

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. С.У. УМАРОВА**

На правах рукописи

УДК 621.315.592

АЛИДОДОВ ТУТИШО МЕРАЛИШОЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ
ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ НА ОСНОВЕ ДВОЙНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР GaInAsP/InP ПО ИХ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫМ
ХАРАКТЕРИСТИКАМ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.04.07 – «Физика конденсированного состояния»**

Душанбе – 2020

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

Научные руководители: **Шохуджаев Нуроншо**

кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Сети связи и системы
коммутации» ТГУ им. М.С. Осими

Муминов Хикмат Халимович

доктор физико-математических наук,
академик НАНТ, вице-президент НАНТ

**Официальные
оппоненты:**

Каримов Хасан Сангинович - доктор
физико-математических наук, в.н.с. отдела
новых технологий ГНУ «Центр
инновационного развития науки и новых
технологий» при НАНТ

Акрамова Рухшона Ятимовна – кандидата
физико-математических наук, зав. кафедрой общей
и теоретической физики Кулябского государственного
университета имени А.Рудаки.

Ведущая организация:

ГОУ Худжандский государственный
университет имени академика Б.Г. Гафурова

Защита состоится 22 апреля 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 6D.KOA-031 при Физико-техническом институте Национальной академии наук Таджикистана по адресу: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Айни 299/1, факс (+992-372)25-79-14. Зал заседаний Учёного совета ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ.

Отзывы направлять по адресу: 734063, Республика Таджикистан, г. Душанбе, проспект Айни, 299/1, ФТИ им. С.У. Умарова НАНТ, диссертационный совет 6D.KOA-031. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана и на сайте www.phti.tj.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

**Учёный секретарь
диссертационного совета,**

кандидат технических наук, с. н. с.



К. Кабутов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТ

Актуальность работы. С момента начала создания, производства и эксплуатации материалов и приборов на основе твёрдых четверных растворов GaInAsP/InP значительное внимание уделялось основным электрофизическим и спектральным параметрам, таким как пороговый ток, квантовый выход, степень линейной поляризации и температурной зависимости этих параметров.

Процесс изготовления, изучения, исследования и практического применения светоизлучающих диодов на основе четверных твёрдых растворов двойных гетероструктур GaInAsP/InP требует от экспериментатора существенных усилий по улучшению их излучательных характеристик. Проведённые разработки и исследования гетероструктур в ФТИ им. С.У. Умарова(Таджикистан), изучение опыта аналогичных работ в ФИАНе им. П.Н. Лебедева и ФТИ им. А.Ф. Иоффе (Россия), и работ зарубежных исследователей, а также полученные практические знания при эксплуатации системы оптической связи на базе ИКМ-120 позволили выявить некоторые особенности, которые не были выявлены и учтены в должной мере до настоящего времени в публикациях по выбранной тематике.

Как нам известно, существуют 3 окна прозрачности кварцевого световолокна для оптического излучения: в диапазоне 0,8мкм – 1-е окно, 1,3мкм – 2 –е окно и 1,55мкм – 3-е окно прозрачности. В оптических линиях связи в основном используют диапазоны 1,3мкм и 1,55мкм из-за минимальных потерь (0,5 Дб/км и 0,18 Дб/км, соответственно) в кварцевом световолокне. Основными светоизлучающими приборами в этих диапазонах являются светоизлучающие и лазерные диоды, изготовленные на основе гетероструктур GaInAsP/InP. Существует ряд факторов, воздействие которых приводит к значительному изменению длины волны излучения в ту или иную сторону. Изменение длины волны приводит к

рассогласованию сигнала синхронизации между приёмником и передатчиком, в конечном счёте - к потере связи. Наиболее значимыми факторами, приводящими к изменению длины волны излучения, являются: во-первых, погрешности при изготовлении светоизлучающих диодов; во-вторых - вариации температуры; в - третьих, изменения внешнего давления; в – четвертых, влияние остаточного механического напряжения, возникающего из-за несовпадения параметров решётки в эпитаксиальных слоях гетероструктур. Суммарное воздействие вышеперечисленных факторов приводит к изменению длины волны и выходу за пределами окна прозрачности. Минимизация влияния этих воздействий увеличивает длину пролёта в оптической системе связи, что, в свою очередь, сокращает число регенераторов и приводит к экономии ресурсов. Устранение перечисленных выше факторов является научно-технической задачей, решение которой позволит повысить эффективность систем связи и обеспечить их надёжность.

Эти и ряд других проблем, представленных в данной работе, пути их решения, несомненно, подчёркивают обоснованность темы и позволяют считать тему диссертации актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Целью данной работы являются: 1) - повышение эффективности излучения лазерных диодов на основе двухсторонних гетероструктур GaInAsP/InP и 2) - исследование влияния внутренних напряжений на их излучательные характеристики.

Для достижения поставленной цели решены следующие **задачи**:

1. Определение диффузионной длины носителей заряда в структуре InP.
2. Разработка методики повышения вывода излучения из торца лазерного диода путём химического травления.
3. Экспериментальные исследования температурной стабилизации частоты излучения лазерных диодов в оптической системе связи.

4. Исследование процесс перестройки длины волны излучения полупроводниковых лазерных диодов на основе двусторонних гетероструктур GaInAsP/InP при одноосном сжатии.
5. Разработка методики определения упругих напряжений в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP по поляризации излучения.
6. Определение упругих напряжений в квантово-размерных гетероструктурах GaInAsP/InP по поляризации излучения.
7. Расчёт внутренних напряжений в многослойных гетероструктурах GaInAsP/InP.

Объектами исследования являются инжекционные лазерные диоды на основе двусторонних гетероструктур GaInAsP/InP.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы квантовой электроники и математические методы линейной алгебры. Экспериментальные исследования проводились с использованием стандартных методик измерения электрических и оптических свойств, и статистической обработки полученных данных. Спектральный анализ проводился по люминесцентной и поляризационной методике.

Научная новизна.

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.

Научно-практическая значимость работы:

1. 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.
2. Модельный расчёт упругого напряжения позволяет оптимизировать конструкцию лазера и повысить эффективность проектирования инжекционных лазеров для волоконно-оптических линий связи, а также приборов для считывания или записи информации, накачки твердотельных лазеров и других устройств, составляющих основу современной оптоэлектронной техники.

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. Рассчитаны значения диффузионной длины для дырок и электронов, соответственно, в n^0InP и $pInP$.
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. Формирование сферической или полусферической формы путём травления заготовки или иголки для заготовки диодов также травлением селективным химическим травителем железосинеродистого калия - гидроокись калия.
3. Экспериментальное исследование температурной стабилизации частоты лазерных диодов на GaInAsP/InP используемых в системах оптической связи. Исследование изменения затухания излучения по линии в зависимости от изменения температуры кристалла диода.
4. Предложено оригинальное малогабаритное устройство для плавной перестройки длины волны излучения полупроводникового лазера и получение 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 четырёхслойного лазерного диода на основе гетероструктур GaInAsP/InP и алгоритм расчёта внутренних напряжений в эпитаксиальных слоях.

Достоверность результатов основана на использовании стандартных методик, тщательной калибровки измерительной аппаратуры, хорошей воспроизводимости результатов при измерении большего количества образцов, соответствии экспериментальных результатов с расчётными данными.

Личный вклад автора. Непосредственное участие в постановке задач и планировании исследований, в проведении экспериментальных исследований, включающий измерения и расчёты, в владение технической экспериментальной установкой. Анализ и интерпретацию полученных результатов, их подготовка к публикации в виде научных тезисов и статей обсуждённые совместно с научными руководителями.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международной конференции, посвящённой «16-сессии Верховного Совета РТ и ее значение в развитии науки и образования», ТТУ им. академика М.С. Осими, (Душанбе, 27-28 сентября 2002 г.), Международной конференции «Физика конденсированного состояния и экологических систем», ФТИ АН РТ (Душанбе, 5-6 октября 2004 г.), Научно- практической конференции «Современные проблемы физики и астрофизики, ТГНУ (Душанбе, 25-26 ноября 2005 г.), на II-ой международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в 21-веке», посвящённой 50-летию ТТУ им. академика М.С. Осими, (Душанбе, ноябрь 2006), VIII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования», ТТУ им. академика М.С. Осими, (Душанбе, 3-4 ноября 2016 г.).

Публикация. 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), 2001-2005 год (ФТИ АН РТ, гос. рег. № 000000 957).

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключение и выводов. Содержание работы изложено на 121 страницах, включая 32 – рисунка, 8 – таблиц и список литературы, состоящий из 114 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основная цель и задачи, показана научная новизна, практическая ценность и даны положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору литературных данных, необходимых для обсуждения полученных в диссертации результатов. Рассмотрены физические и излучательные свойства приборов на основе твердых растворов гетероструктур GaInAsP/InP. В этой главе дана краткая характеристика системы твердых растворов GaInAsP/InP, условия изопериодического замещения для подложки InP, вопросы легирования донорными и акцепторными примесями. Обсуждены вопросы определения диффузионной длины носителей заряда, возможности повышения внешнего квантового выхода, способы термостабилизации и перестройки длины волны излучения лазерных диодов. Обсуждены также следствия воздействия несогласованности периодов решётки, коэффициента термического расширения, приводящие к тетрагональным расширениям и

дислокации несоответствия на возникновение упругого внутреннего напряжения и поляризации рекомбинационного излучения. По результатам анализа проведённого литературного обзора сделаны выводы.

Во второй главе описываются методики, которые были разработаны или использовались при выполнении данной работы. Рассмотрены стандартные методики изготовления гетероструктур GaInAsP/InP и приборов на их основе. Исследуемые гетеролазеры и светоизлучающие диоды выращены жидкофазной эпитаксией, за исключением квантово-размерных, которые были выращены методом молекулярно-пучковой эпитаксии. При исследовании спектральных характеристик лазерных диодов использованы методы фотолюминесценции, электролюминесценции спонтанного и стимулированного излучения. Зависимость величины внутреннего упругого напряжения σ_{xx} от относительного несоответствия периодов решётки $(\Delta a/a)_{\perp}$ исследованы поляризационной методикой из анализа спектральной зависимостью степени линейной поляризации ρ_{π} вдоль контура полосы электролюминесценции.

Третья глава посвящена исследованию электрофизических характеристик приборов на основе гетероструктур GaInAsP/InP.

В первом разделе данной главе разработана методика определения диффузионной длины дырок и электронов в структурах $pInP-n^0InP-nGaInPAs-nInP$ по спектру электролюминесценции диодов на их основе.

Для двух идентичных диодов с интегральной интенсивностью излучения Φ_n и Φ_m (из разных пластин ДГС) с различной толщиной χ выражение интегральной интенсивности $\phi(h\omega)$ с учётом плотности тока j записывается в виде:

$$\Phi_n(h\omega) = q_p n_e p_0 \exp\left(-\frac{\chi_n}{L_p}\right) \quad (1)$$

$$\Phi_m(h\omega) = q_p \eta_e p_0 \exp\left(-\frac{\chi_m}{L_p}\right) \quad (2)$$

Разделив выражение(1) на выражение(2) и прологарифмировав полученное выражение, найдём для расчёта L_p следующее выражение

$$L_p = \frac{\chi_m - \chi_n}{\ln(\Phi_n / \Phi_m)}$$

Применив аналогичное рассуждение к ДГТС $nInP-pInP-pGaInPAs-pInP$, можно легко показать, что выражение для диффузионной длины электронов $pInP$ имеет аналогичный вид. Найденные значения диффузионной длины дырок и электронов, соответственно в n^0InP и $pInP$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Некоторые значения диффузионной длины дырок и электронов InP

№ партии	вещество	Концентрация носителей, см ⁻³	L_p , мкм		L_n , мкм	
			77К	300К	77К	300К
1.	n^0InP	$1 \cdot 10^{17}$	2.2-3.3	4.4-5.4	-	-
2.	n^0InP	$2 \cdot 10^{17}$	1.0-1.6	2.7-4.7	-	-
3.	$pInp$	$1 \cdot 10^{18}$			1.6- 2.6	5.8-7.8

Из таблицы 1 видно, что диффузионная длина носителей сильно зависит от уровня легирования, причём с ростом легирования величина L уменьшается как для электронов, так и для дырок.

Во втором разделе представлены результаты получения и исследования СИД на основе двухсторонних гетероструктур (ДГС) GaInAsP/InP плоской и мезополосковой конструкции со сферической или полусферической геометрии активного излучающего слоя у торца диода.

Углубление, близкое к сферической или полусферической форме, формировалось путём травления заготовки или иголки для заготовки диодов селективным химическим травителем железосинеродистого калия-гидроксида калия.

На рисунке 1 показан относительный рост внешнего квантового выхода излучения, вычисленный из кривых ватт - амперных характеристик в зависимости от времени травления. Видно, что внешний квантовый выход до времени травления 2-3 мин. растёт линейно, за тем остаётся неизменным или уменьшается.

В третьем разделе на основе полученных результатов экспериментального исследования температурной стабилизации частоты излучения лазерных диодов на основе GaInAsP/InP, используемых в системе оптической связи, установлено зависимости изменение частоты излучателей от температуры в системе передачи данных на основе ИКМ-120, установленные между АТС-23 и АТС-24 телефонной сети города Душанбе.

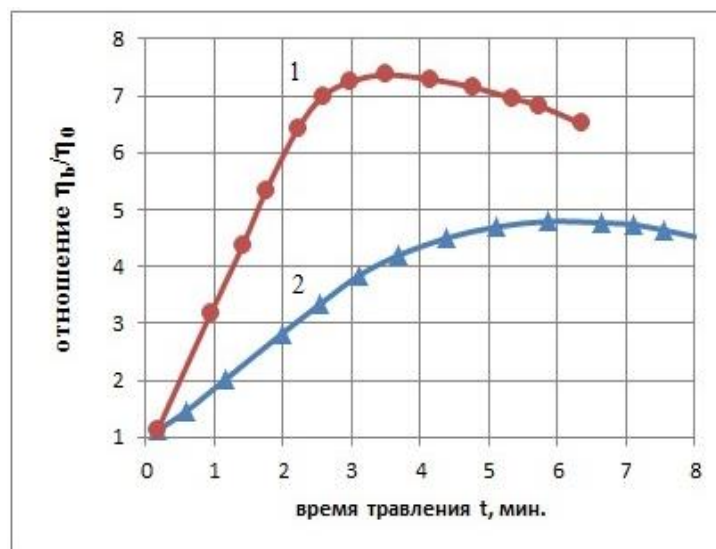


Рисунок 1. Зависимость отношения внешней квантовой эффективности после травления η_b к первоначальной внешней квантовой эффективности η_0 от времени травления в растворе. 1- СИД неполоסקового контакта, 2- СИД полоскового контакта(мезополоски).

Результаты исследования изменений затухания излучения по линии в зависимости от изменения температуры кристалла диода представлены на рисунке 2. Из рисунка 2 видно, что затухание с температурой изменяется по экспоненциальному закону и изменение температуры на 10°C приводит к увеличению затухания световой волны на $\sim 0,1$ дБ. При этом длина волны излучения изменяется на $70\text{-}80\text{Å}$, что находится в согласии с полученными данными по сдвигу длины волны от температуры.

В четвёртом разделе изложены способы управления длиной волны излучения лазерных диодов одноосным давлением. На основе известного оригинального малогабаритного устройства для плавной перестройки длины волны излучения исследовано влияние внешнего давления на длину волны излучения лазерных диодов на основе ДГС GaInAsP/InP при одноосном сжатии. Предельная величина давления на диод, которая была достигнута в эксперименте, составила 4Кбара.

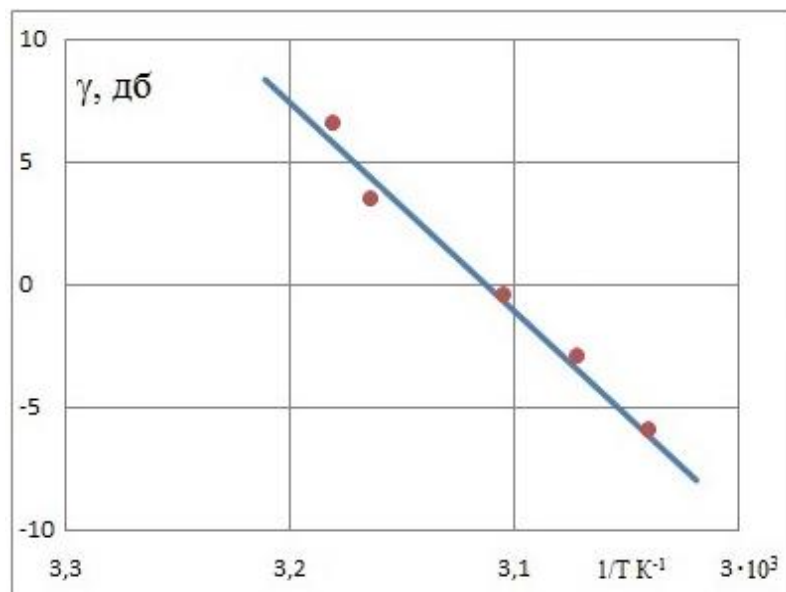


Рисунок 2. Зависимость изменения затухания лазерного излучения на длине волны $\sim 1,3$ мкм от температуры кристалла диода.

На рис. 3 представлена зависимость длины волны излучения лазерного диода на основе ДГС GaInAsP/InP от величины одноосного давления.

Величины одноосного давления оценивались по числу оборотов регулировочного винта (по предварительной калибровке). Из рисунки 3 видно, что при изменении величины давления до 2 Кбар длина волны излучения лазера сдвигается на 120-130 А°, причём перестройка происходит плавно и непрерывно.

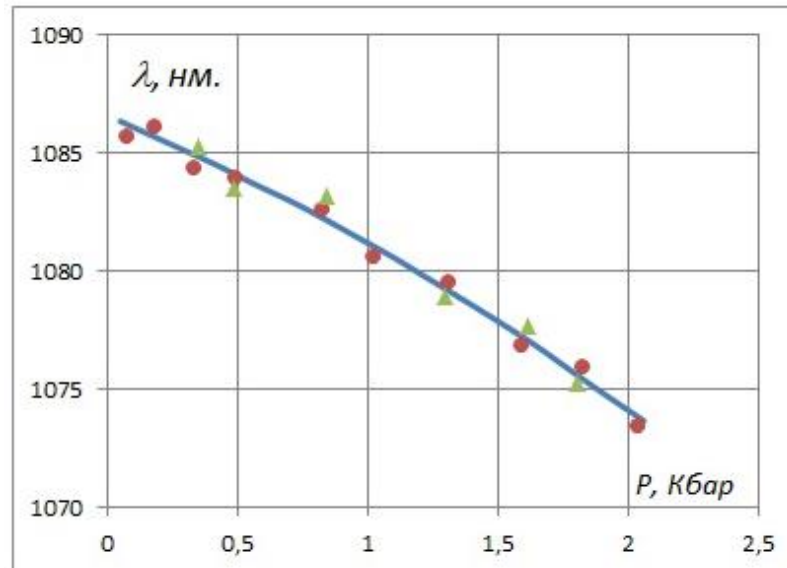


Рисунок 3. Зависимость длины волны излучения лазера от величины одноосного давления на диод

Глава 4 посвящена моделированию и расчёту упругих напряжений в гетероэпитаксиальных слоях гетероструктур GaInAsP/InP.

В первом разделе изложена методика расчёта упругих напряжений в активном слое толщиной $d \geq 0,1 \mu\text{м}$ на основе гетероструктур GaInAsP/InP из анализа спектральной зависимости степени линейной поляризации ρ_π вдоль контура полосы электролюминесценции от длины волны излучения диода.

Величину упругой деформации и относительное несоответствие периодов решётки сопрягаемых материалов в исходных гетероструктурах можно определять из анализа спектральной зависимости степени линейной поляризации люминесценции:

$$\rho = \frac{3}{8} \Delta^* \left[\frac{1}{kT} - \gamma + \frac{d \ln I(\hbar\omega)}{d(\hbar\omega)} \right], \quad (3)$$

где Δ - величина расщепления верхушки валентной зоны в точке $k=0$, γ – константа, характеризующая квантовые состояния.

Измерение ρ вдоль контура полосы люминесценции позволяет рассчитывать Δ и γ . На рисунке 4 представлены спектры спонтанного излучения гетеродиода на структуре с сильно сжатым активным слоем в направлении (100) и спектральной зависимостью степени линейной поляризации ρ_π вдоль контура полосы электролюминесценции и рассчитанная по формуле для расчёта ρ (сплошная кривая 1) и экспериментальные данные, кривая 2.

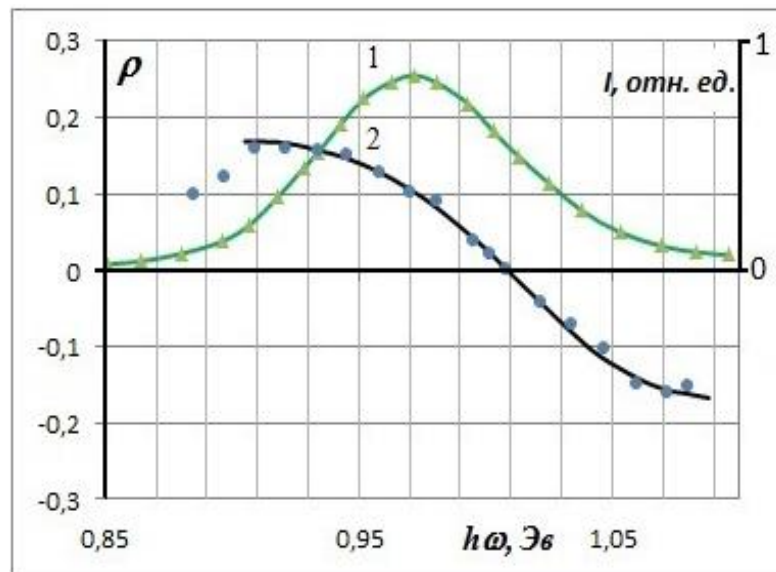


Рисунок 4. Спектр электролюминесценции ДГС GaInAsP/InP I (1) и спектральные зависимости степени линейной поляризации ρ (2) при 300 К для излучателя с сильно сжатым активным слоем в направлении (100).

Результаты расчёта $(\Delta a/a)_\perp$, σ_{xx} , Δ и другие излучательные характеристики гетероструктур GaInAsP/InP представлены в табл. 2.

Из таблицы 2 видно, что активный слой образцов из партии (1-4) имеют деформацию сжатия по оси, перпендикулярной плоскости активного слоя гетероструктуры, а образцы из партии (5-6) - деформацию растяжения по данной плоскости. В лазерных диодах из партии 2, где уровень внутренних напряжений меньше по сравнению с другими партиями, пороговая плотность тока значительно больше. В образцах с большими значениями σ_{xx} , которые менее упруго деформированы, пороговые токи меньше и длина волны сдвинута в область меньших энергий. Следовательно, упругое напряжение приводит к улучшению излучательных характеристик.

Таблица 2

Рассчитанные значения $(\Delta\alpha/\alpha)_{\perp}$, σ_{xx} и Δ

№ партии	λ_g , нм	Δ , мэВ	$(\Delta\alpha/\alpha)_{\perp}$	d, нм	σ_{xx} н/м ²	$J_{пор}$ кА/см
1	1356	6,8	$3 \cdot 10^{-3}$	18	$1,42 \cdot 10^8$	2
2	1320	0,5	$3 \cdot 10^{-4}$	≈ 10	$1,10^7$	4,2
3	1380	8	$3,6 \cdot 10^{-3}$	25	$1,66 \cdot 10^8$	1,5
4	1350	5,5	$2,48 \cdot 10^{-3}$	25	$1,14 \cdot 10^8$	3,5
5	1340	-4,5	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	1000	$-1,28 \cdot 10^8$	2,5
6	1330	-3	$-1,25 \cdot 10^{-3}$	80	$-0,6 \cdot 10^8$	3,2

Во втором разделе разработана методика определения и расчет упругих напряжений в квантово-размерных гетероструктурах GaInAsP/InP по поляризации излучения.

Для расчёта величины упругих напряжений и выяснения их влияния на излучательные характеристики в гетероструктурах с $d < 0,1 \mu\text{м}$ требуется определить вклад поляризационно- квантово-размерного эффекта и далее учесть её при анализе экспериментально найденной спектральной зависимости степени линейной поляризации излучения.

Рассмотрены два способа учёта поляризационно- квантово-размерного эффекта.

В первом случае необходимо определить величину энергетического расщепления спектров поляризации δ , обусловленного квантованием энергетических уровней для тяжёлых и лёгких дырок валентной зоны, в которых оптические переходы соответствуют ТЕ и ТМ- поляризации, соответственно.

В этом разделе нами выведена формула для расчёта δ , обусловленная поляризационно- квантово-размерным эффектом.

$$\delta = E_n \left(1 - \frac{1}{1/2 + \sqrt{1/4 + kT/E_n}} \right) e^{E_n/kT(1/2 - \sqrt{1/4 + kT/E_n})} \quad (4)$$

В формуле (4) $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* d^2}$ - энергия n -го состояния для электронов и дырок, где \hbar - постоянная Планка, n - квантовое число, m^* - эффективная масса электронов или дырок, d - толщина активной (излучающей) области гетероструктуры.

С учётом δ формула для спектральной зависимости степени линейной поляризации ρ_π (3), которая применима для структур с толщиной $d > 0,1$ мкм и для структур с толщиной $d < 0,1$, принимает следующий вид

$$\rho_\pi = \frac{3}{8} (\Delta + \delta) [1/kT - \gamma + d \ln I(\hbar\omega)/d(\hbar\omega)] \quad (5)$$

где Δ - энергетическое расщепление, обусловленное упругой деформацией, δ - энергетическое расщепление из-за квантования подзон тяжёлых и лёгких дырок валентной зоны; k - постоянная Больцмана, T - температура, γ - постоянная величина, зависящая от природы рабочих

переходов, $I(\hbar\omega)$ - интенсивность излучения в спектре электролюминесценции гетероструктур.

Во втором способе расчётов, представим ρ_π как сумму двух составляющих:

$$\rho_\pi = \rho_\pi^{yn. def} + \rho_\pi^{kp}.$$

Здесь необходимо определить ρ_π^{k-p} (степень линейной поляризации, обусловленной квантово-размерным эффектом). Нами выведена формула для расчёта ρ_π^{k-p} , которая имеет следующий вид:

$$\rho_\pi^{kp}(\hbar\omega) = (3E_{cn} / \varepsilon_{cn}) / (3 - E_{cn} / \varepsilon_{cn}), \quad (6)$$

где E_{cn} - энергия квантового подуровня (дна подзоны при одномерном квантовании); ε_{cn} - полная энергия в подзоне с индексом n , равная $E_{cn} + \hbar^2 k_{c11}^2 / 2m_c^*$ (здесь k_{c11} - проекция волнового вектора на плоскость излучающего слоя, m_c^* - эффективная масса). Энергии E_{cn} и ε_{cn} отсчитываются от дна потенциальной ямы.

Величина ρ_π максимальна и равна единице на переходах со дна квантовой подзоны ($E_{cn} = \varepsilon_{cn}$) и быстро убывает с увеличением $\hbar\omega$. По формуле (6) рассчитаны значения E_{cn} и ε_{cn} . Далее получена зависимость ρ_π^{k-p} от толщины излучающего слоя d . Определяя значение ρ_π^{k-p} для гетероструктур с определённой толщиной d и используя (4) и (5), можно вычислить величину Δ (энергетическое расщепление между спектрами поляризации, т. е. расщепление между подзоной тяжёлых и лёгких дырок) и далее по (5) произвести расчёт упругой деформации активного излучающего слоя гетероструктур.

Результаты расчёта δ по (5) и $\rho_{\pi}^{k,p}$ по (6) в зависимости от толщины активного слоя гетероструктур, представлены на рис.5. Видно, что как ρ_{π} , так и δ_{KP} с увеличением толщины изменяются практически по экспоненциальному закону и приближаются к нулю при $d \geq 800 \text{ \AA}$. При величине энергетического расщепления спектров поляризации $\sim 10 \text{ мэВ}$ наблюдается полная поляризации в пользу ТЕ. Ход зависимости ρ_{π} и δ_{KP} свидетельствует о правильности и тождественности обеих предложенных методик.

В третьем разделе разработана модель лазерного диода на основе многослойных гетероструктур GaInAsP/InP и на основе разработанной модели произведён численный расчёт внутренних напряжений и радиуса кривизны многослойной гетероструктуры.

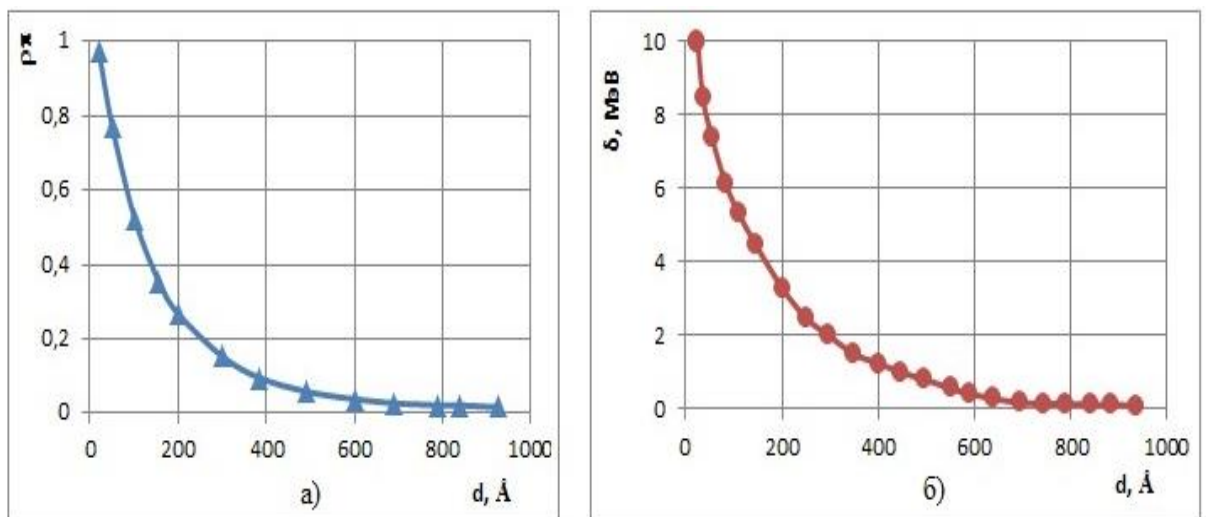


Рисунок 5. Зависимость степени линейной поляризации ρ_{π} (а) и величина энергетического расщепления спектров поляризации δ (в) в квантово-размерном случае от толщины излучающего(активного) слоя в гетероструктурах GaInAsP/InP при 300К.

Для структуры, состоящей из n слоёв, модифицирована известная система уравнений для продольных сил и радиуса кривизны, которая

получена на основе теории упругости и условия механической устойчивости многослойной структуры.

Для численного решения модифицированной системы уравнений предложен алгоритм расчёта продольных напряжений в каждом слое многослойной структуры и её радиуса кривизны.

На основе этого алгоритма написана программа на языке Microsoft Fortran для вычисления напряжения и радиуса кривизны многослойной гетероструктуры. Расчёт напряжений на каждой границе раздела и радиусы кривизны в многослойной гетероструктуре, произведённые по этой программе для ряда партий при различных величинах несоответствия параметров решётки подложки и четверного слоя GaInAsP, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Расчитанные внутренние напряжения в многослойных гетероструктурах

Структура	$\varepsilon, 10^{-3}$	R, м	InP (подложка)		InP (эпит. слой)		Ga _{1-x} In _x P _y As _{1-y}		InP(верх.сл ой)	
			t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²
			1	1.5	-13.0	100	-0.030	15	-0.053	0.1
2	1.2	-16.2	100	-0.024	15	-0.042	0.1	11.69	1.0	-0.044
3	0.9	-21.7	100	-0.018	15	-0.032	0.1	8.77	1.0	-0.033
4	0.9	21.7	100	-0.018	15	-0.032	0.1	8.77	1.0	-0.033
5	-1.2	16.2	100	0.024	15	0.042	0.1	-11.69	1.0	0.044
6	-1.5	13.0	100	0.030	15	0.053	0.1	-14.62	1.0	0.054
7	-1.8	73.1	120	0.154	15	0.265	0.5	-17.33	1.0	0.273
8	-0.9	6.2	120	0.077	15	0.132	0.5	-8.67	1.0	0.137
9	-0.6	9.3	120	0.052	15	0.088	0.5	-5.78	1.0	0.091
10	-0.6	-9.3	120	-0.052	15	0.088	0.5	-5.78	1.0	-0.091
11	1.2	-4.63	120	-0.103	15	0.177	0.5	11.56	1.0	-0.182

Продолжение таблицы 3

Структура	$\varepsilon, 10^{-3}$	R, м	InP (подложка)		InP (эпит. слой)		Ga _{1-x} In _x P _y As _{1-y}		InP(верх.слой)	
			t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²	t, мкм	$\sigma, 10^8$ дин/см ²
12	1.4	-3.7	120	-0.128	15	-0.221	0.5	14.44	1.0	-0.228
13	0.6	-42.01	80	-0.007	15	-0.013	0.05	5.85	0.5	-0.014
14	0.88	-27.8	80	-0.011	15	-0.02	0.05	8.98	0.5	-0.02
15	1.17	-21.04	80	-0.015	15	-0.026	0.05	11.71	0.5	-0.027
16	-0.6	42.01	80	0.007	15	0.013	0.05	-5.85	0.5	0.014
17	-0.9	28.06	80	0.011	15	0.02	0.05	-8.78	0.5	0.020
18	-1.2	21.04	80	0.015	15	0.026	0.05	-11.71	0.5	0.027
19	-1.8	13.8	80	0.023	15	0.04	0.05	-17.56	0.5	0.041
20	-2.1	11.99	80	0.027	15	0.046	0.05	-11.72	0.5	0.017
21	-1.2	34.5	80	0.009	15	0.016	0.03	-11.72	0.5	0.017
22	-1.7	23.75	80	-0.013	15	-0.024	0.03	-17.58	0.5	-0.024
23	0.05	22.1	80	0.013	15	0.027	0.05	-5.84	0.02	-5.84
24	0.03	21.9	80	0.013	15	0.027	0.03	-8.77	0.02	-8.77
25	0.03	16.3	80	0.017	15	0.037	0.03	-11.7	0.02	-11.7
26	0.03	13.2	80	0.021	15	0.045	0.03	-14.6	0.02	-14.6
27	0.03	11.0	80	0.026	15	0.045	0.03	-17.5	0.02	-17.5
28	0.02	47.7	80	0.006	15	0.012	0.02	-5.85	0.015	-5.85
29	0.02	23.8	80	0.012	15	0.025	0.02	-11.7	0.015	-11.7
30	0.02	18.8	80	0.015	15	0.031	0.02	-14.6	0.015	-14.6
31	0.02	15.1	80	0.018	15	0.039	0.02	-17.6	0.015	-17.6
32	0.02	13.4	80	0.020	15	0.044	0.02	-20.5	0.015	-20.5

Выявление и исследование внутренних напряжений и соответствующей им упругой деформации в гетероэпитаксиальных структурах на основе GaInAsP/InP дало важные результаты. Оказалось, что оптимизация уровня упругого напряжения в активном слое приводит к снижению порога генерации, увеличению дифференциальной

эффективности и температурного параметра лазерных структур GaInAsP/InP, только для этого требуется расчёт упругих напряжений и оптимального введения напряжений в активные слои приборных структур.

Основные результаты и выводы

1. Предложена методика определения диффузионной длины дырок в структурах $pInP-n^0InP-nGaInPAs-nInP$ по спектру электролюминесценции. Показано, что диффузионная длина носителей сильно зависит от уровня легирования, причём с ростом легирования диффузионная длина уменьшается как для электронов, так и для дырок [1-А].
2. Получен относительный рост внешнего квантового выхода излучения $\eta_{\text{в}}$ при химическом травлении. Для СИД широкого контакта $\eta_{\text{в}}$ увеличивается в 4 раза а для мезополоскового диода – в 7-8 раз при толщине активного слоя GaInAsP/InP - слоя ~ 1 мкм. [2-А].
3. Исследование изменений характеристик излучателя (в плате ПД-24) при включённой и отключённой электронной схемы управления температурой кристалла диода, показало, что с ростом температуры затухание световой волны изменяется по экспоненциальному закону. Изменение температуры на 10°C приводит к увеличению затухания световой волны на $\sim 0,1$ дБ, при этом длина волны излучения изменяется на $70-80\text{Å}$ [5-А], [9-А], [13-А].
4. При исследовании лазерных диодов на основе двусторонних гетероструктур (ДГС) GaInAsP/InP при одноосном сжатии показано, что при изменении величины давления на 2 Кбар, длина волны излучения лазера сдвигается на $120-130\text{Å}$, причём перестройка длины волны происходит плавно и непрерывно [4-А], [8-А].
5. Используя поляризационный метод, исследованы спектры степени линейной поляризации спонтанного излучения нескольких партий

гетеродиодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP и рассчитаны величины внутреннего напряжения в их активном слое с толщиной $d > 0.1 \mu\text{м}$. Показано, что в пределе до уровня напряжения $1.7 \cdot 10^8 \text{н/м}$ активный слой упруго деформируется, при этом наблюдается улучшение излучательных характеристик, таких как снижение порогового тока, повышение дифференциальной эффективности и поляризация излучения [6-А], [10-А].

6. Предложены два способа учёта поляризационно-квантово-размерного эффекта поляризации при расчёте величины упругой деформации активного слоя гетероструктуры. Показано, что как величина спектральной зависимости степени линейной поляризации, так и величина энергетического расщепления спектров поляризации в квантово-размерном случае с увеличением толщины изменяются практически по экспоненциальному закону и приближаются к нулю при $d \geq 800 \text{Å}$ [3-А], [12-А].
7. В гетероструктур с квантово-размерным активным слоем, когда толщина слоя $d < 0,1 \mu\text{м}$ на поляризацию излучения оказывает сильное влияние квантово-размерный эффект. Разработана методика учёта этого эффекта и теоретически получено выражение, связывающее степень линейной поляризации и толщину активного слоя. Эту методику можно использовать на практике для учёта влияния квантово-размерного эффекта и по поляризационной методике определять напряжения в структуре с ультратонкой активной областью [3-А].
8. На основании предложенной методики разработан алгоритм и рассчитаны напряжения в многослойных гетероструктурах GaInAsP/InP в зависимости от рассогласования периодов решётки подложки и четверного слоя и толщины эпитаксиальных слоёв. Показано, что на уровни напряжения эпитаксиальных слоёв сильно влияет толщина подложки. Изменение толщины эпитаксиальных

слоёв в пределах от 15 нм до 1000 нм не вызывает качественных изменений. Рассогласования периодов решётки подложки и слоёв GaInAsP $\Delta a/a$ в пределах до $\pm 2,1 \cdot 10^{-3}$ приводит к сильному напряжённому состоянию ультратонких слоёв $\sim 2 \cdot 10^9$ дин/см²[6-А, 11-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов: результаты работы имеют важное фундаментальное значение в физике полупроводниковых лазеров. Методы оптимизации параметров излучения лазерных диодов способствуют экономии материальных и денежных ресурсов, а также обеспечивают надёжность работы приборов на их основе. Разработанные математические модели и численные расчёты внутренних напряжений в гетероструктурах дают возможность проектирования и изготовления лазерных диодов с предварительно заданными параметрами излучения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ СТАТЬЯХ И ТЕЗИСАХ ДОКЛАДОВ:

а) статьи, опубликованные в журналах, входящих в перечень публикуемых изданий утверждённых ВАКом при Президенте РТ

[1-А] Шохуджаев, Н. Определение диффузионной длины носителей в InP по излучательным характеристикам гетероструктур GaInAsP/InP / Н.Шохуджаев, **Т.М. Алидодов**, И. Исмаилов // ДАН АН. РТ, 1999, т.42, №9, с. 50-55.

[2-А] Шохуджаев, Н. Повышение эффективности вывода излучения с торца светоизлучательных диодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP путём их селективного химического травления / Н. Шохуджаев, И. Исмаилов, К. Кабутов, **Т.М. Алидодов** // ДАН АН. РТ, 2001, т.44, №9-10, с. 63-67.

- [3-А] Шохуджаев, Н. Об определении упругих напряжений в гетероструктурах GaInAsP/InP с ультратонкой активной областью по поляризации излучения / Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // ДАН АН. РТ, 2002, т. 45, №9, с. 61-66.
- [4-А] Кабутов, К. Устройства для управления длины волны излучения лазерных диодов / К. Кабутов, Н. Шохуджаев, И. Исмаилов, **Т.М. Алидодов** // ДАН АН. РТ, 2003, т. 46, №9, с. 12-17.
- [5-А] Шохуджаев, Н. Исследование стабилизации частоты лазерных диодов на GaInAsP/InP используемые в системе оптической связи / Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов**, К. Кабутов, С.И. Рахимова // ДАН АН. РТ, 2003, т. 46, №10, с. 70-75.
- [6-А] **Алидодов, Т.М.** Методика определения и расчёта внутреннего напряжения в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP / Т.М. Алидодов, Х.Х. Муминов // Известия АН РТ, 2018, №3(1972), с. 36-41.
- [7-А] **Алидодов, Т.М.** Расчёт внутренних напряжений в многослойных гетероструктурах на основе GaInAsP/InP/ Т.М. Алидодов, Х.Ш. Абдулов, Х.Х. Муминов // Известия АН РТ, 2018, №1(170), с. 49-56.

б) Тезисы и статьи, опубликованные в Материалах Конференций

- [8-А] Шохуджаев, Н. Исследование пьезоэффекта усиления в гетеролазерах на основе GaInAsP/InP/ Н. Шохуджаев И. Исмаилов, **Т.М. Алидодов** // Тезис доклад на научной конференции «Физики конденсированного состояния», посвящённой 70-летию Адхамова А.А, 3-4 сентября 1998, Душанбе, ФТИ АН РТ, с. 51.
- [9-А] Шохуджаев, Н. Использование микрохолодильников для стабилизации частоты излучателей применяемых в оптической связи / Материалы международной конференции посвящённой 16-сессии Верховного Совета РТ и ее значение в развитие науки и образования // Н. Шохуджаев, К. Кабутов, **Т.М. Алидодов**, С.И. Рахимова. 27-28 сентября 2002г., Душанбе, ТТУ им. М.С. Осими, с.82-83.

- [10-А] Шохуджаев, Н. Расчёт упругих напряжений в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP / Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // Тезисы доклад международной конференции по физике конденсированного состояния и экологических систем, посвящённой 40-летию ФТИ им. С.У. Умарова АН РТ и 80-летию г. Душанбе, как столицы Таджикистана. 5-6 октября 2004г., Душанбе, ФТИ АН РТ, с.82-83.
- [11-А] Шохуджаев, Н. Расчёт напряжений в гетероэпитаксиальных слоях / Н. Шохуджаев, Х.Ш.Абдулов, **Т.М. Алидодов** // Тезис доклада научно- практической конференции «Современные проблемы физики и астрофизики», Душанбе ТГНУ, 2005.
- [12-А] Шохуджаев, Н. Определение и расчёт упругих напряжений в гетроструктурах GaInAsP/nP / Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // Материалы II Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования в XXI веке» посвященной 50-летию ТТУ им. академик М.С. Осими, 25-26 ноября 2006г., Душанбе, ТТУ, с. 78-80.
- [13-А] **Алидодов, Т.М.** Тасбити ҳароратии басомади нурафкани диодҳои лазерӣ дар системаи алоқаи оптикӣ истифодашаванда / Т.М. Алидодов, И.Т. Оджимамадов // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Перспективы развития образования» посвящённой 25-летию независимости Республики Таджикистан и 60-летию Таджикского технического Университета им. М.С. Осими. 3-4 ноября 2016 год. Душанбе, с. 129-131.

УДК 535.34.375.34.

Алидодов Тутишо Мералишоевич

**ТАДҚИҚИ ШИДДАТҲОИ ДОХИЛИИ ДИОДҲОИ
ЛАЗЕРӢ ДАР АСОСИ ГЕТЕРОСОХТОРҲОИ
ДУЧАНДАИ GaInAsP/InP ТАВАССУТИ ТАВСИФОТИ
АФКАНИШОТИИ ОНҲО**

Автореферати

**диссертатсия барои дарёфти дараҷаи илмии номзади илмҳои
физикаю математика аз руи ихтисоси
01.04.07 – Физикаи ҳолатҳои конденсӣ**

Душанбе – 2020

Диссертатсия дар лабораторияи электроникаи квантии Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон иҷро шудааст.

Роҳбарони илмӣ: Шохучаев Нурулло. - номзади илмҳои физикаю математика, дотсент, мудирӣ кафедраи “Шабакаҳои алоқа ва системаҳои коммутисионӣ” ДТТ ба номи М.С. Осимӣ

Муминов Ҳикмат Ҳалимович – доктори илмҳои физикаю математика, академики АМИТ, ноибӣ президенти АМИТ

Муқарризонӣ расмӣ: **Каримов Хасан Сангиневич** – доктори илмҳои физикаю математика профессор, ходими пешбари илмӣ Маркази рушди инноватсионӣ илм ва технологияҳои нави АМИТ

Акрамова Рухшона Ятимовна - номзади илмҳои физикаю математика, мудирӣ физикаи умумӣ ва назариявии Донишқадаи давлатии Кулоб ба номи А.Рудаки

Муассисаи пешбар: Донишгоҳи давлатии Хучанд ба номи академик Бобочон Гафуров

Ҳимояи рисола рӯзи 22 апрели соли 2021 соати 14⁰⁰ дар ҷаласаи Шӯрои диссертатсионии БД.КOA – 031 назди Институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон баргузор мегардад. Суроғаи: 734063, Ҷумҳурии Тоҷикистон, ш. Душанбе, хиёбони Айни, 299/1, факс (+992-372) 25-79-14. Толори Шӯрои илмӣ ИФТ ба номи С.У.Умарови АМИТ баргузор мегардад. E-mail: shuro.ift@gmail.com.

Бо диссертатсия дар китобхонаи Институти физикаю техникаи ба номи С.У.Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон ва дар сомонаи www.phti.tj шинос шудан мумкин аст.

Автореферат «__» _____ соли 2021 фиристода шуд.

Котиби илмӣ Шӯрои диссертатсионӣ,

номзади илмҳои техникӣ, х.к.и



Қ. Кабутов

ТАВСИФИ УМУМИИ ТАДҚИҚОТ

Муҳимияти кор. Аз оғози таҳия, истехсол ва истифодаи маводҳо ва дастгоҳҳо дар асоси маҳлулҳои саҳти чоргонаи GaInAsP/InP ба параметрҳои асосии электрофизикӣ ва тайфӣ, ба монанди ҳадди ниҳоии ҷориши ҷараён, ҳосилнокии квантӣ, дараҷаи хатҳои кутбиш, инчунин вобастагии онҳо аз ҳарорат ва ғайра таваҷҷӯҳи зиёд дода шудааст.

Раванди истехсол, омӯзиш, тадқиқот ва татбиқи амалии диодҳои нурафкан дар асоси маҳлулҳои саҳти чоргонаи гетеросохторҳои дучандаи GaInAsP/InP аз озмоишкор ба ҳарч додани кӯшишҳои зиёдро барои беҳтар кардани хусусиятҳои афканишоти онҳо тақозо мекунад. Таҳия ва тадқиқи гетеросохторҳо дар Институди физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови АМИ Тоҷикистон, омӯзиши таҷрибаи корҳои монанд дар Институди физикаю техникаи ба номи П.Н. Лебедев ва Институди физикаю техникаи ба номи А.Ф. Иоффе (Русия), омӯзиши кори муҳаққиқони хориҷӣ ва инчунин дониши амалии аз системаи алоқаи оптикӣ дар асоси ИКМ-120 гирифташуда, имкон дод, ки баъзе хусусиятҳои муайян карда шаванд, ки то имрӯз дар адабиёти илмӣ, дар мавзӯи интиҳобшуда, ошкор ва ба дараҷаи даркорӣ ба инобат гирифта нашудаанд.

Тавре ки мо медонем, нурафканиҳои оптикӣ рӯшноинаҳи кварсӣ 3 равшанаи шаффоф дорад: паҳнии 0,8 мкм - равшанаи якум, 1,3 мкм - равшанаи дуюм ва 1,55 мкм - равшанаи сеюм. Дар хатҳои оптикӣ алоқа, асосан, аз паҳниҳои 1,3 мкм ва 1,55 мкм ба сабаби доштани талафоти ҳадди ақал (0,5 дБ/км ва 0,18 дБ/км мувофиқан) истифода мебаранд. Дастгоҳҳои асосии нурафканӣ дар ин паҳниҳо диодҳои нурафкан ва диодҳои лазерӣ мебошанд, ки дар асоси гетеросохторҳои GaInAsP/InP сохта шудаанд. Як қатор омилҳо мавҷуданд, ки таъсири онҳо ба тағйирёбии назарраси дарозии мавҷи нурафканӣ ба ин ё он тараф оварда мерасонад. Тағйир ёфтани дарозии мавҷ ба сабаби номувофиқатии сигнали ҳамзамонсоз дар байни дастгоҳҳои фиристанда ва қабулкунанда гашта, дар ниҳоят ба гум шудани алоқа оварда мерасонад. Омилҳои муҳимтарин, ки боиси тағйир ёфтани

мавчи нурафканӣ мешаванд, инҳоянд: аввалан, хатоҳои нисбӣ ҳангоми истехсоли диодҳои нурафкан; дуввум, таъсири тағйирёбии ҳарорат; сеюм, пайдоиш ва тағйир ёфтани фишори беруна; чорум, фишори механикии боқимонда, ки сабабаш номутобиқати параметрҳои панчараҳои кристаллӣ дар қабатҳои эпитаксиалии гетеросохторҳо мебошад. Таъсири умдаи омилҳои дар боло овардашуда боиси тағйири дарозии мавҷ мегардад, ки он ба баромадани дарозии мавҷи нурафканӣ аз равшанӣ шаффофият оварда мерасонад. То ҳадди ақал кам кардани таъсири ин ҳомилҳо дар системаи алоқаи оптикӣ сабаби афзудани масофаи байни дастгоҳҳои фиристонанда ва қабулқунандаро мегардад, ки ин боиси кам шудани шумораи барқарорсозон(регенераторҳо) мегардад ва ба сарфаи захираҳо меорад. Бартараф кардани омилҳои дар боло зикршуда як масъалаи илмию техникиест, ки ҳалли он самаранокии системаҳои алоқаро баланд мебардорад ва эътимоднокии онҳоро таъмин мекунад.

Аз ин рӯ, ҳалли ин мушкилот ва як қатор масъалаҳои дигаре, ки дар ин кор оварда шудаанд, имкон медиҳанд, ки мавзӯи рисолаҳо ҳам аз ҷиҳати илмӣ ва ҳам аз ҷиҳати амалӣ муҳим шуморем.

Мақсади тадқиқот ин: 1) - баланд бардоштани эффективнокии афканишоти дар асоси гетеросохторҳои дар асоси гетеросохторҳои GaInPAs/InP ва 2) – тадқиқи таъсири шиддатҳои дохили ба хусусиятҳои нурафкании онҳо.

Барои ноил гардидан ба ин мақсад **вазифаҳои** зерин ҳал карда шуданд:

1. Муайян кардани дарозии дифузиони барандагони зарядҳо дар сохтори InP;
2. Таҳияи усули баланд бардоштани баромади афканишот аз дохили диоди лазерӣ бо роҳи чоракории химиявӣ;
3. Тадқиқотҳои таҷрибавии тасбити ҳарорати басомади нурафкании диодҳои лазерӣ дар системаи алоқаи оптикӣ;

4. Тадқиқи таҷдиди мавҷи нурафкании диодҳои нимноқилии лазерӣ дар асоси гетеросохторҳои дутарафаи GaInAsP/InP (ГСД) дар зерӣ таъсири фишори якмехвара;
5. Таҳияи усули муайян кардани шиддатҳои чандирӣ дар қабати фаъоли ғафсиаш аз 0.1 мкм зиёди гетеросохторҳои GaInAsP/InP тавассути қутбиши нурафканӣ;
6. Муайян кардани шиддатҳои чандирӣ дар гетеросохторҳои квантиши андозагидоштаи GaInAsP/InP тавассути қутбиши нурафканӣ;
7. Моделсозӣ ва муҳосибаи шиддатҳои дохилӣ дар гетеросохторҳои бисёрқабатаи GaInAsP/InP.

Объекти тадқиқот. Объекти тадқиқот диодҳои лазерии дар асоси гетеросохторҳои дучонибаи GaInAsP/InP сохташуда, мебошанд.

Усулҳои таҳқиқот. Барои ҳалли масъалаҳои гузашташуда аз усулҳои электроникаи квантӣ ва усулҳои алгебраи хаттӣ истифода карда шуд. Тадқиқотҳои таҷрибавӣ бо истифодаи усулҳои стандартӣ ченкунии хосиятҳои электрикӣ, оптикӣ ва коркарди омории маълумотҳои гирифташуда гузаронида шуданд. Таҳлили тайфӣ мувофиқи усулҳои люминесценсионӣ ва қутбиш гузаронида шуд.

Навоварии илмӣ.

1. **Таҳияи** усули муайян кардани дарозии дифузии электронҳо ва сӯрохиҳо дар сохторҳои pInP-n⁰InP-nGaInPAs-nInP аз рӯи тайфи электролюминесценсионӣ.
2. **Нишон дода шудааст**, ки дарозии дифузиони L ҳомилон ба дараҷаи легиронӣ вобастагии калон дорад ва бо зиёд шудани он дарозии дифузиони L ҳам электронҳо ва ҳам сӯрохиҳо кам мешавад.
3. **Афзоиши** нисбии ҳосилнокии баромади квантии нурафкании диодҳои нурафкан(ДНА) дар асоси гетеросохторҳои GaInAsP/InP тавассути чоракории интихобии химиявӣ.

4. **Имконияти** тағйир додани мавҷи нурафканӣ ва тасбити басомади афканишоти диоди лазерӣ бо ёрии микрояхдон дар асоси унсури Пелте нишон дода шудааст, ки доираи истифодаи лазерҳои нимноқилро боз ҳам васеътар мекунад.
5. **Вобастагии** дарозии мавҷи нурафкании диоди лазерӣ аз фишори якмехвара муайян карда шудааст.
6. **Вобастагии** тайфии дараҷаи қутбиши хатии нурафкании худбахуди гетеродиодҳо дар асоси гетеросохторҳои GaInAsP/InP тадқиқ карда шудааст. Бо истифода аз усули қутбиш қимматҳои шиддатҳои дохилӣ дар қабати фаъол ҳисоб карда шуданд.
7. **Саҳми** эффекти қутбиши андозагӣ барои минтақаи фаъоли ғафсиаш аз 0,1 мкм камтар муайян карда шуда, усули ҳисоби фишорҳои чандирӣ дар он таҳия карда шудаанд.
8. **Модели** диоди лазерӣ ва усули ҳисоб кардани шиддати дохилӣ дар гетеросохторҳои бисёрқабатаи GaInAsP/InP таҳия карда шудаанд. Дар асоси модели таҳияшуда, радиуси качӣ ва муҳосибаи шиддатҳои дохилӣ дар гетеросохторҳои ғафсии қабати фаъолашон гуногуни GaInAsP/InP анҷом дода шуд.

Аҳамияти илмию амалии тадқиқот:

1. Муносибсозии тавсифоти нурафкании лазерӣ, таъмини тасбити ҳароратии басомади нурафканӣ, тасбит ва таҷдиди равони дарозии мавҷи афканишот боэътимодии системаи алоқаи оптикиро таъмин мекунанд, ки боиси кам шудани нуқтаҳои барқароркунӣ ва сарфаи хароҷот дар ташкили хатҳои алоқаи нахӣ-оптикӣ мегардад.
2. Муҳосибаи моделии шиддати чандирӣ имкон медиҳад, ки тарроҳии лазерҳои инъексионӣ муносибсозӣ шавад ва самаранокии тарроҳии лазерҳои инъексионӣ барои хатҳои нахи оптикӣ, инчунин дастгоҳҳо барои хондан ё сабти маълумот, лазерҳо дар асоси ҷисми саҳт ва дигар дастгоҳҳо, ки асоси технологияи муосири оптоэлектронӣ ташкил медиҳанд, муносибсозӣ шавад.

Нуқтаҳои асосии хифзшаванда.

1. Усули таҳиягардидаи муайянкунии дарозии дифузиони сӯрохиҳо дар $p\text{InP}-n^0\text{InP}$ ва электронҳо дар $p\text{InP}$ дар гетеросохторҳои $p\text{InP}-n^0\text{InP}-n\text{GaInPAs}-n\text{InP}$ аз рӯи тайфи электролюминесенсӣ. Ҳисоб кардани дарозии дифузиони барои сӯрохиҳо ва электронҳо, мутаносибан, дар $n^0\text{InP}$ ва $p\text{InP}$.
2. Ҳосил намудан ва омӯзиши диодҳои нурафкананда дар асоси гетеросохтори дутарафаи $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ (ГСД) бо тарҳи ҳамвор ва мезопластикии сатҳи қабати фаъоли нурафканаш куравӣ ё нимкуравии паҳлӯи диод. Додани шакли куравӣ ё нимкуравӣ тавасути чорасозии маҳсулот барои тайёр кардани диодҳо ё сӯзан барои тайёр кардани маҳсулот барои диодҳо тавассути чорасозии интихобии химиёвӣ бо маҳлули калийи оҳан-гидроген - гидроксиди калий.
3. Омӯзиши таҷрибавии тасбити ҳароратии басомадҳои диодҳои лазерӣ дар асоси $\text{GaInAsP}/\text{InP}$, ки дар системаҳои алоқаи оптикӣ истифода мешаванд. Натиҷаҳои бадастомада роҷеъ ба тағйирёбии хомушшавии нурафкани дар хати алоқа вобаста ба тағйирёбии ҳарорати булӯри диод.
4. Дастгоҳи хурди нодири пешниҳодшуда барои таҷдиди равони дарозии мавҷи нурафкани лазерӣ нимноқилӣ ва натиҷаҳои омӯзиши диодҳои лазерӣ дар асоси ГСД $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ зери фишори якмеҳвара.
5. Коркарди усули муайян кардани шиддатҳои чандирӣ дар қабати фаъоли ғафсиаш аз 0.1мкм зиёди гетеросохторҳои $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ тавассути кутбиши нурафкани.
6. Тадқиқи тайфи дараҷаи кутбиши хаттии нурафкани худбахуди гетеродоидҳои квантиши андозагидошта дар асоси якчанд маҷмӯи гетеросохторҳои $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ бо усули кутбиш омӯхташуда ва қимматҳои ҳисобшудаи шиддатҳои дохилӣ дар қабати фаъол.

7. Модели таҳияшудаи диоди лазерии чорқабата дар асоси гетеросохтори GaInAsP/InP ва алгоритми муҳосибаи шиддатҳои дохилӣ дар қабатҳои эпитаксиалӣ.

Эътимодияти натиҷаҳои тадқиқот ба истифодаи усулҳои стандартӣ, дараҷадиҳии дақиқи таҷҳизоти санҷишӣ, бозофарандагии хуби натиҷаҳо ҳангоми чен кардани шумораи зиёди намунаҳо ва мувофиқати натиҷаҳои таҷрибавӣ бо натиҷаҳои муҳосибаҳо асос ёфтааст.

Саҳми шахсии муаллиф. Дар гузориш ва ба нақшагирии тадқиқот саҳми бевосита гирифтааст. Муаллиф тадқиқоти таҷрибавиро, аз он ҷумла санҷишҳо ва муҳосибаҳоро, шахсан худаш анҷом дода аст. Таҳлил ва тафсири натиҷаҳои гирифташуда, тайёр намудани онҳо ба чоп расондани шакли фишурдаҳо ва мақолаҳо дар ҳамҷоягӣ бо роҳбарони илмӣ анҷом додааст.

Озмоиши кор. Натиҷаҳои асосии рисолаи мазкур дар чунин конгронсҳои ҷумҳуриявӣ ва байналмилалӣ баён карда шудаанд: Конгронси байналмилалӣ дар мавзӯи “Иҷтисоии 16-уми Шӯрои Олии Ҷумҳурии Тоҷикистон ва аҳамияти он дар рушди илм ва маориф”. ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ, (Душанбе, 27-28 сентябри 2002); конгронси байналмилалӣ "Физикаи моддаҳои конденсӣ ва системаҳои экологӣ", Институти Физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи илмҳои ҚТ (Душанбе, 5-6 октябри 2004); конференсияи илмӣ-амалии "Масъалаҳои муносири физика ва астрофизика" ДМТ (Душанбе, 25-26 ноябри 2005); Конгронси II байналмилалии илмӣ-амалии "Дурномаи рушди илм ва таҳсилот дар асри 21" бахшида ба 50-солагии ДТТ им. Академик М.С. Осимӣ, (Душанбе, ДТТ, ноябри 2006); Конференсияи VIII байналмилалии илмӣ ва амалӣ "Дурномаи рушди илм ва маориф", ДТТ ба номи академик М.С. Осимӣ, (Душанбе, 3-4 ноябри соли 2016).

Интишорот. Натиҷаҳои тадқиқоти диссертатсионӣ дар 13 кори ҷопӣ инъикос ёфтаанд, ки 7 мақолаи он дар маҷаллаҳои илмие ҷоп шудаанд, ки ба рӯйхати нашрияҳои тавсиядодаи Комиссияи олии аттестатсионии назди

Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил мешаванд, 6 гузориш дар маводи конгрессҳои байналмиллалӣ ва миллӣ чоп карда шуданд.

Тадқиқотҳои гузаронидашуда дар доираи мавзӯҳои корҳои илмӣ-тадқиқотии лабораторияи Электроникаи квантӣ иҷро шуда, дар ду ҳисоботи панҷсола барои солҳои 1996-2000 (ИФТ АИ ҶТ, бақайдгирии давлатӣ таҳти рақами 000000364), 2001-2005 (ИФТ АИ ҶТ, бақайдгирии давлатӣ № 000000957) инъикос ёфтааст.

Ҳаҷми кор. Рисола аз муқаддима, чор боб, мундариҷаи асосӣ ва хулосаҳо иборат аст. Он аз 122 саҳифа, аз он ҷумла 32 - расм, 8 ҷадвал ва рӯйхати адабиётҳои истифодашаванда, ки 114 адабиётро дар бар мегирад, иборат аст.

МАЗМУНИ АСОСИИ КОР

Дар муқаддима мубрамияти мавзӯ асоснок карда шудааст, ҳадаф ва вазифаҳои асосӣ ифода ёфтаанд, навоариҳои илмӣ, арзиши амалӣ нишон дода шудааст ва муқаррароти асосии ҳифзшаванда пешниҳод карда шудааст.

Боби аввал ба баррасии маълумоти адабиётӣ, ки барои муҳокимаи натиҷаҳои дар рисола ба дастонида заруранд, бахшида шудааст. Хосиятҳои физикӣ ва афканишотии дастгоҳҳо дар асоси маҳлулҳои саҳти гетеросохторҳои InGaAsP/InP дида барномада шудаанд. Дар он тавсифи муҳтасари системаҳои маҳлулҳои саҳти InGaAsP, шартҳои ҷойгирии изодаврӣ барои таҳлавлҳои InP, легиронии ғашҳои донорӣ ва аксепторӣ дода шудааст. Масъалаҳои муайян кардани дарозии дифузионии ҳомилони заряд, баланд бардоштани барномади квантии беруна, тасбити ҳароратӣ ва таҷдиди дарозии мавҷи нурафкании диоди лазерӣ муҳокима карда шуданд. Инчунин, натиҷаҳои таъсири номувофиқатии даврҳои панҷараҳо, зарби васеъшавии ҳароратӣ, ки ба васеъшавии тетрагоналӣ меорад ва дислокатсияи номувофиқатӣ ба пайдошавии шиддатҳои дохилӣ ва қутбиши нурафкании

рекомбинатсионӣ муҳокима карда мешаванд. Дар асоси таҳлили гузаронидашудаи адабиёт хулосаҳо бароварда шуданд.

Боби дуум ба усулҳои бахшида шудааст, ки хангоми иҷрои ин кор таҳия ё истифода шудаанд. Усулҳои стандартии тайёр кардани гетеросохторҳои InGaAsP/InP ва дастгоҳҳо дар асоси онҳо дида баромада шуданд. Гетеролазерҳо ва диодҳои нурафкани тадқиқшуда, ба истиснои квантиши андозагӣ дошта, ки бо усули эпитаксияи моеъфаза ҳосил карда шудааст, бо усули эпитаксияи молекулавӣ даставӣ сабзонда шудаанд. Хангоми омӯзиши тавсифоти тайфии диодҳои лазерӣ усулҳои фотолюминесценсия ва электролюминесценсияи нурафкани худбахудӣ ва маҷбурӣ истифода бурда шуданд. Вобастагии шиддатҳои чандирии дохилӣ σ_{xx} ба номувофиқати нисбии давраҳои панчараҳо $(\Delta a/a)_\perp$ бо усули кутбишӣ дар асоси таҳлили вобастагии тайфии дараҷаи кутбиши хаттӣ ρ_π қад-қад хати электролюминесценсия тадқиқ карда шудааст.

Боби сеюм ба тадқиқи хусусиятҳои электрофизикии дастгоҳҳо дар асоси гетеросохторҳои GaInAsP/InP бахшида шудааст.

Дар қисми якуми ин боб усули муайян кардани дарозии дифузиони сӯрохиҳо ва электронҳо дар сохторҳои pInP-n⁰InP-nGaInPAs-nInP аз рӯи тайфи электролюминесценсияи диодҳои, ки дар асоси онҳо сохта шудаанд, таҳия карда шудааст.

Барои ду диоди яхела, ки интенсивияти интегралӣ нурафканишон мувофиқан Φ_n ва Φ_m (аз лавҳаҳои гуногуни ГСД) буда, ғафсии гуногуни χ доранд, интенсивияти интегралӣшон бо назардошти зичии чараён j шакли зерин доранд:

$$\Phi_n(h\omega) = q_p \eta_e p_0 \exp\left(-\frac{\chi_n}{L_p}\right) \quad (1)$$

$$\Phi_m(h\omega) = q_p \eta_e p_0 \exp\left(-\frac{\chi_m}{L_p}\right) \quad (2)$$

Ифодаи (1)-ро ба ифодаи (2) тақсим намуда, ҳосили тақсимро логарифмронӣ карда, барои ҳисоб кардани L_p , ифодаи зеринро пайдо мекунем

$$L_p = \frac{\chi_m - \chi_n}{\ln(\Phi_n / \Phi_m)}$$

Ҳамин гуна муҳокимарониҳо ба ГСД-и nInP-pInP-pGaInPAs-pInP татбиқ намуда, ба осонӣ нишон додан мумкин аст, ки ифода барои дарозии диффузони электронҳо дар pInP шакли шабеҳ дорад. Қимматҳои ҳисобшудаи дарозии диффузони сӯрохиҳо ва электронҳо дар n⁰InP ва pInP мутаносибан дар ҷадвали 1 оварда шудаанд.

Аз ҷадвали 1 дида мешавад, ки дарозии диффузиони ҳомилон ба дараҷаи легиронӣ саҳт вобаста буда, бо афзоиши он бузургии L ҳам барои ҳам электронҳо ва ҳам сӯрохиҳо хурд мешавад.

Ҷадвали 1

Як қатор қимматҳои дарозии диффузиони сӯрохиҳо ва электронҳо дар InP

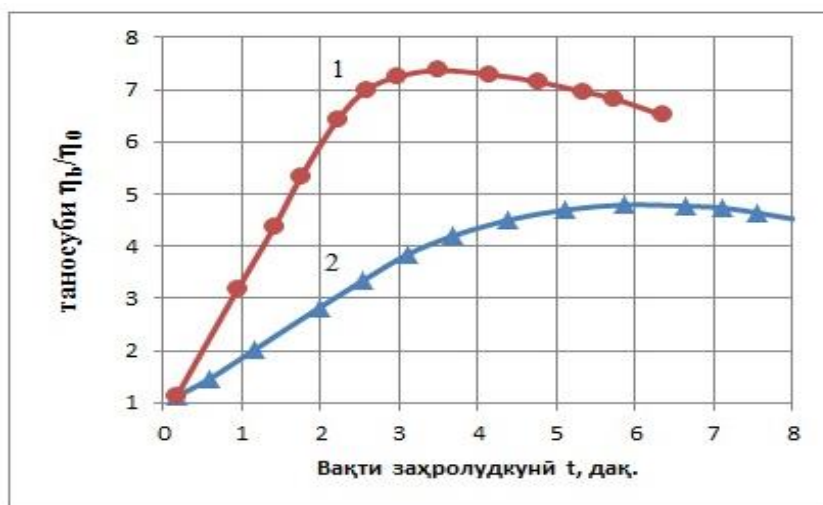
№ партия	Модда	Концентрацияи ноқилони заряд, см ⁻³	L_p , мкм		L_n , мкм	
			77К	330К	77К	330К
1.	<i>n⁰InP</i>	$1 \cdot 10^{17}$	2.2-3.3	4.4-5.4	-	-
2.	<i>n⁰InP</i>	$2 \cdot 10^{17}$	1.0-1.6	2.7-4.7	-	-
3.	<i>pInp</i>	$1 \cdot 10^{18}$			1.6- 2.6	5.8-7.8

Дар қисми дуюми ҳамин боб, натиҷаҳои сохтан ва омӯхтани диодҳои нурафкананда (ДНА) дар асоси ГСД GaInPAs/InP бо тарҳи ҳамвор ва мезопластикии сатҳи қабати фаъоли нурафканаш куравӣ ё нимкуравии паҳлуи диод, пешниҳод шудаанд. Чуқурӣ, ки шаклаш ба кура ё нимкура наздик аст, тавасути чорасозии маҳсулот барои тайёр кардани диодҳо ё сӯ

зан барои тайёр кардани маҳсулот барои диодҳо бо роҳи чорасозии интихобии химииёвӣ бо калийи оҳан-гидроген - гидроксида калий ҳосил карда шуд.

Дар расми 1 вобастагии афзоиши нисбии баромади квантии берунии нурафканӣ, ки аз хаткачи тавсифоти ватт-амперӣ ҳисоб карда шудааст, ба вақти чорасозӣ нишон дода шудааст. Дидан мумкин аст, ки баромади квантии беруна 2-3 дақиқа то чорасозӣ ба таври хаттӣ афзуда, пас аз он бетағйир мемонад ё коҳиш меёбад.

Дар қисми сеюм натиҷаҳои таҳқиқоти таҷрибавии тасбити басомади диодҳои лазерии GaInAsP/InP, ки дар системаи алоқаи оптикӣ истифода мешаванд, инъикос шудаанд. Тағйирёбии басомади диодҳои нурафкананда дар системаи интиқоли наҳи оптикӣ дар асоси ИКМ-120, ки дар байни пойгоҳҳои телефони АТС-23 ва АТС-24 шабакаҳои телефони шаҳри Душанбе насб карда шудааст, ба таври таҷрибавӣ таҳқиқ карда шудааст.



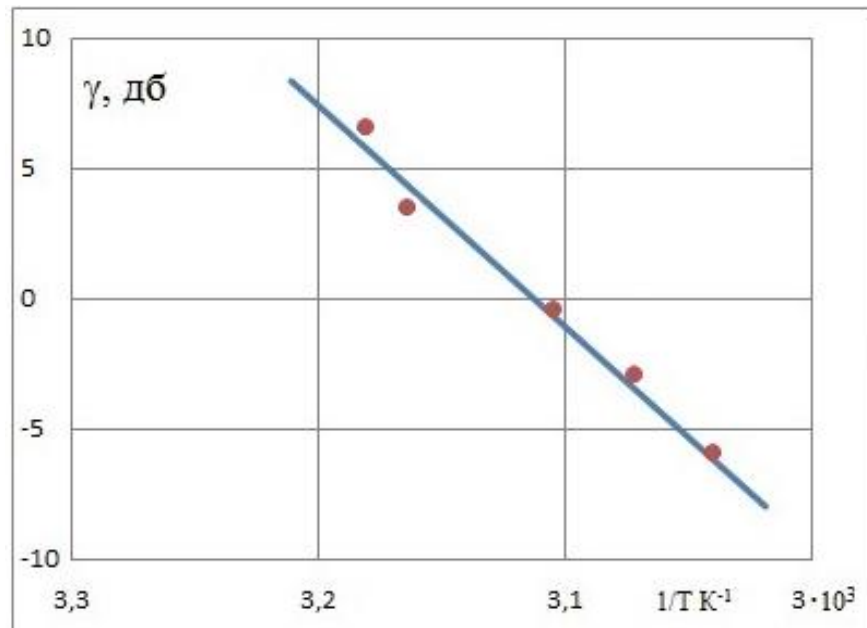
Расми 1. Вобастагии таносуби самаранокии квантии беруна пас аз чорасозӣ η_b ба самаранокии аввалаи квантии беруна η_0 ба вақти чорасозӣ дар маҳлул.

- 1 – Диоди нурафканандаи тамосашон ҳамвор,
- 2 – Диоди нурафканандаи тамосашон раҳдор (мезорах).

Натиҷаҳои омӯзиши тағйирёбии хомӯшшавии нурафканӣ дар хати алоқа, вобаста ба тағйирёбии ҳарорати булӯри диод дар расми 2 оварда

шудаанд. Аз расм бармеояд, ки хомӯшшавӣ ҳангоми тағйирёбии ҳарорат ба таври экспотенсиалӣ тағйир меёбад ва тағйир ёфтани ҳарорат ба 10°C боиси зиёд шудани хомӯшшавии мавҷи нур ба $\sim 0,1$ дБ мегардад. Дар айни ҳол дарозии мавҷи нурафканӣ ба $70\text{-}80\text{Å}$ тағйир меёбад, ки ин бо маълумотҳои дар озмоишгоҳ гирифташуда роҷеъ ба лағзиши дарозии мавҷ вобаста аз ҳарорат мувофиқат мекунад.

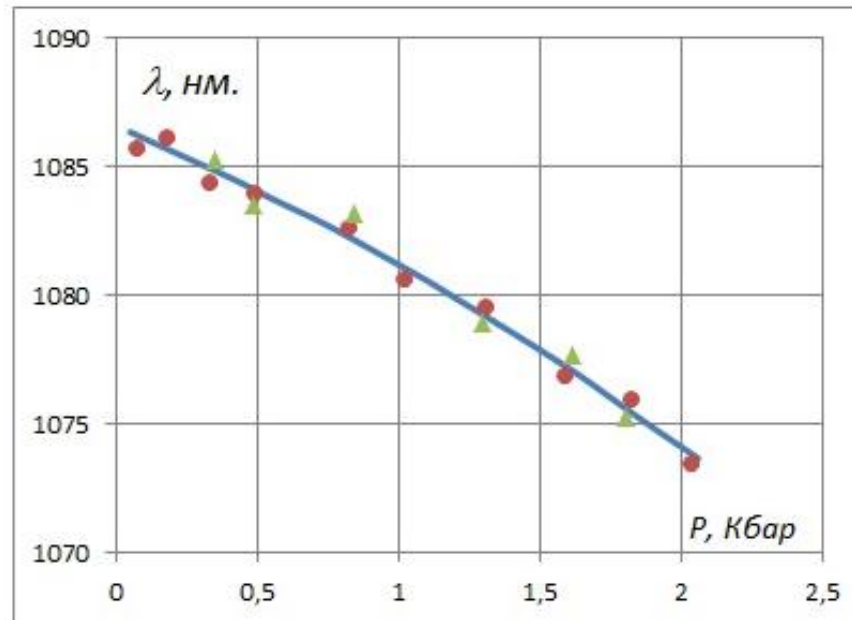
Дар қисми чоруми боби мазкур усулҳои идоракунии мавҷи афканишоти диодҳои лазерӣ тавассути фишори якмехвара тавсиф карда шудаанд. Дар асоси дастгоҳи маъмули хурдандоза барои таҷдиди равони дарозии мавҷи афканишот таъсири фишори беруна ба дарозии мавҷи диодҳои лазерӣ дар асоси ГСД GaInAsP/InP зери фишори якмехвара тадқиқ шудаанд. Фишори баландтарин ба диод, ки дар таҷриба имконпазир гардид, 4 Кбар аст.



Расми 2. Вобастагии тағйирёбии хомӯшшавии нурафканӣ дар дарозии мавҷи $\lambda=1,3$ мкм аз ҳарорати булӯри диод.

Дар расми 3 вобастагии дарозии мавҷи афканишоти диоди лазерӣ дар асоси ГСД GaInAsP/InP аз фишори якмехвара нишон дода шудааст. Аз

ин расм дидан мумкин аст, ки хангоми ба 2 кбар тағйир ёфтани фишор, дарозии мавҷи афканишоти лазер ба 120-130 А мекӯчад. Илова бар ин таҷдид равон ва бефосила мегузарад.



Расми 3. Вобастагии дарозии мавҷи афканишоти лазерӣ аз фишори якмехвара ба диод

Боби 4 ба моделсозӣ ва муҳосибаи шиддатҳои чандирӣ дар қабатҳои гетероэпитаксиалии гетеросохторҳои GaInAsP/InP бахшида шудааст.

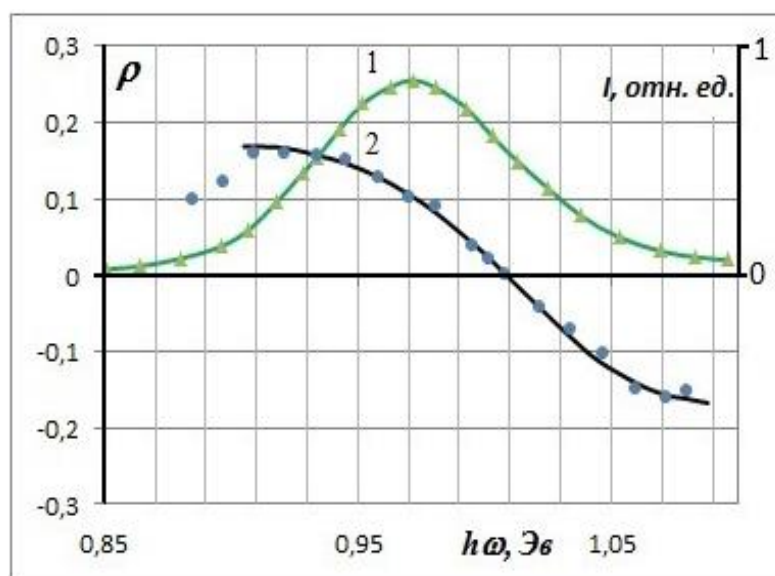
Дар қисми якуми боб усули муҳосибаи шиддати чандирӣ дар қабати фаъоли ғафсиаш $d \geq 0.1 \mu\text{m}$ дар асоси гетероструктураи GaInAsP/InP дар натиҷаи таҳлили вобастагии тайфи дараҷаи кутбиш ρ_π қад-қад контури раҳи электролюминесценсия аз дарозии мавҷи афканишоти диод баён карда шудааст.

Шиддати чандирӣ ва номувофиқатии нисбии даврҳои панҷараҳои маводҳои ҳамбастро дар гетеросохторҳои ибтидоӣ дар асоси таҳлили вобастагии тайфии дараҷаи кутбиши хаттии люминесценсия ёфтан мумкин аст.

$$\rho = \frac{3}{8} \Delta^* \left[\frac{1}{kT} - \gamma + \frac{d \ln I(\hbar\omega)}{d(\hbar\omega)} \right], \quad (3)$$

ки дар ин ҷо Δ - бузургии таҷзияи сақфи минтақаи валентӣ дар нуқтаи $k=0$, γ – зароби ҳолатҳои квантии корӣ.

Ченкунии ρ_{π} қад-қуди контури раҳи люминесценсия имкон медиҳад, ки қимматҳои Δ ва γ ҳисоб карда шаванд. Дар расми 4 тайфи афканишоти худбахуди гетеродиод дар асоси сохторе, ки қабати фаъолаш ба самти (100) саҳт фишурда шудааст ва вобастагии тайфи дараҷаи кутбиши хаттӣ дар тӯли контури электролюминесенсӣ, аз рӯи формула барои ҳисобкунии ρ_{π} (каҷхаттаи бифосила) ва таҷрибавӣ (каҷхатта бо нуқтаҳо) ҳисоб карда шуда, оварда шудаанд.



Расми 4. Тайфи электролюминесенсионии GaInAsP/InP ва вобастагии тайфи дараҷаи кутбиши хаттӣ ρ дар 300 К барои нурафкани бо қабати фаъолаш ба самти (100) саҳт фишурда шуда

Натиҷаҳои муҳосибаи $(\Delta/a)_{\perp}$, σ_{xx} , Δ ва дигар тавсифоти афканишотии гетеросохторҳои GaInAsP/InP дар ҷадвали 2 нишон дода шудаанд.

Ҷадвали 2

Қимматҳои ҳисобкардашудаи $(\Delta/a)_{\perp}$, σ_{xx} , ва Δ

№ мачмӯъ	λ_r , нм	Δ , мэВ	$(\Delta\alpha/\alpha)_\perp$	d , нм	σ_{xx} н/м ²	$J_{ост}$ кА/см
1	1356	6,8	$3 \cdot 10^{-3}$	18	$1,42 \cdot 10^8$	2
2	1320	0,5	$3 \cdot 10^{-4}$	≈ 10	$1,10^7$	4,2
3	1380	8	$3,6 \cdot 10^{-3}$	25	$1,66 \cdot 10^8$	1,5
4	1350	5,5	$2,48 \cdot 10^{-3}$	25	$1,14 \cdot 10^8$	3,5
5	1340	-4,5	$-2,5 \cdot 10^{-3}$	1000	$-1,28 \cdot 10^8$	2,5
6	1330	-3	$-1,25 \cdot 10^{-3}$	80	$-0,6 \cdot 10^8$	3,2

Аз чадвали 2 дидан мумкин аст, ки кабати фаъоли намунаҳо аз мачмӯъҳои (1-4) дар самти тири ба ҳамвории кабати фаъоли гетеросохтор амудӣ тазйиқӣ фишурда, аммо намунаҳо аз мачмӯъҳои (5-6) дар ин ҳамворӣ тазйиқи кашиш доранд. Дар диодҳои лазерӣ аз мачмӯи 2, ки дар он дараҷаи шиддати дохилӣ нисбат ба дигар мачмӯъҳо паст аст, зичии ҷараёни ҳаддиашон хеле зиёдтар аст. Дар намунаҳои дорои қиматҳои калони σ_{xx} , ки камтар тазйиқи чандирӣ мешаванд, ҷараёнҳои ҳадди хурдтаранд ва дарозии мавҷ ба минтақаи энергияи камтар мелағжад. Аз ин рӯ, фишори чандирӣ ба беҳтар шудани хусусиятҳои нурафканӣ меорад.

Дар қисми дуюми ин боб усули муайян кардан ва муҳосибаи шиддатҳои чандирӣ дар гетеросохторҳои квантиши андозагидоштаи GaInAsP/InP тавассути қутбиши нурафканӣ таҳия карда шудааст.

Барои ҳисоб кардани шиддатҳои чандирӣ ва муайян кардани таъсири онҳо ба хусусиятҳои нурафканӣ дар гетеросохторҳои ғафсиашон бо $d < 0,1$ мкм, муайян кардани ҳиссаи эффекти қутбиш-квантиши андозагӣ ва сипас ба ҳисоб гирифтани он ҳангоми таҳлили вобастагии тайфии таҷрибавии дараҷаи қутбиши хаттии нурафканӣ, зарур аст. Ду усули ба ҳисоб гирифтани эффекти қутбиш-квантиши андозагӣ баррасӣ карда шудаанд.

Дар усули аввал, бузургии таъзияи энергиявии тайфи қутбиш δ , ки сабабаш квантиши савияҳои энергияи сӯрохиҳои вазнин ва сабук дар

минтақай валентӣ мебошад ва ба онҳо гузаришҳои оптикӣ кутбишашон мувофиқан ТЕ и ТМ рост меояд, муайян кардан лозим аст.

$$\delta = E_n \left(1 - \frac{1}{1/2 + \sqrt{1/4 + kT/E_n}} \right) e^{E_n/kT(1/2 - \sqrt{1/4 + kT/E_n})} \quad (4)$$

Дар ифодаи (4) $E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* d^2}$ - энергияи ҳолати n -и барои электронҳо ва сӯрохиҳо мебошад, \hbar - доимии Планк, n - адади квантӣ, m^* массаи босамари электронҳо ё сӯрохиҳо, d - ғафсии минтақай ғаъоли (нурафкананда) гетеросохтор. Қимати δ дар ифодаи (3) илова карда ρ_π - ҳисоб мекунем

$$\rho_\pi = \frac{3}{8} (\Delta + \delta) [1/kT - \gamma + d \ln I(\hbar\omega)/d(\hbar\omega)] \quad (5)$$

Дар ин ҷо Δ - таҷзияи энергӣ аз ҳисоби таъйиқи чандирӣ, δ - таҷзияи энергӣ аз ҳисоби квантиши зерминтақай валентии сӯрохиҳои вазнин ва сабук, k - собити Болтсман, T - ҳарорат, γ - собити, ки ба табиати гузаришҳои корӣ вобаста аст, $I(\hbar\omega)$ - интенсивияти нурафканӣ дар тайфи электролюмениссенсияи гетеросохторҳо.

Дар усули дуҷум ρ_π -ро ҳамчун суммаи ду ҷузъи дида мебароем:

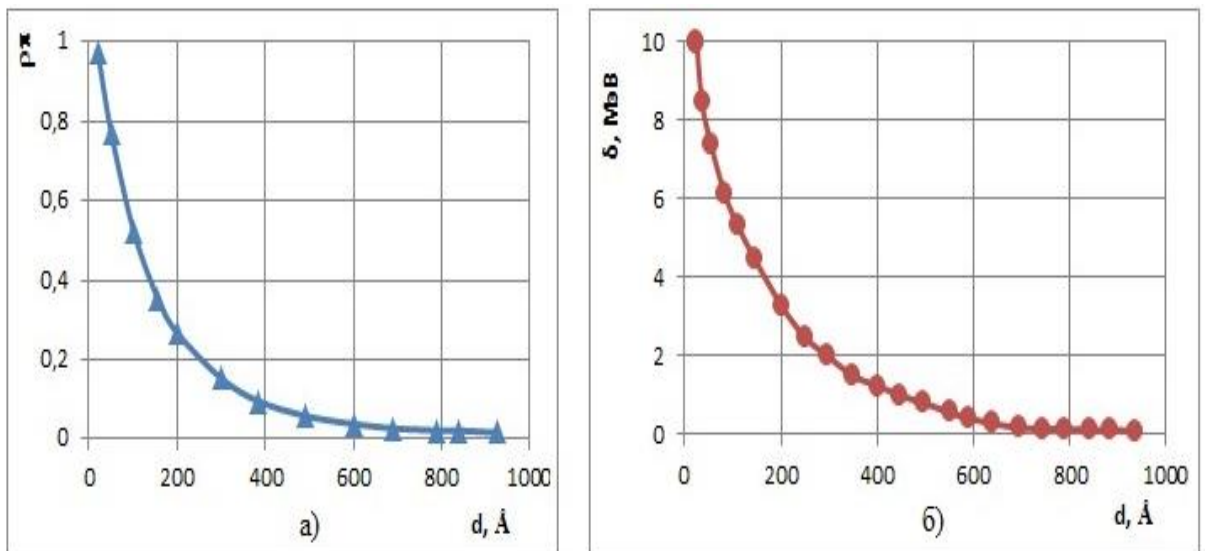
$$\rho_\pi = \rho_\pi^{yn. def} + \rho_\pi^{k.p}$$

Дар ин ҷо, муайян кардани $\rho_\pi^{k.p}$ (дарачаи кутбиши ҳаттӣ аз ҳисоби эффекти квантиши андозагӣ), лозим аст. Барои ҳисоб кардани $\rho_\pi^{k.p}$ ифодаеро ҳосил кардем, ки он шакли зерин дорад:

$$\rho_\pi^{kp}(\hbar\omega) = (3E_{cn} / \varepsilon_{cn}) / (3 - E_{cn} / \varepsilon_{cn}), \quad (6)$$

Дар ин ҷо E_{cn} - энергияи зерсавияи квантӣ (таги зерминтақа ҳангоми квантиши якандоза), ε_{cn} - энергияи пурра дар зерминтақай индексаи n , ки ба $E_{cn} + \hbar^2 k_{c11}^2 / 2m_c^*$ баробар аст. (дар ин ҷо k_{c11} - ҷузъи вектори мавҷӣ дар ҳамвории қабаи нурафкан, m_c^* - массаи босамар). Энергияҳои E_{cn} ва ε_{cn} аз таги ҷоҳи потенциалӣ ҳисоб карда мешаванд.

Бузургии ρ_π дар гузаришҳо аз таги зерминтақаи квантӣ ($E_{cn} = \varepsilon_{cn}$) қимаити калонтарин ва ба 1 баробарро гирифта бо зиёдшавии $\hbar\omega$ ба зудӣ кам мешавад. Қиматҳои E_{cn} ва ε_{cn} аз рӯи формулаи (6) ҳисоб карда шуданд. Сипас вобастагии $\rho_\pi^{k,p}$ аз ғафсии d қабати нурафкан ҳосил карда шуд. Қимати $\rho_\pi^{k,p}$ -ро барои гетеросохторҳо бо ғафсии муайяни d доништа, бо истифода аз (4) ва (5) бузургии Δ (таҷзияи энергӣ дар байни тайфҳои кутбиш, яъне таҷзия дар байни зерминтақаҳои сӯрохиҳои вазнин ва сабук) ҳисоб карда мешавад ва сипас аз рӯи (5) таъйиқи чандирии қабати фаъоли нурафкани гетеросохторҳо муҳосиба карда шуд.



Расми 5. Вобастагии дараҷаи кутбиши хаттӣ ρ_π (1) ва бузургии таҷзияи энергии тайфҳои кутбиш дар ҳолати квантиши андозагӣ аз ғафсии қабати нурафкан (фаъол) дар гетеросохторҳои GaInAsP/InP дар 300К.

Натиҷаҳои муҳосибаи δ аз рӯи (5) ва $\rho_\pi^{k,p}$ аз рӯи (6), дар вобастагӣ аз ғафсӣ, дар расми 5 оварда шудаанд. Дидан мумкин аст, ки ҳам ρ_π ва ҳам δ_{kp} бо зиёд шудани ғафсӣ амалан аз рӯи экспонента тағйир меёбад ва ҳангоми $d \geq 800 \text{Å}$ ба сифр наздик мешавад. Дар сурати таҷзияи энергии тайфи кутбиш $\sim 10 \text{мэВ}$ будан, кутбиши пурра ба суди ТЕ мушоҳида карда мешавад. Равиши вобастагиҳои ρ_π ва δ_{kp} аз дурустӣ ва айнияти ҳар ду усули пешниҳодшуда шаҳодат медиҳад.

Дар қисми сеюми боб модели лазери диодӣ дар асоси гетеросохторҳои бисёрқабатаи GaInAsP/InP таҳия шудааст ва дар асоси ин модели таҳияшуда шиддатҳои дохилӣ ва радиуси қачии гетеросохтори бисёрқабата ҳисоб карда шудаанд.

Барои сохтори иборат аз n қабат системаи муодилаҳои маълум барои қувваҳои тӯлӣ ва радиуси қачӣ, ки дар асоси назарияи чандирӣ ва шартҳои устувории механикӣ ҳосил карда шудаанд, тақмил дода шуданд.

Барои ҳалли адабии системаи тақмилдодашудаи муодилаҳои алгоритми муҳосибаи шиддатҳои тӯлӣ дар ҳар як қабати сохтори бисёрқабата ва радиуси қачии он пешниҳод шудааст.

Дар асоси ин алгоритм, барои ҳисоб кардани шиддати чандирӣ ва радиуси қачии гетеросохтори бисёрқабата барнома бо забони Microsoft Fortran навишта шудааст. Ҳисобкунии шиддатҳо дар ҳар як сарҳади қабат ва радиуси қачӣ дар гетеросохторҳои бисёрқабатаи як қатор маҷмӯъҳо бо бузургҳои гуногуни номутобикати параметрҳои панҷараи таҳлавҳа ва GaInAsP - и чоргона дар ҷадвали 3 оварда шудаанд.

Муайянкунӣ, омӯзиши шиддатҳои дохилӣ ва тазйиқҳои чандирии ба онҳо мувофиқи сохторҳои гетероэпитаксиалӣ дар асоси GaInAsP/InP якҷанд натиҷаҳои муҳим доданд. Маълум шуд, ки муносибсозии сатҳи шиддатҳои чандирӣ дар қабати фаъол ба паст шудани ҳадди генератсия, баланд шудани самаранокии дифференсиалӣ ва параметрҳои ҳароратии сохторҳои лазери GaInAsP/InP оварда мерасонад, ки ҳисобкунии шиддатҳои чандирӣ ва воридкунии муносибсозонаи шиддатҳоро дар қабатҳои фаъоли сохторҳои асбобҳо талаб мекунад.

Ҷадвали 3

Шиддатҳои дохилии муҳосибашуда дар гетеросохторҳои бисёрқабата

Сохтор	R, м	InP (таҳлавҳа)		InP (қабати эпитакс.)		Ga _{1-x} In _x P _y As _{1-y}		InP(қабат. болоӣ)		ε, 10 ⁻³
		t, мкм	σ, 10 ⁸ дин/см ²	t, мкм	σ, 10 ⁸ дин/см ²	t, мкм	σ, 10 ⁸ дин/см ²	t, мкм	σ, 10 ⁸ дин/см ²	

1	-13.0	100	-0.030	15	-0.053	0.1	14.62	1.0	-0.054	1.5
2	-16.2	100	-0.024	15	-0.042	0.1	11.69	1.0	-0.044	1.2
3	-21.7	100	-0.018	15	-0.032	0.1	8.77	1.0	-0.033	0.9
4	21.7	100	-0.018	15	-0.032	0.1	8.77	1.0	-0.033	0.9
5	16.2	100	0.024	15	0.042	0.1	-11.69	1.0	0.044	-1.2
6	13.0	100	0.030	15	0.053	0.1	-14.62	1.0	0.054	-1.5
7	73.1	120	0.154	15	0.265	0.5	-17.33	1.0	0.273	-1.8
8	6.2	120	0.077	15	0.132	0.5	-8.67	1.0	0.137	-0.9
9	9.3	120	0.052	15	0.088	0.5	-5.78	1.0	0.091	-0.6
10	-9.3	120	-0.052	15	0.088	0.5	-5.78	1.0	-0.091	-0.6
11	-4.63	120	-0.103	15	0.177	0.5	11.56	1.0	-0.182	1.2
12	-3.7	120	-0.128	15	-0.221	0.5	14.44	1.0	-0.228	1,4
13	-42.01	80	-0.007	15	-0.013	0.05	5.85	0.5	-0.014	0.6
14	-27.8	80	-0.011	15	-0.02	0.05	8.98	0.5	-0.02	0.88
15	-21.04	80	-0.015	15	-0.026	0.05	11.71	0.5	-0.027	1.17
16	42.01	80	0.007	15	0.013	0.05	-5.85	0.5	0.014	-0.6
17	28.06	80	0.011	15	0.02	0.05	-8.78	0.5	0.020	-0.9
18	21.04	80	0.015	15	0.026	0.05	-11.71	0.5	0.027	-1.2
19	13.8	80	0.023	15	0.04	0.05	-17.56	0.5	0.041	-1.8

Давоми чадвали 3

Соҳтор	R, м	InP (таҳлавҳа)		InP (кабат. эпитакс.)		Ga _{1-x} In _x P _y As _{1-y}		InP(кабати болой)		ε, 10 ⁻³
		t,	σ, 10 ⁸	t,	σ, 10 ⁸	t,	σ, 10 ⁸	t,	σ, 10 ⁸	
		мкм	дин/см ²	мкм	дин/см ²	мкм	дин/см ²	мкм	дин/см ²	
20	11.99	80	0.027	15	0.046	0.05	-11.72	0.5	0.017	-2.1
21	34.5	80	0.009	15	0.016	0.03	-11.72	0.5	0.017	-1.2
22	23.75	80	-0.013	15	-0.024	0.03	-17.58	0.5	-0.024	-1.7

23	22.1	80	0.013	15	0.027	0.05	-5.84	0.02	-5.84	0.05
24	21.9	80	0.013	15	0.027	0.03	-8.77	0.02	-8.77	0.03
25	16.3	80	0.017	15	0.037	0.03	-11.7	0.02	-11.7	0.03
26	13.2	80	0.021	15	0.045	0.03	-14.6	0.02	-14.6	0.03
27	11.0	80	0.026	15	0.045	0.03	-17.5	0.02	-17.5	0.03
28	47.7	80	0.006	15	0.012	0.02	-5.85	0.015	-5.85	0.02
29	23.8	80	0.012	15	0.025	0.02	-11.7	0.015	-11.7	0.02
30	18.8	80	0.015	15	0.031	0.02	-14.6	0.015	-14.6	0.02
31	15.1	80	0.018	15	0.039	0.02	-17.6	0.015	-17.6	0.02
32	13.4	80	0.020	15	0.044	0.02	-20.5	0.015	-20.5	0.02

Натиҷаҳои асосӣ ва хулосаҳо

1. Усули муайян кардани дарозии дифузионӣ барои сӯрохиҳо дар сохторҳои $pInP-n^0InP-nGaInPAs-nInP$ аз рӯи тайфи электрлюминесценсия пешниҳод шудааст. Нишон дода шудааст, ки дарозии дифузионӣ ба дараҷаи легиронӣ саҳт вобаста буда, бо зиёд шудани он дарозии дифузионӣ ҳам барои электронҳо ва ҳам барои сӯрохиҳо кам мешавад [1-М].
2. Афзоиши нисбии баромади квантии берунии нурафканӣ η_b ҳангоми чорасозии интихобии химиявӣ ҳосил карда шудааст. Дар сурати ғафсии қабати ғаъоли GaInPAs ~ 1 мкм будан, барои диодҳои нурафканнади тамоси васеъдор η_b 4 маротиба ва барои диодҳои нурафканнади мезораҳдор 7-8 маротиба зиёд мешавад [2-М].
3. Тадқиқоти тағйирёбии тавсифоти нурафкан (дар лавҳаи ПД-24) ҳангоми мавҷуд будан ва набудани нақшаи электронӣ барои назорат кардани ҳарорати булӯри диод нишон дод, ки бо зиёд шудани ҳарорат хомӯшшавии мавҷи нур ба таври экспоненсиалӣ тағйир меёбад ва тағйир ёфтани ҳарорат 10°C ба зиёд шудани хомӯшшавии мавҷи нур ба $\sim 0,1$ дБ меорад. Дар ин ҳолат, дарозии мавҷи нурафканӣ ба $70-80\text{Å}$

тағйир меёбад, ки ин бо маълумотҳои гирифташуда роҷеъ ба лағжиши дарозии мавҷ аз ҳарорат мувофиқат мекунад[5-М], [9-М], [13-М].

4. Ҳангоми тадқиқи диодҳои лазерӣ дар асоси ГСД *GaInAsP/InP* дар зери фишори якмехвара нишон дода шудааст, тағйирёбии фишор ба 2 Кбар ба лағжиши дарозии мавҷи нурафкании лазер ба $120-130\text{Å}$ меорад. Илова бар ин таҷдиди дарозии мавҷ раван ва бефосила мегузарад[4-М], [8-М].
5. Бо истифода аз усули қутбиш тайфҳои дараҷаи қутбиши хаттии нурафкании худбахуди якҷанд маҷмӯи гетеродиодҳо дар асоси гетеросохторҳои *GaInAsP/InP* тадқиқ карда шуда, шиддатҳои дохилӣ дар қабати фаёлашон бо ғафсии $d > 0,1$ мкм ҳисоб карда шуданд. Нишон дода шудааст, ки дар сатҳи шиддат ба $1,7 \cdot 10^8$ н/м, қабати фаёл ба таври чандирӣ деформатсия мешавад ва дар ин ҳолат беҳтаршавии хусусиятҳои нурафканиӣ, ба мисоли кам шудани чараёни ҳадди аққал, баландшавии самаранокии дифференциалӣ ва поляризатсияи афканишот мушоҳида мешаванд [6-М], [10-М].
6. Ду усули ба ҳисоб гирифтани эффекти квантиши андозагии қутбиш ҳангоми муҳосибаи шиддати чандирии қабати фаёли гетеросохтор пешниҳод карда шудааст. Нишон дода шудааст, ки ҳам бузургии вобастагии спектралӣ дараҷаи қутбиши хатӣ ва бузургии тақсимоти энергия дар спектри қутбиш ҳангоми андозагирии квантӣ бо зиёд шудани ғафсии қабати фаёл тақрибан ба таври экспоненталӣ тағйир ёфта, дар $d \geq 800\text{Å}$ ба сифр наздик мешавад[3-М], [12-М]
7. Дар гетероструктураҳо бо қабати фаёли квантӣ-андозадошта, ҳангоми ғафсии қабат $d < 0,1$ мкм. будан, ба қутбиши афканишот эффекти квантӣ-андозагӣ саҳт таъсир мекунад. Барои ба назар гирифтани ин ҳолат як усул таҳия карда шуда, аз ҷиҳати назариявӣ ифодае ба даст оварда шуд, ки вобастагии дараҷаи қутбиши хатӣ аз ғафсии қабати фаёлро нишон медиҳад. Ин усулро метавон дар амал истифода бурд, то таъсири эффектҳои квантӣ-андозагиро ба назар

гирифта шиддати чандириро дар сохтори дорои минтакаи ултратунуки ғаёлол бо истифодаи усули қутбиш ба назар гирад [3-М].

8. Дар асоси усули пешниҳодшуда алгоритм таҳия карда шуада, шиддати дохилӣ дар гетеросохторҳои бисёрқабатаи GaInAsP/InP, вобаста аз номутобиқати даври панҷараи кристаллии тағлавҳа ва ҷаҳор қабатҳои эпитаксиалӣ ҳисоб карда мешавад. Нишон дода шудааст, ки ба сатҳи шиддатнокии қабатҳои эпитаксиалӣ ғафсии тағлавҳа саҳт таъсир мерасонад. Тағирёбии ғафсии қабатҳои эпитаксиалӣ аз 15 нм то 1000 нм тағйироти сифатино ба вучуд намеорад. Номувофиқат дар байни давраҳои панҷараи кристаллии тағлавҳа ва қабатҳои GaInAsP $\Delta a/a$ дар ҳудуди то $\pm 2,1 \cdot 10^{-3}$, ҳолати шиддати шадиқи қабатҳои ултратунук ба $\sim 2 \cdot 10^9$ дин/см² оварда мерасонад [6-М], [11-М].

Тавсияҳо роҷеъ ба истифодабарии амалии натиҷаҳо:

Натиҷаҳои ба даст оварда дар физикаи лазерҳои нимноқилҳо аҳамияти муҳим доранд. Усулҳои беҳсозии параметрҳои афканишоти диодҳои лазерӣ ба сарфа кардани захираҳои моддӣ ва молиявӣ мусоидат мекунанд ва инчунин эътимоднокии дастгоҳҳоро таъмин менамоянд. Моделҳои таҳияшудаи математикӣ ва ҳисобкунии рақамии фишорҳои дохилӣ дар гетеросохторҳо ба истехсоли диодҳои лазерӣ бо параметрҳои зарурии афканишот имкон медиҳанд.

Маводҳои асосии диссертатсия дар қорҳои зерин ба ҷоп расонида шудаанд:

а) мақолаҳо дар маҷаллаҳои илмие, ки ба рӯйхати нашрияҳои тавсиядодаи Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон дохил мешаванд

- [1-М] Шохуджаев, Н. Определение диффузионной длины носителей в InP по излучательным характеристикам гетероструктур GaInAsP/InP/ Н. Шохуджаев, Т.М. Алидодов, И. Исмоилов // ГАИ. ҚТ., 1999, т.42, №9, с. 50-55.

- [2-М] Шохуджаев, Н. Повышение эффективности вывода излучения с торца светоизлучательных диодов на основе гетероструктур GaInAsP/InP путём их селективного химического травления/Н. Шохуджаев, И. Исмаилов, К. Кабутов, **Т.М. Алидодов** // ГАИ. ҚТ, 2001, т.44, №9-10, с. 63-67.
- [3-М] Шохуджаев, Н. Об определении упругих напряжений в гетероструктурах GaInAsP/InP с ультратонкой активной областью по поляризации излучения/Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // ГАИ. ҚТ, 2002, т. 45, №9, с. 61-66.
- [4-М] Кабутов, К. Устройства для управления длины волны излучения лазерных диодов/К. Кабутов, Н. Шохуджаев, И. Исмаилов, **Т.М. Алидодов** // ГАИ. ҚТ, 2003, т. 46, №9, с. 12-17.
- [5-М] Шохуджаев, Н. Исследование стабилизации частоты лазерных диодов на GaInAsP/InP используемый в системе оптической связи/**Т.М. Алидодов**, К. Кабутов, С.И. Рахимова // ГАИ ҚТ, 2003, т. 46, №10, с. 70-75.
- [6-М] **Алидодов, Т.М.** Расчёт внутренних напряжений в многослойных гетероструктурах на основе GaInAsP/InP/ Т.М. Алидодов, Х.Ш.Абдулов, Х.Х.Муминов // Ахб. АИ. ҚТ., 2018, №1(170), с. 49-56.
- [7-М] **Алидодов, Т.М.** Методика определения и расчёта внутреннего напряжения в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP/ Т.М. Алидодов, Х.Х. Муминов // Ахб. АИ. ҚТ, 2018, №1(170), с. 49-56.

б) Фишурда ва мақолаҳое, ки дар маводҳои конференсияи чоп шудаанд

- [8-М] Шохуджаев, Н. Исследование пьезоэффекта усиления в гетеролазерах на основе GaInAsP/InP / Н. Шохуджаев И. Исмаилов, **Т.М. Алидодов** // Тезиси гузориш дар конференсияи илмӣ “Физикаи ҳолатҳои конденсӣ” бахшида ба 70-солагии Адхамов А.А., 3-4 сентябри соли 1998, Душанбе, ИФТ АИ ҚТ, с. 51.

- [9-М] Шохуджаев, Н. Использование микрохолодильников для стабилизации частоты излучателей применяемых в оптической связи /Н. Шохуджаев, К. Кабутов, **Т.М. Алидодов**, С.И. Рахимова // Маводҳои конференсияи байналмиллалӣ бахшида ба сессияи 16 Шӯрои Олии ҶТ ва арзиши он дар рушди илм ва маориф, 27-28 сентябри 2002г., Душанбе, ДТТ ба номи М.С. Осимӣ, с.82-83.
- [10-М] Шохуджаев, Н. Расчет упругих напряжений в активном слое гетероструктур GaInAsP/InP/ Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // Тезиси гузориш дар конференсияи байналмиллӣ “Физикаи ҳолатҳои конденсӣ ва системаҳои экологӣ” бахшида ба 40-солагии ИФТ ба номи С.У. Умаров АИ ҶТ ва 80-солагии Душанбе ҳамчун пойтахти Тоҷикистон, 5-6 октябри соли 2004, Душанбе ИФТ АИ ҶТ, с.82-83.
- [11-М] Шохуджаев, Н. Расчет напряжений в гетероэпитаксиальных слоях/ Н. Шохуджаев, Х.Ш.Абдулов, **Т.М. Алидодов** // Тезиси гузориш дар конференсияи илмӣ-амалӣ “Проблемаҳои муосири физика ва астрофизика”, бахшида ба 100-солагии назарияи махсуси нисбии А. Эйнштейн, соли байналмиллии физикҳо ва 40-солагии таъсисёбии факултети физикаи ДДМТ, Душанбе, ДДМТ, 25-26 ноябри соли 2005, с.42-43.
- [12-М] Шохуджаев, Н. Определение и расчет упругих напряжений в гетроструктурах GaInAsP/nP/ Н. Шохуджаев, **Т.М. Алидодов** // Маводҳои II конференсияи байналмиллии илмӣ-амалӣ “Дурнамои рушди илм ва маориф дар асри XXI”, бахшида ба 50-солагии ДТТ ба номи М.С. Осимӣ, Душанбе, ДТТ, 25-26 ноябри соли 2006, с. 78-80.
- [13-М] **Алидодов, Т.М.** Тасбити ҳароратии басомади нурафкани диодҳои лазерӣ дар системаи алоқаи оптикӣ истифодашаванда / Т.М. Алидодов, И.Т. Оджимаматов // Маводи конференсияи VIII байналмиллалӣ илмӣ-амалӣ «Дурнамои рушди илм ва маориф» бахшида ба 25-солагии Истиқлолияти давлатии Ҷумҳурии Тоҷикистон

ва 60-солагии Донишгоҳи техникий Тоҷикистон ба номи академик М.С. Осимӣ 3-4 ноябри соли 2016, Душанбе, ДТТ, с. 129-131.

АННОТАТСИЯИ

рисолаи илмӣ Алидодов Тутишо Мералишоевич дар мавзӯи “Тадқиқи шиддатҳои дохилии диодҳои лазерӣ дар асоси гетеросохторҳои дучандаи GaInAsP/InP тавассути тавсифоти афканишотии онҳо” барои дарёфти дараҷаи илмӣ номзади илмҳои физика ва математика аз рӯи ихтисоси 01.04.07 – физикаи ҳолатҳои конденсӣ, ки барои дифоъ ба Шӯрои диссертатсионии 6D.KOA-031-и назди институти физикаю техникаи ба номи С.У. Умарови Академияи миллии илмҳои Тоҷикистон пешниҳод шудааст.

Калимаҳои калидӣ: гетеросохторҳо, тайфи электролюминессионӣ, дарозии диффузия, самаранокии квантӣ, кутбиши нурафканӣ, деформатсияи чандирӣ, шиддати дохилӣ, эффектҳои квантҳои андозагирӣ.

Аҳамияти мавзӯи тадқиқот аз беҳтар кардани хусусиятҳои нурафканиши лазерӣ, баланд бардоштани самаранокии онҳо иборат аст, ки дар навбати худ боиси сарфаи воситаҳо ва кам кардани хароҷот ҳангоми сохтани дастгоҳҳо мегардад. Моделсозӣ ва ҳисоб кардани фишори чандирӣ дар гетеросохторҳо имкон медиҳад, ки диодҳои лазерӣ бо параметрҳои пешакии зарурии нурафканӣ истеҳсол карда шаванд.

Самти тадқиқот диодҳои лазерии тазриқӣ дар асоси гетеросохторҳои дучонибаи GaInPAs/InP мебошанд.

Мақсади кор: 1) баланд бардоштани самаранокии нурафканиши диодҳои лазерӣ; 2) омӯзиши таъсири фишорҳои дохилӣ ба хусусиятҳои афканишоти онҳо мебошад.

Усулҳои таҳқиқот. Таҳқиқот бо истифодаи усулҳои стандартӣ барои чен кардани хосиятҳои электрикӣ, оптикӣ ва коркарди омории маълумотҳои гирифташуда гузаронида шуданд. Таҳлили спектралӣ мувофиқи усулҳои люминессионӣ ва кутбиш гузаронида шудаанд.

Навовари илмий кор:

1. Усули муайян кардани дарозии паҳншавии электронҳо ва сӯрохиҳо дар сохторҳои $p\text{InP}-n\text{InP}-n\text{GaInAsP}-n\text{InP}$ аз спектри электролюминессионӣ таҳия шудааст.

2. Афзоиши ҳосилнокии квантии берунии нурафкании диодҳои дар асоси гетеросохторҳои $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ тавасути чорабинии химиявии онҳо ба даст оварда шудааст.

3. Имконияти тағир додани дарозии мавҷи нурафканӣ ва мӯътадил кардани басомади лазер бо ёрии микрохунуккунак дар асоси унсури Пелте, ки истифодаи лазерҳои нимноқилро боз ҳам васеътар мекунад, нишон дода шудааст.

4. Вобастагии мавҷи нурафкании диоди лазер аз арзиши фишори якмеҳвара муайян карда шудааст.

5. Вобастагии тайфии дараҷаи кутбиши хаттии нурафкании худбахуди гетеродиодҳо дар асоси гетеросохторҳои $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ омӯхта шуда, қиматҳои шиддати дохилӣ дар қабати фаъол ҳисоб карда шуданд.

6. Саҳми эффект-андозаи кутбиш аз ғафси минтақаи фаъоли диоди лазерии 0,1 мкм камтар муайян карда шуда, усули ҳисоби арзиши фишорҳои чандирӣ таҳия карда шуданд.

7. Модели диоди лазерӣ ва усули ҳисоб кардани шиддати дохилӣ дар ҳамаи қабатҳои гетеросохторҳои бисёрқабатаи $\text{GaInAsP}/\text{InP}$ таҳия карда шудаанд.

Доираи фарогирӣ:

1. Натиҷаҳои бадастомада дар хусуси оптимизатсия ва баланд бардоштани самаранокии хусусиятҳои нурафкании диодҳои лазерӣ дар соҳаи алоқа, дар хатҳои наҳи оптикӣ бараъло истифода мешаванд.

2. Натиҷаҳои моделиронӣ ва ҳисоб кардани шиддати дохилӣ дар гетеросохторҳо ҳангоми тарроҳӣ ва сохтани дастгоҳҳо дар асоси диодҳои лазерӣ бо параметрҳои саҳеҳи пешакӣ фармоишдода, истифода мешаванд.

АННОТАЦИЯ

диссертации Алидодова Тутишо Мералишоевича на тему: «Исследование внутренних напряжений лазерных диодов на основе двойных гетероструктур GaInPAs/InP по их излучательным характеристикам», представленная к защите в диссертационный совет 6D.КOA-031 при Физико-техническом институте им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Ключевые слова: гетероструктуры, спектр электролюминесценции, диффузионная длина, квантовая эффективность, поляризация излучения, упругая деформация, внутреннее напряжение, квантово-размерный эффект.

Актуальность диссертационной работы заключается в оптимизации характеристик лазерного излучения, повышении их эффективности, что в свою очередь, приводит к экономии средств и уменьшению затрат при создании приборов на их основе.

Моделирование и расчёт упругого напряжения в гетероструктурах дают возможность изготовления лазерных диодов с предварительно заданными параметрами излучения.

Объектами исследования являются инжекционные лазерные диоды на основе двухсторонних гетероструктур GaInPAs/InP.

Целью работы являются: 1) - повышение эффективности излучения лазерных диодов и 2) - исследование влияния внутренних напряжений на их излучательные характеристики.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием стандартных методик измерения электрических и оптических свойств, и статистической обработки полученных данных. Спектральный анализ проводился люминесцентным и поляризационным методами.

Научная новизна работы:

1. Разработана методика определения диффузионной длины электронов и дырок в структурах $pInP-n^0InP-nGaInAsP-nInP$ по спектру электролюминесценции.
2. Получен относительный рост внешнего квантового выхода излучения светоизлучающих диодов(СИД) на основе гетероструктур $GaInAsP/InP$ путём их селективного химического травления.
3. 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.
4. Определена зависимость длины волны излучения лазерного диода от величины одноосного давления.
5. Исследована спектральная зависимость степени линейной поляризации спонтанного излучения гетеродиодов на основе гетероструктур $GaInAsP/InP$, рассчитаны величины внутреннего напряжения в активном слое.
6. Определён вклад поляризационно-размерного эффекта при толщине активной области меньше 0,1мкм и разработана методика расчёта величины упругих напряжений.
7. Разработана модель лазерного диода и методика расчёта внутренних напряжений во всех слоях многослойных гетероструктурах на основе $GaInAsP/InP$.

Область применения:

1. Полученные результаты по оптимизации и повышению эффективности излучательных характеристик лазерных диодов применяются для улучшения характеристик волоконно-оптических линий связи.
2. Результаты моделирования и расчёт внутреннего напряжения в гетероструктурах применяются при проектировании и создании

приборов на основе лазерных диодов с предварительно точно заданными параметрами.

ANNOTATION

Alidodov Tutisho Meralishoevich's thesis on the topic: "The research of the internal stresses of laser diodes based on GaInPAs/InP double heterostructures according to their emissive characteristics", submitted for defense to the thesis council 6D.KOA-031 at the of S.U. Umarov Physical-technical Institute National Academy of Sciences of Tajikistan for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.07 - condensed matter physics.

Key words: heterostructures, electroluminescence spectrum, diffusion length, quantum efficiency, radiation polarization, elastic deformation, internal stress, quantum-size effect.

The relevance of the thesis is to optimize the characteristics of laser radiation, increase their efficiency, which in turn leads to material save and cost reduction when creating devices based on them.

Modeling and calculation of elastic stress in heterostructures makes it possible to manufacture laser diodes with predefined radiation parameters.

The objects of study are injection laser diodes based on two-sided GaInPAs/InP heterostructures.

The purpose of the work is to increase the radiation efficiency of laser diodes and study the effect of internal stresses on their emissive characteristics.

Research Methods. The studies were carried out using standard methods for measuring electrical and optical properties, and statistical processing of the obtained data. Spectral analysis was carried out according to the luminescent and polarization methods.

The results obtained and their novelty:

1. A method has been developed for determining the diffusion length of electrons and holes in pInP-n⁰InP-nGaInAsP-nInP structures from the electroluminescence spectrum.
2. A relative increase in the external quantum yield of radiation of light-emitting diodes (LEDs) based on GaInAsP/InP heterostructures by their selective chemical etching is obtained.
3. The possibility of changing the wavelength of the radiation and stabilizing the frequency of the laser with the help of a microcooler based on the Peltier element, which further expands the use of semiconductor lasers, is shown.
4. The dependence of the wavelength of the the laser diode radiation on the value of uniaxial pressure is determined.
5. The spectral dependence of the degree of linear polarization of the spontaneous emission of heterodiodes based on GaInAsP/InP heterostructures was studied, and the values of the internal stress in the active layer were calculated.
6. The contribution of the polarization-size effect to the thickness of the active area of less than 0.1 μm was determined and a method for calculating the value of elastic stresses was developed.
7. A laser diode model and a method for calculating internal stresses in all layers of GaInAsP/InP multilayer heterostructures have been developed.

Application field:

1. Optimization and hanging of the efficiency of the radiation characteristics of laser diodes are applied in the field of communication on fiber-optic communication lines.
2. The modeling results and calculation of the internal stresses in heterostructures is used in the design and creation of devices based on laser diodes.