

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 212.166.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ НИЖЕГОРОДСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.И. ЛОБАЧЕВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.12.2018 № 12

О присуждении Королеву Дмитрию Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Влияние примесей на дислокационную люминесценцию в кремнии, имплантированном ионами Si^+ » по специальности 05.27.01 – «Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах» – принята к защите 10 октября 2018 г. (протокол заседания № 7) диссертационным советом Д212.166.01, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23, приказ от 11.04.2012 г. №105/нк о создании диссертационного совета.

Соискатель Королев Дмитрий Сергеевич, 1990 года рождения, в 2013 году окончил федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», в 2017 году завершил освоение программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре федерального

государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» (срок обучения с 01.07.2013 г. по 10.07.2017 г.), работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории физики и технологии тонких пленок Научно-исследовательского физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре электроники твердого тела физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, профессор, Тетельбаум Давид Исаакович, ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии тонких пленок Научно-исследовательского физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

Официальные оппоненты:

1. Герасименко Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, начальник научно-исследовательской лаборатории радиационных методов, технологий и анализа федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,

2. Карасев Платон Александрович, доктор физико-математических наук, доцент кафедры физической электроники Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический

университет Петра Великого»,
дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (ФИЦ КазНЦ РАН, г. Казань) – в своем положительном отзыве, составленном и подписанном Баязитовым Рустэмом Махмудовичем, доктором физико-математических наук, лауреатом Государственной премии СССР, заведующим лабораторией интенсивных радиационных воздействий Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, Баталовым Рафаэлем Ильясовичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН, и утвержденном Калачевым Алексеем Алексеевичем, доктором физико-математических наук, профессором РАН, заместителем директора ФИЦ КазНЦ РАН по научной работе, руководителем Казанского физико-технического института им. Е.К.Завойского – обособленного структурного подразделения ФИЦ КазНЦ РАН, отметила, что тема рассматриваемой диссертационной работы является актуальной и практически важной. Отмечается получение в диссертации важных и новых результатов. Подтверждается, что «тема и содержание диссертации соответствуют специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах. Автореферат полностью отражает содержание диссертации, защищаемые положения и выводы». Указывается, что «диссертация Королева Дмитрия Сергеевича соответствует всем критериям (п.9-п.14) Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением правительства РФ №842 от 24.09.2013, и требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Соискатель имеет 43 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 19 работ, из них 5 статей в журналах, включенных в

Перечень ВАК РФ, в том числе индексируемых международными библиографическими базами Web of Science и Scopus, и 14 публикаций в сборниках трудов и тезисов докладов российских и международных научных конференций. Диссертантом в этих работах выполнены исследования фотолюминесцентных свойств кремния с центрами дислокационной люминесценции, созданными путем имплантации ионов кремния с последующим отжигом. Изучено влияние примесных атомов, как содержащихся в исходных кристаллах, так и внедренных с применением ионной имплантации, на фотолюминесцентные свойства исследуемых образцов.

Личный вклад соискателя в опубликованные по теме диссертации работы является определяющим.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

Сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, **достоверны**.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов.

1) Бунтов Евгений Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физических методов и приборов контроля качества Физико-технологического института Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает актуальность, научную новизну и практическую значимость полученных результатов.

Отзыв Бунтова Е.А. содержит замечания:

1) Из текста автореферата не ясны метод и условия регистрации низкотемпературной ФЛ. Подобная информация является ключевой для интерпретации температурных зависимостей на рисунках 4-6. В частности, в области давлений более 10^{-4} Па, может наблюдаться эффект ложного разгорания ФЛ при $T = 6 - 15$ К.

2) Каковы возможные пути дальнейшего повышения рабочей температуры источников света на основе дислокационной люминесценции?

2) Соболев Николай Алексеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник лаборатории Физики полупроводниковых приборов Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что диссертация выполнена на актуальную тему и содержит ряд новых результатов, а также «...представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу». Отзыв содержит следующее замечание: «В автореферате (раздел 4.6) приводятся результаты моделирования температурной зависимости линии D1. Однако, никаких параметров образовавшихся уровней в запрещенной зоне не приводится.

Также отсутствует их сопоставление с имеющимися в литературе центрами...».

3) Кведер Виталий Владимирович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор, главный научный сотрудник Института физики твердого тела РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «Среди полученных в работе новых результатов можно отметить наблюдение существенного влияния исходной легирующей примеси (фосфор, бор), а также атмосферы постимплантационного отжига на люминесцентные свойства самоимплантированного кремния в атмосферах различного состава. Также установлена особая роль ионного легирования бором, приводящего к усилению ДЛ и снижению эффекта температурного гашения», а также делает вывод о том, что «Диссертационная работа выполнена на требуемом научно-техническом уровне, соответствует паспорту специальности 05.27.01 и удовлетворяет требованиям, установленным в разделе II «Положения о присуждении ученых степеней»...».

Отзыв не содержит замечаний.

4) Тыщенко Ида Евгеньевна, доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории нанодиагностики и нанолитографии Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает актуальность, новизну, практическую важность и достоверность результатов, полученных в диссертационной работе.

Отзыв Тыщенко И.Е. содержит замечания:

1) В диссертации употребляется термин «дислокационная люминесценция», в то время как авторы показали, что природа наблюдаемой фотолюминесценции обусловлена не дислокациями, а скоплениями междоузельных атомов. Поэтому употребление термина «дислокационная люминесценция» в данном случае неуместно.

2) В автореферате диссертации постоянно упоминаются линии фотолюминесценции D1 и D2, но не написано, каким значениям длин волн (или энергий) они соответствуют. Кроме этого, в спектрах наблюдаются не линии ФЛ, а довольно широкие полосы, в состав которых входят указанные линии. Почему автор указывает только две линии и какова природа наблюдаемых полос?

3) В диссертации использована методика спектроскопии фотолюминесценции, основанная на измерении спектров эмиссии, длина волны возбуждения которых, скорее всего, не соответствует максимуму их возбуждения. С другой стороны, о природе энергетических уровней рекомбинационных центров можно судить по спектрам возбуждения фотолюминесценции. Поэтому наблюдаемые изменения интенсивности и энергетического положения максимумов наблюдаемой эмиссии света могут быть связаны не с изменением структуры центра, а с изменением условий максимального возбуждения одного и того же центра.

5) Итальянцев Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, начальник отдела функциональной электроники Акционерного Общества «Научно-исследовательский институт молекулярной электроники» (АО "НИИМЭ"), в своем отзыве на автореферат диссертации отмечает, что «...диссертационная работа выполнена добросовестно, на надлежащем научном уровне и является законченным квалификационным трудом, заслуживающим высокой оценки».

Отзыв Итальянцева А.Г. содержит замечания:

1) При обсуждении различной степени влияния термического окисления на конечный результат люминесценции в кремнии, исходно легированном фосфором и бором, автор не указывает кристаллографическую ориентацию экспериментальных пластин КЭФ-4,5 и КДБ-1. Между тем, стоит предположить, что поверхность КЭФ имеет ориентацию (100), а КДБ (111), как выводы по данному эксперименту могут быть истолкованы иначе в силу резко отличающейся генерации собственных междоузлий при термическом окислении этих поверхностей.

2) В заголовке темы речь идет о люминесценции, в тексте автореферата – о фотолюминесценции. Для микроэлектроники и радиофотоники наиболее актуальна электролюминесценция. Как это соотносится с рассуждениями об актуальности темы в начале автореферата.

3) Хотелось бы большей аккуратности в стилистике изложений. Например, как соотносятся рассуждения об «оптоэлектронных схемах в интегральном

исполнении» с волоконными световодами? Почему в данном контексте используется термин «кремниевое оптоволокно», хотя имеется в виду полосковый кремниевый волновод?

Все отзывы на автореферат диссертации положительные. В них отмечается актуальность темы исследования, новизна научных результатов и их значимость для науки и практики. В отзывах, содержащих замечания, отмечается, что последние не влияют на положительную в целом оценку работы и не снижают ценности защищаемой диссертации.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тематической близостью их научных исследований и диссертационной работы соискателя, проявляющейся в изучении структурных, оптических и люминесцентных свойств ионно-синтезированных структур на основе полупроводников, в частности, кремния, в том числе с использованием методов, применённых соискателем в диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Впервые при изучении дислокационной люминесценции 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;

Предложено объяснение природы примесной модификации параметров дислокационной люминесценции в самоимплантированном кремнии, основанное на учете взаимодействия примесей с собственными междоузельными атомами;

Доказано, что наличие бора в образцах со сформированными центрами дислокационной люминесценции позволяет существенно снизить эффект температурного гашения линии $D1$, особенно в сочетании с внешним алюминиевым геттерированием, а 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;

Применительно к проблематике диссертации эффективно (с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс существующих экспериментальных методов исследования структуры, в том числе: метод просвечивающей электронной микроскопии, метод оптической спектроскопии; а также комплекс технологических методов создания и модификации свойств структур, таких как ионная имплантация, термический отжиг, внешнее алюминиевое геттерирование;

Изучено влияние вида легирующей примеси (фосфор, бор) в исходных образцах Si на люминесцентные свойства самоимплантированного кремния при постимплантационном отжиге в атмосферах различного состава;

Проведено сравнительное исследование параметров дислокационной люминесценции самоимплантированного кремния при легировании путем ионного облучения различными примесями и в отсутствие такого легирования;

Установлена особая роль ионного легирования бором, приводящего к усилению дислокационной люминесценции и снижению эффекта температурного гашения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

Определены технологические параметры ионного легирования образцов самоимплантированного кремния бором, их термообработки и внешнего алюминиевого геттерирования, позволяющие обеспечить сохранение дислокационной фотолюминесценции до температур более 200 К.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается адекватным выбором параметров синтеза исследуемых образцов, использованием хорошо апробированных методов исследования фотолюминесцентных свойств, проведением теоретических расчетов, а также соответствием выводов современным представлениям о дефектообразовании при ионной имплантации и о

природе дислокационной люминесценции. Правильность результатов и обоснованность выводов подтверждались при апробации работы, а также отсутствием противоречий с результатами других исследований;

Модели и теория, представленные в диссертации, опираются на базовые физические принципы и подходы, учитывают основные свойства исследуемых систем и обладают внутренней непротиворечивостью;

Установлено согласие авторских результатов с данными, ранее представленными в литературе.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для использования в различных научно-образовательных и научно-исследовательских организациях, среди которых можно выделить ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва), ФГБУН Институт физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» (г. Казань), ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр РАН» (г. Казань), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики» (г. Санкт-Петербург), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва).

Личный вклад соискателя: Основные результаты, представленные в рассмотренной диссертационной работе, были получены автором лично, либо при непосредственном его участии. Постановка цели и задач диссертационного исследования, анализ и интерпретация полученных результатов выполнялись автором совместно с научным руководителем.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация Королева Д.С. соответствует паспорту научной специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы

на квантовых эффектах, и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую новые и оригинальные результаты, относящиеся к решению научной задачи по исследованию влияния исходных и имплантированных примесей на формирование и последующую модификацию центров дислокационной фотолюминесценции в самоимплантированном кремнии, и вносящую вклад в развитие микро- и нанoeлектроники. Диссертация Королева Д.С. отвечает соответствующему требованию пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

С учетом вышесказанного установлено, что диссертация Королева Д.С. соответствует всем критериям и требованиям Раздела II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013, № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

На заседании 12.12.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Королеву Д.С. ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 5 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 1 (один).

Председатель
диссертационного совета



Ученый секретарь
диссертационного совета


Чупрунов Евгений Владимирович


Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 12.12.2018 г.