

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

диссертационного совета 6D.КOA-031 на базе Физико-технического института имени С.У. Умарова, Национальной академии наук Таджикистана по диссертации Алидодова Тутишо Мералишоевича на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 22 апреля 2021 г., протокол №29

о присуждении Алидодову Тутишо Мералишоевичу, гражданину Республики Таджикистан, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация на тему: «Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных гетереоструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния», принята к защите 15 января 2021 г., протокол №26, диссертационным советом 6D.КOA-031 на базе Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана (734063, г. Душанбе, пр. Айни, 299/1), утвержденном приказом ВАК при Президенте Республики Таджикистан (ВАК РТ) от 02 марта 2020 г., № 38.

Соискатель Алидодов Тутишо Мералишоевич, 1957 года рождения, в 1988 году закончил физический факультет Таджикского государственного университета им. В.И. Ленина (ныне ТНУ) по специальности «Физика, преподаватель физики», работает и.о. заведующего лаборатории квантовой электроники Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Диссертация выполнена в лаборатории квантовой электроники Физико-технического института им С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана.

Научные руководители:

- Шохуджаев Нуроншо, работал заведующей кафедрой «Сети связи и системы коммутации» Таджикского Технического университета им. М.С. Осими, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников и диэлектриков».

- **Муминов Хикмат Халимович**, вице президент Национальной академии наук Таджикистана, доктор физико-математических наук, академик Национальной академии наук Таджикистана.

Официальные оппоненты:

1. **Каримов Хасан Сангинович** – доктор физ.-мат. наук, профессор, ведущий научный сотрудник отдела новых технологий ГНУ «Центр инновационного развития науки и новых технологий» НАНТ
2. **Акрамова Рухшона Ятимовна**. – кандидат физико-математических наук, зав. кафедрой общей и теоретической физики Кулябского государственного университета имени А. Рудаки дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Государственное Образовательное Учреждение (ГОУ) «Худжандский государственный университет имени академика Б. Гафурова» дала **положительный отзыв**, подписанный Кадыровым Абдулахадом Лакимовичем, д.ф-м.н. (по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния), профессором кафедры электроники», утвержденный ректором ГОУ «Худжандский государственный университет имени академика Б. Гафурова» д.т.н, профессором Чӯразода Чамшедом Ҳабибулло. Ведущей организацией отмечено, что диссертационная работа Алидодова Тутишо Мералишоевича на тему «Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных гетереоструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам» является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему.

Автореферат и публикации правильно и достаточно полно отражают содержание диссертационной работы.

Соискатель имеет 13 опубликованных работ, в том числе 7 статей, опубликованных в рецензируемых научных изданиях и 6 тезисов докладов в материалах международных и республиканских конференций.

Наиболее значимыми работами, опубликованными в рецензируемых научных изданиях, являются:

1. Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов**, И. Исмоилов. Определение диффузионной длины носителей в InP по излучательным характеристикам гетероструктур GaInAsP/InP/ Н. Шохуджаев, // ГАИ. ҚТ. -1999. -қ. 42. -№9. -с. 50-55.
2. Н. Шохуджаев, И. Исмоилов, К. Кабутов, **Т.М. Алидодов**. Повышение эффективности вывода излучения с торца светоизлучательных диодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP путём их селективного химического травления // ГАИ. ҚТ. -2001. -қ. 44. -№9-10. -с. 63-67.

3. Н. Шохуджаев, Т.М. Алидодов. Об определении упругих напряжений в гетероструктурах GaInAsP/InP с ультратонкой активной областью по поляризации излучения // ГАИ. ЦТ. -2002. -ч. 45. -№9. -с. 61-66.
4. К. Кабутов, Н. Шохуджаев, И. Исмоилов, Т.М. Алидодов. Устройства для управления длины волны излучения лазерных диодов // ГАИ. ЦТ. - 2003. -ч. 46. -№9. -с. 12-17.
5. Т.М. Алидодов, К. Кабутов, С.И. Рахимова. Исследование стабилизации частоты лазерных диодов на GaInAsP/InP используемые в системе оптической связи// ГАИ ЦТ. -2003. -ч. 46. -№10. -с. 70-75.
6. Т.М. Алидодов, Х.Ш.Абдулов, Х.Х.Муминов. Расчёт внутреннего напряжения в многослойных гетероструктурах на основе GaInAsP/InP // Ахб. АИ. ЦТ. -2018. -№1(170). -с. 49-56.
7. Алидодов, Т.М., Х.Х. Муминов. Методика определения и расчёта внутреннего напряжения в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP // Ахб. АИ. ЦТ. -2018. -№1(170). -с. 49-56.

В официальном отзыве ведущей организации отмечается, что в целом диссертационная работа заслуживает высокой оценки. В то же время, в отзыве ведущей организации сделаны следующие замечания:

1. Отсутствие рассмотрения вопроса об оптимизации напряжённого состояния в структурах заращённой мезополосковой конструкции и структурах с каналом в подложке как наиболее перспективных для получения низкопороговых лазеров на основе GaInPAs/InP.
2. Также имело бы смысл рассмотрение обратной задачи: изменения напряжённого состояния с температурой в структурах с исходным рассогласованием решёток сопрягаемых материалов с целью возможного объяснения температурной зависимости порогового тока и квантовой эффективности.

Как отмечено в отзыве, высказанные замечания ни в коей мере не умаляют в целом научной ценности, теоретической и практической значимости диссертационного исследования и не влияют на общую положительную оценку работы.

Отзыв официального оппонента, доктора физ.-мат. наук, профессора Каримова Хасана Сангиновича. Отзыв положительный. Имеются замечания по результатам исследования:

1. Слишком описательный стиль отдельных разделов диссертации. Прежде всего, это касается исследования влияния переходных слоев в активной области на излучательные свойства и порог генерации (§ 1.6, 1.8) и методики получения гетероструктур (§ 2.1).

2. Влияние переходных слоев на спектр излучения и оценка размеров этих слоев из спектра излучения показаны неубедительно.
3. Следует отметить также, что рисунки, помещенные в диссертации, затрудняют чтение и понимание, вследствие того что все пояснения к ним даны не в подписях под рисунками. Сделанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы.

Отзыв официального оппонента, к.ф.-м.н., доцента Акрамовой Рухшоны. Отзыв положительный. Есть две замечания по результатам исследования:

1. В диссертации приведён большой по объёму литературный обзор, но меньше всего уделено внимание правилу отбора при межзонного перехода в квантово-размерных слоях и влиянию внутренних напряжений на излучательные характеристики лазерных диодов.
2. В четвёртой главе диссертации пункт 4.1 повторяет некоторые моменты пункта 1.6 первой главы.

Высказанные замечания несколько не умаляют научную и практическую ценность диссертации.

На автореферат диссертации поступило 6 положительных отзывов от:

Заведующего лабораторией Теплофизики многофазных систем Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова АН РУз, доктора физико-математических наук **Ф.Р. Ахмеджанова. Имеются замечания:**

1. На рисунке 2(стр.13 автореферата) следовало бы указать, что по оси ординат отложены не сами значения затухания, а логарифмы этих величин.
2. В выводе 3 (стр. 22 автореферата) не показаны границы применения системы температурной стабилизации лазерных диодов. Желательно было привести оценку эффективности системы температурной стабилизации частоты излучения лазерных диодов в волоконно-оптической системе связи.

Доцента кафедры общей физики и твердого тела ГОУ «ХГУ им. академика Б.Г. Гафурова» **Х. Гафурова. Имеются замечания:**

1. На рисунке 2 приводятся конкретные цифры для показателя затухания лазерного диода, но нет информации о том, для какой концентрации примесей получены эти величины.

2. Следовало бы дать более подробное описание для приведённых формул двух различных методов расчёта величины энергетического расщепления верхушки валентной зоны в квантово-размерных слоях.

Профессора кафедры «Радиотехники, электроники и телекоммуникации», Казахского агротехнического университета им. С.Сейфуллина, д.ф.-м.н. **А.С. Ногай, имеются замечания:**

1. На первый взгляд, как мне показалось, нет чёткой грани между тем, что сделано до начала исследования и тем, что получено новшество в результате исследования.
2. Некоторые моменты обзорной части диссертации повторяются в части полученных результатов четвертой главы, относящейся к вопросу о расщеплении верхушки валентной зоны.

Кандидата физико-математических наук, зав. кафедрой «Физическая электроника» Таджикского национального университета **Р.Б. Хамрокулова. Замечания: не имеются.**

Кандидата физико-математических наук, доцента, старшего научного сотрудника лаб. Физики прочности твердых тел ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН **Махмудова Хайрулло Файзуллоевича. Имеются замечания:**

1. К недостаткам автореферата можно отнести порой чрезмерную, на мой взгляд, краткость автора в некоторых важных моментах. В частности, постановку задач разделов 1 и 2 главы 3, автор посчитал достаточным представить только соответствующими рисунками 1-3. Конечно, из этих рисунков можно понять, как именно решаются задачи, но короткое описание ее постановки, в подписях под рисунками или тексте, все-таки нужны.
2. Аналогичное замечание можно сделать в той части раздела 1 главы 4, в которой обсуждается методика расчёта упругих напряжений в активном слое толщиной $d \geq 0,1 \mu\text{м}$ на основе гетероструктур GaInAsP/InP. Для сравнения целесообразно было бы привести хотя бы ещё один спектр электролюминесценции другого лазерного диода с деформацией растяжения по данной плоскости.

Кандидата технических наук, Зав. кафедрой «Теоретические основы радио и электротехники» Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими **С.Т. Исмоилова. Существенных замечаний к автореферату не имеется.**

Однако, указанные замечания никоим образом не снижают высокую оценку научных результатов, полученных в ходе исследования.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они являются ведущими специалистами в области физики полупроводников, конденсированного состояния и т.д.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

-выявлены значимые факторы, влияющие на эффективность излучения лазерных диодов на основе гетероструктуры GaInPAs/InP, разработаны методы оптимизации их излучательных характеристик;

-определен вклад упругого напряжения, возникающего в гетероструктурах GaInPAs/InP из-за несоответствия параметров кристаллических решеток подложки параметрам сопрягаемых слоев, влияющего на излучательные характеристики лазерных диодов;

-разработана методика и алгоритм расчета упругих напряжений в толстых и квантово-размерных структурах лазерных диодов на основе гетероструктуры GaInPAs/InP.

Автором наиболее широко **использовались** следующие величины:

1. Диффузионная длина носителей заряда в InP;
2. Внешняя квантовая эффективность;
3. Температурная стабилизация частоты излучения лазерных диодов;
4. Управление длиной волны излучения лазерных диодов;
5. Определения упругих напряжений в активном слое;
6. Упругие напряжения в квантово-размерных гетероструктурах.

Предложено, что

1. диффузионная длина L носителей сильно зависит от уровня легирования, причем с ростом последнего диффузионная длина L уменьшается как для электронов, так и для дырок.
2. **Получен** относительный рост внешнего квантового выхода излучения светоизлучающих диодов (СИД) на основе гетероструктур GaInAsP/InP путем их селективного химического травления.
3. **Показана** возможность изменения длины волны излучения и стабилизации частоты лазера при помощи микрохолодильника на основе элемента Пельтье, что еще больше расширяет область использования полупроводниковых лазеров.
4. **Определена** зависимость длины волны излучения лазерного диода от величины одноосного давления.

5. Определён вклад поляризационно-размерного эффекта при толщине активной области меньше 0,1мкм и разработана методика расчета величины упругих напряжений.

6. Разработана модель лазерного диода и методика расчета внутренних напряжений в многослойных гетероструктурах на основе GaInAsP/InP. На основе разработанной модели произведены численные расчеты внутренних напряжений в гетероструктурах на основе GaInAsP/InP с различной толщиной активного слоя.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что в ней разработана теоретическая модель и произведены численные расчеты упругих напряжений в активном слое с толщиной слоя больше 0,1мкм и в квантово-размерных структурах активного слоя. Произведенные расчёты позволяют оптимизировать излучательные характеристики лазерных диодов и их производство с заранее заданными параметрами.

Практическая значимость работы состоит в том, что оптимизация характеристик лазерного излучения, обеспечение термостабилизации частоты излучения, стабилизация и плавная перестройка длины волны излучения способны обеспечить надёжность оптической системы связи, сокращая число регенерационных пунктов, что в свою очередь, приводит к экономии средств и уменьшению затрат при создании волоконно-оптических линий связи.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработана методика определения диффузионной длины для дырок в структурах $pInP-n^0InP$ и электронов в $-pInP$ гетероструктурах $pInP-n^0InP-nGaInAsP-nInP$ по спектру электролюминесценции.
2. Получение и исследование СИД на основе двухсторонних гетероструктур (ДГС) GaInAsP/InP плоской и мезополосковой конструкции сферической или полусферической геометрии активного излучающего слоя у торца диода.
3. Экспериментальное исследование температурной стабилизации частоты лазерных диодов на GaInAsP/InP используемых в системах оптической связи.
4. Предложено оригинальное малогабаритное устройство для плавной перестройки длины волны излучения полупроводникового лазера и получены на этом устройстве результаты исследования лазерных диодов на основе двусторонних гетероструктур (ДГС) GaInAsP/InP при одноосном сжатии.
5. Разработанная методика определения упругих напряжений в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP по поляризации излучения.

6. Исследованные спектры степени линейной поляризации спонтанного излучения квантово-размерных гетеродиодов на основе нескольких партий гетероструктур GaInAsP/InP и рассчитанные на основе поляризационной методики величины внутренних напряжений в активном слое.
7. Разработанная модель четырехслойного лазерного диода на основе гетероструктур GaInAsP/InP и алгоритм расчета внутренних напряжений в эпитаксиальных слоях.

Достоверность результатов основана на использовании стандартных методик, тщательной калибровке измерительной аппаратуры, хорошей воспроизводимости результатов при измерении большего количества образцов, соответствии экспериментальных результатов расчётным данным.

Личный вклад автора. Непосредственное участие в постановке задач и планировании исследований, в проведении экспериментальных исследований, включающее измерения и расчеты, владение техникой эксперимента. Анализ и интерпретацию полученных результатов, их подготовку к публикации в виде научных тезисов и статей, обсужденных совместно с научными руководителями.

Публикации. Результаты научных исследований отражены в 13 печатных работах, из которых 7 статей напечатаны в научных журналах, входящих в перечень, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан. 6 докладов опубликованы в Материалах Международных и Республиканских конференций. Проведенные исследования входили в тематику научно-исследовательских работ лаборатории Квантовой электроники и отражены в двух пятилетних отчетах за 1996 – 2000 год (ФТИ АН РТ, гос. рег. № 000000364), 2001-2005 год (ФТИ АН РТ, гос. рег. № 000000 957).

В целом диссертация Алидодова Тутишо Мералишоевича на тему «Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных гетереоструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 - «Физика конденсированного состояния», является завершённой научно-исследовательской работой. Представляет большой научный и практический интерес. Полученные в диссертации Алидодова Т.М. результаты являются новыми, имеют большое научное и практическое значение. Следует отметить оригинальность результатов энергетического спектра электронов и ширине запрещенной зоны GaInPAs/InP, полученных в диссертации путем изучения спектров оптического поглощения и люминесценции, в зависимости от

состава и толщины активного слоя. Практически важный результат диссертации - разработка методики расчета внутреннего напряжения в активном слое, при толщине слоя больше 0,1 мкм и меньше 0,1 мкм, где начинает проявляться размерный эффект квантования. Он был получен благодаря экспериментальным исследованиям спектров электролюминесценции и их численному теоретическому анализу.

Достоверность полученных в диссертационной работе теоретических результатов подтверждается сравнением результатов численного моделирования с экспериментально измеренными данными, а также с аналитическими результатами.

Автореферат написан ясными русским и таджикским языками, имеет хорошую структуру и достаточно полно описывает полученные результаты.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалифицированную работу на актуальную тему, которая соответствует критериям, установленным «Положением о порядке присуждения учёных степеней» ВАК при Президенте Республики Таджикистан, утверждённым Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 26 ноября 2016 г. за №505, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Диссертационная работа, как по объёму, так и по содержанию полностью удовлетворяет всем требованиям ВАК при Президенте Республики Таджикистан, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Т.М. Алидодов, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

На заседании от 22 апреля 2021 г. диссертационный совет принял решение присудить Алидодову Тутишо Мералишоевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 5 докторов наук по специальности – 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния» и 1 кандидат наук, участвовавших в заседании, проголосовали: за 15, против 0, недействительных бюллетеней голосования нет.

Председатель

диссертационного совета 6D.KOA-031,

д.ф.-м.н., профессор

С.Ф. Абдуллоев

Исполняющий обязанности ученого

секретаря диссертационного совета 6D.KOA-031,

кандидат физико-математических наук, в.н.с.

Ф. Шокир