

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 № 13

О присуждении Суродину Сергею Ивановичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Физико-химические особенности ионного синтеза систем с нанокристаллами GaN в матрицах Si, Si₃N₄ и SiO₂ для применения в оптоэлектронике» по специальности 05.27.01 (Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах) принята к защите 10 октября 2018 г., протокол № 6, диссертационным советом Д 212.166.01, 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 Суродин Сергей Иванович, 1991 года рождения, в 2014 году окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского», в 2018 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 01.10.2014 г. по 31.09.2018 г.), работает в должности инженера-технолога в филиале федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова».

Диссертация выполнена в Научно-исследовательском физико-техническом институте и Научно-образовательном центре «Физика твердотельных наноструктур» 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 – Николичев Дмитрий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики полупроводников и оптоэлектроники физического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Министерства науки и высшего образования.

Официальные оппоненты:

1. Турищев Сергей Юрьевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный университет», кафедра физики твёрдого тела и наноструктур, доцент,
2. Ануфриев Юрий Владимирович, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук», отдел разработок и исследований микро- и наносистем, старший научный сотрудник,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук» (ФГБУН «ИПТМ РАН», Московская обл., г. Черноголовка) – в своем положительном отзыве, составленном и подписанном Якимовым Евгением Борисовичем, доктором физико-математических наук, профессором, главным научным сотрудником лаборатории локальной диагностики полупроводниковых материалов, и утверждённом Рощупкиным Дмитрием Валентиновичем, доктором физико-математических наук, директором ФГБУН «ИПТМ РАН», отметила, что «актуальность работы, посвящённой исследованию особенностей распределения химического состава систем с нанокристаллами GaN, синтезированными в матрицах Si, Si₃N₄ и SiO₂ методом последовательной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺, не вызывает сомнений». Задача интеграции нитрида галлия с классической кремниевой технологией «имеет большое практическое значение, так как её решение открывает широкие возможности для развития оптоэлектроники на основе материалов классической микроэлектроники». «Результаты, выводы и основные положения, выносимые на защиту, в достаточной степени обоснованы, базируются на всестороннем анализе исследуемой проблемы и сравнении результатов с литературными данными по теме работы, подтверждены исследованиями с использованием нескольких апробированных методов и анализом большого объёма статистически значимых экспериментальных результатов». «Содержание диссертационного исследования изложено в логически последовательном стиле и имеет в целом чёткую и ясную форму. Диссертация оформлена в соответствии с действующими требованиями ВАК и соответствует специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах. Автореферат соответствует основному содержанию и выводам диссертации. Публикации соискателя в полной мере отражают наиболее значимые моменты проведённых исследований». «Полученный задел может быть использован при решении задач разработки и опытно-

конструкторской реализации на базе научно-производственных центров новых промышленных технологий изготовления фотоприемных устройств с целью создания на их основе оптоэлектронной компонентной базы широкого применения». В целом, ведущая организация охарактеризовала диссертацию Суродина Сергея Ивановича как законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком профессиональном уровне и соответствующую требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, и сделала заключение о том, что её автор «заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах».

Соискатель имеет 29 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них 7 работ опубликовано в рецензируемых научных изданиях из Перечня ВАК РФ, в том числе индексируемых международными библиографическими базами Web of Science и Scopus, 8 публикаций в сборниках трудов и материалов всероссийских и международных научных конференций и симпозиумов, и 2 учебно-методических пособия.

В данных публикациях в необходимой степени отражены основные результаты диссертационной работы: особенности распределения химических связей атомов в образцах на основе кремния и кремнийсовместимых диэлектрических материалов, полученных методом последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ и отжига; анализ эффективности используемых технологических решений с точки зрения синтеза фазы GaN; транспортные и оптические свойства полученных систем; результаты апробации используемого в работе алгоритма уточнения спектрального разложения на различных типах систем, включая образцы с ионно-синтезированными нанокристаллами GaN, рассматриваемые в диссертационной работе.

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

Основные публикации по теме диссертации:

1. Ion-beam synthesis of GaN in silicon / V.A. Sergeev, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, V.K. Vasiliev, A.E. Smirnov, D.E. Nikolitchev, **S.I. Surodin**, D.V. Guseinov, A.V. Nezhdanov, A.S. Markelov, V.N. Trushin, A.V. Pirogov, D.A. Pavlov and, D.I. Tetelbaum // Journal of Physics: Conference Series. – 2015. – 643. – P. 012082.
2. Layer-by-layer composition and structure of silicon subjected to combined gallium and nitrogen ion implantation for the ion synthesis of gallium nitride / D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, V.K. Vasiliev, D.V. Guseinov, E.V. Okulich, A.A. Shemukhin, **S.I. Surodin**, D.E. Nikolitchev, A.V. Nezhdanov, A.V. Pirogov, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50, № 2. – P. 271-275.
3. Distribution of species and Ga–N bonds in silicon co-implanted with gallium and nitrogen ions / **S.I. Surodin**, D.E. Nikolitchev, R.N. Kryukov, A.I. Belov, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, and D.I. Tetelbaum // AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1748. – 050005.
4. Effect of annealing on carrier transport properties of GaN-incorporated silicon / S. Rajamani, D. Korolev, A. Belov, **S. Surodin**, D. Nikolitchev, E. Okulich, A. Mikhaylov, D. Tetelbaum and M. Kumar // RSC Advances. – 2016. – 6. – P. 74691-74695.
5. Composition and luminescence of Si and SiO₂ layers co-implanted with Ga and N / D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, A.I. Belov, A.A. Konakov, V.K. Vasiliev, D.E. Nikolitchev, **S.I. Surodin** and D.I. Tetelbaum // International Journal of Nanotechnology. – 2017. – Vol. 14 (7-8). – P. 637-645.

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

На автореферат диссертации поступило 3 отзыва.

Все отзывы положительные:

1. Шашкин Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделом технологии наноструктур и приборов Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального

государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИФМ РАН), Дроздов Михаил Николаевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник ИФМ РАН, в своём отзыве на автореферат диссертации отмечают актуальность и практическую значимость диссертационного исследования Суролина Сергея Ивановича, направленного на «поиск новых технологических подходов для получения композитных полупроводниковых соединений из прямозонных и непрямозонных материалов с выраженными оптоэлектронными свойствами». Авторы отзыва считают, «что диссертационная работа С.И. Суролина выполнена на высоком научном уровне и соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.27.01, а её автор заслуживает присуждения ему искомой степени».

Отзыв Шашкина В.И. и Дроздова М.Н. содержит замечания:

- 1) Из текста автореферата осталась неясной специфика использования метода РФЭС с широким возбуждающим пучком для послойного анализа массива 3D нанокластеров, с размерами, значительно меньшими диаметра пучка. Кроме того, размер нанокластеров может быть меньше глубины выхода регистрируемых фотоэлектронов и неучет этого фактора может давать заниженное значение концентрации элементов в кластерах в сравнении с матрицей.
- 2) Рис.8 демонстрирует вольтамперные характеристики образца с нанокристаллами GaN, измеренные в темноте и при УФ излучении. Однако, матрица на основе кремния, также может обладать чувствительностью к УФ излучению. Сравнение фоточувствительности таких двух образцов осталось неясным из текста автореферата, что не позволяет однозначно связать эффект детектирования с кластерами GaN.

2. Калинушкин Виктор Петрович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией кристаллических лазеров среднего ИК-диапазона, отдел инфракрасной техники Института общей физики им.

А.М. Прохорова РАН, в своем отзыве отмечает, что «полученные результаты позволяют понять механизмы формирования нанокристаллов GaN в зависимости от последовательности и параметров процесса имплантации примесей, а также состава окружающей матрицы и условий отжига». «Эти данные важны как для лабораторий и институтов, проводящих фундаментальные исследования, так и для производственных предприятий, занимающихся разработкой приборов опто- и нанoeлектроники. Особенно интересным представляется изучение возможности подавления процесса аутидиффузии в системах, подвергнутых последовательной имплантации Ga^+ и N_2^+ , что может быть взято за основу дальнейшего совершенствования предложенной технологии». Отзыв Калинушкина В.П. содержит следующее замечание: «автор не представляет результатов исследования излучательных свойств рассматриваемых систем, хотя они имеют важное значение и напрямую связаны с продвижением этих систем в практическую область создания приборов».

3. Васильев Александр Леонидович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией электронной микроскопии Курчатовского комплекса НБИКС-технологий Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», в своем отзыве отмечает, что «автор решает ряд актуальных научных вопросов». «При этом им используется продвинутая методика количественного анализа спектральных данных метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС), разработка которой велась с непосредственным участием автора и содержит оригинальную часть». «Применительно к исследуемым системам, автору удалось с высокой степенью достоверности рассчитать профили распределения химических состояний имплантированных атомов и окружающей матрицы по глубине». «Полученные данные в полной мере характеризуют физико-химические процессы при ионном синтезе систем с нанокристаллами GaN в матрицах базовых материалов, совместимых с кремниевой технологией и, в частности, особенности аутидиффузии и химического взаимодействия атомов».

Отзыв Васильева А.Л. содержит замечания:

- 1) Не представлен механизм диффузии атомов галлия из образца с образованием летучих соединений на поверхности, по сути механизм выхода атомов с поверхности;
- 2) Не приводится оценка погрешности профилей распределения химического состава образцов по глубине.

В перечисленных отзывах указывается, что замечания и вопросы, возникшие у авторов отзывов при анализе автореферата диссертации, не влияют на положительную в целом оценку диссертации и не снижают её научной и практической ценности.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью в научном сообществе по вопросам твердотельной электроники и приборов на квантовых эффектах, наличием публикаций по теме диссертационного исследования, и способностью определить научную и практическую значимость рассматриваемой диссертации. Официальные оппоненты являются высококвалифицированными специалистами в области физики наноструктур и методов их исследования, в том числе электронной спектроскопии. Ведущая организация широко известна своей научной школой, высоким экспертным уровнем и обладает мировым признанием в области физики полупроводниковых наноструктур для применения в твердотельной электронике.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработаны:

1. Методика обнаружения химического соединения GaN в системах на основе Si и Si_3N_4 до 1 % с относительной погрешностью $\leq 10\%$.
2. Прототипы УФ-детекторов на основе структур с ионно-синтезированными нанокристаллами GaN.

Предложены:

1. Способ ионного синтеза нитрида галлия в матрице кремния.
2. Способ подавления процесса аутдиффузии имплантированных ионов галлия и азота в кремнии за счёт предварительного ионного синтеза слоя Si_3N_4 .

Доказано, что:

1. Отжиг систем на основе Si, подвергнутых последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ , приводит к образованию соединения GaN с концентрацией до 4 %.
2. Ионный синтез нитрида кремния в матрице Si, предшествующий двойной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ , подавляет аутдиффузию галлия и азота из образца и позволяет увеличить концентрацию кристаллического GaN до 10 %.
3. Структуры на основе объемного кремния с нанокристаллами GaN, синтезированными методом последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ и последующего отжига, проявляют чувствительность к УФ-излучению.
4. Алгоритм уточнения спектрального разложения фотоэлектронных линий позволяет достигать предела обнаружения химического соединения GaN в системах на основе Si и Si_3N_4 до 1 % с относительной погрешностью $\leq 10\%$.

Выявлено, что:

1. Последовательность имплантации $N_2^+ \rightarrow Ga^+$ в матрицу кремния позволяет обеспечить лучшее исходное перекрытие профилей примесей, чем обратная ($Ga^+ \rightarrow N_2^+$).
2. Ключевое влияние на эффективность ионного синтеза GaN в кремнии оказывает аутдиффузия имплантированных примесей, приводящая к частичному разделению профилей Ga и N.
3. Предварительная модификация матрицы кремния посредством дополнительной имплантации N_2^+ и высокотемпературного отжига существенно изменяет распределение имплантированных атомов и позволяет свести к минимуму их потери за счет аутдиффузии.
4. Низкая концентрация нанокристаллов GaN, синтезированных в матрице SiO_2 , связана с аутдиффузией атомов азота. Отжиг образцов в атмосфере N_2 не позволяет компенсировать потери имплантированных атомов.
5. Существенное влияние на химический состав плёнок SiO_2 , имплантированных ионами Ga^+ и N_2^+ , оказывает распределение вакансий кислорода.

Применительно к проблематике диссертации эффективно (с получением обладающих новизной результатов) **использован** комплекс существующих экспериментальных методов исследования химического состава, структуры, особенностей фазового состава и оптических свойств систем с нанокристаллами, в том числе: метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, метод просвечивающей электронной микроскопии, метод рентгеновской дифракции, метод электронографии, метод измерения фоточувствительности.

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

Проведенные экспериментальные исследования определяют особенности процесса ионного синтеза нанокристаллов нитрида галлия в материалах, совместимых с классической кремниевой технологией, а также технологические решения, способствующие повышению его эффективности. Они основаны на следующих принципах: 1) подавление процесса аутидиффузии имплантированных примесей из образцов; 2) обеспечение наилучшего перекрытия профилей внедренных примесей. **Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в том, что установленные физико-химические особенности синтеза нанокристаллов GaN в кремнии и кремнийсовместимых диэлектрических материалах необходимы для применения этих структур в микро- и оптоэлектронике при решении задач разработки и опытно-конструкторской реализации на базе научно-производственных центров новых промышленных технологий изготовления светоизлучающих и фотоприемных устройств.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

1. Экспериментальные данные диссертационной работы были получены с **использованием** современного научного оборудования и хорошо апробированных экспериментальных методов исследования.
2. **Установлено** качественное согласие результатов, полученных в диссертационной работе, с данными, представленными в независимых публикациях по данной тематике.

Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы для

использования в научных образовательных и исследовательских организациях, среди которых можно выделить следующие: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (г. Нижний Новгород), Институт прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород), Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (г. Москва), филиал ФГУП РФЯЦ ВНИИЭФ «Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова» (г. Нижний Новгород), Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук (г. Москва), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва), Институт физики микроструктур РАН – филиал «Федерального исследовательского центра Институт прикладной физики РАН» (г. Нижний Новгород), Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (г. Москва), Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук (Московская обл., г. Черноголовка).

Личный вклад соискателя является определяющим с точки зрения проведения измерений и анализа полученных результатов. В частности, автор работы самостоятельно определял направление исследований, лично проводил измерения образцов методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, а также обработку экспериментальных данных и анализ полученных результатов. Им усовершенствована методика количественного химического анализа многокомпонентных твердотельных систем по фотоэлектронным спектрам в части точного расчёта погрешности, который служит критерием оценки достоверности спектрального разложения.

Диссертационный совет отмечает, что диссертация Суродина С.И. соответствует паспорту научной специальности 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах, и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, содержащую новые результаты, относящиеся к решению научной задачи по разработке физических принципов и технологических основ создания и методов совершенствования изделий микро-

и наноэлектроники, и вносящую вклад в развитие твердотельной электроники и физики приборов на квантовых эффектах. Диссертация 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 Суродин С.И. соответствует всем критериям и требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, перечисленным в Разделе II Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842.

На заседании 12.12.2018 г. диссертационный совет принял решение присудить Суродину С.И. 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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах), участвовавших в заседании, из 23 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 17, против 0 (нет), недействительных бюллетеней 0 (нет).

Председатель
диссертационного совета



Ученый секретарь
диссертационного совета

Чупрунов Евгений Владимирович

Марычев Михаил Олегович

Дата оформления Заключения 12.12.2018 г.