

---

На правах рукописи

**БУГРОВ Владислав Евгеньевич**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ  
НИТРИДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР  
ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ  
СВЕТОДИОДНЫХ УСТРОЙСТВАХ**

01.04.10 – физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2013

**Работа выполнена в группе компаний «Оптоган» и на кафедре светодиодных технологий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»**

**Официальные оппоненты:**

**Асеев Александр Леонидович**

академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, директор

**Устинов Виктор Михайлович**

член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, заместитель директора по научной работе

**Воробьев Леонид Евгеньевич**

заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, профессор

**Ведущая организация:**

**Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)**

Защита состоится « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г. в \_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д002.205.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке института по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2013 г.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь совета,  
Доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время полупроводниковые светодиоды, излучающие в синем диапазоне электромагнитного спектра, находят широкое применение в таких приложениях, как системы общего и специального освещения, полноцветные дисплеи со светодиодной подсветкой и т.д. Существует несколько полупроводниковых материалов, перспективных для изготовления излучателей синего цвета. Изначально наиболее перспективными для изготовления таких излучателей считались соединения SiC и ZnSe. Пионерскими исследованиями, связанными с развитием излучателей на основе SiC, по праву считаются работы, выполненные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН в 1970–1980 годах [1]. Другими важнейшими материалами, пригодными для изготовления светоизлучающих структур синего и ультрафиолетового диапазона, являются нитриды металлов III группы периодической системы химических элементов Д.И. Менделеева; синтез этих материалов и исследования их свойств также проводились в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, начиная с самой ранней стадии [2]. В последние две декады в области получения эпитаксиальных слоёв нитрида галлия (GaN) и твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  и  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ , необходимых для развития технологии синих и ультрафиолетовых светодиодов, был достигнут значительный прогресс. Данное направление активно развивается с 90-х годов, начиная с технологических успехов группы профессора Акасаки (I. Akasaki) в области газофазной эпитаксии с использованием металлорганических соединений (ГФЭ МОС). Среди основных этапов развития технологии следует отметить разработку процесса выращивания материала, включающего стадию низкотемпературного роста нуклеационного слоя [3], который позволил создать эпитаксиальные слои GaN на чужеродных подложках и снизить плотность проникающих дислокаций (ПД) в получаемых слоях. Следующим важным шагом явилась разработка методики легирования GaN магнием (Mg) [4], что дало материал с проводимостью дырочного типа ( $p$ -типа) с параметрами, достаточными для изготовления высокоэффективных светодиодов и лазерных диодов. Еще одним значительным вкладом в развитие надежных твердотельных источников синего света стала разработка технологии электрических контактов к GaN [5]. В настоящее время нитриды металлов III группы (III-нитриды) считаются наиболее востребованными полупроводниковыми материалами для приложений, требующих высокоэффективных твердотельных источников света [6]. Принципиальная проблема улучшения характеристик мощных светоизлучающих устройств на основе GaN может быть решена с помощью повышения кристаллического совершенства гетероэпитаксиальных слоёв и разработки новых схем легирования для получения нитридного материала  $p$ -типа проводимости. Решение этой проблемы связано, например, со снятием ограничения по максимальному току, возникающему из-за паразитных процессов безызлучательной рекомбинации носителей заряда на дефектах кристаллической структуры. Такие дефекты, в особенности ПД, во множестве возникают при эпитаксиальном росте слоёв нитрида галлия (и других III-нитридов) на чужеродных подложках, материал которых рассогласован с материалом слоя по параметру кристаллической решетки, например, подложках сапфира, карбида кремния и кремния. Таким образом, развитие физического базиса функционирования и изготовления высокоэффективных полупроводниковых светоизлучающих структур и устройств на основе III-нитридных полупроводников является чрезвычайно востребованным и быстро развивающимся направлением, что обуславливает **актуальность** настоящей диссертационной работы.

**Целью работы** являлась разработка физическо-технологических основ оптимизации свойств приборов современной полупроводниковой оптоэлектроники, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра электромагнитного излучения и создаваемых на основе эпитаксиальных слоёв III-нитридов: InN, GaN, AlN и их твердых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ ,  $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ .

Для достижения этой цели необходимо было решить следующие основные **задачи**:

- Проанализировать возникающие в III-нитридных гетероструктурах деформации и механические напряжения с учетом химического состава, упругой анизотропии и однородности материалов эпитаксиальных слоёв.
- Теоретически рассмотреть и экспериментально исследовать механизмы роста гетероэпитаксиальных слоёв на основе III-нитридов и их микроструктуру, включая изменение плотности проникающих дислокаций в таких слоях.
- Провести моделирование электрических, оптических и тепловых процессов, характерных для полупроводниковых нитридных гетероструктур, светодиодных чипов и устройств на их основе.
- Исследовать влияние эффекта поглощения и рассеяния света в пассивных областях нитридных светодиодных структур на их характеристики.
- Предложить и реализовать эффективные схемы эпитаксиального выращивания нитридных полупроводниковых гетероструктур методом газофазной эпитаксии с использованием металлоорганических соединений.
- Определить способы получения светодиодных структур нитридов металлов III группы на подложке сапфира с заданными структурными и оптико-электрическими параметрами и найти пути снижения уровня деградации оптоэлектронных устройств, обусловленного дефектами.
- Оптимизировать свойства светоизлучающих приборов, создаваемых на основе нитридных полупроводниковых гетероструктур, включая вывод излучения, отвод тепла и т. п., и разработать приборы, соответствующие передовому мировому уровню.

**Научная новизна работы.** В диссертации теоретически и экспериментально исследованы механизмы роста, легирования и дефектообразования в III-нитридах при их выращивании на подложках с большим рассогласованием параметров кристаллической решётки при использовании различных условий роста и различных морфологиях ростовой поверхности подложки. В результате установлены неизвестные ранее закономерности дефектообразования при гетероэпитаксиальном росте полупроводниковых соединений и твёрдых растворов  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ,  $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$  и  $\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  на GaN, и структур с множественными квантовыми ямами (МКЯ)  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$ , выращиваемых методом ГФЭ МОС на подложках сапфира, и предложены новые подходы к снижению дефектности указанных материалов и повышению эффективности светодиодных устройств, создаваемых на их основе.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в том, что осуществлено решение научной проблемы, имеющей важное практическое значение. Исследования, проведенные в диссертации, позволяют глубже понять механизмы формирования дефектов в гетероструктурах на основе нитридов металлов III группы и, как следствие, оптимизировать условия получения низко-дефектных гетероэпитаксиальных структур для создания эффективных светодиодов, работающих в видимой и ультрафиолетовой областях спектра электромагнитного излучения. В результате разработаны научные основы новой технологии, позволяющей создавать гетероструктуры на основе нитридных соединений на подложках из сапфира со сниженной до двух порядков величины (по

сравнению со стандартной технологией) плотностью ПД. Изучены и оптимизированы методы легирования твердых растворов нитридов галлия и алюминия для получения материала *p*-типа проводимости. На основе проведенных исследований и созданных новых ростовых технологий разработаны и внедрены в промышленное производство светодиодные чипы, светодиоды и матричные светодиодные модули для изготовления осветительных устройств.

Полученные в диссертации результаты послужили научной основой **27** (в том числе **6** российских) выданных патентов. Часть результатов работы была получена в ходе выполнения проектов Российского фонда фундаментальных исследований, включая проекты 05-02-17781 «Физические принципы снижения плотности дислокаций в гетероструктурах на основе нитрида галлия» и 09-08-00854 «Механика дефектов в слоистых наногетероструктурах на основе III-нитридов».

#### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Возникновение ростовых поверхностей с высокими кристаллографическими индексами при осаждении полупроводниковых материалов со структурой вюрцита на подложках базисной ориентации (0001) вызывает отклонение ПД от начального вертикального положения. Наклон ПД приводит к существенному уменьшению плотности ПД по мере дальнейшего роста слоёв в результате междислокационных реакций.

2. Использование многостадийного режима роста в ГФЭ МОС процессе (с чередованием двух- и трёхмерной ростовой моды) позволяет достичь быстрого уменьшения плотности ПД в GaN слоях. По мере увеличения толщины слоя плотность ПД может быть снижена на полтора – два порядка. Управление трехмерной ростовой модой на начальном этапе формирования эпитаксиальных слоёв на сапфировой подложке позволяет сократить плотность центров зарождения и при их последующей коалесценции число границ блоков, что является определяющим в формировании слоя с низкой исходной плотностью дислокаций.

3. Разработанный метод создания упорядоченной системы полостей в гетероэпитаксиальных слоях нитрида галлия, выращенных на сапфировых подложках, приводит к снижению уровня механических напряжений в этих слоях. Величина и степень локализации напряжений определяются отношением радиуса создаваемых полостей к толщине слоя.

4. Разработанный метод структурирования поверхности сапфира, на которой формируется светодиодная структура нитридов металлов III группы, и механическая обработка тыльной стороны сапфировой подложки приводят к увеличению вывода света из чипа, что обусловлено подавлением эффекта полного внутреннего отражения за счет усиления рассеяния света. Вывод света контролируется размером и конфигурацией рельефа обрабатываемых поверхностей.

5. В светодиодных структурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Al}_z\text{Ga}_{1-y-z}\text{N}$  с МКЯ резкость границ раздела и однородность состава МКЯ определяются содержанием In в барьерных слоях  $\text{In}_y\text{Al}_z\text{Ga}_{1-y-z}\text{N}$ . Квантовая эффективность структур чувствительна к концентрациям In в барьерном слое. Повышение содержания индия приводит к появлению неоднородного распределения в нем Al и, как следствие, к снижению квантовой эффективности.

6. Состав буферных подслоёв  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  определяет равномерность распределения In в системе светоизлучающих квантовых ям, что соответственно контролирует квантовую эффективность этих гетероструктур.

7. Ток через проводящие каналы в активной области светодиодной структуры с квантовыми ямами (КЯ) во время электростатического разряда (ЭСР) может быть

значительно снижен введением промежуточных слоёв-спейсеров с высоким удельным сопротивлением, прилегающих к активной области структуры. В качестве *p*-спейсера может быть использован *p*-эмиттер, однако для препятствия диффузии Mg из *p*-эмиттера в активную область структуры оптимальным является введение нелегированного спейсера. В *n*-области введение номинально нелегированного спейсера является необходимым.

**Достоверность** результатов работы основана на применении современных научно-обоснованных и взаимодополняющих методов исследования. Экспериментальные результаты диссертации аккумулированы с привлечением комплекса приборов и установок, которые позволяют получать воспроизводимые результаты в широком диапазоне изменяемых параметров опытов. Теоретические результаты получены с использованием корректных математических (аналитических и численных) методов решения поставленных задач и протестированы различными проверками. Обоснованность физических моделей вытекает из их соответствия эксперименту, например, по измерению плотности ПД в буферных слоях.

**Апробация работы.** Результаты, представленные в диссертации, докладывались на следующих конференциях: Silicon Carbide and Related Materials (Kyoto, Japan, 1995), The First European GaN Workshop (Rigi, Switzerland, 1996), конференция «Прикладная оптика-1996» (Санкт-Петербург, 1996), The Second International Conference on Nitride Semiconductors (Tokushima, Japan, 1997), International Conference on Silicon Carbide, III-nitrides and Related Materials (Stockholm, Sweden, 1997), XLVII Санкт-Петербургский симпозиум им А.С. Попова (Санкт-Петербург, 1997), 3<sup>rd</sup> International Symposium on Blue Laser and Light Emitting Diodes (Berlin, Germany, 2000), The Fourth European GaN Workshop (Nottingham, UK, 2000), International Workshop on Nitride Semiconductors (Nagoya, Japan, 2000), UK Nitride Consortium Workshop (Bath, UK, 2001), 2005 MRS Fall Meeting (Boston, USA), International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (ICMOVPE-2006, Miyazaki, Japan), International Symposium on Gallium Nitride (Linköping, Sweden, 2006), 6<sup>th</sup> International Conference on Materials for Microelectronics & Nano-engineering-MFMN (Cranfield, UK, 2006), 7-й и 8-й Всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (Москва, 2010 и Санкт-Петербург, 2011), 15<sup>th</sup> International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy (Lake Tahoe, USA, 2010), E-MRS 2011 Spring Meeting, Symposium F: Group III Nitrides and Their Heterostructures for Electronics and Photonics (Nice, France, 2011), 9<sup>th</sup> International Conference on Nitride Semiconductors (Glasgow, UK, 2011), ChipEXPO-2011 (Москва, 2011), Вторая научная конференция кластера энергоэффективных технологий фонда «Сколково» (Москва, 2011), LED Forum 2011 (Москва, 2011), International Conference on Extended Defects in Semiconductors (Thessaloniki, Greece, 2012), 4<sup>th</sup> International Symposium on Growth of III-Nitrides (Санкт-Петербург, 2012), 9<sup>th</sup> International Symposium on Semiconductor Light Emitting Devices (ISSLED 2012) (Berlin, Germany, 2012), конференция «Прикладная оптика-2012» (Санкт-Петербург, 2012), 6<sup>th</sup> International Conference on Multiscale Materials Modeling (Singapore, 2012), Semicon Russia 2012 (Москва, 2012).

**Публикации.** Результаты диссертационной работы опубликованы в **36 печатных работах** в отечественных и зарубежных научных журналах и сборниках статей. Список публикаций приведен в хронологическом порядке в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх частей, включающих в себя девять глав, и заключения, включает 182 рисунка, 34 таблицы и список литературы из 257 наименований. Общий объем диссертации составляет 309 страниц.

В первой части диссертации, содержащей одну (первую) главу, сформулированы задачи проводимых исследований и описаны методы, применяемые для решения этих задач. В этой части содержится краткий обзор существующих общих проблем по теме диссертации, описаны использованные подходы, направленные на решение конкретных вопросов, рассматриваемых в работе, указаны методики моделирования и экспериментальных исследований и представлен основной технологический метод, использованный в работе, — рост III-нитридов методом ГФЭ МОС. В конце главы рассмотрены использованные методики измерений параметров светодиодных чипов, светодиодов и светодиодных сборок.

Во второй части диссертации содержатся вторая глава, в которой кратко описаны фундаментальные свойства GaN и твёрдых растворов на его основе, и третья глава, где представлены результаты моделирования, выполненного в рамках диссертационной работы. В частности, в разделе третьей главы, посвященном структуре выращиваемых материалов, представлена реакционно-кинетическая модель взаимодействия дислокаций в эпитаксиальных слоях нитридов металлов III группы и смоделирован рост GaN на структурированных подложках GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, в том числе: модель формирования внутренних полостей в нитридных эпитаксиальных слоях, выращенных методом ГФЭ МОС на структурированных подложках; модель распространения дислокаций в эпитаксиальных слоях GaN, выращенных на гексагонально-структурированных подложках GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; модель напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных слоях GaN, выращенных на сапфировых подложках. Также в этой главе представлены результаты теоретического анализа различных процессов в светодиодных чипах и устройствах на основе III-нитридов. В частности, проведено моделирование физических процессов в светодиодных чипах, включая оптимизацию растекания электрического тока и тепла и вывода света из чипа, исследован пробой в светодиодных структурах, вызванный ЭСР, и предложены технологические решения этой проблемы. Также смоделированы светодиодные структуры с резонансным асимметричным туннелированием заряда. В конце главы представлены результаты расчетов, проведенных с целью повышения эффективности вывода света из светодиодного модуля «чип-на-плате» и оптимизации отвода тепла в осветительных системах со светодиодными модулями.

Третью часть диссертации, состоящую из четырех глав и посвященную разработке эффективных практических способов оптимизации свойств светодиодных структур на основе III-нитридов, открывает четвертая глава, в которой представлен новый метод многостадийного роста эпитаксиальных слоёв III-нитридов. В ходе разработки данного метода была предложена новая схема создания нуклеационного слоя GaN с низкой плотностью островков зарождения, проведена оптимизация метода многостадийного роста слоя GaN путём регулирования плотности островков зарождения на стадии низкотемпературного роста и разработана технология регулирования плотности островков зарождения на стадии высокотемпературного заравливания нуклеационного слоя GaN. В данной главе также рассмотрено уменьшение плотности ростовых дислокаций в рамках метода многостадийного роста GaN. Метод был реализован в виде многостадийного роста эпитаксиальных слоёв III-нитридов с целью создания светодиодных структур на основе МКЯ In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN и для выращивания эпитаксиальных слоёв Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N.

В пятой главе диссертации предложен способ контролируемого введения полостей при возобновляемом росте слоя GaN на гексагонально-структурированной подложке.

Здесь рассмотрена задача создания гексагонально-структурированных подложек GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, проанализирован рост на гексагонально-структурированных подложках GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с точки зрения влияния на качество слоёв условий роста и геометрических параметров подложек. В рамках решения поставленной задачи было также исследовано поведение ПД в эпитаксиальных слоях GaN, выращенных на гексагонально-структурированных подложках GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

В шестой главе рассмотрены приёмы структурирования подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, направленные на увеличение выходной мощности излучения нитридных светодиодных структур. Предложена технология получения подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с заданным рельефом поверхности и рассмотрен процесс роста эпитаксиальных слоёв GaN на таких подложках. В данной главе исследованы свойства светодиодных структур на основе In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N, выращенных с использованием сапфировых подложек с контролируемой геометрией поверхности, и рассмотрен метод безмасочного структурирования сапфировой подложки для улучшения вывода света из нитридных светодиодных структур.

В седьмой главе исследованы эпитаксиальные методы создания светодиодных структур In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN и предложены новые приёмы по совершенствованию этой технологии. В частности, оптимизировано получение эпитаксиальных слоёв нитрида галлия *p*-типа проводимости при легировании магнием, изучено влияние концентрации индия в подслое In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N на выходную мощность электролюминесценции светодиодов, создаваемых на основе структур In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN, и проведена оптимизация свойств блокирующего слоя Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N в светодиодных структурах In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN и структур на основе In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/In<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-x-y</sub>N с МКЯ для создания эффективных светодиодов, излучающих в области ближнего ультрафиолета.

В четвёртой части диссертации, состоящей из двух глав, описана реализация полученных в ходе выполнения диссертационной работы результатов при разработке новых светодиодных приборов. В частности, в восьмой главе рассмотрены светодиоды ближнего ультрафиолетового диапазона с улучшенными характеристиками, а в девятой главе представлены практические результаты развития эпитаксиальных светодиодных технологий группы компаний «Оптоган» на основе научных разработок, предложенных в диссертации, и конструкционные решения в области светодиодов видимого диапазона: светодиодных чипов, светодиодов и светодиодных сборок «чип-на-плате». Следует отметить, что часть из описываемых в диссертации изделий уже выпускается промышленно.

В последней части диссертации приведены заключение и выводы по результатам работы, списки публикаций, патентов РФ и заявок на патенты РФ диссертанта по теме работы, а также список докладов автора на научно-технических и научно-практических конференциях, и, наконец, общий библиографический список цитированных первоисточников.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой части диссертации, содержащей одну (первую) главу, сформулированы задачи проводимых исследований и описаны методы, применявшиеся для решения этих задач. В начале этой части дается краткий обзор существовавших к началу выполнения работы научных проблем по теме диссертации, а также общих проблем технологии нитридных гетероструктур и светодиодных устройств на их основе. Далее в первой главе описаны подходы, использованные при решении задач, рассматриваемых в работе. Вначале рассмотрены методы, использованные в ходе теоретических исследований и моделирования: мезоскопические подходы, оперирующие с носителями заряда в полупроводниковых гетероструктурах, световыми лучами в сплошной среде, дислокациями в упругих твердых телах и т.п. Перечислены основные программные средства, использовавшиеся для теоретических исследований и моделирования: программный пакет Mathematica, применявшийся, в частности, для анализа математической модели реакционной кинетики плотностей вертикальных и наклонных ПД и для трёхмерного самосогласованного электро-тепло-светового расчета при оптимизации геометрии электродов светодиодного чипа; программный пакет ZEMAX, использованный для расчетов оптических задач; программный пакет COMSOL, применявшийся для расчета теплопереноса, в частности, распределения теплового поля в светодиодных устройствах; программный пакет ANSYS, при помощи которого осуществлялись расчеты механических свойств.

Далее в первой главе дано обсуждение методов характеристики полупроводниковых материалов, гетероструктур и светодиодных структур, которые исследовались в работе: методов *in situ* рефлектометрии, атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской дифрактометрии, исследования спектров фото- (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ), Оже-электронной спектроскопии и масс-спектропии вторичных ионов (ВИМС). Особое внимание уделено методике измерения радиометрических и фотометрических параметров светодиодных чипов, светодиодов и светодиодных светильников, разработанных на основе научно-практических результатов, полученных в ходе выполнения диссертационной работы. Завершает главу краткий обзор основных достижений технологии выращивания III-нитридов методом ГФЭ МОС, существовавших к началу выполнения работы, а также актуальных проблем этой технологии.

Во второй части диссертации содержатся вторая глава, в которой кратко описаны фундаментальные свойства GaN и твердых растворов на его основе, и третья глава, где представлены результаты моделирования, выполненного в рамках диссертационной работы. Вторую главу открывает анализ фундаментальных свойств GaN, базирующийся на обзоре, опубликованном автором диссертации в Главе 1 книги-сборника «*Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe*» (ред. Levinshtein M.E., Rumyantsev S.L., Shur M.S., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2001) в соавторстве с М.Е. Левинштейном, С.Л. Румянцевым и А.С. Зубриловым. Здесь рассмотрена кристаллическая структура GaN, собственные точечные дефекты решетки этого материала, протяжённые дефекты, зонная структура. Кратко рассмотрен пьезоэлектрический эффект в гексагональном GaN, затем проанализированы оптические свойства III-нитридов и физико-химические свойства GaN.

Первый параграф третьей главы диссертации посвящен дислокациям и механическим напряжениям в нитридных слоях. В начале параграфа развивается реакционно-кинетическая модель взаимодействия дислокаций в эпитаксиальных слоях

III-нитридов. Предложенный в диссертации оригинальный подход к снижению плотности ПД основан на реализации нового двухстадийного процесса роста, в начале которого ростовые условия должны обеспечить формирование трёхмерных островков, имеющих огранку, что позволяет инициировать процессы вынужденного наклона ПД. Таким образом, первая стадия процесса направлена на формирование т.н. «слоя перенаправления дислокаций». В рамках второй стадии процесса роста формируется т.н. «слой взаимодействия дислокаций». Для этого режимы наращивания эпитаксиального слоя (ЭС) должны быть изменены таким образом, чтобы обеспечить преимущественный рост слоя с задаваемой ориентацией (0001). В этом слое перенаправленные (наклоненные) ПД вступают во взаимные реакции. Новый двухстадийный метод роста схематично иллюстрирует рис. 1.

На рис. 1 (а) и (б) показана первая стадия роста, на которой происходит формирование трёхмерных островков нуклеации и генерация дислокаций несоответствия (ДН) и проникающих дислокаций (ПД). В ходе первой стадии роста поддерживаются ростовые условия, позволяющие обеспечить разращивание кристаллографических плоскостей, отличных от (0001), т.е. граней с высокими кристаллографическими индексами, которые будут формировать огранку островков зарождения в условиях поддержания трёхмерной моды роста. Высокие индексы граней описывают пространственное положение кристаллографических плоскостей структуры вюрцитного кристалла  $\{h, k, \bar{h} + k, 0\}$  (по системе обозначений Миллера-Браве), отличных от (0001) или  $\{1\bar{1}00\}$ . На этой стадии процесса формирующиеся дислокации частично аккумулируются на границах сопряжения разнонаправленных граней соседних островков зарождения на начальной стадии их коалесценции. Далее на стадии полного слияния небольших соседних островков образуется непланарный *слой перенаправления дислокаций*, оставшиеся вертикальные ПД отклоняются от своего первоначального направления и обрываются на имеющихся свободных поверхностях непланарного ЭС. Это обусловлено тем, что для прорастающих дислокаций становится энергетически выгодным их отклонение от первоначального направления распространения. Наклон дислокаций становится возможным, поскольку при разращивании свободных поверхностей (граней) с большими индексами реализуются

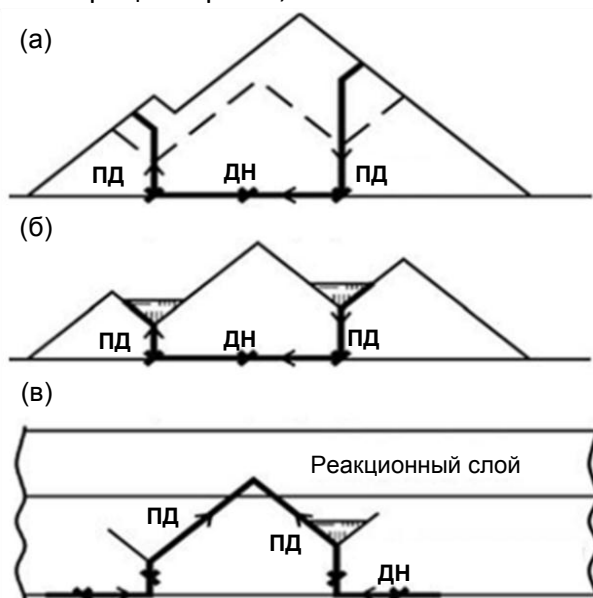


Рис. 1. Схема поперечного сечения растущего эпитаксиального слоя GaN: (а) этап I: наклон проникающих дислокаций - ПД во время роста ограненных островков нуклеации (пунктирными линиями показаны частично объединённые островки); (б) этап II: дополнительное осаждение аморфной пленки для повышения вероятности наклона ПД (области со штриховкой); (в) этап III: рост реакционного слоя с поверхностью (0001); стрелками обозначены направления возможного распространения дислокаций. На границе эпитаксиального слоя показаны дислокации несоответствия — ДН.

условия для преодоления энергетического барьера (препятствующего наклону дислокаций), например, под действием возникающих сил изображения. Энергетический выигрыш при отклонении ПД определяется уменьшением энергии дислокации (что связано с тем, что линия ПД становится короче при отклонении к намеренно введенной грани с большим индексом), в сравнении с энергией ПД, распространяющейся в направлении  $[0001]$ -оси кристалла. Кроме того, ПД с вектором Бюргера типа  $a/3 \langle 2\bar{1}\bar{1}0 \rangle$  обладают максимальной энергией на единицу длины, когда их направление параллельно  $c$ -оси элементарной ячейки вюрцита, т.е. для случая ПД краевого типа. В качестве дополнительной меры для повышения эффективности метода перенаправления дислокаций на первом этапе роста может быть использован прием, заключающийся в нанесении тонких пленок аморфного вещества, например SiN, частично покрывающих боковые грани островков зарождения. Это приведет к тому, что дислокации, образующиеся при коалесценции островков, будут прорастать по межфазной границе, образованной поверхностью наклонных граней островков и аморфной пленкой, также изменяя свое первоначальное направление (см. рис. 1 (б)).

После выращивания *слоя перенаправления дислокаций* осуществляется переход ко второй стадии процесса, в рамках которой выращивается *слой взаимодействия дислокаций* или *реакционный слой*. Для этого мода роста изменяется таким образом, чтобы превалировала ростовая поверхность (0001). На этой стадии происходит заравнивание островков зарождения, где дислокации сохраняют свое измененное направление. Дислокации в реакционном слое ПД с «замороженным» наклонным направлением демонстрируют латеральное движение точки их пересечения с поверхностью растущего (0001) слоя. Проникая таким образом в наращиваемый слой, ориентированный по плоскости (0001), наклонные дислокации имеют возможность вступать в дислокационные реакции. Это приводит к их взаимной аннигиляции, — в случае двух дислокаций с противоположными векторами Бюргера (рис. 1 (в)), или к их слиянию, — в случае двух разнотипных ПД. Оба этих эффекта приводят к уменьшению плотности прорастающих дислокаций. Процедура описанного двухстадийного роста может повторяться, в результате чего реализуется процедура многоступенчатого роста, позволяющая получать низко-дислокационные эпитаксиальные слои GaN и  $Al_yGa_{1-y}N$ . Необходимое число стадий в процедуре роста, и, следовательно, общая толщина поэтапно наращиваемых ЭС, определяется требуемым уровнем снижения плотности дислокаций, которая рассчитывается на основе реакционно-кинетической модели. В рамках модели снижение общей плотности ПД, представляющей собой сумму плотностей вертикальных и наклонных ПД, подчиняется системе «реакционно-кинетических» уравнений для ансамбля взаимодействующих дислокаций:

$$\frac{d\rho_v}{dh} = -f_{redirect}^v(\rho_v, \rho_i) - f_{react}^v(\rho_v, \rho_i) \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_i}{dh} = +f_{redirect}^i(\rho_v, \rho_i) - f_{react}^i(\rho_v, \rho_i) \quad (2)$$

Здесь  $\rho_v$  — плотность вертикальных ПД;  $\rho_i$  — плотность наклонных ПД;  $h$  — толщина слоя, играющая роль эволюционной переменной; функции в правой части  $f_{redirect}^v$ ,  $f_{redirect}^i$  и  $f_{react}^v$ ,  $f_{react}^i$  описывают процессы перенаправления вертикальных ПД и реакции между различными типами ПД. Функции реакций  $f$  зависят от выбранного метода производства подложки, и, следовательно, включают в себя (в параметризованном виде) зависимость от условий роста. Они также могут явно включать

толщины слоя и параметры, описывающие интенсивность реакций ПД. В работе в качестве примера реакционные функции были выбраны в следующем виде:

$$f_{redirect}^v = f_{redirect}^i = \frac{1}{p} \cdot \frac{\rho_v}{h} \quad (3)$$

$$f_{react}^v = 0, \quad f_{react}^i = \kappa \cdot \rho_i^2. \quad (4)$$

Здесь  $\kappa$  — параметр эффективного поперечного сечения дислокационных реакций;  $h$  — общая толщина слоя, включающая как толщину слоя перенаправления, так и толщину реакционного слоя. Параметр  $p$  связан с углом между наклонной плоскостью поверхности островка зарождения и (0001)-кристаллической плоскостью через соотношение

$$p = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\cos \alpha}{(1 - \cos \alpha)}, \quad (5)$$

где  $\gamma$  — коэффициент, зависящий от кристаллической структуры и дополнительных факторов (например, наличия пленки аморфного материала на поверхности островка зарождения).

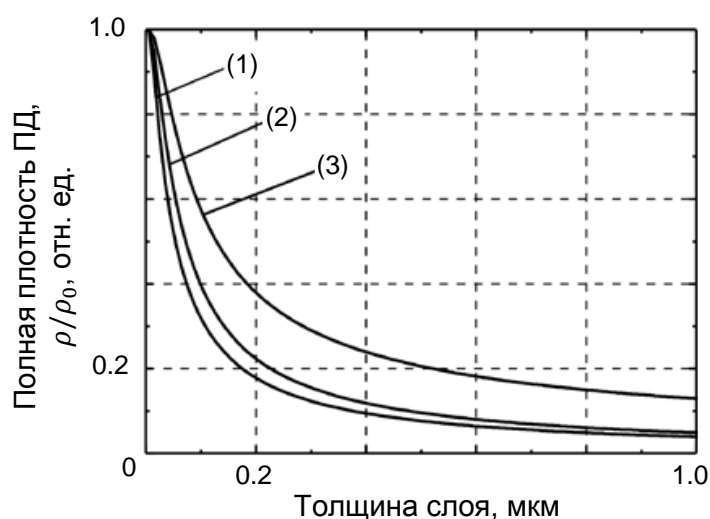


Рис. 2. Результат модельных расчетов снижения плотности ПД в структуре со слоями перенаправления дислокаций и дислокационных реакций: относительная плотность ПД для структур с начальной плотностью  $\rho_0 = 10^{10} \text{ см}^{-2}$  и типичными значениями параметров:  $p = 0.5$  (1),  $p = 1$  (2),  $p = 2$  (3) и  $\kappa = 100 \text{ нм}$ .

сформировать в подложке GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> систему отверстий, то геометрия полостей, формирующихся в ЭС при выращивании GaN, определяется диаметрами этих отверстий. В свою очередь геометрия формирующихся полостей определяет характер изменения траекторий линий ПД. На основании полученных экспериментальных данных в работе предложена феноменологическая модель, объясняющая поведение дислокаций в материале с встроенными полостями. На рис. 3 схематично представлены две модели для двух вариантов распространения ПД. Для случая «А» большая полость имеет большую свободную поверхность, поэтому взаимодействие дислокаций с полостью большого размера, возникающее под влиянием сил изображения, будет более эффективным. В

Результаты расчета уменьшения плотности ПД в эпитаксиальном слое GaN как функции толщины слоя для конкретного примера представлены на рис. 2. Важно отметить, что уменьшение плотности ПД зависит от абсолютного значения их начальной плотности  $\rho_0$ . Более быстрое снижение плотности ПД происходит при больших изначальных значениях  $\rho_0$ . Это обусловлено тем, что при более высокой начальной плотности дислокации обладают повышенной вероятностью встретиться друг с другом и вступить в реакцию.

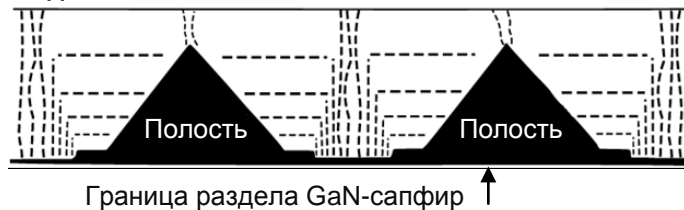
В следующем параграфе третьей главы диссертации (§3.1.2) рассмотрена модель формирования внутренних полостей в нитридных эпитаксиальных слоях, выращиваемых методом ГФЭ МОС на структурированных подложках. Если

результате такого взаимодействия изгибу подвергаются не только те дислокации, которые располагаются в непосредственной близости от свободной поверхности полости, но и дислокации, расположенные на достаточно больших расстояниях от нее. Для случая «В», при меньшем размере полости, взаимодействие полей напряжений дислокаций со свободными поверхностями меньшей площади не так велико, и, таким образом, меньшее число дислокаций, присутствующих в ЭС, погибает по направлению к содержащимся в них свободным поверхностям.

Далее в третьей главе проведено моделирование напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных слоях нитрида галлия на сапфировых подложках. Расчеты проводились на основе линейно-упругой модели материалов с анизотропными свойствами с применением программного комплекса COMSOL®, использующего метод конечных элементов, а также программного комплекса ANSYS®. Изучалось структурирование двух типов: с открытыми полостями (рис. 4 (а)) и со слоем наноколонн (рис. 4 (б)).

В первом случае рассматривался упорядоченный массив открытых гексагональных полостей в слое нитрида галлия, расположенных в шахматном порядке (рис. 4 (а)). Расчетная область представляла собой дискретную структуру, состоящую из массива элементарных блоков в виде параллелепипедов в количестве  $n_1$  и  $n_2$  по направлениям  $x$  и  $y$ , соответственно и с основаниями площадью  $d_1 \times d_2$  ( $d_1/d_2 = \sqrt{3}$ ).

#### Модель А



#### Модель Б

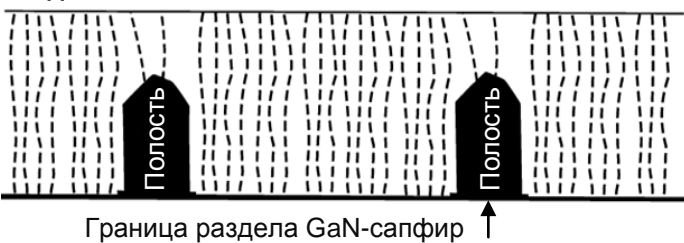


Рис. 3. Схематичное изображение траектории дислокаций вблизи стенок: больших полостей — модель «А»; малых полостей — модель «Б».

В конечно-элементном анализе использовался набор параметров:

$$K = \frac{d_1 - R}{H_f}; \quad A = \frac{R}{H_f}; \quad \frac{H_s}{H_f} = \text{const} = 225, \quad (6)$$

где  $A$  — это нормированный радиус вписанной в шестиугольник полости окружности радиуса  $R$ ,  $K$  — нормированный шаг полостей. Расчеты проводились для различных значений этих параметров. Отношение высот  $H_s/H_f$  (рис. 4 (а)) было выбрано соответствовавшим эксперименту.

В качестве представительной величины было выбрано нормированное гидростатическое напряжение

$$\frac{\text{tr}(\sigma)}{\text{tr}_{\text{poreless}}(\sigma)} = \frac{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})}{(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})_{\text{poreless}}} \quad (7)$$

ввиду инвариантности при изменении системы координат и прямой связи с биаксиальными напряжениями в тонком слое нитрида галлия без полостей на сапфировом основании. В рамках данной работы также была рассмотрена компонента напряжений  $\sigma_{zz}$ . Все нормализующие величины были взяты из расчета структуры подобного размера, не содержащей встроенные полости. Для количественной оценки релаксации производилось осреднение нормализованного гидростатического

напряжения в объеме вокруг полости. Сравнение среднего значения гидростатического напряжения в структурированном слое со значением напряжений в исходной структуре без наличия полостей показало, что введение полостей приводит к 20% падению напряжений.

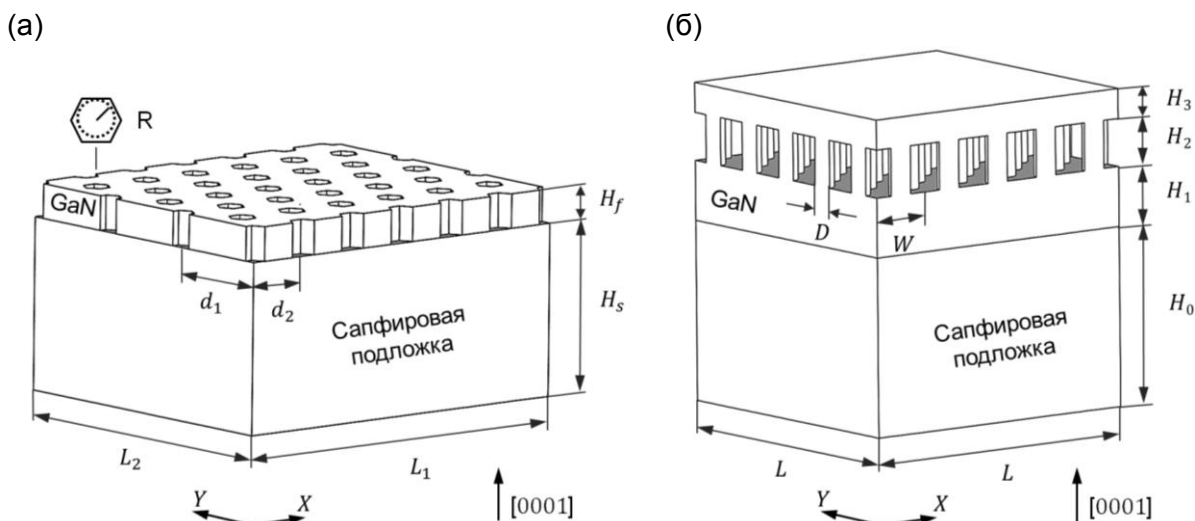


Рис. 4. Геометрические модели к расчету напряженно-деформированного состояния: модель с гексагональными полостями (а); модель с колоннами (б).

В диссертации проанализирована возможность образования трещин в исследуемых структурах. Для дискообразной трещины нормального раскрытия в полярной системе координат использовалась асимптотическая формула для коэффициента интенсивности напряжений. Для получения зависимости коэффициента интенсивности напряжений  $K_1$  от длины трещины проводились конечно-элементные расчеты с внесением в геометрию центральной полости радиальной дискообразной трещины. Полученное распределение компоненты напряжений  $\sigma_{zz}$  в направлении радиуса  $r_0$  вблизи фронта трещины аппроксимировалось функцией вида  $\sigma_{zz}(r, \theta_0, 0) = A/\sqrt{r-r_0}$ , находилась константа  $A$  и вычислялось значение  $K_1$  для текущей длины трещины. Из полученного распределения компоненты напряжений  $\sigma_{zz}$  для открытых полостей следовало, что возникающие напряжения  $\sigma_{zz}$  на границе GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> носят растягивающий характер, а их значения повышаются с увеличением нормированного радиуса полостей. Это способствует формированию трещин нормального раскрытия в указанной области.

Таким образом, проведенное численное моделирование напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных полостями слоях GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> показало, что наличие структуры полостей на границе GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> приводит к 20% падению гидростатических напряжений в слое нитрида галлия, и что увеличение нормированного радиуса полости приводит к уменьшению осредненного гидростатического напряжения в слое нитрида галлия, а эффект локализации напряжений усиливается с увеличением нормированного радиуса открытых полостей и может приводить к растрескиванию материала.

Во втором случае проводилось моделирование напряженно-деформированного состояния структуры GaN на сапфире с промежуточным слоем колонн в слое GaN. При моделировании была использована линейно-упругая модель с анизотропными свойствами материалов. Серия задач решалась в трёхмерной постановке с варьированием соотношений геометрических размеров колонн и промежутков, а также

толщины верхнего слоя GaN. Геометрия модели представлена на рис. 4 (б).

На рис. 5 показаны графики зависимости нормированного гидростатического давления, усредненного по указанному на рисунке объему, от относительного диаметра колонн  $D/W$  ( $D$  — диаметр колонн,  $W$  — размер ячейки периодичности,  $H_3$  — толщина верхнего слоя GaN) для трех вариантов высоты верхнего слоя GaN. Из графиков видно, что степень релаксации напряжений прямо пропорциональна относительному диаметру колонн  $D/W$  и обратно пропорциональна толщине  $H_3$  верхнего слоя GaN.

Для конфигурации  $H_3 = 0.5$  мкм,  $W = 0.7$  степень релаксации достигает 15%.

Далее в третьей главе диссертации построена математическая модель взаимодействия прорастающих дислокаций с полостями для количественной оценки уменьшения плотности данных дефектов. Рассматривалась модель с одним слоем полостей и её развитие — модель с двумя слоями встроенных полостей. В результате моделирования было показано, что использование двух последовательных слоёв с введенными полостями позволяет уменьшить плотность дислокаций вплоть до  $0.2-0.3 \cdot \rho_0$ .

В следующем параграфе третьей главы диссертации (§3.2.1.1) приведены результаты численного моделирования светоизлучающего полупроводникового кристалла (чипа) на основе GaN, которое было выполнено в рамках решения самосогласованной электро-тепло-световой задачи. Были рассчитаны взаимные зависимости прямого напряжения, мощности излучения и КПД чипа, и получены картины растекания тока в зависимости от изменений в геометрии электрода. Результаты расчетов показали, что оптимизация формы электродов может обеспечить прирост КПД более 8%.

Далее, в §3.2.1.2 третьей главы диссертации, рассмотрены технологические аспекты решения проблемы пробоя в светодиодных структурах, вызванного ЭСР. Известно, что основным механизмом пробоя, вызванного ЭСР, является перегрев из-за рассеивания джоулева тепла, поэтому ключевым фактором устойчивости светодиодов к электростатическому разряду является однородность плотности тока по поверхности. В диссертации предложено решение проблемы однородности путём введения в структуру двух слоёв с высоким удельным сопротивлением, называемых спейсерами, в область, прилегающую к активной. Идея заключалась в том, чтобы ограничить локальный пробой по току введением отрицательной обратной связи, которая подавит формирование токовых каналов. Расчётными методами показано, что ток через проводящие каналы в активной области светодиодной структуры с квантовыми ямами во время ЭСР может быть

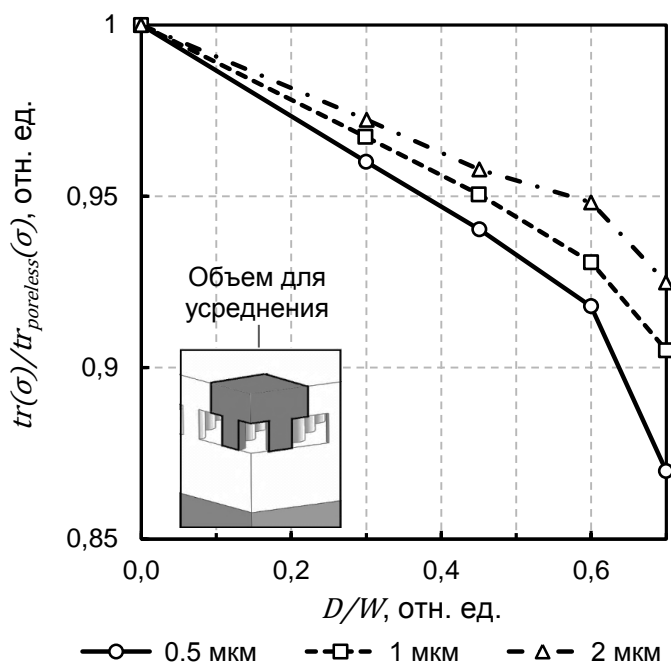


Рис.5. Зависимости нормированного гидростатического давления, усредненного по указанному на рисунке объему, в пленке GaN от относительного диаметра колонн при различных толщинах пленки  $H_3$ .

значительно снижен введением спейсеров с высоким удельным сопротивлением, прилегающих к активной области структуры. Установлено, что  $p$ -эмиттер толщиной 0.5 мкм и более может действовать как  $p$ -спейсер. В  $n$ -области необходимо введение номинально нелегированного  $n$ -спейсера, толщина которого должна выбираться для конкретной структуры таким образом, чтобы, с одной стороны, спейсер увеличивал устойчивость приборной структуры к ЭСР, а с другой, — не снижал внешний квантовый выход. Оптимальным является введение нелегированного спейсера и в  $p$ -области, а в  $n$ -области, — вариант, когда вначале вводится первый  $n$ -спейсер с высоким удельным сопротивлением, прилегающий к активной области, и толщиной  $w_{sp}$ , меньшей, чем диффузионная длина дырок в материале  $n$ -типа проводимости  $L_D$ , а затем вводится более толстый  $n^+$ -эмиттер. В этом случае внешний квантовый выход определяется концентрацией электронов в эмиттере, а устойчивость к электростатическому разряду определяется концентрацией носителей в спейсере.

В следующем параграфе третьей главы диссертации (§3.3) расчётными методами показано, как эффект резонансного асимметричного туннелирования заряда позволяет усилить захват электронов в активную квантовую яму и, таким образом, увеличить общую эффективность светодиодных структур. В диссертации были сформулированы условия реализации эффекта резонансного асимметричного туннелирования заряда в светодиодных структурах с обычными прямоугольными потенциальными ямами и потенциальными ямами со встроенными электрическими полями. Выращенные и протестированные светодиодные структуры с эффектом резонансного асимметричного туннелирования заряда на основе потенциальных ям GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN подтвердили положительный эффект от предложенной конфигурации структур.

Окончание третьей главы диссертации (§3.4 и §3.5) посвящено моделированию, проведенному с целью повышения эффективности вывода света из светодиодного модуля «чип-на-плате» и оптимизации отвода тепла в осветительных системах со светодиодными модулями. Здесь методами компьютерного моделирования с использованием программного пакета ZEMAX показано, что повышение эффективности вывода света из модулей типа «чип-на-плате» (англ., “chip-on-board”, COB) может быть достигнуто созданием оптического элемента из герметизирующего покрытия (например, силиконового эластомера), снижающего количество лучей, претерпевающих полное внутреннее отражение на границе «воздух–эластомер». Установлено, что для рассмотренной конструкции COB с 9 чипами на подложке является форма покрытия, где над каждым чипом находится выпуклая линза с близкой к сферической формой с минимально возможным радиусом кривизны (с максимально возможной высотой). Также методами компьютерного моделирования с использованием пакета COMSOL показано, что в существующих конструкциях систем теплоотвода светодиодных ламп замещения теплопроводность алюминия является избыточной и используется неэффективно. Продемонстрировано, что существенного снижения температуры чипов (до 30°C) можно достичь при использовании комбинированного металлопластикового распределителя тепла. Показано, что утолщение оснований ребер системы теплоотвода для варианта с пластиковым радиатором производит эффект, сходный с эффектом от использования материала с более высокой теплопроводностью.

Третью часть диссертации, посвященную разработке эффективных практических способов оптимизации свойств светодиодных структур на основе нитридов металлов III группы, открывает четвертая глава, в которой представлен новый метод роста эпитаксиальных слоёв нитридов металлов III группы, сочетающий две ключевых



технологии: 1) оптимизации параметров появления и роста зародышевых островков; 2) реализации многостадийного процесса выращивания ЭС согласно модели, описанной в третьей главе. В ходе разработки данного метода, в соответствии с моделью, была предложена экспериментальная методика создания нуклеационного слоя GaN с низкой плотностью островков зарождения, проведена оптимизация метода поэтапного роста GaN путём контроля плотности островков нуклеации на этапе низкотемпературного роста и разработана технология регулирования размера островков на этапе высокотемпературного выращивания нуклеационного слоя GaN. В данной главе также рассмотрено уменьшение плотности ростовых дислокаций в рамках метода многостадийного роста GaN и проанализированы перенаправление и реакции проникающих дислокаций. Ключевым моментом многостадийного процесса роста явился оптимальный выбор технологических условий, которые позволили прецизионно контролировать как форму, так и количество центров нуклеации ЭС. Для этого были использованы чередующиеся циклы «низкотемпературный рост — рекристаллизационный отжиг». В результате формировались нуклеационные слои с требуемой морфологией. В рамках одного цикла нанесение GaN проводилось в ГФЭ МОС реакторе при температуре 530°C (низкотемпературный рост, скорость молярного потока триметилгаллия (TMGa) 60 мкмоль/мин, поток аммиака 2 л/мин). Последующий рекристаллизационный отжиг проводился *in situ* в ГФЭ МОС реакторе с условиях постепенного поднятия температуры до 1060°C в течение 300 с. Морфология нуклеационных слоёв контролировалась в процессе роста с помощью рефлектометра, встроенного в ростовую установку, а также изучалась с применением метода АСМ после окончания роста.

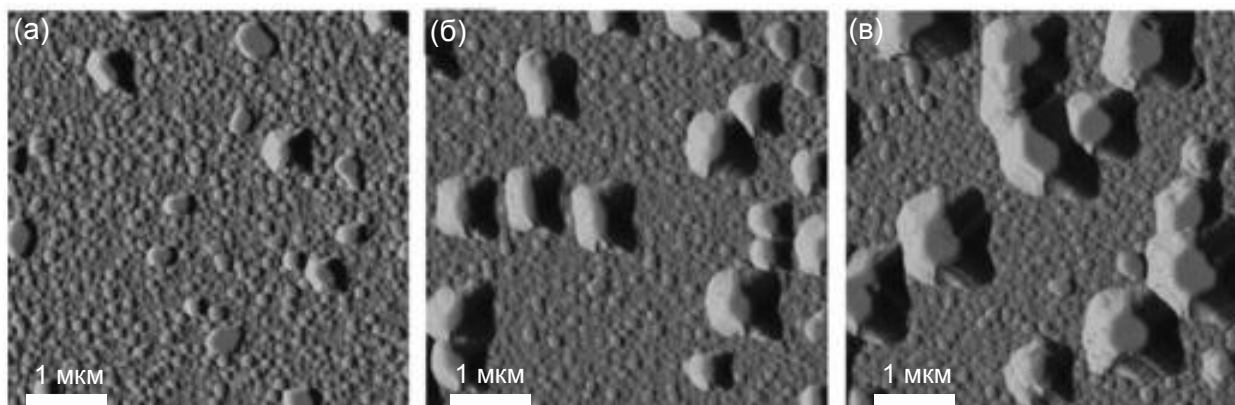


Рис. 6. Данные атомно-силовой микроскопии, иллюстрирующие морфологию образцов, выращенных с использованием одного (а), двух (б) и четырёх (в) циклов «рост-отжиг».

Приведенные на рис. 6 данные АСМ отображают морфологию поверхности трех образцов, которые были выращены с использованием одного, двух и четырёх циклов осаждения-рекристаллизации соответственно. Из приведенных изображений поверхности нуклеационных слоёв видно, что плотность островков практически не отличается для каждого из образцов, и составляет величину на уровне  $6 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$ , а средняя высота увеличивается и составляет соответственно 135 нм (а), 375 нм (б) и 410 нм (в). Это указывает на то, что после двух циклов низкотемпературного осаждения GaN происходит насыщение роста островков в направлении [0001]. Таким образом, показано, что предложенный многостадийный метод позволяет регулировать плотность и размер островков зарождения.

С целью дальнейшей оптимизации метода многоступенчатого роста было изучено влияние скорости потока газа-носителя и общего давления в реакторе на эволюцию морфологии плёнки нуклеационного слоя во время начальных стадий высокотемпературного зарощивания. В результате было установлено, что с увеличением общего давления в ГФЭ МОС реакторе возможно осуществление подавления известного эффекта нежелательной нуклеации высокотемпературного слоя GaN в местах, расположенных между островками зарождения на поверхности ранее сформированного низкотемпературного нуклеационного слоя. На рис. 7 (а–г) представлены изображения АСМ поверхности образцов, обозначенных соответственно как А, В, С и D. Общая скорость потока водорода и давление в реакторе составляли 10.5 л/мин и 200 Торр — для образца А; 10.5 л/мин и 400 Торр — для образца В; 12 л/мин и 500 Торр — для образцов С и D. Температура роста составляла 1060°С для каждого из образцов. Время роста составляло для образцов А, D и С 300 с; для образца D — 700 с. Из сравнения рис. 7 (а) и (б) явно следует, что увеличение давления в реакторе понижает нуклеацию высокотемпературного ЭС между низкотемпературными островками зарождения. Однако полученная плотность островков GaN порядка  $3.0 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$  (образец В) была выше, чем плотность островков в исходном образце —  $1.7 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$ . Полное подавление нежелательной нуклеации удалось достичь при одновременном увеличении как скорости потока газа-носителя (до 12 л/мин), так и общего давления в реакторе (до 500 Торр). Это можно видеть на примере образцов С и D (изображения (в) и (г)), где плотность островков порядка  $1.7 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$  соответствует плотности островков зарождения в исходном нуклеационном слое и остается неизменным с увеличением времени высокотемпературного зарощивания. При этом видно, что увеличение времени высокотемпературного процесса роста (для образца D) сопровождается лишь увеличением размера (разращиванием) островков. Для демонстрации возможности снижения плотности дислокаций в образцах GaN, полученных методом многостадийного процесса роста, были выращены образцы с применением традиционно используемого ГФЭ МОС метода, и по рассмотренной многостадийной технологии.

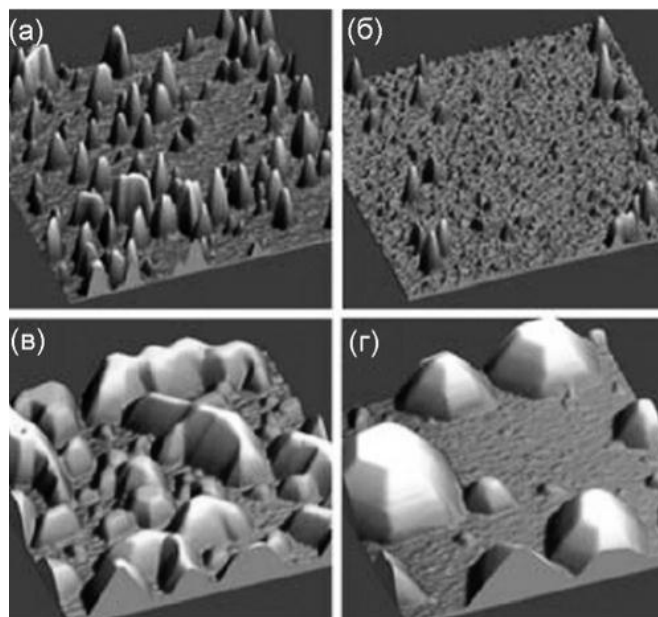


Рис. 7. Данные атомно-силовой микроскопии, иллюстрирующие морфологию поверхности плёнок GaN в начале процесса высокотемпературного зарощивания. Вид поверхности образцов А, В и С представлен на изображениях (а), (б), (в) соответственно; время роста для указанных образцов составляло 300 с. Вид поверхности образца D представлен на изображении (г), для которого время высокотемпературного роста составляло 700 с.

Для определения плотности ПД образцы травились в смеси ортофосфорной и серной кислот, плотность ямок травления измерялась с помощью АСМ. На рис. 8 представлены данные АСМ от двух плёнок GaN толщиной 2.3 мкм с ямками травления на

поверхности. Рис. 8 (а) показывает распределение ямок травления для образца, выращенного по стандартной технологии. Рис. 8 (б) показывает распределение ямок травления на поверхности образца, в котором нуклеационный слой был выращен по многостадийной технологии, подобно тому, как это было сделано для образца В (см. рис. 7). Рассчитанная плотность ямок травления составила для этих образцов соответственно  $6-7 \times 10^8 \text{ см}^{-2}$  и  $3 \times 10^7 \text{ см}^{-2}$ .

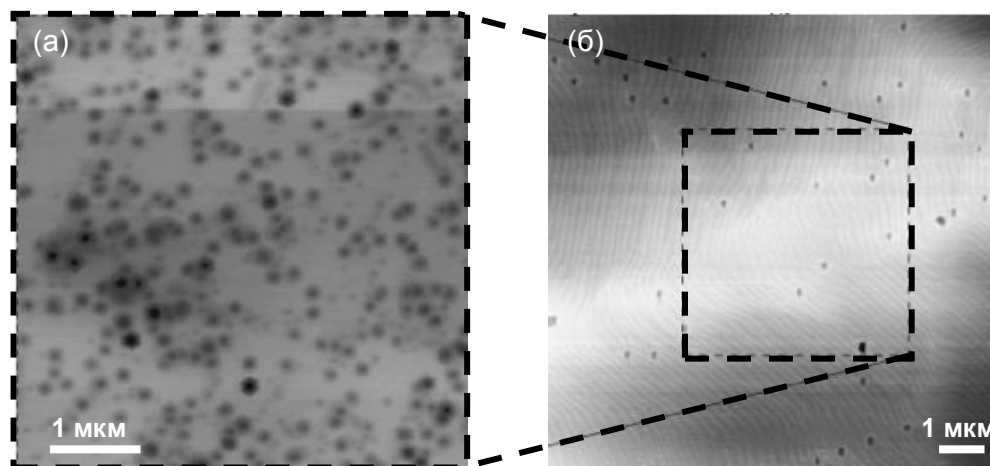


Рис. 8. Данные атомно-силовой микроскопии, показывающие плотность ямок дислокационного травления в слоях GaN, выращенных стандартным (а) и многостадийным (б) методами. Во втором случае наблюдается двадцатикратное уменьшение плотности ПД.

Метод был применен для многостадийного роста эпитаксиальных слоёв нитридов металлов III группы с целью создания светодиодных структур на основе МКЯ  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$

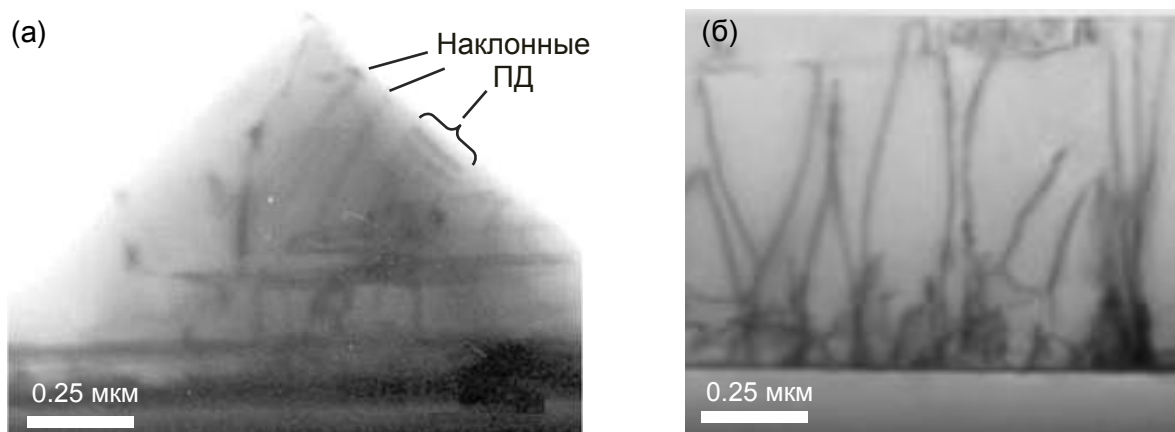


Рис. 9. Данные просвечивающей электронной микроскопии, показывающие систематически наклонные ПД в островках GaN (а) и преимущественно вертикальные ПД в сплошном слое GaN (б). Снимки получены в дифракционных условиях, когда используется два отражения с дифракционными векторами  $\mathbf{g} = 0002$  и  $\mathbf{g} = 01\bar{1}0$  для извлечения максимальной информации об общем количестве ПД.

и для выращивания эпитаксиальных слоёв  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ . Для определения ориентации дислокаций в островках зарождения, зарощенных при температуре с низким отношением V/III, был использован метод просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ). Пример

результатов исследования для одного из полученных образцов представлен на рис. 9 (а). Исследованный образец был выращен в ходе процесса, который был прерван до наступления коалесценции разрастиваемых островков. Можно видеть, что ПД отклонились от направления [0001] и оказались перпендикулярными граням островков с высокими кристаллографическими индексами, что отличается от стандартного поведения ПД в сплошных слоях GaN (см. рис. 9 (б)), где преобладают вертикальные ПД.

В пятой главе диссертации экспериментально реализован способ контролируемого введения и зарастивания полостей при возобновляемом росте GaN на гексагонально-структурированной подложке. Здесь рассмотрена проблема создания гексагонально-структурированных подложек GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и проанализирован рост на таких подложках с точки зрения влияния условий роста и геометрических параметров подложек на качество эпитаксиальных слоёв. В рамках решения поставленной задачи было также исследовано поведение ПД в эпитаксиальных слоях GaN, выращенных на гексагонально-структурированных подложках GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Были исследованы образцы, где в подложках были сформированы гексагональные отверстия с диаметром 2, 3 и 4.5 мкм. После зарастивания в ЭС GaN образовались полости с наклоном стенок соответственно 85°, 70° и 60°. Было установлено, что по мере увеличения диаметра отверстий, значения ширины на полувысоте кривых рентгеновской дифракции ЭС GaN в моде ω-сканирования, полученных в отражении (302), уменьшаются, составляя соответственно 522, 453 и 223 угл. сек. Исследования эффекта перенаправления дислокаций в выращенных ЭС подтвердили, что формирование высокоиндексных кристаллографических граней действительно является причиной изменения направления дислокаций, приводящего к снижению их плотности в наращиваемых ЭС, как и предсказывала соответствующая модель. Результаты анализа данных просвечивающей электронной микроскопии по критерию невидимости и данных рентгеновской дифракции показали, что дислокации, загибающиеся вблизи стенок внутренних полостей в эпитаксиальных слоях, выращенных на структурированных подложках, являются либо чисто краевыми, либо смешанными.

В шестой главе диссертации рассмотрены методы структурирования подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, направленные на увеличение выходной мощности излучения нитридных светодиодных структур. Предложена технология получения подложек Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с заданным рельефом поверхности и рассмотрен процесс роста эпитаксиальных слоёв GaN на таких подложках. В данной главе исследованы свойства светодиодных структур на основе In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N квантовых ям, выращенных с использованием сапфировых подложек с контролируемой топологией поверхности, и рассмотрены методы масочного и безмасочного структурирования сапфировой подложки для улучшения вывода света из нитридных светодиодных структур.

В начале главы описано структурирование ростовой поверхности сапфировых пластин, которое проводилось с использованием химического травления в смеси кислот H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> при температуре 300°C. Для травления использовались два различных типа масок из SiO<sub>2</sub>: с низкой и высокой плотностью распределения гексагональных сот с элементами, имевшими латеральный размер 4 мкм и 3 мкм, с расстоянием между элементами соответственно 3 мкм и 1.5 мкм. В зависимости от типа маски и времени выдержки пластин в травителе был получен набор образцов, имевших следующие типы структур: колонные структуры с низкой плотностью и высотой гексагональных колонн 300, 550 и 700 нм, и структуры с высокой плотностью колонн с высотой колонн 500, 800 и 1300 нм. Полученные зависимости плотности ямок дислокационного травления от типа структур, сформированных на поверхности использованных подложек сапфира, показали,

что для подложек с высокой плотностью колонн наблюдались низкие значения плотности ПД, которые были сравнимы по величине между собой. Наименьшая плотность ПД наблюдалась для высоты колонн в 1050 нм. В случае подложек с низкой плотностью колонн высота колонн оказалась более критичной, наибольшее снижение плотности ПД было достигнуто при использовании структурированной сапфировой подложки с колоннами высотой 300 нм. В этом случае значение плотности ПД оказалось таким же, что и для подложек с высокой плотностью колонн. Однако с увеличением высоты колонн в структуре с низкой плотностью колонн наблюдалось возрастание плотности дислокаций.

На рис. 10 представлены результаты исследования ФЛ светодиодных структур на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , выращенных на структурированных сапфировых подложках. Из представленных спектров видно, что все образцы, выращенные с использованием структурированных сапфировых подложек, показали более высокую интенсивность ФЛ (спектры 1, 2 и 3) по сравнению с референсным образцом, выращенным на планарной сапфировой подложке (кривая 0). При измерениях ЭЛ, когда тестировались 500 индивидуальных чипов на каждой пластине, было установлено, что светодиоды, созданные на структурированной сапфировой подложке, всегда показывали более интенсивную ЭЛ по сравнению с референсной структурой на планарной подложке. Поскольку параметры, отражавшие степень структурного совершенства материала для ЭС, выращенных на структурированных и планарных подложках, были близки, был сделан вывод, что наблюдаемое повышение эффективности светодиодных структур было обусловлено в основном топологией структуры поверхности подложек.

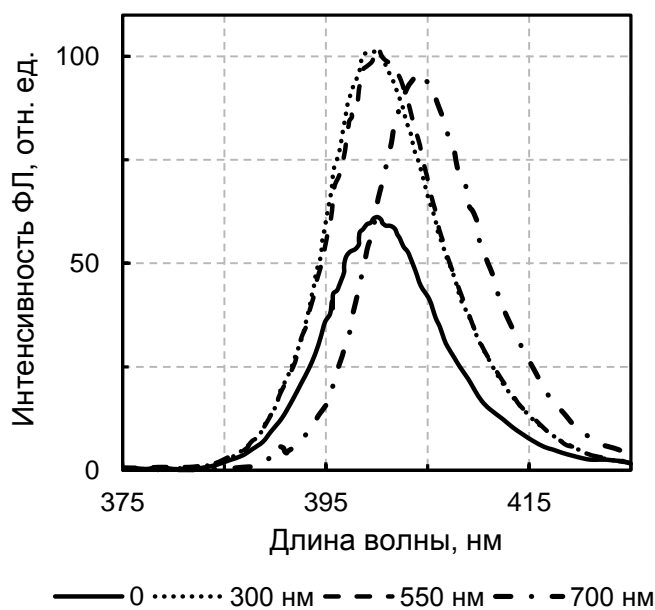


Рис. 10. Спектры ФЛ структур, выращенных на планарной подложке (0), и на подложке с низкой плотностью колонн и различной высотой колонн: 300, 550 и 700 нм. Интенсивность пика ФЛ для образца с высотой колонн 300 нм принята за 100.

Также в этой главе рассмотрен метод структурирования *внешних* поверхностей светодиодных структур, то есть, обратной поверхности использованных сапфировых подложек. Структурирование поверхностей подложек (исходно обработанных шлифовкой) проводилось их выдержкой в серной кислоте ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), нагретой до температуры  $300^\circ\text{C}$ . Перед проведением указанной обработки поверхность ЭС маскировалась слоем  $\text{SiO}_2$  для защиты от воздействия травителя. После проведения обработки защитный слой диоксида кремния удалялся. По результатам измерения зависимости выходной мощности ЭЛ от тока для светодиодных структур, на части из которых была проведена указанная выше процедура, было установлено, что в структурах, выращенных на обработанных подложках, выходная мощность света, выводимого со стороны подложки, была на 20–25% выше по сравнению со структурами, не подвергнутыми обработке. Очевидно, что в этом случае элементы структурированной поверхности играют роль объектов, рассеивающих свет, что препятствует его полному

внутреннему отражению на границе раздела и увеличивает мощность излучения при условии вывода света из структур со стороны подложки.

В седьмой главе рассмотрены эпитаксиальные методы создания светодиодных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  и предложены новые приёмы по совершенствованию этой технологии. В частности, оптимизировано получение ЭС GaN *p*-типа проводимости при легировании магнием, исследовано влияние концентрации индия в подслое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  на выходную мощность ЭЛ светодиодов, создаваемых на основе структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ , и проведена оптимизация свойств блокирующего слоя  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  в светодиодных структурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  и структур на основе  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_x\text{Al}_y\text{Ga}_{1-x-y}\text{N}$  с множественными квантовыми ямами для создания эффективных светодиодов, излучающих в ближней ультрафиолетовой области.

В первом параграфе этой главы рассматривается проблема получения ЭС GaN *p*-типа проводимости при легировании магнием. Активация магния (Mg) как акцептора в слоях GaN является одним из ключевых шагов в изготовлении оптоэлектронных приборов на основе нитридов металлов III группы. Слои GaN, легированные магнием в условиях эпитаксиального процесса, обычно обладают большим удельным сопротивлением и не обладают выраженным *p*-типом проводимости. Причину электрической неактивности Mg, введенного в слои во время ростового процесса, связывают с эффектом пассивации этой примеси водородом, который используется при выращивании эпитаксиальных слоёв нитрида галлия в качестве газа-носителя. На момент начала работы по данной теме были известны результаты, указывающие на то, что материал *p*-типа проводимости может быть получен непосредственно в процессе эпитаксии, если в качестве газа-носителя используется азот. Однако роль газа-носителя оставалась до конца не выясненной, поэтому в ходе диссертационной работы было проведено исследование, проясняющее влияние как типа газа-носителя, так и условий пост-ростовой активации Mg, на электрические свойства ЭС GaN *p*-типа проводимости. Для этого слои GaN, легированные Mg, выращивались в атмосфере водорода ( $\text{H}_2$ ) или в атмосфере азота ( $\text{N}_2$ ) при температуре 1000 °С и соотношении компонентов V/III, равном 1100. Скорость потока использованных газов-носителей была одинаковой и составляла 9000 см<sup>3</sup>/мин. Скорость потока Mg изменялась в пределах 275–400 см<sup>3</sup>/мин для атмосферы водорода и 100–300 см<sup>3</sup>/мин для атмосферы азота. После роста образцы охлаждались в смеси газа-носителя и аммиака. Эксперименты по термической активации проводились в атмосфере азота и в атмосфере кислорода. Температура отжига варьировалась с целью определения оптимальных условий активации акцепторной примеси. Время отжига составляло 30 минут. Электрические свойства эпитаксиальных слоёв GaN *p*-типа проводимости исследовались с применением метода Холла в геометрии Ван-дер-Пау.

Из данных исследования эффекта Холла было установлено, что для каждого газа-носителя, использованного при росте, существует своя оптимальная скорость протока Mg (скорость, при которой достигается увеличение концентрации дырок и уменьшение удельного сопротивления эпитаксиальных слоёв, подвергнутых отжигу). Результаты показали, что оптимальная скорость потока Mg существенно меньше в случае использования в качестве газа-носителя азота. По результатам экспериментов с активационными отжигами было определено, что существует определенный температурный диапазон (550–600°С), где удельное сопротивление достигает минимальных значений для каждой из использованных атмосфер отжига. При этом было установлено, что активационные отжиги более эффективны для эпитаксиальных слоёв GaN, выращенных в атмосфере водорода. В этом случае для температуры отжига

существует чёткий предел в 550°C, выше которого удельное сопротивление остается постоянным вне зависимости от атмосферы, в которой проводился отжиг. В результате совокупности экспериментов был сделан вывод о том, что эффективность постростовой активации магния как акцепторной примеси в GaN выше, если ЭС выращиваются в атмосфере водорода. Для таких слоёв активационные отжиги можно проводить в широком диапазоне температур без строгих ограничений на выбор атмосферы отжига.

Второй параграф седьмой главы диссертации посвящен исследованию влияния концентрации индия в подслое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  на выходную мощность электролюминесценции светодиодов, создаваемых на основе структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$ . В таких структурах из-за различия оптимальных условий выращивания GaN и  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  возникает необходимость в прерывании ростового процесса для набора температуры и смены газа-носителя перед началом формирования активной области светодиодных структур. В условиях прерывания роста велика вероятность возникновения центров безызлучательной рекомбинации в области структуры, находящейся непосредственно под набором КЯ. На эффективность излучения из КЯ также влияет неоднородность распределения In и высокая плотность дислокаций, возникающих при релаксации напряжений несоответствия. Для управления уровнем напряжений в структуре с КЯ, снижения плотности центров безызлучательной рекомбинации и ограничения уровня колебаний содержания индия в работе развился подход, использующий введение подслоя  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  под активной областью светодиодной структуры. На рис. 11 приведены спектры ЭЛ образцов светодиодных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  с различным содержанием In, где наибольшая интенсивность ЭЛ приведена к значению 100 условных единиц. Как видно, интенсивность ЭЛ возрастает с увеличением содержания In в подслое от 0 до 1.5%, а затем, при дальнейшем увеличении концентрации индия, уменьшается. Образец с содержанием In в подслое 1.5%, показал увеличение интенсивности ЭЛ на 50% при токе инжекции 20 мА. В спектрах всех образцов с подслоем  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , наблюдались:

уменьшение значения полуширины пика ЭЛ (для образца, содержащего 1.5% In — на 25%) и коротковолновый сдвиг пика (на 15 нм для того же образца) относительно референсного образца с 0% содержанием In, выращенного без подслоя. Дополнительно, в образцах, содержащих 0.7% и 1.5% In, наблюдалось увеличение интенсивности ЭЛ по сравнению с референсным образцом. Данные ВИС показали, что эффект присутствия подслоя проявлялся в формировании области с градиентным возрастанием концентрации In перед самой нижней КЯ и меньших вариациях концентрации In от одной ямы к другой, что и объясняет уменьшение полуширины пиков ЭЛ (а также ФЛ) в образцах с подслоем по сравнению с референсным образцом. В образцах с подслоем также наблюдалось 10–20% снижение

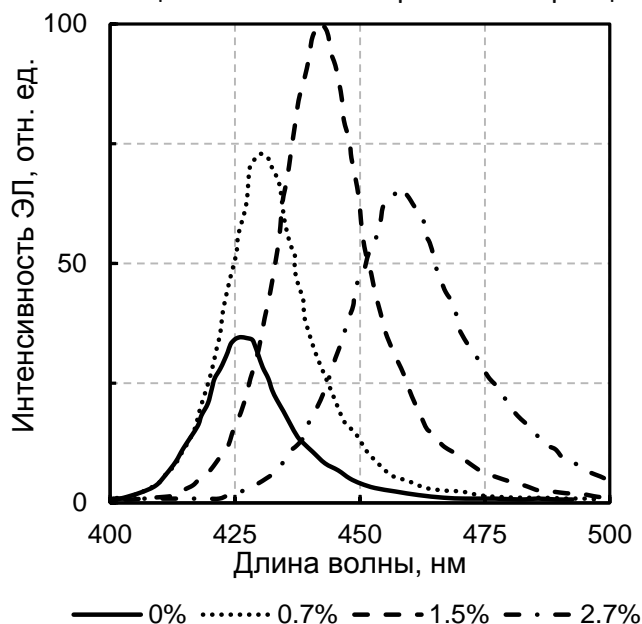


Рис. 11. Спектры ЭЛ светодиодных структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  без подслоя и с подслоем с различным содержанием In.

плотности ПД. Таким образом, было установлено, что выбор эпитаксиального подслоя с оптимальным составом (при содержании индия 1.5%) позволяет повысить однородность распределения индия в наборе КЯ и достичь снижения плотности ПД в активной области светодиодных структур, что приводит к увеличению выходной мощности электролюминесценции светодиодных структур.

В третьем параграфе седьмой главы диссертации рассмотрены результаты работы по оптимизации свойств блокирующего слоя  $Al_xGa_{1-x}N$  в светодиодных структурах  $In_xGa_{1-x}N/GaN$ . Блокирующие слои (также называемые «слои, блокирующие электроны», СБЭ) служат для предотвращения перетекания электронов из активной области в область  $p$ -контакта. Обычно в качестве СБЭ используются слои  $Al_xGa_{1-x}N$ , однако широкая запрещенная зона этого материала приводит к разрывам зон как в валентной зоне, так и в зоне проводимости, поэтому такой СБЭ обычно блокирует не только электроны, но и дырки. Проблема, связанная с блокированием дырок, может быть решена, если в качестве блокирующих слоёв использовать слои  $Al_xGa_{1-x}N$   $p$ -типа проводимости, получаемые легированием Mg. Это ведет к искривлению зон и созданию более эффективного барьера для электронов, нежели для дырок. Однако при таком подходе имеет место нежелательный эффект обратной диффузии атомов Mg из блокирующего слоя в активную область, а эти атомы могут служить центрами безызлучательной рекомбинации и понижать эффективность светодиодов. В рамках работы был развит подход, когда поверх набора КЯ выращивался тонкий разделительный слой нелегированного GaN (спейсер), назначением которого являлась защита активной области от воздействия высоких температур и диффузии магния при выращивании слоёв  $p$ -типа проводимости.

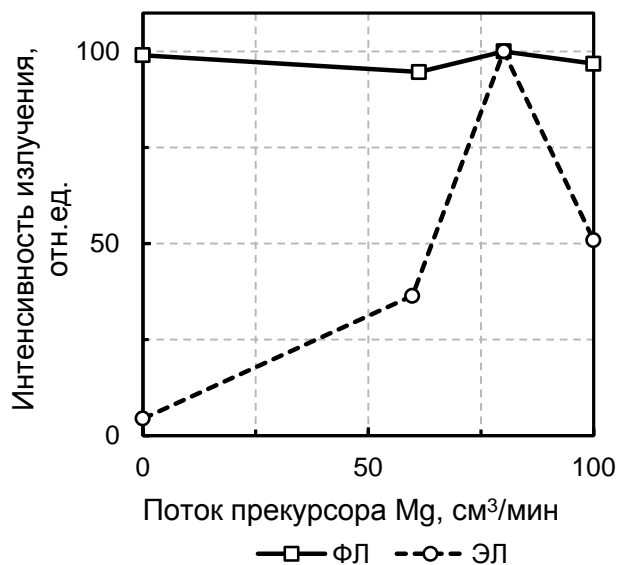


Рис. 12. Относительные интенсивности фото- и электро-люминесценции структур, полученных при различных потоках прекурсора Mg в ходе выращивания СБЭ на основе  $Al_xGa_{1-x}N$ .

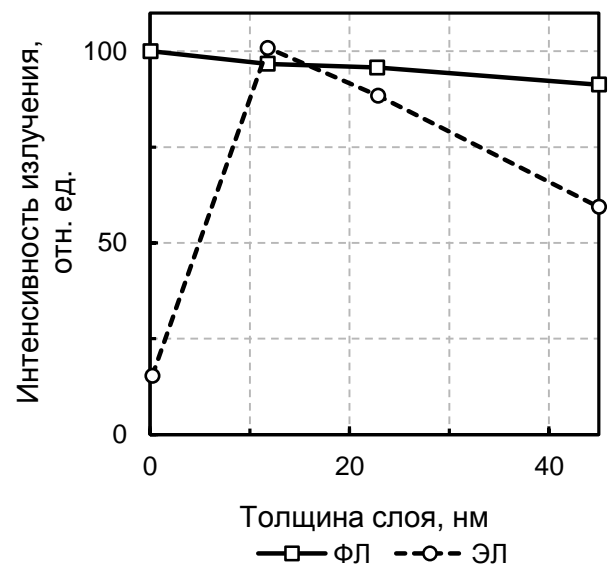


Рис. 13. Относительные интенсивности фото- и электро-люминесценции структур с различными толщинами СБЭ.

Для того чтобы оценить, как уровень легирования СБЭ влияет на оптические свойства светодиодов, была изготовлена серия структур с различным уровнем легирования этого слоя, а для того, чтобы исследовать влияние толщины СБЭ на работу



светодиода, была выращена еще одна серия образцов с различными толщинами блокирующего слоя. Результаты измерений интенсивности ФЛ и ЭЛ в зависимости от величины потока прекурсора Mg представлены на рис. 12, где видно, что на зависимости интенсивности ЭЛ от потока Mg имеется явный максимум, в то время как интенсивность ФЛ практически одинакова для всех образцов.

На профилях ВИМС исследованных структур (приведены в диссертации) обращает на себя внимание тот факт, что кривая распределения Al имела асимметричную форму. Причиной этого, наиболее вероятно, является более глубокая диффузия Al в спейсер GaN, нежели в слой *p*-GaN (вследствие худшего кристаллического качества спейсера). Результаты ВИМС также показали и наличие диффузии магния в спейсер из слоёв *p*-типа. Полученный результат позволил сделать вывод, что диффузия Mg протекает более интенсивно в область спейсера, нежели в другие слои светодиодной структуры, выращенные при более высоких температурах. Это подтвердили и результаты исследований серии образцов, где при прочих равных условиях выращивая толщина СБЭ изменялась от 0 до 45 нм, данные измерений ФЛ и ЭЛ этих структур представлены на рис. 13. Можно видеть что, как и для предыдущей серии структур, интенсивность ФЛ оставалась на одном и том же уровне во всех образцах, что свидетельствует об идентичности свойств их активной области. Наблюдаемое уменьшение интенсивности ЭЛ с увеличением толщины слоя, блокирующего электроны, начиная с толщины 12 нм, может быть объяснено неадекватной инжекцией дырок из области контакта *p*-GaN в область, содержащую КЯ. Можно говорить о двух вероятных причинах такого поведения: (1) диффузия Mg из сильно легированного слоя *p*-GaN в слой спейсера уменьшается с увеличением толщины СБЭ; (2) более низкое кристаллическое качество  $Al_xGa_{1-x}N$  *p*-типа проводимости препятствует эффективной инжекции дырок из *p*-GaN в область, содержащую КЯ. В любом случае, влияние СБЭ ясно видно при сравнении выходной мощности ЭЛ структур с этим слоем и без него. Таким образом, проведенные эксперименты по оптимизации структур показали, что для достижения необходимой инжекции дырок в область, содержащую КЯ, требуется достаточно высокий уровень легирования, однако избыточное легирование ухудшает кристаллическое совершенство слоя и его электрические свойства. При этом толщина СБЭ должна быть минимально возможной для поддержания эффективной инжекции дырок, и в то же время достаточной для предотвращения перетекания электронов в слой *p*-GaN.

Кроме прямого результата, данное исследование позволило внести уточнения в выводы, сделанные по итогам оптимизации светодиодных структур на основе КЯ с точки зрения их устойчивости к электростатическому разряду, представленные выше. Несмотря на то, что *p*-эмиттер в принципе может выполнять функцию *p*-спейсера, ограничивающего ток через активную область при ЭСР, из представленных в данном разделе результатов однозначно следует, что оптимальным является введение дополнительного нелегированного спейсера не только с *n*-, но и с *p*-стороны нитридной гетероструктуры.

В заключительном параграфе седьмой главы (§7.4) представлены результаты по оптимизации структур на основе  $In_xGa_{1-x}N/In_zAl_yGa_{1-z-y}N$  с множественными квантовыми ямами для создания эффективных светодиодов, излучающих в ближней ультрафиолетовой области. Здесь было показано, что при росте ЭС  $In_xAl_yGa_{1-x-y}N$  с увеличением потока триметилиндия (TMIn), наблюдается увеличение содержания индия в четверном твердом растворе, которое сопровождается уменьшением содержания в нем алюминия. Было установлено, что однородное распределение как In, так и Al, достигается при выборе оптимального потока TMIn. В структурах с КЯ резкость границ раздела и

однородность состава определяются содержанием In в барьерных слоях. Увеличение содержания In в барьерном слое свыше 0.008 (до 0.016) приводит к появлению неоднородного распределения в нем Al, и, как следствие, — к снижению квантовой эффективности светодиодных  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_z\text{Al}_y\text{Ga}_{1-z-y}\text{N}$  структур.

В четвёртой части диссертации описана реализация предложенных научных подходов и технических решений при разработке новых светодиодных приборов. В частности, в восьмой главе представлены сведения о разработке и тестировании чипов светодиодов, работающих в области ближнего ультрафиолета, созданных на основе структур  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{GaN}$  с рассеивающими свет внутренними полостями, введёнными на границе раздела GaN — сапфир. Для формирования внутренних полостей в выращиваемых светодиодных структурах были использованы исходные структурированные подложки GaN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (композитные подложки). На основе проведенных измерений было установлено, что при использовании композитных подложек достигается увеличение выходной оптической мощности по сравнению с референсным образцом, выращенным на стандартной сапфировой подложке, для которого мощность излучения составляла 9.4 мВт при токе инжекции 20 мА. Увеличенные значения мощности излучения для светодиодных структур, полученные на композитных подложках с углами наклона стенок введённых полостей 85° и 60°, составляли соответственно 10.2 и 11.4 мВт. Исследования электрических параметров показали, что последовательное сопротивление и обратные токи утечки для светодиодов с наклоном стенок полостей в 60° были гораздо меньше, чем для референсной структуры.

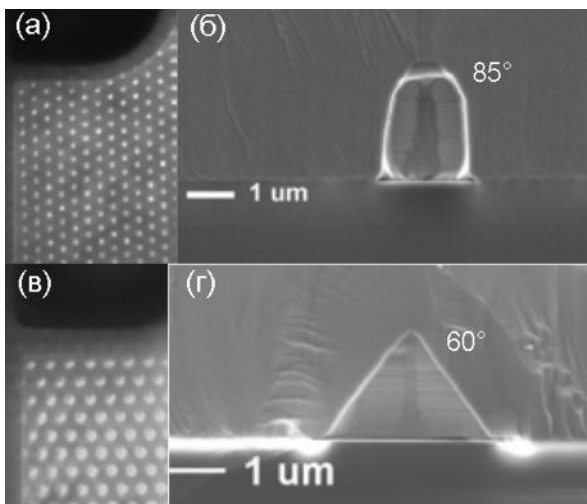


Рис. 14. Внешний вид поверхности чипов во время работы (а) и (в), изображения СЭМ встроенных полостей (б), (г), угол наклона стенок которых, соответственно, 85° и 60°.

На рис. 14 представлены оптические изображения двух различных светодиодных чипов с длиной волны излучения 405 нм, полученные в рабочем режиме при токе инжекции 50 мА. Представленные результаты ясно указывают на повышение эффективности вывода света в структурах, выращенных на композитных подложках по сравнению с референсным образцом светодиода вообще и в структуре, содержащей полости с углом наклона стенок 60°, в частности. В последнем случае наиболее выраженное улучшение вывода света, приведенное на рис. 15, может быть приписано общему эффекту улучшения качества материала и повышению рассеивающей способности внутренних полостей в силу особенности их геометрии: большего размера и большего угла наклона стенок относительно нормали к поверхности образца.

В девятой главе диссертации представлены практические результаты развития эпитаксиальных светодиодных технологий на основе научных разработок, предложенных в диссертации. Значительная часть этих разработок была положена в основу решений в области улучшения эпитаксиальных технологий, используемых группой компаний «Оптоган», одним из основателей которой является автор диссертации, при промышленном производстве светодиодных чипов, светодиодов и светодиодных сборок.

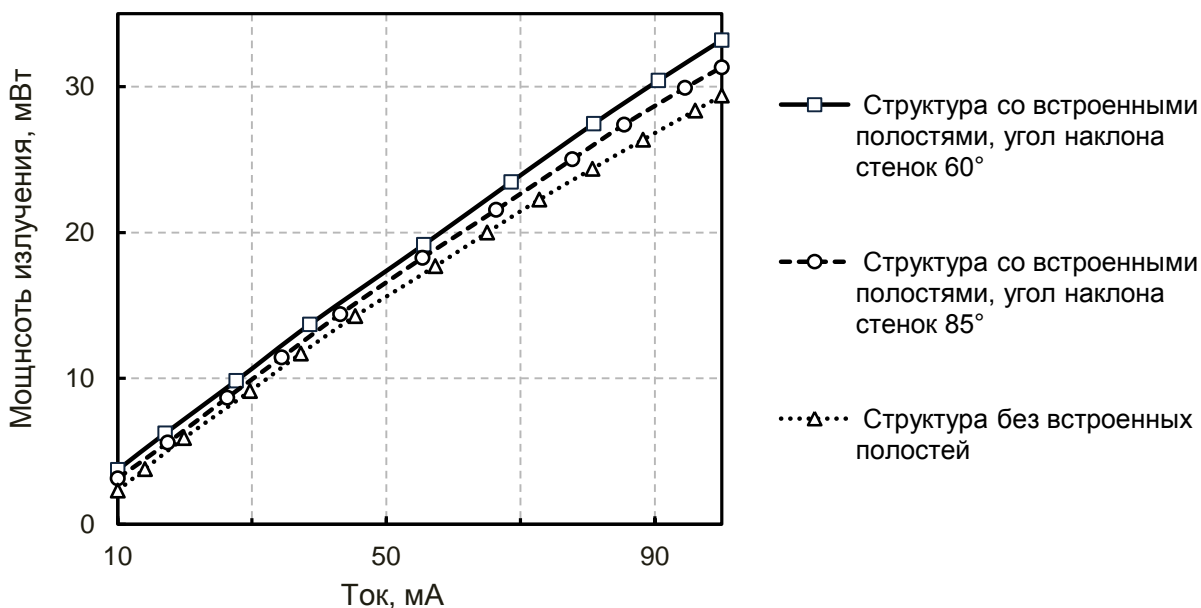


Рис. 15. Зависимость мощности излучения светодиодов от рабочего тока при наличии встроенных полостей с углом наклона 85° и 60° и без полостей.

В развитии эпитаксиальных технологий Оптогани связанном с ним увеличении выходной мощности светодиодных структур, имевшем место с 2003 г. по настоящее время, ключевыми моментами стали именно разработки, описанные в диссертации: оптимизация процессов нуклеации GaN на сапфировой подложке, огрубление поверхности GaN *p*-типа проводимости для улучшения вывода света из структуры, улучшение параметров активной области (оптимизация числа квантовых ям и условий их выращивания), введение слоя, блокирующего ток, структурирование сапфировых подложек, применение приёмов, повышающих устойчивость структур к ЭСР, и т.п.

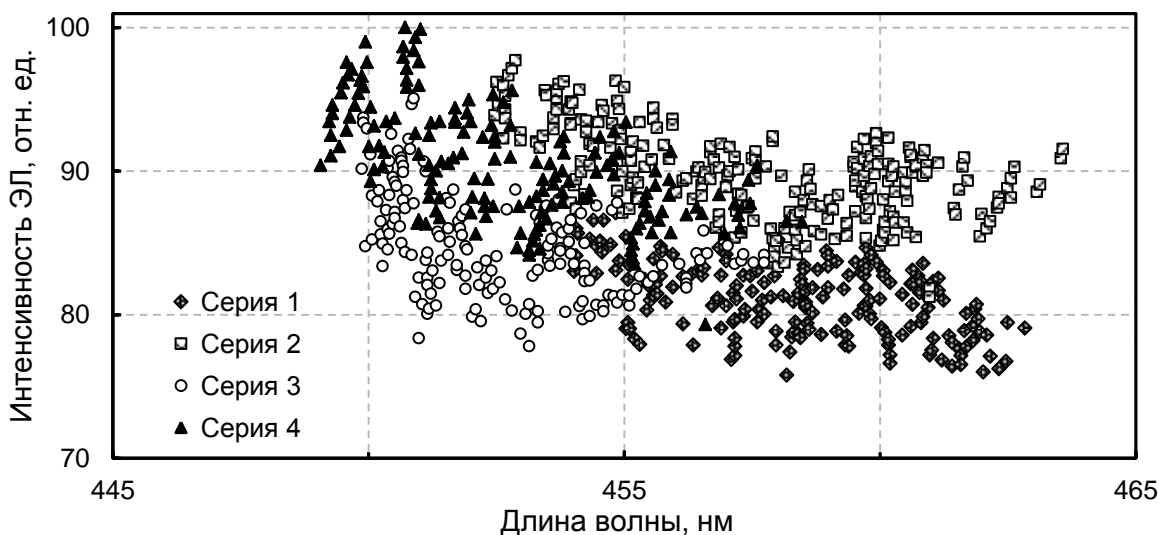


Рис. 16. Результаты измерения интенсивности света из светодиодных чипов после оптимизации структуры на поверхности сапфировой подложки.

В качестве примера на рис. 16 представлены результаты измерения интенсивности света, выходящего из светодиодных чипов, для двух видов светодиодных чипов с оптимизированным дизайном структурирования (чипы серии 2 и 4) и референсных чипов (чипы серии 1 и 2). Как следует из рис. 16, оптимизация дизайна структурирования

привела к увеличению интенсивности света в среднем на 10%. В целом, в результате реализации технологических приёмов, которые были разработаны на основе научного подхода, развитого в диссертации, КПД светодиодных структур был увеличен более чем в 3 раза, с 15% до 50%, достигнутое значение светоотдачи белых светодиодов составило 160 лм/Вт.

Оптимизация технологии создания светодиодных структур, выполненная группой компаний «Оптоган», также включала совершенствование технологии формирования контактов из оксидов олова и индия (Indium Tin Oxide – ITO). Были также оптимизированы режимы травления ITO и боковых стенок мезы полупроводникового чипа. Стандартный процесс травления ITO не приводил к полному удалению материала, и частицы оксида оставались на поверхности *p*-GaN, *n*-GaN и на боковых стенках мезы. Как было установлено экспериментально, это приводило к возникновению нежелательных токов утечки, ухудшавших характеристики чипов. Для решения этой проблемы был разработан процесс фотолитографии, включавший формирование дополнительного слоя (маски) из диоксида кремния, использовавшийся при формировании контактной площадки из ITO и слоя, блокирующего ток. В результате применения этого процесса удалось добиться полного удаления паразитных частиц ITO с поверхности чипа и минимизации токов утечки.

Дополнительно были проведены исследования по оптимизации люминофоров. Для получения светодиодных изделий с высоким индексом цветопередачи был осуществлен выбор люминофоров путем тестирования большого количества образцов различных фирм-производителей. Основными исследованными типами люминофоров были: желтые силикатные люминофоры и люминофоры типа YAG:Ce (иттрий-алюминиевые гранаты, легированные церием); желто-зеленые и зеленые люминофоры, являющиеся производными YAG (иттрий в кристаллической решетке частично или полностью замещен другими ионами редко-земельных элементов); красные оксинитридные люминофоры.

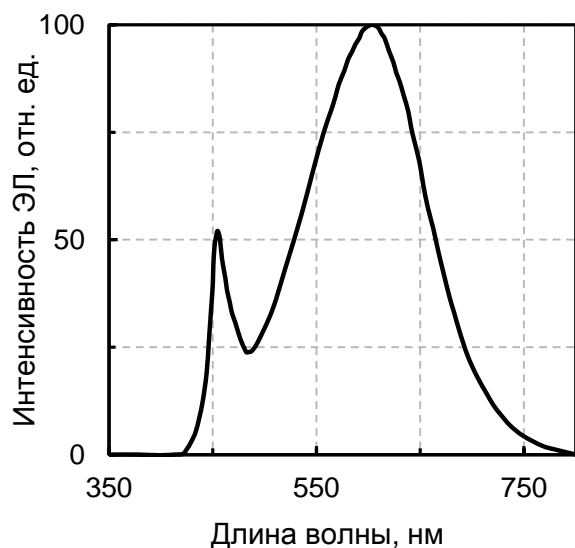


Рис. 17. Образец спектра светодиода с CRI = 95 и CCT = 3000 К.

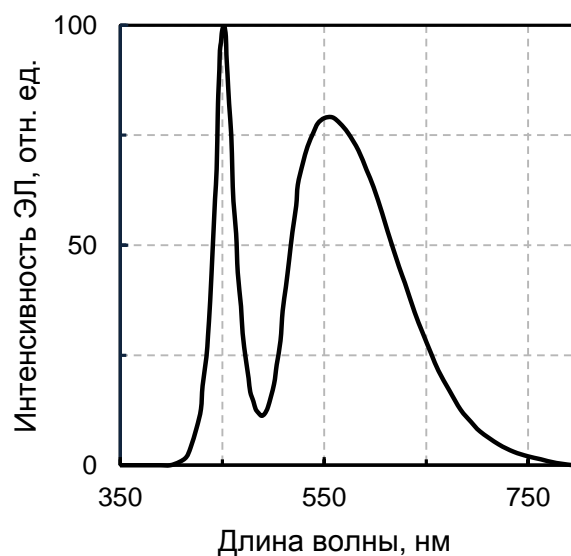


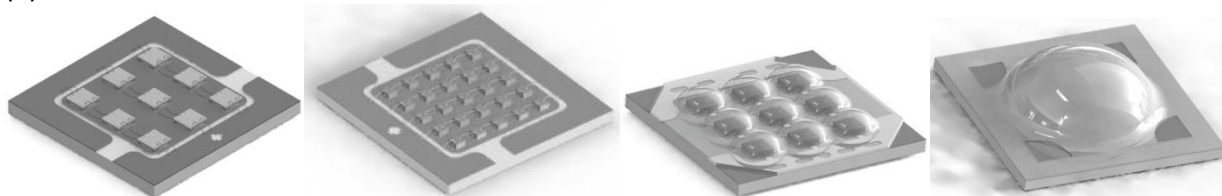
Рис. 18. Образец спектра светодиода с CRI = 70 и CCT = 5000 К.

В результате тестирования и оптимизации были получены светодиоды с индексом цветопередачи вплоть до 95 для 3000 К и 97 для 2700 К. Спектр излучения светодиода с

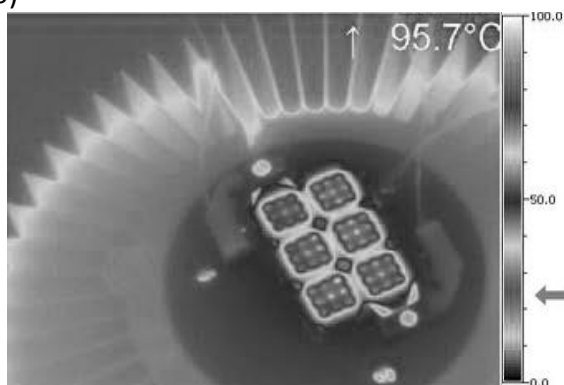
CRI = 95 и CCT = 3000 K представлен на Рис. 17. Для изготовления светодиодов с подобным спектром был использован люминофор с пиковой длиной волны 518 нм, а также красный оксинитридный люминофор с пиковой длиной волны излучения 655 нм.

На основе научно-практических разработок диссертации были также созданы сборки типа «чип-на-плате». В качестве примера оригинальной разработки представлена сборка X10. Её отличительной чертой является гибкость и масштабируемость, достигаемая тем, что индивидуальные модули в сборке содержат по 9 чипов, при этом количество модулей в сборке может составлять практически произвольное число, а разделение сборки на отдельные модули может осуществляться вручную. Спектр излучения светодиодной сборки X10 холодного белого света, выполненной по технологии «чип-на-плате» с использованием люминофора YAG представлен на рис. 18. Изображение сборки представлено на рис. 19.

(a)



(б)



(в)

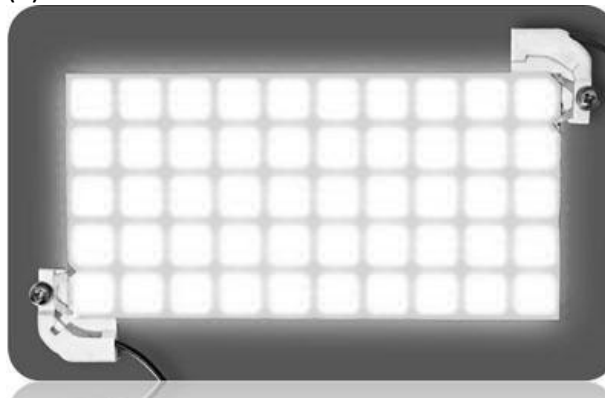


Рис. 19. Светодиодные сборки «чип-на-плате» X10: (а) варианты постановки чипов в 10 Вт корпус и варианты формы линз; (б) распределение теплового поля по поверхности 60 Вт модуля X10, зафиксированное при помощи инфракрасной камеры; (в) 50 Вт модуль X10 в работе.

Использование разработанных в ходе выполнения диссертационной работы полупроводниковых чипов с характеристиками мирового уровня в комбинации с современными люминофорами позволило создать различные виды эффективно работающих осветительных устройств. В части светодиодныхборок «чип-на-плате» промышленно выпускаемые изделия превосходят по ряду характеристик мировые аналоги, например, по величине светового потока с единицы поверхности светодиодной сборки.

Таким образом, в результате выполнения диссертационной работы были предложены научно обоснованные технические решения в области создания и разработки технологии высокоэффективных полупроводниковых светоизлучающих структур и устройств на основе нитридов металлов III группы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

### Основные полученные результаты:

1. Теоретически показано, что контролируемое изменение ростовой моды в процессе эпитаксиального наращивания слоёв нитрида галлия со структурой вюрцита на гетероподложку инициирует дислокационные реакции, позволяющие снизить плотность проникающих дислокаций на два порядка величины при толщинах слоёв 1–4 микрометра.
2. С помощью компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния в эпитаксиальных слоях нитрида галлия, выращенных на сапфировых подложках, показано, что создание упорядоченной системы полостей в объёме слоёв приводит более чем к 20% падению механических напряжений. Величина и степень локализации напряжений определяется радиусом создаваемых полостей, расстоянием между ними и толщиной слоя.
3. С помощью моделирования напряженно-деформированного состояния в эпитаксиальных слоях нитрида галлия показано, что промежуточный слой в виде колонн приводит к релаксации напряжений в вышележащем слое GaN. Степень релаксации напряжений прямо пропорциональна относительному диаметру колонн  $D/W$ , где  $W$  — толщина слоя с полостями, и обратно пропорциональна толщине  $H$  верхнего (над колоннами) слоя GaN. По результатам компьютерного моделирования установлено, что оптимальной является конфигурация с параметрами  $D/W = 0.7$ ,  $H = 0.5$  мкм, для которой достигнута степень релаксации механических напряжений 15%. Построена математическая модель взаимодействия прорастающих дислокаций с периодическим массивом полостей и показано, что использование двух последовательных слоёв с полостями позволяет уменьшить плотность дислокаций вплоть до  $0.24 \cdot \rho_0$ , где  $\rho_0$  — исходная плотность дислокаций.
4. Проведено трехмерное самосогласованное электро-тепло-световое моделирование светодиодной структуры на основе нитридных полупроводниковых гетероструктур и показано, что выбор оптимальной конфигурации омических контактов к  $n$ - и  $p$ -областям светодиодной структуры и их относительного расположения на поверхности светодиодного чипа позволяет существенно увеличить КПД светоизлучающего устройства.
5. Расчётными методами показано, что ток через проводящие каналы в активной области светодиодной структуры с квантовыми ямами во время электростатического разряда (ЭСР) может быть значительно снижен введением промежуточных слоёв-спейсеров с высоким удельным сопротивлением, прилегающих к активной области структуры. Установлено, что  $p$ -эмиттер толщиной 0.5 мкм и более может действовать как  $p$ -спейсер, однако, как показали эксперименты, для препятствия диффузии магния из  $p$ -эмиттера в активную область структуры желательным является введение с  $p$ -стороны гетероструктуры нелегированного спейсера. В  $n$ -области введение номинально нелегированного спейсера является необходимым.
6. Расчётными методами показано, что эффект резонансного асимметричного туннелирования заряда позволяет усилить захват электронов в активную квантовую яму и, таким образом, увеличить общую эффективность светодиодных структур. Сформулированы условия реализации эффекта резонансного асимметричного

туннелирования заряда в светодиодных структурах с обычными прямоугольными потенциальными ямами и потенциальными ямами со встроенными электрическими полями. Выращены и протестированы светодиодные структуры с эффектом резонансного асимметричного туннелирования заряда на основе потенциальных ям GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN, результаты подтвердили положительный эффект от резонансного асимметричного туннелирования заряда.

7. Методами компьютерного моделирования показано, что повышение эффективности вывода света из модулей «чип-на-плате» (англ., «*chip-on-board*», «*COB*») может быть достигнуто созданием оптического элемента из силиконового эластомера, снижающего количество лучей, претерпевающих полное внутреннее отражение на границе «воздух–эластомер». Установлено, что для рассмотренной конструкции COB с 9 чипами на подложке наиболее эффективной является форма покрытия, где над каждым чипом находится выпуклая линза с близкой к сферической формой с минимально возможным радиусом кривизны (с максимально возможной высотой).

8. Методами компьютерного моделирования показано, что в существующих конструкциях систем теплоотвода светодиодных ламп замещения теплопроводность алюминия является избыточной, и используется неэффективно. Продемонстрировано, что существенного снижения температуры чипов (до 30°C) можно достичь при использовании комбинированного металлопластикового распределителя тепла. Показано, что утолщение оснований ребер системы теплоотвода для варианта с пластиковым радиатором производит эффект, сходный с эффектом от использования материала с более высокой теплопроводностью.

9. Реализован новый многостадийный процесс выращивания нитридов металлов III группы методом ГФЭ МОС на сапфировой подложке с ориентацией (0001). Экспериментально подтверждено, что преднамеренное поддержание трехмерной ростовой моды, направленное на снижение плотности центров зарождения на начальном этапе формирования эпитаксиальных слоёв нитридов металлов III группы, наращиваемых на инородную подложку, приводит к снижению плотности проникающих дислокаций за счет снижения плотности границ коалесценции. Повышение эффективности дислокационных реакций при многостадийном процессе роста обусловлено переходом к двумерной моде роста.

10. Экспериментально установлено, что использование буферного слоя нитрида галлия, выращенного методом многостадийной ГФЭ МОС на сапфировой пластине с ориентацией (0001), для последующего роста светодиодных структур на основе множественных квантовых ям In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN, приводит к увеличению эффективности (уменьшению уровня насыщения света) синих светодиодов, работающих при высоких плотностях тока. Показано, что увеличение эффективности полученных светодиодных структур обусловлено снижением плотности содержащихся в них проникающих дислокаций.

11. Разработан метод ГФЭ МОС выращивания эпитаксиальных слоёв нитрида галлия на структурированных подложках GaN/сапфир, позволяющий формировать низкодефектные слои, содержащие внутренние полости с контролируемой геометрией. Показано, что данный метод может быть использован в рамках ростовых технологий создания нитридных светодиодных структур для увеличения их внутренней квантовой эффективности.

12. Экспериментально установлено, что применением безмасочного метода огрубления нерабочей поверхности сапфировых подложек обработкой в нагретой серной кислоте может быть достигнуто 20–25% увеличение выходной мощности светодиодных структур с длиной волны излучения 460 нм. Показано, что увеличение светоотдачи достигается за счет формирования специфического микро-рельефа на поверхности подложечной пластины, способствующего рассеянию выходящего света, при этом размер элементов, рассеивающих свет, может контролироваться временем обработки.
13. Экспериментально показано, что эффективность постростовой активации магния как акцепторной примеси в нитриде галлия выше, если эпитаксиальные слои GaN выращиваются в атмосфере водорода. Показано, что для таких слоёв активационные отжиги можно проводить в широком диапазоне температур, не накладывая строгих ограничений на выбор атмосферы отжига.
14. Экспериментально показано, что индий в составе буферного слоя (подслоя) эпитаксиальной структуры GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N способствует увеличению интенсивности ее электролюминесценции. Определен оптимальный состав в подслое (In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N)  $x \sim 1.5\%$ , при котором обеспечивается и равномерность распределения индия в наборе квантовых ям (КЯ), и снижение плотности проникающих дислокаций в активной области светодиодных структур на основе GaN/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N. Оба эти фактора позитивно сказываются на увеличении выходной мощности светоизлучающих структур.
15. Экспериментально установлено, что оптимизация свойств блокирующих электроны слоёв Al<sub>y</sub>Ga<sub>1-y</sub>N, таких, как уровень их легирования и толщина, а также введение нелегированных слоёв GaN, разделяющих слой, блокирующий электроны, и активную область светодиодных структур, позволяют достичь существенного повышения квантовой эффективности полупроводниковых нитридных структур.
16. На основе экспериментальных данных показано, что в светодиодных структурах In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/In<sub>y</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>1-y-z</sub>N с множественными квантовыми ямами (МКЯ) резкость границ раздела и однородность состава МКЯ определяется молярным содержанием In в барьерных слоях In<sub>y</sub>Al<sub>2</sub>Ga<sub>1-y-z</sub>N. Установлено, что увеличение содержания In в барьерном слое свыше 0.01 приводит к появлению неоднородного распределения в нем Al, и, как следствие, к снижению квантовой эффективности светодиодных гетероструктур.
17. По результатам тестирования светодиодных чипов, работающих в области ближнего ультрафиолета, и созданных на основе структур In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N/GaN с рассеивающими свет внутренними полостями, намеренно введёнными на границе раздела GaN-сапфир, показано, что степень достигаемого увеличения значений мощности излучения чипов определяется размерами вводимых полостей и углом наклона их стенок.
18. На основе проведённых расчётов и разработанных в рамках диссертационной работы эпитаксиальных технологий и конструкций созданы светодиодные чипы, светодиоды и светодиодные сборки, не уступающие по своим характеристикам лучшим мировым аналогам, а в части светодиодныхборок — превосходящие их.



## Основные выводы:

I. Преднамеренное изменение наклона линий проникающих дислокаций в слоях нитридных полупроводников со структурой вюрцита, растущих в базисной ориентации (0001), оказывается эффективным для снижения плотности таких дефектов. Наклон дислокаций может быть спровоцирован возникновением ростовых поверхностей с высокими кристаллографическими индексами, т.е. отличных от (0001),  $\{h, k, \bar{h} + \bar{k}, 0\}$ .

II. Многостадийный режим роста в ГЭ МОС с чередованием двух- и трёхмерной ростовой моды позволяет достичь быстрого и значительного (до 2 порядков) уменьшения плотности проникающих дислокаций в слоях GaN. Формирование слоёв с пониженной исходной плотностью проникающих дислокаций достигается за счет сокращения числа центров зарождения, что дополнительно позволяет оптимизировать предложенный многостадийный процесс.

III. Темплэты GaN/сапфир с упорядоченным ансамблем полостей или колонн в гетероэпитаксиальных слоях нитрида галлия обеспечивают существенное снижение уровня механических напряжений и повышение структурного качества подложек. Полученные на таких подложках светодиодные чипы с системой квантовых ям (КЯ) демонстрируют прирост эффективности.

IV. Структурирование поверхности, на которой формируется светодиодный чип, и механическая обработка тыльной стороны сапфировой подложки дают увеличение вывода света из чипа. Вывод света контролируется размером и конфигурацией рельефа обрабатываемых поверхностей, что связано с подавлением эффекта полного внутреннего отражения за счет усиления рассеяния света.

V. Квантовая эффективность светодиодных структурах  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Al}_z\text{Ga}_{1-y-z}\text{N}$  с множественными квантовыми ямами (МКЯ) определяется содержанием In в барьерных слоях  $\text{In}_y\text{Al}_z\text{Ga}_{1-y-z}\text{N}$ . Это обусловлено зависимостью резкости границ раздела и состава МКЯ от концентрации In в барьерном слое.

VI. Равномерность распределения In в системе светоизлучающих КЯ, полученных на буферном подслое  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ , определяется составом подслоя, что позволяет в итоге контролировать квантовую эффективность гетероструктур.

VII. Применение промежуточных слоёв-спейсеров с высоким удельным сопротивлением, прилегающих к активной области структуры, позволяет значительно понизить ток через проводящие каналы в активной области светодиодной структуры с квантовыми ямами во время электростатического разряда. В качестве *p*- и *n*-спейсеров наиболее эффективно использование номинально нелегированных слоёв.

**В целом, в диссертации решена важная научная проблема создания физического базиса для оптимизации параметров гетероструктур нитридных полупроводников, разработки и внедрения в промышленное производство передовых технологий их эпитаксиального выращивания методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений, изготовления светодиодных чипов,борок типа «чип-на-плате» и светоизлучающих полупроводниковых устройств с улучшенными характеристиками и повышенной эффективностью.**

### Цитированная литература

- [1] Дмитриев В.А., Иванов П.А., Морозенко Я.В., Попов И.В., Челноков В.Е. Карбидокремниевые светодиоды с излучением в синефиолетовой области спектра // Письма ЖТФ. 1985. Т. 11. В. 4. С. 246-252.
- [2] Водаков Ю.А., Карклина М.И., Мохов Е.Н., Робенков А.Д. Рост эпитаксиальных слоев GaN на подложках сапфира и SiC // Неорганические материалы. 1980. Т.16. №3. С. 537-538.
- [3] Akasaki I., Amano H., Koide Y., Hiramatsu K., Sawaki N. Effects of a buffer layer on crystallographic structure and on electrical and optical properties of GaN and Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>N (0<x≤0.4) films grown on sapphire substrate by MOVPE // J. Cryst. Growth. 1989. V. 98. No. 1–2. PP. 209–219.
- [4] Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. P-Type conduction in Mg-doped GaN treated with low-energy electron beam irradiation (LEEBI) // Jpn. J. Appl. Phys. 1989. V. 28. Part 2. No. 12. PP. L2112–L2114.
- [5] Pearton S. J., Zolper J. C., Shul R. J., Ren F. GaN: Processing, defects, and devices // J. Appl. Phys. 1999. V. 86. No. 1. PP. 1–78.
- [6] Nakamura S., Fasol G. The Blue Laser Diode, Springer–Verlag, Berlin–Heidelberg–New York, 1997.

### Основные публикации по теме диссертации

- [1a] Bougrov V.E., Zubrilov A.S., "Computer simulation of optical confinement in III-V nitride double heterostructures", *Institute of Physics Conference Series*, Vol. 142, No. 6, pp. 1007-1010 (1996).
- [2a] Бугров В.Е., Зубрилов А.С., «Волноводные свойства гетероструктур на основе нитридов галлия, алюминия и индия», *Физика и Техника Полупроводников*, Т. 31, В. 1, С. 63–67 (1997).
- [3a] Зубрилов А.С., Мельник Ю.В., Цветков Д.В., Бугров В.Е., Николаев А.Е., Степанов С.И., Дмитриев В.А., «Люминесцентные свойства слоев нитрида галлия, выращенных газофазной эпитаксией в хлоридной системе на подложках карбида кремния», *Физика и Техника Полупроводников*, Т. 31, В. 6, С. 616–620 (1997).
- [4a] Bougrov V.E., Zubrilov A.S., "Optical confinement and threshold currents in III-V nitride heterostructures: Simulation", *Journal of Applied Optics*, Vol. 81, Is. 7, pp. 2952-2956 (1997).
- [5a] Sukhoveyev V., Ivantsov V., Zubrilov A., Nikolaev V., Nikitina I., Bougrov V., Tsvetkov D., Dmitriev V., "Crystal structure and optical properties of bulk GaN crystals grown from a melt at reduced pressure", *Material Science Forum*, Vols. 264-268, pp. 1331–1334 (1998).
- [6a] Бугров В.Е., Константинов О.В., «Учет кулоновского взаимодействия электронов и дырок в квантовых точках на основе InGaN», *Физика и Техника Полупроводников*, Т. 32, В. 10, С. 1235-1239 (1998).
- [7a] Rebane Y.T., Shreter Y.G., Yavich B.S., Bougrov V.E., Stepanov S.I., Wang W.N., "Light emitting diode with charge asymmetric resonance tunneling", *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 180, Is. 1, pp. 121-126 (2000).
- [8a] Stepanov S., Wang W.N., Yavich B.S., Bougrov V., Rebane Y.T., Shreter Y.G., "Influence of Poisson's ratio uncertainty on calculations of the bowing parameter for strained InGaN layers", *MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research*, Vol. 6, Art. 6 (2001).
- [9a] Wang P.J., Bougrov V.E., Rebane Y.T., Shreter Y.G., Stepanov S.I., Tseng L., Yavich B.S., Wang W.N., "III-nitride efficient LEDs", *Proceedings of SPIE*, Vol. 4445, pp. 99-110 (2001).

- [10a] Bougrov V., Levinshtein M., Rumyantsev S.L., Zubrilov A., Chapter 1 (Gallium Nitride) in: "Properties of Advanced Semiconductor Materials: GaN, AlN, InN, BN, SiC, SiGe", John Wiley & Sons, Inc. NY-Chichester-Weinheim-Brisbane-Singapore-Toronto, 2002.
- [11a] Rebane Y.T., Bochkareva N.I., Bougrov V.E., Tarkhin D.V., Shreter Y.G., Girnov A.E., Stepanov S.I., Wang W.N., Chang P.T., Wang P.J., "Degradation and transient currents in III-Nitride LEDs", *Proceedings of SPIE*, Vol. 4996, pp. 113-124 (2003).
- [12a] Lang T., Odnoblyudov M., Bougrov V., Sopanen M., "MOCVD growth of GaN islands by multistep nucleation layer technique", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 277, Is. 1–4, pp. 64-71 (2005).
- [13a] Bougrov V.E., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., Lang T., Konstantinov O.V., "Threading dislocation density reduction in two-stage growth of GaN layers", *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 203, No. 4, pp. R25-R27 (2006).
- [14a] Lang T., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Romanov A.E., Suihkonen S., Sopanen M., Lipsanen H., "Multistep method of threading dislocation density reduction in MOCVD grown GaN epilayers", *Physica Status Solidi (a)*, Vol. 203, No 10, pp. R76-R78 (2006).
- [15a] Lang T., Odnoblyudov M., Bougrov V., Suihkonen S., Sopanen M., Lipsanen H., "Morphology optimization of MOCVD grown GaN nucleation layers by the multistep technique", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 292, Is. 1, pp. 26-32 (2006).
- [16a] Suihkonen S., Lang T., Svensk O., Sormunen J., Törmä P.T., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Control of the morphology of InGa<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>N quantum wells grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 300, Is. 2, pp. 324–329 (2007).
- [17a] Ситникова А.А., Конников С.Г., Кириленко Д.А., Мынбаева М.Г., Оdnoblyudov M.A., Бугров В.Е., Ланг Т., "Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии структуры эпитаксиальных пленок нитрида галлия, выращенных на подложках с различной морфологией границы раздела», *Поверхность. Физика, Химия, Механика*, Т. 43, В. 5, С. 51–55 (2007).
- [18a] Lang T., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., Suihkonen S., Svensk O., Törmä P.T., Sopanen M., Lipsanen H., "Reduction of threading dislocation density in Al<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>N epilayers by a multistep technique", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 298, pp. 276-280 (2007).
- [19a] Suihkonen S., Svensk O., Lang T., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "The effect of InGaNGaN MQW hydrogen treatment on threading dislocation optimization on GaN LED efficiency", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 298, pp. 740–743 (2007).
- [20a] Svensk O., Suihkonen S., Lang T., Lipsanen H., Sopanen M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Effect of growth conditions on electrical properties of Mg-doped p-GaN", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 298, pp. 811-814 (2007).
- [21a] Lankinen A., Lang T., Suihkonen S., Svensk O., Säynätjoki A., Tuomi T.O., McNally P.J., Odnoblyudov M., Bougrov V., Danilewsky A.N., Bergman P., Simon R., "Dislocations at the interface between sapphire and GaN", *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, Vol. 19, No. 2, pp. 143-148 (2008).
- [22a] Svensk O., Törmä P.T., Suihkonen S., Ali M., Lipsanen H., Sopanen M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Enhanced electroluminescence in 405 nm InGa<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub>N LEDs by optimized electron blocking layer", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 310, Is. 23, pp. 5154-5157 (2008).

- [23a] Törmä P.T., Svensk O., Ali M., Suihkonen S., Sopanen M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Effect of InGaN underneath layer on MOVPE-grown InGaN/GaN blue LEDs", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 310, Is. 23, pp. 5162-5165 (2008).
- [24a] Suihkonen S., Svensk O., Törmä P.T., Ali M., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "MOVPE growth and characterization of InAlGaN films and InGaN/InAlGaN MQW structures", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 310, Is. 7-9, pp. 1777-1780 (2008).
- [25a] Törmä P.T., Ali M., Svensk O., Sintonen S., Kostamo P., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "An investigation of structural properties of GaN films grown on patterned sapphire substrates by MOVPE", *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 404, Is. 23-24, pp. 4911-4915 (2009).
- [26a] Törmä P.T., Svensk O., Ali M., Suihkonen S., Sopanen M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Maskless roughening of sapphire substrates for enhanced light extraction of nitride based blue LEDs", *Solid-State Electronics*, Vol. 53, Is. 2, pp. 166-169 (2009).
- [27a] Bougrov V.E., Kovsh A.R., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., "High quality GaN substrates for modern LED technology", *LED Professional Review*, Is. 18, pp. 42-49 (2010).
- [28a] Törmä P.T., Ali M., Svensk O., Suihkonen S., Sopanen M., Lipsanen H., Mulo M., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "InGaN-based 405 nm near-ultraviolet light emitting diodes on pillar patterned sapphire substrates", *Crystengcomm*, Vol. 12, Is. 10, pp. 3152-3156 (2010).
- [29a] Ali M., Romanov A.E., Suihkonen S., Svensk O., Törmä P.T., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Void shape control in GaN re-grown on hexagonally patterned, mask-less GaN", *Journal of Crystal Growth*, Vol.315, Is. 1, pp. 188-191 (2011).
- [30a] Ivukin I.N., Bougrov V.E., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., "Reduction of mechanical stresses in GaN/sapphire templates via formation of regular porous structure *Physica Status Solidi (c)*, vol. 9, No. 3-4, pp.1057-1059 (2012).
- [31a] Suslov S.S., Bougrov V.E., Odnoblyudov M.A., Romanov A.E., "Modeling and optimization of electric current spreading in III-nitride LEDs", *Physica Status Solidi (c)*, Vol. 9, No. 3-4, pp. 1105-1108 (2012).
- [32a] Ali M., Romanov A.E., Suihkonen S., Svensk O., Sintonen S., Sopanen M., Lipsanen H., Nevedomsky V.N., Bert N.A., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Analysis of threading dislocations in void shape controlled GaN re-grown on hexagonally patterned mask-less GaN", *Journal of Crystal Growth*, Vol. 344, Is. 1, pp. 59-64 (2012).
- [33a] Суслов С.С., Виноградова К.А., Бугров В.Е., Одноблюдов М.А., Романов А.Е., "Параметрическое моделирование светоизлучающих структур на основе III-нитридов", *Materials Physics and Mechanics*, Vol. 14, No. 1, pp. 78-86 (2012).
- [34a] Ивукин И.Н., Артемьев Д.М., Бугров В.Е., Одноблюдов М.А., Романов А.Е., "Моделирование напряженно-деформированного состояния в тонких структурированных пленках нитрида галлия на сапфировых подложках", *Физика Твёрдого Тела*, Т. 54, № 12, с. 2102-2105 (2012).
- [35a] Ali M., Svensk O., Riuttanen L., Kruse M., Suihkonen S., Romanov A.E., Törmä P.T., Sopanen M., Lipsanen H., Odnoblyudov M.A., Bougrov V.E., "Enhancement of near-UV GaN LED light extraction efficiency by GaN/sapphire template patterning", *Semiconductor Science and Technology*, Vol. 27, No. 8, Art. 082002 (2012).
- [36a] Artemiev D., Bougrov V., Odnoblyudov M., Romanov A., «Mechanical stress control in GaN films on sapphire substrate via patterned nanocolumn interlayer formation», *Physica Status Solidi (c)*, vol. 10, No. 1, pp.89-92 (2013).