

## 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

Интеграция оптоэлектронных компонентов на кремниевые чипы, и, особенно, решение вопросов создания совместимых технологических маршрутов для производства таких гибридных схем в едином технологическом цикле, позволит существенно повысить быстродействие и снизить энергопотребление электроники следующего поколения. Перспективным решением является использование низкоразмерных гетероструктур Ge(Si)/Si. Однако, помимо собственно решения технологических вопросов создания светоизлучающих и фото-приемных элементов на основе кремний-германиевых наноструктур, необходимо понимание физики процессов их формирования и механизмов фотоотклика и электролюминесценции. При этом необходимо снижать температуру получения активных слоев для того, чтобы избежать диффузии, приводящей к деградации свойств. Существенно важной задачей является также и решение вопроса радиационной стойкости при эксплуатации приборов в экстремальных условиях — в космосе, на объектах ядерной энергетики и в аппаратуре специального назначения. Традиционные ИК-фотоприёмники на основе A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>-соединений демонстрируют недостаточную устойчивость к импульсным  $\gamma$ -п воздействиям и плохо совместимы с КМОП-технологиями. К началу диссертационного исследования отсутствовали систематические данные о фотоэлектрических свойствах и механизмах радиационной деградации фотодиодов на основе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si, полученных низкотемпературными методами эпитаксии. Не были установлены фундаментальные связи между морфологией наноструктур, составом материала, условиями эксплуатации и радиационной стойкостью при импульсном облучении. Таким образом, тема представленного исследования *является актуальной и практически значимой.*

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 150 страниц. Список процитированной литературы из 135 наименований достаточно полно отражает существующие публикации по тематике работы.

В первой главе автор проводит критический анализ современного состояния исследований в области низкоразмерных Ge(Si)/Si-структур. Рассматривает физику формирования наноструктур, релаксации напряжений и влиянию состава на зонную структуру. Указывает на отсутствие систематических данных о свойствах низкотемпературных систем наноструктур Ge/Si и толстых слоев Ge на поверхности кремниевой подложки, приборов на основе указанных структур. Также приведены результаты исследований влияния протонного и электронного облучения на излучательные и электрофизические свойства гетероструктур и обоснована необходимость изучения

поведения таких структур при импульсном  $\gamma$ -п облучении, моделирующем условия ядерного воздействия. Во второй главе описаны использованные в работе низкотемпературные методы получения структур, физические особенности процессов роста в выбранных режимах. Диагностика структур выполнена комплексом взаимно дополняющих методик: электронная и атомно-силовая микроскопия, комбинационное рассеяние света с ультра-высоким пространственным разрешением ( $\sim 100$  нм), электрофизические методы. Далее автор переходит к описанию собственных результатов, изложенному в 3-й и 4-й главах. В заключении кратко подведены итоги работы и подчеркнуты основные выводы.

Из описанных автором *новых результатов*, созданы Ge(Si)/Si nanoостровковые структуры и исследованы свойства фотодиодов на их основе, предложена количественная модель отклика, которая связывает квантовую эффективность с локальным составом островков, напряжённостью электрического поля и температурой. Установленные закономерности зависимости квантовой эффективности от температуры и напряжения смещения позволяют обоснованно выбирать режимы эксплуатации фотодиодов. Также в работе продемонстрирована возможность получения высококачественных толстых слоёв Ge при рекордно низкой температуре ( $350$  °C) без последующего отжига, что опровергает устоявшееся представление о том, что низкотемпературный рост неизбежно приводит к высокой плотности дислокаций и открывает технологически реализуемый путь монолитной интеграции Ge-фотодиодов в КМОП-платформу. Механизм «заморожки» дефектов в приграничном слое заслуживает дальнейшего теоретического изучения. *Впервые экспериментально установлена* высокая радиационная стойкость nanoостровковых структур именно к импульсному  $\gamma$ -п облучению — режиму, моделирующему ядерное воздействие. Предложенное автором объяснение обнаруженного эффекта предлагает новый принцип повышения радиационной стойкости, основанный на использовании особенностей геометрии наноструктуры, а не на ее легировании или отжиге. Продемонстрирована работоспособность оптоэлектронных пар, состоящих из Si:Er излучателя и GeSi-фотодиода после облучения флюенсами нейтронов до  $10^{14}$  см $^{-2}$ , что достаточно для применения таких оптопар в системах гальванической развязки на объектах ядерной энергетики и в аппаратуре, подверженной воздействию ядерного взрыва. Перечисленные *теоретические* и *практические результаты*, несомненно, *значимы* и будут использованы при разработке архитектуры и технологий создания оптоэлектронных приборов следующего поколения космической бортовой электроники и систем управления ядерными установками.

*Достоверность и надёжность* полученных в диссертации *результатов*, *обоснованность выводов* обеспечена комплексным применением взаимодополняющих методов диагностики, что позволяет уменьшить влияние систематических погрешностей и подтвердить результаты наблюдений независимыми способами. Обнаруженные закономерности не противоречат общепринятым положениям физики полупроводников и находят подтверждение в опубликованных работах, в части, где сравнение возможно.

*Личный вклад* М.М. Ивановой в диссертационную работу *не вызывает сомнений*. Автором самостоятельно выполнены ключевые этапы исследования: от критического анализа современного состояния проблемы до постановки научных задач, выбора

методологии, планирования экспериментов и, что особенно важно, — физической интерпретации полученных данных. *Основные результаты* диссертационной работы *достаточно полно отражены* в 6 статьях 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. Результаты работы были широко представлены на научных конференциях, в том числе с международным участием. Автореферат правильно отражает содержание диссертации и представляет краткое изложение основных результатов, полученных в работе.

Таким образом, диссертация М.М. Ивановой представляет собой законченное и актуальное исследование, вносящее вклад в развитие радиационно-стойкой кремниевой оптоэлектроники и создающее научно-техническую основу для разработки Si-совместимых ИК-фотоприёмников нового поколения. Диссертация по поставленным целям, решённым задачам и полученным результатам соответствует п.п. 2, 4, 7, 11, 13 паспорта специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

#### **Замечания по диссертационной работе.**

1. На с. 80 сказано, что «рост релаксированных островков методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии кремния и газофазной эпитаксии германия при низком давлении происходит по механизму Лифшица – Слезова – Вагнера, когда большие островки растут за счёт растворения меньших». Можно ли проводя отжиг структур в ростовой камере без подачи моногермана добиться более узкого распределения по размерам?

2. Возможен захват дырок, эмитированных из наноостровков, при их полевом дрейфе в матрице на встреченные по дороге следующие островки. Оценивалась ли вероятность этого процесса и его влияние на характеристики фотодиодных структур?

3. Расхождение между температурными зависимостями  $\eta_Q(T)$  и нормированной ФЧ  $S_{ph}(T)$  в области низких температур автор связывает с увеличением значения  $\tau_r$  при понижении температуры (с. 91). Каковы физические механизмы этого явления?

4. Воздействие гамма-нейтронного потока на морфологию изучалось на образцах, в которых радиационно-стимулированная диффузия атомов связана, в том числе, с открытой поверхностью, как островков, так и области между ними. В диодной структуре островки захоронены внутри кремниевой матрицы, что изменяет процессы их перестройки под действием облучения. Каким образом это может сказаться на перестройке островков?

5. В работе не приведены такие параметры гамма-нейтронного облучения, как время, температура, флуенс по гамма частицам.

6. Также не описано, каким образом автор рассчитывала размеры и концентрацию разупорядоченных областей, формируемых в мишени под действием облучения. Как могут сказаться геттерирующие свойства напряженного крайнего слоя островков в структуре на размере и свойствах формируемых разупорядоченных областей?

## Заключение

Указанные в отзыве замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. *Диссертация* «Фотоэлектрические свойства и радиационная стойкость фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001)» *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. *Соискатель*, Иванова Мария Михайловна, *достойна присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук* по специальности 1.3.11 – Физика полупроводников.

## Официальный оппонент:

*Карасев Платон Александрович*

доктор физико-математических наук по специальностям

01.01.04 – «Физическая электроника»,

01.04.10 – «Физика полупроводников»

профессор высшей инженерно-физической школы федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

адрес места работы:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.

Телефон: +7 (81

E-mail: Platon.K [redacted] stu.ru

