

На правах рукописи

ЛЮТЕЦКИЙ Андрей Владимирович

**Асимметричные гетероструктуры раздельного ограничения и мощные  
лазеры на их основе  
( $\lambda = 1.6-1.85$  мкм)**

01.04.10 - физика полупроводников

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2009

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН.

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

Н.А. Пихтин.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, член-корр. РАН

А.Е. Жуков.

Академический физико-технологический университет Российской академии наук

доктор физико-математических наук, профессор

Л.Е. Воробьев.

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет “ЛЭТИ”  
им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится “ 24 ” декабря 2009 г. в “ 11 ” часов “ 30 ” минут на заседании совета Д-002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан “20” \_\_\_\_\_ ноября \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д-002.205.02

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

### **Актуальность темы.**

Мощные полупроводниковые лазеры в настоящее время можно выделить в отдельный подкласс полупроводниковых лазеров. Область применения мощных полупроводниковых лазеров распространяется на системы навигации, мониторинга и специального назначения, химических процессов, медицину, а также технологические системы обработки, сварки, резки и испарения материалов. Благодаря высокому КПД = 75% [1\*-4\*] одним из главных применений мощных полупроводниковых лазеров является накачка оптических усилителей, твердотельных и волоконных лазеров. Для накачки материалов на основе кристаллов, легированных ионами переходных металлов, требуется расширение диапазона длин волн излучения мощных полупроводниковых лазеров.

На диапазон длин волн 1.6-1.85 мкм приходится большое количество полос поглощения молекул газов, поэтому этот диапазон является столь же востребованным, насколько сложным к освоению в связи со свойствами исходных полупроводниковых твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP, которые обладают высокими внутренними оптическими потерями, повышенной скоростью оже-рекомбинации и большим поглощением в отщепленную SO-подзону [5\*].

Таким образом, разработка гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн 1.6-1.85 мкм, и создание мощных полупроводниковых лазеров с низкими внутренними потерями на их основе является актуальной задачей как с научной, так и с практической точек зрения.

**Основная цель работы** заключалась в исследовании свойств симметричных и асимметричных лазерных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения и разработке на их основе мощных источников излучения в диапазоне длин волн 1.6-1.85 мкм.

**Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс задач.**

1. Разработка асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур с низкими оптическими потерями и максимально возможной длиной волны излучения.
2. Исследование факторов, ограничивающих максимально достижимую мощность источников излучения в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.6-1.85$  мкм.
3. Создание и исследование свойств мощных многомодовых импульсных и непрерывных источников излучения на основе асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения.

## **Представляемые к защите научные положения и результаты.**

### **Положения.**

1. В InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктурах, имеющих значительно бóльшие внутренние оптические потери по сравнению с AlGaAs/GaAs/InGaAs гетероструктурами, расширение волновода до 2.8 мкм снижает внутренние оптические потери до  $1 \text{ см}^{-1}$  в диапазоне длин волн  $\lambda = 1.6\text{-}1.85 \text{ мкм}$ .
2. Применение в асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктурах сжато-напряженных слоев твердых растворов InGaAs в качестве активных областей позволило получить мощное лазерное излучение на длинах волн до 1.85 мкм при высоких уровнях накачки в непрерывном и импульсном режимах генерации.
3. Рост концентрации носителей заряда в активной области полупроводникового лазера за порогом генерации усиливает вклад процесса оже-рекомбинации в насыщение интенсивности стимулированного излучения.
4. Выполнение условий инверсной заселенности в кулоновской яме волноводного слоя полупроводникового лазера при высоком уровне накачки ведет к срыву генерации излучения в активной области.

### **Результаты:**

1. Разработаны и созданы методом МОС-гидридной эпитаксии асимметричные InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктуры раздельного ограничения с внутренними оптическими потерями порядка  $1 \text{ см}^{-1}$  на длине волны генерации 1.85 мкм.
2. В системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP созданы многомодовые полупроводниковые лазеры, излучающие на длине волны 1.85 мкм оптическую мощность 2.5 Вт в непрерывном и 20 Вт в импульсном режимах генерации.

### **Научная новизна.**

1. Экспериментально показано, что в InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктурах раздельного ограничения с высоким уровнем внутренних оптических потерь, расширение волновода позволяет снизить внутренние оптические потери до  $1 \text{ см}^{-1}$ .
2. Применение сжато-напряженных слоев твердых растворов InGaAs в качестве активных областей в асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP структурах позволяет при высоких уровнях накачки в непрерывном и импульсном режимах генерации расширить диапазон длин волн излучения до 1.85 мкм.
3. Установлено, что рост концентрации носителей заряда в активной области InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP полупроводниковых лазеров за порогом генерации делает определяющим вклады процессов оже-

- рекомбинации и поглощения в спин-орбитально отщепленную зону в насыщение стимулированного излучения.
4. Показано, что выполнение условий инверсной заселенности в кулоновской яме волноводного слоя полупроводникового лазера при высоком уровне накачки ведет к срыву генерации излучения в активной области.

**Практическая ценность:**

1. Разработаны асимметричные InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктуры раздельного ограничения с внутренними оптическими потерями порядка  $1 \text{ см}^{-1}$ , излучающие на длине волны 1.85 мкм.
2. В одиночных лазерах на основе асимметричных гетероструктур в системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP мощность оптического излучения в непрерывном режиме генерации доведена до 2.5 Вт.
3. В одиночных лазерах на основе асимметричных гетероструктур в системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP мощность оптического излучения в импульсном режиме генерации доведена до 20 Вт.

**Приоритет результатов.** В диссертации впервые применена модель асимметричных гетероструктур с расширенным волноводом для снижения внутренних оптических потерь в системе твердых растворов AlGaInAs/InP и InGaAsP/InP. Оптические характеристики лазерных диодов (величины внутренних оптических потерь -  $1 \text{ см}^{-1}$ , непрерывной мощности - 2.5 Вт и импульсной - 20 Вт), изготовленных на основе разработанных гетероструктур ( $\lambda = 1850 \text{ нм}$ ), находятся на уровне лучших мировых результатов на момент написания работы.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международной Конференции «CLEO/Euro`2000», 2000, 10-15 сентября, Ницца, Франция; Международном семинаре по инфракрасным источникам излучения «MICS`2001», 2001, 25-29 июня, С.Петербург; на 27-й Европейской Конференции по оптической связи «ECOC`01», 2001, 30 сентября-4 октября, Амстердам, Нидерланды; на 11-ой Международной Конференции «IC MOVPE XI», 2002, 3-7 июня, Берлин, Германия; на 4-м Российско-Белорусском семинаре по полупроводниковым лазерам и системам, 2002, 20-22 мая, Минск, Белоруссия и на 10-й и 11-й конференциях по лазерной оптике «LO`2003», 2003, 30 июня-4 июля, С.Петербург.

**Публикации.** По результатам диссертационной работы опубликовано 7 работ, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Общий

объем диссертации составляет: количество страниц \_\_\_\_, в том числе страниц основного текста \_\_\_\_, \_\_\_\_, рисунков на \_\_\_\_ страницах и \_\_\_\_ таблицы. Список цитированной литературы включает в себя \_\_\_\_ наименований.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована основная цель работы, показаны ее научная новизна, практическая ценность и приоритет результатов, приведены выносимые на защиту научные положения.

**В первой главе** дан обзор литературных данных, посвященных созданию и совершенствованию полупроводниковых лазеров.

**Первый параграф** посвящен истории развития полупроводниковых гетеролазеров. Рассмотрены лазеры на основе двойной гетероструктуры. Затем дана краткая историческая справка по развитию мощных полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом. Рассмотрены преимущества асимметричных лазерных гетероструктур, применение которых позволяет снизить внутренние оптические потери и провести селекцию мод высших порядков в широком волноводе лазерной гетероструктуры [6\*].

**Во втором параграфе** приведены данные об исследовании гетеролазеров на основе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP. Первое сообщение о создании лазерных гетероструктур на основе твердых растворов InGaAsP/InP появилось в 1974 г [7\*]. К тому времени гетеролазеры на основе других систем твердых растворов изучались уже около десяти лет, поэтому история развития лазеров на основе гетероструктур InGaAsP/InP проходила по ускоренному варианту. Основное внимание в статьях уделялось достигнутым результатам и сложностям, привносимым особенностями используемых полупроводниковых материалов.

Анализ литературных данных позволил заключить, что твердые растворы InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP являются единственно возможным материалом для создания мощных непрерывных и импульсных источников излучения в диапазоне длин волн 1600-1850 нм, а оптимальной конструкцией для создания мощных полупроводниковых лазеров является квантово-размерная двойная гетероструктура раздельного ограничения с расширенным волноводом.

**Во второй главе** исследована возможность максимального увеличения длины волны излучения в мощных полупроводниковых лазерах на основе InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения с напряженной квантово-размерной активной областью [1,2].

Проведен анализ влияния геометрических и материальных параметров эпитаксиальных слоев активной области и волновода на длину волны излучения активной области гетероструктуры. Показано различие расчетных и экспериментально определенных величин критической толщины напряженных активных областей. Обоснована необходимость экспериментального определения критической толщины напряженной активной области в мощных полупроводниковых лазерах [3].

**В первом параграфе** проанализировано влияние деформации на энергетическую зонную структуру полупроводников со структурой цинковой обманки. Для увеличения длины волны излучения в двойной гетероструктуре на основе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP требуется изменение состава твердого раствора InGaAs, которое ведет к возникновению двухосного напряжения сжатия в эпитаксиальном слое активной области. Двухосное напряжение сжатия твердых растворов InGaAs или InGaAsP ослабляет уменьшение ширины запрещенной зоны, возникающее при изменении состава твердых растворов. Эффект расщепления подзон легких и тяжелых дырок, возникающий также в результате двухосного сжатия, приводит к «всплытию» подзоны тяжелых дырок и увеличению длины волны излучения.

**Во втором параграфе** рассмотрено влияние деформации на глубину квантовых ям и на положения уровней размерного квантования для электронов и дырок в напряженной квантовой яме. Внесение дополнительных напряжений сжатия в активную область лазерной гетероструктуры отдельного ограничения приводит к уменьшению энергетической глубины квантовой ямы для электронов, следствием чего является уменьшение энергии их уровня размерного квантования, и, соответственно, увеличение длины волны генерации. Однако уменьшение глубины квантовой ямы приводит к увеличению температурной чувствительности полупроводниковых лазеров и внутренних оптических потерь в них.

**В третьем параграфе** проведены исследования уровней размерного квантования в напряженных слоях тройных  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}$  и четверных  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  твердых растворов при двух значениях деформации  $\varepsilon = 1\%$  и  $\varepsilon = 1.5\%$ . В качестве волноводного слоя рассматривались твердые растворы InGaAsP и AlGaInAs, изопериодические с InP. На рис.1 приведены зависимости длины волны излучения от толщины, деформации и материалов напряженного активного и волноводного слоев [3]. Наибольшее увеличение длины волны излучения достигнуто в гетероструктуре с максимально сжатой-напряженной квантовой ямой наибольшей толщины. Тройной твердый раствор InGaAs в активной области предпочтительнее, чем четверной твердый раствор InGaAsP.

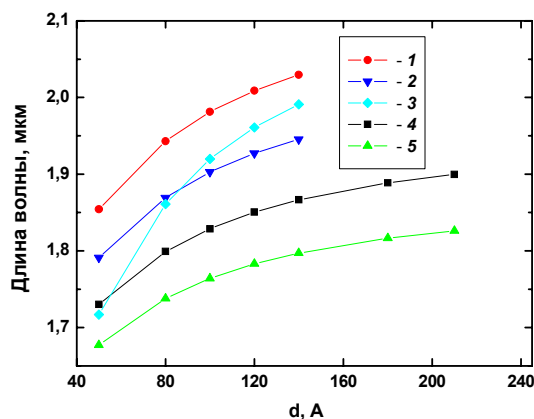


Рис. 1. Зависимость длины волны от толщины квантовой ямы ( $E_{gw}=1$  эВ):

- 1-InGaAs/InGaAsP ( $\epsilon=1.5\%$ )
- 2-InGaAsP/InGaAsP( $\epsilon=1.5\%$ )
- 3-InGaAs/AlGaInAs( $\epsilon=1.5\%$ )
- 4-InGaAs/InGaAsP ( $\epsilon=1\%$ )
- 5-InGaAsP/InGaAsP ( $\epsilon=1\%$ )

Независимо от состава напряженной квантовой ямы, увеличение ее толщины от 50 до 100 Å за счет смещения уровней размерного квантования увеличивает длину волны излучения примерно на 100 нм (40 мэВ).

**В четвертом параграфе** рассмотрено влияние состава твердого раствора волноводного слоя на длину волны излучения. Исследовались гетероструктуры, в которых волноводные слои состояли из InGaAsP или AlGaInAs твердых растворов, изопериодических с InP. Применение твердых растворов AlGaInAs в качестве эмиттеров и волноводов теоретически увеличивает температурную стабильность лазерных гетероструктур по сравнению со структурами, в которых используются твердые растворы InGaAsP. Тем не менее, применение твердых растворов InGaAsP в качестве волновода позволяет достичь в напряженной квантовой яме больших длин волн излучения, чем в случае AlGaInAs твердых растворов. Это обусловлено тем, что уменьшение ширины запрещенной зоны волноводных слоев способствует увеличению длины волны генерации. Однако при этом уменьшается энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в активной области, что приводит к делокализации носителей заряда в активной области.

**В пятом параграфе** представлены результаты исследований критической толщины активной области и выбора критериев для экспериментального определения критической толщины активной области лазерных гетероструктур с напряженной активной областью. Критическая толщина квантовой ямы может быть определена как расчетным путем, так и экспериментально. Она зависит: от материалов квантовой ямы и волноводного слоя, от температуры роста гетероструктуры, от ориентации подложки, а также от метода



изготовления слоев. Расчетное значение критической толщины может быть сильно завышено, поэтому его необходимо определять экспериментально. В связи с этим, методом МOC- гидридной эпитаксии изготавливались модельные гетероструктуры с эпитаксиальными слоями твердых растворов InGaAs и InGaAsP различной толщины в центре волноводного слоя для исследований внешнего квантового выхода фотолюминесценции. Согласно расчетам длина волны излучения 2 мкм может быть получена с использованием квантовой ямы из тройного твердого раствора InGaAs толщиной 120 Å, имеющего рассогласование постоянной кристаллической решетки с InGaAsP волноводом 1.5%. Максимальное значение квантового выхода фотолюминесценции достигалось при толщине эпитаксиальных слоев 60-90 Å. Дальнейшее увеличение толщины эпитаксиальных слоев приводило к снижению квантового выхода. Поэтому окончательный выбор условий для получения мощных полупроводниковых лазеров с максимальной длиной волны излучения на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения на подложке фосфида индия необходимо произвести после экспериментальных исследований полупроводниковых лазеров на основе таких гетероструктур.

**В третьей главе** проведены исследования целесообразности применения асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом в системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP. Представлены результаты исследований излучательных характеристик асимметричных и симметричных лазерных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения. Продемонстрирована возможность снижения внутренних оптических потерь до  $1 \text{ см}^{-1}$  и создания мощных многомодовых лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 1600-1850 нм в непрерывном режиме генерации [4,6].

**В первом параграфе** проведен анализ внутренних оптических потерь в лазерных гетероструктурах раздельного ограничения. Поглощение излучения в слоях полупроводниковой гетероструктуры приводит к возбуждению электронов и дырок и, как следствие, к внутризонным и межподзонным переходам. Поглощение света при межподзонных переходах в исследуемых твердых растворах за счет перераспределения в боковые X или L – долины оказывается несущественным, а переходы дырок в спин-орбитально отщепленную (SO) зону существенно возрастают с уровнем накачки. Поглощение свободными носителями заряда возрастает с ростом концентрации и длины волны поглощаемого света. Для твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP, излучающих в диапазоне 1600-1850 нм, оптические потери пропорциональны:  $\alpha_i \sim \lambda^{2.5}$ .

Проведенные исследования поглощения света в активной области гетероструктур, изготовленных на основе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP, показывают, что основной вклад в оптические потери вносят внутризонные переходы носителей, взаимодействующих с полярными оптическими фононами, а также межподзонное поглощение света дырками в валентной зоне. Суммарный уровень оптических потерь в лазерных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP структурах превышает оптические потери в лазерных структурах на основе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs, поэтому только экспериментально можно установить целесообразность применения асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом в системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP.

**Во втором параграфе,** согласно концепции мощных полупроводниковых лазеров, смоделированы и изготовлены асимметричные и симметричные AlGaInAs/InP лазерные гетероструктуры раздельного ограничения с различными толщинами волновода. Рассмотрены технологии МОС-гидридной эпитаксии, примененной для выращивания лазерных гетероструктур, и постростовые технологии изготовления мощных многомодовых лазеров конструкции «мелкая меза».

В лазерных гетероструктурах раздельного ограничения расширение волновода приводит к выполнению пороговых условий для мод высших порядков наряду с фундаментальной модой. Существует несколько способов селекции мод высших порядков за счет внесения дополнительных потерь в лазерную гетероструктуру. В лазерах на основе твердых растворов AlGaInAs/InP с высокими внутренними оптическими потерями применение таких подходов приводит к снижению максимально достижимой излучаемой мощности. В работе был применен способ селекции мод посредством изменения пороговых условий для различных мод волновода [4]. Пороговые условия для мод высших порядков при расширении волновода не должны приближаться к пороговым условиям фундаментальной моды. Из условия для порога генерации следует, что величина фактора оптического ограничения является удобным инструментом для управления пороговыми условиями мод высших порядков. Был проведен расчет факторов оптического ограничения мод для волноводов с различной толщиной и выбраны положения активной области в волноводах лазерных структур, при которых фактор оптического ограничения фундаментальной моды существенно превышает остальные [6].

Для проведения сравнительных исследований, в системе твердых растворов AlGaInAs/InP методом МОС-гидридной эпитаксии были выращены симметричные и асимметричные лазерные гетероструктуры

раздельного ограничения. На их основе были изготовлены многомодовые лазеры с 100 мкм апертурой и различными длинами резонатора [4].

В третьем параграфе проведены исследования и анализ излучательных характеристик полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения с различной толщиной волновода. Измерения ватт-амперных характеристик проводились для серий лазеров с длиной резонатора 1 – 4 мм в непрерывном режиме генерации. Контроль температуры теплоотвода, на который смонтирован кристалл полупроводникового лазера, в непрерывном режиме генерации проводился с помощью системы термостабилизации с элементом Пельтье. Измерение излучаемой оптической мощности выполнялось с помощью калиброванного болометра Ophir 10A. Исследования зависимостей дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора позволили определить внутренние оптические потери в структурах с различной толщиной волноводного слоя. В асимметричных AlGaInAs/InP лазерных гетероструктурах с расширенным волноводом внутренние оптические потери удалось снизить до  $1 \text{ см}^{-1}$ , что гораздо ниже, чем в стандартных гетероструктурах с тонким волноводом, где потери составляют  $22 \text{ см}^{-1}$ . Столь значительное снижение внутренних оптических потерь позволило сохранять высокие значения дифференциальной эффективности в лазерах с большой длиной резонатора.

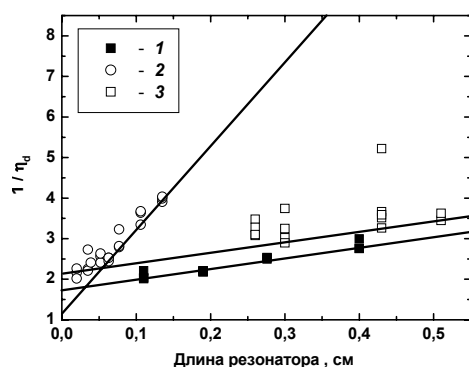


Рис. 2. Экспериментальные зависимости обратной величины внешней дифференциальной квантовой эффективности ( $1/\eta_d$ ) от длины резонатора лазерного диода с различной толщиной волновода, мкм: 1 – 1,7, 2 – 0,2, 3 – 2,8.

Увеличение толщины волновода несколько повысило пороговую плотность тока для лазеров с бесконечно большой длиной резонатора, но снизило ее зависимость от длины резонатора. Достигнутые улучшения характеристик лазерных гетероструктур по сравнению с симметричными структурами с тонкими волноводами позволило увеличить излучаемую оптическую мощность в непрерывном режиме генерации до 2 Вт [4]. Необходимо отметить, что вследствие высоких внутренних оптических потерь в твердых растворах AlGaInAs/InP, оптические потери в

AlGaInAs/InP гетероструктурах в несколько раз выше, чем в гетероструктурах, изготовленных на основе твердых растворов AlGaAs/GaAs/InGaAs. Однако достигнутое снижение внутренних оптических потерь в асимметричных AlGaInAs/InP гетероструктурах с расширенным волноводом позволило увеличить длину полупроводниковых лазеров без снижения дифференциальной квантовой эффективности и увеличить оптическую мощность. Применение сжато-напряженных активных областей позволило достичь в непрерывном режиме генерации длины волны излучения 1.85 мкм при мощности излучения 2 Вт [4]. Следует отметить, что применение асимметричной гетероструктуры обеспечило полное подавление генерации мод высших порядков и сохранение генерации на фундаментальной моде во всем диапазоне токов накачки.

**В четвертом параграфе** проведены исследования и анализ излучательных характеристик полупроводниковых лазеров на основе InGaAsP/InP гетероструктур раздельного ограничения с различной толщиной волновода. Для создания полупроводниковых лазеров, излучающих на длинах волн 1.6-1.85 мкм, успешно используются два типа гетероструктур: InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP. Гетероструктуры AlGaInAs/InP имеют некоторое теоретическое предпочтение, поскольку обеспечивают больший энергетический разрыв в ширинах запрещенных зон активной области и эмиттеров. Однако реальные технологические условия накладывают дополнительные ограничения при создании лазерной гетероструктуры. Поэтому были смоделированы и изготовлены симметричные и асимметричные InGaAsP/InP лазерные гетероструктуры раздельного ограничения с толщиной волновода 0.5 мкм и 2.5 мкм, соответственно. В изготовленных на их основе мезаполосковых лазерах были исследованы излучательные характеристики. Внутренние оптические потери в лазерах на основе асимметричных InGaAsP/InP лазерных гетероструктур составили  $2 \text{ см}^{-1}$ , что обеспечило возможность увеличения оптической мощности излучения до 2.5 Вт [7] в непрерывном режиме генерации на длине волны 1.75 мкм. В лазерах на основе симметричных гетероструктур InGaAsP/InP максимальная непрерывная мощность составила 1.5 Вт [3]. Применение системы твердых растворов InGaAsP/InP позволило достичь некоторого преимущества в излучаемой оптической мощности, но в целом использование обоих типов гетероструктур позволяет решать поставленную задачу: создания мощных лазеров на длину волны излучения 1.6-1.85 мкм в равной степени. Это обусловлено тем, что в мощных лазерах на основе реальных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом наблюдается идентичные температурная чувствительность пороговой плотности тока и дифференциальной квантовой эффективности ( $T_0 \sim 55 \text{ К}$  и  $T_1 \sim 150 \text{ К}$ ).

Применение асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом позволяет снизить внутренние оптические потери до  $1-2 \text{ см}^{-1}$ , повысить излучаемую оптическую мощность до 2.5 Вт, а использование сжато-напряженных квантово-размерных активных областей – получить излучение на длине волны 1.75-1.8 мкм [7].

**В четвертой главе** исследована возможность создания мощных импульсных полупроводниковых лазеров на основе асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом. Исследованы излучательные характеристики созданных импульсных источников излучения. Рассмотрены причины, ограничивающие максимальную мощность излучения в лазерах на основе InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктур [5, 6].

**В первом параграфе** продемонстрировано успешное применение асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с расширенным волноводом для создания мощных импульсных источников излучения в системе твердых растворов InGaAsP и AlGaInAs, изопериодических с InP. При переходе к импульсной токовой накачке (100 нс, 10 кГц) удалось достичь увеличения мощности оптического излучения до 20 Вт [6] по сравнению с лазерами со стандартным тонким волноводом. Однако в импульсных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP лазерах с расширенным волноводом насыщение ватт-амперной характеристики было выражено гораздо сильнее, чем в AlGaAs/GaAs/InGaAs лазерах с расширенным волноводом [6].

**Во втором параграфе** исследованы спектральные характеристики импульсных источников излучения при высоких уровнях токовой накачки (до 200 А). С ростом тока накачки в InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP лазерах в спектрах излучения обнаружено три особенности: расширение спектра с током накачки в длинноволновую и в коротковолновую области, а при достижении некоторой мощности излучения, насыщение интенсивности максимума спектра излучения [5].

Насыщение интенсивности максимума спектра излучения наблюдается во всех полупроводниковых лазерах на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения независимо от длины волны излучения. При этом мощность оптического излучения полупроводникового лазера продолжает расти. Расширение спектра генерации с током накачки косвенно указывает на рост концентрации носителей заряда в активной области лазерной гетероструктуры. Спектры спонтанного излучения, при достижении некоторого тока накачки, состоят из двух полос – излучения активной области и волноводного слоя. С увеличением тока накачки в спектре излучения волноводного слоя наблюдалась стимуляция, а затем и генерация. Следовательно, в случае выполнения пороговых условий в волноводных слоях, активизируется

новый канал стимулированной рекомбинации, совпадающий с полным насыщением ватт-амперной характеристики.

**В третьем параграфе** исследовалось явление роста концентрации носителей заряда в активной области лазерной гетероструктуры за порогом генерации. С увеличением тока накачки спектр генерации расширяется, что свидетельствует о выполнении пороговых условий для высокоэнергетичных уровней размерного квантования в энергетическом спектре квантовой ямы активной области. Из сопоставления коротковолнового края спектра генерации и порогового тока лазера, обеспечивающего выбранную длину волны на пороге генерации, определялась зависимость пороговой плотности тока от длины волны генерации для исследуемой структуры. Полученные зависимости позволяют определить пороговую концентрацию носителей заряда в активной области от длины волны генерации. Пороговая концентрация в активной области возрастала в 6–7 раз как для лазеров, изготовленных на подложках InP, так и на подложках GaAs [5]. В то же время, как это уже отмечалось в § 4.2, в полупроводниковых лазерах на подложках GaAs и InP максимальная мощность излучения в импульсном режиме генерации различалась по величине в 5-6 раз [6]. Это свидетельствует о наличии другой причины для столь существенного различия в максимально достижимых мощностях оптического излучения. Полное насыщение ватт-амперной зависимости наступало при выполнении пороговых условий для волноводной кулоновской ямы [5].

**В четвертом параграфе** проведены исследования вклада оже-рекомбинации в насыщение ватт-амперных характеристик мощных полупроводниковых лазеров на основе асимметричные гетероструктур раздельного ограничения, изготовленных на подложках InP ( $\lambda = 1.76$  и  $1.88$  мкм) и GaAs ( $\lambda = 1.04$  мкм).

Процесс стимулированной рекомбинации претерпевает изменения в условиях возрастания концентрации носителей заряда в активной области за порогом генерации. Для расчета этих изменений использовалась система уравнений баланса электронов и баланса фотонов в стационарных условиях. Было получено, что в случае сверхвысоких уровней накачки при росте концентрации носителей заряда в активной области за порогом генерации нарастание скорости стимулированного излучения замедляется из-за увеличения времени жизни электронов в квантовой яме, что снижает внутреннюю квантовую эффективность излучения. В результате выражение для расчета зависимости излучаемой мощности от тока накачки принимает следующий вид:

$$P = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \cdot \frac{\hbar\omega}{q} \cdot (\eta_i \cdot I - C \cdot n \cdot p^2 \cdot q \cdot V_a) \quad (1)$$

где:  $\alpha_m$  - внешние оптические потери,  $\alpha_i$  - внутренние оптические потери,  $\hbar\omega$  - энергия фотона,  $C$  - коэффициент - оже-рекомбинации,  $n$ ,  $p$  - концентрации электронов и дырок в активной области,  $I$  - ток накачки,  $q$  - заряд электрона,  $V_a$  - объем активной области,  $\eta_i$  - внутренняя квантовая эффективность, определяемая как доля электронов, инжектируемых в активную область лазера.

Используя методику расчета концентрации носителей заряда в активной области лазерной гетероструктуры [5], были определены зависимости мощности оптического излучения от плотности тока для высоких уровней токовой накачки. В расчетах использовались следующие значения оже-коэффициентов:  $C = 2.5 \cdot 10^{-29} \text{ см}^6/\text{с}$  ( $\lambda = 1.04 \text{ мкм}$ ),  $C = 3.6 \cdot 10^{-28} \text{ см}^6/\text{с}$  ( $\lambda = 1.76 \text{ мкм}$ ) и  $C = 4.8 \cdot 10^{-28} \text{ см}^6/\text{с}$  ( $\lambda = 1.88 \text{ мкм}$ ). Расчет дал хорошее согласие с экспериментальными ватт-амперными характеристиками. Различия в насыщении ватт-амперных характеристик лазеров на подложке арсенида галлия и фосфида индия полностью определяются разницей в величинах оже-коэффициентов [6].

Процессы безызлучательной оже-рекомбинации повышают пороговый ток пропорционально коэффициенту оже-рекомбинации, а за порогом генерации при росте концентрации «отбирают» часть тока от стимулированной рекомбинации, что приводит к более быстрому насыщению ватт-амперных характеристик [6].

**В заключении** диссертации приведены основные результаты исследований.

1. Разработаны и созданы методом МОС-гидридной эпитаксии асимметричные InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктуры раздельного ограничения с внутренними оптическими потерями порядка  $1 \text{ см}^{-1}$  на длине волны генерации 1.85 мкм.
2. Применение в асимметричных InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP гетероструктурах сжато-напряженных слоев твердых растворов InGaAs в качестве активных областей позволило получить эффективную лазерную генерацию в диапазоне длин волн до 1.85 мкм при высоких уровнях накачки в непрерывном и импульсном режимах генерации.
3. Показано, что рост концентрации носителей заряда в активной области полупроводникового лазера за порогом генерации усиливает с током накачки вклад процесса оже-рекомбинации в насыщение стимулированного излучения полупроводниковых лазеров на основе системы твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP.
4. Экспериментально показано, что выполнение условий инверсной заселенности в кулоновской яме волноводного слоя полупроводникового лазера при высоком уровне накачки ведет к срыву генерации излучения в активной области.

5. В системе твердых растворов InGaAsP/InP и AlGaInAs/InP созданы многомодовые полупроводниковые лазеры, излучающие на длине волны 1.85 мкм оптическую мощность 2.5 Вт в непрерывном и 20 Вт в импульсном режимах генерации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Е.Н. Голикова, В.А. Курешов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. Мощные InGaAsP/InP – лазеры, излучающие на длине волны 1.8 мкм. Письма в ЖТФ, 2002, т. 28, вып. 3, с. 66-72.
2. А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, Ю.А. Рябоштан, Е.Н. Голикова, И.С. Тарасов, Мощные одномодовые лазерные диоды с длинами волн излучения  $\lambda=1.7-1.8$  мкм. Письма в ЖТФ, 2003, т. 29, вып.7, с. 55-63.
3. А.В. Лютецкий, А.Ю. Лешко, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Н.В. Фетисова, В.В. Шамахов, А.Ю. Андреев, Ю.А. Рябоштан, Е.Н. Голикова, И.С. Тарасов, 1.7-1.8 мкм лазерные диоды на основе квантово-размерных InGaAsP/InP–гетероструктур. ФТП, 2003, т.37, в.11, с.1394-1401.
4. А.В. Лютецкий, К.С. Борщёв, А.Д. Бондарев, Т.А. Налет, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, В.А. Симаков, И.С. Тарасов. 1.8 мкм лазерные диоды на основе квантово-размерных AlInGaAs/InP-гетероструктур. ФТП, 2007, т. 41, вып. 7, с. 883 – 887.
5. Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, М.А. Хомылев, В.В. Шамахов, К.С. Борщёв, И.Н. Арсентьев, И.С. Тарасов. Насыщение ватт-амперных характеристик мощных лазеров ( $\lambda=1.0-1.8$  мкм) в импульсном режиме генерации. ФТП, 2007, т. 41, вып. 8, с.1003 – 1008.
6. А.В. Лютецкий, К.С. Борщёв, Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов. Вклад оже-рекомбинации в насыщение ватт-амперных характеристик мощных полупроводниковых лазеров ( $\lambda =1.0-1.9$  мкм). ФТП, 2008, т. 42, вып. 1, с.106-112.
7. А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, А.Ю. Лешко, С.О. Слипченко, З.Н. Соколова, Ю.А. Рябоштан, А.А. Мармалюк, И.С. Тарасов. Мощные диодные лазеры ( $\lambda = 1.7-1.8$  мкм) на основе асимметричных квантово-размерных InGaAsP/InP гетероструктур раздельного ограничения. ФТП, 2009, т. 43, вып. 12, с. 1646-1649.



### Цитируемая литература

- 1\*. N.A. Pikhtin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov and Zh.I. Alferov. 16 W continuous-wave output power from 100- $\mu\text{m}$ -aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure. *Electron. Lett.*, 2004, vol. 40, no. 22, p. 1413-1414.
- 2\*. Д.А. Лившиц, А.Ю. Егоров, И.В. Кочнев, В.А. Капитонов, В.М. Лантратов, Н.Н. Леденцов, Т.А. Налет, И.С. Тарасов. Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур. *ФТП*, 2001, т. 35, вып. 3, с. 380 – 384.
- 3\*. С.О. Слипченко, Н.А. Пихтин, Н.В. Фетисова, М.А. Хомылев, А.А. Мармалюк, Д.Б. Никитин, А.А. Падалица, П.В. Булаев, И.Д. Залевский, И.С. Тарасов. Лазерные диоды ( $\lambda = 0.98 \text{ мкм}$ ) с узкой диаграммой направленности в вертикальной плоскости и низкими внутренними оптическими потерями. *Письма в ЖТФ*, 2003, т. 29, вып. 23, с. 26 – 34.
- 4\*. A. Al-Muhanna, L.J. Mawst, D. Botez, D.Z. Garbuzov, R.U. Martinelly, J.C. Conolly. High-power ( $>10 \text{ W}$ ) continuous-wave operation from 100  $\mu\text{m}$ -aperture 0.97  $\mu\text{m}$ -emitting Al-free diode lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, vol. 73, No. 9, p. 1182 – 1184.
- 5\*. J.S.Major, D.W.Nam, J.S.Osinski, D.F.Welch. High Power 2.0  $\mu\text{m}$  InGaAsP Laser Diodes. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1993, No.5, p.594-599.
- 6\*. С.О. Слипченко, Д.А. Винокуров, Н.А. Пихтин, З.Н. Соколова, А.Л. Станкевич, И.С. Тарасов, Ж.И. Алферов. Сверхнизкие внутренние оптические потери в квантово-размерных лазерных гетероструктурах раздельного ограничения. *ФТП*, 2004, т. 38, вып. 12, с. 1477 – 1486.
- 7\*. А.П. Богатов, Л.М. Долгинов, П.Г.Елисеев, М.Г. Мильвидский, Б.В. Свердлов, Е.Г.Шевченко. Излучательные характеристики лазерных гетероструктур на основе InP-GaInPAs. *ФТП*, 1974, т.9, в.10, с.1956-1961.