

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе и инновациям
Томского государственного университета
систем управления и радиоэлектроники



Иванов, доцент

А. Г. Лощилов

14 » Июня 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN»

В период подготовки диссертации соискатель Задорожный Олег Федорович работал на кафедре электронных приборов «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», в качестве ассистента.

В 2019 году окончил обучение в магистратуре «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» по направлению «Электроника и нанoeлектроника». С 2019 по настоящее время обучается в аспирантуре «Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» на кафедре электронных приборов.

Научный руководитель – Давыдов Валерий Николаевич, доктор физико-математических наук, основное место работы: «Томский государственный университет системы управления и радиоэлектроники» профессор кафедрой электронных приборов.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Оценка выполненной соискателем работы.

Диссертация Задорожного О.Ф. является научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты научных исследований электрофизических и эмиссионных свойств светодиодных гетероструктур на основе барьера InGaN/GaN, которые позволили решить научно-техническую задачу по повышению интенсивности генерируемого

оптического излучения и совершенствовать методы исследования свойств гетероструктуры с квантовыми ямами.

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.

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. 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 .

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые показано, что с увеличением номера уровня размерного квантования (УРК) в квантовых ямах прямоугольного и треугольного профилей выше второго и

третьего соответственно нарушается условия размерного квантования, что ведет к преобразованию/исчезновению уровней с более высокими номерами. Предполагается, что последующие УРК преобразуются в мезазоны разрешенных значений энергий, а для уровней с высшими номерами - к преобразованию в энергетический спектр, подобный спектру 3D полупроводника.

2. 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, а определяется концентрацией неосновных носителей заряда.

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

4. 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.

5. 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, обеспечивающих захват электронов и дырок квантовой ямой.

6. 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 увеличивает интенсивность излучения, но меньше, чем комбинирование прямоугольных квантовых ям.

Практическая значимость полученных результатов

1. Разработана методика комбинирования квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, позволяющая повысить эффективность светоизлучающей гетероструктуры 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 и позволяющая исследовать свойства наноразмерных объектов методами теории электрических цепей.

Личное участие автора в получении результатов проведенных исследований

Личный вклад автора заключается: в совместной с руководителем постановке задач и проведении экспериментальных 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.

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 2014-2022 гг.» 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. Разработанный профиль квантовой ямы, 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 составления комбинируемого профиля из прямоугольных и треугольных квантовых ям, используется в лекционном и практическом циклах курса «Полупроводниковая оптоэлектроника», читаемого магистрам направления 01.04.04 в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность выносимых на защиту теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами исследований других авторов. Результаты работы получены с использованием в экспериментальных исследованиях 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 прошли рецензирование при опубликовании их в научных журналах и выступлениях на научных конференциях различного уровня.

Публикации и выступления на конференциях

По материалам диссертации опубликовано 26 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций, 7 статей в журналах, индексируемых в библиографической базе данных РИНЦ, и 19 публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций. По результатам научных исследований в соавторстве получен один патент РФ на изобретение.

Статьи в журналах, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus (русскоязычные варианты статей индексируются в библиографической базе данных РИНЦ):

1. Davydov V.N. Restriction of a number of levels of dimensional quantization in elements of nanoelectronics / **O.F. Zadorozhny**, O.A. Karankevich // Russian Physics Journal. – 2019. - Vol. 62, No 3. – P. 499–504.

Русскоязычный вариант: Давыдов В.Н. Ограничение числа уровней размерного квантования в элементах нанoeлектроники / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный**, О.А. Каранкевич // Известия вузов. Физика. – 2019. – Т.62, №3. – С. 99-103.

2. 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. – Vol. 62, No. 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.

3. 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. –Vol. 64, No 3. – P. 534–538.

Русскоязычный вариант: Давыдов. В.Н. Фононный спектр led-гетероструктуры InGaN/GaN с квантовыми ямами / В.Н. Давыдов, **О.Ф. Задорожный** // Известия вузов. Физика. – 2021. – Т.64, №3. – С. 145-147.

4. Davydov V.N. Energy Possibilities of Led Heterostructures with Combined Profile Quantum Wells / V.N. Davydov, **O.F. Zadorozhny** // Russian Physics Journal. –2022. – Vol. 64, No. 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.

5. Davydov V.N. Series-parallel equivalent circuit of heterostructure with quantum wells / V.N. Davydov, **O.F. Zadorozhny** // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 64, No. 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.1133-1142.

Статьи, индексируемые в библиографической базе данных РИНЦ:

1. **Задорожный О.Ф.** Анализ конфигураций пространственного объединённых треугольных Квантовых ям / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Вестник НовГУ. Квантовая электроника. – 2022. – № 2. – С.27-30.

2. 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.

Патент на изобретение:

1. Давыдов. В.Н. Задорожный О.Ф Туев В.И. и другие Патент РФ на изобретение: «Светодиодная гетероструктура с квантовыми ямами комбинированного профиля». Дата регистрации: 23.04.2020 № RU2720046C1 20200423.

Материалы международных и всероссийских 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: Из-во «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 Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во «В-Спектр». – 2018. – Ч.1. – С. 260-263.

3. **Задорожный О.Ф.** Трехцветные гетероструктуры с управляемым смещением RGB-цветов / **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XV Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во «В-Спектр». – 2019. Ч.2. – С. 16–18.

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

5. **Zadorozhny O.F.**, Davydov V.N. Triangular quantum well with staggered profile // Сборник научных трудов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2019». – Tomsk: Pub. «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 Международный научный конгресс Магистерская научная сессия «Первые шаги в науке». – Новосибирск: Из-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 доклада 57-я Международная научная студенческая конференция. – 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. **Задорожный О.Ф.** Ограничение числа уровней размерного квантования в квантовых ямах прямоугольной формы/ **О.Ф. Задорожный**, В.Н. Давыдов/ Сборник научных трудов к IX Международная конференция по фотонике и информационной оптике. – Москва: Изд-во «МИФИ». – 2020. – С. 405–406.

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

11. Задорожный О.Ф. Энергетический спектр LED-гетероструктур с квантовыми ямами комбинированного профиля/ О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во «В-Спектр». – 2020. – Ч.1. – С. 89–92.

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

13. Задорожный О.Ф. Последовательно-параллельная эквивалентная схема гетероструктуры с квантовыми ямами / О.Ф. Задорожный, В.Н. Давыдов // Материалы докладов XVI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления». – Томск: Изд-во «В-Спектр». – 2020. – Ч.1. – С. 93–95.

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

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

16. **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 оптике. – Москва: Изд-во «МИФИ». –2020. – С. 385–386

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

18. **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.

19. **Задорожный О.Ф.** Применение квантовых ям 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.

Соответствие содержания диссертации научной специальности

Предмет исследования и материалы диссертационной работы соответствуют специальности 1.3.5 – физическая электроника в области исследования «Твердотельная электроника, в том числе СВЧ-электроника, полупроводниковая электроника, акустоэлектроника, сверхпроводниковая электроника, спиновая электроника, оптоэлектроника, криоэлектроника» (п. 2 паспорта специальности), «Практическое применение физических явлений в твердотельных микро- и нано-структурах, молекулярных структурах и кластерах; проводящих, полупроводниковых и тонких диэлектрических пленках, и покрытиях» (п.4 паспорта специальности).

Диссертация «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN» Задорожного Олега Федоровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 «Физическая электроника».

Заключение принято на заседании научно-технического семинара кафедры Электронных приборов факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томского государственного университета системы управления и радиоэлектроники». Присутствовали на заседании 21 чел. Результаты голосования: «за» - 21 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 2-05-23 от 24 мая 2023 г.

Председатель заседания

д.ф-м.н., зав.каф «Электронных приборов»

ТУСУРа

Буримов Н.И.

Секретарь заседания

ведущий электроник кафедры

«Электронных приборов» ТУСУРа

Бакланова О.А.