

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Баранова Глеба Владимировича

"Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации",
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01- «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Актуальность темы исследования

В настоящее время ионная имплантация является одним из основных технологических инструментов при разработке и создании перспективных приборов микро- и нанoeлектроники. В тоже время, явления, связанные с ионным легированием, образованием и устойчивостью первичных и вторичных радиационных дефектов в области гетерограниц, оказались изученными в меньшей степени. Актуальность данной диссертационной работы обусловлена изучением ранее не исследованных фундаментальных вопросов, связанных с особенностями распределений первичных радиационных дефектов вблизи границы слоистых структур. Новизна исследований связана с оригинальной идеей - изучить особенности образования первичных радиационных дефектов и их пространственного распределения в слоистых структурах на основе кремния при условиях, когда проецированный пробег ионов совпадает с интерфейсом гетероструктур. Интерфейс в таких гетероструктурах ($\text{SiO}_2\text{-Si}$; TiN-Si ; $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}$) является физической границей, позволяющей разделить радиационные вакансии и собственные междоузельные атомы, что может повлиять на вторичное дефектообразование и пространственное распределение имплантированной примеси. Результаты исследования этих эффектов могут стать основой для разработки новых технологических решений при создании перспективных приборов на основе кремния с использованием методов ионной имплантации. Таким образом, в диссертационной работе Баранова Г.В. "Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации" решаются актуальные задачи, отвечающие современным тенденциям развития элементной базы микро- и нанoeлектроники. В представленной диссертации приводятся теоретические результаты, полученные аналитическими методами и численными расчётами, а также обширные экспериментальные результаты.

**Степень обоснованности полученных положений, выводов и рекомендаций,
сформулированных в диссертации**

Выносимые на защиту научные положения основаны на достоверных экспериментальных результатах, полученных с использованием современного аналитического оборудования, а также на корректном применении уравнений диффузии и математического аппарата. В ходе работы построены адекватные модели изучаемых физических явлений и оговорены границы их применимости. Корректность разработанных физических моделей подтверждается согласованностью с полученными экспериментальными результатами и результатами ранее опубликованных экспериментальных и теоретических работ. Таким образом, основные выводы работы являются надёжными и обоснованными.

Основные результаты, полученные автором, и их новизна

Полученные автором основные научные результаты обладают научной новизной. Наиболее значимыми, на мой взгляд, являются следующие:

1. Впервые для различных слоистых гетерогенных структур теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность термически устойчивого интегрального разделения компонентов пар Френкеля, возникающих при ионной имплантации в слоистые структуры. Разработана феноменологическая модель пространственного разделения радиационных вакансий (V) и собственных междоузлий (I) на интерфейсе гетероструктур на основе Si. Продемонстрировано, что при выборе определенных параметров имплантации может быть сформирован и на начальных стадиях отжига сохранен нетиповой фон радиационных дефектов в Si, что позволяет ускорить или затормозить диффузию имплантированных примесных атомов.

2. На примере $\text{SiO}_2\text{-Si}$, TiN-Si и $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-Si}$ структур методами обратного резерфордского рассеяния и рентгеновской дифрактометрии, путем исследования непосредственно фона дефектов, экспериментально подтверждены основные положения феноменологической модели устойчивого интегрального пространственного разделения радиационных V и I при имплантации в область границ раздела указанных структур тяжелых ионов.

3. Экспериментально и теоретически показана возможность управления диффузионными процессами примесных атомов за счет создания нетипового фона радиационных дефектов, что экспериментально подтверждено на примере имплантации в модельных условиях ионов Sb и As в структуру $\text{SiO}_2\text{-Si}$. Впервые показано, что при этом диффузия атомов Sb в Si на стадии постимплантационного

отжига может быть практически полностью подавлена, а диффузия атомов As в Si имеет сложный характер и включает элемент «восходящей диффузии».

4. Разработана оригинальная количественная модель сложного диффузионного перераспределения ионно-имплантированных в границу раздела структуры SiO₂-Si атомов As, включающего разнонаправленные потоки атомов в составе комплексов с междоузлиями, учитывающая особенности сформированного в таких условиях фона первичных радиационных дефектов и позволяющая прогнозировать диффузионный профиль As при других параметрах эксперимента.

5. Количественные оценки размерных факторов ионно-имплантированных областей, при которых существенное влияние на их формирование в части коррекции металлургической границы будут оказывать механические и электрические поля, связанные с присутствием маскирующего слоя.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в работе результаты и описанные методы исследования вносят вклад в развитие физики и технологии ионной имплантации. В главах 2 и 3 изучаются процессы, связанные с ионным легированием, образованием и устойчивостью первичных и вторичных радиационных дефектов в области гетерограниц. Примечательно, что решаемые задачи рассматривались в рамках единого теоретического подхода к описанию предсказанных и экспериментально наблюдаемых особенностей формирования профилей радиационных дефектов в области гетерогенной границы и особенностей диффузионных процессов имплантированной примеси в присутствии этих дефектов. Полученные результаты также представляют практический интерес. В частности, они могут быть использованы при проектировании и разработке физико-технологических основ формирования активных малоразмерных областей с управляемыми профилями легирования основных типов донорных и акцепторных атомов для интеграции в традиционную Si технологию микроэлектроники.

Таким образом, разработанные физические модели и полученные экспериментальные результаты позволяют не только контролируемо управлять параметрами ионного легирования слоистых структур, но и разработать подходы к созданию перспективных электронных устройств с базовыми параметрами, соответствующими требованиям современного уровня развития электронной промышленности.

Замечания по работе

1. Анализируя процессы пространственного разделения радиационных дефектов в области межфазной границы, автор указывает несколько механизмов. Это эффект устойчивого разделения дефектов (V и I) границей раздела, прямая рекомбинация вакансий и междоузельных атомов в области перекрытия их распределений и сток дефектов и примеси на границу раздела. Вместе с тем, в диссертации отсутствуют сравнительные количественные оценки влияния этих механизмов на разделение V и I, а также на диффузию и распределения имплантированной примеси.

2. Дефектная структура исследованных объектов анализировалась методами рентгеновской дифрактометрии, РОР, вторичной ионной масс-спектропии, которые по отношению к структурам с толщиной слоёв в несколько десятков нанометров можно считать интегральными. К сожалению, в работе не использовался метод просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения, который позволил бы детально наблюдать эффект пространственного разделения дефектных областей, обогащенных I и V, и пространственное распределение имплантированных примесей.

3. Во второй главе диссертации при обсуждении пространственного разделения дефектов в структуре SiO₂-Si при облучении ионами Kr автор не указывает какой вклад в изменение деформационного поля в Si вносят сами имплантированные атомы Kr. Было бы интересно сделать такую оценку, учитывая, что интегральная доза ионов криптона $\sim 10^{14}$ ат/см².

4. Работа не свободна от опечаток - так, на стр. 32 написано, что ".....коэффициент диффузии Бора превышал равновесное значение ...". По-видимому, речь идёт о химическом элементе?

В целом, приведённые замечания не снижают общий высокий уровень работы.

Заключение

Диссертация Баранова Глеба Владимировича на тему "Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации" является завершённой научно-квалификационной работой, относящейся к интенсивно развивающейся области физики твёрдого тела. Содержание, иллюстративный материал и оформление диссертации соответствуют требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней. Личный вклад

соискателя в получение основных результатов диссертации является определяющим. Работа соответствует специальности 05.27.01- "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах". Автореферат и публикации по теме диссертации достаточно полно отражают содержание работы.

Диссертация Баранова Глеба Владимировича на тему "Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации" соответствует п.9 Положения о присуждении учёных степеней, утверждённого постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 (ред. от 28.08.2017), а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01- "Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах".

Официальный оппонент, кандидат физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)", директор Научно-образовательного центра "Физика твердотельных структур" (НОЦ ФТНС ННГУ).

Горшков Олег Николаевич

Адрес: 603950 Нижний Новгород, пр-т Гагарина, 23, корп. 3.

Телефон: +7 (831) 462-31-33

e-mail: gorshkov@nifti.unn.ru

07.12.2018

