

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **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 избранной темы

Развитие физики и технологии соединений $A^{III}B^V$ — нитридов алюминия, индия и галлия показало, как научные исследования и технологические разработки новых материалов, а также реализация приборов на их основе приводят к экономически эффективному внедрению этих результатов в промышленность. Наглядным примером здесь может служить применение светодиодов (СД) белого цвета свечения на основе гетероструктур (ГС) InGaN/GaN в освещении, которое за последние десять лет прошло путь от пробных проектов до широкого использования. Актуальность поставленных в диссертации задач обусловлена как необходимостью развития физических принципов генерации излучения твердым телом, так и в реализации конструктивных и топологических решений по созданию светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами (КЯ). Уникальное сочетание свойств таких структур и возможность их целенаправленного изменения, открывает большие возможности для их практического применения.

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

Полученные Задорожным О.Ф. результаты отличаются существенной новизной и представляют интерес с точки зрения дальнейшего развития и применения как светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN так и

методов расчета моделей излучательной рекомбинации в гетероструктурах с комбинированным профилем. Отмечу, на мой взгляд, наиболее значимые:

Предложена методика составления КЯ комбинированного профиля из прямоугольных и треугольных КЯ с различными значениями глубины, ширины и наклона, что дало возможность увеличения интенсивности излучения ГС с КЯ за счет роста числа захватываемых носителей заряда с дополнительных уровней размерного квантования. Показана возможность увеличения интенсивности излучения в несколько раз по сравнению с ГС с одиночными, не комбинированными КЯ.

На основе анализа физических процессов, протекающих в различных элементах гетероструктуры с КЯ, разработана методика составления последовательно-параллельной эквивалентной схемы гетероструктуры, в которой учтены электронные процессы, включающие процессы захвата квантовой ямой и эмиссии из неё электронов, их излучательную рекомбинацию в КЯ и диффузию в барьерных слоях. Сравнение расчетных зависимостей эквивалентной емкости и эквивалентного сопротивления от частоты тестового сигнала с экспериментальными данными по частотным зависимостям эквивалентной емкости и эквивалентного сопротивления позволило определять численные значения ряда параметров ЭС.

Предложен метод профилирования концентрации свободных носителей заряда в гетероструктурах с КЯ, основанный на низкочастотных измерениях дифференциального сопротивления гетероструктуры в функции напряжения смещения. Проведенное экспериментальное сравнение предложенного метода с методом емкостного профилирования, показало высокую чувствительность резистивного профилирования к особенностям распределения концентрации свободных носителей заряда в пределах р-п перехода с КЯ.

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

Достоверность и новизна результатов диссертационной работы не вызывает сомнения и подтверждается систематическим характером исследований, использованием комплексных экспериментальных методик, сравнением полученных результатов с результатами других исследователей, широкой апробацией результатов работы на международных конференциях. Результаты диссертации опубликованы в 24 работах, 6 работ было опубликовано в рецензируемом журнале «Известия вузов. Физика», англоязычная версия которого индексируется в международных базах данных Web of Science и Scopus. По результатам работы получен патент РФ на изобретение.

Научная и практическая значимость полученных автором результатов

1. Разработанная методика комбинирования квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, позволяет повысить эффективность светоизлучающей гетероструктуры до нескольких раз.
2. Предложен и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом, обладающий более высокой информативностью по сравнению с емкостными методами исследования - метод резистивного профилирования.
3. Разработана методика составления эквивалентных схема гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающая все значимые электронные процессы в гетероструктуре и позволяющая исследовать электрофизические и оптические свойства nano-размерных объектов методами теории электрических цепей.

Таким образом, в результате комплексных исследований, решена важная научно-техническая проблема, состоящая в развитии методов конструирования и получения высокоэффективных светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы на предприятиях полупроводниковой промышленности РФ, таких как, группа компаний «Микрон», АО «Группа Кремний Эл», группа компаний «Ангстрем» и другими. Следует отметить, что результаты диссертационной работы уже использованы при выполнении Федеральных целевых программ. Кроме того, разработанный профиль КЯ, обеспечивающий увеличение эффективности источника оптического излучения до нескольких раз, защищен патентом РФ на изобретение.

Оценка содержания диссертации, ее завершенность

По структуре, содержанию и изложению материала диссертационная работа Задорожного О.Ф. 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, сформулированы положения, выносимые на защиту,

В первой главе проведен обзор научно-технической литературы по свойствам гетероструктур на основе InGaN/GaN, а также их параметрам, топологии и методам исследования. Изучен вопрос влияния формы квантовой ямы и её заполнения уровнями размерного квантования на величину генерируемого излучения.

Во второй главе проведен анализ свойств энергетического спектра прямоугольной и треугольной ям. 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 исследован фононный спектр гетероструктур с КЯ. Построена энергетическая диаграмма КЯ с включением в неё захвата электрона и генерации фононов. Предложена феноменологическая модель захвата электронов КЯ, основанная на модели Шокли-Рида-Холла. Рассмотрена топология гетероструктуры с множественными КЯ, каждому элементу которой ставится в соответствие своя последовательная или параллельная RC-цепь.

В четвертой главе рассматриваются методики расчета энергетического спектра ГС с квантовыми ямами составного профиля, полученного объединением КЯ одинаковой формы и разных размеров. Получено математическое выражение для интенсивности излучения гетероструктур с КЯ комбинированного профиля по модели бимолекулярной рекомбинации. Показано, что интенсивности излучения КЯ комбинированного профиля по сравнению с одиночной КЯ увеличивает интенсивность излучения до трех раз за счет роста числа захватываемых КЯ свободных носителей.

В заключении дан общий вывод по результатам диссертационной работы.

Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации

Замечания по тексту и содержанию диссертации.

1. В диссертации имеются опечатки и неудачно сформулированные предложения, например, многократно повторяющийся термин “свободный электрон в яме”.
2. На стр. 34 в записи уравнения Шредингера (формула 1.27) допущено две ошибки.
3. Использование автором в тексте диссертации таких неопределенных терминов, как «плотность» уровней и «длина уровней», на страницах 45-47 не способствует ясности изложения и выглядит непонятным.

Высказанные замечания по диссертации Задорожного О.Ф. не являются принципиальными и не снижают общий высокий уровень представленной диссертационной работы.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации

Тематика диссертационной работы и её содержание соответствует специальности 1.3.5 - «Физическая электроника». Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Заключение

Оценивая диссертацию Задорожного О.Ф. в целом, следует отметить, что в данной работе решена важная научная и практическая задача по разработке новых конструктивных и топологических решений с целью создания высокоэффективных светодиодов на основе гетероструктур InGaN/GaN с множественными квантовыми ямами.

Диссертация Задорожного О.Ф. соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 - физическая электроника.

Официальный оппонент,

профессор кафедры «Общей физики» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова». 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1. Тел: +7(916)377-62-36, e-mail: avakyants@physics.msu.ru

доктор физико-математических наук

 Авакянц Лев Павлович

28 ноября 2023 г.

Подпись Авакянца Льва Павловича заверяю:

И.о. декана физического факультета МГУ

профессор



 Белокуров В.В.