

**«Утверждаю»**  
**Ректор ГОУ «Худжандский государственный**  
**университет имени академика Бободжона Гафурова»**  
 **Джуразода Д.Х.**  
» \_\_\_\_\_ **2021**



### **Отзыв**

ведущей организации ГОУ ХГУ им. академика Б. Гафурова на диссертацию  
Алидодова Тутишо Мералишоевича  
«Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных  
гетероструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам»,  
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.07 – физика  
конденсированного состояния.

До настоящего время в мире интенсивно ведутся работы по созданию оптоэлектронных приборов для спектрального диапазона 1,0 – 1,6 мкм, включающего практически важные длины волны: 1,06 мкм (имитация излучения мощных твердотельных лазеров), 1,3 и 1,5 мкм (окно прозрачности с минимальными потерями и нулевой материальной дисперсией в волоконных световодах). Материальной базой для создания источников излучения на этот спектральный диапазон являются 4-х компонентные твёрдые растворы GaInPAs/InP.

Диссертационная работа Т.М. Алидодова посвящена важной с практической точки зрения, конкретной проблеме – исследованию взаимосвязи излучательных характеристик GaInPAs/InP лазеров с возникающих в них остаточных напряжений.

**Целью работы** является исследование возможности улучшения излучательных характеристик двусторонних гетероструктур (ДГС) на основе GaInPAs/InP путём оптимизации внутренних напряжений в эпитаксиальных слоях при 300 К с длиной волны излучения от 1,0 до 1,6 мкм.

**Актуальность работы** определяется тем, что она направлена на поиск путей получения лазеров с улучшенными характеристиками, т.к. сильная температурная зависимость, пороговый ток и эффективный квантовый выход в лазерах на основе GaInPAs/InP затрудняет получение CW- лазеров (непрерывной волны) и создаёт дополнительные препятствия для их практического применения. Кроме того вопрос оптимального согласования постоянных решёток наведённых остаточных напряжений при изготовлении в лазерах на GaInPAs/InP ещё не достаточно хорошо изучен. В этом смысле работа Алидодова Т.М. своевременна и представляет научный и практический интерес.

В работе использован поляризационный метод определения напряжённого состояния лазерных гетероструктур, основанный на спектральной зависимости степени линейной поляризации спонтанного и

стимулированного излучения. Применение этого метода позволило изучить взаимосвязь напряжений и излучательных характеристик лазеров, классифицировать их по степени преимущественной поляризации излучения, прогнозировать и объяснить разброс излучательных характеристик, включая температурную зависимость изменения длины волны.

В диссертационной работе большое внимание уделено изучению низкопороговых ДГС на длину волны излучения  $\lambda = 1,0 - 1,6$  мкм с целью создания коротковолновых и длинноволновых лазеров, применяемых в качестве имитаторов мощного неодимового лазера и источников излучения в волокну-оптических линиях связи (ВОЛС).

### **Объём и структура диссертации**

Диссертационная работа Алидодова Т.М. состоит из введения, четырёх глав основного текста, основных результатов и выводов. Содержание работы изложено на 121 страницах, включая 32 рисунка, 8 таблиц и списка цитируемой литературы из 114 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные решаемые задачи, показана научная новизна и практическая значимость результатов исследования, выносимых на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ, соответствующих теме диссертаций.

**Вторая глава** посвящена методическим вопросам. Коротко описаны электрофизические характеристики исходных структур, методика получения излучающих структур и измерение их характеристик.

**В третьей главе** приведены и обсуждаются полученные экспериментальные результаты исследований электрофизических характеристик лазерных диодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP по улучшению их излучательных характеристик. Наиболее важными из них являются: получение относительного роста внешнего квантового выхода излучения лазерных диодов путём селективного химического травления; возможность изменения длины волны излучения и стабилизации частоты лазера на основе элемента Пельтье, что ещё больше расширяет область использования полупроводниковых лазеров; определение зависимости длины волны излучения лазерного диода от величины одноосного давления.

**В четвёртой главе** более подробно приводятся методики определения внутренних напряжений и несоответствие параметров решёток из анализа спектральной зависимости степени линейной поляризации спонтанного излучения. Из представленных результатов четвёртой главы наиболее важным, на наш взгляд, является то, что для оптимизации внутренних характеристик лазерной активной среды в системе GaInPAs/InP целесообразно иметь некоторый уровень упругой деформации активного слоя. Также особо важным результатом является модельный расчёт упругого

напряжения, который позволяет оптимизировать конструкцию лазера и повысить эффективность проектирования инжекционных лазеров для ВОЛС.

Приведённые в заключении выводы обоснованы и логически вытекают из результатов исследований. Полученные экспериментальные данные соответствуют целям и задачам диссертационной работы.

### **Научная новизна**

К наиболее значимым результатам, полученным в диссертации Алиева Т.М. и имеющим несомненную научную новизну, можно отнести следующие:

1. **Разработана** методика определения диффузионной длины электронов и дырок в структурах  $pInP-n^0InP-nGaInAsP-nInP$  по спектру электролюминесценции.

2. **Показано**, что диффузионная длина  $L$  носителей сильно зависит от уровня легирования, причём с ростом последнего диффузионная длина  $L$  уменьшается как для электронов, так и для дырок.

3. **Получен** относительный рост внешнего квантового выхода излучения светоизлучающих диодов (СИД) на основе гетероструктур GaInAsP/InP путём их селективного химического травления.

4. **Показана** возможность изменения длины волны излучения и стабилизации частоты лазера при помощи микрохолодильника на основе элемента Пельтье, что ещё больше расширяет область использования полупроводниковых лазеров.

5. **Определена** зависимость длины волны излучения лазерного диода от величины одноосного давления.

6. **Исследована** спектральная зависимость степени линейной поляризации спонтанного излучения гетеродиодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP, рассчитаны величины внутреннего напряжения в активном слое.

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

8. **Разработана** модель лазерного диода и методика расчёта внутренних напряжений в многослойных гетероструктурах на основе GaInAsP/InP. На основе разработанной модели произведены численные расчёты внутренних напряжений в гетероструктурах на основе GaInAsP/InP с различной толщиной активного слоя.

### **Практическая значимость и научная ценность работы:**

Практически важным результатом является экспериментально установленный факт, что путём оптимизации напряжённого состояния активной области (за счёт введения заданного рассогласования периодов



решёток или внешнего одноосного давления), можно улучшить излучательные характеристики (увеличить  $\eta_d$  до 1,5 – 2 раз, снизить  $I_{\text{пор}}$  на 20 – 30%, осуществить спектральную перестройку в пределах 15 мэВ и увеличить параметр чувствительности  $I_{\text{пор}}$  к температуре  $T_0$  до 1,5 – 2 раз) с сохранением практически неизменных ресурсных свойств.

В научном плане представляет интерес теоретическое рассмотрение механизмов влияния деформации на излучательные характеристики лазеров на основе модели перестройки и расщепления структуры валентных подзон, а также заполнение их носителями тока.

Научно-практическая значимость работы, на наш взгляд, заключается в том что, во первых, 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 ВОЛС.

Во вторых модельный расчёт упругого напряжения позволяет оптимизировать конструкцию лазера и повысить эффективность проектирования инжекционных лазеров для ВОЛС, а также приборов для считывания или записи информации, накачки твердотельных лазеров и других устройств, составляющих основу современной оптоэлектронной техники.

### **Обоснованность и достоверность основных результатов и рекомендаций, сформулированных в работе**

Достоверность полученных результатов подтверждаются их аргументированным обоснованием на основе экспериментальных данных, а также предложенных автором физических предпосылок.

Работа выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты представляют практический интерес, а обсуждаемые в ней механизмы влияния одноосного деформации смогли служить опорной точкой для построения теоретической модели расчёта внутренних напряжений в эпитаксиальных слоях гетероструктуры GaInPAs/InP.

Научные выводы и практические рекомендации, сформулированные в автореферате, характеризуются аргументированностью, чёткостью изложения.

### **Публикация основных результатов работы**

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. Проведённые исследования входили в тематику научно-исследовательских работ лаборатории квантовой электроники и отражены в двух пятилетних отчётах за 1996 – 2000 год (ФТИ АН РТ, гос. рег. № 000000364) и за 2001-2005 год (ФТИ АН РТ, гос. рег. № 000000 957).

### **Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования**

Полученные диссертантом научно-практические результаты в третьей главы диссертационной работы, разработанные им методики, подготовленные методические и практические рекомендации могут быть использованы в практической деятельности ряд предприятий по выпуску оптоэлектронного оборудования и приборов.

Моделирование и численные расчёты внутренних напряжений в активном слое гетероструктур на основе GaInPAs/InP, представленные в четвертой главе диссертации, имеют научно-теоретическое значение по оптимизацию излучательных параметров светоизлучающих диодов и фотопреобразователей солнечной энергии.

Отдельные результаты научного исследования могут использоваться при разработке учебно-методических материалов в образовательном процессе вузов, готовящих специалистов для радиоэлектронной промышленности, научно-исследовательских институтов, а также имеет возможность использования в коммерческих целях.

Результаты диссертации представляют интерес для следующих организаций: НПО «Полюс», предприятие п/я Г-446 Гиредмет Российской Федерации и другие.

### **Замечания по диссертационной работе**

К числу недостатков диссертационной работы следуют отнести:

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.

Высказанные замечания ни в коем мере не умаляют в целом научной ценности, теоретической и практической значимости диссертационного исследования и не влияют на общую положительную оценку работы.

## Заключение

Следует отметить, что обсуждаемая диссертация является одной из первых в Республике Таджикистан систематических исследований влияния одноосной деформации и остаточного напряжения активного слоя на излучательные характеристики GaInPAs/InP лазеров.

Основные результаты работы достаточно полно опубликованы в научной печати и известны специалистами в этой области. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

В целом диссертационная работа Алидодова Т.М. является законченным научным трудом, в котором разработаны теоретические положения и получены экспериментальные результаты, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

По своему объёму, актуальности, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Алидодова Т. М. на тему «Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных гетероструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам» полностью соответствует требованиям, предъявляемым ВАК при Президенте Республики Таджикистан к диссертациям, представленным на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния, а её автор, Алидодов Тутишо Мералишоевич заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

Отзыв составлен доктором физико-математических наук, профессором Кадыровым А.Л. Он обсуждался и был одобрен на заседании расширенного семинара кафедры электроники «ГОУ Худжандский государственный университет имени академика Бободжона» Гафурова 3 февраля 2021 года, протокол № 5.

Профессор кафедры электроники  
ГОУ «ХГУ имени академика Б. Гафурова»,  
доктор физико-математических наук

А.Л. Кадыров

Подпись профессора Кадырова А.Л. заверяю:  
Начальник ОК ГОУ ХГУ им. ак. Б. Гафурова



З.Н. Ашрапова

ГОУ ХГУ имени академика Бободжона Гафурова,  
735700, Республика Таджикистан, г. Худжанд,  
проезд Мавлонбекова 1

<https://www.hgu.tj> (992-3422) 6-52-73

E-mail [abdulakhatkadirov@gmail.com](mailto:abdulakhatkadirov@gmail.com)