

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию **Задорожного Олега Федоровича «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN»** представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности **1.3.5 – физическая электроника**

Актуальность тематики

Неоспоримые преимущества светодиодных источников излучения, такие как высокий световой выход, длительный срок службы, экологичность, управляемость стимулируют многочисленные исследования и разработки, направленные на улучшение параметров светодиодов, расширение номенклатуры, выход на конкурентные характеристики светоизлучающих приборов. Гетероструктуры InGaN/GaN нашли широкое применение для изготовления светодиодов синего диапазона, и «белых» светодиодов на их основе. Не смотря на длительную историю применения таких структур, существует ряд научно-технологических проблем, препятствующих достижению теоретически возможной эффективности излучения. Круг решаемых в диссертационной работе задач направлен на поиск способов повышения интенсивности генерируемого оптического излучения гетероструктур на основе барьера InGaN/GaN, что является весьма актуальным для науки и техники. В свете проблем импортозамещения, развития российских технологий оптоэлектроники, тематика очень важна для светотехнической отрасли России.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформированных в диссертации

Научные положения, вынесенные на защиту, и выводы, сформированные по результатам диссертационного исследования хорошо обоснованы, аргументированы. Для подтверждения положений и выводов применялись как экспериментальные, так и расчетные методы.

Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность теоретических и экспериментальных результатов, представленных в диссертации обеспечивается использованием стандартных измерительных методик и аттестованного контрольно-измерительного оборудования, использованием в теоретических расчетах базовых принципов и моделей физики полупроводников и теории низкоразмерных объектов, подтверждается достоверность воспроизводимостью результатов, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами исследований других авторов.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, прошли апробацию на научных конференциях различного уровня. По результатам исследования опубликовано 24 работы, 6 работ было опубликовано в рецензируемом журнале «Известия вузов. Физика», индексируемого в международных базах данных Web of Science и Scopus, получен патент РФ на изобретение.

Новизна полученных результатов не вызывает сомнений и заключается в следующем: установлено, показано, что при большой разнице в концентрациях электронов и дырок в полупроводнике излучательная рекомбинация описывается моделью, в которой скорость рекомбинации определяется концентрацией неосновных носителей заряда и не зависит от концентрации легирующей примеси; впервые составлена эквивалентная схема светоизлучающей гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающая в совокупности несколько процессов: захват носителей заряда ямой, их излучательную рекомбинацию, протекание не взаимодействующего с ямами сквозного тока; разработана математическая модель и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом – метод резистивного профилирования, более информативный по сравнению с емкостным

методом; предложена феноменологическая модель захвата носителей заряда квантовой ямой, основанная на модели рекомбинации Шокли - Рида – Холла, позволяющая рассчитать скорость генерации оптического излучения; эмпирически определены энергии оптических фононов, участвующие в захвате электронов и дырок квантовой ямой в гетероструктурах из InGaN/GaN; предложен новый подход формирования профиля прямоугольной квантовой ямы, путем совмещения прямоугольных ям разной толщины и глубины, что позволяет увеличить число захватываемых носителей заряда и интенсивность излучения гетероструктуры.

Научная и практическая значимость полученных автором результатов

Результаты, полученные в работе имеют как научную, так и практическую значимость. Проанализированы физические процессы, определяющие эффективность излучающей структуры, предложены технические решения для существенного увеличения светового и квантового выхода. Предложена методика комбинирования квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, позволяющая повысить эффективность гетероструктуры InGaN/GaN в несколько раз. Предложен и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом с более высокой информативностью по сравнению с емкостными методами исследования - метод резистивного профилирования. Смоделирована эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающая все значимые электронные процессы в гетероструктуре и позволяющая исследовать электрофизические, полевые и оптические свойства наноразмерных объектов методами теории электрических цепей.

Научная и практическая значимость подтверждается поддержкой исследований Федеральной целевой программой «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-

технологического комплекса России на 2014-2022гг.». В рамках проекта «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» разработаны подходы для создания комбинированного профиля квантовой ямы источника оптического излучения на основе барьера InGaN/GaN для применения в светодиодных источниках света.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты работы представляют ценность для разработки технологий получения гетероструктур для фотоники, нанoeлектроники. Результаты работы могут быть использованы на предприятиях: АО НИИПП, АО «Монокристалл», АО Зеленоградский нанотехнологический центр, в научных учреждениях: Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Институт лазерной физики СО РАН, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

По структуре, содержанию и изложению материала диссертационная работа является законченным научным трудом. Работа имеет структуру, соответствующую рекомендациям ВАК. Она состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 139 страниц текста, 48 рисунков, 2 таблиц и библиографический список из 218 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, указана научная и практическая новизна полученных результатов, а также обоснована их

достоверность. В этой части диссертации обозначены методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту

Первая глава посвящена обзору научно-технической литературы по свойствам гетероструктур на основе InGaN/GaN, их топологии, рассмотрены методы исследования полупроводниковых гетероструктур. На основе обширного обзора выявлены проблемные вопросы и поставлены задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены электрофизические свойства гетероструктур с квантовыми ямами различного профиля. Предложена составная модель излучательной рекомбинации, в которой в области сравнительно низких уровней легирования доминирует бимолекулярная модель, а в области высоких концентраций - модель постоянства скорости излучательной рекомбинации.

В третьей главе представлены результаты исследования гетероструктур с квантовыми ямами оптическими и электрофизическими методами. Смоделирована последовательно-параллельная эквивалентная схема гетероструктуры с КЯ, в которой учтены все области и электронные процессы, включающие процессы захвата квантовой ямой и эмиссию из неё электронов, их излучательную рекомбинацию в КЯ и диффузию в барьерных слоях. Предложен метод профилирования концентрации носителей заряда в гетероструктурах с квантовыми ямами, основанный на низкочастотных измерениях зависимости дифференциального сопротивления гетероструктуры от напряжения смещения.

В четвертой главе анализируются энергетические возможности гетероструктур (ГС) с множественными квантовыми ямами (КЯ). Предложена методика составления КЯ комбинированного профиля из прямоугольных и треугольных квантовых ям с различными значениями глубины, ширины и наклона, обеспечивающая уплотнение энергетического спектра в верхней части спектра квантовой ямы и, тем самым, увеличение

скорости захвата электронов / дырок на состояния квантовой ямы. Показано что за счет комбинированного профиля из трех прямоугольных квантовых ям на основе InGaN/GaN достигается увеличение в 5,25 раза по сравнению с интенсивностью ГС на некомбинированных квантовых ямах.

Предложено практическое применение разработанной методики повышения эффективности излучения гетероструктуры с квантовыми ямами для разработки источника белого света по RGB технологии на одном чипе.

В заключении обобщены основные результаты диссертационного исследования.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Диссертация Задорожного О.Ф. представляет собой решение научной-технической задачи по повышению эффективности светодиодных источников излучения на основе гетероструктур InGaN/GaN. Цели, поставленные в работе, достигнуты, получены практически значимые результаты. Работа производит хорошее впечатление.

По тексту и содержанию диссертации имеются замечания.

1. В диссертации нет информации о происхождении исследуемой гетероструктуры InGaN/GaN, упоминания о параметрах гетероструктуры встречаются в предположительном контексте.
2. На рисунках не всегда приведена полная информация о приведенных зависимостях (рис.2.4, 3.6 – отсутствуют пояснения по кривым 1, 2). Из рис.3.6 не ясно, что демонстрируют правая и левая его части, ось x и ось приведена в логарифмах величин, при этом в обсуждении фигурируют величины емкости, сопротивления и частоты в натуральном выражении, что осложняет восприятие информации.
3. Для подтверждения валидности эквивалентных схем гетероструктур следовало бы привести более широкое сопоставление расчетных характеристик ГС с реальными экспериментальными данными.

4. Выводы о более эффективном методе генерации красного излучения путем введения в структуру квантовой ямы короткопериодной сверхрешетки из InGaN/GaN (стр. 110) сделаны без какого либо обоснования, анализа и сравнения объективных данных.
5. На странице 60 приведена неверная ссылка на рисунок 4.2.
6. В разделе 3.2.4. сказано, что были проведены экспериментальные исследования частотных характеристик параметров гетероструктур с КЯ разных производителей, и выявлены как качественные, так и количественные различия резистивных и емкостных частотных характеристик. Однако, результатов данных исследований в работе не приведено.
7. В формулах часто не приводятся пояснения к обозначениям используемых величин, что затрудняет чтение текста.
8. В тексте диссертации встречаются несоответствие падежей в предложениях, стилистические ошибки и грамматические ошибки.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Тематика диссертационной работы и её содержание соответствует специальности 1.3.5 - «Физическая электроника». Направление исследований соответствует п.5 паспорта специальности: Физические явления в твердотельных микро- и нано-структурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках и покрытиях.


Автореферат корректно и полно отражает содержание диссертации.

Заключение

Таким образом, совокупность представленных научных результатов позволяет сделать заключение, что диссертационная работа Задорожного О.Ф. «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на

основе InGaN/GaN», является законченной научно-квалификационной работой, выполненной в рамках актуального направления физической электроники. Диссертация удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней (Постановление правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Задорожный Олег Федорович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.

01.12.2023 г.


_____/Полисадова Елена Федоровна/

Полисадова Елена Федоровна - профессор отделения материаловедения Инженерной школы новых производственных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», д.ф.-м.н. по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния»

Адрес: 634050, г. Томск, проспект Ленина, д. 30

Телефон: +7-905-992-5509

E-mail: elp@tpu.ru

Подпись Полисадовой Е.Ф. заверяю

Ученый секретарь
Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский политехнический университет»
Томский




_____/Е.А. Кулинич

01.12.2023 г.