

На правах рукописи

СИЗОВ Виктор Сергеевич

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ InGaN/(In,Al)GaN АКТИВНОЙ
ОБЛАСТИ ДЛЯ СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИХ ПРИБОРОВ

(Специальность 01.04.10-физика полупроводников)

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе

Научный руководитель: кандидат физ.-мат. наук, с.н.с. ФТИ им. Иоффе
А.Ф. Цацульников.

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, проф. СПбГУ
Сидоров Валерий Георгиевич.

доктор физ.-мат. наук, проф. ФТИ им. Иоффе
Сейсян Рубен Павлович

Ведущая организация: Институт Аналитического
Приборостроения РАН

Защита состоится 21.10.2010 в 11³⁰ час. на заседании диссертационного
совета Д002.205.02 при Физико-Техническом институте им. А.Ф. Иоффе по
адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-Технического
института им.А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан 20.09.2010

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук

Л. М. Сорокин.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

Актуальность темы.

На сегодняшний день большинство полупроводниковых приборов получают на основе квантоворазмерных гетероструктур. Наибольшее количество исследований в этой области посвящается системе АЗВ5. Одним из основных применений квантоворазмерных гетероструктур являются светоизлучающие приборы: лазеры и светодиоды. Наиболее бурно развивается в последнее время технология получения светоизлучающих приборов на основе соединений нитрида галлия. Это связано с тем, что ширина запрещенной зоны этих соединений и их твердых растворов может варьироваться в диапазоне энергий соответствующих длинам волн от ультрафиолетового до инфракрасного. Другим привлекательным качеством нитридов элементов третьей группы являются их выдающаяся термическая, механическая и химическая стойкость.

Являясь одной из наиболее бурно развивающихся отраслей промышленности, полупроводниковая микроэлектроника охватывает всё более новые материалы, расширяя тем самым области применения и повышая качество полупроводниковых приборов. Уменьшение длины волны излучения лазера в оптических устройствах хранения информации приводит к значительному увеличению плотности записи. Использование светодиодов видимого диапазона позволяет создавать полноцветные светодиодные дисплеи, с высокими показателями контраста и цветопередачи. Являясь более надёжными и эффективными чем традиционные лампы, светоизлучающие диоды (СИ) используются в системах общего освещения.

Прорыв в развитии технологии получения нитридов-элементов третьей группы произошёл в 1986 году, когда Аmano обнаружил значительное усовершенствование качества эпитаксиальных слоёв GaN при использовании зародышевого слоя AlN [2]. Именно использование таких зародышевых слоёв позволило создать СД для видимого диапазона. Но отсутствие согласованных подложек вынуждает использование инородных подложек, что приводит к росту слоёв GaN с большой плотностью дефектов и дислокаций, являющихся центрами безызлучательной рекомбинации. Однако использование ультратонких слоёв InGaN в активной области приборов помимо обеспечения желаемой энергии оптического перехода варьированием содержания индия, приводит к образованию локализуемых центров, вследствие тенденции слоёв InGaN к фазовому распаду [3]. Наличие этих локализуемых центров подавляет транспорт носителей к безызлучательным центрам, значительно повышая эффективность приборов. Будучи очень чувствительным к условиям выращивания фазовый распад InGaN может иметь различный характер, значительно тем самым влияя на оптические и транспортные свойства структур. Поэтому хорошее понимание процессов формирования активной области (АО), а также связь структурных свойств с оптическими характеристиками чрезвычайно важны для разработки приборов на основе III- нитридов.

Основная цель данной работы - исследование оптических, транспортных и структурных свойств квантоворазмерных гетероструктур с активной областью InGaN/(Al,In)GaN различного дизайна, предназначенных для создания эффективных светодиодных приборов видимого диапазона.

Научная новизна работы

- Показано, что в структурах с InGaN/(Al,In)GaN активной областью присутствует три канала безызлучательной рекомбинации, ответственных за различные механизмы транспорта к центрам безызлучательной рекомбинации (БР): захват на центры БР расположенные вблизи локализованных состояний, захват через состояния расположенные выше уровня протекания, и захват через состояния в матрице. Каждый из этих механизмов доминирует в определённом температурном диапазоне, определяемом характером неоднородности активной области.
- Показано, что короткопериодные сверхрешётки InGaN/GaN отражают свойства неоднородного массива квантовых точек. Использование короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN в дизайне светодиодных структур позволяет улучшить характеристики приборов.
- Изучено взаимное влияние различных слоёв активной области на эффективность и характер вхождения индия при создании активной области InGaN/GaN. Исследовано влияние состава матрицы на свойства активной области структур с InGaN/(Al)GaN активной областью. Показано, что состав материала матрицы сильно влияет на структурные и оптические свойства активной области.
- Предложен и реализован новый метод формирования квантовых точек InGaN основанный на *in-situ* наномаскировании слоем AlN.

- Исследован туннельный механизм транспорта носителей. Обнаружено, что туннельный механизм транспорта носителей оказывает значительное влияние на характеристики структур с InGaN/(Al,In)GaN активной областью.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. В структурах с InGaN/(Al,In)GaN активной областью присутствуют три канала, ответственные за различные механизмы транспорта носителей к центрам безызлучательной рекомбинации: захват на центры, расположенные вблизи локализованных состояний, захват через состояния расположенные выше уровня протекания, и захват через состояния в матрице.
2. Характерное время туннельной утечки носителей из активного слоя InGaN светодиодной структуры зеленого диапазона сравнимо со временем излучательной рекомбинации.
3. При эпитаксиальном росте InGaN/GaN активной области светодиодов зелёно-жёлтого диапазона с множественными квантовыми ямами, эффективность вхождения индия увеличивается для каждого последующего слоя InGaN в результате частичной релаксации упругих напряжений.
4. Для структур зелёного диапазона осаждение слоёв InGaN в матрицу AlGaN приводит к увеличению среднего состава по индию и подавлению фазового распада по сравнению с матрицей GaN.
5. Использование короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN в активной области светодиодов значительно увеличивает эффективность излучения благодаря улучшению условий инжекции и структурного совершенства активной области.

Научная и практическая ценность. Разработана модель транспорта и рекомбинации, позволяющая связать оптические и структурные свойства структур с InGaN/(In,Al)GaN активной областью. Исследовано влияние условий роста на формирование активной области.

Впервые получены и исследованы короткопериодные сверхрешётки InGaN/GaN, выращенные методом периодической конвертации поверхностного слоя InGaN. Показано, что использование короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN в активной области позволило значительно улучшить характеристики светодиодных структур. Впервые предложен и реализован метод формирования КТ с большим составом по индию методом *in-situ* наномаскирования, что может быть использовано для расширения спектрального диапазона светоизлучающих приборов.

Показана важность туннельного механизма транспорта носителей в светодиодных структурах с InGaN/GaN активной областью, что поможет при разработке дизайна структур.

Апробация работы

- 7-й Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 1–3 февраля 2010 года Москва.
- 6-й Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 18–20 июля 2008 года Санкт-Петербург
- 5-й Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 31 января–2 февраля 2007 года Москва

- 4-й Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 3–5 июля 2006 года Санкт-Петербург XII All Russian Scientific Conference Students- physicist (2006)
- “Nanaostructures Physics and Technology”, St-Petersburg, June 25-30, 2006
- 6-th international conference on nitride semiconductors, ICNS6, August 28- September 2, 2005, Bremen, Germany
- International summer school “Self-Organised Nanostructures” Cargese, 17-23 July 2005
- IV All Russian Conference ‘Nitrides of Gallium, Indium and Aluminum: Structures and devices’ St. Petersburg, July 3 - 5, 2005.
- “Nanostructures Physics and Technology”, St-Petersburg, June 20-25, 2005
- 7-th international conference PHOTONICS2004, 2004 December 9-11, Kochin, India.
- 2004 IEEE International Conference on Semiconductor Electronics, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004 December 9 - 7

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 8 - в научных статьях и 4 - в материалах конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 115 страницах машинописного текста. Диссертация включает также 79 рисунков и 5 таблиц. Список литературы состоит из 112 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 129 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулирована цель диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит литературный обзор, посвящённый оптическим и структурным свойствам нитридов элементов III-группы. Рассмотрены особенности, характерные для гетероструктур InGaN/(Al)GaN такие как: сильные упругие напряжения на гетерогранице, большие неоднородности активной области, эффект Штарка и пр. Приводится историческая справка о получении нитридов, а также рассматриваются особенности выращивания нитридов на сапфировых подложках. Обсуждается природа локализуемых слоёв InGaN, их свойства и влияние на оптические характеристики гетероструктур InGaN/GaN. Приведён обзор существующих на данный момент представлений механизмов транспорта носителей, обсуждаются механизмы безызлучательной рекомбинации. Рассмотрены основные сложности в получении эффективных приборов на основе нитридов элементов III-группы, такие как: безызлучательная и оже – рекомбинация, пространственное разделение носителей вследствие эффекта Штарка и пр. Приводятся возможные пути решения этих проблем.

Во **второй** главе описываются применявшиеся в процессе работы экспериментальные методики и технологическое оборудование. В работе исследовались эпитаксиальные структуры, полученные методом ГФЭ МОС на установках Epiquip VP-50 RP и Aixtron 2000 HT. Рассматривается устройство установок, а также преимущества ГФЭ МОС для получения гетероструктур. Все образцы, исследованные в работе, выращивались при использовании подложек из сапфира ориентации [0001]. В качестве источников элементов третьей группы используются триметилгаллия (ТМГ) триэтилгаллия (ТЭГ) триметилалюминия (ТМА) и триметилиндия

(ТМИ). В качестве источника магния (легирующей примеси) используется бисциклопентадиэнил магния (Cp_2Mg). Для легирования донорами (атомами кремния) применяется газ силан (SiH_4). В качестве источника элемента пятой группы (азота) используется аммиак (NH_3). Газами носителями являются азот и водород. Дано описание структур, исследованных в работе. Из оптических методов исследования в работе применялись фотолюминесценция (ФЛ) и электролюминесценция (ЭЛ). Дальнее поле ФЛ измерялось как в непрерывном режиме, так и с временной развёрткой. При измерении непрерывной ФЛ для надбарьерного возбуждения использовался лазер He-Cd с длиной волны основной линии 325 нм и мощностью 10 мВ. Для резонансного возбуждения использовались полупроводниковый лазер с длиной волны основной линии 405 нм и мощностью 1-100 мВ или газоразрядная Xe^+ лампа. Для регистрации ФЛ использовался монохроматор МДР-23 и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ - 83). При измерении спектров ФЛ с временным разрешением структуры возбуждались Ti- Al_2O_3 лазером с длиной импульса порядка 10 пикосекунд и длиной волны 405 нм. Для регистрации спектров использовалась Streak Camera Hamamatsu. Ближнее поле ФЛ измерялось при помощи сканирующего микроскопа ближнего поля высокого разрешения с разрешением менее 100 нм и детектировалось при помощи CCD-камеры. Для увеличения пространственного разрешения измерений ФЛ в работе применялось нанесение наноапертур методом электронной литографии, диаметр апертур составлял 120 и 3000 нм. Структуры исследовались методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской дифрактометрии, сканирующей электронной микроскопии.

В третьей главе рассматриваются общие оптические свойства структур с InGaN/GaN активной областью. Представлены результаты измерений ФЛ ближнего поля, показано, что спектры ФЛ содержат как узкие линии (ширина меньше 1 мэВ) ответственные за излучение КТ (измерения диамагнитного сдвига показывают, что размер КТ составил порядка 2-3 нм.) так и более широкие линии – ответственные за более крупные области. В зависимости от технологических режимов выращивания в структурах могут доминировать КТ (неоднородности малого размера 1-5 нм) или более крупные неоднородности. Для описания транспортных и оптических свойств структур с КТ рассматривается статистическая модель, описывающая неоднородный массив КТ, помещённый в резервуар, через который КТ обмениваются носителями. В рамках этой модели хорошо описываются экспериментальные результаты ФЛ и ЭЛ структур с КТ при различной температуре и плотности накачки. В зависимости от плотности накачки, температуры и глубины локализации может реализовываться неравновесная статистика носителей, что также наблюдается в эксперименте. С помощью этой модели оцениваются характерные энергии активации, времена жизни и степень однородности массива КТ, что позволяет связать оптические и структурные свойства структур.

Для описания механизмов транспорта и рекомбинации в структурах с преобладанием крупных неоднородностей или структур с неоднородной квантовой ямой в работе разработана модель, учитывающая три канала безызлучательной рекомбинации: через уровни в матрице, через остаточную квантовую яму и через безызлучательные центры, расположенные рядом с локализованными состояниями. Для каждого канала получены характерные энергии активации для структур,

выращенных в различных технологических режимах. Энергии активации связаны с характером неоднородности распределения индия в активной области.

Обнаружено, что увеличение давления в реакторе от 100 до 600 мбар приводит к стимуляции фазового распада и формированию активной области, состоящей из локально обогащенных индием областей с латеральными размерами порядка 5-20 нм. Это приводит к увеличению глубины локализации носителей, что отражается в оптических свойствах. Другим методом стимуляция фазового распада является наращивание слоя InGaN слоем InGaN меньшего состава по индию или использование InGaN в качестве матрицы. Увеличение локализации носителей приводит к подавлению латерального транспорта и увеличению эффективности структур. Показана лучшая термическая стабильность эффективности излучения структур с активированным фазовым распадом. Приведённые в работе данные ПЭМ согласуются с результатами оптических измерений. Для увеличения энергии локализации носителей относительно матрицы в структурах, излучающих в УФ диапазоне (390-400 нм) было предложено использование более широкозонной, чем GaN, матрицы AlGaIn. Увеличение энергии локализации подтверждается оптическими измерениями. Оптические и структурные свойства структур хорошо согласуются с моделью транспорта и безызлучательной рекомбинации предложенной в работе. Светодиодные структуры с матрицей AlGaIn показывают лучшую термическую стабильность и большее значение внешнего квантового выхода излучения, чем аналогичные структуры с матрицей GaN. В работе исследовалось влияние матрицы AlGaIn на формирование InGaIn активной области структур, излучающих в зелёной области. Обнаружено, что несмотря на увеличение локализации носителей

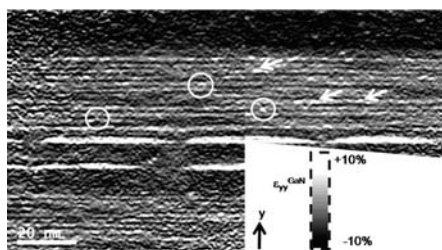
относительно матрицы, в структурах с матрицей AlGaN наблюдается увеличение среднего состава по индию, а также подавление фазового распада, приводящего к увеличению латерального транспорта, по сравнению со стандартной матрицей GaN.

В четвертой главе приводятся результаты исследования короткопериодных сверхрешёток (КПСР) InGaN/GaN, полученных методом периодической конвертации поверхностного слоя InGaN в GaN. КПСР InGaN/GaN выращивалась путём циклического осаждения $\text{In}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{N}$ 2 нм с дальнейшим прерыванием роста: выключение потоков, обеспечивающих элементами III-группы, в течении 20 секунд с использованием водородно-азотной атмосферы в соотношении $\text{N}_2:\text{H}_2 = 7:3$. Во время прерывания роста происходила конвертация поверхности слоя InGaN с испарением индия и образованием слоя GaN толщиной 1 нм. Таким образом, формировалась КПСР InGaN/GaN - 1нм/1нм. Данные ПЭМ высокого разрешения показывают, что КПСР представляют собой массив индий обогатенных островков размерами 1-3 нм включенных в матрицу InGaN малого (<5%) состава (рис. 1а). Это говорит о неравномерном характере конвертации слоёв InGaN, что помимо всего прочего приводит к слипанию индий обогатенных островков из соседних слоёв КПСР.

При увеличении пространственного разрешения до 120 нм линия излучения КПСР, которая при измерении стандартной ФЛ имела ширину порядка 100мэВ с центром около 405 нм, распадается на совокупность более узких линий (вкладка рис. 1б). Поведение линии ФЛ с температурой характерно для неоднородного массива КТ и хорошо описывается моделью, рассмотренной в первой главе, давая значение ширины функции распределения массива КТ по энергиям 250 мэВ. Таким образом, показано, что КПСР представляет собой неоднородный массив КТ. Осаждённый на

такую КПСР слой InGaN по данным ПЭМ представляет собой неоднородную квантовую яму. При увеличении пространственного разрешения линии ФЛ от слоя InGaN не меняла формы (Рис. 1б) Температурное поведение ФЛ также было характерно для неоднородной

а



б

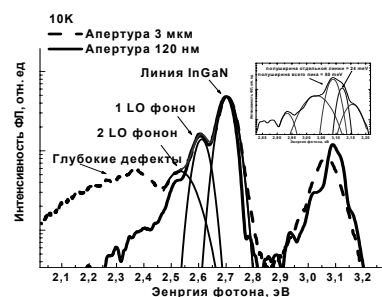


Рис. 1 (а) - карта распределения напряжений, полученная с помощью ПЭМ. (б) – спектры ФЛ КПСР и слоя InGaN при различном пространственном разрешении.

квантовой ямы, подтверждая тем самым данные ПЭМ (Рис. 1а). Были исследованы светодиодные структуры с новым дизайном активной области на основе КПСР. Были выращены серии структур, в которых КПСР располагалась под активной областью, над активной областью или с обеих сторон. Также варьировалась толщина барьера между нижней КПСР и активной областью InGaN/GaN. Исходя из анализа зависимостей внешней квантовой эффективности от плотности тока и температурных измерений ФЛ с резонансным возбуждением обнаружено: что использование КПСР под активной областью уменьшает плотность безызлучательных центров в активной области, а использование КПСР над активной областью улучшает

условия инжекции. Варьирование толщины барьера между нижней КПСР и активной областью позволяет регулировать степень фазового распада и управлять латеральным транспортом носителей, а также подавлять утечку дырок в n-область структуры. Таким образом, сочетание оптимальных толщин барьеров и использование КПСР позволяет в несколько раз увеличить внешний квантовый выход структур сине-зелёного диапазона.

В первой части пятой главы проводятся исследования по формированию активной области для структур глубокого зелёного диапазона. Исследованы многослойные InGaN/GaN структуры с высоким содержанием индия (>20%). Обнаружено, что для таких структур увеличение числа слоёв InGaN приводит к увеличению содержания индия в верхнем слое InGaN. Показано, что это связано с увеличением эффективности вхождения индия при уменьшении напряжения растущего слоя. При выращивании каждого следующего слоя напряжения частично релаксируют, что и приводит к увеличению состава по индию следующего слоя InGaN.

На основании сильной зависимости встраиваемости индия от напряжения в работе был предложен и реализован новый метод формирования индий обогатённых наностроек (КТ) методом *in-situ* наномаскирования слоем AlN. При осаждении слоя AlN малой толщины (порядка 1 нм) на буферный GaN, AlN получается не сплошной. Известно, что GaN, в отличие от AlN, в присутствии водорода нестабилен, поэтому при помещении структуры в атмосферу водорода GaN частично вытравливается в местах, не покрытых AlN. В области ямки травления нарушение сплошности напряжённого слоя AlN должно приводить к его локальной релаксации и локальному увеличению параметра решетки GaN. При дальнейшем осаждении слоя InGaN в релаксированных областях будет

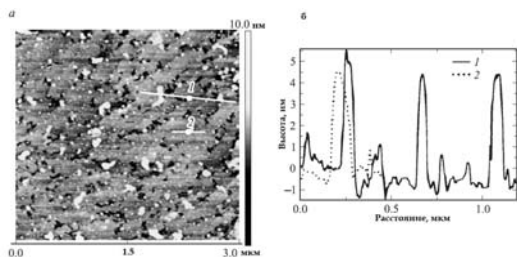


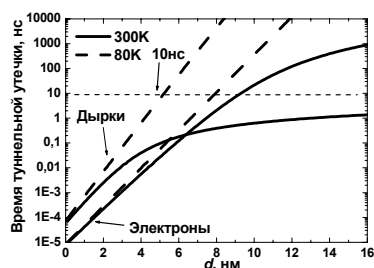
Рис. 2 (а) - АСМ изображение структуры с использованием наномаскирования с одним слоем InGaN (б) – профиль поверхности структуры вдоль линий 1,2 отмеченных на рис. 2 (а).

происходить стимуляция фазового распада InGaN с образованием индий обогащённых островков. На рис. 2(а) представлено АСМ изображение структуры с использованием наномаскирования с одним слоем InGaN толщиной 2.5 нм, заключённым между барьерами GaN толщиной 1 нм. На изображении чётко разрешаются два вида островков: с размерами ~ 10 нм и плотностью, соответствующий плотности ямок травления ($5-7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$), и более крупных, с размерами 30-100 нм и плотностью, соответствующей ямкам от прорастающих дислокации (10^8 см^{-2}). Высота островков обоих типов 4.5 нм, что равняется суммарной GaN-InGaN-GaN толщине (рис. 2(б)). Исследования структур без наномаскирования не выявило образования подобного плотного массива индий обогащенный островков. Таким образом, можно утверждать, что образование индий обогащенных островков связано с ямками травления. Исследования ФЛ показывают наличие двух линий ФЛ с центром 2.15 мэВ и 2.55 мэВ для структуры с наномаскированием и только одной (2.55 мэВ) для структуры без наномаскирования. Длинноволновая линия связана с ФЛ индий обогащенных островков, сформированных в ямках травления, а коротковолновая линия с ФЛ от слоя InGaN расположенного между островками.

Во второй части пятой главы исследуется туннельный механизм транспорта носителей в структурах с InGaN/GaN активной областью. Моделирование этого процесса с учётом Больцмановского распределения носителей по энергиям показывает, что характерное время туннельной утечки носителей через треугольный барьер из квантовой ямы сравнимо со

временем жизни носителей (1-10 нс). На рис. 3(а) представлены расчётные зависимости времени туннельной утечки носителей при различной

а



б

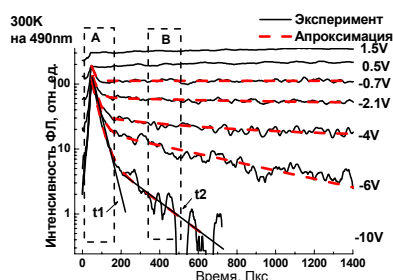


Рис. 3 (а) - Расчётные зависимости времени туннельной утечки электронов и дырок для структуры В. (б)- Зависимость интенсивности ФЛ от времени для структуры В, полученные при температуре 300 К

толщине основания барьера в структуре с InGaN/GaN активной областью излучающей на длине волны 500 нм. Из рисунка видно, что в зависимости от температуры и толщины барьера может реализовываться доминирование как электронной, так и дырочной утечки. Таким образом, при анализе этого процесса необходимо учитывать оба типа носителей.

Для экспериментального исследования туннельного транспорта носителей были исследованы спектры ФЛ светодиодных структур синезелёного и зелёного диапазона при различном внешнем смещении и температуре. Для исключения эффектов, связанных с изменением условий инжекции при изменении внешнего смещения, использовалась подбарьерная накачка (с энергией возбуждающего фотона меньшей, чем ширина запрещённой зоны GaN). При увеличении обратного смещения ФЛ распалась на две линии, одна из которых испытывала коротковолновый сдвиг, характерный для системы InGaN/GaN, что есть следствие эффекта

Штарка. Вторая линия располагалась на больших длинах волн и её положение оставалось неизменным при изменении внешнего смещения. Исследования ФЛ с временным разрешением при различном внешнем смещении показывают наличие двух характерных времён спада ФЛ (рис. 3(б)). Более быстрый спад интенсивности ФЛ, с характерным временем порядка 30 пкс связан с ФЛ областей, расположенных вблизи дислокаций. Положение линия ФЛ этих областей оставалось неизменным при увеличении внешнего смещения. Как обсуждалось выше, эффективность вхождения индия сильно зависит от напряжений, поэтому максимум линии ФЛ от областей вблизи дислокаций располагается на больших длинах волн, поскольку наличие дислокаций приводит к локальной релаксации напряжений. Второе характерное время спада уменьшалось с увеличением обратного смещения. Это связано с увеличением скорости туннельной утечки, так как при увеличении обратного смещения уменьшается толщина треугольного барьера. Сравнение спектров ФЛ, измеренных в разные промежутки времени показывают не типичный для таких систем коротковолновый сдвиг ФЛ со временем. Аномальное поведение также объясняется наличием двух типов областей. Сравнение экспериментальных данных с расчётными зависимостями даёт хорошее согласие. Показано, что уменьшение глубины локализации и повышение температуры приводит к увеличению туннельного транспорта через барьер для структур с InGaN активной областью, что хорошо согласуется с моделью. Увеличение времени жизни, что характерно для структур с большим содержанием индия в слоях InGaN также увеличивает значимость туннельного транспорта носителей.

В **заключении** приводятся основные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Исследованы транспортные свойства структур с $\text{InGaN}/(\text{In,Al})\text{GaN}$ активной областью. Показано, что в структурах с $\text{InGaN}/(\text{Al,In})\text{GaN}$ активной областью присутствует три канала безызлучательной рекомбинации ответственных за различные механизмы транспорта к центрам безызлучательной рекомбинации (БР): захват на центры БР расположенные вблизи локализованных состояний, захват через состояния расположенные выше уровня протекания, и захват через состояния в матрице. Каждый из этих механизмов доминирует в определённом температурном диапазоне, определяемом характером неоднородности активной области.
2. Показано, что наращивание InGaN активной области слоем InGaN меньшего состава по индию или осаждение в матрицу InGaN приводит к стимуляции фазового распада активной области InGaN .
3. Использование матрицы AlGaN в активной области светодиодов позволяет увеличить эффективность структур? излучающих в УФ области спектра.
4. Выращивание тонких слоёв InGaN с большим содержанием индия в матрицу AlGaN приводит к увеличению среднего состава по индию и подавлению фазового распада.
5. Изучены структурные и оптические свойства короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN . Показано, что короткопериодные сверхрешётки InGaN/GaN представляют собой частично периодичную структуру областей локально

обогащённых индием, с оптическими свойствами, характерными для неоднородного массива КТ. Использование короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN в активной области светодиодов позволило значительно увеличить эффективность структур.

6. Показано, что в случае многослойной структуры нижележащие слои в активной области значительно влияют на формирование слоёв InGaN в активной области для структур зелёного диапазона вследствие сильной зависимости эффективности вхождения индия от напряжения растущего слоя.
7. Исследован туннельный механизм транспорта носителей в структурах с активной областью InGaN/GaN. Показано, что такой механизм оказывает сильное влияние на оптические свойства и характеристики структур.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Использование короткопериодных сверхрешёток InGaN/GaN в светодиодах синего диапазона, В. С. Сизов, А. Ф. Цацульников, А. В. Сахаров, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, Н. А. Черкашин, М. J. Hutch, А. Е. Николаев, А. М. Минтаиров, YanHe, J.L. Merz, ФТП, 2010, том 44, выпуск 7.
2. Мост через «зеленую долину». По пути к RGB источникам белого света А.Ф. Цацульников, В.В. Лундин, А.В. Сахаров, Е.Е. Заварин, С.О. Усов, А.Е. Николаев, Н.В. Крыжановская, М.А. Сеницын, В.С. Сизов, Н.А. Черкашин, А.Е. Черняков, А.Л. Закгейм, М.Н. Мизеров, 7-й Всероссийская

конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 1–3 февраля 2010 г. Москва.

3. Оптимизация активной области светодиодов на основе III-нитридов, В. С. Сизов, А. Ф. Цацульников, А. В. Сахаров, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, А. Е. Николаев, 7-й Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» 1–3 февраля 2010 года Москва.

4. Формирование индий-обогащенных островковых структур методом *in-situ* наномаскирования, Е. Е. Заварин, А. В. Сахаров, В. В. Лундин, Д. В. Давыдов, В. С. Сизов, А. Ф. Цацульников, ПЖТФ, 2009, т. 35, в. 21.

5. Влияние релаксации напряжений на формирование активной области InGaN/(Al)GaN гетероструктур для светодиодов зеленого диапазона А. В. Сахаров, В. В. Лундин, Е. Е. Заварин, М. А. Сеницын, А. Е. Николаев, С. О. Усов, В. С. Сизов, Г. А. Михайловский, Н. А. Черкашин, M. Hutch, F. Hue, Е. В. Яковлев, А.В. Лобанова, А. Ф. Цацульников, ФТП, 2009, том 43, выпуск 6. стр.841.

6. Фазовый распад и безызлучательная рекомбинация носителей в активных областях светоизлучающих приборов на основе InGaN квантовых точек в матрице GaN или AlGaN, В.С. Сизов, А. А. Гуткин, А. В. Сахаров, В. В. Лундин, П. Н. Брунков, А.Ф. Цацульников ФТП, 2009, том 43, выпуск 6. стр.836

7. Исследование транспорта и безызлучательной рекомбинации носителей между слоями квантовых точек InGaN/(Al)GaN' 6-я Всероссийская конференция «нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» В.С. Сизов, А. В. Сахаров, А. Ф. Цацульников, В. В. Лундин, 18–20 июля 2008 года Санкт-Петербург

8. Нановключения InGaN в матрице AlGaN, В.С.Сизов, А.Ф.Цацульников, В.В.Лундин, ФТП, 2008, том 42, выпуск 7 804

9. Sizov D.S. , Sizov V.S, Lundin V.V. Zavarin E.E. , Tsatsul`nikov A.F., Musikhin Yu.G., Vlasov A.S., Ledentsov N. N., Mintairov A. M., Sun K., Merz, “Investigation of InGaN/GaN and InGaN/InGaN QDs grown in a wide pressure MOCVD reactor”, International Journal of Nanoscience Vol. 6, No. 5 (2007) 327–332
10. Неравновесная заселенность носителей в структурах с глубокими квантовыми точками InGaN, Д.С.Сизов, Е.Е.Заварин, Н.Н.Леденцов, В.В.Лундин, Ю.Г.Мусихин, В.С.Сизов, Р.А.Сулис, А.Ф.Цацульников, ФТП 41 (5) 595 (2007).
11. Исследование латерального транспорта носителей в структурах с квантовыми точками InGaN в активной области, В.С.Сизов, Д.С.Сизов, Г.А.Михайловский, Е.Е.Заварин, В.В.Лундин, А.Ф.Цацульников, Н.Н.Леденцов, ФТП, 2006, том 40, выпуск 5, 589-596
12. Localization of non-equilibrium carriers in deep InGaN quantum dots and its impact on the device performance, 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., Physica status solidi (c) Volume 3, Issue 6, Date: June 2006, Pages: 2043-2047

Цитированная литература:

- [1] Marushka and Tietjen, Appl. Phys. Lett. 15 (1969) 327
- [2]H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki and Y. Toyoda Metalorganic vapor phase epitaxial growth of a high quality GaN film using an AlN buffer layer Appl. Phys. Lett. 48 (1986) pp. 353–5

- [3]N. Nakayama, S. Itoh, T. Ohata, K. Nakano, H. Okuyama, H. Ozawa, M. Ishibas, A. Ikeda, Y. Mori “Room temperature continuous operation of blue-green laser diodes”, Electron. Lett., 29 (1993) pp. 1488-1489
- [4]W. Fashinger, J. Nurnberger, “Green II-VI light emitting diodes with long lifetime on InP substrate” Appl. Phys. Lett. 77, (2000) pp. 187-189
- [5]Yusuke Yoshizumi, Masahiro Adachi, Yohei Enya, Takashi Kyono, Shinji Tokuyama, Takamichi Sumitomo, Katsushi Akita, Takatoshi Ikegami, Masaki Ueno, Koji Katayama, and Takao Nakamura «Continuous-Wave Operation of 520nm Green InGaN-Based Laser Diodes on Semi-Polar {2021} GaN Substrates», Applied Physics Express 2 (2009) 092101
- [6] Takashi Miyoshi, Shingo Masui, Takeshi Okada, Tomoya Yanamoto, Tokuya Kozaki, Shin-ichi Nagahama, and Takashi Mukai « 510–515nm InGaN-Based Green Laser Diodes on *c*-Plane GaN Substrate», Applied Physics Express 2 (2009) 062201