

На правах рукописи



Карташова Анна Петровна

Особенности излучательной и безызлучательной рекомбинации в
квантоворазмерных структурах InGaN/GaN, GaAsN/GaN, связанные с
характером организации наноматериала

01.04.10 - физика полупроводников

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН и Балтийском государственном техническом университете “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова.

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор Федоров Дмитрий Леонидович,
БГТУ “ВОЕНМЕХ” им. Д.Ф. Устинова
кандидат физико-математических наук,
Шмидт Наталия Михайловна,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, Сидоров Валерий Георгиевич,
СПбГПУ
кандидат физико-математических наук
Полоскин Дмитрий Сергеевич,
ФТИ им. А.Ф. Иоффе

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный
университет

Защита состоится « 21 » октября 2010 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе по адресу: 194021 Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Автореферат разослан « 20 » сентября 2010 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физико-математических наук, профессор



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последнее десятилетие разработки в области создания светоизлучающих структур (СС) на основе нитридов III -группы превратились в одно из ведущих направлений полупроводниковой оптоэлектроники. Использование твердых растворов InGaN, обеспечивающих излучение в сине-зеленой области спектра, открывает новые возможности по созданию устройств цветного оптического отображения информации нового поколения, а также энергосберегающих твердотельных источников освещения. Одна из основных проблем на пути создания энергосберегающего твердотельного освещения – падение квантовой эффективности светодиодов, начиная с малых плотностей тока $\sim 10 \text{ А/см}^2$. Представляется, что трудности в решении этой проблемы связаны с тем, что механизмы рекомбинации в светодиодах на основе III-нитридов до сих пор не выяснены, также как причины противоречивости данных о вкладе точечных и структурных дефектов в процессы безызлучательной рекомбинации, и причины таких особенностей излучательной рекомбинации как температурное гашение максимума квантовой эффективности, задержанная электро- и фотолюминесценция [1]. Трудности и противоречия могут быть вызваны сложной структурной организацией этих материалов, принципиально отличающейся от традиционных $\text{А}^3\text{В}^5$. Возникновение сложной структуры обусловлено тем, что рост происходит в неравновесных условиях, с сильным рассогласованием (13%) постоянных решетки растущих слоев и подложки, с формированием на начальной стадии зародышевого слоя содержащего кристаллиты (нанодомены) с размерами от нескольких до десятков нанометров, имеющих разные углы наклона и разворота оси «с» относительно друг друга [2]. Такие условия приводят к многообразию форм существования нитридов III –группы с разным характером организации наноматериала от плохо сросшихся нанодоменов с протяженными дислокационными стенками до практически эпитаксиального материала со слабыми следами границ сросшихся нанодоменов. В результате, кроме высокой плотности дислокаций $10^8\text{-}10^9 \text{ см}^{-2}$,

для этих материалов типичным является существование мозаичной (колончатой) структуры. К началу выполнения работы было известно, что выбор режима роста зародышевого слоя и подготовка подложки существенно изменяют характер организации наноматериала слоев нитрида галлия, и сопровождаются изменением механизма транспорта носителей заряда от прыжкового до типичного для традиционных полупроводников [3]. Эти результаты послужили основанием для предположения о том, что характер организации наноматериала в квантоворазмерных InGaN/GaN структурах может также оказывать существенное влияние на механизм транспорта носителей и особенности излучательной и безызлучательной рекомбинации. К началу выполнения работы вклад характера организации наноматериала в эти процессы не был исследован. Кроме того, внешняя квантовая эффективность светоизлучающих структур InGaN/GaN для синей и зеленой областей спектра была ниже 2%, а причины падения значений внешней квантовой эффективности, начиная с 10 A/cm^2 , т.е. на порядок ниже, чем у светодиодов на традиционных A^3B^5 , были не выяснены. Это и определило цели и задачи данной работы.

Основные цели и задачи данной работы заключаются в выяснении взаимосвязи особенностей излучательной и безызлучательной рекомбинации светоизлучающих квантоворазмерных структур InGaN/GaN с характером организации наноматериала, причин падения значений внешней квантовой эффективности этих структур при плотностях тока больше 10 A/cm^2 , а также в выяснении возможности получения излучательной рекомбинации в зеленой области спектра на основе гетероструктур GaAsN/GaN.

Научная новизна работы заключается в следующем: показано, что применение оригинальной методологии количественного определения характера организации наноматериала светоизлучающих квантоворазмерных InGaN/GaN структур такими параметрами, как степень упорядоченности (степень нарушения локальной симметрии Δ_p) и уровень самоорганизации D ,

позволяет выявить взаимосвязь процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации с характером организации наноматериала; показано, что противоречивость экспериментальных результатов и выводов разных исследователей вызваны тем, что они получены на светоизлучающих структурах с разным характером организации наноматериала; показано, что особенности рекомбинации вызваны существованием независимого канала безызлучательной рекомбинации, локализованного в системе протяженных дефектов, пронизывающей активную область структур; выяснено, что вид зависимости внешней квантовой эффективности от плотности тока, определяется конкуренцией вкладов в излучательную рекомбинацию локализованных и делокализованных носителей, при этом вклад последних растет по мере ухудшения характера организации наноматериала, увеличения температуры и уровня возбуждения; локализация носителей происходит как в ямах квантоворазмерных InGaN/GaN структур, так и в трехмерных наноразмерных областях, образованных флуктуациями состава твердого раствора.

Практическая ценность

Показана возможность получения интенсивной фотолюминесценции в зеленой области спектра с максимумом при 2,5 эВ в слоях GaAsN с нанодоменами GaAsN с характерными латеральными размерами 3-4 нм и содержанием As до 32%.

Выяснено, что необходимым условием для получения внешней квантовой эффективности более 10% (без линз) является обеспечение характера организации наноматериала, количественно определенное значениями $\Delta_p < 0,345$. Показано, что для увеличения внешней квантовой эффективности в максимуме до 30-35% (без линз) необходимо уменьшить ширину барьеров до 1-2 нм и увеличить ширину слоя объемного заряда в активной области до 50-100 нм. Выяснены причины падения, в 2 раза относительно максимума, внешней

квантовой эффективности в диапазоне плотностей тока меньше 50 A/cm^2 и показаны возможности их устранения.

Полученные результаты открывают новые возможности по оптимизации параметров мощных синих светодиодов для решения задач энергосберегающего освещения. Примененные методы диагностики, а также установленные критерии качества наноматериала могут быть использованы для увеличения внешней квантовой эффективности светодиодов зеленой и ультрафиолетовой областей спектра.

Основные положения, выносимые на защиту

Формирование в плоскости интерфейса GaN/GaAsN нанодоменов GaAsN с характерными латеральными размерами 3-4 нм и содержанием As до 32%, позволяет реализовать интенсивную фотолюминесценцию в зеленой области спектра с максимумом при 2,5 эВ.

1. Изменение условий формирования зародышевого слоя сопровождается переходом от трехмерного преимущественно к двумерному характеру роста квантоворазмерных InGaN/GaN структур, а также изменением характера организации наноматериала, количественно определяемое уровнем самоорганизации D и степенью упорядоченности Δ_p (степенью нарушения локальной симметрии). Эти параметры более полно, чем плотность единичных дислокаций отражают структурные свойства, а также свойства системы протяженных дефектов, пронизывающей активную область структур.
2. Величина токов утечки квантоворазмерных структур при смещениях меньше 2 В интегрально отражает свойства локального канала безызлучательной рекомбинации, локализованного в системе протяженных дефектов, коррелирует со степенью упорядоченности наноматериала светоизлучающих структур Δ_p , возрастая до пяти порядков с увеличением Δ_p от 0,330 до 0,355.

3. Характер зависимости внешней квантовой эффективности от плотности тока определяется конкуренцией вклада в излучательную рекомбинацию локализованных и делокализованных носителей. При этом вклад делокализованных носителей возрастает по мере ухудшения характера организации наноматериала, а также с ростом температуры и плотности инжекционного тока и становится определяющим для квантоворазмерных структур с плохой организацией наноматериала, характеризуемой $D > 1,65$ и $\Delta_p > 0,345$, при $T = 300$ К, а также для всех структур, независимо от характера организации наноматериала при $T \geq 400$ К и плотностях тока больше 50 А/см^2 .
5. Резкое падение внешней квантовой эффективности, до 2 раз относительно максимальных значений, при плотностях тока меньше 50 А/см^2 вызвано следующими устранимыми причинами: а) высокий уровень легирования (выше $5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) n^+ -слоя; б) высокий кремниевый фон (выше $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) в области p^+ -слоя; в) присутствие компенсированных областей в активной области. При плотностях тока выше 50 А/см^2 падение эффективности более слабое и аппроксимируется зависимостью Γ^{-b} (где $0,2 < b < 0,3$).

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на

VI-ой Российской конференции по физике полупроводников «Полупроводники 2003», Санкт-Петербург, 27-31 октября 2003; 3-ей Всероссийской конференции «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия- структуры и приборы», Москва, 6-8 июня, 2004; 4-ой Всероссийской конференции «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия- структуры и приборы», Санкт-Петербург, 3-5 июля 2005; 4 International Conference “ 4PLMCN”, St. Petersburg, Russia, July, 2004; 5-ой Всероссийской конференции «Нитрид Галлия, Индия и Алюминия- структуры и приборы», Москва, 30 января-1 февраля 2007, а также на научных семинарах Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Публикации Основные результаты работы опубликованы в 9 печатных работах, из них 5 научные статьи в реферируемых журналах, и 4 расширенных тезисах в материалах конференций.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 191 странице машинописного текста. Диссертация включает также 65 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 102 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Первая глава содержит обзор литературы по структурным, электрическим и оптическим свойствам нитридов III группы на начало 2010 года. Проанализированы экспериментальные результаты по особенностям формирования мозаичной (доменной) структуры, а также системы протяженных дефектов, и методов, позволяющих охарактеризовать структурные свойства нитридов III-группы. Кратко описаны результаты по применению мультифрактального анализа [4] в исследованиях единичных слоев GaN [3]. Приведен краткий обзор основных экспериментальных и теоретических исследований рекомбинации в светодиодных структурах на основе MQW InGaN/GaN и эффекта падения внешней квантовой эффективности [5-7,18], известных, на начало 2010 года. В конце главы сформулированы основные выводы и определены основные цели и задачи диссертационной работы.

Во **второй главе** описывается применявшееся технологическое и измерительное оборудование. Особенности технологии выращивания светоизлучающих структур методами газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (ГФЭ МОС) на сапфировых подложках с ориентацией (0001), а также методики, использованные в работе для

исследования структурных, электрических и оптических свойств, такие как просвечивающая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, вторичная ионная масс-спектрометрия (ВИМС), атомно-силовая микроскопия, фото- и электролюминесценция. Кратко описан метод обработки данных атомно-силовой микроскопии с применением мультифрактального анализа. Приведена характеристика исследованных в работе светоизлучающих структур, выращенных отечественными производителями в разных режимах роста зародышевого слоя, а также светодиодов, сформированных из этих структур, и коммерческих светодиодов известных зарубежных фирм Cree, Lumiledes. Большая часть светодиодов собрана по технологии флип-чип монтажа без линз (для удобства проведения исследований) в ЗАО «Светлана-Оптоэлектроника». Все исследованные светодиоды имели значения внешней квантовой эффективности от 5-25% без линз при токах 5-10 мА (с линзами максимальные значения 30-35%, что соответствует современному мировому уровню).

В третьей главе излагаются основные идеи по разработке альтернативного способа решения проблемы получения светоизлучающих структур для зеленой области спектра с максимумом при 2,5 эВ на основе твердого раствора GaAsN и гетероструктур GaAsN/GaN и приводятся экспериментальные результаты по получению и исследованию свойств этих растворов и гетероструктур [A1-A3]. Показано, что конверсия тонких слоев GaAs (30-60) нм, в процессе их высокотемпературного зарастивания (1040⁰С) слоем GaN толщиной 50 нм, приводит к формированию слоя твердого раствора GaAsN, содержащего плотные массивы нанодоменов GaAsN. Они имеют латеральные размеры 3-4 нм и содержание As до 32% по данным просвечивающей микроскопии [A3]. На таких образцах обнаружена фотолуминесценция (ФЛ) в зеленой области спектра (рис. 1). Зависимость интегральной интенсивности максимума (I) ФЛ в этой области при 2,5 эВ от плотности мощности накачки P описывается зависимостью $I \sim P^{1.7}$ (вставка рис.1), что близко к поведению краевой ФЛ ($I \sim P^2$). Плотность дислокаций в полученных структурах не превышала $2 \times 10^9 \text{ см}^{-2}$, т.е.

величину достаточно типичную для светоизлучающих структур на основе твердых растворов InGaN. Однако квантовая эффективность этих квантоворазмерных структур оказалась меньше 1%. Эффективность синих отечественных светодиодов на момент начала работ была несколько выше ~ 2% при токе 20 мА, но в несколько раз ниже, значений полученных Накамурой [8], а токи утечки на несколько порядков выше. Сделан вывод о том, что общей задачей является снижение потерь на безызлучательную рекомбинацию. В силу того, что ростовая технология была развита лучше для синих СД, дальнейшие исследования излучательной и безызлучательной рекомбинации, а также выяснение путей повышения внешней квантовой эффективности проводились на квантоворазмерных структурах InGaN/GaN (на длину волны излучения 450-460 нм).

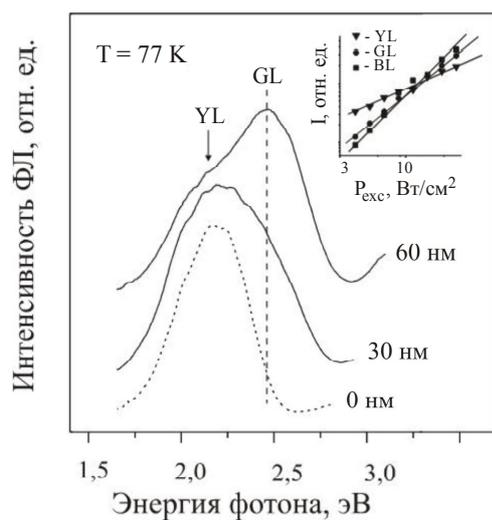
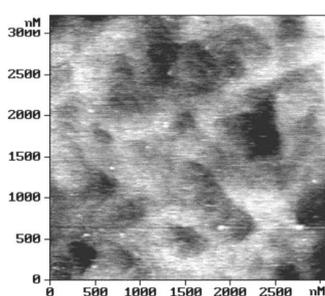


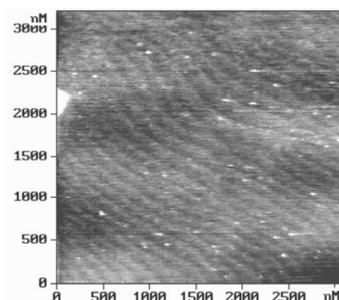
Рис.1 Спектры ФЛ при 77 К слоев GaN:As, полученных при осаждении слоев GaAs разной толщины. На вставке приведена зависимость интегральной интенсивности линий YL, GL, BL от интенсивности возбуждающего света P_{exc} .

Четвертая глава посвящена изучению особенностей безызлучательной рекомбинации квантоворазмерных InGaN/GaN структур, связанных со спецификой организации наноматериала и свойств системы протяженных дефектов, пронизывающей активную область структур. Приведены экспериментальные результаты, полученные на серии структур, выращенных на зародышевых слоях, сформированных в разных режимах, но с одинаковым дизайном активной области, содержащей MQW InGaN/GaN из 5 периодов (с толщинами 3 нм InGaN и 7-10 нм GaN). Приведены результаты по определению уровня самоорганизации (размерность Реньи, D) и степени

упорядоченности (нарушение локальной симметрии, Δ_p), несущие информацию о характере организации наноматериала этих структур. Параметр D для исследованных структур изменялся от 1,50 до 1,90 (точность определения $\pm 0,02$), а Δ_p изменялся по абсолютной величине от 0,320 до 0,370 (точность определения $\pm 0,003$) [A5]. Показано, что изменение режима роста зародышевого слоя сопровождается переходом от 3-х мерного характера роста преимущественно к 2-мерному, а также уменьшением значений D и Δ_p (рис. 2), что согласно теоретическим представлениям [4] и ранее полученным на слоях GaN экспериментальным результатам [3] соответствует улучшению характера организации наноматериала квантоворазмерных структур. Результаты просвечивающей электронной микроскопии подтвердили улучшение структурных свойств по мере уменьшения значений D и Δ_p , выражающееся в большей мере в уменьшении скоплений дислокаций, протяженности дислокационных границ, а не плотности единичных дислокаций (рис. 2в, г),



а)



б)

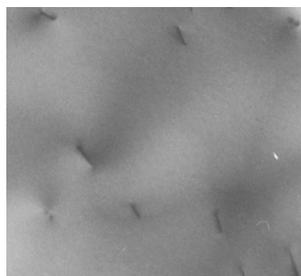
Характер организации
наноматериала
квантоворазмерных структур

а) $D = 1,60$; $\Delta_p = 0,370$

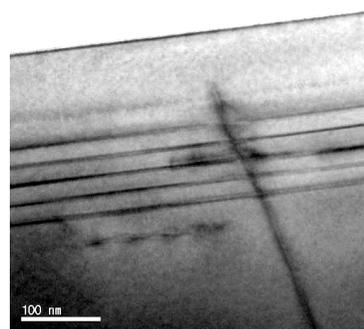
б) $D = 1,49$; $\Delta_p = 0,320$



в)



г)



д)

Рис.2. Переход от 3-х мерного характера роста (а) квантоворазмерных структур к 2-мерному (б). Просвечивающая микроскопия тех же структур, соответственно в) и г), поле 2x2 мкм. Дислокация пронизывающая активную область (д).

т.е. в изменении свойств системы протяженных дефектов. Причем на отдельных пластинах выявляются изменения значений D и Δ_p вдоль диаметра, в то время как эти области не различимы по данным рентгеновской дифрактометрии. Вольтамперные характеристики (ВАХ) светодиодов, сформированных на этих структурах, а также гомо р-п переходов, сформированных на слоях GaN, выращенных на зародышевых слоях, полученных в разных режимах, выявили корреляцию со значениями мультифрактальных параметров, т.е. с характером организации наноматериала. Рост значений D и Δ_p сопровождается увеличением токов утечки до 5 порядков, как на светодиодах (рис. 3а, кривые 1, 3, 5, 6), так и на гомо р-п переходах (рис. 3а, кривые 2,4) [А5-А8]. Эти закономерности и проведенный анализ полученных результатов в рамках теории туннельной рекомбинации Моргана [12], а также симметричный вид ВАХ при $U < 1,5$ В (рис. 3б), вызванный шунтирующими свойствами системы протяженных дефектов [11, А5],

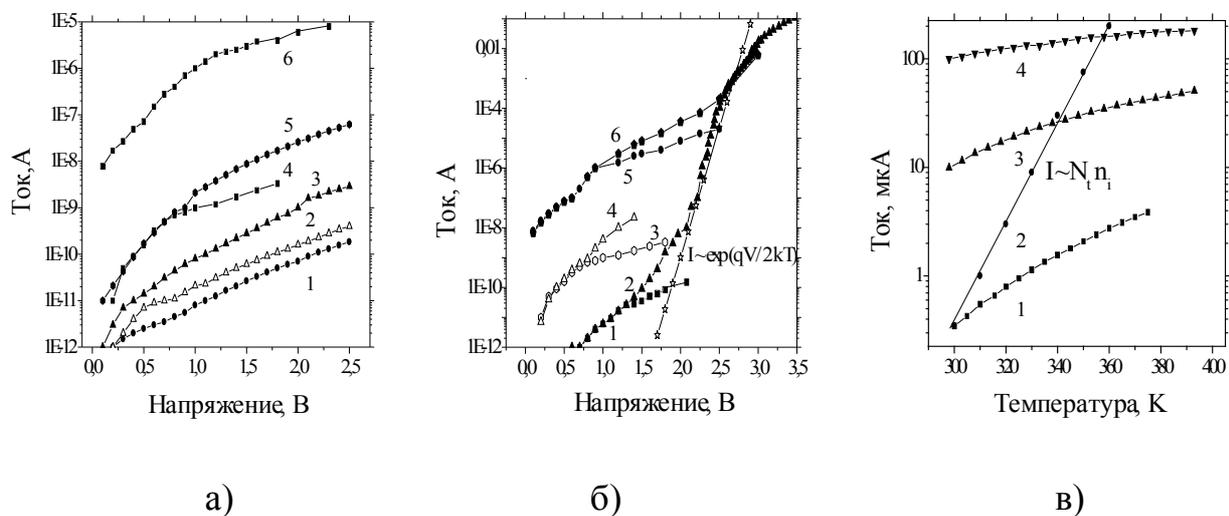
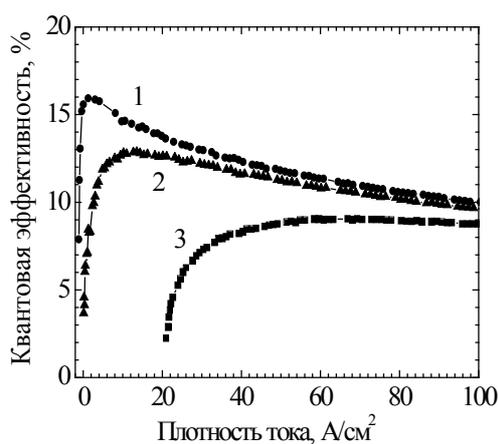


Рис. 3. Обратные ветви ВАХ светодиодов (а, кривые 1, 3, 5, 6) и гомопереходов (а, кривые 2, 4) с разным Δ_p : 1 -0,330; 2 -0,335; 3 -0,340; 4, 5 -0,346; 6 -0,355. ВАХ светодиодов (1, 2; 5, 6) и гомопереходов (3, 4) б) (прямые ветви 2, 4, 6; обратные ветви 1, 3, 5) с разным Δ_p : 1, 2 -0,330; 5, 6 -0,355 3, 4 -0,346 (2, 4, 6-прямые ветви; 1, 3, 5-обратные); в) Температурные зависимости тока при фиксированном смещении в прямом направлении: 1 - 2,3 В; 2- по теории Шокли-Нойса-Саа; 3 - 2,4 В; 4 - 2,5 В. Прямые и обратные ветви приведены в одном квадранте, напряжение смещения дано по абсолютной величине.

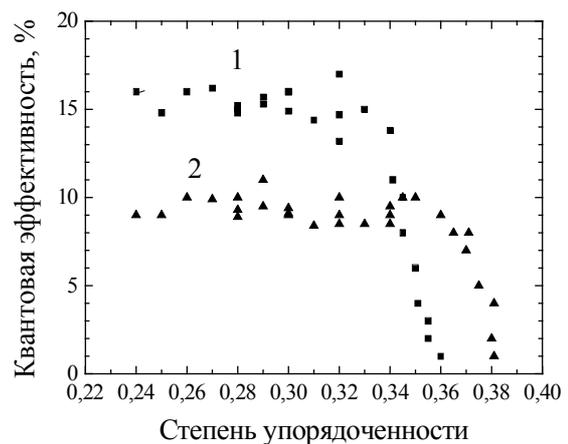
свидетельствует о том, что наряду с механизмом диагонального туннелирования и туннельно-рекомбинационного механизма с участием состояний на гетерограницах, важный вклад в безызлучательную рекомбинацию вносит система протяженных дефектов, пронизывающая активную область светоизлучающих структур и гомо p-n переходов. При этом, величина тока утечки интегрально отражает рекомбинационные свойства системы протяженных дефектов. В области прямых смещений 2-2,5 В для большей части исследованных светодиодов прямая ветвь ВАХ аппроксимируется зависимостью $I \sim \exp(qV/2kT)$, описывающей в теории Шокли – Нойса-Саа рекомбинационный ток в области объемного заряда p-n перехода, смещенного в прямом направлении (рис. 3б). Однако, температурные зависимости тока на порядки более слабые (рис. 3в, кривые 1, 3, 4), и не соответствует зависимости $n_i(T)$ (рис. 3в, кривая 2). Сделан вывод о том, что система протяженных дефектов, пронизывающая активную область светодиодов, является основным локальным каналом безызлучательной рекомбинации при смещениях меньших 2 В, а при больших смещениях в прямом направлении конкурирует с вкладом в безызлучательную рекомбинацию единичных центров, распределенных в области объемного заряда. Эта конкуренция каналов безызлучательной рекомбинации определяет нестандартный вид ВАХ исследованных светодиодов, в том числе коммерческих светодиодов зарубежных фирм Cree и Lumiledes, а также приведенных в [9,10]. Наблюдаемая динамика свойств локального канала, связанного с системой протяженных дефектов подобна хорошо известному поведению дислокаций, проникающих через область объемного заряда p-n перехода в традиционных полупроводниках [13].

В **пятой главе** приведены результаты по исследованию оптических свойств квантоворазмерных InGaN/GaN структур, классифицированных по характеру организации наноматериала, в том числе с разным числом ям InGaN в активной области [A5-A9]. Показано, что по мере роста значений параметров D и Δ_p , т.е. с ухудшением характера организации наноматериала, растет не только уровень

тока утечки, но и изменяется характер зависимости внешней квантовой эффективности (η) от плотности тока накачки (j) (рис. 4а). По мере ухудшения организации наноматериала, уменьшается величина η в максимуме, и наблюдается сдвиг максимума в сторону больших плотностей тока накачки. Следовательно, присутствие шунтирующего локального канала безызлучательной рекомбинации, локализованного в системе протяженных дефектов, приводит к перераспределению поля в активной области светодиодов. Взаимосвязь значений η в максимуме при плотности 10 А/см^2 и 50 А/см^2 со значениями Δ_p носит пороговый характер (рис. 4б). Из наблюдаемой взаимосвязи следует несколько важных выводов: противоречивость данных разных авторов по влиянию дислокаций на величину η обусловлена тем, что эти данные относятся к разным формам организации наноматериала; для получения значений η выше 10% (без линз) при плотностях тока 10 А/см^2 необходимо обеспечить получение материала с $\Delta_p < 0,345$, что позволяет свести к минимуму протяженность дислокационных границ и скоплений дислокаций. Выяснено, что эффективность светодиодов с таким характером организации может быть увеличена до значений 25-35% (без линз), путем уменьшения до 1-2 нм ширины барьеров и увеличения ширины слоя объемного заряда



а)



б)

Рис. 4. Зависимость внешней квантовой эффективности от плотности тока светодиодов с разным Δ_p (а): 1 -0,320; 2 -0,330; 3 -0,360. Корреляция η светодиодов со значениями Δ_p при плотностях тока (б): 1-10 А/см^2 ; 2-50 А/см^2 .

до 50-100 нм в активной области. Приведены экспериментальные результаты исследования спектров электролюминесценции светодиодов при плотности тока 5 A/cm^2 и 100 A/cm^2 , а также зависимости $\eta(j)$ в диапазоне температур 50-400 К (рис. 5). Эти результаты демонстрируют неравновесное заполнение носителями энергетических уровней и вместе с наблюдаемыми немонотонными S-образными зависимостями положения максимума излучения от температуры подтверждают выводы работ [14, 15], о том, что максимум эффективности при плотностях тока меньше 10 A/cm^2 определяется излучательной рекомбинацией локализованных носителей. Наблюдаемое температурное гашение максимума излучательной рекомбинации локализованных носителей при 400-420 К (рис. 5в) [А8], свидетельствует о слабости локализующего потенциала $\sim 30 \text{ мэВ}$. Кроме отмеченных особенностей, наблюдаются задержанные спектры фото- и электролюминесценции [А4, А7], начало излучения при напряжениях на 0,2-0,3В более низких, чем напряжения, соответствующие максимуму излучения. Совокупность этих особенностей, типичная только для светодиодов с хорошей организацией наноматериала ($\Delta_p < 0,345$), может быть объяснена с привлечением представлений и моделей, развитых для неоднородных, неупорядоченных

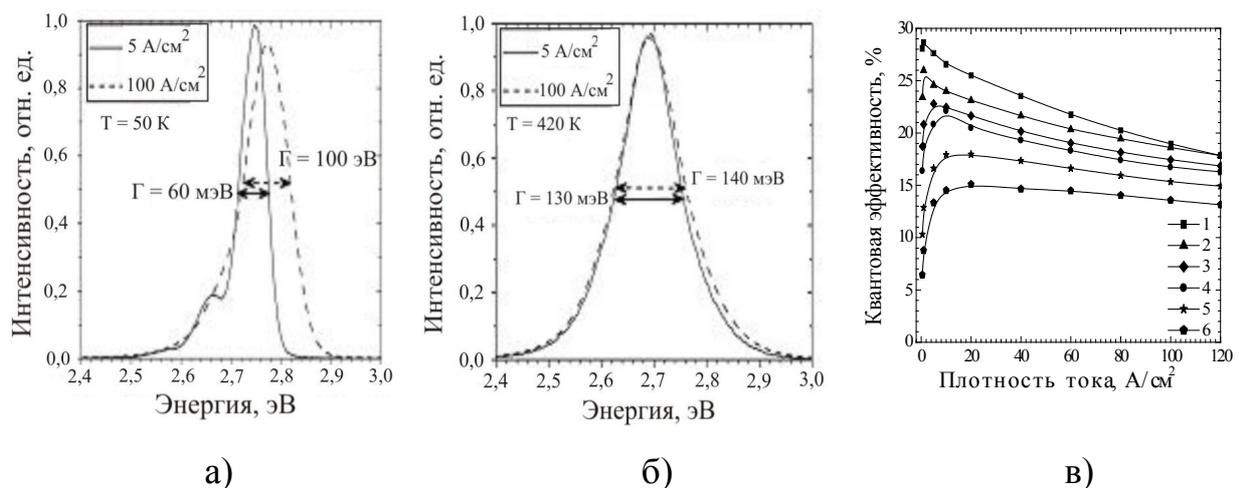


Рис. 5. Спектры электролюминесценции светодиодов при двух плотностях тока 5 A/cm^2 и 100 A/cm^2 при 50 К (а) и при 420 К (б). Зависимости $\eta(j)$ светодиода (в) при температурах: 1- 100 К; 2- 200 К; 3- 300 К; 4- 340 К; 5- 380 К; 6- 420 К.

полупроводников [16, 17], с латеральными мелкомасштабными флуктуациями потенциала и локализацией носителей в трехмерных неоднородностях нанометрового размера от единиц до сотен нм. Существование подобных неоднородностей с размерами 10-100 нм, образованных флуктуациями состава InGaN по In, наблюдалось в многочисленных работах по исследованию спектров излучения светодиодов с высоким пространственным разрешением [18,19].

Таким образом, локализация носителей происходит не только в ямах и квантовых точках, но и в трехмерных областях с размерами до 100 нм и слабыми флуктуациями состава. При плотностях тока больше 50 A/cm^2 , выше упомянутые особенности не наблюдаются, а температурный коэффициент изменения η близок к значениям для светодиодов на основе традиционных A^3B^5 , т.е. вид зависимости $\eta(j)$ определяется конкуренцией вкладов в излучательную рекомбинацию локализованных и делокализованных носителей. По мере увеличения параметров Δ_p и D и плотности тока вклад локализованных носителей уменьшается и при плотностях тока больше 50 A/cm^2 для большинства светодиодов вклад делокализованных носителей преобладает. Контроль характера организации наноматериала на нескольких партиях светодиодов с разным уровнем легирования n^+ -области (рис. 6) позволил выяснить, что многообразие характера зависимостей $\eta(j)$ при плотностях тока меньше 50 A/cm^2 определяется не только соотношением излучательной рекомбинации локализованных и делокализованных носителей, но и

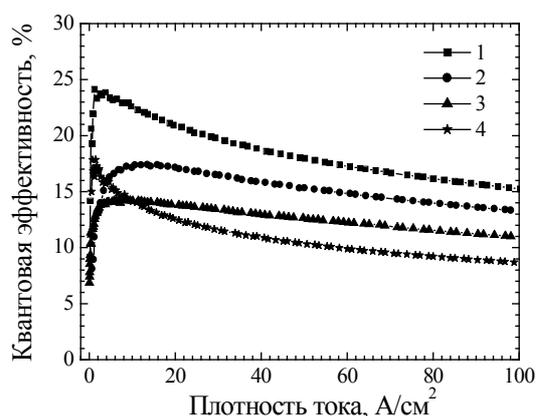


Рис. 6. Зависимости $\eta(j)$ светодиодов (без линз) при 300К из нескольких партий с разным уровнем легирования n^+ области: 1 - $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 2 - $4 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 3 - $6 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$; 4 - 10^{19} см^{-3}

соотношением потоков электронов и дырок в активную область. В связи с этим, уровень легирования до 10^{19} см^{-3} части n^+ -области, прилегающей к ямам, приводит к смещению излучательной рекомбинации к p^+ -области и препятствует продвижению дырок к остальным ямам, что сопровождается падением η до 2 раз относительно максимума в этом диапазоне плотностей тока. К такому же эффекту приводит образование компенсированных областей в p^+ -области или в активной области из-за высокой фоновой концентрации в ростовой системе соответственно кремния или магния. Эти причины могут быть устранены, и вместе с применением вышеизложенных мер по увеличению η в максимуме, падение эффективности может быть уменьшено с 50% до 10% относительно максимума. Более единообразный характер зависимости $\eta(j)$ наблюдается для всех исследованных СД, в том числе и коммерческих, при плотностях тока больше 50 А/см^2 и аппроксимируется зависимостью $I^{-0,2-0,3}$, что указывает на общую природу этого явления и нуждается в дальнейших исследованиях.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. Классификация исследуемых светоизлучающих структур по значениям параметров Δ_p и D позволяет выделить вклад характера организации наноматериала в излучательную и безызлучательную рекомбинацию.
2. Выяснено, что особенности безызлучательной рекомбинации вызваны существованием канала, локализованного в системе протяженных дефектов, изменяющего свои рекомбинационные свойства с ростом концентрации неравновесных носителей, а также с ухудшением характера организации наноматериала. Эти особенности и конкуренция вклада этого канала и рекомбинации через единичные центры в области объемного заряда приводят к неоднозначности выводов о роли структурных дефектов в безызлучательной рекомбинации.
3. Показано, что особенности излучательной рекомбинации вызваны конкуренцией вклада в излучательную рекомбинацию локализованных и делокализованных носителей. При этом локализация носителей происходит не

только в ямах и квантовых точках, но и в трехмерных областях с размерами до 100 нм и слабыми флуктуациями состава.

4. Выяснено, что для повышения внешней квантовой эффективности светодиодов до 30-35% (без линз) при плотностях тока меньше 10 А/см^2 необходимо обеспечить получение наноматериала со степенью упорядоченности $\Delta_p < 0,345$, что позволяет свести к минимуму протяженность дислокационных границ и скоплений дислокаций, кроме того уменьшить ширину барьеров до 1-2 нанометров и увеличить ширину слоя объемного заряда в активной области до 50-100 нм.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

A1. Tsatsulnikov A.F., Kartashova A.P., Kudryavtsev Yu.A., Ledentsov N.N., Lundin V.V., Sakharov A.V., Usikov A.S. and Alferov Zh.I. Investigation of MOVPE-grown GaN layers with As atoms // *Semiconductors*. **33**, 728-732 (1999).

A2. Цацульников А.Ф., Бер Б.Я., Карташова А.П., Кудрявцев Ю.А., Леденцов Н.Н., Лундин В.В., Максимов М.В., Сахаров А.В., Усиков А.С., Алферов Ж.И., Hoffman A. Исследование слоев GaN, легированных атомами As, полученных методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений // *Физика и техника полупроводников*, 1999. - Т.33. - С. 791-793.

A3. Tsatsulnikov A.F., Krestnikov I.L., Lundin V.V., Sakharov A.V., Kartashova A.P., Usikov A.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Hoffman A., Bimberg D. and Plaut A. Formation of GaAsN nanoinsertions in a GaN matrix by metal-organic chemical vapour deposition // *Semicond. Sci. Technol.* **15**, 766-769 (2000).

A4. Besyulkin A.I., Kartashova A.P., Kolmakov A.G., Lundin W.V., Sakharov A.V., Shmidt N.M., Zakgeim A.L., and Zolotareva R.V. Surface control of light-emitting structures based on III-nitrides // *Phys. Stat. Sol.* **2**, 837-840 (2005).

A5. Заварин Е.Е., Закгейм А.Л., Карташова А.П., Колмаков А.Г., Лундин В.В., Мездрогина М.М., Сахаров А.В., Шмидт Н.М. Эффективность светодиодов на основе MQW InGaN/GaN с разной степенью упорядоченности мозаичной структуры // Тезисы докладов 3-й Всероссийской конференции « Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» Москва 2004 С. 69.

A6. Шмидт Н.М., Закгейм А.Л., Золотарева Р.В., Каманин А.В., Карташова А.П., Колмаков А.Г., Копьев П.С., Сахаров А.В., Ситникова А.А., Трожков С.И. Причины деградации голубых светодиодов, обусловленные характером структурной организации нитридов III-группы // Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции « Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы» (3-5 июля 2005 С-Петербург) - Санкт-Петербург: 2005. С. 126-127.

A7. Бесюлькин А.И., Заварин Е.Е., Карташова А.П., Колмаков А.Г., Криволапчук В.В., Лундин В.В., Мездрогина М.М., Сахаров А.В., Шмидт Н.М.

Оптические свойства нитридов III-группы с разной степенью упорядоченности мозаичной структуры // Тезисы VI Российской конференции по физике полупроводников. (С-Петербург 27-31 октября 2003г.) - СПб.: 2003. - С. 467-468.

А8. Грешнов А.А., Давыдов Д.В., Закгейм А.Л., Лавринович Д.А., Карташова А.П., Ратников В.В., Черняков А.Е., Шмидт Н.М., Якимов Е.Б. Динамика излучательной и безызлучательной рекомбинации синих светодиодов // Тезисы докладов 4-й Всероссийской конференции “Нитриды галлия, индия и алюминия-структуры и приборы” (Москва, январь 2007г.) - Москва: 2007. С.27.

А9. Карташова А.П., Шмидт Н.М., Закгейм А.Л., Федоров Д.Л. Энергосберегающее освещение будущего // Информация и космос, 2009. - № 3. - С. 82 - 91.

Цитируемая литература

1. Шуберт Ф. Светододы: Пер. с англ./ Под ред. А.Э. Юновича. – Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. - 496с.
2. Ю.Г.Шретер, Ю.Т. Ребане, В.А. Зыков, В.Г. Сидоров. Широкозонные полупроводники – СПб.: Наука, 2001.- 124 с.
3. Shmidt N.M., Emtsev V.V., Kolmakov A.G., Kryzhanovsky A.D., Poloskin D.S., Ratnikov V.V., Titkov A.N. *Nanotechnology*. **12**, 471- 474 (2001).
4. Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. – Ижевск. 2001. - 116с.
5. М.Л. Бадгутдинов, А.Э. Юнович, ФТП, **42**, 438 (2008)
6. Н.И. Бочкарева, Ю.Т. Ребане, Ю.Г. Шретер. ФТП, **39**, 829 (2005).
7. И.В. Рожанский, Д.А. Закгейм, ФТП, **40**, 861 (2006).
8. S.Nakamura,G.Fasol, *The Blue Laser Diode:GaN based Light Emitters and Lasers*- Berlin, Springer, 1997,325 P.
9. P.G. Eliseev, P. Perlin, M. Osinski,*Appl.Phys.Lett.***71**, 569-571 (1997).
10. В.Е. Кудряшов, А.Э.Юнович, Ф.И. Маняхин, ФТП, **31**, 1304 (1997).
11. Hsu J.W.P., Manfra M.J. and Pfeiffer L.N.,*Appl. Phys. Lett.* **78**, 1685 (2001).
12. Morgan T.N. *Physical Review*. **148**, 890-903 (1966).
13. Матаре Г. Электроника дефектов в полупроводниках: Пер. с англ./ Под ред. Г.М.Гуро. - М.: Мир, 1974. - 463 с.
14. Kazlauskas K., Khan M.A., Shur M.S. *Appl. Phys. Lett.* **83**, 3722 (2003).
15. I.A. Pore and J.D.Thomson, *Appl. Phys. Lett.* **82**, 2755-3758 (2003).
16. С.Д. Барановский, Б.И. Шкловский, ФТП, **23**, 146-151 (1989).
17. А.П.Леванюк, В.В.Осипов, УФН, **133**, 427-477 (1981).
18. Eiji Kobayashi, Tsunemassa Taguchi and Hiroaki Okagawa,*The 8th Internatinal Conference on Nitride Semiconductors*, **2**, 1434-1435 (2009).
19. Akio Kaneta, Koichi Okamoto, Giichi Marutsuki, Yukio Narukawa, Takashi Mukai. *Appl.Phys.Lett.*, **81**, 4353-4355 (2002).