

резонансного туннелирования в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN.

Представленные в диссертационной работе Копьева В. В. результаты имеют фундаментальное и прикладное значение, и вносят существенный вклад в развитие физических представлений о переносе носителей заряда в наногетероструктурах на основе нитридных соединений.

Общая характеристика структуры и содержания диссертационной работы. Диссертация В. В. Копьева состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка литературы. Диссертация изложена на 126 страницах текста, содержит 66 рисунков и 5 таблиц, 146 ссылок на литературные источники.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, проведен анализ используемых теорий для описания переноса носителей заряда в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN. Представлены методологические подходы для исследования характеристик структур на основе InGaN/GaN. Сформулированы цели и задачи диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту и обладающие научной новизной. Показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов, апробация и количество публикаций, в которых они изложены.

В **первой главе** приведен обзор литературы по теме диссертационной работы, включающий в себя исследование свойств твердого раствора InGaN, влияния встроенных электрических полей на оптические характеристики структур на основе InGaN/GaN, способы измерения квантовой эффективности светодиодных структур. Рассмотрены обнаруженные другими авторами влияние на квантовый выход электролюминесценции утечки носителей над квантовыми ямами, слабой дырочной инжекции, туннельной утечки электронов по структурным дефектам и ожереккомбинации. Показана необходимость исследования свойств модельных «монополярных» структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN.

Во **второй главе** описаны методики экспериментального исследования спектров фото- и электролюминесценции, спектров поглощения, квантовой эффективности, вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, а также структурного совершенства монополярных и биполярных структур с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN. Представлены автоматизированные установки для проведения измерений характеристик гетероструктур.

Осуществлен выбор монополярных и светодиодных структур на основе множественных квантовых ям InGaN/GaN.

Установлены критерии применения методики измерения квантовой эффективности с использованием импульсных источников возбуждающего излучения.

В **третьей главе** приведены результаты расчета величины встроенных электрических полей в монополярных структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN. Описаны экспериментально обнаруженные эффекты резонансного туннелирования в гетероструктурах на основе InGaN/GaN. По характеру пиков проводимости на вольт-сименсных характеристиках установлено, что в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN присутствует три разрешенных уровня энергии в пределах потенциальной ямы сложной формы. Показано, что множественный

характер разрешенных уровней энергии является логичным следствием наличия сильных встроенных полей в области барьеров GaN.

В четвертой главе экспериментально исследован транспорт носителей заряда в светодиодных структурах «синего» диапазона с квантовыми ямами InGaN/GaN. Предложен механизм, который связан с транспортом горячих носителей над квантовыми ямами. Данный механизм позволил наблюдать качественное совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей квантовой эффективности электролюминесценции от плотности тока. Для объяснения повышения квантового выхода светодиодных структур в режиме электролюминесценции в области «вымораживания» дырок предложен механизм туннельной инжекции дырок из примесных акцепторных состояний в активную область светодиодных структур на основе InGaN/GaN.

Основные научные результаты, полученные автором, заключаются в следующем:

1. Установлены критерии применения методики измерения квантовой эффективности с использованием импульсных источников возбуждающего излучения.

2. Экспериментально обнаружены участки отрицательного дифференциального сопротивления в структурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN с толщиной барьеров GaN 6 нм, связанные с резонансными туннельными переходами между разрешенными уровнями энергии в соседних квантовых ямах.

3. Установлено, что в гетероструктурах с множественными квантовыми ямами InGaN/GaN присутствует, по крайней мере, три разрешенных уровня энергии, что связано с наличием сильного встроенного электрического поля (порядка 1 МВ/см).

4. Обнаружено, что в области температур от 160 до 220 К и в области напряжений более 3 В транспорт носителей носит баллистический характер. Это обусловлено резким ростом тока и снижением квантовой эффективности электролюминесценции.

5. Обнаружено, что в области температур от 160 до 220 К и в области напряжений менее 3 В транспорт носителей возможно описать с учетом туннелирования дырок из примесных состояний Mg по структурным дефектам в GaN в область множественных квантовых ям.

Научная новизна заключается в том, что измеренные вольт-амперные характеристики и зависимости квантовой эффективности от уровня возбуждения в режимах фото- и электролюминесценции позволили установить определяющую роль сопротивления активной области светодиодов в области криогенных температур. Предложенный в работе механизм переноса, связанный с транспортом горячих носителей над квантовыми ямами, позволил качественно описать результаты эксперимента.

Объяснение повышения квантовой эффективности светодиодных структур в режиме электролюминесценции в области низких температур, когда должно происходить «вымораживания» дырок основано на привлечении механизма инжекции дырок из примесных акцепторных состояний в активную область.

Все полученные результаты анализируются с учетом наличия сильных электрических полей спонтанной и пьезоэлектрической поляризации в квантовых

ямах InGaN/GaN, которые в различной степени связаны с проявлением наблюдаемых эффектов.

Практическая значимость работы заключается в том, что впервые получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность изготовления резонансно-туннельных диодов и квантово-каскадных лазеров с использованием сверхрешеток InGaN/GaN.

Результаты работы позволят разработать технологии управления свойствами структур на основе нитрида галлия с целью их оптимизации.

В ходе проведения диссертационных исследований были установлены критерии применимости методики измерения квантового выхода светодиодных гетероструктур в широком диапазоне температур, которые могут быть рекомендованы к использованию на предприятии АО «НИИПП» (г. Томск).

Результаты диссертации представляют большой интерес для специалистов, работающих в области физики полупроводников, и их можно рекомендовать к использованию в организациях, ведущих исследования оптических и электрических характеристик структур с множественными квантовыми ямами: Академический университет им. Ж.И. Алфёрова (г. Санкт-Петербург), Институт физики твердого тела РАН (г. Черноголовка), Физико-технический институт имени А.Ф.Иоффе (г. Санкт-Петербург), НИ технологический университет МИСиС (г. Москва), Томский государственный университет.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается тем, что полученные температурные зависимости вольт-амперных характеристик многократно воспроизводились на пяти образцах из каждой партии. Предложенные математические модели адекватно описывают транспорт носителей заряда в структурах с квантовыми ямами InGaN/GaN в широком диапазоне температур.

В тоже время, отмечая актуальность выполненного в диссертации исследования, его новизну и практическую значимость, следует привести следующие замечания:

1. В работе отсутствуют полные сведения об экспериментальных светодиодных структурах. Параметры эпитаксиальных слоев измерены косвенными методами (атомно-эмиссионная спектроскопия, вольт-фарадное профилирование, измерение фотопроводимости при резонансном возбуждении и квантовой эффективности), напряженность встроенных электрических полей также оценена с использованием косвенных методов (измерение спектров пропускания, спектров фотолюминесценции, расчет встроенного поля на основании данных из литературных источников). Указанные факты не дают возможности проведения точного количественного анализа.

2. Предложенные модели протекания тока не учитывают в явной форме величину встроенных электрических полей в области квантовых ям, что осложняет сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Предложенные модели построены на основе эквивалентных схем и не учитывают реальной микроструктуры экспериментальных образцов (возможную кластеризацию раствора InGaN, наличие дислокаций).

Указанные замечания не снижают научной и практической значимости выполненной автором работы. Текст диссертации построен логично, содержит достаточное количество формульных и графических материалов, цель исследования

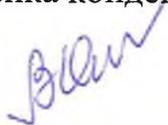
достигнута, а поставленные задачи успешно решены. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации опубликованы в российских и зарубежных журналах и доложены на российских и международных конференциях.

Таким образом, диссертация «Влияние встроенных электрических полей на перенос носителей заряда в излучающих структурах InGaN/GaN» является завершенной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. (ред. от 01 октября 2018 г.), а ее автор Копьев Виктор Васильевич, заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании Отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» от 28 ноября 2019 г., протокол № 25.

Отзыв составил

Профессор Отделения материаловедения ИШНПТ ФГАОУ ВО НИ ТПУ, доктор физико-математических наук, (01.04.07 – Физика конденсированного состояния),


Олешко Владимир Иванович
E-mail: oleshko@tpu.ru

Заведующий кафедрой – руководитель отделения на правах кафедры ФГАОУ ВО НИ ТПУ, доктор технических наук (01.04.07 – Физика конденсированного состояния), профессор,


Клименов Василий Александрович,
E-mail: klimenov@tpu.ru

3 декабря 2019 г.

Подписи Олешко Владимира Ивановича и
Клименова Василия Александровича удостоверяю

Ученый секретарь Ученого совета НИ ТПУ


О. А. Ананьева

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30; телефон: +7 (3822) 60-63-33; e-mail: tpu@tpu.ru; https://tpu.ru)