

На правах рукописи



Сурудин Сергей Иванович

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИОННОГО
СИНТЕЗА СИСТЕМ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ GaN В
МАТРИЦАХ Si, Si₃N₄ И SiO₂ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В
ОПТОЭЛЕКТРОНИКЕ**

*Специальность 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах*

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2018 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского.

Научный руководитель:

Николичев Дмитрий Евгеньевич,
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики
полупроводников и оптоэлектроники
Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского.

Официальные оппоненты:

Турищев Сергей Юрьевич,
доктор физико-математических наук,
доцент кафедры физики твёрдого тела
и наноструктур Воронежского
государственного университета;

Ануфриев Юрий Владимирович,
кандидат технических наук, старший
научный сотрудник отдела разработок
и исследований микро- и наносистем
Института нанотехнологий
микроэлектроники Российской
академии наук.

Ведущая организация:

**ФГБУН «Институт проблем
технологии микроэлектроники и
особочистых материалов Российской
академии наук».**

Защита состоится «12» декабря 2018 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д212.166.01 в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, Конференц-зал (аудитория № 227).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/864>.

Автореферат разослан « » октября 2018 г.

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



Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Кремний на протяжении уже нескольких десятилетий является наиболее значимым материалом для промышленной электроники. Это обусловлено рядом обстоятельств: доступность исходного материала, его дешевизна и легкость очищения; возможность получения качественных слитков и пластин диаметром более 300 мм; простота получения областей нужного типа проводимости; высокое качество естественного оксида и интерфейса Si/SiO₂. Полупроводниковая промышленность на основе композитных полупроводников занимает значительно меньшую долю рынка электронных устройств, но, несмотря на этот факт, следует понимать, что её существование и развитие продиктовано особыми преимуществами данных материалов. Кремний, ввиду его непрямозонности, не может использоваться при изготовлении светоизлучающих устройств, тогда как оптоэлектронные приборы на основе прямозонных полупроводников, таких как GaAs и GaN, обладают эффективной фотоэмиссией, что определяет лидирующие позиции этих материалов на рынке телекоммуникаций и оптоэлектронных приборов.

В настоящее время большинство устройств на основе нитридов третьей группы изготавливаются на подложках, которые представляют собой эпитаксиальный слой GaN на сапфире. Большие перспективы с экономической точки зрения имеет подход, основанный на получении слоев GaN на подложках Si, но из-за большого несоответствия решеток и большой разницы в коэффициентах термического расширения прямой рост и изготовление оптоэлектронных структур и устройств на подложках Si неосуществимы.

Проблема интеграции фотонных устройств с электронными на основе Si уже давно привлекает внимание ученых, что иллюстрируется множеством работ [см., например, 1-3]. Для её преодоления было разработано множество различных технологических подходов. В первой главе диссертации приведен краткий обзор наиболее значимых результатов в решении данной проблемы.

Общим недостатком существующих технологий получения эпитаксиальных пленок GaN на Si является их сложность. В качестве возможной альтернативы предлагается синтез GaN в виде нанокристаллизованных включений в матрицах материалов, совместимых с кремниевой технологией. Данный подход соответствует общей идеологии интеграции технологии GaN с классической кремниевой и выглядит весьма привлекательно с точки зрения технологических возможностей его реализации.

В течение многих десятилетий интерес к наноструктурам (НС) в общем и нанокристаллам (НК) в частности обусловлен их уникальными физическими свойствами. Зависимость ширины запрещенной зоны от их размера, люминесцентные свойства, пространственное и энергетическое ограничение свободных носителей делает НК перспективными для применения в солнечных

элементах с широким спектральным диапазоном, элементах памяти и в качестве сред для оптического усиления излучения. Кроме того, НК могут рассеивать акустические фононы, тем самым позволяя управлять средней длиной свободного пробега фононов и, соответственно, теплопроводностью.

Одним из наиболее универсальных методов получения композитных полупроводниковых кристаллов является высокочастотная последовательная ионная имплантация атомов, входящих в состав синтезируемого материала, с последующим отжигом, который сопровождается выделением нанокристаллов из пересыщенного твердого раствора [4,5]. Эта технология является чрезвычайно привлекательной для приборных применений, поскольку позволяет получить определенную концентрацию нанокристаллов в слоях различных материалов на предварительно рассчитанной глубине и совместима с классической кремниевой технологией.

К началу выполнения данной работы в литературе был известен ряд публикаций [6-8], рассматриваемых в Главе 1, в которых сообщается о результатах исследования оптических и структурных свойств слоев, полученных при двойной имплантации в SiO_2 и Al_2O_3 ионов Ga^+ и N^+ с последующим отжигом. В частности, показано, что после имплантации N^+ в образцы, облученные Ga^+ , и их отжига при $900\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 1 часа в атмосфере NH_3 образуются наночастицы оксидов и нитрида галлия.

В диссертационной работе рассмотрены физико-химические особенности распределения атомного состава и химических связей атомов по глубине образцов на основе Si , Si_3N_4 и SiO_2 , подвергнутых двойной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ с последующим отжигом в атмосфере N_2 .

При исследовании ионно-синтезированных систем и оценке эффективности технологических решений решались задачи анализа химического и фазового состава образцов. Большинство из них были успешно решены с применением «классических» для нанотехнологии аналитических методов, которые на сегодняшний день вышли на высокий уровень технической реализации: рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия (РФЭС), просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ), рентгеновская энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС), дифракционные методы, спектроскопия комбинационного рассеяния света (КРС) и другие. Однако ключевой вопрос о количественном распределении химических связей атомов в структурах был разрешен благодаря применению уникальной методики количественного химического анализа образцов композиционных многофазных систем по фотоэлектронным спектрам – алгоритма уточнения спектрального разложения.

В работе помимо фундаментальных основ ионного синтеза НК GaN в матрицах, совместимых с кремнием, затронуты прикладные аспекты данного направления исследований, созданы и исследованы прототипы УФ-детекторов.

Цель и задачи работы

Целью настоящей работы является исследование распределения химического состава систем на основе Si, Si₃N₄ и SiO₂ с ионно-синтезированными нанокристаллами GaN.

Основные задачи работы:

1. Разработка методики количественного химического анализа для систем с ионно-синтезированными нанокристаллами GaN с заданной погрешностью.
2. Исследование влияния условий отжига на структуру, химический и фазовый состав систем на основе Si, SiO₂, Si₃N₄, подвергнутых двухстадийной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺.
3. Исследование влияния предварительной модификации матриц Si и SiO₂ при имплантации ионов N₂⁺ на распределение химического состава систем после двухстадийной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ с последующим отжигом в атмосфере N₂.
4. Анализ основных характеристик созданных приборных структур на основе Si, SiO₂, Si₃N₄.

Научная новизна работы

1. На основе самосогласованной методики химического анализа многокомпонентных твердотельных наносистем по фотоэлектронным спектрам разработан алгоритм, позволяющий определять концентрации химических соединений с относительной погрешностью, не превышающей заданного значения, и имеющий количественный критерий оценки достоверности спектрального разложения.
2. С применением алгоритма уточнения спектрального разложения впервые получены профили распределения концентрации химических соединений по глубине в системах на основе Si, SiO₂ и Si₃N₄, подвергнутых двойной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ с последующим отжигом в атмосфере N₂.
3. Впервые показана возможность синтеза НК GaN в Si посредством имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ и отжига в атмосфере N₂.
4. Экспериментально показана эффективность предварительного ионного синтеза нитрида кремния в матрице Si для увеличения концентрации НК GaN, полученных путем двойной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ и отжига.
5. Впервые созданы прототипы детекторов УФ-излучения нового поколения на основе кремния с ионно-синтезированными нанокристаллами GaN и измерены их приборные характеристики.

Методология, теоретическая и практическая значимость работы

В работе представлена усовершенствованная методика самосогласованного количественного анализа химического состава по фотоэлектронным спектрам (алгоритм уточнения спектрального разложения), которая позволяет проводить анализ с заданной точностью и достигать предела обнаружения химических соединений до 1 ат.%. Алгоритм уточнения спектрального разложения имеет количественный критерий объективности полученного результата, он универсален и применим для других спектрометрических методов (например, электронной оже-спектроскопии), когда математическая обработка включает в себя аппроксимацию спектральных данных математическими функциями.

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 с целью создания на их основе оптоэлектронной компонентной базы, применимой в ядерной энергетике, космической технике, а также гражданского назначения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Отжиг систем на основе Si, подвергнутых последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ , приводит к образованию соединения GaN с концентрацией до 4 ат.%.
2. Ионный синтез нитрида кремния в матрице Si, предшествующий двойной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ , подавляет аутидиффузию галлия и азота из образца и позволяет увеличить концентрацию кристаллического GaN до 10 ат.%.
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 ат.% с относительной погрешностью $\leq 10\%$.

Достоверность результатов

Достоверность результатов экспериментальной части работы была обеспечена благодаря применению в рамках исследования уникальной апробированной методики самосогласованного количественного анализа химических состояний атомов на основе метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с последующей оценкой статистической значимости результатов

на рабочих структурах, а также использованию комплекса взаимодополняющих методов исследований (высокоразрешающей просвечивающей электронной микроскопии, малоугловой рентгеновской дифракции, оптических и электрофизических измерений).

Апробация работы

Результаты работы докладывались на XVIII Российском симпозиуме по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твердых тел «РЭМ-2013» (Россия, г. Черноголовка, 3-7 июня, 2013), XV Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Россия, г. Санкт-Петербург, 25-29 ноября, 2013), Всероссийской конференции и школе молодых ученых и специалистов «Физические и физико-химические основы ионной имплантации» (Россия, г. Нижний Новгород, 2014, 2016), 1st International School and Conference «Saint-Petersburg OPEN 2014» on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures (Saint-Petersburg, Russia, March 25-27, 2014), XXV Российской конференции по электронной микроскопии «РКЭМ-2014» (Россия, г. Черноголовка, 2-6 июня, 2014), Третьей школе молодых ученых по физике наноструктурированных и кристаллических материалов (Россия, г. Нижний Новгород, 15-17 мая, 2014), XX Нижегородской сессии молодых ученых (естественные, математические науки) (Россия, Нижегородская обл., Арзамасский р-он, 19-22 мая 2015), 18th International Conference on Radiation Effects in Insulators «REI-18» (Jaipur, Rajasthan, India, October 26-31, 2015), Международных симпозиумах «Нанопизика и наноэлектроника» (Россия, г. Нижний Новгород, 2016, 2017), V International Scientific Conference State-of-the-art Trends of Scientific Research of Artifical and Natural Nanoobjects «STRANN-2016» (Saint Petersburg, Russia, 26-29 April, 2016), E-MRS 2016 Spring Meeting (France, Lille, May 02-06, 2016), VII ежегодной конференции Нанотехнологического общества России (Россия, г. Москва, 2 марта, 2016).

Автор выполнял работу по теме диссертации, будучи ответственным исполнителем проектов: «Развитие аналитических методов электронной спектроскопии и микроскопии для исследования систем спинтроники» (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, мероприятие 1.2.2, проект 2012-1.2.2-12-000-1003-013, 2012-2013 г.), руководитель Николичев Д.Е.; «Исследование ионно-лучевого синтеза и свойств систем на основе нанокристаллов нитрида галлия, внедренных в кремний-совместимые матрицы, для применений в фотодетекторах и источниках излучения нового поколения» (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы», мероприятие 2.1, проект 2014-14-585-0001-3, уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI58414X0008, Соглашение о предоставлении субсидии № 14.584.21.0008, 2014-2016 гг.), руководитель Тетельбаум Д.И.

Публикации

Всего по теме диссертации опубликовано 17 научных и учебно-методических работ, включая 2 учебно-методических пособия, 7 статей в ведущих научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 8 публикаций в сборниках трудов и тезисах докладов российских и международных научных конференций.

Личный вклад автора

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 расчета погрешности, который служит критерием оценки достоверности спектрального разложения.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4-х глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 157 страниц, включая 61 рисунок. Список цитируемой литературы включает 175 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель и поставлены задачи работы, показана новизна и практическая значимость, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации работы и публикациях автора по теме диссертации.

В **первой главе** диссертации произведён анализ и обобщение литературных данных, касающихся исследований совместимости и интеграции структур и материалов на основе GaN с классической кремниевой технологией. В частности, обсуждаются некоторые технологические подходы к созданию качественных эпитаксиальных пленок GaN на Si и их основные свойства, а также сделан обзор актуальных работ, посвящённых созданию низкоразмерных структур на основе GaN (квантовых нитей, квантовых точек). Помимо этого, рассматривается альтернативный подход, способный обеспечить интеграцию устройств на основе Si и GaN – ионный синтез GaN, в виде нанокристаллов в матрицах кремнийсовместимых диэлектрических материалов. Известно [9-11], что нанокристаллы GaN могут быть синтезированы в SiO₂ и Al₂O₃ методом двухстадийной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ и последующего отжига. Данный факт инициировал обширные

исследования физико-химических особенностей ионно-лучевого синтеза подобного рода структур и разработки в области их практического применения.

Во **второй главе** приведено описание методики формирования образцов систем на основе объемного Si, пленок термического SiO₂ и пленок плазмохимического Si₃N₄, подвергнутых двухстадийной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ и последующему отжигу. При выборе оптимальных параметров последовательных операций имплантации ионов галлия и азота основным является условие наилучшего перекрытия профилей распределения примесей по глубине. Особенностью применяемой в работе методики является использование в качестве атмосферы отжига молекулярного азота, тогда как в известных работах термообработка проводилась в среде аммиака.

В главе приводится описание методов, использованных в работе для обеспечения комплексного подхода и подтверждения достоверности результатов. Так как метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии является основным в проведенном исследовании, то его физические основы, особенности аппаратной реализации, а также аспекты, связанные с послойным профилированием и анализом фотоэлектронных спектров, изложены подробно.

Главным аспектом интерпретации фотоэлектронных спектров является анализ химических сдвигов характеристичных линий, так как он позволяет получать информацию о химических связях между атомами в составе вещества. Задача химического анализа сводится к разложению фотоэлектронных линий на спектральные составляющие, отвечающие определенному химическому состоянию атомов и описываемые суперпозицией функций Гаусса и Лоренца.

Задача количественного определения химического состава из фотоэлектронных спектров многокомпонентных систем слишком сложна и имеет множество решений, достоверность которых не может быть доказана аналитическими инструментами самого метода РФЭС без привлечения дополнительных методов исследований.

Очевидно, с уменьшением ширины линии возбуждающего ХРИ улучшается спектральное разрешение и, следовательно, повышается точность решения поставленной задачи. Но на практике, наиболее распространенными источниками ХРИ для метода РФЭС являются рентгеновские пушки с алюминиевым или магниевым анодом без дополнительной монохроматизации. В этом случае некорректно ограничиваться только качественным анализом составляющих спектральных линий, как это делается в подавляющем большинстве работ. Более того, в случае анализа многофазных композиций это может привести к абсурдным результатам и правомерным вопросам о достоверности разложения фотоэлектронных линий.

В **третьей главе** описывается метод, который позволяет проводить самосогласованный количественный анализ химических состояний атомов по фотоэлектронным спектрам. Идея, положенная в его основу, была изложена в работах [12,13]. Обобщенная автором в ходе апробации

и дополненная в части расчета погрешности версия данного метода анализа спектральных данных получила название алгоритм уточнения спектрального разложения. Показано, что возможность точного расчёта погрешности позволяет добиться заданного уровня точности химического анализа, а также определяет критерий объективности результатов спектрального синтеза.

Алгоритм уточнения спектрального разложения основан на сопоставлении интенсивностей гауссиан (здесь и далее суперпозиция функций Гаусса и Лоренца, встроенные в ФЭ-линию, будет называться "гауссианой", т.к. вклад лоренцианы обычно $< 10\%$), соответствующих конкретному химическому соединению, в составе тех фотоэлектронных линий, в которых оно наблюдается, с учетом ФОЧ и стехиометрии соединения.

Для трехкомпонентной системы, состоящей из элементов A , B и C , в общем случае химический состав образца представлен набором соединений типа $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$, где a_i , b_i и c_i стехиометрические коэффициенты, сумма которых равна 1. Для каждого соединения $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$ должно выполняться равенство:

$$\frac{1}{a_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{S_A} = \frac{1}{b_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^B}{S_B} = \frac{1}{c_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^C}{S_C}, \quad (1)$$

где $I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A$ – интенсивность гауссианы, отвечающей соединению $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$, в составе фотоэлектронной линии элемента A , S_A – фактор относительной чувствительности элемента A .

Если количество идентифицированных соединений равно n , то можно записать систему из уравнений (1) для каждого соединения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{a_1} \cdot \frac{I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^A}{S_A} = \frac{1}{b_1} \cdot \frac{I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^B}{S_B} = \frac{1}{c_1} \cdot \frac{I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^C}{S_C} \\ \dots \\ \frac{1}{a_n} \cdot \frac{I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^A}{S_A} = \frac{1}{b_n} \cdot \frac{I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^B}{S_B} = \frac{1}{c_n} \cdot \frac{I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^C}{S_C} \end{array} \right., \quad (2)$$

где n количество идентифицированных соединений.

Система уравнений (2) позволяет сбалансировать относительные интенсивности гауссиан, определенных по ФЭ-линиям разных элементов, для каждого химического соединения.

Вследствие требования равенства суммы площадей встроенных гауссиан и интегральной интенсивности соответствующей фотоэлектронной линии, систему уравнений (2) необходимо решать совместно с системой:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^A + I_{A_{a2}B_{b2}C_{c2}}^A + \dots + I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^A = I^A \\ I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^B + I_{A_{a2}B_{b2}C_{c2}}^B + \dots + I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^B = I^B \\ I_{A_{a1}B_{b1}C_{c1}}^C + I_{A_{a2}B_{b2}C_{c2}}^C + \dots + I_{A_{an}B_{bn}C_{cn}}^C = I^C \end{array} \right., \quad (3)$$

где I^A – интегральная интенсивность анализируемой ФЭ-линии элемента A .

Концентрация атомов $N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci})$ элемента A , отвечающих химическому соединению $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$, определяется, как произведение полной концентрации атомов данного элемента $N(A)$ на долю соответствующей гауссианы в разложении фотоэлектронной линии:

$$N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci}) = \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{I^A} \cdot N(A). \quad (4)$$

Сумма концентраций атомов всех элементов в составе конкретного химического соединения позволяет определить его содержание:

$$\frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{I^A} \cdot N(A) + \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^B}{I^B} \cdot N(B) + \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^C}{I^C} \cdot N(C) = N(A_{ai}B_{bi}C_{ci}), \quad (5)$$

где $N(A_{ai}B_{bi}C_{ci})$ – концентрация соединения $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$. Величины $N(A)$, $N(B)$ и $N(C)$ определяются в ходе количественного анализа атомного состава исследуемого слоя методом ФОЧ.

Выполнение соотношений систем (2) и (3) возможно лишь с некоторым приближением, которое в конечном итоге определяет погрешность количественного химического анализа. На практике применяется итерационный процесс последовательного уточнения параметров встраиваемых функций в пределах их допустимых вариаций: диапазон изменения положения пика по энергии и его ширина на полувысоте составляет $\pm 0,2$ эВ. Критерием для окончания вариаций параметров встроенных функций является значение погрешности на очередном шаге итерации.

Метод точного расчёта погрешности алгоритма уточнения спектрального разложения был впервые предложен в данной работе. Погрешность определения концентрации атомов элемента A , отвечающих химическому соединению $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$, определяется как:

$$\Delta N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A} \cdot N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci}) \right)^2 + \left(\frac{\Delta I^A}{I^A} \cdot N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci}) \right)^2 + \left(\frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{I^A} \cdot \Delta N(A) \right)^2}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в соотношении (6) определяется величиной $\Delta I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A$. Ее можно оценить, используя соотношение (1):

$$\Delta I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A = \left(I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A - I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^{med} \cdot a_i \cdot S_A \right), \quad (7)$$

где $I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^{med}$ – среднее значение нормированной (с учетом факторов относительной чувствительности для элементов) интенсивности гауссиан химического соединения $A_{ai}B_{bi}C_{ci}$ в составе ФЭ-линий элементов A , B и C , которое определяется соотношением:

$$I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^{med} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{a_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^A}{S_A} + \frac{1}{b_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^B}{S_B} + \frac{1}{c_i} \cdot \frac{I_{A_{ai}B_{bi}C_{ci}}^C}{S_C} \right). \quad (8)$$

Величина ΔI^A во втором слагаемом соотношения (7) определяется, как разница площадей под характеристичной линией элемента A в спектре и суммарной площадью гауссиан, которыми она описана. Третье слагаемое в (7) определяется величиной $\Delta N(A)$. Она представляет собой погрешность количественного анализа атомного состава методом факторов относительной чувствительности. В нашем случае, при использовании эталонных образцов для уточнения факторов, значение $\Delta N(A)$ не превышает 1 ат. %.

Эмпирически установлено, что в случае, когда значение $N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci})$ превышает 1 ат. %, относительная погрешность данной величины составляет менее 10 % и быстро сокращается с ростом $N_A(A_{ai}B_{bi}C_{ci})$.

Помимо того, что точный расчет погрешности является критерием окончания вариаций параметров встроенных функций Гаусса и достоверности разложения, он позволяет достигать установленной точности результатов (в пределах погрешности аналитического оборудования для метода РФЭС). При условии, что исходные значения химических сдвигов, а также параметры встраиваемых функций известны, задача количественного химического анализа может быть решена с хорошей точностью небольшим (обычно 2 – 3) количеством итераций.

Апробация алгоритма уточнения спектрального разложения проводилась на более чем 50 образцах различных твердотельных систем [см., например, 14,15,A3,A8,A11], что обуславливает его правильность как метрологическую характеристику.

Четвертая глава посвящена анализу химического состава систем на основе Si, Si₃N₄ и SiO₂, подвергнутых совместной имплантации ионов Ga⁺ и N₂⁺ и последующему отжигу в атмосфере N₂.

При совместной имплантации больших доз Ga⁺ и N₂⁺ в кремний ещё до отжига происходит некоторое перераспределение примесей вследствие радиационно-ускоренной диффузии. Ускорение диффузии, связанное с генерацией радиационных дефектов, происходит в основном при внедрении более тяжелых ионов Ga⁺. Последовательность имплантации N₂⁺ → Ga⁺ позволяет обеспечить лучшее исходное перекрытие профилей примесей, имплантированных в матрицу Si, так как при такой последовательности имплантация Ga⁺ осуществляется в матрицу, модифицированную предшествующей имплантацией N₂⁺. Химический анализ характеристичных линий фотоэлектронных спектров на основе алгоритма уточнения спектрального разложения показывает, что азот образует соединения с кремнием (рис. 1а), а большая часть атомов галлия находится в образце в виде твердого раствора внедрения (рис. 1б), что объясняет его высокую скорость диффузии.

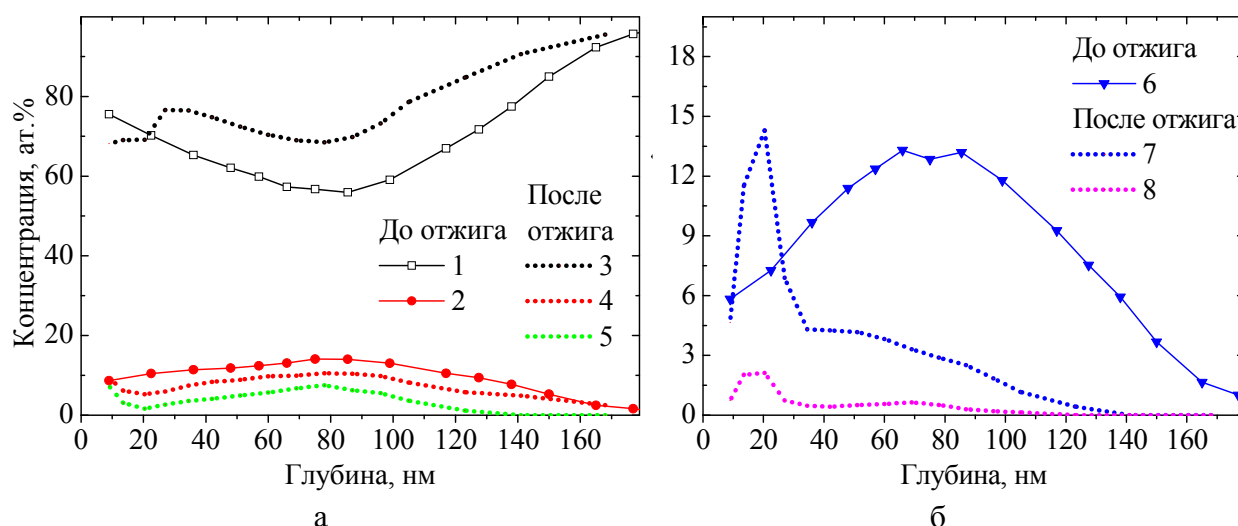


Рис. 1. Профили распределения Si (а) и Ga (б), находящихся в различных химических состояниях, по глубине образцов Si, подвергнутых последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ : 1, 3 – Si в Si^0 ; 2, 4 – Si в SiN_x ($x < 1,3$); 5 – Si в Si_3N_4 ; 6, 7 – Ga в Ga^0 ; 8 – Ga в GaN .

При отжиге (900°C , 30 мин) происходит аутидиффузия (диффузия к поверхности и выход из образца) имплантированных атомов Ga, приводящая к частичному разделению профилей Ga и N. По результатам структурных исследований имплантированных образцов объемного кремния установлено образование включений, обогащенных галлием. Кристаллической фазы GaN не выявлено. По данным метода РФЭС азот преимущественно связан с кремнием (рис. 1 а), большая часть атомов галлия образуют связи между собой (рис. 1 б), а концентрация атомов галлия, связанных с азотом, достигает 2 ат.%. Формирование химических связей в имплантированном слое кремния и распределение связанных состояний примесей определяется суммарным влиянием нескольких факторов: энергиями связи, диффузией в поле механических напряжений, взаимодействием примесей с радиационными дефектами.

Полученные результаты позволили выявить главную проблему ионного синтеза нанокристаллов GaN в кремнии – аутидиффузию имплантированных атомов галлия при отжиге. Данный эффект не позволяет обеспечить высокую слоевую концентрацию примесных атомов, что наряду с низкой реакционной способностью атомов Ga и N между собой приводит к невысокой эффективности процесса синтеза фазы GaN в кремнии.

Основываясь на том, что нитрид кремния характеризуется более низким коэффициентом диффузии примесей, чем кремний, была предложена идея создания в кремниевой подложке слоя нитрида кремния путем дополнительной ионной имплантации N_2^+ , предшествующей основной двухстадийной имплантации Ga^+ и N_2^+ , с последующим высокотемпературным отжигом. Данный метод органично сочетается с рассматриваемым подходом ионного синтеза нанокристаллов GaN, а также дает возможность создавать барьерный слой, обладающий нужными параметрами и составом. В первом образце (рис. 2 а) предварительная имплантация проводилась при той же

энергии ионов N_2^+ , что и при основной имплантации. Это значит, что барьерный Si_3N_4 формировался по всей толщине слоя, в котором распределяются ионы Ga^+ и N_2^+ при основной имплантации. Во втором образце (рис. 2 б) предварительная имплантация проводилась при энергии ионов N_2^+ в два раза ниже, чем при основной имплантации, поэтому барьерный Si_3N_4 формировался только в приповерхностной области. Дозы были подобраны таким образом, чтобы обеспечить в имплантированном слое концентрацию азота, достаточную для образования стехиометрического Si_3N_4 .

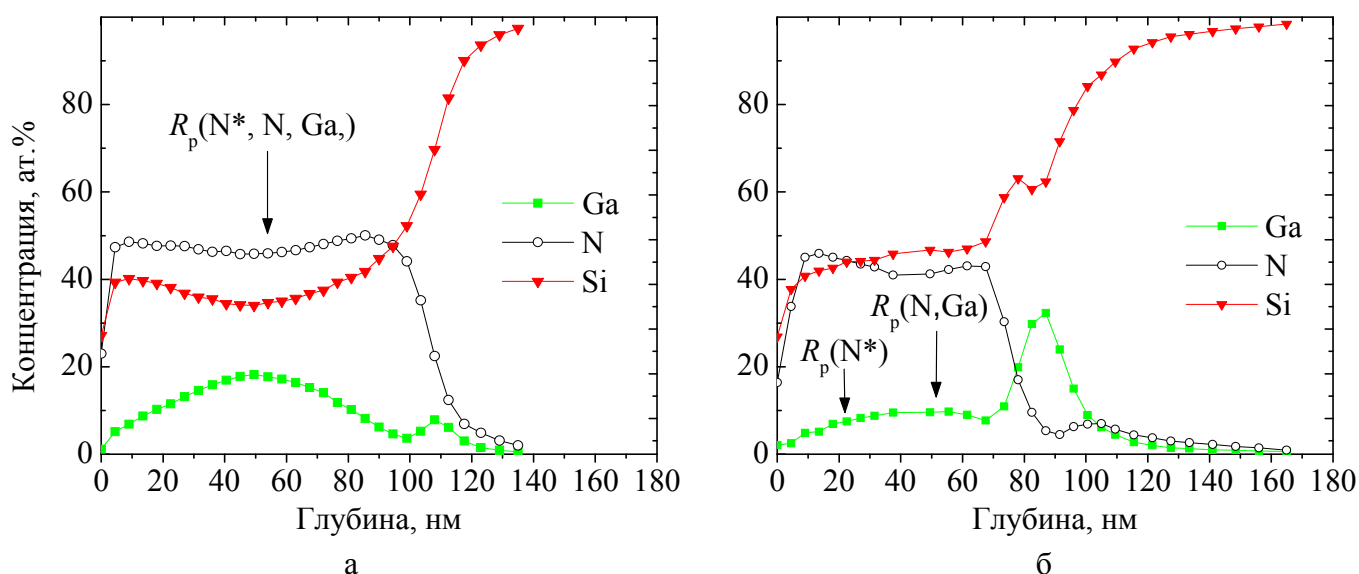


Рис. 2. Профили распределения элементов по глубине образцов Si с ионно-синтезированным слоем SiN_x , подвергнутых последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ : а) $h > R_p$; б) $h < R_p$.

Интегрирование профилей распределения Ga для обоих образцов позволило установить, что потери Ga за счет аутдиффузии невелики. Когда толщина h слоя Si_3N_4 превышает пробеги основной части ионов галлия (рис. 2 а), то есть $h > R_p$, где R_p – средний проецированный пробег Ga^+ , ослабляющее аутдиффузию влияние слоя Si_3N_4 проявляется непосредственно: значительного перераспределения атомов Ga при отжиге не происходит за счет низкой скорости диффузии. Когда же слой Si_3N_4 формируется на меньших глубинах $h < R_p$ (рис. 2 б), он служит эффективным барьером для выхода галлия из образца. При этом в слоях, находящихся глубже барьерного, Ga перераспределится весьма значительно: подавляющее большинство имплантированных атомов смещаются в области спада концентрации азота, то есть за пределы нитридного слоя. Полученные профили, по всей видимости, являются результатом действия поля упругих напряжений, создаваемых слоем Si_3N_4 .

Анализ химических связей атомов по ФЭ спектрам совместно с алгоритмом уточнения спектрального разложения позволили рассчитать профили распределения по глубине элементов, находящихся в различных химических состояниях (рис. 3). Подавляющее количество атомов Si связаны с N в виде стехиометрического Si_3N_4 (рис. 3 а,в). Большая часть атомов Ga (~ 86%)

находится в состоянии металлического галлия (рис. 3 б,г), а концентрация атомов галлия, связанных с азотом, достигает 5 ат.%.

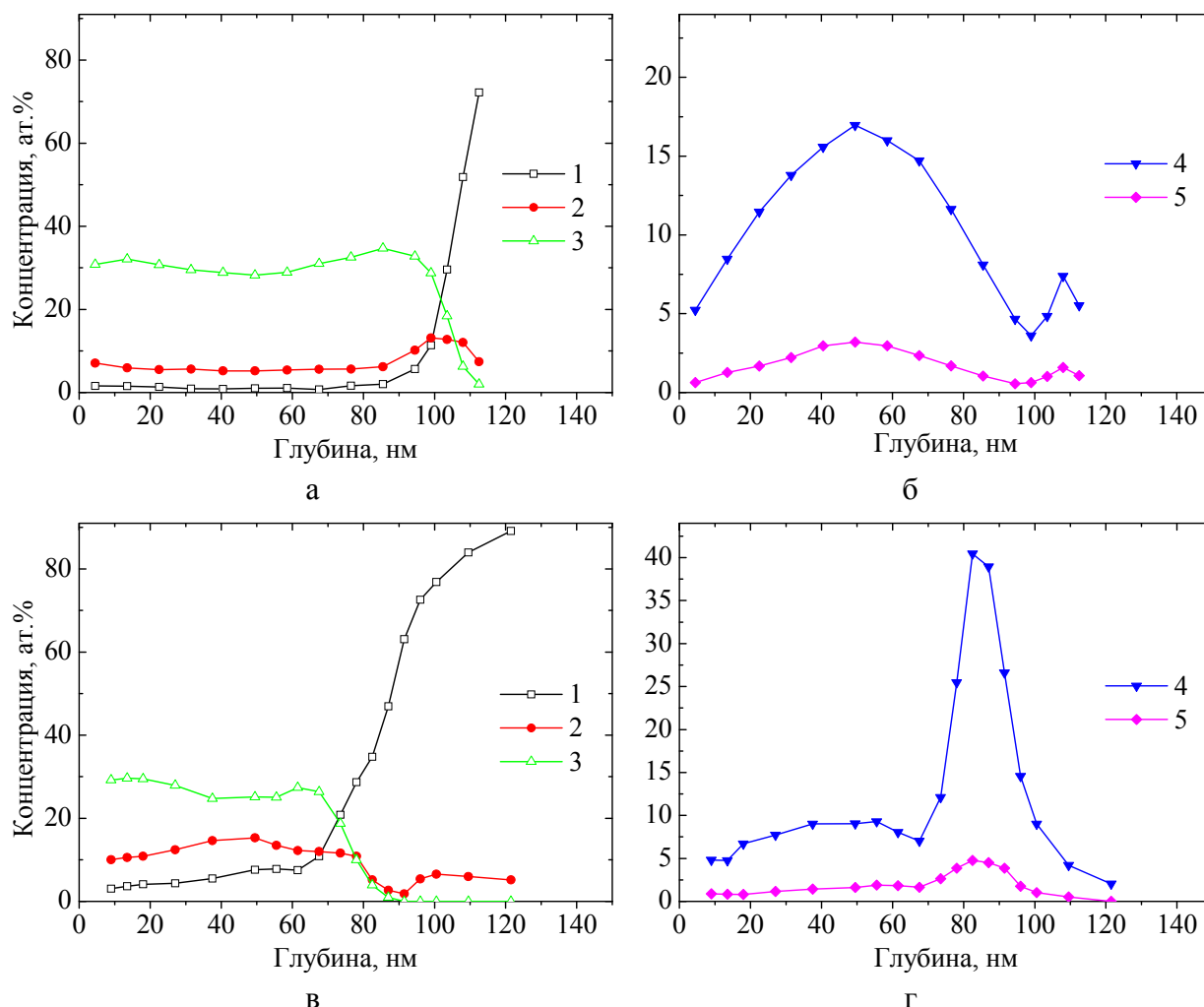


Рис. 3. Профили распределения элементов, находящихся в различных химических состояниях, по глубине образцов Si с ионно-синтезированным слоем SiN_x , подвергнутых последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ : а, в) 1 – Si в Si^0 ; 2 – Si в SiN_x ($x < 1,3$); 3 – Si в Si_3N_4 ; б, г) 4 – Ga в Ga^0 ; 5 – Ga в GaN.

Результаты рентгеновской дифракции показали наличие дифракционных максимумов, соответствующих гексагональной фазе нитрида галлия, для обоих типов образцов с ионно-синтезированным слоем SiN_x , что указывает на образование нанокристаллов GaN.

В главе также приводятся результаты исследования физико-химических особенностей ионного синтеза нанокристаллов GaN в плёнках SiO_2 , подвергнутых последовательной имплантации Ga^+ и N_2^+ и отжигу при 900°C в атмосфере N_2 .

Из профилей распределения химического состава образца (рис. 4) установлено, что, хотя в ходе отжига галлий существенно перераспределяется по толщине пленки, его интегральная концентрация соответствует дозе имплантированной примеси. В то же время концентрация азота в пленке не превышает 2 ат.%, что говорит о его сильной аутидиффузии. Так как энергия связи N с Si

меньше, чем энергия связи О с Si, то с термодинамической точки зрения атомам азота энергетически не выгодно встраиваться в матрицу диоксида кремния. С другой стороны, низкая скорость реакции азота с галлием приводит к тому, что лишь небольшое количество атомов успевают образовать химические связи. Непрореагировавшие атомы азота быстро диффундируют к поверхности и испаряются.

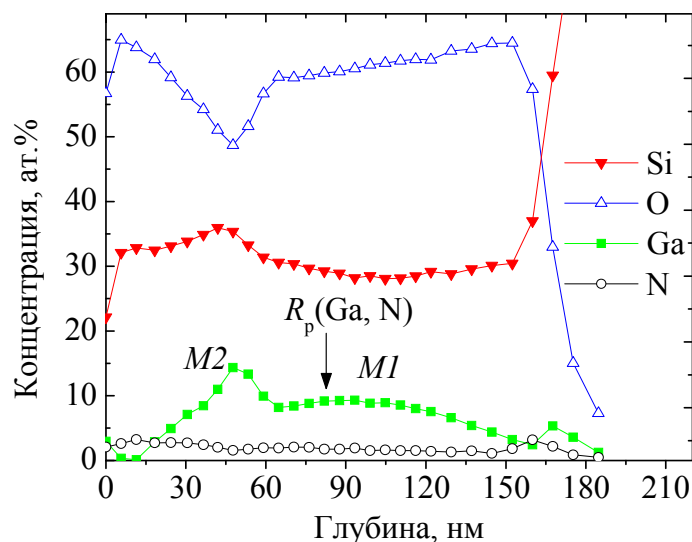


Рис. 4. Профили распределения элементов по глубине пленки SiO_2 , подвергнутой последовательной имплантации Ga^+ и N_2^+ и отжигу при 900°C в атмосфере N_2 . М1 и М2 – области основного и дополнительного максимумов, соответственно.

В результате последовательной имплантации ионов Ga^+ и N_2^+ и отжига вблизи поверхности формируется область повышенной концентрации кислородных вакансий (рис. 4), наличие которых компенсируется за счет атомов Ga. На рис. 5 приведены результаты разложения фотоэлектронных линий $\text{Ga } 2p_{3/2}$, записанных при анализе состава образца О32 в областях дополнительного (а) и основного максимумов Ga (б). Анализ химических сдвигов компонентов разложения позволил установить, что в области дополнительного максимума (совпадает с максимумом вакансий кислорода) подавляющее большинство атомов галлия находится в состоянии металлического Ga. Идентифицирована также компонента, имеющая малую интенсивность и отвечающая Ga_2O_3 , и неразрешенный пик Ga в состоянии Ga_2O , GaN и GaO_xN_y . В области основного максимума большая часть атомов галлия окисляется, а остальные находятся в состоянии металлического Ga, а также, GaN и GaO_xN_y .

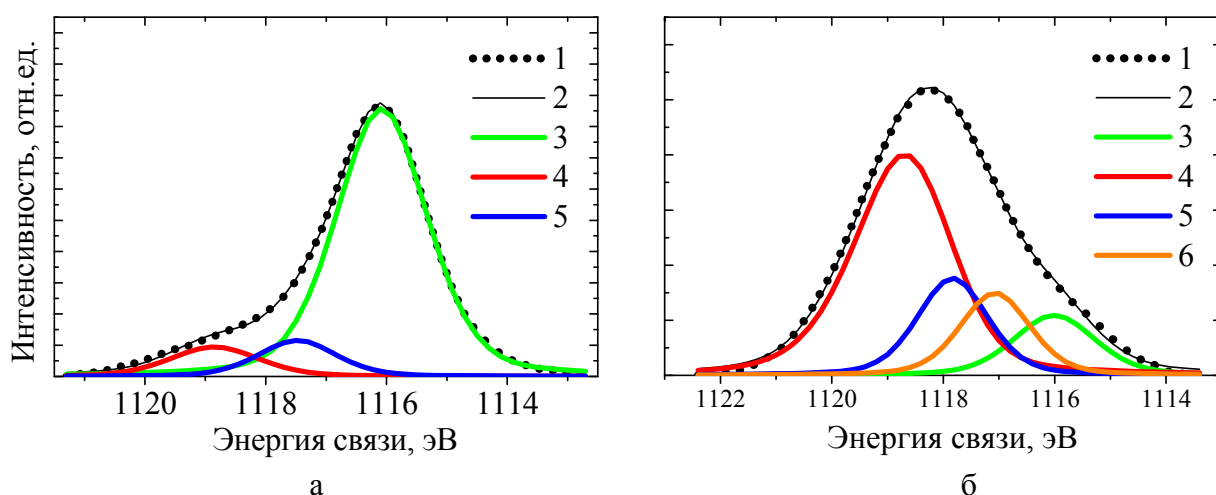


Рис. 5. Разложение фотоэлектронных линий Ga $2p_{3/2}$, записанных при анализе состава пленки SiO₂, подвергнутой последовательной имплантации Ga⁺ и N₂⁺ и отжигу в области основного (а) и дополнительного (б) максимумов: 1 – экспериментальный спектр; 2 – суммарная огибающая; 3 – Ga в состоянии металлического Ga⁰; 4 – Ga в состоянии Ga₂O₃; 5 – неразрешенный пик Ga в состоянии Ga₂O, GaN и GaO_xN_y; 6 – Ga в состоянии GaO_x, $x < 0,5$.

Наиболее достоверное свидетельство наличия включений GaN в SiO₂ было получено из данных просвечивающей электронной микроскопии. На снимке (рис. 6) исследуемого образца на фоне аморфной матрицы SiO₂ видно большое число областей темного контраста, которые связаны с z -контрастом обогащенных галлием участков. Для нескольких указанных участков z -контраста было выполнено Фурье-преобразование (вставка на рис. 6), расшифровка которых позволила однозначно определить наличие включений гексагональной фазы GaN.

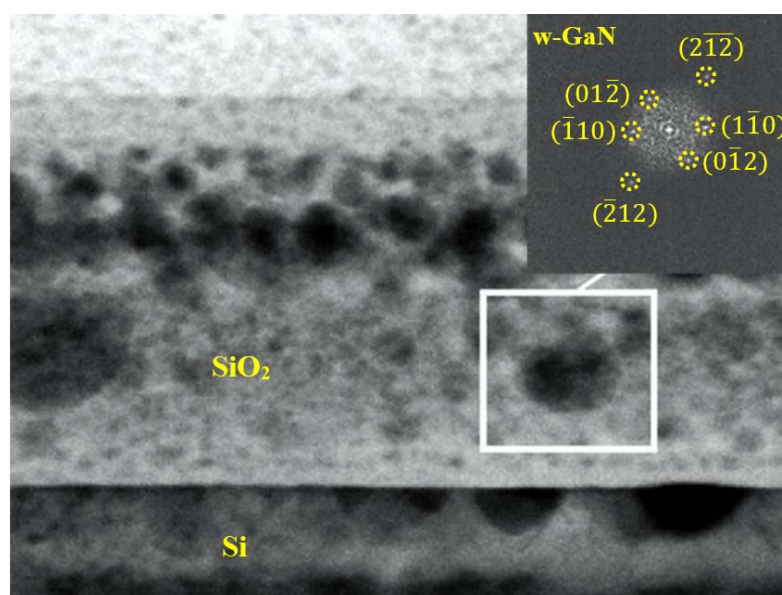


Рис. 6. ПЭМ-снимок пленки SiO₂, подвергнутой последовательной имплантации Ga⁺ и N₂⁺ и отжигу. На вставке приведена картина Фурье-преобразования, полученная от выделенной квадратом области темного контраста.

На основе структур с синтезированными нанокристаллами GaN в рамках прикладных научных исследований были созданы прототипы УФ-детекторов (рис.7). На очищенную поверхность образцов, полученных с применением ионного синтеза, методом термического испарения осаждали металлизацию в виде Cr/Au-пленок. С использованием фотолитографии были сформированы встречно-штыревые электроды с различными ширинами электродов и зазоров между ними. В таких изделиях за оптическое поглощение ультрафиолетового излучения ответственны нанокристаллы нитрида галлия.

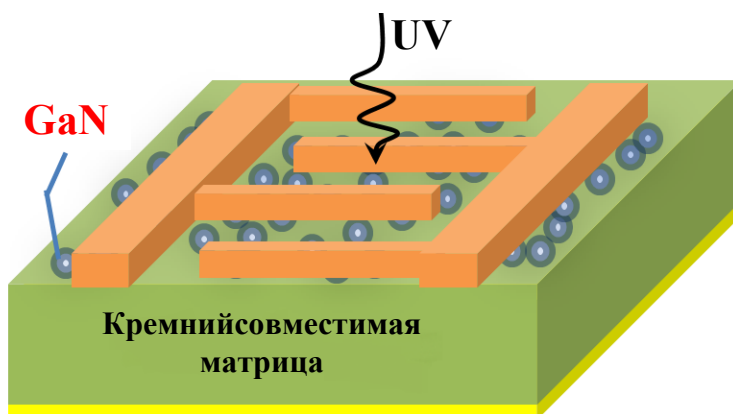


Рис. 7. Схематическое изображение фотодетектора на основе нанокристаллов GaN.

Для исследования чувствительности систем к УФ-излучению проводились измерения вольтамперных характеристик прототипов фотодетекторов в темноте и в условиях освещения УФ-источником с длиной волны излучения 365 нм и плотностью мощности 2 мВт/см². Результаты измерений показали, что большинство изготовленных образцов характеризуются повышением тока при УФ-облучении относительно «темновых» значений (рис. 8), то есть являются светочувствительными.

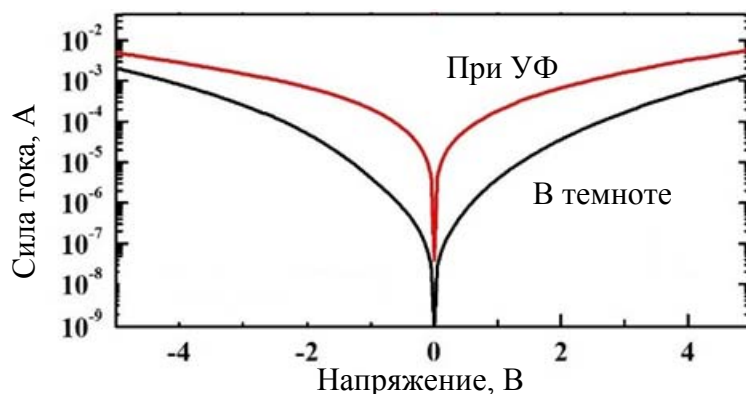


Рис. 8. Вольтамперные характеристики образца, подвергнутого последовательной имплантации Ga^+ и N_2^+ и отжигу, измеренные в темноте и при УФ-освещении.

Прототипы фотодетекторов, полученные в ходе работы, по чувствительности к внешнему излучению и темновому току не уступают мировым аналогам, представленным в [16-21].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Алгоритм уточнения спектрального разложения фотоэлектронных спектров позволяет достигать предела обнаружения химического соединения GaN в системах на основе Si и Si₃N₄ до 1 ат.% с относительной погрешностью $\leq 10\%$.
2. Последовательность имплантации $N_2^+ \rightarrow Ga^+$ в матрицу кремния позволяет обеспечить лучшее исходное перекрытие профилей примесей, чем обратная ($Ga^+ \rightarrow N_2^+$).
3. В образцах объемного кремния, подвергнутых двухстадийной имплантации Ga^+ и N_2^+ и отжигу при 900°C, слоевая концентрация GaN достигает 4 ат.%. Ключевое влияние на эффективность ионного синтеза GaN в кремнии оказывает аутиффузия имплантированных примесей, приводящая к частичному разделению профилей Ga и N.
4. Предварительная модификация матрицы кремния посредством дополнительной имплантации N_2^+ и высокотемпературного отжига существенно изменяет характер распределения имплантированных атомов и позволяет свести к минимуму их потери за счет аутиффузии. В результате концентрация GaN увеличивается до 10 ат.%.
5. Низкая концентрация НК GaN, синтезированных в матрице SiO₂, связана с аутиффузией атомов азота. Отжиг образцов в атмосфере N₂, не позволяет компенсировать потери имплантированных атомов.
6. Существенное влияние на химический состав пленок SiO₂, имплантированных ионами Ga^+ и N_2^+ , оказывает распределение вакансий кислорода.
7. Структуры с ионно-синтезированными НК GaN на основе кремнийсовместимых материалов проявляют чувствительность к УФ-излучению.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Substrate for gallium nitride epitaxy / Liu, L. and Edgar, J.H. // Material Science and Engineering – 2002. – R37. – P. 61-127.
2. Gallium nitride (GaN) / V. Bougrov, M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, A. Zubrilov // Properties of Advanced Semiconductor Materials GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe / M.E. Levinshtein, S.L. Rumyantsev, M.S. Shur (Eds.) – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001. – P.1-30. – ISBN: 978-0-471-35827-5.
3. A review of GaN-based optoelectronic devices on silicon substrate / B. Zhang, Y. Liu // Chinese Science Bulletin. – 2014. – Vol.59, №12. – P. 1251-1275.
4. Encapsulated semiconductor nanocrystals formed in insulators by ion beam synthesis / C.W. White, J.D. Budai, S.P. Withrow, J.G. Zhu, E. Sonder, R.A. Zuhr, A. Meldrum, D.M. Hembree, Jr., D.O. Henderson, and S. Prawder // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. – 1998. –

Vol. 141. – P. 228-240.

5. Controlling the size, structure and orientation of semiconductor nanocrystals using metastable phase recrystallization / J.D. Budai, C.W. White, S.P. Withrow, M.F. Chisholm, J. Zhu, and R.A. Zhur // *Nature*. – 1997. – Vol. 390. – P. 384-386.
6. Synthesis, structure and optical properties of GaN nanocrystals prepared by sequential ion implantation in dielectrics / E. Borsella, S. Dal Toe, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, A. Saber, G.C. Battaglin, E. Cattaruzza, F. Gonella, A. Quaranta, F. D'Acapito // *Materials Science and Engineering: B*. – 2001. – Vol. 82. – P. 148-150.
7. Synthesis of GaN quantum dots by ion implantation in dielectrics / E. Borsella, M. A. Garcia, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, E. Cattaruzza, F. Gonella, G. Battaglin, A. Quaranta, and F. D'Acapito // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – Vol. 90. – P. 4467.
8. Synthesis of wide band gap nanocrystals by ion implantation / E. Borsella, C. de Julian Fernandez, M.A. Garcia, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, S. Padovani, C. Sada, G. Battaglin, E. Cattaruzza, F. Gonella, A. Quaranta, F. D'Acapito, M.A. Tagliente, L. Tapfer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2002. – Vol. 191. – P. 447-451.
9. Synthesis, structure and optical properties of GaN nanocrystals prepared by sequential ion implantation in dielectrics / E. Borsella, S. Dal Toe, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, A. Saber, G.C. Battaglin, E. Cattaruzza, F. Gonella, A. Quaranta, F. D'Acapito // *Materials Science and Engineering: B*. – 2001. – Vol. 82. – P. 148-150.
10. Synthesis of GaN quantum dots by ion implantation in dielectrics / E. Borsella, M. A. Garcia, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, E. Cattaruzza, F. Gonella, G. Battaglin, A. Quaranta, and F. D'Acapito // *Journal of Applied Physics*. – 2001. – Vol. 90. – P. 4467.
11. Synthesis of wide band gap nanocrystals by ion implantation / E. Borsella, C. de Julian Fernandez, M.A. Garcia, G. Mattei, C. Maurizio, P. Mazzoldi, S. Padovani, C. Sada, G. Battaglin, E. Cattaruzza, F. Gonella, A. Quaranta, F. D'Acapito, M.A. Tagliente, L. Tapfer // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. – 2002. – Vol. 191. – P. 447-451.
12. Химический и фазовый состав пленок оксида кремния с нанокластерами, полученными путем ионной имплантации углерода / Боряков А.В., Николичев Д.Е., Тетельбаум Д.И., Белов А.И., Ершов А.В., Михайлов А.Н. // *ФТТ*. – 2012. – Т.54, №2. – С.370-377.
13. Боряков А.В. Анализ состава оксидных слоев с термостабильными нановключениями кремния: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 01.04.07. ННГУ им. Н.И.Лобачевского, Нижний Новгород, 2014.
14. Химический и фазовый состав пленок оксида кремния с нанокластерами, полученными путем ионной имплантации углерода / Боряков А.В., Николичев Д.Е., Тетельбаум Д.И., Белов А.И., Ершов А.В., Михайлов А.Н. // *ФТТ*. – 2012. – Т.54, №2. – С.370-377.

15. Chemical and phase compositions of multilayer nanoperiodic a-SiO_x/ZrO₂ structures subjected to high-temperature annealing / Boryakov A.V., Surodin S.I., Nikolichev D.E., Ershov A.V. // Physics of the Solid State. – 2017. – V. 59. № 6. – P. 1206-1214.
16. Low noise p-pi-n GaN Ultraviolet Photodetectors / A. Osinsky, S. Gangopadhyay, R. Gaska, B. Williams, M. A. Khan, D. Kuksenkov and H. Temkin // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71. – P. 2334.
17. High speed, low noise ultraviolet photodetectors based on GaN p-i-n and AlGaN(p)-GaN(i)-GaN(n) structures / G. Y. Xu, A. Salvador, W. Kim, Z. Fan, C. Lu, H. Tang, H. Morkoç, G. Smith, M. Estes B. Goldenberg, W. Yang, and S. Krishnankutty // Appl. Phys. Lett. – 1997. – Vol. 71. – P. 2154.
18. Ultrafast and highly sensitive photodetectors fabricated on high-energy nitrogenimplanted GaAs / M. Mikulics, M. Marso, P. Kordoš, S. Stanček, P. Kováč, X. Zheng, S. Wu, and Roman Sobolewski // Appl. Phys. Lett. – 2003. – Vol. 83. – P. 1719.
19. Realization of a High-Performance GaN UV Detector by Nanoplasmonic Enhancement / D. Li, X. Sun, H. Song, Z. Li, Y. Chen, H. Jiang, G. Miao // Adv. Mater. – 2012. – Vol. 24. – P. 845.
20. High-performance visible-blind GaN-based p-i-n photodetectors / B. Butuna, T. Tut, E. Ulker, T. Yelboga, and E. Ozbay // Appl. Phys. Lett. – 2008. – Vol. 92. – P. 033507.
21. A High-Responsivity GaN Nanowire UV photodetector / W.Y. Weng, T.J. Hsueh, S.J. Chang, S.B. Wang, H.T. Hsueh, G.J. Huang // IEEE J. Sel. Topic Quantum Elec. – 2011. – Vol. 17. – P. 996.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. 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. Nikolitchiev, **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.
- A2. 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. Nikolitchiev, A.V. Nezhdanov, A.V. Pirogov, D.A. Pavlov, D.I. Tetelbaum // Semiconductors. – 2016. – Vol. 50, № 2. – P. 271-275.
- A3. Distribution of species and Ga–N bonds in silicon co-implanted with gallium and nitrogen ions / **S.I. Surodin**, D.E. Nikolitchiev, R.N. Kryukov, A.I. Belov, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, and D.I. Tetelbaum // AIP Conference Proceedings. – 2016. – 1748. – 050005.

- A4. 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.
- A5. 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.
- A6. Chemical and Phase Compositions of Multilayer Nanoperiodic a-SiO_x/ZrO₂ Structures Subjected to High-Temperature Annealing / A.V. Boryakov, **S.I. Surodin**, D.E. Nikolichev, and A.V. Ershov // Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59, №. 6. – P. 1206–1214.
- A7. Deep UV Narrow-Band Photodetector Based on Ion Beam Synthesized Indium Oxide Quantum Dots in Al₂O₃ Matrix / S. Rajamani, K. Arora, A. Konakov, A. Belov, D. Korolev, A. Nikolskaya, A. Mikhaylov, **S. Surodin**, R. Kryukov, D. Nikolitchev, A. Sushkov, D. Pavlov, D. Tetelbaum, M. Kumar, M. Kumar // Nanotechnology. – 2018. – V. 29, №30. – P. 305603.
- A8. Исследование химического состава кремния, имплантированного ионами галлия и азота / **С.И. Суродин**, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, Д.Е. Николичев, Р.Н. Крюков, А.И. Белов, Д.С. Королев // XX Нижегородская сессия молодых ученых. Естественные, математические науки: материалы докладов, Нижегородская обл., Арзамасский р-он, 19-22 мая. – 2015. – С. 60-63.
- A9. Распределение химического состава по глубине в кремнии, имплантированном ионами галлия и азота / **С.И. Суродин**, Д.Е. Николичев, Р.Н. Крюков, А.И. Белов, Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум // Нанопизика и наноэлектроника. Материалы XX Международного симпозиума, Нижний Новгород, 14–18 марта. – Том 2. – 2016. – С.741.
- A10. Оптические свойства ионно-синтезированных нановключений нитрида галлия в кремнии и диэлектрических матрицах / Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.С. Королев, А.А. Конаков, К.В. Сидоренко, В.А. Сергеев, В.К. Васильев, Д.Е. Николичев, **С.И. Суродин** // Нанопизика и наноэлектроника. Материалы XX Международного симпозиума, Нижний Новгород, 14–18 марта. – Том 2. – 2016. С.246.
- A11. Chemical composition of silicon subsurface layers implanted with Ga⁺ and N₂⁺ ions / **S.I. Surodin**, D.E. Nikolitchev, R.N. Kryukov, A.I. Belov, D.S. Korolev, A.N. Mikhaylov, D.I. Tetelbaum // V International Scientific Conference State-of-the-art Trends of Scientific Research of Artifical and Natural Nanoobjects (STRANN-2016). Abstract, Saint Petersburg, 26-29 April. – 2016. – P.223.
- A12. Ion-beam synthesis of GaN in silicon and Si-compatible dielectric films / D.S. Korolev, A.I. Belov, V.K. Vasiliev, V.A. Sergeev, A.A. Nikolskaya, D.E. Nikolitchev, **S.I. Surodin**, D.V.

- Guseinov, A.V. Nezhdanov, A.S. Markelov, V.N. Trushin, A.V. Pirogov, D.A. Pavlov, A.A. Konakov, K.V. Sidorenko, A.N. Mikhaylov, D.I. Tetelbaum, M. Kumar // E-MRS 2016 Spring Meeting. Abstracts, France, Lille, May 02-06. – 2016. – BB.P2.30.
- A13. Исследование химического состава и оптических свойств слоев кремния и пленок SiO_2 , Si_3N_4 , Al_2O_3 , HfO_2 , подвергнутых имплантации ионов Ga^+ и N^+ с целью синтеза нановключений GaN / Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, А.А. Конаков, К.В. Сидоренко, **С.И. Суродин**, Д.Е. Николичев, Д.И. Тетельбаум // VII ежегодная конференция Нанотехнологического общества России. Сборник тезисов, Москва, 2 марта. – 2016 г. – С. 14-17.
- A14. Формирование нанокластеров в кремнии и оксидных пленках на кремнии, имплантированных Ga и N / Д.С. Королев, А.И. Белов, Е.В. Окулич, А.А. Никольская, **С.И. Суродин**, Д.Е. Николичев, А.В. Нежданов, Ю.В. Усов, Д.А. Павлов, А.С. Маркелов, В.Н. Трушин, А.Н. Михайлов, Д.И. Тетельбаум, М. Kumar // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: тезисы докладов VI Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов, Нижний Новгород, 24–27 октября. – 2016 г. – С. 62.
- A15. Профилирование по глубине химического состава структур, полученных методом имплантации ионов Ga и N в кремний и кремнийсовместимые диэлектрические матрицы / **С.И. Суродин**, Р.Н. Крюков, Д.Е. Николичев, Д.С. Королев // Физические и физико-химические основы ионной имплантации: тезисы докладов VI Всероссийской конференции и школы молодых ученых и специалистов, Нижний Новгород, 24–27 октября. – 2016 г. – С.91.
- A16. Николичев Д.Е., Боряков А.В., **Суродин С.И.** Химический анализ твердотельных гетеронаносистем методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии: учебное пособие – Н. Новгород: ННГУ, 2013, 73 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/esca.pdf (дата обращения: 22.05.2018).
- A17. Николичев Д.Е., Боряков А.В., **Суродин С.И.**, Крюков Р.Н. Анализ твердотельных гетеронаносистем методом РФЭС: учебно-методическое пособие – Н. Новгород: ННГУ, 2014, 50 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.unn.ru/books/met_files/esca_project.pdf (дата обращения: 22.05.2018).