

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 направлена на решение важной научно-технологической задачи – разработке GeSi/Si(001) гетероструктур и приборов на их основе для радиационно-стойкой оптоэлектронной элементной базы. Учитывая значительный объем известных результатов по направлению исследований, автор сосредоточился на 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, достаточно полно обосновав актуальность исследований, практическую значимость и перспективность (востребованность) результатов работы.

Основные научные результаты, представленные в автореферате, имеют четко выраженную новизну. Это касается:

- теоретической модели, связывающей состав материала самоформирующихся наностроек GeSi, напряжение смещения на p-n Si фотодиоде и его рабочую температуру с квантовой эффективностью;

- макетов фотодетекторов с толстыми (~0.5-1 мкм) эпитаксиальными слоями Ge/Si, выращенными низкотемпературным методом горячей нити без дополнительного высокотемпературного циклического отжига;

- радиационной стойкости p-n Si фотодиодов с самоформирующимися наностройками GeSi к импульсному гамма-нейтронному излучению.

Достоверность экспериментальных результатов подтверждается использованием современных взаимодополняющих друг друга структурных (методы: атомно-силовой микроскопии, двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии, подсчет ямок травления, вандер-Пау для удельного сопротивления и эффекта Холла) и приборных (регистрация спектральных и вольт-амперных характеристик) исследовательских инструментов и диагностических комплексов.

Автореферат в полной мере отражает масштаб и комплексность проведенного исследования. Работа является законченным научным трудом, в котором изложены новые обоснованные решения и разработки, имеющие существенное значение для решения теоретических, физико-технологических и методических задач при создании радиационно-стойких фотодиодов на основе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), получаемых низкотемпературными эпитаксиальными методами. Содержание положений, выносимых на защиту, соответствует паспорту специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

По содержанию автореферата следует сделать следующие замечания и комментарии:

1. Формулировка цели работы «Комплексное изучение фотоэлектрических свойств и стойкости к импульсному гамма-нейтронному облучению фотодиодов на базе гетеро(нано)структур Ge(Si)/Si(001), выращенных низкотемпературными эпитаксиальными методами», предполагает, что будут представлены и обсуждены результаты для нескольких низкотемпературных технологических методов. Однако порядок изложения материала в автореферате не отвечает этим ожиданиям.

В разделе, посвященном обзору главы 1, обсуждаются различные методы формирования гетероструктур с самоформирующимися островками GeSi на подложках Si.

Указано на недостаточную изученность физико-химических механизмов роста эпитаксиальных слоев (ЭС) Ge/Si(001) методом газозафазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити (HWCVD), который по заявлению автора представляет особый интерес в контексте для выращивания толстых (толщиной $\approx 0,5$ мкм) ЭС Ge/Si(001) при низкой температуре ($T_g \approx 350$ °C). Далее по тексту (обсуждение Главы 2) следует: «Исследуемые гетероструктуры были выращены в НИФТИ ННГУ на оригинальной МЛЭ установке. Si p—n структуры с наноостровками GeSi/Si(001) выращивались комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ», «Эпитаксиальные слои Ge/Si(001) толщиной $\approx 0,5$ мкм выращивались методом газозафазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити». Так как схемы создаваемых структур не представлены, то читателю крайне сложно определить на каких ростовых этапах применялся тот или иной технологический метод и какие из них следует считать низкотемпературными в контексте решаемых в работе задач. Заключение также не вносит ясности в температурные границы применимости методов.

2. На странице 12 указано, что эпитаксиальные слои Ge/Si выращивались методом газозафазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити «использовалась полоска Та, нагреваемая до $T_s = (1200...1300)$ °C». Метод представляется довольно «грязным» (тантал или вольфрам с нити могут попасть в слой), поэтому возникают следующие вопросы:

а) Как по мнению автора эти примеси влияют на темновой ток фотодиодов?

б) Автор связывает низкую фоточувствительность (квантовую эффективность) с фоновым легированием (стр. 18: « $\eta \approx 0,05$, что в ≈ 4 раза меньше рекордного значения ... это может быть связано с достаточно высокими значениями N_a в эпитаксиальных слоях Ge/Si(001), выращенных при низких температурах, и, как следствие, недостаточной диффузионной длиной электронов в p-Ge L_n ») и не обсуждает потенциальную диффузию металлов нити (Ta/W) в структуру.

в) Проводился ли анализ для точного определения примеси?

3. На рисунке 2а (стр. 16) нормированная фоточувствительность в области низких температур превосходит расчетные оценки внешней квантовой эффективности. Чем автор может объяснить это расхождение? Также из графиков на рисунке 2 не видно, в каких диапазонах температур и напряжений доминирует термоактивационный, а в каких – туннельный механизм эмиссии, какова зависимость τ_c одновременно от T и U_b .

4. Невысокие значения внешней квантовой эффективности (стр.17-18) связываются автором с высокими значениями концентрации акцепторов N_a в слоях Ge/Si(001), выращенных при низких температурах, и, как следствие, недостаточной диффузионной длиной электронов в p-Ge L_n . Необходимо отметить, что уровень легирования акцепторами в $(0,9...1,5) \cdot 10^{17}$ см⁻³ нельзя признать высоким для эпитаксиальных слоев германия. Более вероятно получение недостаточной диффузионной длины электронов вследствие возникновения глубоких рекомбинационных центров, либо недостаточного качества гетерограницы Ge/Si. Хотелось бы получить комментарий от автора: производился ли анализ этих механизмов потерь, в частности, оценивалась ли скорость поверхностной рекомбинации на гетерогранице.

5. Вторым положением на защиту выносятся следующее «Низкая плотность прорастающих дислокаций толстых эпитаксиальных слоев Ge/Si(001), выращенных методом газозафазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити при низкой температуре подложки (350 °C), обусловлена образованием переходного слоя германия с высокой плотностью дислокаций несоответствия». Не возражая против правильности утверждения, сам тезис выглядит незавершенным – в положении хотелось бы увидеть, как такой переходный слой блокирует возникновение дислокаций.

Технические замечания

а) Не совсем понятно, используются два разных технологических методы или нет, так как присутствуют следующие названия:

- «низкотемпературный метод горячей проволоки без дополнительного высокотемпературного циклического отжига»;

- «методом газофазного осаждения с разложением моногермана на горячей нити».
- б) отсутствует расшифровка сокращения HWCVD.

Представленные замечания не являются критическими и скорее преследуют цель получить пояснения к определенным формулировкам и выводам. Автореферат в достаточной мере представляет все сильные стороны диссертационного труда и позволяет дать положительную оценку работе в целом.

Следует заключить, что представляемая работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор М.М. Иванова заслуживает присуждения искомой ученой степени.

К.ф.-м.н. (01.04.10 – Физика полупроводников)
Ведущий научный сотрудник,
Заведующий лабораторией фотоэлектрических преобразователей ФТИ им. А.Ф. Иоффе
д. 26, ул. Политехническая, г. Санкт-Петербург, 194021, РФ, т +7 [REDACTED]
e-mail: shvarts@scell.ioffe.ru

[REDACTED] Шварц Максим Зиновьевич
22.05.26

Я, Шварц Максим Зиновьевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Ивановой Марии Михайловны, и их дальнейшую обработку.

[REDACTED] Подпись Шварца М.З. удостоверяю
зав.отделом кадров ФТИ им.А.Ф.Иоффе
[REDACTED] Н.С. Буценко
22.05.2026