодов на таких структурах в области поглощения островков (<1,05 эВ) не превышает 5 % при флюенсе нейтронов 10^{14} см⁻², тогда как в матрице кремния она достигает 30-50 %. Эффект объясняется пространственной локализацией фотогенерации в объеме, малом для образования радиационных дефектов (вероятность попадания дефекта в наноструктуру составляет ~3 %). Разработанная теоретическая модель, связывающая квантовую эффективность

фотодиодов на базе исследуемых Ge(Si)/Si-структур с режимами их эксплуатации, позволила автору сформулировать практически важные рекомендации по применению оптоэлектронных устройств на подобных структурах. После воздействия импульсного гамма-нейтронного облучения на оптоэлектронные пары на базе Ge(Si)/Si-структур они сохранили свою работоспособность. Полученные экспериментальные данные подтверждают, что предложенные технические решения могут быть использованы в современных разработках по созданию систем гальванических развязок и оптических интерфейсов с повышенными требованиями по радиационной стойкости.

Таким образом, **цель работы** заключается в комплексном изучении фотоэлектрических свойств и стойкости к импульсному гамма-нейтронному облучению фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами.

Согласно автореферату, во **введении** представлены актуальность и степень разработанности темы исследования, поставлены цель и задачи диссертационной работы, представлена научная новизна и практическая значимость проводимых исследований, указаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, приведены степень достоверности и апробация результатов. В **первой главе** на основе анализа существующих технологических особенностей изготовления гетероструктур с наноструктурами GeSi и эпитаксиальными слоями германия на подложках Si(001) выделены сдерживающие факторы применения вышеуказанных методов в интересах интегральной оптоэлектроники – высокотемпературность, низкая производительность и связанная с этим высокая стоимость выращенных структур. Показана необходимость проведения расширенных исследований зависимости спектров фоточувствительности структур с наноструктурами GeSi, выращенных методом СМЛЭ-ГФЭ, от их морфологии и состава материала островков. Проведенный автором анализ литературных данных в части влияния ионизирующих излучений на оптоэлектронные устройства на базе различных квантоворазмерных структур показал перспективность их использования для повышения радиационной стойкости. При этом отмечается необходимость проведения расширенных исследований влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наноструктур GeSi и спектры фоточувствительности фотодиодов на базе кремниевых p-n структур с наноструктурами GeSi и толстыми эпитаксиальными слоями Ge/Si(001). **Вторая глава** посвящена

описанию методик формирования исследуемых гетероструктур и экспериментальных образцов фотодиодов и оптоэлектронных пар на их основе. Гетероструктуры с поверхностными островками GeSi, сформированными в тех же условиях, что и островки в диодных структурах, позволили провести анализ морфологии островков GeSi/Si(001). В ходе выполненных исследований автором установлено, что низкая плотность прорастающих дислокаций толстых эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити при низкой температуре подложки (350 °C), обусловлена образованием переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия. В **третьей главе** представлены результаты исследований фотоэлектрических свойств фотодиодов на базе Si p-n структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001), а также приведены оценка возможности использования таких фотодиодов в оптоэлектронных парах и способы практического увеличения квантового выхода фотодиодов. Замена в оптопарах фоточувствительных структур с наноструктурами Ge(Si) на фоточувствительные структуры, выполненные на основе эпитаксиальных слоев Ge/Si, позволяет увеличить максимальные значения коэффициента передачи оптоэлектронной пары по току до $\sim 10^{-5}$. **Четвертая глава** посвящена анализу результатов экспериментальных исследований влияния импульсного гамма-нейтронного излучения на фотоэлектрические свойства фотодиодов на базе Si p-n структур с наноструктурами GeSi/Si(001) и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001). Автором представлены результаты исследований поведения параметров морфологии наноструктур, выращенных при различных температурах подложки. Дана оценка возможности целенаправленного управления параметрами оптоэлектронных приборов за счет управления параметрами морфологии самоформирующихся наноструктур Ge/Si(001).

Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы заключаются в разработке теоретической модели, которая связывает квантовую эффективность фотодиодов на базе кремниевых p-n структур с самоформирующимися наноструктурами GeSi с составом материала островков, напряжением смещения на фотодиоде и его рабочей температурой. Также в работе обоснована и впервые экспериментально подтверждена стойкость таких фотодиодов к импульсному гамма-нейтронному излучению; при этом работоспособность оптоэлектронных пар при высоких уровнях воздействий гамма-нейтронного облучения обеспечивается за счет

выполнения условия совместимости параметров светоизлучающих и фотоприемных структур. Показана принципиальная возможность применения фотодиодов на базе Si p-n структур с островками GeSi и эпитаксиальными слоями Ge/Si(001) в радиационно стойких оптоэлектронных парах в качестве приемников оптического излучения.

Автореферат диссертации дает представление о содержании диссертационной работы. **Достоверность и обоснованность полученных диссертантом научных результатов** подтверждается использованием теоретически обоснованных методов исследований и совпадением полученных результатов с результатами, полученными в других лабораториях Института физики полупроводников СО РАН (г. Новосибирск), ИФМ РАН (г. Нижний Новгород), зарубежных лабораториях: Massachusetts Institute of Technology (Boston, USA), AT&T Bell Laboratories (Murray Hill USA), CEA-GRE (Grenoble, France), University of Rome (Italy) и др.)

Основные результаты диссертации прошли апробацию на российских и международных научных конференциях, а также опубликованы в ведущих научных изданиях, входящих в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» ВАК РФ.

Вместе с тем, по представленному автореферату диссертационной работы можно сделать несколько **замечаний**:

- цель диссертационной работы, на мой взгляд, сформулирована не достаточно корректно, поскольку не отражает в полной мере полученные автором научные результаты в виде установленных зависимостей и выявленных закономерностей в ходе изучения фотоэлектрических свойств и радиационной стойкости фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами;


- в тексте автореферата описано влияние гамма-нейтронного излучения на электрофизические свойства гетероструктур, но не приведены особенности воздействия отдельно гамма- и отдельно нейтронного излучения на параметры морфологии наноостровков;

- при проведении статистической обработки результатов исследования влияния флюенса нейтронов на параметры морфологии наноостровков отсутствует оценка погрешности полученных результатов.

Указанные замечания не снижают научной ценности проведенных исследований и могут быть учтены автором при подготовке доклада, представляемого на защите.

Диссертационная работа соответствует заявленной специальности, диссертационное исследование является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет критериям п.п. 9-14 Положения «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Иванова Мария Михайловна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».


Бутина Анастасия Валентиновна,
кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник ФГУП «ВНИИА»
Адрес: ул. Сущевская, д. 22, Москва, 127030
Тел.: (499) 978-78-03 E-mail: vniiia@vniiia.ru


07.05.2026

Я, Бутина Анастасия Валентиновна, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ивановой Марии Михайловны.

Подпись Бутиной А.В. удостоверяю
Ученый секретарь НТС
ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова», к.т.н.





Л.В. Феоктистова
07.05.2026