

На правах рукописи



ЗАДОРЖНЫЙ
Олег Федорович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СВЕТОДИОДНЫХ
ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ InGaN/GaN**

Специальность 1.3.5 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель: **Давыдов Валерий Николаевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры электронных приборов ТУСУР.

Официальные оппоненты: **Авакянц Лев Павлович**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова».

Полисадова Елена Федоровна, доктор физико-математических наук, профессор отделения материаловедения инженерной школы новых производственных технологий (ИШНПТ) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», руководитель образовательной программы "Оптотехника".

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Защита состоится «20» декабря 2023 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.03, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте ТУСУРа:

<https://postgraduate.tusur.ru/urls/hwpib4gq>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Казиков А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Среди всего многообразия полупроводниковых диодов светодиодное (СД) семейство нашло широкое применение во многих областях науки и техники. Популярность и доступность светодиодных ламп объясняются простотой и надежностью их конструкции. Лежащий в основе работы любого светодиода р-п переход выгодно выделяет их среди большинства светотехнических устройств, использующих недолговечные нити накаливания или опасные для окружающей среды пары ртути. Фотоны внутри р-п перехода генерируются не за счет термоэмиссии электронов, а за счёт разности электрического потенциала, образующегося между контактами диода (Алферов Ж.И., 1998; Шуберт Ф.Е., 2008). Это позволяет создавать высокоэффективные источники оптического излучения малой массы и размеров, с перестраиваемой длиной волны генерируемого излучения, со сроком службы до 50 000 часов работы на отказ. В настоящее время годовой оборот светодиодной продукции на мировом рынке, оценивается в десятки миллиардов долларов. Разработкой и серийным выпуском светодиодной продукции широкой номенклатуры занимаются крупнейшие фирмы всех ведущих стран мира: Китая, США, Японии, России и других государств. Большие успехи в создании эффективных источников видимого излучения достигнуты на гетероструктурах (ГС) с квантовыми ямами (КЯ) на основе барьера InGaN/GaN (Юнович А.Э. 2007).

Высокая эффективность СД источников, их широкое применение практически во всех сферах жизни современного общества привело к высокому уровню конкуренции производителей, следствием которой, с одной стороны, стало высокое качество продукции и её невысокая цена, а с другой - информационная закрытость всего СД направления, начиная с научных разработок, технологических приемов и заканчивая применяемой топологией, используемым составом полупроводниковых компонентов и численными значениями параметров выпускаемых светоизлучающих приборов.

Сказанное выше показывает актуальность рассматриваемой темы, её научное и практическое значение, как в плане разработки физических принципов генерации излучения твердым телом, так и в реализации конструктивных и топологических решений по созданию светодиодных источников в виде отдельных элементов, линеек, матриц и их всевозможных комбинаций.

Весь круг проблем, требующих решения конкретных задач по увеличению интенсивности излучения светодиодных гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ), можно объединить в следующие научно-технические направления:

1) первостепенным из них является задача увеличения интенсивности излучения светодиодных источников на основе барьера InGaN/GaN. Её решение за счет увеличения тока через гетероструктуру является неприемлемым, поскольку его рост пропорционально увеличивает тепловые потери (Солтанович О.А., 2012), что ведет к повышению температуры кристалла источника излучения, приводящему, в конечном счете, к его термическому разрушению. Поэтому увеличение интенсивности излучения целесообразно реализовывать повышением коэффициента его полезного действия. Основными направлениями достижения такого улучшения являются: повышение скорости захвата носителей заряда квантовой ямой и увеличение скорости излучательной рекомбинации носителей заряда в квантовой яме. При решении этой задачи важно понимать и учитывать границы реализации эффекта размерного квантования в потенциальной яме толщиной, меньшей длины волны де Бройля. Анализ условий наблюдения этого эффекта показывает, что его наблюдение возможно в кристаллах с предельно малой эффективной массой носителей заряда. Данный параметр является константой, определяемой структурой и физико-химическим составом материала излучателя и потому он малоприспособен для решения задачи повышения коэффициента полезного действия. Другим параметром, определяющим длину волны де Бройля, является энергия захватываемого потенциальной ямой свободного носителя заряда. В научной литературе рассмотрению роли этого параметра уделено недостаточно внимания, что также мешает целостному представлению о применимости эффекта размерного квантования в приборах полупроводниковой опто- и нанoeлектроники.

2) для увеличения скорости излучательной рекомбинации необходимо полное понимание механизма этого вида рекомбинации в кристаллических объектах, в качестве которого используют феноменологическую модель - модель бимолекулярной рекомбинации свободного электрона и свободной дырки. Согласно этой модели, легирование полупроводника донорной или акцепторной примесью увеличивает скорость излучательной рекомбинации по гиперболическому закону. Следовательно, для получения высокоэффективного источника оптического излучения целесообразно использовать легированные полупроводники. В гетероструктурах с

множественными квантовыми ямами из нелегированного материала, находящимися в обеднённой области р-n перехода, их заполнение электронами и дырками меняется от эмиттера электронов к эмиттеру дырок на многие порядки, что должно сказаться на механизме рекомбинации. Однако данный вопрос в научной литературе практически не рассмотрен, что ограничивает понимание процесса генерации оптического излучения в указанных объектах.

3) эффективным способом исследования электрофизических свойств полупроводниковых приборов, в том числе и светоизлучающих, является применение метода эквивалентных схем, согласно которому исследуемый прибор заменяется RC – цепью замещения, элементы которой определяются топологией прибора и режимом его работы. Данный метод позволяет исследовать такие характеристики прибора, как его частотные, полевые зависимости, а так же вычислять параметры ГС, анализируя реакцию эквивалентной RC - цепи на внешнее воздействие. Полезность такого подхода к исследованию свойств полупроводниковых приборов многократно продемонстрирована на практике. Однако в настоящее время применение данного метода для изучения свойств светоизлучающих гетероструктур с множественными квантовыми ямами весьма ограничено и, главным образом, используется в исследовании профиля концентрации носителей заряда с помощью емкостного метода, разработанного для 3D полупроводников (Зубков В.И, 2014).

4) В применении к полупроводниковым приборам, имеющим в своем составе объекты пониженной размерности, например, квантовые ямы, емкостные методы значительно доработаны, что позволяет вычислить многие параметры энергетической диаграммы гетероструктур. Однако эти методы исследования обладают принципиальным недостатком – высокая частота их тестового сигнала, используемого для регистрации емкостных свойств прибора (обычно составляющая сотни кГц) не позволяет фиксировать медленные процессы, такие как структурная перестройка активной области прибора, а также генерации - рекомбинации центров захвата носителей заряда. Поэтому представляется целесообразным применить низкочастотные измерения для исследования резистивных свойств гетероструктур с квантовыми ямами и совместно с высокочастотными методами использовать их при разработке и исследовании приборов микро - и оптоэлектроники на 3D полупроводниках с нано размерными элементами.

5) имеющиеся в настоящее время физические модели захвата носителей заряда КЯ достаточно сложны как в плане математического описания, так и физической трактовки. Так, математическое описание смены природы электрона (при захвате) с корпускулярной (в барьерном слое) на волновую (на состояниях в квантовой яме) природу и передача им избытка своей энергии фононам весьма громоздко. Поэтому для расчета элементов эквивалентной схемы гетероструктуры с квантовыми ямами наиболее пригоден феноменологический подход, который должен быть оформлен в виде модели захвата электрона. Её суть может быть заимствована из моделей взаимодействия свободных носителей заряда в 3D полупроводниках. Этот вопрос требует дополнительного рассмотрения.

б) при решении задачи по увеличению скорости захвата носителей заряда квантовой ямой необходимо учитывать структуру энергетических уровней размерного квантования – их число и положение в энергетическом спектре должны быть достаточными для размещения дополнительно захватываемых носителей заряда. На эти факторы большое влияние оказывает профиль квантовой ямы (который может быть прямоугольным или треугольным), физико-химический состав вещества КЯ и её параметры. Комбинируя их, в том числе создавая новый профиль ямы из узких и широких ям того же профиля, можно повышать или понижать плотность уровней энергии в верхней или нижней части ямы и тем самым менять заполнение уровней носителями заряда, а значит - изменять и интенсивность излучения. В литературе этот вопрос освещен недостаточно для использования сложных профилей в светодиодах.

Цели и задачи работы. Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследование электрофизических и эмиссионных свойств светодиодных гетероструктур на основе барьера InGaN/GaN, направленное на повышение интенсивности генерируемого оптического излучения. Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Исследование фундаментальных изменений энергетического спектра прямоугольной и треугольной квантовых ям при изменении ширины КЯ и энергии захватываемого ямой электрона с целью выявления условий его преобразования.

2. Исследование влияния концентрации легирующей примеси на время излучательной рекомбинации в полупроводнике с целью разработки модели излучательной рекомбинации в гетероструктуре с учетом различия величин концентраций электронов и дырок в квантовых ямах.

3. Составление эквивалентной схемы гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающей захват КЯ носителей заряда, их последующую рекомбинацию, наличие сквозного тока через светодиодную гетероструктуру, а также расчет емкостных и резистивных элементов эквивалентной схемы.

4. Разработка метода исследования свойств и параметров гетероструктуры с квантовыми ямами на основе низкочастотных измерений резистивных свойств гетероструктуры, а также экспериментальное сравнение методов резистивного и емкостного профилирования.

5. Составление феноменологической модели захвата носителей заряда для количественного описания скорости захвата носителей заряда квантовой ямой и её использование для расчета элементов эквивалентной схемы.

6. Рассмотрение энергетического спектра и излучающих свойств квантовых ям комбинированного профиля из прямоугольных ям разной ширины и высоты, а также из треугольных квантовых ям и вычисление возможного выигрыша в интенсивности генерируемого оптического излучения при различном числе объединяемых квантовых ям в яму комбинированного профиля.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые показано, что при большом разбалансе концентраций электронов и дырок в полупроводнике бимолекулярная модель излучательной рекомбинации сменяется моделью рекомбинации, в которой скорость рекомбинации не зависит от концентрации легирующей примеси и определяется концентрацией неосновных носителей заряда.

2. Впервые составлена эквивалентная схема светоизлучающей гетероструктуры с квантовыми ямами, которая учитывает захват носителей заряда ямой, их излучательную рекомбинацию, а также протекание не взаимодействующего с ямами сквозного тока. Вычислены элементы эквивалентной схемы.

3. Разработана математическая модель и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом – метод резистивного профилирования, потенциально обладающий более высокой информативностью по сравнению с емкостным методом.

4. Предложена феноменологическая модель захвата носителей заряда квантовой ямой, основанная на модели рекомбинации Шокли - Рида – Холла. Модель позволяет рассчитать скорость генерации оптического

излучения. В гетероструктурах из InGaN/GaN экспериментально определены энергии оптических фононов, участвующий в захвате электронов и дырок квантовой ямой.

5. Предложен профиль прямоугольной квантовой ямы, полученный совмещением прямоугольных ям разной толщины и глубины, позволяющий увеличить число захватываемых носителей заряда и тем самым увеличить интенсивность излучения гетероструктуры. Комбинирование ям треугольного профиля также может увеличивать интенсивность излучения, но меньше, чем комбинирование прямоугольных квантовых ям.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработана методика комбинирования квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, позволяющая повысить эффективность светоизлучающей ГС до нескольких раз.

2. Предложен и экспериментально апробирован новый метод исследования свойств полупроводниковых приборов с р-п переходом, потенциально обладающий более высокой информативностью по сравнению с емкостными методами исследования - метод резистивного профилирования.

3. Составлена эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами, учитывающая все значимые электронные процессы в гетероструктуре и позволяющая исследовать электрофизические, полевые и оптические свойства нано размерных объектов методами теории электрических цепей.

Методология и методы исследования. При выполнении работы проводились экспериментальные, теоретические исследования, численный расчет, математическое моделирование и аппроксимации полученных зависимостей аналитическими выражениями. В теоретических исследованиях использовалась бимолекулярная модель излучательной рекомбинации в полупроводниках, модель Шокли – Рида – Холла о взаимодействии свободных носителей заряда с примесными уровнями; метод Фурье-спектроскопии для регистрации спектров диффузного отражения по нахождению спектра поглощения по методу Кубелки – Мунка; метод ёмкостного профилирования; квазиклассическое приближение Бора-Зоммерфельда; графический метод решения дисперсионных уравнений; стандартные методы расчета спектров как одиночных, так и комбинированных КЯ; метод эквивалентных схем, стандартные приемы преобразования RC-цепей; стандартные методы математической обработки числовых рядов.

Моделирование и аппроксимация выполнялись в программной среде Mathcad. Экспериментальные исследования проводились на измерителе Keithley, ИК-Фурье спектрофотометра (ИКФС) Shimadzu IRTracer-100 с приставкой DRS-8000A и измерителях импеданса LCR Agilent 4980A и «Адмиттанса E7-20».

Связь темы диссертации с плановыми работами. Результаты диссертационной работы, полученные в процессе теоретических и экспериментальных исследований, использованы при выполнении Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2022гг.» в проекте «Разработка прототипов передовых технологических решений роботизированного интеллектуального производства электронной компонентной базы и энергоэффективных световых устройств» (соглашение № 14.577.21.0266 от 26 сентября 2017 г.) в части разработки комбинированного профиля квантовой ямы источника оптического излучения на основе барьера InGaN/GaN для разработки ламп освещения. Разработанный профиль КЯ, обеспечивающий увеличение эффективности источника оптического излучения до нескольких раз, защищен патентом РФ на изобретение.

Часть диссертационного материала, касающаяся составления эквивалентной схемы СД гетероструктуры с КЯ и принципа получения комбинированного профиля прямоугольных и треугольных квантовых ям выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования (задание FRWM-2023-0012) и используется в лекционном и практическом циклах курса «Полупроводниковая оптоэлектроника», читаемого магистрам направления 01.03.04 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Положения, выносимые на защиту:

1. Рост концентрации легирующей примеси в полупроводнике приводит к смене механизма излучательной рекомбинации по бимолекулярной модели с доминирующим влиянием концентрации основных носителей на модель, по которой её скорость протекания не зависит от уровня легирования и задается концентрацией неосновных носителей заряда. Предложена составная модель излучательной рекомбинации, по которой в области низких и средних уровней легирования излучательная рекомбинация описывается бимолекулярной моделью, а в области высоких концентраций определяющей становится модель, в которой излучательная рекомбинация не зависит от уровня легирования.

2. Предложена эквивалентная схема гетероструктуры с множественными квантовыми ямами, основанная на её электрофизической структуре и описывающая основные процессы токопротекания, захвата носителей заряда и их излучательную рекомбинацию. Рассчитаны элементы эквивалентной схемы. Разработан метод резистивного профилирования концентрации свободных носителей заряда в гетероструктурах, основанный на низкочастотных измерениях зависимости дифференциального сопротивления исследуемой структуры от напряжения смещения и потенциально позволяющий получить больше информации о параметрах и процессах в гетероструктуре, чем метод емкостного профилирования, за счет регистрации медленно протекающих структурных и электрических процессов.

3. Предложена идеология составления комбинированного профиля парциальных (не зависящих друг от друга) прямоугольных и треугольных квантовых ям с более плотным энергетическим спектром в его верхней части, чем у исходного профиля, по которой определяется порядок расположения объединяемых ям, их оптимальное число, число уровней размерного квантования в каждой яме, а также ширина и глубина каждой из объединяемых ям, обеспечивающих увеличение числа захватываемых свободных носителей заряда на уровне размерного квантования.

4. Использование в светодиодных гетероструктурах на основе InGaN/GaN квантовых ям комбинированного профиля, полученного по разработанной идеологии составления профиля объединением нескольких прямоугольных ям разной ширины, глубины и физико-химического состава, позволяет получить выигрыш в интенсивности излучения по сравнению с интенсивностью, генерируемого квантовой ямой стандартного профиля: для конфигурации профиля «узкая яма – средняя яма - широкая яма», составленного из прямоугольных ям, выигрыш в интенсивности излучения достигает 5,3 раза, а при комбинировании двух ям профиля «узкая яма – широкая яма» 4,0 раза. При объединении двух треугольных ям в профиль по наклону «малый – большой» выигрыш по интенсивности составляет 3,2 раза.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность выносимых на защиту теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами исследований других авторов. Результаты экспериментальных исследований получены с использованием стандартных измерительных методик и сертифицированного контрольно-

измерительного оборудования. Выполненные в диссертационной работе теоретические расчеты базируются на базовых принципах и моделях физики полупроводников и теории низкоразмерных объектов в микро- и оптоэлектронике. Все результаты диссертационной работы при их опубликовании в научных журналах и выступлениях на научных конференциях различного уровня прошли рецензирование и обсуждения научной общественностью.

Результаты работы докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2018 – 2020 гг; Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» г. Томск, 2018 - 2021 гг; Международном научном конгрессе научная сессия «Первые шаги в науке» г. Новосибирск, 2019 г; 57-й Международной научной студенческой конференции, г. Новосибирск, 2019 г; Международной конференции по фотонике и информационной оптике г. М., 2019 - 2021 гг; Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых ТПУ, Томск, 2021 г; Всероссийской научно-технической конференции СФУ, г. Красноярск, 2022 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 4 статьи в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 6 статей в журналах, индексируемых в библиографической базе данных РИНЦ, и 18 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. По результатам научных исследований в соавторстве получен один патент РФ на изобретение.

Личный вклад автора. Личный вклад заключается: в совместной с руководителем постановке задач и проведении экспериментальных и теоретических исследований, в анализе и обработке их результатов, в написании статей и докладов для научных журналов и конференций с теоретическим обоснованием полученных практических результатов, в частности, в разработке методик измерений и проведения расчетов энергетических спектров квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, а также совместных с научным руководителем аналогичных расчетов интенсивности излучения комбинированных квантовых ям и модели излучательной рекомбинации при высоких уровнях легирования полупроводника.

Структура диссертации. Диссертация объемом 139 страницы состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения, списка литературы из 218 наименований источников научно-технической информации и трех приложений

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 сформулированы положения, выносимые на защиту, указано число статей по результатам диссертационной работы, опубликованных в научных журналах, цитируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, а также приведен список докладов по теме диссертации на научных конференциях с публикацией текстов докладов.

В первой главе проведен обзор научно-технической литературы по свойствам гетероструктур на основе InGaN/GaN, а также их параметрам, топологии и методам исследования показал, что данный тип источника излучения характеризуется коэффициентом полезного действия, достигающим (40 – 50) % для излучения с длиной волны (0,45 – 0,55) нм.

Установлено, что для поиска способов увеличения интенсивности излучения влияние структуры уровней размерного квантования, а также пространственного распределения КЯ по области p-n перехода на скорость излучательной рекомбинации в ямах в литературе рассмотрены недостаточно.

В литературе также недостаточно информации по схемотехнической интерпретации функционирования СД гетероструктур с КЯ, представляемой в виде эквивалентной RC – схемы и описывающей основные процессы, протекающие в приборе, определяющие его электрофизические и оптические свойства. Установлено, что основными методами исследования СД гетероструктур являются электрофизические методы, основанные на измерении параметров тока через гетероструктуру, представляемую в виде ёмкости и сопротивления со своими их зависимостями от частоты и напряжения. Каждая из этих характеристик несет определенную информацию об исследуемом объекте.

Изучен вопрос влияния формы квантовой ямы и её заполнения уровнями размерного квантования на величину генерируемого излучения. Этот вопрос в научно-технической литературе рассмотрен недостаточно.

Как пример этого, автору не удалось найти четкие данные по сравнению излучательных свойств таких базовых форм КЯ, как прямоугольная (ПКЯ) и треугольная квантовые ямы (ТКЯ). Более того, практически нет данных по свойствам гетероструктур с КЯ комбинированного профиля (ККЯ) различных комбинаций: «ПКЯ – ТКЯ», «узкая ПКЯ – средняя ПКЯ – широкая ПКЯ», «узкая ТКЯ – средняя ТКЯ – широкая ПТЯ» и по другим более сложным их комбинациям.

Исходя из приведенного рассмотрения состояния вопроса об условиях генерации оптического излучения в ГС с КЯ различной формы, определены следующие задачи на исследование:

1. Исследовать энергетический спектр ПКЯ и ТКЯ различной толщины при изменении энергии захватываемого квантовой ямой электрона для выяснения оптимальной структуры спектра квантовой ямы с целью увеличения интенсивности генерируемого излучения заданного спектрального состава.

2. Рассмотреть влияние концентрации легирующей примеси на время излучательной рекомбинации (ВИР) в КЯ с учетом различия концентраций электронов и дырок в ямах.

3. Составить эквивалентную схему гетероструктуры с КЯ, учитывающую захват ямой свободных носителей заряда, их рекомбинацию, наличие сквозного тока через СД гетероструктуру, а также рассчитать емкости и сопротивления эквивалентной схемы, пригодных для их численных оценок.

4. Разработать метод исследования свойств гетероструктуры с КЯ на основе низкочастотных измерений резистивных свойств гетероструктуры, способный регистрировать медленные процессы изменения электрической активности элементов гетероструктуры, а также экспериментально сравнить резистивное и емкостное профилирование.

5. Используя данные о генерации фононов определённых энергий в процессе генерации оптического излучения, составить феноменологическую схему захвата носителей заряда КЯ для количественного описания скорости захвата носителей заряда.

6. Проанализировать энергетический спектр и излучающие свойства ККЯ, составленных из ПКЯ разной ширины и высоты, а также из ТКЯ и численно определить выигрыш в интенсивности генерируемого излучения, получаемый от применения новых конфигураций профиля КЯ. Определить оптимальную форму комбинированной квантовой ямы (ККЯ), критерии

определения числа объединяемых ям и их параметров для получения максимального эффекта по увеличению интенсивности излучения.

Вторая глава посвящена анализу свойств энергетического спектра прямоугольной и треугольной ям, показавший, что спектр прямоугольной ямы разрежен в его верхней части. Это ограничивает число захватываемых ямой свободных носителей заряда, а значит и интенсивность генерируемого излучения. Для увеличения их скорости захвата целесообразно увеличить толщину ямы в её верхней части, сохранив толщину ямы в её нижней части, которая определяет длину волны генерируемого излучения. Выполнение этих требований приводит к тому, что оптимальная форма ямы должна быть составной, сочетая узкую нижнюю часть и широкую верхнюю.

Показано, что при высоких уровнях легирования полупроводника и малом уровне инжекции неравновесных носителей заряда бимолекулярная модель излучательной рекомбинации имеет ограничение, связанное с пропорциональным снижением концентрации неосновных носителей заряда. По модели бимолекулярной рекомбинации с ростом концентрации легирующей примеси τ уменьшается по гиперболе. Однако имеющиеся экспериментальные данные указывают на более сложный характер этой зависимости. На рисунке 1 точками показаны экспериментальные значения времени жизни носителей τ в GaAs. Их аппроксимация в виде гиперболической кривой 1 недостаточно точно отражает характер этой зависимости.

Более точная аппроксимация показана кривой 2 и предполагает действие трех механизмов:

- 1) бимолекулярная рекомбинация в области низких и средних уровней легирования (до 10^{16} см^{-3});
- 2) независимость τ от уровня легирования во второй области с диапазоном от 10^{16} см^{-3} до 10^{18} см^{-3} ;
- 3) в третьей области (выше 10^{18} см^{-3}) – спад τ по гиперболическому закону.

Уменьшение времени жизни носителей заряда в этой области происходит, вероятно, в результате рекомбинации на структурных дефектах легирования. Во второй области механизм ИР аналогичен первому, но с тем

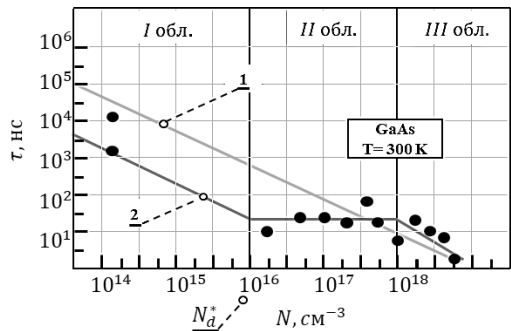


Рисунок 1 – Зависимость времени жизни электронов в GaAs от концентрации донорной примеси

отличаем, что в указанной области зон-зонная рекомбинация при столкновении частиц ограничена концентрацией неосновных носителей заряда. Для этого случая число рекомбинирующих частиц можно описать выражением:

$$N_{\text{рек}} = \frac{n_0 p_0}{n_0 + p_0}. \quad (1)$$

Поскольку этот механизм доминирует при $n_0 > n^* \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, то в качестве начальных параметров расчета ВИР во второй области берутся концентрация N_d^* и время τ из рисунка 1, равные 10^{16} см^{-3} и 10^{-8} с .

Расчеты показывают, что с учетом ВИР в собственном полупроводнике $\tau_l^{(i)}$ во второй области ВИР будет описываться выражением:

$$\tau_2 = \frac{\delta n}{\delta R_l^*} = \tau \frac{(n_0 + p_0)^2}{n_0^2 + p_0^2} = \tau_l^{(i)} \frac{2n_i}{N_d^*} \cdot \frac{(n_0 + p_0)^2}{n_0^2 + p_0^2}. \quad (2)$$

Предложено, что при высоких уровнях легирования в первой и второй областях можно пользоваться вычислением скорости излучательной рекомбинации, пользуясь функцией обратной суммы обратных величин, которая дает независимость скорости излучательной рекомбинации от уровня легирования.

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. При этом, выражение для ВИР, справедливое в первой и второй областях, будет представлять собой алгебраическую сумму выражений для бимолекулярной рекомбинации и выражения (2):

$$\tau = \tau_l^{(i)} \left(\frac{2n_i}{n_0 + p_0} \right) \cdot \left[1 + \frac{(n_0 + p_0)}{N_d^*} \cdot \frac{(n_0 + p_0)^2}{n_0^2 + p_0^2} \right] \quad (3)$$

В третьей главе диссертации исследуются электрофизические свойства ГС с КЯ для описания эквивалентными РС-цепями. Исследование фонованого спектра излучения ГС с КЯ показало наличие в нем двух пиков с энергиями фононов $E_1 = 0,193 \text{ эВ}$ и $E_2 = 0,207 \text{ эВ}$, которые связаны нами с захватом носителей заряда КЯ. При этом предполагается, что фононы с энергией E_2 генерируются в результате захвата электронов на верхний

уровень размерного квантования (УРК) в электронной КЯ. Последующая релаксация электронов на нижний излучательный уровень сопровождается генерацией фононов с энергией E_f . Построена энергетическая диаграмма КЯ с включением в неё захвата электрона и генерации фононов (рисунок 2).

Предложена феноменологическая модель захвата электронов КЯ, основанная на модели Шокли-Рида-Холла по захвату носителя на гипотетический уровень, совпадающий с потолком валентной зоны КЯ.

Основные электрофизические свойства полупроводниковых структур описывают ВФХ и ВСХ, из которых получают основной набор параметров этих структур.

Измерение указанных характеристик проводится с помощью измерителя импеданса.

Это означает, что исследуемый объект заменяется эквивалентной схемой (ЭС), составленной из последовательных и параллельных RC -цепочек и представляемой в виде схемы замещения из R и C элементов со сложными зависимостями от частоты тестового сигнала и от величины приложенного напряжения. Её составление является отдельной задачей и предполагает знание физических процессов в полупроводнике и умение комбинировать электрические цепи, соответствующие этим процессам. На рисунке 3 показаны основные токи в ГС с КЯ.

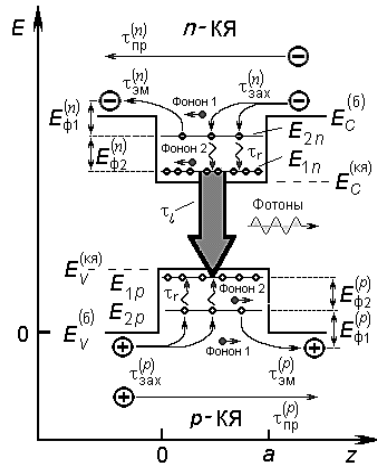


Рисунок 2 – Захват и эмиссия электронов ямой с генерацией фононов

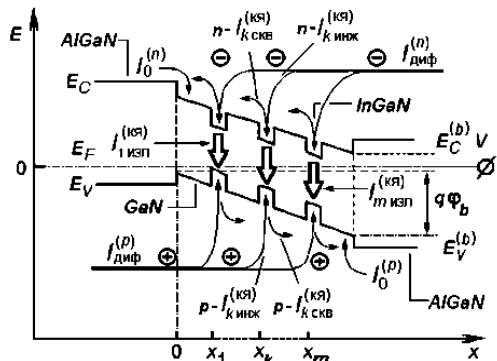


Рисунок 3 – Схема токопротекания, захвата и излучения света в ГС с КЯ

Построение ЭС ГС с КЯ основывается на топологии ГС. На рисунке 4 показана топология ГС с множественными КЯ, каждому элементу которой ставится в соответствие своя последовательная или параллельная RC-цепь. Пересчет импеданса составленной ЭС в конечную цепь замещения производится методами теории электрических цепей с получением математических выражений для дифференциального сопротивления ГС $R_{ГС}(\omega)$ и емкости $C_{ГС}(\omega)$. Из их сравнения с экспериментальными зависимостями находят параметры ГС: емкости и сопротивления отдельных областей, а также времена перезарядки, определяющие время захвата, время пролета носителей заряда и т.п. Полевые зависимости емкости позволяют определить величины барьеров в ГС.

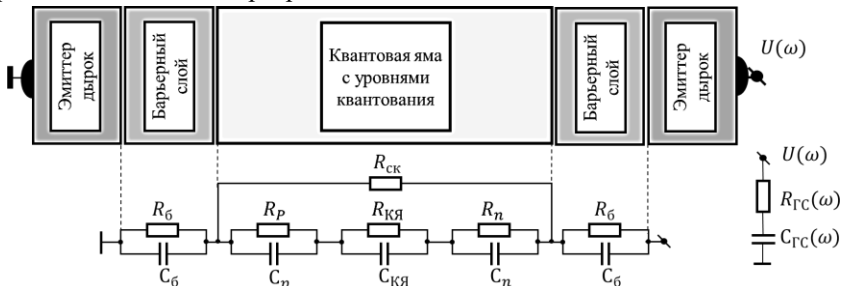


Рисунок 4 – Методика составления ЭС с выбранной схемой замещения

На рисунке 5 приведены частотные зависимости емкости и сопротивления ГС производства фирмы «SemiLED» и $10^{-5} c$ - для ГС фирмы «Samsung» в отсутствии смещения на p-n-переходе.

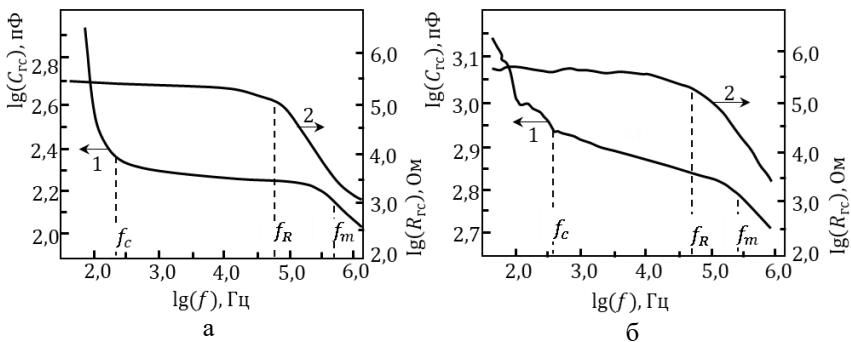


Рисунок 5 – Экспериментальные ВФХ и ВСХ ГС с КЯ разных производителей

Из представленных зависимостей, по частотам среза. можно найти время релаксации, в частности, для р-п перехода, которое оказалось равным порядка 10^{-4} с.

Емкостные измерения дают возможность получить профиль концентраций носителей заряда, что особенно важно при наличии в структуре КЯ. Производя расчет по стандартной методике нахождения концентрации свободных носителей в р-п переходе, можно обнаружить неоднородности распределения концентрации зарядов.

КЯ в спектре концентраций электронов и их местоположение будут отмечены пиками.

Все емкостные измерения высокочастотные (от 10 кГц и выше), поэтому в измеряемом сигнале отсутствуют: процессы медленной перестройки вещества КЯ, а также граница раздела с барьером и другие процессы со сравнительно большими временами протекания. Эти процессы можно увидеть на низких частотах ($\omega \ll 1/R_{Гс}C_{Гс}$), на которых импеданс ГС является резистивным. Профилирование концентрации электронов в ГС с КЯ на низких частотах можно реализовать, измеряя зависимость омического сопротивления ГС от напряжения смещения р-п перехода.

Если рассматривать ГС с КЯ как диффузионный переход, то его дифференциальное сопротивление определяется диффузионным обратным током и описывается экспоненциальной зависимостью. Полное же дифференциальное сопротивление ГС с КЯ равно сумме последовательно соединенных сопротивлений р-п переходов $R_{p-n}(V)$ и сопротивлений всех КЯ. Интерпретируя эквивалентное сопротивление ГС при прямых смещениях ($V > 0$), как дифференциальное сопротивление р-п перехода с КЯ и обратным током за счет диффузии неосновных носителей из n -области, оно описывается выражением:

$$\frac{1}{R_{Гс}(V)} \cong \frac{q^2 S}{kT} \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{n_R^{(rc)}(V)} \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (4)$$

Для нахождения профиля концентрации $n_R(x)$ по методике профилирования пошагово изменяют напряжение смещения и измеряют приращение проводимости:

$$\frac{d}{dV} \left[\frac{1}{R_{Гс}(V)} \right] = \frac{q^2 n_i}{kT} S \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i}{n_R^{(rc)}(V)} \cdot \left(\frac{q}{kT} \right) \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right). \quad (5)$$

Из выражения (5) определим профиль концентрации, как полный дифференциал концентрации электронов:

$$n_R^{(rc)}(V) = \frac{N_d}{1 - \frac{kT}{q^2 S} \cdot \frac{N_d}{n_i^2} \sqrt{\frac{\tau_p}{D_p}} \cdot \left(\frac{kT}{q}\right) \cdot \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \cdot \sum_{k=1}^m \left[\frac{d}{dV} \left(\frac{1}{R_{кя}^{(k)}(V)} \right) \right]} \cdot dV, \quad (6)$$

где сумма берется по квантовым ямам. Второе слагаемое знаменателя (6) содержит производную от сопротивления КЯ, которая вне КЯ равна нулю, а точка нахождения КЯ дает пик значения. Как результат, в профиле концентрации ГС с КЯ вдали от квантовых ям имеем концентрацию электронов, равную N_d , а в точках нахождения КЯ всплеск $n_R^{(rc)}(V)$. Поскольку в научной литературе отсутствует выражение для профиля концентрации с учетом КЯ, оно было получено нами по описанной методике с учетом элементов эквивалентной схемы. Сравнение профилей, найденных из емкостных и резистивных измерений, показало (рисунок 6), что если емкостные профили достаточно «чистые» и «гладкие», то резистивные профили содержат дополнительные пики.

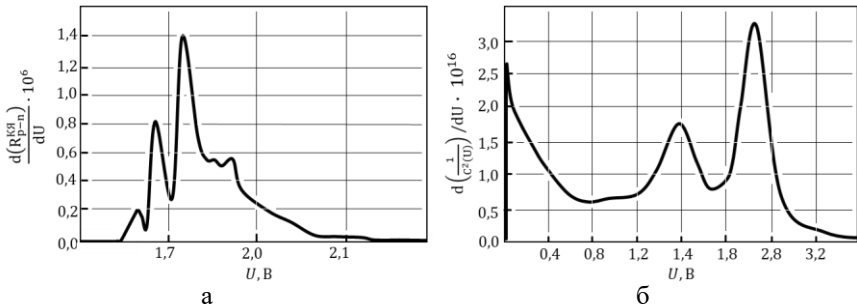


Рисунок 6 – Экспериментальные профили концентрации электронов, полученные методом: резистивного профилирования (а), емкостного профилирования (б)

Четвертая глава посвящена изучению энергетических возможностей ГС с КЯ различного профиля. В начале главы рассматриваются и дополняются методики расчета энергетического спектра ГС с ТКЯ и ПКЯ составного профиля, полученного объединением КЯ одинаковой формы и разных размеров. Отмечается, что одним из способов увеличения интенсивности излучения является увеличение ширины КЯ, что указывает на целесообразность изготовления КЯ комбинированного профиля.

Для оценки данного метода повышения интенсивности излучения предложена методика получения комбинированного профиля путем

составления их по оси, одна над другой с увеличением толщины каждой очередной КЯ с получением воронкообразного профиля. Ввиду оценочного характера проводимого расчета для каждой из КЯ, энергетический спектр рассчитывается без учета влияния других КЯ, а суммарный спектр формируется из индивидуальных спектров (рисунок 7).

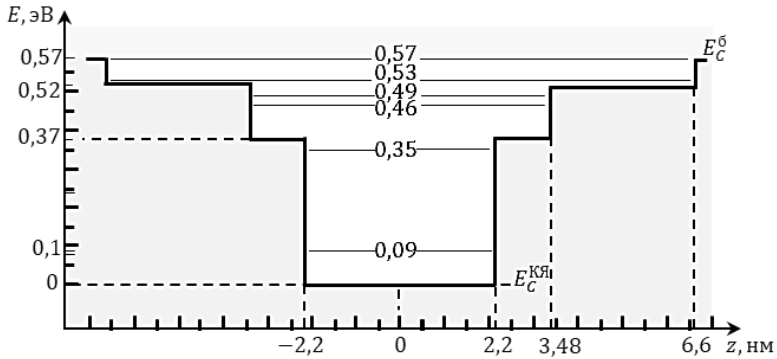


Рисунок 7 – Энергетическая диаграмма КЯ комбинированного профиля их трех ям прямоугольных ям

Разработана методика расчета оптимальных параметров объединяемых КЯ: их числа, содержания индия в них и толщины. Получено математическое выражение для интенсивности излучения ГС с КЯ комбинированного профиля по модели бимолекулярной рекомбинации:

$$I_{\text{ГС}}^{(\text{комб})} = \hbar\omega \cdot B_l \cdot \left(\frac{m_n^*(x_1)}{\pi \cdot \hbar^2} \right) \cdot \left(\frac{m_p^*(x_1)}{\pi \cdot \hbar^2} \right) \cdot (a_1^2 N_1 P_1 + a_2^2 N_2 P_2 + a_3^2 N_3 P_3), \quad (7)$$

где N_1, N_2, N_3 и P_1, P_2, P_3 - количество УРК для электронов (N_k) и дырок (P_k), в объединяемой в ступенчатый профиль КЯ; a_1, a_2, a_3 - толщины КЯ. Остальные обозначения общепринятые. Численные оценки роста интенсивности излучения в предположении «невзаимодействующих» КЯ показали возможность увеличения интенсивности в несколько раз.

Рассчитан реальный спектр электронных состояний в ямах комбинированного профиля составленного из трех ПКЯ с учетом взаимодействия между ними. На его основании оценен выигрыш в интенсивности излучения такой структуры в сравнении с одиночной ПКЯ (нижней из объединяемых), который будет описываться выражением:

$$\frac{I_{\Gamma C}^{(\text{комб})}}{I_{\Gamma C}^{(\text{од})}} = 1 + q^2 \left(\frac{N_2 P_2}{N_1 P_1} \right) + q^4 \left(\frac{N_3 P_3}{N_1 P_1} \right), \quad (8)$$

где $q = 1,71$ - константа. Оценка выигрыша в интенсивности по выражению (12) дает значение в 5,3 раза для профиля «узкая яма – средняя яма – широкая яма» (рисунок 8, а).

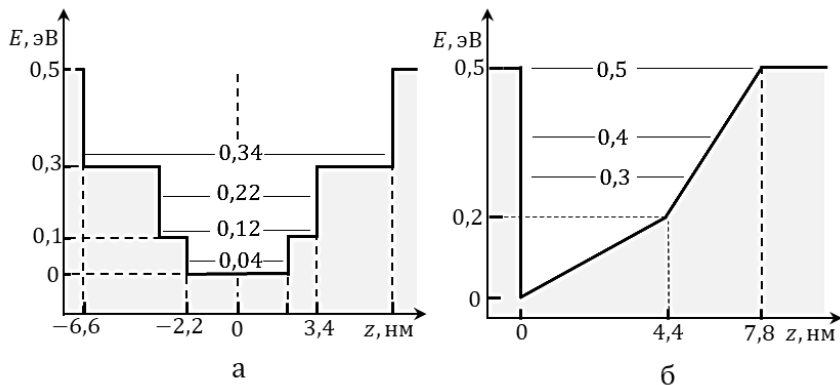


Рисунок 8 – Энергетическая диаграмма КЯ комбинированного профиля с учетом их взаимодействия, полученная объединением трех ПКЯ (а), и двух ТКЯ (б)

Полученное значение увеличения интенсивности несколько ниже значения, полученного для случая аддитивного спектра, т.е. увеличения интенсивности для объединения ПКЯ в яму комбинированного профиля, с учетом трансформации его энергетического спектра, имеет место и превосходит почти в два раза выигрыш, достигаемый при объединении только двух КЯ. Результаты комбинирования ТКЯ менее значительны.

На рисунок 8, б показана комбинированная ТКЯ, составленная по принципу наклона «малый - большой».

Уменьшение глубины нижней ТКЯ до значения 0,20 эВ приводит к росту числа уровней до четырех с энергиями 0,25 эВ, 0,36 эВ, 0,45 эВ и 0,53 эВ. Их длины соответственно равны: $l_{k1} = 4,96$ нм, $l_{k2} = 5,55$ нм, $l_{k3} = 6,41$ нм и $l_{k4} = 7,45$ нм. Тогда выигрыш в интенсивности излучения такой ТКЯ комбинированного профиля по сравнению с одиночной ТКЯ будет:

$$\frac{I_{\Gamma C}^{(\text{комб})}}{I_{\Gamma C}^{(\text{од})}} = \frac{l_{k1}^2 + l_{k2}^2 + l_{k3}^2 + l_{k4}^2}{I_{\Gamma C}^{(\text{од})}} = 3,2$$

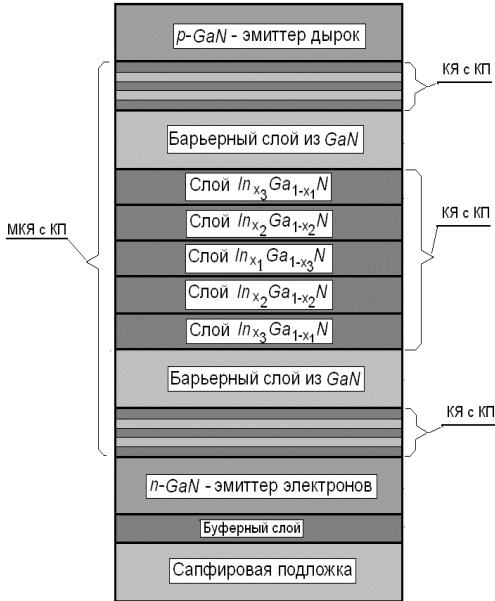


Рисунок 9 – Конструкция СД ГС с КЯ комбинированного профиля

Таким образом, рассмотрение выражения для интенсивности излучения ТКЯ комбинированного профиля по сравнению с одиночной треугольной КЯ показывает, что предлагаемое комбинирование увеличивает интенсивность ГС до трех раз за счет роста числа захватываемых КЯ свободных носителей.

На рисунке 9 показана конструкция СД ГС на основе InGa_N/Ga_N с квантовыми ямами комбинированного профиля, полученного объединением трех квантовых ям прямоугольного профиля и дающего наибольший выигрыш в интенсивности.

Описано практическое применение ям комбинированного профиля для получения белых светодиодов без использования люминофора. Использование ККЯ позволяет бороться со снижением интенсивности красной и зеленой ямы возникающих в следствии сильных полей спонтанной поляризации задавая необходимый баланс цветов, а введение люминесцентного вещества препятствует выделению индия в виде второй фазы в процессе выращивания и эксплуатации СД.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

При выполнении диссертационного исследования получены следующие основные результаты:

1. На основе проведенного обзора научно-технической литературы по светодиодным гетероструктурам на основе р-п перехода с квантовыми ямами InGa_N/Ga_N установлено, что основным вопросом совершенствования их излучательных свойств является вопрос повышения эффективности преобразования в них электрического тока в световое

излучение. Установлено, что нет полной ясности влияния структуры энергетического спектра уровней размерного квантования на интенсивность генерируемого излучения, а также пространственного распределения КЯ по области пространственного заряда p-n перехода на скорость излучательной рекомбинации в ямах. Также недостаточно информация о феноменологической модели процесса захвата свободных носителей заряда КЯ.

2. Анализа свойств энергетического спектра прямоугольной и треугольной ям показал, что спектр прямоугольной ямы разрежен в его верхней части. Это ограничивает число захватываемых ямой свободных носителей заряда, а значит и интенсивность генерируемого излучения. Для увеличения их скорости захвата целесообразно увеличить толщину ямы в её верхней части, сохранив толщину ямы в её нижней части, которая определяет длину волны генерируемого излучения. Выполнение этих требований приводит к тому, что оптимальная форма ямы должна быть составной, сочетая узкую нижнюю часть и широкую верхнюю.

3. На основании анализа физической картины протекания излучательной рекомбинации в квантовых ямах, характеризующихся большим различием в значениях в них концентраций электронов и дырок, предложено, что при высоких уровнях легирования полупроводника и малом уровне инжекции неравновесных носителей заряда, бимолекулярная модель излучательной рекомбинации имеет ограничение, связанное пропорциональным снижением концентрации неосновных носителей заряда. При высоких уровнях легирования (по аналогии с моделью Шокли-Рида-Холла рекомбинации через глубокий уровень) предложено пользоваться вычислением скорости излучательной рекомбинации функцией обратной суммы обратных величин, которая дает независимость скорости излучательной рекомбинации от уровня легирования. Сравнение с экспериментальными данными по времени жизни носителей заряда в GaAs показывает наличие области концентрации лигатуры (10^{16} - 10^{18}) см^{-3} , в пределах которой время их жизни не зависит от уровня легирования. Составлена модель излучательной рекомбинации, в которой в области низких уровней легирования доминирует бимолекулярная модель, а в области высоких концентраций – модель независимости скорости излучательной рекомбинации от легирования полупроводника.

4. На основе анализа физических процессов, протекающих в различных элементах гетероструктуры с квантовыми ямами, разработана методика составления последовательно-параллельной эквивалентной

схемы гетероструктуры с квантовыми ямами, в которой корректно учтены все области и электронные процессы, включающие процессы захвата квантовой ямой и эмиссии из неё электронов, их излучательную рекомбинацию в квантовых ямах и диффузию в барьерных слоях. Получены аналитические выражения для всех активных и реактивных элементов, входящих в ЭС. Сравнение расчетных зависимостей эквивалентной емкости и эквивалентного сопротивления от частоты тестового сигнала с экспериментальными данными по частотным зависимостям эквивалентной емкости и эквивалентного сопротивления позволяет определять численные значения ряда параметров ЭС.

5. Предложен метод профилирования концентрации свободных носителей заряда в гетероструктурах с квантовыми ямами, основанный на низкочастотных измерениях дифференциального сопротивления гетероструктуры от напряжения смещения. Получено аналитическое выражение для профиля концентрации свободных носителей заряда в p-n переходе. Экспериментальные исследования подтвердили возможности метода резистивного профилирования по обнаружению квантовых ям и их особенностей. Проведено экспериментальное сравнение предложенного метода с методом емкостного профилирования, показавшее высокую чувствительность резистивного профилирования к особенностям распределения концентрации свободных носителей заряда в пределах p-n перехода с квантовыми ямами.

6. Методом Фурье – спектроскопии экспериментально установлено, что в фоновом спектре светоизлучающей ГС с КЯ из $\text{In}_{0,12}\text{GaN}_{0,88}/\text{GaN}$ имеются два пика с энергиями $E_1 = 1,93$ эВ и $E_2 = 0,207$ эВ, которые могут быть связаны с захватом носителей заряда квантовыми ямами. Предполагается, что фононы с энергией $E_2 = 0,207$ эВ образуются в результате захвата электронов на второй (верхний) уровень размерного квантования в электронной яме. Последующая релаксация электронов на излучательный уровень сопровождается генерацией фононов с энергией $E_1 = 1,93$ эВ. Построена энергетическая диаграмма квантовой ямы с включением в неё захвата электрона и генерацию фононов.

7. В рамках модели бимолекулярной излучательной рекомбинации Шокли получено аналитическое выражение для интенсивности излучения ГС с КЯ, показавшее возможность её увеличения за счет роста числа захватываемых носителей заряда.

8. Предложена методика составления КЯ комбинированного профиля из прямоугольных и треугольных ям с различными параметрами: глубиной, шириной и наклоном, обеспечивающая уплотнение энергетического спектра в верхней части ямы и тем самым увеличение скорости захвата носителей на энергетические состояния в яме.

9. Предложена методика получения из двух и более прямоугольных ям ямы комбинированного профиля с более плотным энергетическим спектром в верхней части комбинированной ямы. Выведено математическое выражение для расчета интенсивности излучения ГС с КЯ комбинированного профиля. Численные оценки интенсивности излучения в предположении «невзаимодействующих» ям показали возможность роста интенсивности по сравнению с ГС с одиночными (некомбинированными) ямами до несколько раз, определяемых значениями параметров объединяемых квантовых ям.

10. Рассчитан спектр электронных состояний в ямах комбинированного профиля, составленных из двух треугольных ям разной толщины, глубины и наклона. На основании полученного спектра энергии оценен выигрыш в интенсивности излучения, получаемый за счет комбинированного профиля ям на основе InGaN/GaN, оказавшийся равным по величине 5,3 раза для конфигурации профиля «узкая яма – средняя яма – широкая яма». При объединении двух треугольных ям в профиль «широкая яма – узкая яма» выигрыш по интенсивности с ГС треугольного профиля достигает 3,2 раза. Приведённые численные значения выигрыша получены без оптимизации параметров объединяемых ТКЯ, которая может увеличить указанные значения.

11. Предложено практическое применение разработанной методики повышения эффективности излучения гетероструктуры с квантовыми ямами комбинированного профиля при разработке источника белого света по RGB технологии на одном чипе. Ямы комбинированного профиля целесообразно использовать для изготовления источников зеленого и голубого излучения. Для получения красного излучения можно ввести в квантовую яму короткопериодную сверхрешетку.

СТАТЬИ ПО ТЕМЕ ДИСЕРТЦИИ, ОПУБЛИКОВАННЫЕ В ЖУРНАЛАХ ВАК, РИНЦ, WEB OF SCIENCE

Патент на изобретение

1. Патент № 2720046 С1 Российская Федерация, МПК H01L 33/04, H01L 33/32. Светодиодная гетероструктура с квантовыми ямами комбинированного профиля: № 2019123050 заявл. 7.07.2019 : опубл. 17.07.2019 / Давыдов. В.Н., Задорожный О.Ф., Туев В.И [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР). – 15 с

Статьи

1. Davydov V.N. Effect of doping on the luminescent properties of LED heterostructures with quantum wells / V.N. Davydov, **O.F. Zadorozhny**, O.A. Karankevich // Russian Physics Journal. – 2020. – V. 62, N 10. – P. 1770–1778.

Русскоязычный вариант: Давыдов В.Н. Влияние легирования на люминесцентные свойства полупроводников / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный**, О.А. Каранкевич // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т.62, №3. – С.19-25.

2. Davydov V.N. Phonon spectrum of led ingan/gan heterostructure with quantum wells / V.N. Davydov, **O.F. Zadorozhny**, O.A. Karankevich // Russian Physics Journal. – 2021. –V. 64, N 3. – P. 534–538.

Русскоязычный вариант: Давыдов. В.Н. Фоновый спектр led-гетероструктуры InGaN/GaN с квантовыми ямами / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный** // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т.64, №3. – С. 144-147.

3. Davydov V.N. Energy Possibilities of Led Heterostructures with Combined Profile Quantum Wells / V.N. Davydov, **O.F. Zadorozhny** // Russian Physics Journal. –2022. – V.64, N 3. – P. 893–903.

Русскоязычный вариант: Давыдов В.Н. Энергетические возможности светодиодной гетероструктуры с квантовыми ямами комбинированного профиля / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный** // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т.65, №5. – С.119-127.

4. Davydov V. N. Series-parallel equivalent circuit of heterostructure with quantum wells / V. N. Davydov, **O.F. Zadorozhny** // Russian Physics Journal. – 2022. – V.64, N 3. – P. 734-743.

Русскоязычный вариант: Давыдов В.Н. Последовательно-параллельная эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами /

В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный** // Известия вузов. Физика. – 2022. – Т.65, №4. – С.133-142.

5. **Задорожный О.Ф.** Анализ конфигураций пространственного объединённых треугольных Квантовых ям / **О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов** // Вестник НовГУ. Квантовая электроника. – 2022. – № 2. – С.32-40.

6. Давыдов. В.Н. Резистивное профилирование как метод исследования гетероструктур с множественными квантовыми ямами / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный** // Известия вузов. Физика. – 2023. – Т.66, № 2. – С.24 – 32.

ПУБЛИКАЦИИ В СБОРНИКАХ МАТЕРИАЛОВ И ТРУДОВ КОНФЕРЕНЦИЙ

1. **Задорожный О.Ф.** Спектр и мощность излучения прямоугольной и треугольной квантовой ямы / **О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов** // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2018». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч.2. – С. 193-196.

2. **Задорожный О.Ф.** Уровни размерного квантования в квантовых ямах различного профиля / **О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов** // Материалы докладов XIV Международной научно-практической конференций «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2018. – Ч.1. – С. 260-263.

3. **Задорожный О.Ф.** Трехцветные гетероструктуры с управляемым смешением RGB-цветов / **О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов** // Материалы докладов XV Международной научно-практической конференций «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч.2. – С. 16 -18.

4. **Zadorozhny O. F.** Using the heterostructure with staggered QWs for controlled RGB color offset / **O. F. Zadorozhny, V. N. Davydov** //Electronic Devices and Control Systems: XV International Scientific-practical Conference. – Tomsk: V-Spektr, 2019. – Part.2 – P. 235-237.

5. **Zadorozhny O. F.** Triangular quantum well with staggered profile/ **O.F. Zadorozhny, V. N. Davydov** // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019». – Tomsk: V-Spektr, 2019. – Part.4 – P. 104-106.

6. **Задорожный О.Ф.** Моделирование излучательной рекомбинации в гетероструктурах с квантовыми ямами / **О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов,**

О.А Каранкевич // Сборник материалов XV Международного научного конгресса Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск: Изд-во СГУГиГ, 2019. – Т.6, №1. – С 9-15.

7. **Задорожный О.Ф.** Спектр энергии носителей заряда в квантовых ямах комбинированного профиля/ **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов, О.А Каранкевич // Материалы докладов 57-й Международной научной студенческой конференции. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2019. – С.12-16.

8. **Задорожный О.Ф.** Энергетический спектр треугольной квантовой ямы комбинированного профиля / **О.Ф. Задорожный**, В.Н Давыдов // Сборник научных трудов к VIII международная конференция по фотонике и информационной оптике. – Москва: Изд-во «МИФИ», 2019. – С.485-486.

9. **Zadorozhny O.F.** Energy spectrum rectangular quantum well with staggered profile/ O.F. Zadorozhny, V. N. Davydov // Electronic Devices and Control Systems: XVI International Scientific-practical Conference – Tomsk: V-Spektr, 2020. – Part 2. – P. 239 - 242.

10. **Задорожный О.Ф.** Энергетический спектр LED-гетероструктур с квантовыми ямами комбинированного профиля/ **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2020. –Ч.1. – С. 89-92.

11. **Задорожный О.Ф.** Резистивное профилирование как метод исследования гетероструктур с КЯ / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2020. –Ч.1 – С. 96 - 98.

12. **Задорожный О.Ф.** Последовательно-параллельная эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2020. –Ч.1. – С. 93-95.

13. **Задорожный О.Ф.** Расчет параметров элементов последовательно-параллельной эквивалентной схемы гетероструктуры с квантовыми ямами/ **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления». – Томск: В-Спектр, 2021, Ч.1 – С. 82 – 85.

14. **Zadorozhny O.F.** Calculation of serial-parallel equivalent circuit elements of a heterostructure with quantum wells/ **O.F. Zadorozhny**, V. N. Davydov // Electronic Devices and Control Systems: XVII International Scientific-practical Conference. –Tomsk: V-Spektr, 2021. – Part.1 – P. 82 - 85.

15. **Задорожный О.Ф.** Время излучательной рекомбинации с учетом разбаланса концентраций носителей заряда / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Сборник научных трудов IX международной конференции по фотонике и информационной оптики. – Москва: Изд-во МИФИ», 2020. – С. 385-386.

16. **Zadorozhny O.F.** Limiting the number of dimensional quantization levels in rectangular quantum wells / **O.F. Zadorozhny**, V. N. Davydov // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019». – Tomsk: V-Spektr, 2019. – Part.4. – P. 253-254.

17. **Задорожный О.Ф.** Схема излучательной рекомбинации с учетом большого числа носителей заряда в гетероструктурах с квантовыми ямами/ **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Сборник научных трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск: Изд-во ТПУ, 2021. – С 133-135.

18. **Задорожный О.Ф.** Применение квантовыми ямами комбинированного профиля для повышения энергетических возможностей светодиодных гетероструктур / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Сборник научных трудов к XXIII Всероссийской научно-технической конференции СФУ. – Красноярск: Изд-во «Красноярск СФУ», 2022. – С. 341- 346.

Тираж 100 экз. Заказ.
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40.
Тел. (3822) 533018.