На правах рукописи

Королев Дмитрий Сергеевич

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСЕЙ НА ДИСЛОКАЦИОННУЮ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ В КРЕМНИИ, ИМПЛАНТИРОВАННОМ ИОНАМИ Si^+

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (ННГУ им. Н.И. Лобачевского)

Научный руководитель: **Тетельбаум Давид Исаакович**
доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок Научно-исследовательского физико-технического института ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Официальные оппоненты: **Герасименко Николай Николаевич**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», начальник научно-исследовательской лаборатории радиационных методов, технологий и анализа

Карасев Платон Александрович
доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», доцент кафедры физической электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук»

Защита состоится «12» декабря 2018 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета Д.212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (Конференц-зал)

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте **https://diss.unn.ru/865**

Автореферат разослан « » 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.166.01,
кандидат физико-математических наук Марычев Михаил Олегович

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Создание нового поколения устройств коммуникационной техники требует разработки систем обработки и передачи данных, обладающих повышенной надежностью и более высоким быстродействием по сравнению с существующими аналогами. Эта задача может быть решена при переходе от традиционной микроэлектроники к оптоэлектронике и интегральной оптике. Развитие электроники базируется на полупроводниковой технологии, в которой ключевым элементом является *кремний* в силу своей широкой распространенности, устойчивости к химическим воздействиям, а главное – из-за наличия превосходно отработанных технологий создания монокристаллических образцов большого диаметра, обладающих при этом высоким структурным совершенством и степенью очистки, а также благодаря уникальным пассивирующим свойствам диоксида кремния, что позволило создавать сверхбольшие интегральные схемы. Однако, до сих пор так и не созданы оптоэлектронные схемы в интегральном исполнении, в которых все элементы были бы выполнены по кремниевой технологии. Причина этого заключается в отсутствии эффективного излучателя света на основе кремния.

Существующие варианты решения данной проблемы – создание структур A_3B_5 на кремнии, использование соединений Si_xGe_{1-x} и другие [1,2], обладают существенным недостатком – сложностью их встраивания в технологические процессы кремниевой микроэлектроники. Использование линии межзонной люминесценции кремния ограничивается тем, что он является непрямозонным полупроводником и вероятность излучательных переходов крайне мала. Широко изученные методы улучшения излучательных свойств кремния путем наноструктурирования, например, создание слоев пористого кремния [3,4], синтез кремниевых нанокристаллов в диэлектрических матрицах [2,3,5], к сожалению, пока также не нашли широкого практического применения. Одна из причин этого – несовпадение длины волны излучения таких систем с окнами прозрачности оптических волоконных световодов. Поэтому весьма важно создание на кремнии источников излучения, которые излучали бы на длине волны ~ 1,5 мкм, соответствующей максимуму прозрачности кремниевого оптоволокна. Решение этой задачи открыло бы возможность создания и широкого применения систем оптической передачи данных.

Одним из возможных подходов к решению этой задачи может служить *инженерия дефектов* [6] – направление, которое зародилось еще в 60-70-х годах прошлого века при изучении процессов дефектообразования при облучении твердых тел ускоренными частицами. Изучение процессов формирования дефектов, создаваемых в процессах радиационных воздействий, привело к идее о разработке способа контролируемого введения дефектов в твердые тела и их использовании для модификации структурных, электрических и оптических

свойств материалов. Практическое применение это направление нашло с развитием технологии *ионной имплантации*, процесс которой сопровождается, помимо внедрения электрически активных примесей, возникновением большого числа видов *радиационных дефектов* [7,8]. Изучение эволюции системы дефектов при постимплантационном отжиге показало существование комплексов дефектов, которые обладают люминесценцией в инфракрасной (ИК) области спектра [9,10], в том числе и на «коммуникационных» длинах волн. Однако применение люминесценции таких дефектов существенно ограничивается ее сильным температурным гашением.

Рекомбинационное излучение в кремнии, связанное с дислокациями, было обнаружено впервые в конце 1970-х годов в пластически деформированном кремнии [11]. Центры *дислокационной люминесценции* (ДЛ) в кремнии имеют высокую устойчивость к температурной обработке образцов и относительно высокую температурную стабильность, что делает их привлекательными для использования в светоизлучающих диодах [12]. Особый интерес с этой точки зрения представляют центры, ответственные за длинноволновую линию *D1* (~ 1,5 мкм), которая обладает наибольшей температурной стабильностью из всех линий ДЛ и, что наиболее важно, попадает в область максимума прозрачности волоконной оптики. Несмотря на тот факт, что уже получены первые результаты по изготовлению кремниевых светодиодов с ДЛ методом пластической деформации [13] с рекордной внешней квантовой эффективностью 0,1% при комнатной температуре, что свидетельствует о перспективности данного метода, в этом направлении существуют значительные трудности. Большим недостатком метода пластической деформации, одного из основных методов создания дислокационных структур, является его практически полная несовместимость с традиционной микроэлектронной технологией [12]. Остается также проблема сильного температурного гашения ДЛ, что является одним из главных препятствий к ее практическому использованию. Другая проблема состоит в том, что природа центров излучения, ответственных за длинноволновую часть ДЛ, наиболее перспективную для оптоэлектронных приложений, до сих пор остается не выясненной, и это затрудняет задачу управления ее параметрами. Существует две основных версии природы центров *D1* ДЛ. Первая связывает линию *D1* с геометрическими особенностями ядер дислокаций, в частности, с образованием изгибов или ступенек, появляющихся, например, при пересечении дислокаций [14,15]. Отмечается также возможная роль дислокационных сегментов (таких как Ломеровские дислокации), появление которых обусловлено взаимодействием дислокаций [12,16]. Вторая версия связана с наличием точечных дефектов в атмосферах, окружающих ядро дислокации [17]. К настоящему моменту предприняты многочисленные попытки определить систему энергетических уровней, ответственных за излучательную рекомбинацию, однако, до сих пор не

предложено общей модели, объясняющей люминесценцию линии *D1* ДЛ [12,18,19].

Одним из прорывных результатов последних лет служит формирование центров ДЛ при высокотемпературном отжиге облученных ионами различной природы пластин кремния [19]. Эволюция собственных междоузельных атомов (СМА), образующихся при ионном облучении, в процессе отжига приводит к образованию сначала комплексов, состоящих из нескольких междоузельных атомов, а затем через стадию формирования стержнеобразных дефектов – к образованию дислокаций [10], после чего и наблюдается интенсивная ДЛ, в том числе линия *D1* [19].

Одним из наиболее технологичных ионно-лучевых способов введения дислокаций является облучение кремния ионами Si^+ (самоимплантация) с последующим отжигом [20]. Самоимплантация приводит к появлению дополнительных СМА, которые могут расходоваться на формирование центров ДЛ.

Имеющиеся в настоящее время сведения о ДЛ структур, синтезированных методом ионной имплантации, получены лишь для некоторых режимов имплантации. Однако, было установлено, что на эволюцию дефектной системы, приводящую к формированию центров ДЛ, существенное влияние может оказывать непреднамеренный нагрев образцов при ионном облучении. Более того, в условиях отсутствия надежной термостабильности в процессе ионного облучения возможна низкая воспроизводимость результирующего состояния дефектной системы и, как следствие – люминесцентных параметров структур. Ионы Si, как и другие ионы с относительно малой массой, относятся к той категории, для которых результирующая дефектная структура кремния чрезвычайно чувствительна к температуре облучения при её вариации от комнатной до нескольких десятков градусов Цельсия [21].

При формировании светоизлучающих дислокационных структур целенаправленно не использовалась такая важная возможность управления системой дефектов, как контролируемое ионное облучение примесными атомами, хотя было замечено различие характера ДЛ для кремния с различным типом проводимости [13,14,22].

Как сказано выше, практическое использование ДЛ существенно ограничивается сильным температурным гашением интенсивности основных спектральных линий. Одним из способов существенного улучшения параметров ДЛ – температурной зависимости интенсивности ДЛ – является уменьшение концентрации, а также оптической активности центров безызлучательной рекомбинации (ЦБР), обусловленных неконтролируемыми примесями, например, с помощью процедуры внешнего алюминиевого геттерирования [13]. Однако, процедура внешнего геттерирования применительно к самоимплантированному кремнию с ДЛ практически не исследовалась.

Таким образом, исследование закономерностей влияния примесей на ДЛ весьма актуально как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. К началу выполнения данной работы озвученные проблемы оставались практически не исследованы.

Цель и задачи работы

Цель работы – комплексное исследование влияния исходных и имплантированных примесей на формирование и последующую модификацию центров дислокационной фотолюминесценции в самоимплантированном кремнии.

Основные задачи работы:

1. Исследование распределения центров *D1* дислокационной фотолюминесценции кремния, подвергнутого имплантации ионов Si^+ (самоимплантированного кремния) и последующему высокотемпературному отжигу.
2. Изучение влияния легирующих примесей, содержащихся в исходном кремнии (бор, фосфор), на дислокационную фотолюминесценцию самоимплантированного кремния в зависимости от состава среды постимплантационного отжига.
3. Исследование влияния введения в самоимплантированный кремний примесей путем дополнительной ионной имплантации на интенсивность и температурную зависимость дислокационной фотолюминесценции.
4. Применение процедуры внешнего алюминиевого геттерирования для улучшения параметров дислокационной фотолюминесценции самоимплантированного кремния.

Научная новизна работы

1. Впервые при изучении ДЛ в самоимплантированном кремнии разработана и применена система термостабилизации образца при ионном облучении, позволяющая обеспечить постоянство температуры в процессе облучения и устранить фактор невоспроизводимости структуры и люминесцентных свойств образца. Изучение распределения излучательных центров по глубине образца выявило корреляцию их распределения с профилем распределения имплантированных ионов кремния.
2. Установлено существенное влияние вида исходной легирующей примеси (фосфор, бор) на люминесцентные свойства самоимплантированного кремния при постимплантационном отжиге в атмосферах различного состава.
3. Проведено сравнительное исследование параметров ДЛ самоимплантированного кремния при легировании путем ионного облучения различными примесями и в отсутствие такого легирования. Установлена особая роль ионного легирования бором, приводящего к усилению ДЛ и снижению эффекта температурного гашения.
4. Продемонстрировано дополнительное снижение температурного гашения интенсивности ДЛ в облученных бором образцах самоимплантированного кремния в результате внешнего алюминиевого геттерирования.

5. Найдена система излучательных и безызлучательных переходов в самоимплантированном и дополнительно легированном ионами бора кремнии, согласующаяся с экспериментальными данными по температурной зависимости интенсивности ДЛ.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные результаты создают предпосылки для развития представлений о закономерностях формирования и природе примесной модификации параметров ДЛ в самоимплантированном кремнии, в частности, свидетельствуют о ключевой роли взаимодействия примесей с собственными междоузельными атомами. Практическая значимость работы определяется получением новых экспериментальных данных о ДЛ в кремнии, которые могут быть использованы при разработке устройств интегральной оптики, опто- и наноэлектроники.

Методология и методы исследования

Методологической основой исследования являются хорошо разработанные методы исследования и подходы, развитые в многочисленных научных работах по ионной имплантации, дефектообразованию и исследованию спектральных характеристик наноструктур. В качестве экспериментальных методов использовались такие хорошо отработанные методики, как ионная имплантация, термический отжиг, а также спектроскопия фотолюминесценции при исследовании люминесцентных свойств синтезированных образцов.

Положения, выносимые на защиту

1. В излучение линии *D1* дислокационной люминесценции самоимплантированного кремния основной вклад вносит слой, в котором расположены имплантированные атомы Si.
2. Влияние легирующих примесей, как содержащихся в исходном кремнии, так и вводимых ионной имплантацией, на линию *D1* дислокационной люминесценции обусловлено их взаимодействием с собственными междоузельными атомами в процессе формирования излучательных центров.
3. Имплантация ионов бора (50 кэВ) в самоимплантированный кремний при дозах не выше $2 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$ приводит к повышению интенсивности линии *D1* дислокационной люминесценции и существенно уменьшает влияние температурного гашения. Применение алюминиевого геттерирования совместно с ионной имплантацией бора позволяет повысить максимальную температуру, при которой наблюдается линия *D1* дислокационной фотолюминесценции, до значений выше 200 К.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается тщательным выбором параметров ионной имплантации и последующего отжига, использованием хорошо апробированных методов исследования фотолюминесцентных свойств, а также соответствием выводов современным

теоретическим представлениям. Правильность результатов и обоснованность выводов подтверждались при апробации работы.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы [A1-A19] и докладывались на следующих конференциях: XVII, XVII, XIX, XXI Международные Симпозиумы «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2013, 2014, 2015, 2017); 12-я и 13-я Международные научные конференции-школы «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение» (Саранск, 2013, 2014); V и VI Всероссийские конференции и школы молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Нижний Новгород, 2014, 2016); E-MRS 2016 Spring Meeting (Lille, France, 2016); E-MRS 2018 Spring Meeting (Strasbourg, France, 2018); XI Конференция и X Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе «Кремний 2016» (Новосибирск, 2016); XLVII, XLVIII Международные Тулиновские конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2017, 2018); XXIII Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП 2017) (Москва, 2017).

Два доклада на конференциях были отмечены дипломами: диплом за лучший постерный доклад, представленный на XXIII Международной конференции «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП 2017) (Москва, 2017) и диплом за лучший доклад на XLVIII Международной Тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, 2018).

Работа по теме диссертации выполнялась диссертантом (в качестве основного исполнителя) в рамках следующих научных проектов: «Разработка новых подходов для управления процессами образования структурных дефектов и люминесцентных центров при изготовлении кремниевых структур с дислокационной люминесценцией методом ионной имплантации» (Грант РФФИ № 12-02-00980); «Физические принципы создания перспективных полупроводниковых и оксидных микро- и наноматериалов комбинированными методами осаждения, термообработки и ионной имплантации» (Задание № 3.285.2014/К на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, код проекта: 285, 2014-2016 гг.); «Развитие физических принципов модификации дислокационной люминесценции в кремнии и формирования гексагонального кремния при ионной имплантации» (Задание № 16.2737.2017/ПЧ на выполнение научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности, 2017-2019 гг.); «Развитие физических принципов повышения эффективности люминесценции дислокационных структур в кремнии методом ионной имплантации» (Грант РФФИ № 17-02-01070); «Исследование аномальной температурной зависимости дислокационной

люминесценции в имплантированных кремниевых структурах» (Грант РФФИ № 16-32-50184 мол_нр), а также стипендии Президента РФ (СП-1147.2018.3).

Личный вклад автора в получение результатов

Основные эксперименты были спланированы автором совместно с научным руководителем и заведующим лабораторией физики и технологии тонких пленок НИФТИ ННГУ А.Н. Михайловым. Самостоятельно выполнялись подготовка образцов, термические отжиги, исследование люминесцентных свойств. Остальные исследования выполнялись при непосредственном участии автора. Ионная имплантация производилась вед. инж. НИФТИ В.К. Васильевым. Исследования структуры методом просвечивающей электронной микроскопии проводились под руководством проф. Д.А. Павлова в НОЦ ФТНС ННГУ. Исследования температурных зависимостей ДЛ и проведение алюминиевого геттерирования частично выполнялись совместно с А.Н. Терещенко в ИФТТ РАН. Теоретическое описание температурных зависимостей было выполнено совместно с С.Н. Нагорных (НГТУ им. Р.Е. Алексеева) и В.И Павленковым (Арзамасский филиал ННГУ). Анализ и интерпретация полученных результатов выполнялись автором совместно с научным руководителем.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 5 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 7 статей в сборниках трудов конференций и 7 тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации составляет 119 страниц, включая 44 рисунка, список литературы, который содержит 109 наименований и список публикаций по теме диссертации.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы и степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи работы, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, перечислены применявшиеся при решении задач методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту. Указаны сведения об апробации и степени достоверности представленных результатов, о научных достижениях автора и его личном вкладе в получение результатов исследования, публикациях, а также структуре и объеме диссертации.

В **Главе 1** приведен литературный обзор наиболее важных работ по люминесцентным свойствам дефектно-примесных систем в кремнии. Наибольшее внимание уделено люминесцентным центрам, источником формирования которых являются радиационные дефекты (пары Френкеля, кластеры на их основе и

комплексы с участием примесей), в частности, генерируемые при облучении кремния ускоренными частицами. Также рассмотрена эволюция таких дефектных комплексов при термообработке.

В **разделе 1.1** рассмотрены люминесцентные свойства различных дефектных структур в кремнии, полученных, в основном, при облучении ускоренными частицами. Показано, что определяющую роль в образовании таких дефектов играют СМА.

В **разделе 1.2** рассмотрены основные методики формирования и свойства центров ДЛ в кремнии. Приведен обзор работ по формированию центров ДЛ в кремнии методом пластической деформации. Кратко рассмотрены люминесцентные свойства кремниевых дислокационных структур, формирующихся при гидрофильном сращивании разориентированных кремниевых пластин. Приведен обзор работ по ДЛ кремния, обусловленной кислородными преципитатами. Отмечены основные работы по формированию центров ДЛ при облучении кремния ионами различной природы. Рассмотрено состояние проблемы влияния исходных и введенных ионной имплантацией примесных атомов на особенности ДЛ кремния.

В **разделе 1.3** приведено краткое резюме по результатам литературного обзора и дано обоснование выбранных цели и задач диссертационного исследования.

В **Главе 2** представлены оригинальные результаты изучения процесса формирования центров ДЛ при имплантации ионов Si^+ и последующей высокотемпературной термообработке кремния («самоимплантированный» кремний).

В **разделе 2.1** описана методика формирования исследуемых образцов. Образцы кремния КЭФ-4,5 (100) подвергались имплантации ионов Si^+ в с энергией 100 кэВ, дозами $1 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$ и $1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$. Для устранения эффекта невоспроизводимости дефектной структуры под действием нагрева при облучении была разработана и применена система улучшенного теплоотвода, обеспечивающая постоянство температуры в процессе имплантации. Средний проецированный пробег ионов кремния по расчетам программы SRIM (*www.srim.org*) составлял ~ 140 нм. Максимум распределения структурных нарушений в образце, согласно данным Резерфордовского обратного рассеяния, находился на глубине ~ 200 нм. Последующий отжиг проводился при температурах 900-1100 °С в хлорсодержащей окислительной атмосфере (ХСА) в течение 1 ч.

В **разделе 2.2** представлены результаты исследования влияния термостабилизации при ионном облучении на ДЛ. Показано, что при дозе $1 \cdot 10^{17}$ $см^{-2}$ низкоинтенсивная линия *D1* наблюдается только в условиях стабилизации температуры, тогда как при сравнительно малых дозах ($1 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$) вне зависимости от применения стабилизации температуры наблюдается интенсивная люминесценция линии *D1*. Методом послойного химического травления совместно

с электронно-микроскопическим исследованием структуры поперечного среза образца и измерением интенсивности ДЛ показано, что максимальный выход люминесценции *D1* происходит преимущественно из слоя, близкого по глубине (~ 0,1-0,2 мкм) к максимуму распределения имплантированных ионов кремния, используемых при формировании дислокационного слоя, тогда как дислокации, образованные в имплантационном слое при отжиге, проникают далеко за пределы этого слоя – до глубин ~ 1 мкм. Полученный результат свидетельствует в пользу участия СМА в формировании центров *D1* ДЛ.

В **разделе 2.3** сформулированы выводы по Главе 2.

В **Главе 3** рассмотрено влияние контролируемых примесей на ДЛ в самоимплантированном кремнии.

В **разделе 3.1** приводятся детали изготовления исследуемых образцов. Рассматривались две серии образцов. В *первой* серии использовались образцы кремния КЭФ-4,5 и КДБ-1, исходно легированных фосфором и бором, соответственно. Имплантация ионов кремния проводилась с энергией 100 кэВ и дозой $1 \cdot 10^{15}$ $см^{-2}$. Постимплантационный отжиг в потоке газов осуществлялся при температурах 900, 1000 и 1100 ºС в течение 1 ч. В качестве газов применялись высокочистые азот, очищенный аргон и кислород. При отжиге в смешанных атмосферах (азот + кислород) их состав регулировался путем изменения скоростей потоков азота и кислорода в пропорциях 80:20, 60:40, 40:60 и 20:80%.

Вторая серия представляла собой образцы кремния с предварительно синтезированными в одних и тех же условиях центрами ДЛ. Дополнительное их облучение ионами C^+, O^+, B^+, P^+ проводилось с энергиями, соответственно, 60, 75, 50 и 130 кэВ, при которых, согласно расчету по программе SRIM, средние проецированные пробеги ионов были одинаковыми и составляли ~ 200 нм. Использовались две дозы ионного легирования – «большая», соответствующая концентрации атомов примеси в максимуме распределения ~ $1 \cdot 10^{20}$ $см^{-3}$, и «малая» – в 10^2 раз меньшая. После имплантации примесей проводился отжиг при 800 °С (0,5 ч) в атмосфере азота. Температура 800 °С – существенно ниже той, которая использовалась при формировании центров ДЛ (1100 °С).

В **разделе 3.2** приводятся результаты по влиянию исходной легирующей примеси на ДЛ. Установлено существенное различие поведения линии *D1* для образцов *n*- и *p*-Si при изменении состава атмосферы отжига (рисунок 1). Для *n*-Si отжиг в *чистом азоте* не приводит к возникновению ДЛ, тогда как при отжигах в *смешанных* атмосферах либо в *чистом кислороде* линия *D1* возникает, а ее интенсивность растет практически пропорционально концентрации кислорода в атмосфере отжига. Для образцов *p*-Si ситуация другая: линия *D1* возникает при отжигах *как в окисляющей, так и в инертной атмосферах*, причем ее интенсивность весьма слабо зависит от состава атмосферы. Таким образом, реакция ДЛ на изменение атмосферы отжига существенно зависит от типа легирующей примеси. Такое изменение практически не приводит к изменению

интенсивности ДЛ в образцах, исходно легированных *бором*, но существенно влияет на интенсивность ДЛ для кремния, легированного *фосфором*.

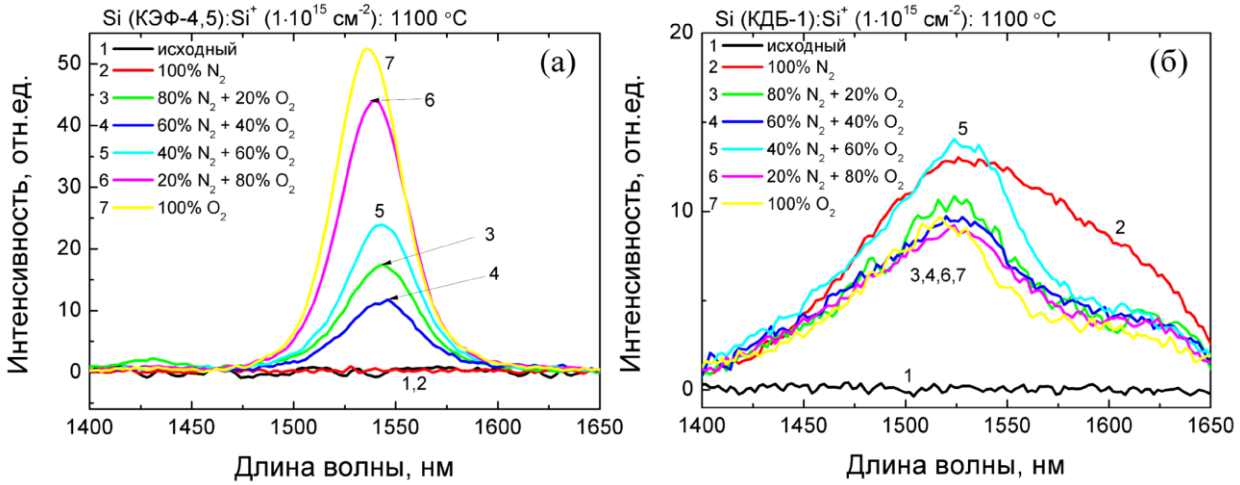

Рисунок 1. Спектры ФЛ (линия *D1*) для двух серий имплантированных образцов – КЭФ-4,5 (а) и КДБ-1 (б), отожженных в чистых N_2, O_2, а также в смешанных атмосферах (N_2+O_2) при температуре 1100 °C. Спектры измерены при 77 К.

Предполагая, что в образование центров *D1* ДЛ определяющий вклад вносят точечные дефекты (ТД), локализованные в атмосферах Коттрелла дислокаций, необходимо обеспечить приток таких дефектов в процессе отжига. При отжигах в *окисляющей* атмосфере приток СМА происходит в процессе окисления, скорость которого (и, следовательно, поток СМА) растет с температурой и содержанием кислорода в атмосфере отжига. Если же отжиг производится в инертной атмосфере, то источником СМА служат только дефекты, запасенные при имплантации; но для того, чтобы они смогли выполнять функцию насыщения Коттрелловских атмосфер и формирования там центров ДЛ, нужно обеспечить сохранение ТД до той стадии отжига, когда происходит интенсивное формирование дислокаций, т.е. до температур 900 °C и выше [10]. В случае *p*-Si примесные атомы бора интенсивно взаимодействует с СМА, вступая в реакции типа $Si+B_i \leftrightarrow Si_i+B$, $mSi_i+nB_i \leftrightarrow (Si_i)_mB_n$ [23]. До стадии образования дислокаций в отсутствие бора «доживает» слишком малая доля запасенных при имплантации СМА, поэтому при отжиге образцов КЭФ-4,5 в инертной атмосфере ДЛ не наблюдается. Наоборот, в присутствии бора последний, связываясь с междоузельными атомами, и/или вступая с ними в обменные реакции, способствует сохранению СМА до необходимых для формирования дислокаций температур и времен.

Таким образом, показано, что исходный примесный состав кремния существенно влияет на параметры центров ДЛ, формируемых в процессе высокотемпературного отжига. Полученные результаты подтверждают гипотезу о том, что за формирование линии *D1* ДЛ ответственны ТД, находящиеся в атмосферах дислокаций. Бор в качестве примеси обеспечивает сохранение достаточного запаса междоузельных атомов в *процессе отжига* до той стадии, при

которой образуются центры ДЛ, и это способствует увеличению концентрации последних.

В **разделе 3.3** обсуждается влияние ионной имплантации различных примесей – O, C, P и B – на спектр фотолюминесценции (ФЛ) кремния, в котором линия *D1* была предварительно получена путем имплантации ионов Si^+. Показано, что облучение ионами в отсутствие отжига приводит к практически полному гашению ДЛ вне зависимости от сорта примеси. Отжиг при 800 °C (30 мин, N_2) приводит к восстановлению линии *D1* ДЛ, причем ее интенсивность существенно зависит от типа и дозы легирующей примеси (рисунок 2).

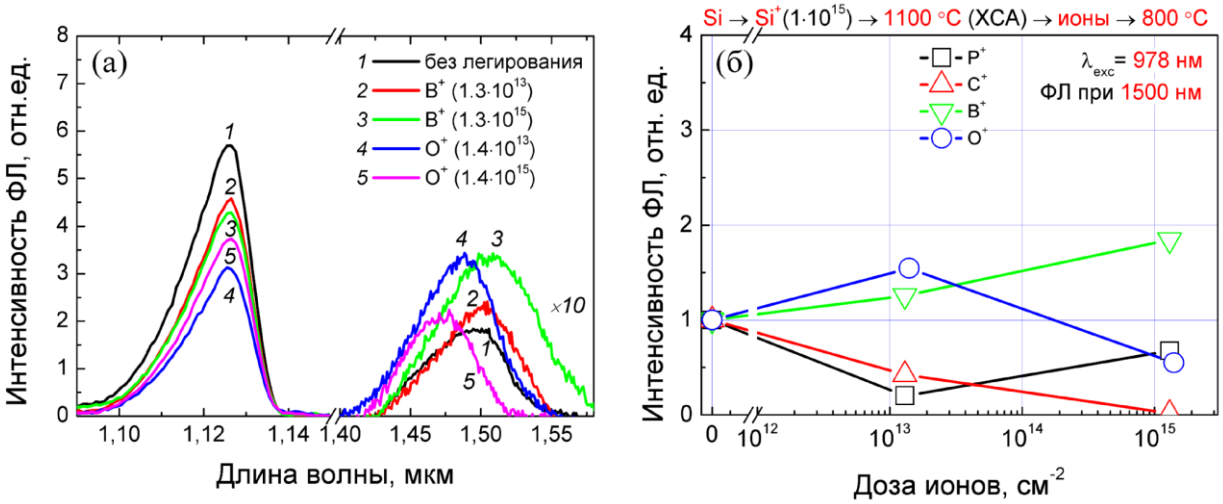

Рисунок 2. Влияние легирования бором и кислородом на спектры ФЛ (а) и зависимости интенсивности ФЛ в максимуме линии *D1* от дозы облучения различными ионами (б) после заключительного отжига при 800°C. За единицу интенсивности ФЛ на (б) принята интенсивность для образцов, не подвергавшихся дополнительному облучению, но отожженных при 800°C. Спектры измерены при 77 К.

Имплантация углерода и фосфора гасит линию *D1*, а имплантация кислорода с концентрацией, сравнимой с концентрацией в исходных образцах (Cz-Si), повышает интенсивность этой линии, тогда как при большой концентрации имплантированного кислорода наблюдается обратный результат. Ионное легирование бором оказывает положительное влияние на интенсивность линии *D1*. Электронно-микроскопическое исследование облученных бором образцов выявило изменение структуры, сопровождающееся увеличением плотности дислокаций в облученных бором образцах на порядок (до величины ~ $6 \cdot 10^9$ $см^{-2}$) относительно не облученных бором образцов. Дополнительные исследования показали, что возрастание интенсивности ДЛ при легировании бором практически не связано с возникновением новых дислокаций. Результаты, изложенные в этой главе, еще раз подтверждают, что линия *D1* ДЛ обусловлена наличием избытка СМА, степенью пересыщения которых можно управлять путем вариации атмосферы отжига и выбором режимов дополнительного ионного легирования.

В **разделе 3.4** сформулированы выводы по Главе 3.

В **Главе 4** изложены результаты детального исследования влияния имплантации ионов бора с вариацией режимов облучения и термообработки на излучательные характеристики центров ДЛ.

В **разделе 4.1** приводятся детали синтеза исследуемых в этой главе образцов. В качестве исходных образцов использовался кремний марки КЭФ-4,5 (100), который облучался ионами кремния с энергией 100 кэВ и дозой $1{\cdot}10^{15}$ см$^{-2}$. После облучения проводился отжиг в ХСА при 1100 °С в течение 1 часа. Приготовленные по такой методике образцы кремния подвергались имплантации ионов бора с энергией 50 кэВ и различными дозами: $1{\cdot}10^{15}$, $3{\cdot}10^{15}$, $1{\cdot}10^{16}$, $2{\cdot}10^{16}$, $3{\cdot}10^{17}$ см$^{-2}$. После облучения проводился отжиг в атмосфере осушенного азота последовательно при 600, 700 и 800 °С в течение 30 минут каждый, причем измерение ФЛ проводилось после каждого отжига.

В **разделе 4.2** рассмотрено влияние легирования бором на ДЛ при 77 К. Дополнительное облучение ионами бора с последующим отжигом при температурах 600 и 700 °С приводит к практически полному гашению ДЛ, а после отжига при 800 °С вызывает немонотонное изменение интенсивности ДЛ с ростом дозы бора (рисунок 3): при дозах до $1{\cdot}10^{16}$ см$^{-2}$ интенсивность возрастает, а при дальнейшем увеличении дозы – снижается. Однако, даже при оптимальной дозе $1{\cdot}10^{16}$ см$^{-2}$ интенсивность остается несколько ниже, чем для исходного образца, что связано с внесением неконтролируемых примесей в процессе отжига. Таким образом, легирование бором в определенном интервале доз оказывает положительное влияние на ДЛ в линии *D1*, хотя не может полностью устранить отрицательного влияния загрязнения образцов при отжиге в данных условиях. Снижение интенсивности ФЛ при дозах бора более $2{\cdot}10^{16}$ см$^{-2}$ интерпретируется как следствие образования борсодержащих комплексов – ЦБР.

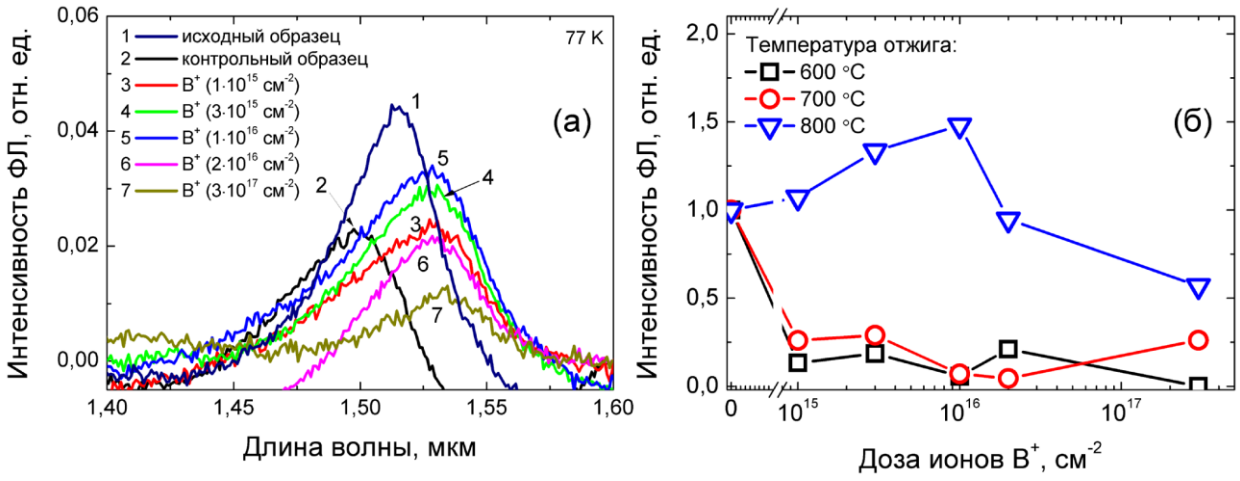

Рисунок 3. Спектры ДЛ кремния, облученного Si^+ и отоженного при 1100 °С в ХСА: (1) – исходный образец; (2) – образец, дополнительно отожженный при 800 °С без имплантации бора (контрольный образец); (3-7) – образцы, облученные Si^+ и отожженные при 1100 °С в ХСА, дополнительно легированные бором с различными дозами (а). Зависимость интенсивности ДЛ от дозы ионов бора для различных температур отжига (б).

Увеличение интенсивности ДЛ при ионном легировании бором при не слишком больших дозах по сравнению с контрольным образцом, отожженным при 800 °С, но не подвергшимся легированию бором, в общем случае может быть обусловлено двумя факторами: либо связыванием «случайной» примеси X за счет образования комплексов B_nX_m, не являющихся ЦБР (геттерирование), либо генерацией дополнительных СМА, участвующих в образовании центров *D1*, за счет реакции обмена бора в узлах с СМА. Однако, дальнейшее исследование показало, что определяющий вклад вносит именно взаимодействие атомов бора с СМА, а не геттерирование неконтролируемых примесей ТД, вносимыми при имплантации B^+ (раздел 4.5).

В **разделе 4.3** приводятся особенности спектров низкотемпературной ДЛ имплантированных бором образцов. Показано, что при низких температурах (6 К) на спектрах ДЛ исходных образцов с синтезированными центрами ДЛ наряду с линией *D1* наблюдается и линия *D2*. При легировании ионами бора интенсивность линии *D1* значительно снижается, а линия *D2* полностью исчезает. Исследование поведения интенсивности линии *D1* ДЛ при повышении температуры измерения от 6 до 77 К выявило существенное отличие для образцов, дополнительно легированных бором, от нелегированных. В образце с исходной дислокационной структурой интенсивность люминесценции падает с ростом температуры от 6 до 77 К, тогда как в имплантированных бором образцах люминесценция при 77 К оказалась выше, чем при 6 К, то есть вместо температурного гашения происходит температурное *возгорание* ДЛ.

В **разделе 4.4** детально рассмотрена температурная зависимость интенсивности ДЛ образцов кремния, легированных бором. В диапазоне 6 – 20 К увеличение интенсивности ДЛ имеет место как для образцов с различным содержанием бора, так и для образцов, не легированных бором (рисунок 4). При этом интенсивность ДЛ в этом диапазоне температур возрастает с увеличением дозы бора.

Наиболее важный результат состоит в том, что имплантация ионов B^+ позволяет снизить влияние температурного гашения линии *D1* ДЛ и приводит к появлению дополнительного максимума на температурной зависимости при температурах ~ 60 – 70 К. Интенсивность и положение этого максимума зависят от концентрации имплантируемого бора. Наибольшая интенсивность достигается при дозе бора $2 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$.

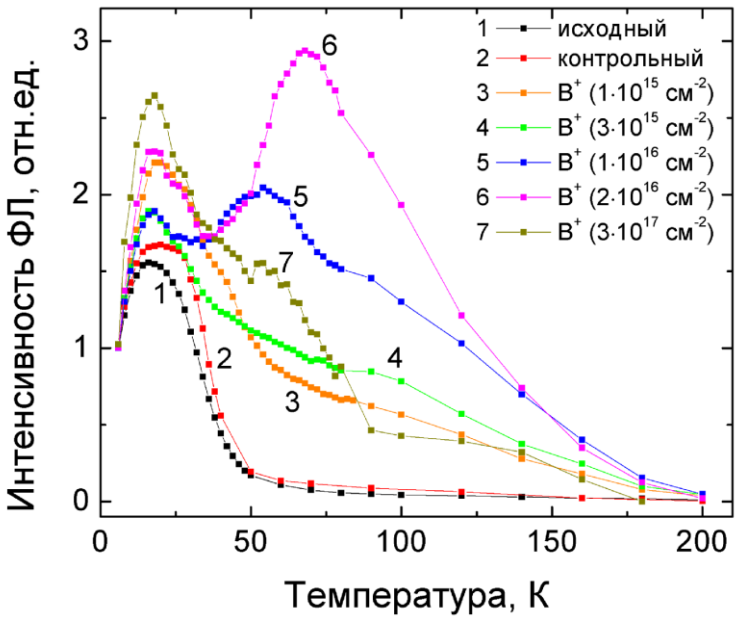

Рисунок 4. Зависимость интенсивности линии *D1* от температуры (кривые нормированы на интенсивность при 6 К) для образцов, облученных ионами бора с различными дозами и прошедших серию изохронных отжигов. Приведены также температурные зависимости для образца без облучения ионами B^+ и отжигов (исходный) и образца без облучения B^+, но после изохронных отжигов (контрольный) в том же режиме.

В **разделе 4.5** рассмотрено влияние процедуры *внешнего алюминиевого геттерирования* (AlG) на температурную зависимость ДЛ в ионно-имплантированном кремнии. Применение AlG является эффективным способом удаления (или снижения концентрации) случайных примесей, вносящих ЦБР, из активной области с дислокациями. Процедура AlG экспериментальных образцов заключалась в следующем. На образец вакуумным термическим напылением наносился слой Al толщиной ~ 1-3 мкм, затем образец отжигался при 830 °C (1 ч) с последующим охлаждением до 300 °C со скоростью 3 °C/мин в инертной атмосфере ($Ar + H_2$).

Исследование температурной зависимости линии *D1* ДЛ для таких образцов показало следующее (рисунок 5). В результате применения геттерирования интенсивность линии *D1* значительно возросла во всем исследованном интервале температур, при этом температурный ход интенсивности ДЛ демонстрирует более крутой рост. Для образца, который после отжига при 800 °C (30 мин) подвергался дополнительной термообработке при 830 °C (1 ч), но без нанесения алюминия, наблюдается снижение интенсивности ФЛ во всем исследованном температурном интервале (особенно при температурах более 40 К) что подтверждает предположение о влиянии на ФЛ загрязнений, вносимых в процессе отжига, и снижение их концентрации при AlG.

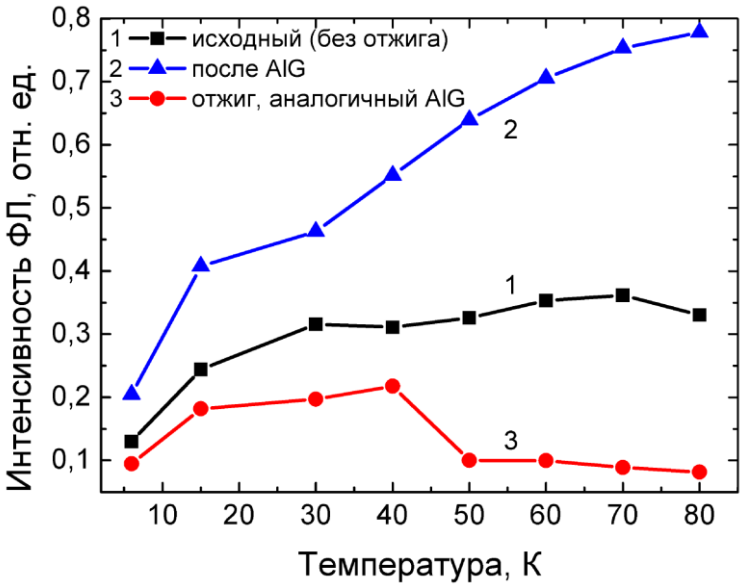

Рисунок 5. Зависимость интенсивности линии *D1* от температуры для образцов, легированных бором ($1 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$) после AlG при 830 °C: (1) – образец без дополнительной термообработки, (2) – образец после AlG, (3) – после отжига, аналогичного процедуре AlG.

Исследование температурной зависимости ДЛ в интервале температур 6 – 200 К для образцов с разной дозой бора показало, что в результате легирования происходит не только существенное улучшение температурной зависимости интенсивности линии *D1*, но и меняется форма этой зависимости (рисунок 6). После проведения AlG форма температурной зависимости практически одинакова для всех образцов, имплантированных бором, низкотемпературный максимум при 20 К менее выражен, а высокотемпературный максимум расположен при ~ 90 – 100 К, то есть сдвинут в область более высоких температур по сравнению с образцом без AlG.

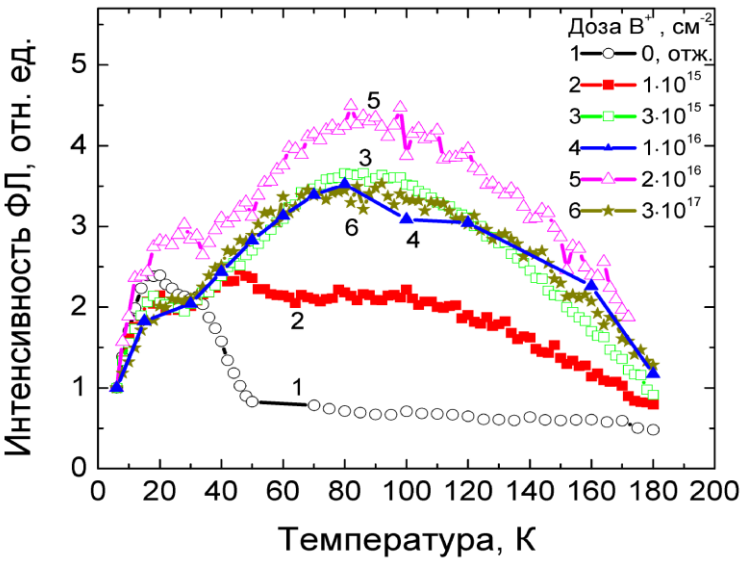

Рисунок 6. Зависимости интенсивности линии *D1* от температуры (кривые нормированы на интенсивность при 6 К) для образцов, легированных бором с различными дозами и отожженными при 800 °C, после процедуры AlG.

При этом важно, что измеримая ФЛ линии *D1* в случае AlG сохраняется вплоть до температур ~ 200 K, тогда как без AlG она полностью гасится при этой температуре. Интересно, что в отсутствие ионной имплантации B^+ процедура AlG не оказывает большого влияния на ФЛ. Это указывает на тот факт, что положительное влияние ионной имплантации бора не связано с возможным эффектом геттерирования неконтролируемых примесей дефектами, вносимыми при имплантации B^+ (очищением от них дефектно-примесных атмосфер дислокаций путем переноса «вредных» примесей на центры геттерирования, локализованные вне дислокационных атмосфер), как можно было бы предполагать в качестве одного из механизмов положительного влияния бора на ДЛ.

В **разделе 4.6** путем теоретического описания (аппроксимации) температурной зависимости интенсивности линии D1 ДЛ для образца, не легированного бором, а также образца, ионно-легированного бором с дозой $2 \cdot 10^{16}$ $см^{-2}$, найдена система энергетических уровней и параметры, характеризующие излучательные и безызлучательные переходы, которые позволяют наилучшим образом аппроксимировать экспериментальные зависимости интенсивности линии *D1* от температуры. В расчетах предполагалось, что один из уровней (E_c – 0,31 эВ) является излучательным, а остальные – безызлучательные. Расчет показал, что легирование бором приводит к появлению большего количества уровней в запрещенной зоне, чем в нелегированном образце. Это обусловлено образованием дополнительных сложных дефектов. Смещение уровня Ферми вниз при легировании бором освобождает от электронов уровни, расположенные выше в запрещенной зоне, в невозбужденном (термически равновесном) состоянии и делает возможным их заселение при световом возбуждении. Конкуренция между процессом перехода с излучательного уровня на вышележащие безызлучательные и процессом термического заселения излучательного уровня при переходе на него электронов с нижележащих (его подпитка) приводит к появлению второго – высокотемпературного – максимума на температурной зависимости интенсивности ФЛ. Основной результат – усложнение системы уровней при легировании бором позволяет сделать вывод о том, что в люминесценцию центров *D1* ДЛ вносят вклад факторы, связанные с внедрением бора и влияющие на конкуренцию излучательных и безызлучательных процессов.

В **разделе 4.7** сформулированы выводы по Главе 4.

Заключение

1. Показано, что стабилизация температуры в процессе ионного облучения в общем случае влияет на параметры дислокационной люминесценции в самоимплантированном кремнии, подвергнутом последующему высокотемпературному отжигу в окислительной атмосфере, но при относительно

низких дозах ($1 \cdot 10^{15}$ см$^{-2}$) влияние на спектры дислокационной фотолюминесценции практически не выражено.

2. Впервые показано, что центры *D1* дислокационной люминесценции расположены преимущественно в приповерхностном слое, толщина которого близка к глубине максимума распределения ионов кремния, тогда как дислокации, образованные в самоимплантированном Si при отжиге, проникают гораздо глубже.

3. Установлено, что наличие даже относительно низких (~ 10^{16} см$^{-3}$) концентраций бора в исходных образцах существенно сказывается на характере влияния состава атмосферы отжига. При отжиге в инертной атмосфере линия *D1* наблюдается только в образцах, легированных бором (КДБ-1), тогда как образцы, исходно легированные фосфором (КЭФ-4,5), обладает выраженной дислокационной фотолюминесценцией только при отжиге в окислительной атмосфере.

4. Установлено, что ионное облучение самоимплантированного кремния с последующим отжигом при 800 °С приводит к изменению его люминесцентных свойств, зависящему от природы и дозы внедряемой примеси. При имплантации бора обнаружено явление существенного усиления интенсивности линии *D1* дислокационной люминесценции.

5. Детальное исследование параметров дислокационной люминесценции *D1* в широком диапазоне доз имплантированного бора ($1 \cdot 10^{15}$ – $3 \cdot 10^{17}$ см$^{-2}$) выявило немонотонную зависимость интенсивности люминесценции от дозы: максимальная интенсивность линии *D1* имеет место при дозе $2 \cdot 10^{16}$ см$^{-2}$. Обнаружено также нетипичное для дислокационной люминесценции поведение температурной зависимости в дополнительно облученных бором образцах: появление второго максимума в интервале температур 60 – 70 К. Применение процедуры внешнего алюминиевого геттерирования неконтролируемых примесей позволяет осуществить сдвиг высокотемпературного максимума до температур ~ 100 К и обеспечить сохранение фотолюминесценции до температур более 200 К. Таким образом, ионная имплантация бора позволяет существенно снизить эффект температурного гашения линии *D1*, особенно в сочетании с геттерированием.

6. Расчетным путем установлено, что влияние ионного легирования бором самоимплантированного кремния может быть объяснено введением дополнительных глубоких уровней в запрещенную зону, в том числе ответственных за термическую подкачку электронов на излучательный уровень.

7. Полученные результаты указывают на ключевую роль СМА в формировании центров ДЛ *D1* и возможность применения ионного легирования бором для усиления линии *D1* на практически важной длине волны 1,5 мкм.

Результаты работы имеют важное значение для изучения природы ДЛ в кремнии. Они дают дополнительные аргументы в пользу того, что наиболее важная с практической точки зрения линия *D1* связана с наличием точечных дефектов в

атмосферах дислокаций – центров излучательной рекомбинации. Результаты создают предпосылки для развития новых фундаментальных и прикладных разработок, которые могут найти практическое применение в современных оптоэлектронных устройствах.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Публикации в журналах из списка ВАК:

[A1] Влияние ионного легирования на фотолюминесценцию в кремнии, связанную с дислокациями, сформированными путем имплантации ионов Si^+ / А.Н. Михайлов, А.И. Белов, **Д.С. Королев**, А.О. Тимофеева, В.К. Васильев, А.Н. Шушунов, А.И. Бобров, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум, Е.И. Шек // Физика и техника полупроводников. – 2014. – Т.48, №2. – С.212-216.

[A2] Distribution of *D1* Dislocation Luminescence Centers in Si^+-Implanted Silicon and the Photoluminescence Model / S.N. Nagornykh, V.I. Pavlenkov, D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, **D.S. Korolev**, A.N. Shushunov, A.I. Bobrov, D.A. Pavlov, E.I. Shek // Modern Electronic Materials. – 2015. – Vol.1, No.2. – P.33-37.

[A3] Localization of dislocation-related luminescence centers in self-ion implanted silicon and effect of additional boron ion doping / D.I. Tetelbaum, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, **D.S. Korolev**, A.N. Shushunov, A.I. Bobrov, D.A. Pavlov, E.I. Shek, N.A. Sobolev // Phys. Stat. Sol. C. – 2015. – V.12, No.1-2. – P.84-88.

[A4] Effect of ion doping, intrinsic impurities and annealing conditions on dislocation-related luminescence in self-ion-implanted Si / **D.S. Korolev**, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, D.I. Tetelbaum // Phys. Stat. Sol. C. – 2016. – Vol.13. – P.937-939.

[A5] Влияние примеси бора на излучательные свойства дислокационных структур в кремнии, сформированных путем имплантации ионов Si^+ / А.Н. Терещенко, **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум, Э.А. Штейнман // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т.52, №7. – С.702-707.

Статьи в сборниках трудов конференций:

[A6] Влияние ионной имплантации примесей на дислокационную фотолюминесценцию в кремнии / А.Н. Михайлов, А.И. Белов, **Д.С. Королев**, А.О. Тимофеева, В.К. Васильев, Д.И. Тетельбаум, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, Е.И. Шек, Н.А. Соболев // XVII Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». Труды, Н. Новгород, 11–15 марта, 2013. – С.608-609.

[A7] Влияние ионного легирования на дислокационную фотолюминесценцию в кремнии / **Д.С. Королев**, А.И. Белов, А.Н. Михайлов, А.И. Бобров, Д.А. Павлов, Д.И. Тетельбаум // 12-я Международная конференция-школа «Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение». Сборник трудов, Саранск, 1-4 октября 2013 г. – С.28.

[A8] Влияние дозы ионного легирования бором и условий отжига на дислокационную фотолюминесценцию в кремнии / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Е. Смирнов, А.Н. Шушунов, Е.И. Шек, Д.И. Тетельбаум // XVIII

Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». Труды, Н. Новгород, 10–14 марта, 2014. – С.638-639.
[А9] Дислокационная фотолюминесценция в кремнии: влияние дозы ионного легирования бором и атмосферы отжига / **Д.С. Королев**, А.Е. Смирнов, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Н. Шушунов, Д.И. Тетельбаум // Материалы нано-, микро-, оптоэлектроники и волоконной оптики: физические свойства и применение: сборник трудов 13-й Международной научной конференции-школы, Саранск, 7–10 октября 2014 г. – С.43.
[А10] Исследование влияния отжига в окислительной атмосфере на дислокационную люминесценцию в кремнии, имплантированном Si^+ / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Е. Смирнов, Д.И. Тетельбаум // XIX Международный Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». Труды, Н. Новгород, 10–14 марта, 2015. – С.539-540.
[А11] Влияние легирования бором на температурную зависимость дислокационной люминесценции в кремнии / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман, Д.И. Тетельбаум // XXI Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника». Труды симпозиума, Н. Новгород, 13-16 марта, 2017. – Т.2. – С.625-626.
[А12] Механизм влияния температуры на дислокационную фотолюминесценцию ионно-имплантированного кремния / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, С.Н. Нагорных, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман, Д.И. Тетельбаум // XXIII Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (ВИП 2017). Труды, Москва, 21-25 августа, 2017. – Т.3. – С.93-96.

Тезисы докладов конференций:
[А13] Эволюция дислокационной люминесценции в кремнии при дополнительном ионном легировании и отжиге в различных атмосферах / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Н. Шушунов, А.Е. Смирнов, Д.И. Тетельбаум, Е.И. Шек, Н.А. Соболев // V Всероссийская конференция и школа молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации». Тезисы докладов, Нижний Новгород, 27-31 октября, 2014. – С.61.
[А14] Effect of ion doping, intrinsic impurities and annealing conditions on dislocation-related luminescence in self-ion-implanted Si / **D. Korolev**, A. Mikhaylov, A. Belov, D. Tetelbaum // E-MRS 2016 Spring Meeting. Abstracts, France, Lille, May 02-06, 2016. – BB.15.5.
[А15] Влияние примеси бора на излучательные свойства дислокационных структур в кремнии, сформированных путем имплантации ионов Si^+ / А.Н.Терещенко, А.Н.Михайлов, А.И. Белов, **Д.С. Королев**, Д.И. Тетельбаум, Э.А. Штейнман // XI Конференция и X Школа молодых ученых и специалистов по актуальным проблемам физики, материаловедения, технологии и диагностики кремния, нанометровых структур и приборов на его основе “Кремний 2016”. Тезисы докладов, Новосибирск, 12-15 сентября, 2016. – С.70.
[А16] Аномальная температурная зависимость дислокационной фотолюминесценции в кремнии, подвергнутом имплантации ионов кремния и бора / **Д.С. Королев**, А.И. Белов, А.Н. Михайлов, С.Н. Нагорных, В.И. Павленков, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман // VI Всероссийская конференция и школа молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы

ионной имплантации». Тезисы докладов. Нижний Новгород, 24-27 октября 2016 г. – С. 22-23.

[А17] Дислокационная люминесценция в имплантированном ионами Si^+ кремнии с разными типами проводимости и концентрациями легирующей примеси / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман, Д.И. Тетельбаум // XLVII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2017). Тезисы докладов, Москва, 30 мая-1 июня, 2017. – С. 124.

[А18] Температурная зависимость дислокационной фотолюминесценции в ионно-имплантированном кремнии, дополнительно легированном акцепторными примесями / **Д.С. Королев**, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Никольская, А.Н. Терещенко, Э.А. Штейнман, Д.И. Тетельбаум, С.Н. Нагорных, В.И. Павленков // XLVIII Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (ФВЗЧК-2018). Тезисы докладов, Москва, 29 - 31 мая, 2018. – С. 131.

[А19] Influence of boron implantation and gettering on light-emitting properties of dislocation structures in ion-implanted silicon / **D. Korolev**, A. Tereschenko, A. Nikolskaya, A. Mikhaylov, A. Belov, E. Steinman, D. Tetelbaum // E-MRS 2018 Spring Meeting. Abstracts, France, Strasbourg, June 18-22, 2018. – K.P1.31.

Список цитированной литературы

1. Silicon photonics III. Systems and applications / ed. L. Pavesi, D. Lockwood. – New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. – 524 p. – ISBN: 978-3-642-10502-9.

2. Silicon Nanophotonics: Basic Principles, Present status and Perspectives / ed. L. Khriachtchev. – Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009. – 452 p. – ISBN: 978-981-4241-11-3.

3. Silicon Nanocrystals: fundamentals, synthesis and applications / ed. L. Pavesi, R. Turan. – Weinheim: Wiley-VCH, 2010. – 627 p. – ISBN: 978-3-527-32160-5.

4. Handbook of Porous Silicon / L. Canham (Ed.) – Switzerland: Springer International Publishing, 2014. – 1017 p.

5. Особенности формирования и свойства светоизлучающих структур на основе ионно-синтезированных нанокристаллов кремния в матрицах SiO_2 и Al_2O_3 / А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.Б. Костюк, И.Ю. Жаворонков, Д.С. Королев, А.В. Нежданов, А.В. Ершов, Д.В. Гусейнов, Т.А. Грачева, Н.Д. Малыгин, Е.С. Демидов, Д.И. Тетельбаум // Физика твердого тела. – 2012. – Т.54, №2. – С.347-359.

6. Соболев, Н.А. Инженерия дефектов в технологии полупроводников / Н.А. Соболев. – М: Lambert Academic Publishing, 2011. – 252 с.

7. Риссел, Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – Перевод с нем. В. В. Климова, В. Н. Пальянова. - М. : Наука, 1983. - 360 с.

8. Зорин, Е.И. Ионное легирование полупроводников / Е.И. Зорин, П.В. Павлов, Д.И. Тетельбаум. – М.: Энергия, 1975. – 129 с.

9. Радиационные эффекты в полупроводниках / Под ред. Л.С. Смирнова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 181 с.
10. Libertino, S. Damage Formation and Evolution in Ion-Implanted Crystalline Si / S. Libertino, A. La Magna // Topics Appl. Physics. – 2010. – Vol.116. – P.147-212. – In: Materials Science with Ion Beams / H. Bernas (Eds.) – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
11. Рекомбинационное излучение на дислокациях в кремнии / Н.А. Дроздов, А.А. Патрин, В.Д. Ткачев // Письма в ЖЭТФ. – 1976. – Т.23, №11. – С.651-653.
12. Kveder, V.V. Dislocations in Silicon and D-Band Luminescence for Infrared Light Emitters / V.V. Kveder, M. Kittler // Materials Science Forum. – 2008. – Vol. 590. – P. 29–56.
13. Silicon light-emitting diodes based on dislocation-related luminescence / V. Kveder, M. Badylevich, W. Schröter, M. Seibt, E. Steinman, A. Izotov // Phys. Stat. Sol. A. – 2005. – Vol.202, №5. – P.901-910.
14. Suezawa, M. The nature of photoluminescence from plastically deformed silicon / M. Suezawa, K. Sumino // Physica Status Solidi (a). – 1983. – Vol. 78, № 2. – P. 639–645.
15. Influence of misfit dislocation interactions on photoluminescence spectra of SiGe on patterned Si / G.P. Watson, J.L. Benton, Y.H. Xie, E.A. Fitzgerald // Journal of Applied Physics. – 1998. – Vol. 83, № 7. – P. 3773–3776.
16. Fedina, L.I. On the structure and photoluminescence of dislocations in silicon / L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, T.S. Shamirzaev // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 124, № 5. – P. 053106.
17. Cathodoluminescence imaging and spectroscopy of dislocations in Si and $Si_{1-x}Ge_x$ alloys / V. Higgs, E.C. Lightowlers, S. Tajbakhsh, P.J. Wright // Applied Physics Letters. – 1992. – Vol. 61, № 9. – P. 1087–1089.
18. Steinman, E.A. The Mechanisms and Application of Dislocation Related Radiation for Silicon Based Light Sources / E.A. Steinman, V.V. Kveder, H.G. Grimmeiss // Solid State Phenomena. – 1995. – Vol. 47–48. – P. 217-222.
19. Соболев, Н.А. Инженерия дефектов в имплантационной технологии кремниевых светоизлучающих структур с дислокационной люминесценцией (Обзор) / Н.А. Соболев // ФТП. – 2010. – Т.44, №1. – С.3-25.
20. Фотолюминесценция в кремнии, имплантированном ионами кремния с аморфизующими дозами / Н.А. Соболев, А.Е. Калядин, Р.Н. Кютт, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, Е.И. Шек, В.В. Афросимов, Д.И. Тетельбаум // ФТП. – 2011. – Т.45, №9. – С.1182-1187.
21. Pelaz, L. Ion-beam-induced amorphization and recrystallization in silicon / L. Pelaz, L.A. Marqués, J. Barbolla // Journal of Applied Physics. – 2004. – Vol. 96, № 11. – P. 5947-5976.
22. Correlation between defect structure and luminescence spectra in monocrystalline erbium-implanted silicon / N.A. Sobolev, A.M. Emel yanov, E.I. Shek, V.I. Vdovin, T.G. Yugova, S. Pizzini // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2002. – Vol. 14, № 48. – P. 13241-13246.
23. Transient enhanced diffusion of boron in Si / S.C. Jain, W. Schoenmaker, R. Lindsay, P.A. Stolk, S. Decoutere, M. Willander, H.E. Maes // J. Appl. Phys. – 2002. – Vol.91, №11. – P.8919-8941.