

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.415.03, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР),
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 20.12.2023 г. № 239

О присуждении Задорожному Олегу Федоровичу, гражданину Республики Казахстан, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Повышение эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN» по специальности 1.3.5 – «Физическая электроника» принята к защите 17 октября 2023 г. (протокол № 236) диссертационным советом 24.2.415.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР), Министерство науки и высшего образования российской федерации, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, приказ № 1030/нк от 30.12.2013 г.

Соискатель Задорожный Олег Федорович, 2 июля 1993 года рождения, в 2017 году окончил бакалавриат ТУСУРа, в 2019 году окончил магистратуру ТУСУРа по направлению подготовки «Электроника и нанoeлектроника», в 2023 году окончил аспирантуру ТУСУРа. В настоящее время работает инженером Научно-образовательного центра «Нелинейная оптика, нанофотоника и лазерные технологии» (НОЦ НОНЛТ) и по совместительству ассистентом кафедры электронных приборов ТУСУРа.

Диссертация выполнена на кафедре электронных приборов ТУСУРа.

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

Официальные оппоненты:

Авакянц Лев Павлович, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», кафедра общей физики, профессор;

Полисадова Елена Федоровна, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», отделение материаловедения инженерной школы новых производственных технологий (ИШНПТ), профессор, руководитель образовательной программы «Оптотехника», дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО НГТУ)**, г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном Остертаком Д.И., кандидатом технических наук, заведующим кафедрой полупроводниковых приборов и микроэлектроники, и Новиковым И.Л., кандидатом технических наук, ученым секретарем кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники, утвержденном проректором по учебной работе ФГБОУ ВО НГТУ

кандидатом технических наук Отто А.И., указала, что работа соответствует критериям п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013, а её автор, Задорожный Олег Федорович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.5 - «Физическая электроника».

Соискатель имеет по теме диссертации 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.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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, Iss. 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, Iss. 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. 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, Iss. 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, Iss. 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.

На автореферат поступило **6 отзывов, все отзывы положительные:**

1) Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева» Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН), г. Томск, от доктора физ.-мат. наук, заслуженного деятеля науки РФ, главного научного сотрудника **Белова Владимира Васильевича**. В отзыве отмечены следующие недостатки работы: К недостаткам содержательного плана можно отнести отсутствие

экспериментального исследования гетероструктур, изготовленных с квантовыми ямами комбинированного профиля. К недостаткам оформления автореферата можно отнести некоторые неточности в формулировках выводов и заключений преимущественно в литературном обзоре, излишней краткости в формулировке выводов по главам.

2) Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Петрозаводский государственный университет», г. Петрозаводск, от доктора физ.-мат. наук, профессора кафедры физики твердого тела **Гуртова Валерия Алексеевича**. В отзыве отмечаются следующие недостатки работы:

1. В работе не указаны ограничения на величину положительного эффекта от использования в светодиодных гетероструктурах квантовых ям комбинированного профиля, а также на число объединяемых квантовых ям;

2. Отсутствуют экспериментальные данные по исследованию излучающих свойств гетероструктур с ямами комбинированного профиля;

3. Полученное в работе аналитическое выражение по расчету интенсивности излучения квантовой ямы комбинированного профиля не учитывает влияние поля поляризации (спонтанной, пиро- и пьезополяризации), являющейся одной из основных причиной снижения внутренней квантовой эффективности генерации света в материале InGaN, а следовательно, полученный выигрыш в интенсивности комбинированной ямы может оказаться заметно меньше или вообще отсутствовать;

4. При выполнении экспериментальных исследований автор мало внимания уделяет описанию топологии и основных параметров используемых гетероструктур, что отрицательно сказывается на глубине трактовки полученных результатов.

3) Отзыв из Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, от доктора физ.-мат. наук, доцента, профессора кафедры физики твердого тела и микроэлектроники Института электронных и информационных систем **Захарова Максима Анатольевича**. В отзыве отмечаются следующие недостатки работы:

1. В работе отсутствуют экспериментальные данные по исследованию излучающих свойств гетероструктур с ямами комбинированного профиля, полученного объединением квантовых ям только прямоугольного или треугольного профиля, а также комбинацией прямоугольных и треугольных ям.

2. Предложенное в работе аналитическое выражение по расчету интенсивности излучения КЯ не учитывает влияние на скорость излучательной рекомбинации поля пьезополяризации, являющееся одной из основных причин снижения внутренней квантовой эффективности генерации света в InGaN.

4) Отзыв из Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова, г. Санкт-Петербургского, от доктора физ.-мат. наук, профессора кафедры микро- и нанoeлектроники, руководителя Ресурсного Центра «Физика твердого тела» **Зубкова Василия Ивановича**. В отзыве отмечаются следующие недостатки работы:

1. Принципиальный недостаток результатов расчета энергетической структуры, представленных на Рис. 2.7, 8 - использование прямоугольного приближения квантовой ямы. Это типичная ошибка квантовомеханического рассмотрения задачи, когда электрон, находясь в потенциальной яме, не оказывает сам на нее никакого влияния.

2. Автором предложена феноменологическая модель захвата носителей заряда квантовой ямой, основанная на модели рекомбинации Шокли-Рида-Холла (Научная новизна №4). В существующей классической модели Ш-Р-Х для локального центра важное значение имеет поперечное сечение захвата. Для двумерной квантовой ямы такой параметр вводить некорректно, и из автореферата не ясно, как автор решил эту проблему. В ранних публикациях, посвященных исследованиям захвата носителей заряда квантовой ямой, ее характеризовали обычно как Giant trap (гигантская ловушка).

3. Анализируя концентрационные профили, полученные из емкостных и резистивных измерений (Рис. 6), автор заключает, что резистивные профили содержат дополнительные пики. Природа таких пиков не объяснена. Кроме того, вероятно, оси ординат на графиках (а) и (б) перепутаны.

4. Для количественного объяснения зависимости времени жизни носителей заряда в GaN от концентрации, автор привлекает экспериментальные значения времени жизни носителей в GaAs. Данные материалы существенно отличаются кристаллической решеткой и другими основными физическими параметрами. Поэтому приведенные рассуждения следует рассматривать с большой осторожностью.

5) Отзыв из Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики прочности и материаловедения СО РАН», г. Томск, от доктора физ.-мат. наук, профессора, заведующего лабораторией физики поверхностных явлений **Панина Алексея Викторовича**. В отзыве отмечаются следующие недостатки работы:

1. Не ясно, что именно автор называет гиперболической кривой 1 на рис. 1 автореферата.

2. В работе представлены оценки выигрыша в интенсивности излучения, получаемого при объединении прямоугольных или треугольных квантовых ям. Очевидно, что представленные значения будут зависеть от геометрических размеров и состава гетероструктур.

3. В автореферате встречаются ошибки и неточности. В частности, на стр. 12 автореферата ошибочно указано выражение (12).

б) Отзыв из Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, от доктора физ.-мат., профессора кафедры физики полупроводников **Эрвье Юрия Юревича**. В отзыве отмечен следующий недостаток: В качестве небольшого недостатка можно указать на отсутствие в автореферате обсуждения возможностей реального получения (синтеза) предложенных гетероструктур.

Выбор официальных оппонентов доктора физико-математических наук **Авакянца Л.П.** и доктора физико-математических наук **Полисадовой Е.Ф.**, обоснован тем, что они являются специалистами в области физики светоизлучающих гетероструктур, известными своими достижениями и публикациями в указанной области науки. Поэтому они способны объективно оценить положительные и отрицательные стороны диссертационной работы.

Выбор **Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»** в качестве ведущей организации обоснован тем, что сотрудниками кафедры полупроводниковых приборов и микроэлектроники проводятся научные исследования высокого уровня в области, соответствующей тематике диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан метод повышения эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN;

разработан метод резистивного профилирования концентрации свободных носителей заряда в гетероструктурах, основанный на низкочастотных измерениях зависимости дифференциального сопротивления исследуемой структуры от напряжения смещения и позволяющий получить потенциально больше информации о параметрах и процессах в гетероструктуре, чем метод емкостного профилирования;

предложена методика составления комбинированного профиля с более плотным энергетическим спектром в её верхней части, обеспечивающая увеличение числа захватываемых зарядов на уровне размерного квантования.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изучено влияние концентрации легирующей примеси в полупроводнике на скорость излучательной рекомбинации, показавшее возможную смену механизма, описываемого бимолекулярной моделью с доминирующим влиянием концентрации основных носителей на механизм, в котором скорость рекомбинации не зависит от уровня легирования;

создана теоретическая модель резистивного профилирования концентрации свободных носителей заряда в гетероструктурах, основанная на низкочастотных измерениях зависимости дифференциального сопротивления исследуемой структуры от напряжения смещения и потенциально позволяющая получить больше информации о параметрах и процессах в гетероструктуре, чем метод емкостного профилирования;

изложена 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, участвующих в захвате электронов и дырок квантовой ямой;

предложено использование в светодиодных гетероструктурах на основе InGaN/GaN квантовых ям комбинированного профиля из трех прямоугольных ям различного физико-химического состава и ширины. Это позволяет получить выигрыш в интенсивности излучения по сравнению с интенсивностью, генерируемого квантовой ямой прямоугольного профиля. Так для конфигурации профиля «узкая яма – средняя яма - широкая яма» 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 излучения достигает 3,2 раза.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

результаты работы **получены** при выполнении Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 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., годы участия 2018–2019 гг.) в части разработки комбинированного профиля квантовой ямы источника оптического излучения на основе барьера InGaN/GaN;

разработан и защищен патентом РФ на изобретение комбинированный профиль квантовой ямы;

научные результаты диссертационной работы, касающаяся составления эквивалентной схемы светодиодной гетероструктуры с квантовыми ямами и принципа получения комбинированного профиля прямоугольных и треугольных квантовых ям **использованы** в лекционном и практическом циклах курса «Полупроводниковая оптоэлектроника», читаемого магистрант ТУСУРа.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

теоретические расчеты выполнены на основе современных моделей и представлений, используемых в теории 3D полупроводников, а также в низкоразмерных объектах в микро- и оптоэлектронике;

экспериментальные исследования проведены на стандартном оборудовании, поверенном в установленном порядке;

достоверность теоретических и экспериментальных результатов обеспечивается их воспроизводимостью, внутренней непротиворечивостью и согласованностью с результатами исследований других авторов;

результаты работы в процессе их публикации и представления на научных конференциях прошли рецензирование и обсуждение ведущими специалистами в области теории и практики полупроводниковой электроники.

Личный вклад соискателя 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, в разработке методик измерений и проведения расчетов энергетических спектров квантовых ям прямоугольного и треугольного профилей, а также совместных с научным руководителем расчетов интенсивности излучения комбинированных квантовых ям и модели излучательной рекомбинации при высоких уровнях легирования полупроводника.

В ходе защиты диссертации не было высказано критических замечаний.

Соискатель Задорожный Олег Федорович ответил на заданные ему в ходе заседания вопросы.

На заседании 20 декабря 2023 г. диссертационный совет постановил: за решение важной научно-технической задачи по разработке метода повышения эффективности светодиодных источников излучения на основе InGaN/GaN присудить Задорожному Олегу Федоровичу ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 21 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 16, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Заместитель председателя
диссертационного совета




Михайлов Михаил Михайлович

Ученый секретарь
диссертационного совета


Казakov Андрей Викторович

20.12.2023 г.