

На правах рукописи

Цацульников Андрей Федорович

**СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ ПИ-N ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ С ТРЕХМЕРНОЙ
ЛОКАЛИЗАЦИЕЙ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА**

Специальность 01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2019

Работа выполнена в

Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук и

Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научно-технологическом центре
микроэлектроники и субмикронных гетероструктур Российской академии наук

Официальные оппоненты: **Журавлев Константин Сергеевич**

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник
Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН

Мармалюк Александр Анатольевич

доктор технических наук, начальник НТЦ, Акционерное Общество
«Научно-исследовательский институт «Полюс» им. М.Ф.
Стельмаха» (АО «НИИ «Полюс»)

Зубков Василий Иванович

доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН), г. Санкт-Петербург

Защита состоится " ____ " _____ 2019г. в ____ час. на заседании диссертационного совета
Д 002.205.02 при ФТИ им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул.
Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФТИ им. А.Ф. Иоффе, адрес сайта:
www.ioffe.ru

Автореферат разослан " ____ " _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Высокие темпы развития твердотельной оптоэлектроники и электроники на основе III-N гетероструктур привели к появлению приборов на основе этих гетероструктур даже в областях, которые изначально были основаны на устройствах, работающих на других принципах. Например, коммерчески доступные источники белого света на основе III-N светодиодов уже превосходили все другие типы ламп по всем основным показателям [1]. Однако, несмотря на значительные успехи, существует ряд фундаментальных проблем, ограничивающих развитие III-N технологии, основной из которых является то, что все III-N соединения (GaN, AlN, InN) имеют различные постоянные кристаллической решетки [2], а эпитаксиальный рост осуществляется на инородных подложках (в основном, подложках сапфира или карбида кремния). С одной стороны, в результате разработки технологии [3] и дизайна активной области [4], эта проблема не явилась критической для создания высокоэффективных светодиодов синего диапазона [5] или СВЧ транзисторов [6]. С другой стороны, несмотря на то, что III-N оптоэлектроника потенциально позволяет перекрыть весь видимый диапазон длин волн, различие в постоянных решетки не позволят создавать квантовые ямы (КЯ) InGaN с высоким содержанием индия, что приводит к падению эффективности излучения III-N светодиодов в желтой и красной областях спектра и затрудняет создание, например, RGB белых светодиодов с высокими индексами цветопередачи и возможностью динамического управления цветовыми параметрами [7, 8]. Таким образом, актуальной становится задача разработки новых методов эпитаксиального роста III-N гетероструктур, состоящих из материалов значительно различающихся по параметрам решетки. Подход, исследованный в данной работе, основан на том, что при росте светоизлучающих квантоворазмерных гетероструктур InGaN/GaN с многокомпонентными напряженными КЯ InGaN толщиной несколько нанометров, внутри этих КЯ происходит фазовый распад и распределение атомов индия является неоднородным, что приводит к образованию в КЯ локальных In-обогащенных областей, обеспечивающих трехмерную локализацию носителей заряда. В случае КЯ InGaN/GaN, образование таких узкозонных локальных областей приводит к значительной модификации оптических свойств гетероструктур, в частности, с одной стороны, расширяя диапазон излучения, с другой стороны, увеличивая ширину линии излучения. Параметры формирующихся областей определяются как технологическими условиями эпитаксиального роста, так и, в случае многослойных InGaAlN гетероструктур, последовательностью и толщинами слоев их составляющих. Для наиболее важных с практической точки зрения гетероструктур InGaN/GaN формирование In-обогащенных областей наблюдалось экспериментально даже в случае низкого содержания индия [2, 9], но систематических исследований технологических методов стимулирования или

подавления процессов формирования In-обогащенных областей не проводилось. Также практически отсутствовали комплексные исследования взаимосвязи методов и параметров эпитаксиального роста и структурных и оптических свойств гетероструктур InGaN/GaN с локальными In-обогащенными областями.

Цель работы заключалась в разработке экспериментальных методов формирования In-обогащенных областей в светоизлучающих гетероструктурах на основе III-N материалов, обеспечивающих трехмерную локализацию носителей, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС), комплексном исследовании взаимосвязи условий роста и структурных и оптических свойств выращенных гетероструктур, и создании на основе разработанных методов новых типов гетероструктур для светоизлучающих приборов.

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи**:

1. Исследование технологических методов формирования In-обогащенных областей в InGaN КЯ.
2. Изучение влияния дизайна (последовательности, толщин и химического состава слоев) многослойных III-N гетероструктур на формирование In-обогащенных областей в КЯ InGaN.
3. Комплексное исследование взаимосвязи условий роста, структурных и оптических свойств, выращенных КЯ InGaN.
4. Создание на основе разработанных методов роста КЯ InGaN новых типов гетероструктур, в том числе приборных.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые продемонстрирована *in-situ* трансформация сплошной КЯ InGaN в массив изолированных островков, стимулированная условиями эпитаксиального роста: прерываниями роста в азот-водородной атмосфере после осаждения КЯ InGaN и давлением при росте КЯ InGaN.
2. Впервые проведено комплексное исследование влияния технологических параметров эпитаксиального роста КЯ InGaN (температуры роста, потока индия, давления, состава газовой атмосферы в реакторе) на формирование локальных In-обогащенных областей, в том числе на формирование квантовых точек (КТ).
3. Впервые для InGaN/GaN гетероструктур предложен и изучен метод субмонослойного роста.
4. Впервые методом циклической конвертации слоя InGaN в GaN при прерываниях роста в азот-водородной атмосфере созданы короткопериодные сверхрешетки InGaN/GaN.

5. Впервые для III-N материалов предложены и изучены композитные гетероструктуры InGaN/GaN/InAlN, позволяющие расширить спектр излучения КЯ InGaN.

6. Впервые предложены и изучены светоизлучающие структуры синего и желто-зеленого диапазона, а также светоизлучающие структуры с монокристаллической активной областью, основанные на комбинации короткопериодных сверхрешеток (КПСР) InGaN/GaN, сформированных методом конвертации InGaN в GaN, и трансформированных в островки КЯ InGaN.

Практическая значимость работы:

1. Разработанные методы формирования как пространственно неоднородных, так и пространственно однородных КЯ InGaN, позволяют контролировать длину волны и ширину линии излучения, подавлять транспорт носителей к центрам безызлучательной рекомбинации и создавать светоизлучающие приборы с высокой эффективностью излучения.

2. Разработанные технологии и конструкция активной области светодиодных структур синего и желто-зеленого диапазона, позволили продемонстрировать высокую квантовую эффективность для излучения в диапазонах 430-460 нм и 540-560 нм.

3. На основе монокристаллических светодиодных структур, излучающих в диапазоне 430-510 нм, созданы белые светодиоды, обеспечивающие предельные значения индекса цветопередачи $Ra(8)=98.6$ и $Ra(14)=97.4$ при коррелированной цветовой температуре $CCT=3300-3500$ К, что соответствует лучшему мировому уровню.

Положения, выносимые на защиту.

1. Технология роста квантовых ям InGaN методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений позволяет трансформировать сплошную квантовую яму в массив островков с размерами от единиц до десятков нанометров, обеспечивая трехмерную локализацию носителей заряда.

2. Азот-водородная атмосфера реактора при эпитаксиальном росте квантовой ямы InGaN методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений обеспечивает формирование однородной по составу квантовой ямы.

3. Периодические прерывания при росте InGaN методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений позволяют формировать короткопериодные сверхрешетки InGaN/GaN за счет конвертации поверхностного слоя InGaN в GaN.

4. Локальные области трёхмерной локализации носителей заряда в квантовой яме InGaN образуются при ее осаждении на поверхность намеренно сформированных трехмерных стрессоров.

5. Использование комбинации короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN и квантовых ям InGaN, трансформированных в массив островков, в активной области светоизлучающих приборов позволяет реализовать высокую эффективность излучения благодаря подавлению безызлучательной рекомбинации при сохранении эффективной инжекции носителей.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях, семинарах и симпозиумах: Международных симпозиумах Наноструктуры: Физика и Технология (1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2015, 2016, 2017); Всероссийских конференциях «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (С.Петербург, Москва, 2000, 2001, 2004, 2005, 2007, 2008, 2010, 2011, 2013, 2015); Российские конференции по физике полупроводников (Новосибирск, 1999; Нижний Новгород, 2001; Ершово, 2015; Екатеринбург, 2017); на Международных семинарах по нитридным полупроводникам (Нагойя, Япония, 2000; Флорида, США, 2010; Вроцлав, Польша, 2014); Европейских семинарах по металлорганической газофазной эпитаксии и связанным техникам роста (Берлин, Германия, 1997; Прага, Чехия, 1999; Метц, Франция, 2008); Международных конференциях по нитридным полупроводникам (Монпелье, Франция, 1999; Глазго, Великобритания, 2011); Международных конференциях по физике полупроводников (Осака, Япония, 2000; Сеул, Корея, 2010); Международной конференции по газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (Невада, США, 2010;) Международном симпозиуме по росту III-нитридов (Санкт-Петербург, Россия, 2012); IX Конференции по материалам и приборам на основе нитрида галлия (Сан-Франциско, США, 2014); 15-ой Международной конференции по нанотехнологиям (Рим, Италия, 2015); Российско-Белорусских семинарах "Полупроводниковые лазеры и системы на их основе" (Минск, 2005, 2011, 2013, 2017); 7 Международной конференции Фотоники-2004 (Кочин, Индия, 2004); Международной конференции по полупроводниковой электронике (Коала Лумпур, Малайзия, 2004).

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 51 научной публикации в рецензируемых научных изданиях, входящих в базу Web of Science / Web of Knowledge.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Материал изложен на 200 страницах, включая 113 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 126 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы задачи и цель работы, ее научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит результаты исследований эпитаксиального роста КЯ InGaN методом ГФЭ МОС, для которых характерен локальный фазовый распад и формирование In-обогащенных областей с трехмерной локализацией носителей вплоть до комнатной температуры. Поскольку данные области в КЯ InGaN определяют их оптические свойства [10, 11, 12], то принципиальным становится изучение условий эпитаксиального роста, позволяющих управлять этим эффектом. В случае КЯ InGaN высокого состава флуктуации в распределении атомов индия играют более важную роль из-за усиления влияния их размеров и состава на энергию оптического перехода. Важным является тот факт, что поскольку все слои многослойных гетероструктур на основе InGaAlN являются решеточно-несогласованными, то фазовый распад определяется не только химическим составом, толщиной и режимами роста КЯ InGaN, но и параметрами и режимами роста остальных слоев гетероструктуры. Для выявления особенностей роста КЯ InGaN с заданными свойствами в первой главе были проведены детальные исследования зависимости структурных и оптических свойств КЯ InGaN от технологических параметров их роста. Акцент был сделан на исследовании влияния легко контролируемых технологических параметров, таких как температура, давление и атмосфера в реакторе, на формирование локальных In-обогащенных областей и реализацию высокой эффективности излучения.

Исследовано влияние состава газовой атмосферы в реакторе на структурные свойства КЯ InGaN. Традиционно считается, что выращивание КЯ InGaN должно производиться в атмосфере азота. Присутствие водорода в атмосфере реактора приводит к подавлению вхождения индия в InGaN. Однако, добавка малого количества водорода к несущему газу во время прерываний роста после осаждения КЯ приводит к существенному увеличению эффективности фото- (ФЛ) и электролюминесценции (ЭЛ). С одной стороны, это обусловлено удалением избыточных атомов индия с поверхности InGaN, что улучшает структурное качество и эффективность излучения формирующихся КЯ. С другой стороны, в данной работе было показано, что прерывания роста в азот-водородной атмосфере после осаждения КЯ InGaN позволяют изменять их микроструктуру, трансформируя КЯ в массив островков с латеральными размерами в десятки нанометров, содержащих внутри себя локальные In-обогащенные области, имеющие латеральные размеры единицы нанометров. Этот эффект трансформации обусловлен травлением КЯ в присутствии водорода, которое неоднородно и зависит от локального содержания индия. Степень влияния прерываний роста различна для КЯ InGaN с различным

содержанием индия. В случае КЯ InGaN с небольшим содержанием индия, излучающих в диапазоне длин волн 400-410 нм, прерывания роста приводят к уменьшению общего количества индия в КЯ и к коротковолновому сдвигу линии излучения, однако сами КЯ остаются сплошными и формирования изолированных островков не наблюдается. В случае КЯ InGaN с содержанием индия, соответствующим излучению в синем диапазоне длин волн 440-470 нм, происходит формирование изолированных островков с латеральными размерами в десятки нанометров (рис. 1 а-в).

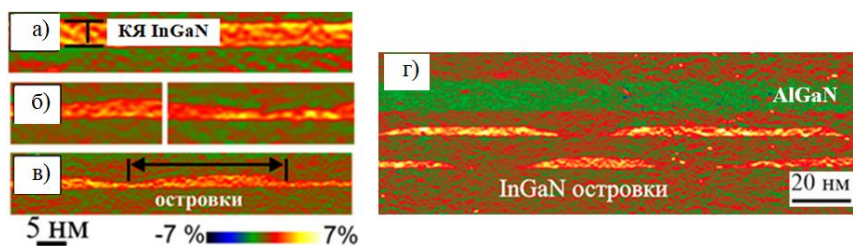


Рис. 1. GPA изображение КЯ InGaN, выращенных с применением прерываний роста в азот-водородной атмосфере. а) – КЯ InGaN, выращенная без прерываний роста. б), в) – КЯ InGaN, выращенные при потоке водорода через реактор 5.5 slm и длительностях прерываний 6 и 16 сек, соответственно. г) – КЯ InGaN/GaN, выращенные при оптимизированных условиях.

На рис.1 приведены изображения распределения локальных деформаций кристаллической решетки, полученные с помощью обработки результатов просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения (ПЭМ ВР) методом геометрических фаз (GPA-изображения) [13, 14]. При оптимальных условиях роста между островками полностью отсутствует InGaN и наблюдается достаточно четкая огранка боковых стенок островков (рис. 1 г). Исследования оптических свойств полученных структур при инжекционной накачке показали, что, несмотря на сильную морфологическую трансформацию КЯ, сдвиг длины волны излучения структур, выращенных с прерываниями роста, незначителен, а внешняя квантовая эффективность (ВКЭ) излучения заметно возрастает по сравнению с эффективностью излучения сплошных КЯ (рис. 2). Кроме того, прерывания роста приводят к более быстрому нарастанию ВКЭ с током и смещению максимума в токовой зависимости ВКЭ в область меньших значений токов. Токовая зависимость ВКЭ для образца LED-Ref характерна для КЯ InGaN с относительно однородным распределением атомов индия. В таких КЯ носители свободно двигаются в плоскости, достигая дефектных областей, что уменьшает ВКЭ в области малых токов, а насыщение безызлучательной рекомбинации при увеличении тока приводит к монотонному росту ВКЭ. Образование островков при прерываниях роста подавляет латеральный транспорт носителей к областям дефектов, что увеличивает ВКЭ в области малых значений тока и приводит к

смещению максимума токовой зависимости в область меньших токов (рис.2, образцы LED-H3 и LED-H6).

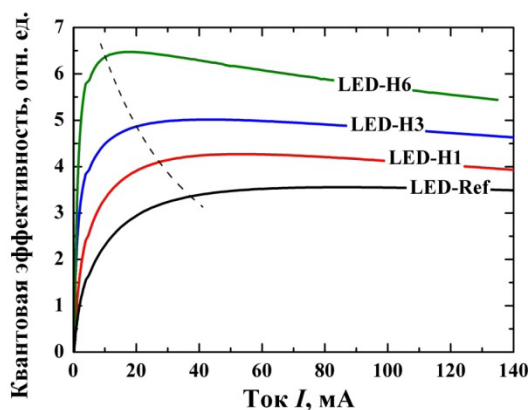


Рис. 2. Токовые зависимости ВКЭ для InGaN/GaN структур, выращенных с различными прерываниями роста (структура LED-Ref выращена без прерываний роста, структуры LED-H1 – LED-H6 выращены при потоке водорода через реактор 5.5 slm и длительностях прерываний 3, 6 и 16 сек, соответственно).

В случае КЯ InGaN с высоким содержанием индия, излучающих в желто-зеленом диапазоне 540-570 нм, с помощью прерываний роста также можно трансформировать сплошную КЯ в изолированные островки, но уменьшение содержания индия в КЯ и ее толщины приводят к значительному сдвигу линии излучения в область больших энергий фотонов, вплоть до синей области спектра.

Были проведены исследования влияния давления в реакторе при эпитаксиальном росте КЯ InGaN на формирование In-обогащенных областей в КЯ, включая комбинированное воздействие давления при росте КЯ и прерываний в азот-водородной атмосфере после осаждения КЯ. На рис. 3 приведены GPA изображения КЯ InGaN/GaN синего диапазона, выращенных при разном давлении с использованием прерываний роста (длительностью 20 сек) в азот-водородной атмосфере.

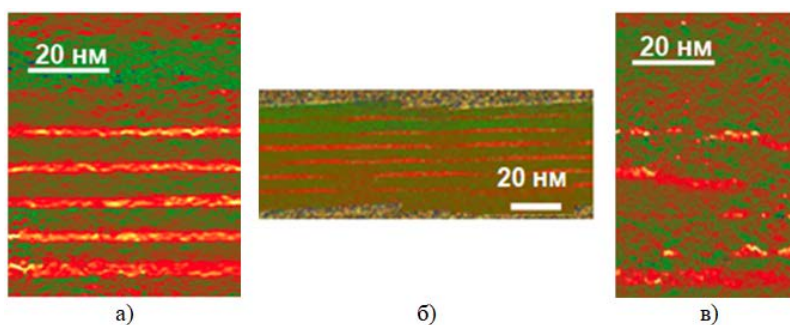


Рис. 3. GPA изображения КЯ InGaN/GaN, выращенных при давлении 100 (а), 450 (б) и 600 мбар (г).

Рост КЯ при низком давлении (100 мбар) приводит к образованию сплошных в плоскости КЯ (рис. 3 а) с заметными флуктуациями состава на масштабе длин в единицы нанометров. КЯ InGaN, выращенные при высоком давлении (450 и 600 мбар), имеют принципиально другую структуру (рис.3 б,в). Они разделены на плоские островки, имеющие большую дисперсию по размерам от единиц до нескольких десятков нанометров. При этом высота островков практически совпадает с толщиной КЯ и составляет 2.3–2.5 нм, а среднее содержание индия в КЯ и островках также остается неизменным и составляет $27 \pm 8\%$. Было показано, что само по себе увеличение давления без применения прерываний роста не приводит к образованию островков, но при использовании прерываний роста увеличение давления стимулирует формирование островков. Исследования спектров излучения КЯ InGaN показало, что увеличение давления приводит к значительному коротковолновому сдвигу линии излучения и ее уширению, что согласуется с формированием островков, имеющих дисперсию по размерам или/и по составу. Исследования оптических свойств выращенных структур при инжекционной накачке показали, что увеличение давления роста до 600 мбар приводит к значительному увеличению ВКЭ, особенно в области малых (< 20 мА) токов, что обусловлено формированием островков и подавлением латерального транспорта носителей к центрам безызлучательной рекомбинации. Дальнейшее увеличение давления выше 650-700 мбар вызывает уменьшение эффективности излучения, что связано с уменьшением числа и размеров островков, которое наблюдается ПЭМ ВР.

Исследования КЯ InGaN методом ПЭМ ВР показали, что распределение атомов индия внутри как КЯ, так и островков, является неоднородным и зависит от условий эпитаксиального роста. В КЯ и островках InGaN формируются In-обогащенные области, имеющие размеры единиц нанометров, которые могут рассматриваться как квантовые точки (КТ). Данные объекты, во многом, обуславливают оптические свойства InGaN/GaN гетероструктур: длину волны излучения, ширину полосы излучения, температурную зависимость ФЛ и ЭЛ и т.д.

В работе были исследованы технологические способы влияния на структурные свойства таких объектов и изучена связь их структурных и оптических свойств с технологическими условиями роста. Было показано, что при использовании прерываний роста в азот-водородной атмосфере In-обогащенные области нанометрового размера внутри КЯ хорошо разрешаются. Исследования оптических свойств КЯ, излучающих в различных спектральных диапазонах, показали, что наибольшая локализация носителей реализуется в структурах, излучающих в синей области спектра. Было показано, что использование при росте периодических InGaN/GaN гетероструктур метода термоциклирования, при котором периодическая структура формируются не с помощью модуляции потока индия, а путем периодического изменения температуры при постоянном потоке индия, позволяет стимулировать формирование In-

обогащенных областей нанометрового размера. Были проведены исследования оптических свойств КЯ InGaN, содержащих In-обогащенные области, методом ФЛ с временным разрешением при резонансном и нерезонансном возбуждении. В случае, если In-обогащенные области нанометрового размера имеют δ -образную плотность состояний, то линия излучения при резонансном возбуждении, в отличие от нерезонансного возбуждения, не смещается в длинноволновую сторону после выключения накачки. На рис. 4 представлены спектры ФЛ, записанные в различные промежутки времени после выключения накачки при нерезонансном (а) и резонансном (б) возбуждении.

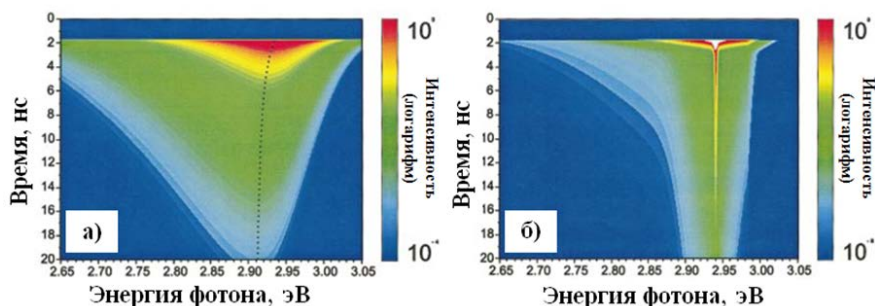


Рис. 4. Спектры ФЛ, записанные после различных промежутков времени после выключения накачки при нерезонансном (а) и резонансном (б) возбуждении.

В случае нерезонансного возбуждения (рис.4 а), наблюдается неоднородно уширенный спектр излучения, интенсивность которого постепенно уменьшается после выключения накачки, а максимум сдвигается в область меньших энергий фотонов. При резонансном возбуждении (рис.4 б) форма спектра принципиально другая: после выключения накачки спектр ФЛ практически точно воспроизводит спектр источника возбуждения. Положение линии ФЛ не сдвигается во времени и отсутствует спектральное уширение линии излучения. Этот факт прямо доказывает, что рекомбинация происходит через дискретные уровни.

Были проведены исследования зависимости оптических свойств таких гетероструктур при сверхвысоких плотностях возбуждения. Увеличение оптической накачки вплоть до 1 МВт/см^2 показало, что смещение линии излучения в структурах, выращенных с помощью термоциклирования, меньше, чем величина стоковского сдвига (разница энергий края зоны поглощения и излучения), что свидетельствует о том, что рекомбинация происходит через локализованные состояния вплоть до сверхвысоких плотностей возбуждения. Это приводит к тому, что, структуры, содержащие в активной области КЯ InGaN/GaN, выращенные с использованием термоциклирования демонстрируют стимулированное излучения через локализованные состояния, как в вертикальном направлении, так и в торцевой геометрии. Исследования ЭЛ структур, выращенных с использованием термоциклирования, показало

увеличение эффективности их излучения по сравнению со структурами, содержащими КЯ InGaN/GaN, выращенные при постоянной температуре роста, соответствующей InGaN. Это обусловлено как улучшением структурного качества GaN барьеров из-за высокой температуре их роста, так и подавлением транспорта носителей в дефектные области за счет их локализации в островках, образование которых стимулируется термоциклированием.

Были проведены исследования, направленные на формирование однородных по распределению атомов индия КЯ InGaN. Было показано что, в отличие от прерываний роста после осаждения КЯ InGaN, использование азот-водородной атмосферы непосредственно во время роста КЯ InGaN подавляет фазовый распад. Принимая во внимание тот факт, что низкое давление роста (100-200 мбар) позволяет формировать сплошные в плоскости КЯ InGaN, было показано, что используя рост при пониженном давлении в азот-водородной атмосфере можно получить однородные по распределению атомов индия КЯ. На основе развитой технологии были созданы резонансные брегговские структуры, формируемые квази-двумерными экситонами в периодической системе InGaN КЯ [15].

Вторая глава содержит результаты исследований новых типов гетероструктур, выращенных с использованием развитых методов формирования In-обогащенных областей. Использование влияния прерываний роста в азот-водородной атмосфере на свойства КЯ InGaN позволило разработать новый метод формирования КПСР InGaN/GaN. В предложенном методе использовались две фазы: рост слоя InGaN и прерываний роста в азот-водородной атмосфере. Во время прерываний роста происходит декомпозиция приповерхностного слоя InGaN, удаление атомов In с поверхности и формирование слоя GaN. Таким образом, при циклическом повторении двух этих фаз (роста и прерываний) происходит формирование сверхрешетки, состоящей из слоев InGaN и GaN (рис. 5).

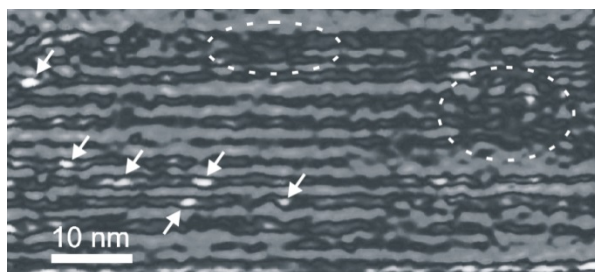


Рис. 5. ГРА изображения КПСР. Темные полосы – слои InGaN, светлые полосы – слои GaN, пунктирные линии – области смыкания соседних слоев InGaN, стрелки – In-обогащенные области.

Формирующийся на поверхности слой GaN препятствует дальнейшей декомпозиции InGaN и, следовательно, при данном методе роста толщина слоев GaN определяется «самоконтролирующимся» процессом конвертации, что позволяет получать сверхтонкие (~1 нм) слои сверхрешетки с высокой точностью. Было показано, что данный процесс конвертации InGaN в GaN происходит и при прерываниях роста в атмосфере азота, но использование азот-водородной атмосферы ускоряет процесс конвертации. Было показано, что КПСР представляют собой хорошо сформированные периодические структуры, обладающие высоким структурным совершенством, сложным градиентным распределением индия внутри периода, образованием локальных In-обогащенных областей и областей смыкания соседних слоев InGaN, приводящих к образованию областей, локализуемых носители заряда (рис. 5). Были проведены исследования оптических свойств выращенных КПСР InGaN/GaN различным количеством периодов. Было показано, что помимо линии, связанной с излучением слоев КПСР, спектры ФЛ содержат линию, сдвинутую в область меньших энергий, связанную с рекомбинацией носителей через локализованные состояния, обусловленные смыканием соседних слоев InGaN или In-обогащенными областями.

На основе развитых технологических подходов была изучена применимость концепции субмонослойного роста, которая была детально разработана для A_3B_5 [16, 17] и A_2B_6 [18] материалов, для гетероструктур InGaN/(Al,Ga)N. Данная концепция основана на том, что при субмонослойном осаждении InGaN (т.е. осаждении слоя InGaN с эффективной толщиной менее одного монослоя) распределение атомов индия неоднородно по поверхности и при нескольких циклах субмонослойного осаждения InGaN/GaN происходит формирование в КЯ In-обогащенных областей. Проведенные исследования показывали, что при росте тонких КЯ InGaN (толщиной ~3 нм) с помощью субмонослойного осаждения их структурные свойства определяются не только технологическими условиями, но и дизайном структуры (количеством и эффективной толщиной субмонослоев и барьерами между ними).

Были исследованы КЯ $In_xGa_{1-x}N$ в матрицах $In_yGa_{1-y}N$ ($x > y$) и AlGaN. В структурах $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$ было показано, во-первых, увеличение энергии локализации носителей относительно состояний материала матрицы за счет изменения свойств In-обогащенных областей и, во-вторых, изменение транспорта носителей. Поскольку при определенных условиях роста (давление роста, состав газовой атмосферы, использование прерываний) для КЯ InGaN характерно как наличие непрерывного спектра состояний, так и локализованных состояний, то наращивание КЯ слоем InGaN может привести как к увеличению энергетического расстояния между локализованными состояниями и непрерывным спектром, так и к его уменьшению. Было показано, что в гетероструктурах $In_xGa_{1-x}N/In_yGa_{1-y}N$ наблюдается увеличение энергии локализации носителей, приводящее к тому, что квазиравновесная заселенность состояний

достигается при температуре ~ 600 К. Были проведены исследования оптических свойств гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ методами микро-ФЛ и ФЛ ближнего поля в магнитном поле. Они показали, что при уменьшении пространственного разрешения до 300 нм, в спектрах излучения появляются узкие линии, соответствующие излучению отдельных In-обогащенных областей, имеющих δ -образную плотность состояний, для которых характерен очень слабый диамагнитный сдвиг в диапазоне полей 0-9 Т.

Изучены свойства КЯ InGaN в матрице AlGaN в зависимости от длины волны излучения КЯ. Было показано, что для КЯ InGaN с относительно небольшим содержанием индия, излучающих в диапазоне ~ 390 -440 нм, сдвиг линии излучения при осаждении их в матрицу AlGaN не наблюдается. Однако, для КЯ InGaN, излучающих в диапазоне 490-500 нм, наблюдалось увеличение энергии локализации носителей и длинноволновый сдвиг излучения, который объясняется совместным действием следующих эффектов. Во-первых, в структуре InGaN/AlGaN происходит изменение встроенных электрических полей, приводящих к уменьшению энергии оптического перехода [19]. Во-вторых, как было показано в данной работе, при заравнивании КЯ InGaN слоем AlGaN наблюдается уменьшение влияние неоднородности распределения атомов индия на оптические свойства КЯ, что может быть объяснено более однородным распределением атомов индия.

Были проведены исследования *in-situ* формирования In-обогащенных областей в КЯ InGaN путем формирования композитных InAlN/InGaN структур, в которых узкозонная КЯ InGaN осаждалась на поверхность широкозонных InAlN стрессоров, которые также представляют собой островки, образующиеся при осаждении слоя InAlN толщиной 9-18 нм (рис. 6 а). За счет неоднородных упругих напряжений, создаваемых массивом стрессоров, в КЯ InGaN стимулировался локальный фазовый распад, который приводил к формированию изолированных островков (рис. 6 б).

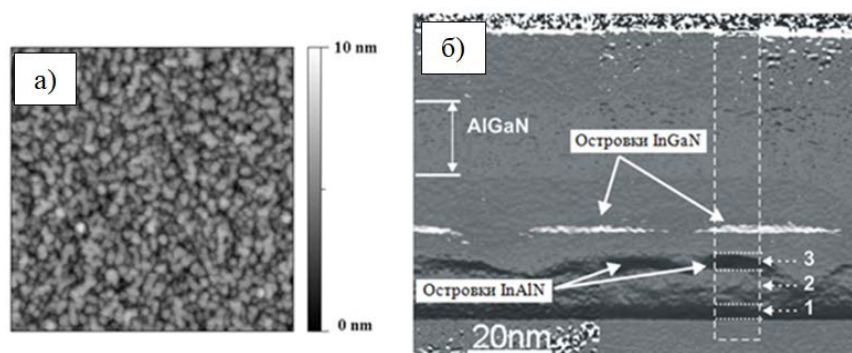


Рис. 6. АСМ (а) и ГРА (б) изображения слоя InAlN толщиной 9 нм (а) и композитной InAlN/InGaN структуры (б) с толщинами слоев InAlN и InGaN, равными 9 нм и 3 нм, соответственно.

Были проведены детальные исследования структурных и оптических свойств таких композитных структур и была показана возможность реализации в них излучения вплоть до красной области спектра. Однако, эффективность излучения таких структур была достаточно низкой.

На основе изученных эффектов нестабильности (In,Ga)N в атмосфере водорода и стимулирования образования островков в КЯ InGaN с помощью внешних стрессоров был предложен новый метод формирования наноструктур InGaN/GaN, излучающих в длинноволновом спектральном диапазоне, основанный на *in-situ* наномаскировании с использованием GaN-AlN структур. Было показано, что при прерываниях роста в азот-водородной атмосфере закрытого слоем AlN слоя GaN на поверхности образуются ямки травления с плотностью $5-7 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$, что на порядок превышает плотность прорастающих дислокаций. В области ямки травления нарушение сплошности напряженного слоя AlN приводит к его локальной релаксации и увеличению параметра решетки GaN, что локально повышает эффективность вхождения индия при осаждении КЯ InGaN непосредственно после формирования описываемых ямок. Было показано, что осаждение КЯ InGaN, излучающей в синей области спектра (в структурах без использования наномаскирования), на поверхность, содержащую ямки травления, приводит к ее сдвигу в желто-зеленую область спектра.

Третья глава посвящена исследованиям светоизлучающих структур с активной областью на основе КЯ InGaN и КПСР InGaN/GaN. Комбинированное использование КПСР InGaN/GaN, формирование которых было описано выше, и КЯ InGaN, трансформированных в массив островков, позволило создать новые конструкции активных областей светоизлучающих структур, расширить спектральный диапазон их излучения и разработать дизайн активной области монолитных светодиодных структур, содержащей несколько КЯ InGaN, излучающих при различных длинах волн.

Был предложен дизайн светодиодных структур, содержащих в активной области КЯ InGaN/GaN, трансформированные в массив островков с помощью прерываний роста, ограниченные с одной или обеих сторон КПСР InGaN/GaN с постоянным или переменным (варизонные КПСР) содержанием атомов индия (рис. 7 а). Варизонные КПСР с переменным составом формировались путем линейного уменьшения/увеличения температуры во время роста, что приводило к изменению содержания индия по толщине сверхрешетки. Обычно, светодиодные структуры синего диапазона содержат специальные слои между активной областью и слоем n-GaN, в качестве которых могут выступать КЯ InGaN/GaN или толстый слой InGaN меньшего состава, низкотемпературный слой GaN. Использование таких слоев позволяет

увеличить эффективность излучения, при этом в литературе приводится достаточно большое количество причины этого эффекта [20].

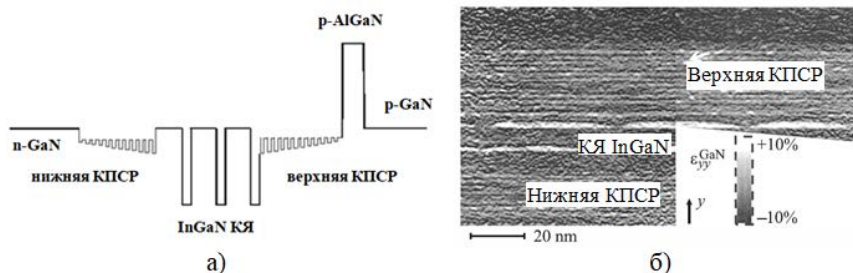


Рис. 7. Схематическое (а) и GPR изображение (б) InGaN/GaN активной области исследованных структур.

Было проведено сравнение светодиодной структуры, содержащей КПСР между n-GaN и активной областью, со стандартной светодиодной структурой, содержащей в этом месте структуры набор КЯ InGaN, имеющих низкое содержание индия. Из анализа зависимостей ВКЭ от тока было показано, что осаждение нижней КПСР приводит к уменьшению числа дефектов в активной области и подавлению безызлучательной рекомбинации. Использование верхней КПСР вместо слоя GaN позволяет улучшить инжекцию дырок в активную область и увеличить толщину барьера между активной областью и блокирующим слоем p-AlGaN, легированным магнием. Это уменьшает в КЯ концентрацию атомов магния и, следовательно, снижает плотность глубоких дефектов, подавляющих эффективность излучения. Полученные ПЭМ ВР значения параметров КЯ InGaN и островков (толщины, содержание индия, латеральные размеры) были использованы для моделирования транспорта носителей с использованием диффузионно-дрейфовой модели совместным решением уравнения непрерывности для электронов и дырок и уравнения Пуассона. Сравнение протекания электронов и дырок через такую «островковую» активную область с протеканием электронов через активную область, содержащую сплошные КЯ InGaN, показало, что в то время как в структуре с сплошными КЯ распределение тока латерально однородно, в структуре с островками InGaN ситуация другая. Траектории носителей огибают потенциальные барьеры на вершине и дне островка, что приводит к транспорту носителей между островками в матрице, и инжекция носителей в островки происходит, в основном, через их края. Данный вывод был подтвержден исследованиями вольт-амперных характеристик выращенных структур. Из выращенных светодиодных структур с оптимальным дизайном были изготовлены светодиоды без применения каких-либо специализированных методов, увеличивающих вывод света (использование профилированных подложек или отделение подложек), которые показали значения ВКЭ излучения ~30%. На основе полученных результатов были проведены оценки

внутренней квантовой эффективности излучения (IQE) по методике, описанной в работе [21], которые дали значение IQE ~70% [A48], что соответствует мировому уровню для структур синего диапазона.

Развитые методы формирования КЯ и КПСР были использованы для создания светодиодных структур желто-зеленого диапазона. В отличие от светодиодных структур синего диапазона, для светодиодных структур желто-зеленого диапазона, содержащих 1, 3 или 5 КЯ, выращенных в одинаковых технологических режимах, наблюдается сильная зависимость спектрального положения линий излучения от числа КЯ InGaN. Этот эффект обусловлен релаксацией упругих напряжений в многоямных InGaN/GaN структурах и позволяет сдвинуть линию излучения от 500 нм в одиночной КЯ InGaN до 570-590 нм в InGaN/GaN структуре с тремя КЯ. Однако, многоямные структур, полученные таким образом, характеризуются низкой эффективностью излучения. Для улучшения структурных и оптических свойств был предложен дизайн активной области на основе одной КЯ InGaN с высоким содержанием индия и нижележащей КПСР (рис. 8 а,б). КЯ и КПСР были разделены слоем GaN, выращенным при пониженной температуре (LT-GaN). Исследования дизайна активной области показала, что параметры КПСР и LT GaN должны быть оптимизированы совместно для обеспечения максимальной ВКЭ излучения. Зависимость ВКЭ от толщины LT-GaN очень сильная в области малых толщин и насыщается при толщине 10-15 нм с некоторым увеличением в области 20-25 нм. Значение этого слоя состоит в предотвращении инжекции дырок в КПСР из активной области.

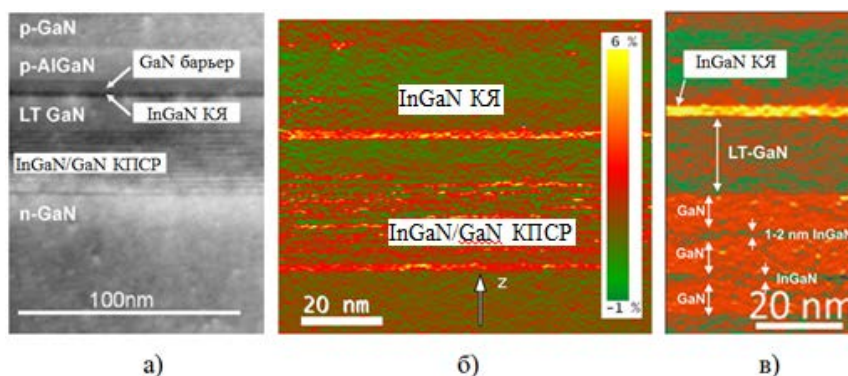


Рис. 8. Изображения ПЭМ ВР светодиодной структуры в целом (а) и ГРА изображения активной области, содержащей 12-и (б) и 3-х (в) периодную КПСР.

Были проведены исследования влияния числа периодов КПСР на ВКЭ излучения. Значения максимальной ВКЭ, полученные на собранных светодиодах, составили (8-20)% для диапазона длин волн (560-530) нм и были получены для структур с 3-периодной КПСР (рис. 8 в) и p-GaN слоем, выращенным в безводородной атмосфере. Оценки внутренней квантовой эффективности

(IQE) по методике, описанной в работе [21], дали значение IQE ~40% для длины волны 550-560 нм, что соответствует мировому уровню для структур желто-зеленого диапазона.

В работе были исследованы подходы к созданию монокристаллических белых светодиодов с активной областью на основе КЯ InGaN, излучающих при различных длинах волн, и КПСР InGaN/GaN. Были созданы безлюминофорные белые светодиоды с монокристаллической активной областью, излучающей в диапазоне 440-570 нм, и люминофорные белые светодиоды с монокристаллической активной областью, излучающей в диапазоне 440-530 нм. Для исследований безлюминофорных светодиодов были выращены структуры, содержащие в активной области две КЯ InGaN толщиной 3 нм, излучающие в синем диапазоне 440-450 нм («синие» КЯ), разделенные барьером GaN толщиной ~10 нм, и КЯ InGaN толщиной ~3 нм, излучающая в желто-зеленом диапазоне 540-570 нм («зеленая» КЯ) (рис. 9). ГРА изображения показали, что верхние интерфейсы «синих» КЯ являются не планарными, что связано с использованием при их росте прерываний, которые привели к вариациям в толщинах КЯ. «Синие» и «зеленая» КЯ были разделены барьером GaN, толщина которого изменялась в различных структурах от 8 до 24 нм, или КПСР InGaN/GaN с толщинами слоёв InGaN и GaN ~1 нм, содержащей в различных структурах 6 или 12 периодов.

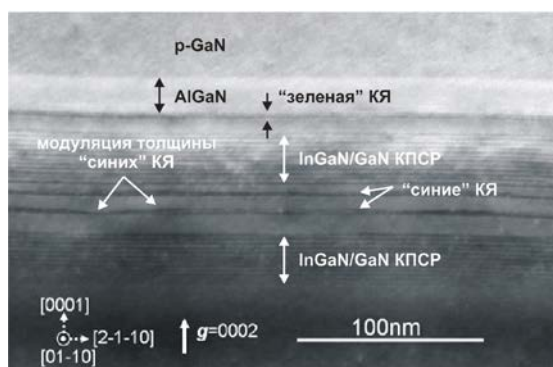


Рис. 9. Изображение ПЭМ ВР монокристаллической светодиодной структуры, содержащей 12-периодную нижнюю КПСР и барьер между «синими» и «зеленой» КЯ на основе 12-периодной КПСР [А46].

Были исследованы эффективности излучения и отношения амплитуд «зелёной» и «синей» полос ЭЛ (R_{GB}) от тока для структур различного дизайна. Численное моделирование транспорта носителей заряда и излучения монокристаллической активной области, проведённое с использованием значений толщин слоёв и составов, полученных ПЭМ ВР, показало высокую чувствительность отношения R_{GB} к уровню легирования и толщине барьерного слоя. Светодиодные структуры с GaN барьером показывают более высокое значение ВКЭ по сравнению со структурами с барьерами на основе КПСР, что связано с меньшим общим содержанием индия в активной области и, соответственно, с меньшим числом дефектов. Были

рассмотрены основные факторы, определяющие эффективность излучения монолитных светодиодов, в зависимости от их дизайна. Для этого эффективности излучения монолитных светодиодов были сопоставлены с эффективностями излучения светодиодных структур, содержащих только «зеленую» или «синие» КЯ, соответственно. Для монолитных светодиодных структур независимо от типа барьера наблюдается уменьшение эффективности излучения по сравнению со стандартными структурами, причем данное различие максимально для малых токов и уменьшается с ростом тока через структуру. Было показано, что ухудшение эффективности излучения связано с ухудшением качества «зеленой» КЯ, что обусловлено неоптимальным дизайном монолитной активной области, в которой «зеленая» КЯ осаждается не на специально спроектированную КПСР и LT-GaN слой, а на барьерный слой GaN или КПСР, имеющую другой дизайн.

Зависимость ширин и интенсивностей «синей» и «зеленой» линий излучения от тока приводит к токовой зависимости цветовых характеристик излучения монолитного светодиода. С точки зрения практического применения, токовая зависимость цветовых координат является отрицательным эффектом, поскольку требуется точное поддержание тока, протекающего через светодиод. С другой стороны, открывается возможность управления цветовыми параметрами излучения монолитных светодиодов используя широтно-импульсную модуляцию протекающего через светодиод тока. В случае монолитной светодиодной структуры, для «синих» и «зеленой» КЯ характерна различная зависимость ВКЭ от тока, что и позволяет изменять отношение их интенсивностей и, следовательно, цветовые координаты с помощью широтно-импульсной модуляции тока, протекающего через структуру. Задавая амплитуду импульса можно задавать плотность тока через светодиод и, следовательно, соотношение интенсивностей линий излучения, а изменяя коэффициент заполнения, можно поддерживать требуемый уровень светового потока. Было показано, что для безлюминофорных монолитных белых дихромных светодиодов с длинами волн излучения 440 нм и 540 нм, изменяя ток в диапазоне 0.1-1 А и одновременно уменьшая длительность импульса, можно при постоянном световом потоке изменить отношение интенсивностей «зеленой» и «синей» линий излучения от ~0.8 до ~0.2, изменяя таким образом значение коррелированной цветовой температуры (ССТ) более, чем в три раза, переходя от «холодного» излучения к «нейтральному».

Основной проблемой безлюминофорных монолитных белых светодиодов является их низкая эффективность излучения и малое значение индекса цветопередачи (CRI), что связано со сложностью создания активной области оптимального дизайна, содержащей достаточно много КЯ InGaN с различной длиной волны. Для получения белого света совместно с люминофорным покрытием были исследованы светодиодные структуры с монолитной активной областью, излучающей в диапазоне 430-530 нм,. Такой подход позволяет, с одной стороны, сохранить

высокую эффективность излучения поскольку общее содержание индия в активной области невелико. а с другой стороны, за счет перекрытия провалов в спектрах излучения белых люминофорных светодиодов на основе синих светодиодов в диапазоне длин волн ~ 500 нм, реализовать высокий индекс цветопередачи. Были исследованы белые светодиоды с монокристаллической активной областью, излучающей при длинах волн 430-435 нм и 460-490 нм, с использованием коммерческой люминофорной панели (RF3000K-96), производства компании Phosphortech Corporation, которая содержала смесь красного и зеленого люминофора. Оптимизация дизайна активной области показала, что последовательность КЯ в активной области, при которой сначала осаждается КЯ, излучающая при 460-490 нм, а затем – КЯ, излучающая при 430-435 нм (рис. 10 а), позволяет получить максимальное значение ВКЭ. Кроме того, такая последовательность КЯ обеспечивает необходимое соотношение интенсивностей линий излучения для реализации белого света при нанесении люминофора. Исследования спектров излучения от толщины барьера между КЯ и от его легирования показали возможность управлять соотношением линий излучения, что дает возможность контроля спектральных параметров.

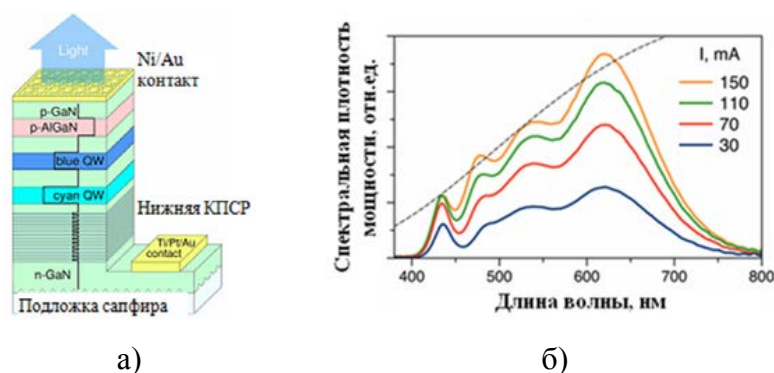


Рис. 10. Схематическое изображение гетероструктуры и тестового светодиодного кристалла (а). Спектры ЭЛ белого светодиода с монокристаллической активной областью с нанесенным люминофором (б).

Спектры излучения светодиода с люминофором приведены на рис. 10 б. Видно, что результирующий спектр излучения близок к излучению абсолютно черного тела (пунктирная линия на рис. 10). Созданные светодиоды продемонстрировали максимальное значение индекса цветопередачи $Ra(8)=98.6$ и $Ra(14)=97.4$ при $ССТ=3300-3500$ К (рис. 11), полученные с помощью измерений 8 или 14 стандартных эталонных цветов, что очень близко к максимальному экспериментально продемонстрированному значению $CRI=99.1$ при $ССТ=5322$ К, которое было достигнуто в работе [22] для источника белого света на основе ультрафиолетового светодиода и трех люминофоров. Необходимо отметить, что для данных

структур наблюдается хорошая стабильность цветовых координат в диапазоне токов 30-190 мА (вставка на рис. 11).

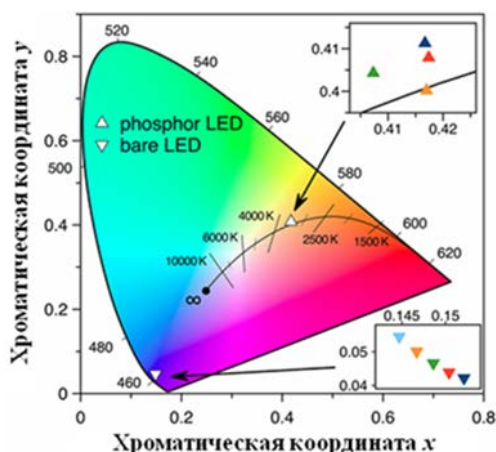


Рис. 11. Цветовые координаты излучения белого светодиода с нанесенным люминофором. Верхняя вставка – цветовые координаты светодиодного кристалла с люминофором, нижняя вставка – цветовые координаты светодиодного кристалла без люминофора (цвета символов соответствуют токам от 30 до 190 мА).

В заключении приводятся основные результаты работы:

1. Показано, что применение прерываний роста в азот-водородной атмосфере после осаждения КЯ InGaN позволяет трансформировать сплошную КЯ яму в массив изолированных островков с латеральными размерами от единиц до десятков нанометров. Увеличение давления при росте КЯ стимулирует данный процесс трансформации. Помимо образования островков, имеющих размеры в десятки нанометров, определенные технологические условия роста (такие как прерывания роста в азот-водородной атмосфере, рост КЯ InGaN/GaN методом термоциклирования) позволяют формировать выраженные In-обогащенные области, имеющие латеральные размеры единицы нанометров, т.е. квантовые точки, с плотностью до $3 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Формирующиеся квантовые точки определяют оптические свойства гетероструктур InGaN/GaN вплоть до комнатной температуры и высоких плотностей возбуждения.

2. Рост КЯ InGaN в азот-водородной атмосфере при низком давлении (до 200 мбар) позволяет подавить эффект фазового распада и получать однородные по распределению атомов индия квантовые ямы.

3. На основе разработанных методов роста КЯ InGaN были выращены новые типы III-N гетероструктур. Показано, что использование циклических прерываний при росте InGaN в азот-водородной атмосфере позволяет формировать КПСР InGaN/GaN с толщинами слоев ~ 1 нм и большим количеством периодов (вплоть до 60-ти периодов). Показано, что для III-N гетероструктур применим метод субмонослойного роста КЯ InGaN, который позволяет

стимулировать формирование в КЯ In-обогащенных областей. Исследованы структурные и оптические свойства гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ и $\text{InGaN}/\text{AlGaIn}$ и показано увеличение энергии локализации носителей в таких структурах. Были выращены и исследованы композитные $\text{InAlN}/\text{GaN}/\text{InGaN}$ гетероструктуры, позволяющие трансформировать КЯ InGaN в массив изолированных островков и обеспечивающие излучение вплоть до красной области спектра. Предложен новый метод формирования наноструктур InGaN/GaN , излучающих в длинноволновом спектральном диапазоне, основанный на *in-situ* наномаскировании.

4. Разработанные методы роста позволили создать светодиодные структуры синего и желто-зеленого диапазонов. Прерывания роста, также как увеличение давления, в случае эпитаксиального роста светодиодных структур синего диапазона, позволяют реализовать высокую эффективность излучения за счет трансформации сплошной КЯ в массив изолированных островков, которые подавляют транспорт носителей в плоскости КЯ к областям дефектов, высокая плотность которых характерна для III-N гетероструктур, выращенных на инородных подложках. Использование КПСР InGaN/GaN в активной области светодиодных структур позволяет улучшить структурное совершенство, инжекционные свойства и реализовать высокую эффективность излучения. Разработан дизайн светодиодных структур желто-зеленого диапазона, основанный на использовании последовательности КПСР InGaN/GaN , низкотемпературного слоя LT-GaN и одиночной КЯ InGaN высокого состава.

5. Изучены гетероструктуры для источников белого света с монокристаллической активной областью на основе КЯ InGaN , излучающих в различных спектральных диапазонах. Показано, что использование в качестве барьеров, разделяющих КЯ, КПСР InGaN/GaN позволяет реализовать эффективную инжекцию во все КЯ в активной области. Изменяя параметры барьеров, разделяющих КЯ (толщины, состав, легирование), можно влиять на соотношение интенсивностей линий излучения отдельных КЯ и, следовательно, на цветовые параметры излучения. Зависимость спектральных параметров излучения от плотности тока дает возможность создавать белые светодиоды с монокристаллической активной областью с динамически изменяющимися цветовыми параметрами. Использование светодиодной гетероструктуры с монокристаллической активной областью совместно с люминофорным покрытием позволяет создавать светодиоды, имеющие высокие значения ВКЭ и предельные значения CRI.

Таким образом, в ходе работы проведено комплексное исследование технологических подходов к росту светоизлучающих III-N гетероструктур, содержащих локальные In-обогащенные области с размерами от единиц до десятков нанометров, методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений, исследованы их структурные свойства в зависимости от технологических условий, изучена их взаимосвязь с оптическими свойствами, разработана воспроизводимая технология создания гетероструктур для высокоэффективных

источников излучения видимого диапазона и источников белого света, пригодных для применения в системах высококачественного и интеллектуального освещения.

Список основных публикаций по теме диссертации

- [A1] Сахаров А.В., Лундин В.В., Семенов В.А., Усиков А.С., Леденцов Н.Н., Цацульников А.Ф., Байдакова М.В. Лазерная генерация в вертикальном направлении в многослойных квантово-размерных InGaN/GaN гетероструктурах. // Письма в ЖТФ. – 1999 – Т. 25 (12) - Стр. 1-9.
- [A2] Sakharov A.V., Lundin W.V., Krestnikov I.L., Semenov V.A., Usikov A.S., Tsatsul'nikov A.F., Musikhin Yu.G., Baidakova M.V., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Optical Properties of Structures with Single and Multiple InGaN Insertions in a GaN Matrix // Phys. Stat. Sol.(b) – 1999 – Vol. 216 - Pp.435-440.
- [A3] Krestnikov I.L., Lundin W.V., Sakharov A.V., Semenov V.A., Usikov A.S., Tsatsul'nikov A.F., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Photopumped InGaN/GaN/AlGaN Vertical Cavity Surface Emitting Laser Operating at Room Temperature. // Phys. Stat. Sol.(b) – 1999 – Vol. 216 - Pp.511-515.
- [A4] Sakharov A.V., Lundin W.V., Krestnikov I.L., Semenov V.A., Usikov A.S., Tsatsul'nikov A.F., Musikhin Yu.G., Baidakova M.V., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Surface-mode lasing from stacked InGaN insertions in a GaN matrix. // Appl. Phys. Lett. – 1999 – Vol. 74 (26) – Pp. 3921-3923.
- [A5] Krestnikov I.L., Lundin W.V., Sakharov A.V., Semenov V.A., Usikov A.S., Tsatsul'nikov A.F., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Room-temperature photopumped InGaN/GaN/AlGaN vertical-cavity surface-emitting laser. // Appl. Phys. Lett. – 1999 – Vol. 75 (9) – PP.1192-1194.
- [A6] Крестников И.Л., Сахаров А.В., Лундин В.В., Мусихин Ю.Г., Карташова А.П., Усиков А.С., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н., Алферов Ж.И., Сошников И.П., Hahn E., Neubauer B., Rosenauer A., Litvinov D., Gerthsen D., Plaut A.C., Hoffmann A., Bimberg D. Лазерная генерация в вертикальном направлении в структурах InGaN/GaN/AlGaN с квантовыми точками InGaN. // ФТП – 2000 - Т. 34 (4) – стр. 496-503.
- [A7] Krestnikov I.L., Sakharov A.V., Lundin W.V., Usikov A.S., Tsatsul'nikov A.F., Ledentsov N.N., Alferov Zh.I., Soshnikov I.P., Gerthsen D., Plaut A.C., Holst J., Hoffmann A., Bimberg D. Lasing in Vertical Direction in Structures with InGaN Quantum Dots // Physica Status Solidi (a) – 2000 – Vol. 180 - Pp.91-96.
- [A8] Sakharov A.V., Usikov A.S., Lundin W.V., Tsatsulnikov A.F., Tu Ru Chin, Yin Sun Bin, Chi Jim Y. Comparative study of InGaN/GaN structures grown by MOCVD using various growth sequences // Phys Status Solidi b – 2001 – Vol. 228 (1) - Pp.95-98.
- [A9] Sakharov A.V., Usikov A.S., Lundin W.V., Bedarev D.A., Tsatsulnikov A.F., Zavarin E.E., Besulkin A.I., Ledentsov N.N., Bimberg D. Laser-like emission in the blue-green spectral

range from InGaN/GaN/AlGaN structures under optical pumping // Phys Status Solidi (a) – 2001 - Vol. 188 (1) - Pp.91-94.

- [A10] Lundin W.V., Sakharov A.V., Usikov A.S., Bedarev D.A., Tsatsulnikov A.F., Tu Ru Chin, Yin Sun Bin, Chi Jim Y. Growth, optical and structural characterization of InGaN/GaN/AlGaN optically pumped lasers // Phys Status Solidi (a) – 2001 – Vol. 188 (1) - Pp.73-77.
- [A11] Musikhin Yu.G., Gerthsen D., Bedarev D.A., Bert N.A., Lundin W.V., Tsatsulnikov A.F., Sakharov A.V., Usikov A.S., Alferov Zh.I., Krestnikov I.L., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Influence of metalorganic chemical vapor deposition growth conditions on In-rich nanoislands formation in InGaN/GaN structures // Appl. Phys. Lett. – 2002 – Vol. 80 (12) - Pp. 2099-2101.
- [A12] Krestnikov I.L., Sakharov A.V., Lundin W.V., Usikov A.S., Tsatsulnikov A.F., Musikhin Yu.G., Gerthsen D., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D. Time-resolved studies of InGaN/GaN quantum dots // Phys Status Solidi (a) – 2002 – Vol. 192 (1) - Pp.49–53.
- [A13] Krestnikov I.L., Ledentsov N.N., Hoffmann A., Bimberg D., Sakharov A.V., Lundin W.V., Tsatsul'nikov A.F., Usikov A.S., Alferov Zh.I., Musikhin Yu.G., Gerthsen D. Quantum dot origin of luminescence in InGaN-GaN structures. // Phys. Rev. B – 2002 – Vol. 66 - P. 155310.
- [A14] Сизов Д.С., Сизов В.С., Заварин Е.Е., Лундин В.В., Фомин А.В., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н. Кинетика и неоднородная инжекция носителей в нанослоях InGaN // Физика и техника полупроводников – 2005 – Т. 39 (2) – Стр. 264-268.
- [A15] Сизов Д.С., Сизов В.С., Заварин Е.Е., Лундин В.В., Фомин А.В., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н. Исследование статистики носителей в светодиодных структурах InGaN/GaN. // Физика и техника полупроводников – 2005 – Т. 39 (4) – Стр. 492-496.
- [A16] Сизов Д.С., Сизов В.С., Лундин В.В., Цацульников А.Ф., Заварин Е.Е., Леденцов Н.Н. Исследование электронного спектра структур с квантовыми точками InGaN с помощью спектроскопии фототока. // Физика и техника полупроводников – 2005 – Т. 39 (11) – Стр. 1350-1353.
- [A17] Sizov D.S., Sizov V.S., Lundin V.V., Zavarin E.E., Tsatsul'nikov A.F., Vlasov A.S., Musikhin Yu.G., Ledentsov N.N., Mintairov A.M., Sun K., Merz J. Localization of non-equilibrium carriers in deep InGaN quantum dots and its impact on the device performance // Phys Status Solidi (a) – 2006 – Vol. 3 (6) - Pp: 2043–2047.
- [A18] Сизов В.С., Сизов Д.С., Михайловский Г.А., Заварин Е.Е., Лундин В.В., Цацульников А.Ф., Леденцов Н.Н. Исследование латерального транспорта носителей в структурах

с квантовыми точками InGaN в активной области // Физика и техника полупроводников – 2006 – Т. 40 (5) – Стр. 589-596.

- [A19] Сизов Д.С., Заварин Е.Е., Леденцов Н.Н., Лундин В.В., Мусихин Ю.Г., Сизов В.С., Сурис Р.А., Цацульников А.Ф. Неравновесная заселенность носителей в структурах с глубокими квантовыми точками InGaN // Физика и техника полупроводников – 2007 – Т. 41 (5) – Стр. 595-608.
- [A20] Usov S.O., Tsatsulnikov A.F., Lundin V.V., Sakharov A.V., Zavarin E.E., Sizov D.S., Musikhin Y.G., Bert N.A., Arakcheeva E.M., Ledentsov N.N. Analysis of the local indium composition in ultrathin InGaN layers. // *Semicond. Sci. Technol.* – 2007 – Vol.22 – Pp. 528-532.
- [A21] Сизов В.С., Цацульников А.Ф., Лундин В.В. Нановключения InGaN в матрице AlGaN. // Физика и техника полупроводников – 2008 – Т. 42 (7) – Стр. 804-809.
- [A22] Сизов В.С., Гуткин А. А., Сахаров А. В., Лундин В. В., Брунков П. Н., Цацульников А.Ф. Фазовый распад и безызлучательная рекомбинация носителей в активных областях светоизлучающих приборов на основе InGaN квантовых точек в матрице GaN или AlGaN. // Физика и техника полупроводников – 2009 – Т. 43 (6) - Стр.836-840.
- [A23] Сахаров А. В., Лундин В. В., Заварин Е. Е., Синицын М. А., Николаев А. Е., Усов С. О., Сизов В. С., Михайловский Г. А., Черкашин Н. А., Nytych M., Hue F., Яковлев Е. В., Лобанова А.В., Цацульников А. Ф Влияние релаксации напряжений на формирование активной области InGaN/(Al)GaN гетероструктур для светодиодов зеленого диапазона // Физика и техника полупроводников – 2009 – Т. 43 (6) - Стр.841-846.
- [A24] Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Лундин В.В., Давыдов Д.В., Сизов В.С., Цацульников А.Ф. Формирование индий-обогащенных островковых структур методом in-situ наномаскирования // Письма в Журнал технической физики – 2009 – Т. 35 (21) - Стр.88-95.
- [A25] Гончаров В.В., Корытов М.Н., Брунков П.Н., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Цацульников А.Ф., Конников С.Г. Исследование формирования квантовых точек InGaN на поверхности GaN // Известия академии наук, серия физическая – 2009 – Т. 73 (1) - Стр. 40–42.
- [A26] Цацульников А.Ф., Лундин В.В, Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Черкашин Н.А., Бер Б.Я., Казанцев Д.Ю., Мизеров М.Н., Park Hee Seok, Nytych M., Hue F. Варизонная активная область на основе короткопериодных InGaN/GaN сверхрешеток для мощных светоизлучающих диодов диапазона 440-470 нм // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (1) - Стр. 96-100.

- [A27] Лундин В. В., Заварин Е. Е., Сеницын М.А., Сахаров А. В., Усов С.О., Николаев А.Е., Давыдов Д.В., Черкашин Н.А., Цацульников А. Ф. Влияние давления в реакторе на свойства активной области InGaN/GaN светодиодов // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (1) - Стр. 126-129.
- [A28] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Крыжановская Н.В., Сеницын М.А., Сизов В.С., Закгейм А.Л., Мизеров М.Н. Монолитный белый светодиод с активной областью на основе квантовых ям InGaN, разделенных короткопериодными InGaN/GaN сверхрешетками // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (6) - Стр. 837-840.
- [A29] Крыжановская Н.В., Лундин В.В., Николаев А.Е., Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Павлов М.М., Черкашин Н.А., Вальковский Г.А., Яговкина М.А., Усов С.О. Исследования оптических и структурных свойств короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN для активной области светоизлучающих диодов // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (6) - Стр. 857-863.
- [A30] Сизов В.С., Цацульников А.Ф., Сахаров А.В., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Черкашин Н.А., Hytch M.J., Николаев А.Е., Минтаиров А.М., He Yan, Merz J.L. Использование короткопериодных сверхрешеток InGaN/GaN в светодиодах синего диапазона // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (7) - Стр. 955-961.
- [A31] Цацульников А.Ф., Заварин Е.Е., Крыжановская Н.В., Лундин В.В., Сахаров А.В., Усов С.О., Брунков П.Н., Гончаров В.В., Черкашин Н.А., Hytch M. Формирование композитных квантовых точек InGaN/GaN/InAlN // Физика и техника полупроводников – 2010 – Т. 44 (10) - Стр. 1382-1386.
- [A32] Лундин В.В., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Сизов В.С., Закгейм А.Л., Черняков А.Е., Цацульников А.Ф. Высокоэффективные InGaN/GaN/AlGaIn светодиоды с короткопериодной InGaN/GaN сверхрешеткой для диапазона 530-560 nm // Письма в Журнал технической физики – 2010 – Т. 36 (22) - Стр. 89-95.
- [A33] Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Sakharov A. V., Zavarin E. E., Usov S. O., Nikolaev A. E., Kryzhanovskaya N. V., Chernyakov A. E., Zakgeim A. L., Cherkashin N.A., Hytch M. Deep green and monolithic white LEDs based on combination of short-period InGaN/GaN superlattice and InGaN QWs // AIP Conf. Proc. – 2011 -Vol.1399 – Pp. 253-254.
- [A34] Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Sakharov A. V., Zavarin E. E., Usov S. O., Nikolaev A. E., Kryzhanovskaya N. V., Sizov V.S., Chernyakov A. E., Zakgeim A. L., Cherkashin N.A., Hytch M. InGaN/GaN Short-Period Superlattices: Synthesis, Properties, Applications // Phys. Status Solidi C – 2011 – Vol. 8 (7–8) – Pp. 2308–2310.

- [A35] Lundin W.V., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Ustinov V.M. MOVPE of device-oriented wide-band-gap III-N heterostructures // *Semicond. Sci. Technol.* – 2011 – Vol. 26 (1) – Pp. 014039.
- [A36] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Сизов В.С., Усов С.О., Мусихин Ю.Г., Gerthsen D. Влияние водорода на локальную фазовую сепарацию в тонких слоях InGaN и свойства светодиодных структур на их основе // *Физика и техника полупроводников* – 2011 – Т. 45 (2) - Стр. 274-279.
- [A37] Single quantum well deep-green LEDs with buried InGaN/GaN short-period superlattice W.V. Lundina, A.E. Nikolaev, A.V. Sakharov, E.E. Zavarin, G.A. Valkovskiy, M.A. Yagovkina, S.O. Usov, N.V. Kryzhanovskaya, V.S. Sizov, P.N. Brunkov, A.L. Zakgeim, A.E. Cherniakov, N.A. Cherkashin, M.J. Hytch, E.V. Yakovlev, D.S. Bazarevskiy, M.M. Rozhavskaya, A.F. Tsatsulnikov // *Journal of Crystal Growth* 315 (2011) 267–271
- [A38] Устинов В. М., Цацульников А. Ф., Лундин В. В., Сахаров А. В., Николаев А. Е., Заварин Е. Е., Закгейм А. Л., Черняков А. Е., Мизеров М. Н., Черкашин Н. А., Hytch M. Монолитные белые светодиоды: подходы, технология, дизайн // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования* – 2012 - № 6 – Стр. 1–4.
- [A39] Tsatsulnikov A. F., Lundin W. V., Sakharov A. V., Zavarin E. E., Usov S. O., Nikolaev A. E., Sizov V. S., Zakgeim A. L., Mizerov M. N., Cherkashin N.A., Hytch M. Effect of stimulated phase separation on properties of blue, green and monolithic white LEDs // *Phys. Status Solidi C* – 2012 – Vol. 9 (3–4) – Pp. 774–777.
- [A40] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Сахаров А.В., Мусихин Ю.Г., Усов С.О., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Гетероструктуры InGaN/GaN, выращенные методом субмонослойного осаждения // *Физика и техника полупроводников* – 2012 – Т. 46 (10) - Стр. 1357-1362.
- [A41] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Рожавская М.М., Усов С.О., Брунков П.Н., Сеницын М.А., Дадыдов Д.В., Мизеров М.Н., Черкашин Н.А. Композитные InGaN/GaN/InAlN-гетероструктуры, излучающие в желто-красной области спектра // *Физика и техника полупроводников* – 2012 – Т. 46.(10) - Стр. 1304-1308.
- [A42] Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V. Stimulated Formation of InGaN Quantum Dots // “State-of-the-Art of Quantum Dot System Fabrications”, 172 стр. Publisher: InTech, 2012, ISBN 978-953-51-0649-4, стр.142-160.
- [A43] Titkov I.E., Yadav A, Zerova V.L., Zulonas M, Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Sakharov A.V., Rafailov E.U. Internal quantum efficiency and tunable colour temperature in monolithic

white InGaN/GaN LED // Proceedings SPIE. Gallium Nitride Materials and Devices IX – 2014 – Vol. 8986 – P. 89862A.

- [A44] Лундин В.В., Николаев А.Е., Сахаров А.В., Яговкина М.А., Цацульников А.Ф. Свойства гетероструктур InGaN/GaN, сформированных с помощью прерываний роста в различных условиях // Письма в Журнал технической физики – 2014 – Т. 40 (9) – Стр. 1-8.
- [A45] Bolshakov A.S., Chaldyshev V.V., Lundin W.V., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Yagovkina M.A., Zavarin E.E. Resonant Bragg structures based on III-nitrides // Journal of materials research – 2015 – Vol. 30 (5) – Pp. 603-608.
- [A46] Цацульников А.Ф., Лундин В.В., Сахаров А.В., Заварин Е.Е., Усов С.О., Николаев А.Е., Сеницын М.А., Черкашин Н.А., Карпов С.Ю. Исследование влияния дизайна активной области монокристаллических многоцветных светодиодных гетероструктур на спектры и эффективность их излучения // Физика и техника полупроводников – 2015 – Т. 49 (11) – Стр. 1563-1568.
- [A47] Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Sakharov A.V., Nikolaev A.E., Zavarin E.E., Usov S.O., Yagovkina M.A., Hÿtch M.J., Korytov M., Cherkashin N. Formation of Three-Dimensional Islands in the Active Region of InGaN Based Light Emitting Diodes Using a Growth Interruption Approach // Science of Advanced Materials - 2015 - Vol. 7 - Pp. 1629–1635.
- [A48] Karpov S.Yu., Cherkashin N.A., Lundin W.V., Nikolaev A.E., Sakharov A.V., Sinitsin M.A., Usov S.O., Zavarin E.E., Tsatsulnikov A.F. Multi-color monolithic III-nitride light-emitting diodes: Factors controlling emission spectra and efficiency // Phys. Status Solidi A – 2016 – Vol. 213 (1) – Pp. 19-29.
- [A49] Titkov I.E., Yadav A., Karpov S.Yu., Sakharov A.V., Tsatsulnikov A.F., Slight T.J., Gorodetsky A., Rafailov E.U. Superior color rendering with a phosphor-converted blue-cyan monolithic light-emitting diode // Laser Photonics Rev. – 2016 – Vol. 10 (6) – Pp. 1031–1038.
- [A50] Baretin D., der Maur M. Auf, Carlo Aldo di, Pecchia A., Tsatsulnikov A.F., Lundin W.V., Sakharov A.V., Nikolaev A.E., Korytov M., Cherkashin N., Hÿtch M.J., Karpov S.Yu. Carrier transport and emission efficiency in InGaN quantum-dot based light-emitting diodes // Nanotechnology – 2017 – Vol. 28 (27) - article number 275201.
- [A51] Baretin D., der Maur M. Auf, Pecchia A., Tsatsulnikov A.F., Sakharov A.V., Lundin W.V., Nikolaev A.E., Usov S.O., Cherkashin N., Hÿtch M., Carlo A. Di, Karpov S.Yu. Influence of electromechanical coupling on optical properties of InGaN quantum-dot based light-emitting diodes // Nanotechnology – 2017 – Vol. 28 (1) - article number 015701.

Список цитируемой литературы.

- 1 Solid-State Lighting R&D Plan [Электронный ресурс] // [2015.] URL: http://energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f22/ssl_rd-plan_may2015_0.pdf (дата обращения 20.05.2016).
- 2 Ho I., Stringfellow G. B. Solid phase immiscibility in GaInN // *Applied Physics Letters*. - 1996. – V. 69(18). – Pp. 2701-2703.
- 3 Amano H., Sawaki N., Akasaki I., Toyoda Y. Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer // *Applied Physics Letters*. - 1986. - Vol. 48(5). – Pp. 353-355.
- 4 Nakamura S., Senoh M., Iwasa N., Nagahama S. High-brightness InGaN blue, green and yellow light-emitting diodes with quantum well structures // *Japan Journal of Applied Physics*. - 1995. - Vol. 34(7A). - Pp. L797 - L799.
- 5 Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M, Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy // *J. Phys. D: Appl. Phys.* - 2010 – Vol. 43 – Pp. 354002 (6pp).
- 6 Мальцев П. П., Федоров Ю. В. Современное состояние и перспективы развития нитридных СВЧ приборов миллиметрового диапазона за рубежом и в России // «Интеграл»: Нанотехнологии и наноматериалы. - 2013. - Т. 3. №71. - Стр. 25-29.
- 7 Phillips J. M., Coltrin M. E., Crawford M. H., Fischer A. J., Krames M. R., Mueller-Mach R., Mueller G. O., Ohno Y., Rohwer L. E. S., Simmons J. A., Tsao J. Y. Research challenges toultra-efficient inorganic solid-state lighting // *Laser Photon. Rev.* - 2007 – Vol. 1 –Pp. 307-333.
- 8 Tsao J. Y., Crawford M. H., Coltrin M. E., Fischer A. J., Koleske D. D., Subramania G. S., Wang G. T., Wierer J. J., Karlicek R. F. Toward smart and ultra-efficient solid-state lighting // *Adv. Opt. Mater.* - 2014 – Vol. 2(9) - Pp. 809–836.
- 9 Chichibu S., Azuhata T., Sota T., Nakamura S. Spontaneous emission of localized excitons in InGaN single and multiquantum well structures // *Appl. Phys. Lett.* - 1996. – Vol. 69 (27) - Pp.4188-4190.
- 10 Jain S. C., Willander M., Narayana J., Overstraeten R. Van. III–nitrides: Growth, characterization, and properties. // *J. Appl. Phys.* – 2000 – Vol. 87, №3 – Pp. 965-1006.
- 11 Narukawa Y., Kawakami Y., Funato M., Fujita S., Fujita S., Nakamura S.. Role of self-formed InGaN quantum dots for exciton localization in the purple laser diode emitting at 420 nm // *Appl. Phys. Lett.* – 1997 – Vol. 70 (8) – Pp. 981-983.
- 12 Narukawa Y., Sawada K., Kawakami Y., Fujita S., Fujita S., Nakamura S. Emission mechanism of localized excitons in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ single quantum wells // *J. Cryst. Growth* – 1988 – Vol. 189/190 – Pp. 606-610.

-
- 13 Hytch M.J., Snoeck E., Kilaas R. Quantitative measurement of displacement and strain fields from HREM micrographs // *Ultramicroscopy* – 1998 – Vol. 74 Pp. 131-146.
- 14 HREM Research, <http://www.hremresearch.com>.
- 15 Bolshakov A. S., Chaldyshev V. V., Zavarin E. E., Sakharov A. V., Lundin W. V., Tsatsulnikov A. F., Yagovkina M. A. Room temperature exciton-polariton resonant reflection and suppressed absorption in periodic systems of InGaN quantum wells // *Journal of Applied Physics* – 2017 – Vol. 121 (13) - Pp.133101.
- 16 Алферов Ж.И., Бимберг Д., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Копьев П.С., Леденцов Н.Н., Рувимов С.С., Устинов В.М., Хейденрайх И. Напряженные субмонослойные гетероструктуры и гетероструктуры с квантовыми точками // - 1995 - *Успехи физических наук* – Т. 165 (2) – Стр. 224-225.
- 17 Ledentsov N.N., Tsatsul'nikov A.F., Egorov A.Yu., Kop'ev P.S., Kovsh A.R., Maximov M.V., Ustinov V.M., Volovik B.V., Zhukov A.E., Alferov Zh.I., Krestnikov I.L., Bimberg D., Hoffmann A. Intrinsic optical confinement and lasing in InAs–AlGaAs submonolayer superlattices // *Appl. Phys. Lett.* – 1999 – Vol. 74 (2) – Pp. 161-163.
- 18 Ledentsov N. N., Krestnikov I. L., Maximov M. V., Ivanov S. V., Sotomayor Torres C. M. Ground state exciton lasing in CdSe submonolayers inserted in a ZnSe matrix // *Appl. Phys. Lett.* – 1996 – Vol. 69 (10) – Pp. 1343-1345.
- 19 Saito S., Hashimoto R., Hwang J., Nunoue S. InGaN Light-Emitting Diodes on c -Face Sapphire Substrates in Green Gap Spectral Range // *Appl. Phys. Express* – 2013 - Vol. 6(11) - Pp.111004-1 - 111004-3.
- 20 V. Sheremet, N. Gheshlaghi, M. Sozen, M. Elci, N. Sheremet, A. Aydinli, I. Altuntas, K. Ding, V. Avrutin, Ü. Ozgür, H. Morkoç. InGaN stress compensation layers in InGaN/GaN blue LEDs with step graded electron injectors // *Superlattices and Microstructures* – 2018 – Vol. 116 – Pp. 253-26.1
- 21 Titkov I E, Karpov S Y, Yadav A, Zerova V L, Zulonon M, Galler B, Strassburg M, Pietzonka I, Lugauer H-J and Rafailov Temperature-dependent internal quantum efficiency of blue high-brightness light-emitting diodes. // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2014 - Vol. 50 (11) – Pp. 911-920.
- 22 Fukui T., Kamon K., Takeshita J., Hayashi H., Miyachi T., Uchida Y., Kurai S., Taguchi T. Superior Illuminant Characteristics of Color Rendering and Luminous Efficacy in Multilayered Phosphor Conversion White Light Sources Excited by Near-Ultraviolet Light-Emitting Diodes // *Jpn. J. Appl. Phys.* – 2009 – Vol. 48(11) – Pp. 112101-1 - 112101-6.