

На правах рукописи

Шашкин

ШАШКИН Илья Сергеевич

**Физические принципы повышения мощности
полупроводниковых лазеров на основе
AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур в непрерывном
режиме генерации.**

01.04.10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор, зав. лаб. И.С. Тарасов.

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук,
профессор, профессор Л.Е. Воробьев.
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

доктор физико-математических наук, ген. директор Г.Т. Микаелян.
ОАО "Научно-производственное предприятие "Инжект"

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится " 17 " мая 2012 г. в " 11 " часов " 30 " минут на заседании совета Д-002.205.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан " 16 " апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д-002.205.02
доктор физико-математических наук


Д.М. Сорокин

Актуальность темы.

Полупроводниковые лазеры неуклонно вытесняют газовые, твердотельные и другие источники когерентного излучения из всех областей их практического применения. За последние годы в физике и технологии полупроводников сформировалось направление мощных полупроводниковых лазеров на базе концепции асимметричных лазерных гетероструктур раздельного ограничения с малыми внутренними оптическими потерями [1*]. Успехи, достигнутые в развитии мощных полупроводниковых лазеров трудно переоценить: мощность оптического излучения из одиночного источника превышает 16 Вт, а КПД достигает 75% в непрерывном режиме генерации [2* – 4*]. Достигнутые характеристики ставят вне конкуренции мощные полупроводниковые лазеры в системах оптической накачки волоконных и твердотельных квантовых генераторов, и технологических применениях по обработке материалов. Непрерывное развитие подобных лазерных систем требует постоянного совершенствования и улучшения мощностных характеристик полупроводниковых источников излучения. Прогресс в развитии эпитаксиальных и постростовых технологий привел к тому, что максимально достижимую мощность полупроводникового лазера стали ограничивать главным образом фундаментальные причины, ведущие к насыщению ватт-амперных характеристик, а не свойства, зависящие от уровня технологического исполнения лазера. Поэтому увеличение оптической мощности требует ясного понимания не только конструктивных и технологических, но также фундаментальных причин, ограничивающих оптическую мощность излучения полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации.

Таким образом, исследование свойств асимметричных гетероструктур раздельного ограничения и определение физических принципов повышения мощности полупроводниковых лазеров является актуальной задачей.

Основная цель работы заключалась в исследовании свойств квантово-размерных асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения и определении физических принципов повышения оптической мощности в непрерывном режиме генерации полупроводниковых лазеров на их основе.

Для достижения поставленной цели решался следующий комплекс задач.

1. Разработка асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения с минимальной пороговой концентрацией носителей заряда и низкими внутренними оптическими потерями.
2. Определение факторов, приводящих к снижению дифференциальной квантовой эффективности и ограничивающих максимально достижимую мощность полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации.
3. Достижение высокой температурной стабильности характеристик мощных полупроводниковых лазеров на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения.
4. Исследование свойств мощных многомодовых непрерывных источников излучения на основе квантово-размерных, асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения.

Представляемые к защите научные положения и результаты.

Положения.

1. Снижение дифференциальной квантовой эффективности мощного полупроводникового лазера с увеличением тока накачки в непрерывном режиме генерации происходит в результате увеличения внутренних оптических потерь при сохранении величины внутреннего квантового выхода стимулированного излучения близкой к 100%.
2. Температурная делокализация носителей заряда в волноводный слой гетероструктуры раздельного ограничения является основной причиной роста внутренних оптических потерь, и ее подавление исключает снижение дифференциальной квантовой эффективности полупроводникового лазера.
3. Увеличение концентрации делокализованных носителей заряда в расширенном волноводном слое гетероструктуры раздельного ограничения до величины $n \sim 3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ ведет к резкому снижению дифференциальной квантовой эффективности и полному насыщению ватт-амперной характеристики мощных непрерывных полупроводниковых лазеров.
4. Снижение пороговой концентрации в квантово-размерных активных областях непрерывного полупроводникового лазера при сохранении низких внутренних оптических потерь ведет к максимальной линейности ватт-амперной характеристики и достижению максимальной мощности в непрерывном режиме генерации.

Результаты.

1. Созданы асимметричные AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктуры раздельного ограничения с длиной волны излучения $\lambda \sim 1060$ нм, величиной внутренних оптических потерь $\alpha \sim 0,17 \text{ см}^{-1}$ и характеристическим параметром температурной стабильности пороговой плотности тока $T_o = 220$ К.

2. Созданы одиночные многомодовые лазеры на основе асимметричных гетероструктур в системе твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs с непрерывной выходной мощностью оптического излучения 21 Вт при комнатной температуре и сохраняющие 5 Вт излучаемой оптической мощности при увеличении температуры до 140 °С.

Научная новизна.

1. Исследован эффект температурной делокализации носителей заряда в волноводный слой полупроводникового лазера на основе асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения в зависимости от параметров активной области.

2. Установлено, что увеличение температуры активной области мощного полупроводникового лазера за порогом генерации приводит к росту внутренних оптических потерь при сохранении величины внутреннего квантового выхода стимулированного излучения близкой к 100%.

3. Показано, что внутренние оптические потери растут в результате увеличения концентрации делокализованных носителей заряда в волновод, и подавление температурной делокализации исключает рост внутренних потерь и снижение дифференциальной квантовой эффективности.

Практическая ценность:

1. Экспериментально установлены факторы, снижающие температурную делокализацию носителей заряда в волновод асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения (пороговая концентрация носителей заряда, температурная стабильность пороговой концентрации носителей заряда, энергетическая глубина активной области, толщина и число квантовых ям активной области).

2. Созданы асимметричные AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктуры раздельного ограничения с характеристическим параметром температурной стабильности пороговой плотности тока $T_o = 220$ К и величиной внутренних оптических потерь $0,17 \text{ см}^{-1}$.

3. В одиночных многомодовых лазерах на основе асимметричных гетероструктур в системе твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs достигнута непрерывная выходная мощность оптического излучения 21 Вт при комнатной температуре и 5 Вт излучаемой оптической мощности при увеличении температуры до 140 °С.

Приоритет результатов. В диссертации впервые определены и практически применены физические и технологические принципы увеличения оптической мощности полупроводниковых лазеров на основе асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения. Достигнутые оптические характеристики полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации (внутренние оптические потери – $0,17 \text{ см}^{-1}$; непрерывная выходная мощность оптического излучения – 21 Вт; характеристический параметр $T_0 = 220 \text{ К}$), находятся на уровне лучших мировых результатов на момент написания работы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Международной конференции «Лазеры. Измерения. Информация», 2009, 2 – 4 июня, Санкт-Петербург; на II симпозиуме по «Когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур». Москва-Звенигород, 16-18 ноября 2009 г.; на Конференции «Физика и астрономия», 2009, 29 – 30 октября, Санкт-Петербург; на 2-ом Симпозиуме «Полупроводниковые лазеры: физика и технология», 2010, 10 – 12 ноября; Санкт-Петербург; на конференции «Scientific and applied conf. Opto-nano electronics and renewable energy sources», 2010, Varna, Bulgaria; на международном симпозиуме «XVIII Int. Symp. on Gas Flow and Chemical Lasers & High Power Lasers», 2010, 30 aug.-3 sept., Sofia, Bulgaria.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликовано 5 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 _____ таблиц. 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 приведён обзор литературных данных, посвященных созданию и совершенствованию мощных полупроводниковых лазеров на основе квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения.

В первом параграфе обсуждается концепция мощных полупроводниковых лазеров. Рассмотрены преимущества применения широкого волновода и асимметричной лазерной гетероструктуры: более низкая плотность мощности на выходном зеркале, возможность увеличить длину резонатора и снизить величину порогового тока благодаря сверхнизким внутренним оптическим потерям, а также селекция мод высших порядков.

Во втором параграфе приведён обзор по мощным непрерывным лазерам, их ватт-амперные характеристики, сроки службы, технологии пассивации резонаторных граней, рабочие температуры, расходимость излучения в дальней зоне. К настоящему времени достигнуты успехи в увеличении сроков службы благодаря высочайшему уровню постростовых технологий обработки зеркал полупроводниковых лазеров [5*]. Но, тем не менее, задача повышения линейности ватт-амперной характеристики до больших токов накачки и повышения выходной оптической мощности полупроводникового лазера остаётся актуальной.

В третьем параграфе представлены выводы к обзору литературных данных.

Во второй главе описано изготовление квантово-размерных асимметричных лазерных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур и полупроводниковых лазеров на их основе и проведена их характеристика.

В первом параграфе подробно рассмотрены квантово-размерные лазерные гетероструктуры в системе твёрдых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs и сформированные из них полупроводниковые лазеры, на которых проводились экспериментальные исследования. Активная область лазера состояла из одной или двух сжатонапряженных $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ квантовых ям толщиной 50 – 90 Å. Квантовые ямы были «встроены» в волновод из GaAs или из твердого раствора $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x \leq 0.2$. Большинство исследуемых структур имело широкий волновод толщиной 1.5 – 2.0 мкм, в котором активный слой был смещён на 0.2 – 0.3 мкм в направлении Р-эмиттера. Материалом эмиттеров *n*- и *p*-типа проводимости являлся твердый раствор AlGaAs с содержанием алюминия 25 – 35 %.

С использованием фотолюминесцентных методик установлены границы изменения толщин и составов напряженного твердого раствора

квантово-размерных активных областей для достижения длины волны излучения 1060 нм.

С помощью просвечивающего электронного микроскопа высокого разрешения и рентгеновского микроскопа получена информация о составе, толщине и границах эпитаксиальных слоев, которая продемонстрировала полное соответствие задаваемых и измеряемых параметров, а также возможность прецизионного управления параметрами квантово-размерных слоев исследуемых лазерных гетероструктур.

Во втором параграфе проанализированы лазерные конструкции типа «мелкая меза» и «глубокая меза». Описана технологическая схема формирования полупроводниковых лазеров. Показаны преимущества конструкции типа «глубокая меза» по сравнению с конструкцией типа «мелкая меза». Конструкция типа «глубокая меза» позволяет исключить срыв генерации основной моды резонатора Фабри-Перо с увеличением тока накачки [6*].

Исследованные в диссертационной работе лазеры имели конструкцию типа «глубокая меза» с апертурой излучения 100 мкм и длиной резонатора Фабри-Перо 1 – 6 мм.

В третьем параграфе представлены выводы ко второй главе диссертационной работы.

В третьей главе исследованы фундаментальные причины ограничения мощности многомодовых лазеров на основе квантово-размерных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения в системе твёрдых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs при работе в непрерывном режиме генерации.

В первом параграфе показано, что при непрерывной накачке полупроводникового лазера его активная область может разогреваться относительно теплоотвода лазера на десятки градусов [1].

На рис.1 (правая шкала) приведена экспериментальная зависимость температуры активной области от тока накачки. Величина разогрева активной области рассчитывалась по сдвигу длинноволновой части лазерного спектра при увеличении тока накачки. На рис.1 (левая шкала) приведена ватт-амперная характеристика полупроводникового лазера длиной 3 мм с апертурой излучения 100 мкм, полученная в непрерывном режиме генерации при температуре теплоотвода 20°C.

Перегрев активной области зависит также от КПД полупроводникового лазера, максимальное значение которого в исследуемых лазерах достигает 55 – 65 %, при этом тепловое сопротивление составляет величину 4 – 5 град/Вт.

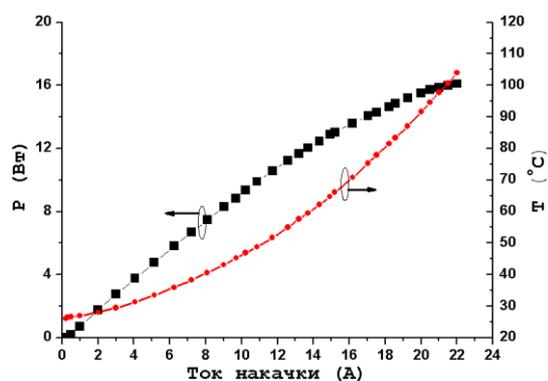


Рис.1 – Ватт-амперная характеристика полупроводникового лазера (P) длиной 3 мм с апертурой излучения 100 мкм, полученная в непрерывном режиме при температуре теплоотвода 20 °С (левая шкала), и зависимость температуры активной области (T) от тока накачки (правая шкала).

Во втором параграфе приводятся результаты экспериментального исследования температурной зависимости пороговой плотности тока [1, 2], определяется температурная зависимость пороговой концентрации, рассчитываются внутренние оптические потери в структурах разных типов в диапазоне температур 20 – 140 °С. При температуре выше комнатной наблюдается сильная температурная зависимость пороговой плотности тока в полупроводниковых лазерах.

Зависимость пороговой плотности тока от температуры принято представлять в виде [7*]:

$$J(T) = J(T_{ref}) \exp\left(\frac{T - T_{ref}}{T_0}\right), \quad (1)$$

где $J(T_{ref})$ – пороговая плотность тока при температуре T_{ref} , а T_0 – характеристический параметр. Из исследований нескольких типов лазерных структур следует, что параметр T_0 возрастает с увеличением энергетической глубины квантовой ямы для электронов в активной области полупроводникового лазера.

При увеличении тока накачки возрастает пороговая концентрация носителей заряда в квантовых ямах и, как следствие, увеличивается концентрация носителей в волноводе. Из экспериментальной температурной зависимости пороговой плотности тока получена температурная зависимость пороговой концентрации носителей заряда в активной области для разных типов лазерных гетероструктур.

Рассчитаны температурные зависимости положения квазиуровня Ферми для исследуемых типов гетероструктур. Для

структуры с GaAs волноводом квазиуровень Ферми достигает дна зоны проводимости волноводного слоя при $T \sim 50^\circ\text{C}$, а для структуры с $\text{Al}_{0,1}\text{Ga}_{0,9}\text{As}$ волноводом это происходит при $T \sim 130^\circ\text{C}$. Для структуры с $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ волноводом при глубине квантовой ямы $\Delta E_c = 302$ мэВ в исследуемом диапазоне температур (до 140°C) квазиуровень Ферми вообще не приближается к верху квантовой ямы. Достижение квазиуровнем Ферми дна зоны проводимости волноводного слоя коррелирует со значительным возрастанием пороговой плотности тока. Отсюда следует, что увеличение глубины квантовой ямы активной области является одним из основных способов повышения температурной стабильности пороговой плотности тока.

В третьем параграфе экспериментально показано, что при температурах, при которых происходит возрастание пороговой плотности тока, спектр спонтанного излучения от активной области начинает перекрываться со спектром волновода. Это явление получило название температурной делокализации свободных носителей заряда из активной области в волновод [3, 4].

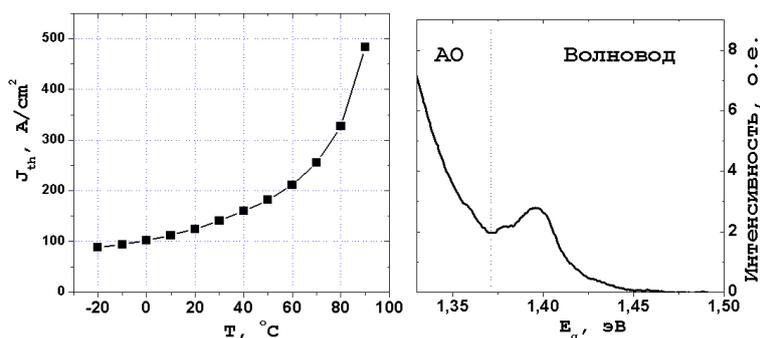


Рис.2 Температурная зависимость плотности порогового тока (J_{th}) (левый график) и спектр спонтанного излучения при температуре 40°C из активной области (АО) и GaAs волновода (правый график).

В полупроводниковых лазерах на основе гетероструктуры с волноводным слоем из арсенида галлия волноводная полоса сливается с коротковолновым краем полосы излучения активной области при температуре активной области $40 - 50^\circ\text{C}$ (рис.2). Энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в данной структуре составляет величину 172 мэВ.

Для структуры с волноводными слоями из твердого раствора $\text{Al}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$, энергетическая глубина квантовой ямы для электронов в

которой составляет величину 303 мэВ, полосы излучения активной области и волноводных слоев не объединяются в одну даже при температуре 140 °С.

В структуре с волноводами из полупроводникового твердого раствора $Al_{0,1}Ga_{0,9}As$, где энергетическая глубина квантовой ямы активной области составила 190 мэВ, эффект температурной делокализации возрастает по сравнению со структурами с глубинами квантовых ям 210 и 303 мэВ.

В четвёртом параграфе проведен анализ температурных зависимостей обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора (рис.3). Показано, что снижение дифференциальной квантовой эффективности в полупроводниковых лазерах в диапазоне температур 20 – 140 °С происходит не из-за падения внутреннего квантового выхода стимулированного излучения, который остаётся на уровне 90 – 100%, а связано с увеличением внутренних оптических потерь [5].

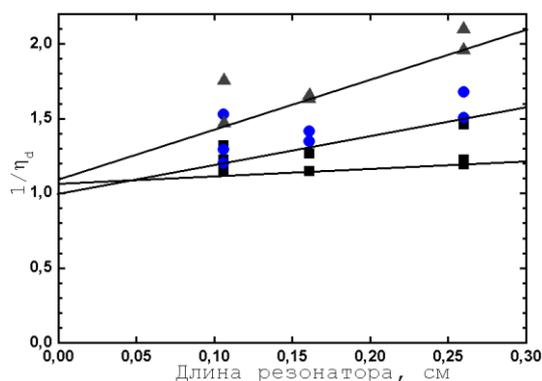


Рис.3 – Температурные зависимости обратной дифференциальной квантовой эффективности ($1/\eta_d$) от длины резонатора. Квадраты – 20°C; Круги – 70°C; Треугольники – 140°C.

Увеличение внутренних оптических потерь с температурным ростом пороговой концентрации связано с возрастанием оптических потерь на свободных носителях в активной области и волноводном слое. Так как активная область лазера является наноразмерным слоем (толщина $\sim 80 \text{ \AA}$), то основная доля волноводной моды приходится на широкий волноводный слой (толщина $\sim 2 \text{ мкм}$), поэтому увеличение концентрации носителей заряда в волноводе с ростом температуры приводит к возрастанию внутренних оптических потерь. Таким образом, основная причина, обуславливающая снижение дифференциальной квантовой эффективности излучения при увеличении температуры – рост концентрации носителей заряда в

волноводе лазерной асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом.

Показано, что в лазерных структурах величина внутренних оптических потерь при высоких температурах коррелирует с энергетической глубиной квантовой ямы активной области. Величина минимальных внутренних оптических потерь при 140 °С составила величину 2.3 см^{-1} . Это было получено в лазерной структуре с одной квантовой ямой и волноводом $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ (глубина квантовой ямы для электронов 302 мэВ).

В пятом параграфе экспериментально показано, что помимо увеличения энергетической глубины квантовой ямы активной области для снижения температурной делокализации носителей заряда и увеличения температурной стабильности пороговой плотности тока требуется увеличение числа квантовых ям в активной области [2, 4].

Увеличение числа квантовых ям позволяет снизить пороговую концентрацию в отдельной квантовой яме активной области полупроводникового лазера. Это сдвигает начало процесса делокализации в область больших температур.

Показано, что использование двух квантовых ям в качестве активной области приводит к линейности ватт-амперной характеристики до существенно больших токов накачки лазера по сравнению со структурой с одной квантовой ямой. Использование трёх или более квантовых ям даёт незначительное улучшение мощностных характеристик лазера по сравнению со структурой с двумя квантовыми ямами.

Экспериментально показано, что сильное возрастание пороговой плотности тока в структуре с двумя квантовыми ямами происходит при значительно более высоких температурах в сравнении со структурой с одной квантовой ямой. Величина характеристического параметра T_0 для лазеров с двумя квантовыми ямами в активной области и длиной резонатора $\sim 3 \text{ мм}$ в диапазоне температур $-20 \div +70 \text{ °С}$ достигает 220 К.

В шестом параграфе представлены выводы к третьей главе диссертационной работы.

Проведенные исследования показывают, что главным фактором, ограничивающим максимальную выходную мощность полупроводниковых лазеров при работе в непрерывном режиме генерации, является температурная делокализация носителей заряда из активной области в волноводный слой. Конструкция мощного температурностабильного полупроводникового лазера должна включать

две тонкие (менее 60 Å) квантовые ямы с максимальной энергетической глубиной для электронов.

Четвертая глава посвящена исследованию характеристик мощных многомодовых полупроводниковых лазеров на основе квантово-размерных асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения, изготовленных методом МОС-гидридной эпитаксии с применением физических и технологических принципов повышения излучаемой мощности в непрерывном режиме генерации.

В первом параграфе дано обоснование выбора конструктивных и технологических параметров асимметричной гетероструктуры раздельного ограничения с расширенным волноводом с применением установленных физических и технологических принципов повышения мощности полупроводниковых лазеров. Проведена характеристика исследуемых лазерных гетероструктур и мощных многомодовых полупроводниковых лазеров.

Во втором параграфе приведены результаты исследований свойств лазерных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения. Продемонстрировано достижение минимального уровня температурной делокализации при температуре теплоотвода 140 °С в лазерных гетероструктурах с максимальной энергетической глубиной квантово-размерной активной области (302 мэВ). Показано, что активная область лазерной структуры должна содержать две квантовые ямы с толщиной, не превышающей 50 – 60 Å, для снижения пороговой концентрации носителей заряда. В исследуемых лазерных гетероструктурах зарегистрирована величина внутренних оптических потерь $\alpha = 0,17 \text{ см}^{-1}$.

В третьем параграфе приведены результаты исследований мощных многомодовых полупроводниковых лазеров на основе квантово-размерных асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения, изготовленных с применением физических и технологических принципов повышения излучаемой мощности в непрерывном режиме генерации. Исследован спектральный и модовый состав излучения полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации. Исследованы мощностные характеристики и показана возможность достижения в непрерывном режиме генерации 21 Вт излучаемой оптической мощности из полупроводникового лазера с шириной мезаполоска 100 мкм. Продемонстрировано преимущество лазерных гетероструктур с двумя квантовыми ямами в активной области для достижения линейности

ватт-амперной характеристики и максимальной мощности излучения в непрерывном режиме генерации.

В четвертом параграфе обсуждаются результаты исследований температурных зависимостей (в диапазоне температур $-20 \div +140^\circ\text{C}$) характеристик мощных многомодовых полупроводниковых лазеров, изготовленных с применением физических и технологических принципов повышения излучаемой мощности в непрерывном режиме генерации. Продемонстрировано достижение температурной стабильности пороговой плотности тока и, соответственно, пороговой концентрации носителей заряда в диапазоне температур $-20 \div +140^\circ\text{C}$ с характеристическим параметром $T_o = 196\text{ K}$. Максимальное значение характеристического значения $T_o = 220\text{ K}$ получено в диапазоне температур $-20 \div +70^\circ\text{C}$ в полупроводниковых лазерах с длиной резонатора 3 мм, с двумя квантовыми ямами максимальной энергетической глубины. Это позволило достигнуть при 140°C величины непрерывной выходной оптической мощности излучения 5 Вт.

В заключении диссертации приведены основные результаты работы.

1. Определены и практически реализованы физические и технологические принципы увеличения оптической мощности полупроводниковых лазеров на основе асимметричных AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур раздельного ограничения.

2. Экспериментально показано, что снижение дифференциальной квантовой эффективности полупроводникового лазера с увеличением тока накачки в непрерывном режиме генерации происходит в результате увеличения внутренних оптических потерь при сохранении величины внутреннего квантового выхода стимулированного излучения близкой к 100 %.

3. Экспериментально продемонстрировано, что увеличение концентрации делокализованных носителей заряда в расширенном волноводном слое гетероструктуры раздельного ограничения до величины $n \sim 3 \cdot 10^{17}\text{ см}^{-3}$ ведет к резкому снижению дифференциальной квантовой эффективности и полному насыщению ватт-амперной характеристики мощных непрерывных полупроводниковых лазеров.

4. Созданы и исследованы асимметричные AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктуры раздельного ограничения с длиной волны излучения $\lambda \sim 1060\text{ нм}$, величиной внутренних оптических потерь $\alpha \sim 0,17\text{ см}^{-1}$ и характеристическим параметром температурной стабильности пороговой плотности тока $T_o = 220\text{ K}$.

5. Созданы и исследованы одиночные многомодовые лазеры на основе асимметричных гетероструктур в системе твердых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs с непрерывной выходной мощностью оптического излучения 21 Вт при комнатной температуре и сохраняющие 5 Вт излучаемой оптической мощности при увеличении температуры до 140°C.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. М.А. Ладугин, А.В. Лютецкий, А.А. Мармалюк, А.А. Падалица, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, Н.А. Рудова, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. *Температурная зависимость пороговой плотности тока и внешней дифференциальной квантовой эффективности в полупроводниковых лазерах ($\lambda = 900-920$ нм).* // ФТП **44** (10), 1417 (2010).
2. И.С. Шашкин, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А.Пихтин, Н.А. Рудова, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л.Станкевич, В.В. Шамахов, Д.А. Веселов, К.В. Бахвалов, И.С. Тарасов. *Температурная зависимость пороговой плотности тока в полупроводниковых лазерах ($\lambda = 1050-1070$ нм).* // ФТП **46** (10), в печати (2012).
3. С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, Л.С. Вавилова, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Н.А. Пихтин, А.А. Подоскин, А.Л. Станкевич, Н.В. Фетисова, И.С. Тарасов. *Температурная делокализация носителей заряда в полупроводниковых лазерах.* // ФТП **44** (5), 688 (2010).
4. И.С. Шашкин, Д.А. Винокуров, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, Н.А. Пихтин, М.Г. Растегаева, З.Н. Соколова, С.О. Слипченко, А.Л.Станкевич, В.В. Шамахов, Д.А. Веселов, А.Д. Бондарев, И.С. Тарасов. *Температурная делокализация носителей заряда в полупроводниковых лазерах ($\lambda = 1050-1070$ нм).* // ФТП **46** (10), в печати (2012).
5. Н.А. Пихтин, С.О. Слипченко, И.С. Шашкин, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, А.А. Подоскин, И.С. Тарасов. *Температурная зависимость внутренних оптических потерь в полупроводниковых лазерах ($\lambda = 900-920$ нм).* // ФТП **44** (10), 1411 (2010).

Цитируемая литература

- 1*. 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 38 (12), 1477 (2004).

- 2*. И.С. Тарасов. *Мощные полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур раздельного ограничения. Обзор. // Квантовая электроника 40 (8), 661 (2010).*
- 3*. N.A. Pikhin, S.O. Slipchenko, Z.N. Sokolova, A.L. Stankevich, D.A. Vinokurov, I.S. Tarasov, Zh. I. Alferov. *16 W continuous-wave output power from 100 μ m-aperture laser with quantum well asymmetric heterostructure. // Electronics letters 40 (22), 1413 (2004).*
- 4*. P. Crump, G. Blume, K. Paschke, R. Staske, A. Pietrzak, U. Zeimer, S. Einfeldt, A. Ginolas, F. Bugge, K. Häusler, P. Ressel, H. Wenzel, and G. Erbert. *20W continuous wave reliable operation of 980nm broad-area single emitter diode lasers with an aperture of 96 μ m. // Proc. of SPIE 7198, 719814 (2009).*
- 5*. P. Ressel, G. Erbert, U. Zeimer, K. Häusler, G. Beister, B. Sumpf, A. Klehr, and G. Tränkle. *Novel passivation process for the mirror facets of Al-free active-region high-power semiconductor diode lasers. // IEEE Photon. Technol. Lett. 17 (5), 962 (2005).*
- 6*. A. Komissarov, M. Maiorov, R. Menna, S. Todorov, J. Connolly, D. Garbuzov, V. Khalfin, and A. Tsekoun. *Waveguide collapse in InGaAsP ridge-waveguide lasers with weak lateral optical confinement. // Proc. Conf. Dig. Lasers Electro-Optics Quantum Electron. Laser Sci. (CLEO/QELS), paper CMG1, pp. 31–32, (2001).*
- 7*. Х. Кейси, М. Паниш. *Лазеры на гетероструктурах. // М.: Мир, т.1 (1981).*