

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 избранной темы

Тема диссертации относится к областям взаимодействия неравновесных дефектов и примесей в гетероструктурах на основе кремния и возможности управления (инженерии) профилями дефектов и примесей в ионно-имплантированных разнородных слоях и вблизи их гетерограниц. Эти области остаются актуальными и по сей день, несмотря на более чем пятидесятилетнюю историю исследования. Такой интерес обусловлен как возможностью совершенствования существующей технологической базы кремниевой микро- и нанoeлектроники, так и созданием принципиально новых устройств на основе кремниевых гетероструктур.

Целью диссертационной работы Баранова Г.В. являлось установление эффектов и механизмов взаимодействия примесей и дефектов в слоистых структурах на основе кремния, а также способов контроля фона неравновесных радиационных дефектов для управления профилем распределения примесных атомов в таких структурах. Выбор объекта исследований – слоистые структуры на основе Si не случаен. С одной стороны, интерес к таким структурам возрастает с уменьшением проектных норм технологии микро- и нанoeлектроники, требующих одновременно роста концентрации примесей до более чем 1%, а глубин легирования сток-истоковых областей полевых транзисторов менее длины канала для ослабления коротко-канальных эффектов. С другой стороны, ввиду недостаточной изученности процессов взаимодействия атомов примесей и дефектов на границах гетероструктур открывается возможность разработки новых методов контроля их электрофизических и структурных параметров.

Научная и практическая значимость

В работе представлены активно развиваемые в последнее десятилетие (см. например, обзор I. Martin-Bragado et al. Progress in Materials Science 92 (2018) 1; X. Zhang et al. J. Appl. Phys. 123 (2018) 125704) подходы к управлению распределением радиационных дефектов и примесных атомов в Si, основанные на эффектах вблизи границ гетероструктур, которые ранее не исследовались, либо считались малозначимыми и не

рассматривались с позиций способа управления профилями примесных атомов в наиболее распространенных структурах микроэлектроники.

Автором работы показано, что при рассмотрении распределения дефектов и примесей на границах раздела двух фаз следует учитывать не только эффекты рекомбинации точечных дефектов, сегрегации примеси и формирования третьей фазы, но также дифференциацию профилей относительно положения гетерограницы и проницаемость последней для точечных дефектов. Автору удалось теоретически обосновать и экспериментально подтвердить, что возможно устойчивое к термообработкам разделение вакансионных и междоузельных дефектов, сформированных первичными вакансиями и междоузельными атомами (V и I) при имплантации ионов в двухслойные структуры, если имплантация ведется при условии $R_p \sim h$, где R_p - средний проецированный пробег ионов, h – толщина слоя поверхностной фазы.

Результаты проведенных исследований могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих технологий получения сверхмелких ионно-легированных областей в Si. Кроме того, возможность управления составом первичных неравновесных дефектов открывает возможности создания стабильных излучающих центров радиационно-термической природы для кремниевой оптоэлектроники.

Обоснованность и достоверность полученных научных положений, выводов

Положения, выносимые на защиту, сформулированы логично и раскрыты в диссертационной работе. Основные выводы, приведенные по итогам глав диссертации и в заключении, в целом не вызывают возражений, они полностью подтверждены результатами экспериментальных и теоретических исследований.

Достоверность и новизна

Достоверность результатов исследования обусловлена сопоставлением экспериментальных результатов, полученных несколькими различными аналитическими методами, среди которых рентгеновская дифракция, резерфордовское обратное рассеяние и каналирование (RBS/C), вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), а также отсутствием противоречий итогов исследований с утвердившимися представлениями в литературе по проблемам современной радиационной физики конденсированного состояния. Исследуемые явления в перераспределении внедренных примесей, взаимодействующих с неравновесным фоном радиационных дефектов, известны более 50 лет. Однако автору удалось предложить подход к выбору условий имплантации тяжелых ионов As и Sb средних энергий в область границы раздела гетероструктуры, обеспечивающий максимальное проявление этих эффектов. Ранее подобные процессы

исследовались только для ионов низких (~ 1 кэВ) энергий вблизи сверхтонких пленок оксидов (например, F. Meirer et al. Appl. Phys. Lett. 101 (2012) 232107).

Краткая характеристика основного содержания диссертации

Содержание диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов. В первой главе приводится аналитический обзор достижений радиационной физики, наиболее близких к предмету диссертационных исследований. Обсуждаются процессы первичного и вторичного дефектообразования, подробно рассматриваются вопросы пространственного разделения первичных радиационных дефектов и их взаимодействия с межфазными границами, что является фундаментом для развития модельных представлений о методах контроля фона радиационных дефектов в гетерогенных структурах.

Во второй главе теоретически обоснован и экспериментально подтвержден развиваемый автором подход к пространственному разделению областей, обогащенных вакансиями и собственными междоузельными атомами кремния, устойчивому к термическим воздействиям. Экспериментальное подтверждение модельных представлений получено обработкой данных рентгеновской дифракции и резерфордского обратного рассеяния в режиме каналирования.

В третьей главе рассмотрены следствия устойчивого пространственного разделения первичных радиационных дефектов в структуре $\text{SiO}_2\text{-Si}$, касающиеся изменения скорости диффузионного расплывания профилей примесных атомов. Построены модели эффекта заторможенной диффузии Sb и ускоренной диффузии As, обеспечившие качественное и количественное совпадение с результатами измерения профилей методом ВИМС.

Четвертая глава посвящена теоретическим исследованиям эффектов управления ионно-имплантированным профилем примесных атомов в Si под действием силовых полей маскирующего слоя при формировании мелких локальных ионно-легированных областей.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации в части защищаемых положений, содержания глав и выводов.

Замечания и рекомендации

При общей положительной оценке работы в целом следует отметить следующие недостатки:

1. Цель работы сформулирована недостаточно четко и в форме технологической разработки для решения задач перспективной элементной комплектной базы.

2. Первое защищаемое положение звучит слишком общё и не отражает оригинальности критериев предложенного автором подхода имплантации ионов в область гетерофазной границы для термически устойчивого разделения типов дефектов.
3. В обзорной части первой главы диссертации, посвященной установленному факту разделения первичных вакансионных и междоузельных атомов при имплантации ионов, слабо отражены результаты работ по исследованию перераспределения примесей в структурах кремний-на-изоляторе (КНИ) и эпитаксиальных кремниевых структурах с встроенными субмонослоями оксида кремния (OI) для контроля профилей дефектов в современных нанотранзисторах (R.M. de Oliveira et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007) 5227; N. Kong et al. *Appl. Phys. Lett.* 90, 062107 (2007); M. Dalponte et al. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42 (2009) 165106; R. J. Mears et al., *IEEE EDTM Conf.*, 2017).
4. Исследовав во второй и третьей главах условия разделения первичных компонентов пар Френкеля V и I при имплантации тяжелых ионов As, Kr и Sb в гетероструктуры, обеспечивающие максимальное проявление эффекта разделения VI-пар, автору удалось предложить подход к выбору условий имплантации для целенаправленного изменения профилей легирующих примесей. По иронии природы эффекты ускоренной (замедленной) точечными дефектами диффузии наиболее существенны при внедрении и отжиге для легких примесей B и P в тонких слоях кремния (см. например, X. Zhang et al. *J. Appl. Phys.* 123 (2018) 125704), которые не представлены в проведенном исследовании, но довольно точно воспроизводятся в рамках модельных расчетов пакета TCAD Synopsys (*Advanced Calibration for Process Simulation User Guide. Version K-2015.06, June 2015*).
5. При описании выполненных оценок размерных эффектов в четвертой главе не приведены сравнения с экспериментальными данными аналогичных исследований, в которых основные проблемы связываются с флуктуациями легирования в слабелегированных гало- и LDD-областях транзистора, например, при имплантации атомов As через маску (R.A. Minamisawa et al. *Solid-State Electron.* 60 (2011) 31) или вклада локальных электрических полей и механических напряжений в формирование профилей примесей ((X. Yuan et al. *IEEE Trans. Electron Devices*, 58 (2011) 335; P. Eyben et al. *Nanotechnology* 26 (2015) 355702; W. Vandervorst et al. *Materials Science in Semiconductor Processing* 62 (2017) 31; J.H. Park et al. *Superlattices and Microstructures* 113 (2018) 169e177; A. Ogura et al. *Materials Science and Engineering B* 159–160 (2009) 206).

6. В диссертации и автореферате имеются незначительные неточности (например одновременное использование терминов «компонент» и «компонента» для одного и того же объекта (стр. 21 и 22)), а также употребление жаргона: «голая поверхность кремния» (стр. 99); «энергетика» (стр. 21), или англоязычных терминов вместо общепринятых в русскоязычной научной литературе. На удивление, их общее число невелико и не нарушает ясный стиль изложения и логику представления выполненных исследований.

Заключение

Несмотря на указанные недостатки, диссертация Баранова Г.В. «Эффекты пространственного распределения дефектов и примесных атомов в слоистых структурах на основе Si при ионной имплантации» является логически завершенным исследованием, выполненным на высоком научном уровне, обладающим новизной в подходе управления профилем внедренной в гетероструктуры примеси и практической значимостью полученных результатов. В работе поставлена и решена актуальная научная и техническая задача по реализации управления фоном дефектов и распределением примесных атомов в Si. Среди положительных сторон диссертационной работы следует отметить оригинальность способа имплантации в межфазную границу, предложенного и развитого автором, четкую структуру работы и достаточную насыщенность её теоретическими и экспериментальными данными.

В целом диссертация Баранова Глеба Владимировича является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент:

Попов Владимир Павлович, д-р физ.-мат. наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников, заведующий лабораторией физических основ материаловедения кремния, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики

полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,
Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13
тел.: +7 (383) 333-25-37
e-mail: popov@isp.nsc.ru



Попов Владимир Павлович

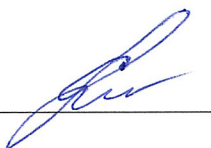
10.12. 2018

Подпись Попова В.П. достоверно:

Учёный секретарь

ФГБУН ИФП СО РАН

канд. физ.-мат. наук



С.А. Аржанникова

ФГБУН ИФП СО РАН, Россия, 630090 г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

<http://www.isp.nsc.ru/>; IFP@isp.nsc.ru