На правах рукописи

Кириченко (Бобрецова) Юлия Константиновна

Внутренние оптические потери

в мощных полупроводниковых лазерах на основе AlGaAs/InGaAs/GaAs гетероструктур

Специальность: 1.3.11 – физика полупроводников

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание научной степени кандидата физико-математических наук

> Санкт-Петербург 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки

Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель:	Пихтин Никита Александрович
	кандидат физико-математических наук, руководитель Центра Физики Наногетероструктур, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Официальные оппоненты:	Крыжановская Наталья Владимировна
	доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Международная лаборатория квантовой оптоэлектроники, Санкт-Петербургский филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа Экономики»»
	Рывкин Борис Соломонович
	кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Лаб. интегральной оптики на гетероструктурах, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Ведущая организация:	федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО»

Защита состоится «____» _____ 2022 г. в _____ часов _____ минут на заседании диссертационного совета 34.01.02 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 и на сайте <u>www.ioffe.ru</u>.

Отзывы об автореферате в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан «____» ____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ФТИ 34.01.02

доктор физико-математических наук

Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Достижения современной техники во многом обязаны развитию физики полупроводников и, в частности, созданию полупроводниковых лазеров и приборов на их основе. Лазеры полосковой геометрии с торцевым выводом излучения являются исторически первым типом полупроводниковых лазеров и на сегодняшний момент наиболее проработанной и массово применяемой их конструкцией. Такие лазеры отличаются малыми размерами, высокой эффективностью преобразования электрической энергии в оптическую, высокими уровнями оптической мощности, технологичностью, надежностью и долгим сроком службы. Среди наиболее важных областей применения следует отметить накачку мощных твердотельных И волоконных лазеров полупроводниковыми матрицами, обработку материалов, дальнометрию и различные специальные задачи (наведение, целеуказание, газоанализ).

Мощный торцевой лазер изготавливается на основе двойной гетероструктуры раздельного ограничения с квантоворазмерной активной областью (КР РО ДГС). Параметры исходной гетероструктуры (толщины, составы слоёв и т.д.) определяют свойства лазера. Именно прогресс в технологии и разработке гетероструктур позволил кардинально повысить лазерные характеристики, сделав эти приборы привлекательными для широкого круга практических применений. Несмотря на достигнутые успехи, мощностной потенциал полупроводниковых лазеров всё ещё реализован далеко не полностью: в настоящий момент значительные усилия направлены на чисто экстенсивное развитие лазеров – расширение выходной апертуры, увеличение количества излучателей в матрицах, уменьшение габаритных размеров кристаллов. Одновременно производится техническая оптимизация приборов: определяются наилучшие для конкретной задачи сочетания параметров резонатора, типы теплоотводов, режимы работы. Однако фундаментальные причины, ограничивающие лазерные характеристики, заключаются в физических принципах его работы и связаны главным образом с конструкцией гетероструктуры. Оптимизация параметров гетероструктуры – задача важная, но сложная как по технологическим причинам, так и в виду сложности изучения физических механизмов, которые протекают в гетероструктуре в процессе работы лазера.

Множество экспериментальных и теоретических работ посвящено исследованию внутренних физических процессов, таких как рост концентрации носителей заряда в волноводе, поглощение на свободных носителях, двухфотонное поглощение и носители заряда, им сгенерированные, рост концентрации носителей в квантовых ямах (КЯ) и другие. Все механизмы взаимосвязаны между собой и почти не поддаются прямому экспериментальному исследованию.

Важным внутренним физическим фактором, ограничивающим мощностные характеристики, являются внутренние оптические потери лазера. Внутренние оптические потери – это комплекс процессов рассеяния и поглощения оптического излучения, которые действуют в слоях лазерной гетероструктуры (преимущественно, в волноводе), и снижают внешнюю квантовую эффективность лазера. К основным механизмам потерь относят [1-4]: рассеяние света на неоднородностях и дефектах гетероструктуры, поглощение света на свободных носителях, двухфотонное поглощение и аналогичные эффекты нелинейной оптики. Для современных лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs внутренняя квантовая эффективность (ВКЭ) близка к 100%, однако внешняя квантовая эффективность, как правило, составляет не более 90%, соответствующие потери мощности связаны именно с внутренними оптическими потерями. Более того, сравнительно недавно различными научными группами [3,5–7] было показано, что с ростом тока накачки внутренние оптические потери растут, что приводит к насыщению ватт-амперной характеристики (BTAX) лазера, падению эффективности электрооптического преобразования и, в конечном счёте, к ограничению максимальной мощности.

Причины и особенности роста оптических потерь изучены скорее на качественном, чем на количественном уровне, влияние конструкции гетероструктуры на процессы роста потерь практически не рассматривалось. Соответственно, актуальной задачей является надёжное количественное описание процессов поглощения излучения в мощном лазере, оценка влияния конструкции гетероструктуры на внутренние оптические потери и, наконец, определение основных методов борьбы с ними.

Цель работы.

Всестороннее исследование полупроводниковых лазеров различных конструкций, исследование физических причин роста внутренних оптических потерь и падения внутренней квантовой эффективности, определение соотношения вкладов различных внутренних механизмов в рост внутренних оптических потерь и падение внутренней квантовой эффективности.

Задачи исследования.

 Анализ литературных данных по вопросам ограничения оптической мощности полупроводниковых лазеров и возможных причин роста внутренних оптических потерь.

4

- Разработка и изготовление лазерных гетероструктур различного дизайна, которые позволят наглядно проследить взаимосвязь параметров лазерной гетероструктуры и ее электрооптических характеристик.
- 3. Стандартная характеризация изготовленных лазерных гетероструктур при различных условиях работы.
- 4. Разработка и тестирование методики, позволяющей измерять внутренние оптические потери в работающем полупроводниковом лазере.
- 5. Исследование внутренних оптических потерь в лазерах различных конструкций по предложенной методике.
- 6. Поиск закономерностей в экспериментальных данных и оценка вклада различных механизмов в рост внутренних оптических потерь.
- Выбор оптимальной лазерной гетероструктуры для получения предельно возможных мощностей.
- Разработка теоретической модели для обоснования полученных экспериментальных результатов.

Научная новизна.

- 1. Впервые предложена методика измерения внутренних оптических потерь в работающем полупроводниковом лазере с точностью 0.1 см⁻¹.
- 2. Впервые экспериментально показано, что вид зависимости внутренних оптических потерь от тока накачки выше порога генерации определяется конструкцией гетероструктуры: для лазеров с расширенным волноводом зависимость близка к линейной в некотором диапазоне токов накачки, а для лазеров со сверхузким волноводом (100-200 нм) зависимость сублинейна.
- 3. Обнаружена аномальная температурная зависимость внутренних оптических потерь для лазеров со сверхузкими волноводами (< 200 нм): при токах накачки выше порога генерации с ростом температуры внутренние оптические потери уменьшаются, и снижается их градиент зависимости от тока.
- Для лазеров с расширенным волноводом и слабой локализацией носителей заряда в активной области при повышенных температурах (более 50⁰C) обнаружена сверхлинейная зависимость внутренних оптических потерь от тока накачки.
- 5. Впервые экспериментально показано, что в лазерах с расширенным волноводом в непрерывном режиме работы внутренние оптические потери сверхлинейно зависят от тока накачки ввиду саморазогрева кристалла.

- Впервые для современных мощных полупроводниковых лазеров проведены подробные электрооптические измерения при экстремально низкой температуре 120 К.
- Разработана математическая модель, позволяющая получить приемлемое соответствие экспериментальных и теоретических данных как по мощностным характеристикам, так и по величине внутренних оптических потерь.

Практическая значимость работы.

- Созданы полупроводниковые лазеры различных конструкций с выходной мощностью в диапазоне от единиц до более 10 Вт и с пиковым КПД 40-65% в непрерывном режиме работы.
- Получены температурные и токовые зависимости внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности для различных конструкций гетероструктур.
- Численные значения внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности для различных лазерных конструкций позволяют проводить оптимизацию характеристик полупроводниковых лазеров.
- Показано, что использование искусственных энергетических барьеров на границе волновод-эмиттер в лазерах со сверхузким волноводом (< 200 нм) позволяет повысить ВКЭ и выходную оптическую мощность.
- Использование AlGaAs волновода позволяет обеспечить ВКЭ близкий к 100% и снизить эффекты двухфотонного поглощения.
- 6. Для лазеров на основе гетероструктуры с расширенным AlGaAs волноводом в импульсном режиме достигнута максимально доступная линейность BTAX и пиковая оптическая мощность более 65 Вт (в две стороны) для длинных образцов с обеими просветлёнными гранями. Для стандартных лазерных образцов с выводом излучения через переднее зеркало достигнута пиковая оптическая мощность 90 Вт.
- 7. Для стандартных лазерных образцов с выводом излучения через переднее зеркало лазеров на основе гетероструктуры с расширенным GaAs волноводом при температуре 120 К была достигнута оптическая мощность 27 Вт в непрерывном режиме работы и 120 Вт в импульсном режиме.

Положения.

1. Методика ввода зондирующего излучения в волновод работающего полупроводникового лазера позволяет измерять оптическое поглощение на

свободных носителях в его слоях с высокой (0.1 см⁻¹) точностью при произвольных температурах и уровнях накачки лазера-образца.

- Рост плотности тока накачки (при неизменной температуре) мощного торцевого полупроводникового лазера приводит к росту оптического поглощения на свободных носителях преимущественно в волноводных слоях его гетероструктуры.
- Рост температуры мощного торцевого полупроводникового лазера (при неизменном токе накачки) приводит к росту оптического поглощения в активной области его гетероструктуры.
- 4. В лазерах со сверхузкими (100-200 нм) волноводами и лазерах со слабой локализацией носителей заряда в активной области наблюдается заметное падение внутренней квантовой эффективности с ростом тока и температуры.
- 5. Понижение температуры лазера до 120 К позволяет в значительной степени подавить процессы роста оптических потерь с током и температурой, однако не позволяет полностью от них избавиться.

Апробация работы. Результаты данной работы были доложены на следующих Российский конференциях: 5-й симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2016), VI Международный симпозиум излучению по когерентному оптическому полупроводниковых соединений и структур (Москва, 2017), 6-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология» (Санкт-Петербург, 2018), 18th International Conference Laser Optics ICLO 2018 (Санкт-Петербург, 2018), 12-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе» (Минск, 2019), XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск, 2019), XXI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2019), Photonics West 2020 (Сан-Франциско, 2020).

<u>Публикации</u>. По результатам исследований, проведенных в диссертации, опубликовано 16 работ, из них 6 статей в рецензируемых журналах (список приведен в заключении).

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Диссертация содержит 182 страниц текста, включая 110 рисунков и 11 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 142 публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

<u>Во введении</u> обоснована актуальность проведенных исследований, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, и кратко изложено содержание диссертации.

В первой главе приведен обзор литературных данных, посвященных мощным торцевым полупроводниковым лазерам на основе квантово-размерных гетероструктур раздельного ограничения. В параграфе 1.1 представлены новейшие достижения и результаты актуальных разработок в этой сфере. Показано, что проблемой всех полупроводниковых лазеров является насыщение ватт-амперной характеристики, приводящее к ограничению максимально достижимой мощности. В параграфе 1.2 рассмотрены температурные причины насыщения мощности, возникающие ввиду саморазогрева лазера. В *параграфе 1.3* рассмотрен импульсный режим работы, при котором эффекты саморазогрева лазера отсутствуют, и насыщение мощности вызвано внутренними физическими механизмами, имеющими нетемпературный характер. Проведен анализ известных теоретических моделей работы лазеров и расчёта их характеристик [1-3,8]. Показано, что на сегодняшний момент не существует единой и непротиворечивой модели, полностью описывающей наблюдаемые экспериментально явления. Большинство рассмотренных физических механизмов вызывают постепенный рост концентрации носителей заряда в волноводных слоях с увеличением плотности тока [5,8]. Носители заряда в волноводе рекомбинируют излучательно и безызлучательно, а также поглощают лазерное излучение. Именно поглощение на свободных носителях – это конечный физический механизм, который является основной причиной падения эффективности лазера с ростом тока. Параграф 1.4 посвящен подробному рассмотрению механизма оптического поглощения на свободных носителях заряда. С фундаментальной точки зрения механизм поглощения хорошо изучен, однако подходит только для общего описания процессов с точностью до порядка величины. Для математического анализа работы современных мощных полупроводниковых лазеров требуются более точные значения коэффициента поглощения и их зависимости от температуры, длины волны, состава материала.

Во второй главе приведены этапы разработки, изготовления и характеризации полупроводниковых лазеров на основе квантово-размерных асимметричных гетероструктур раздельного ограничения в системе твёрдых растворов AlGaAs/InGaAs/GaAs. В *параграфе 2.1* описан процесс конструирования набора

8

различных лазерных гетероструктур, основанный на современных концепциях мощных полупроводниковых лазеров. Были разработаны 6 гетероструктур, в первую очередь отличающиеся толщинами и составами волноводов, что представляет большой интерес для исследований процессов накопления носителей заряда и роста оптического поглощения. Все структуры рассчитаны на лазерную генерацию вблизи длины волны 1060 нм. Гетероструктуры делятся на две категории: структуры с широким (№1-3) и структуры co сверхузким (№4-6) волноводами. Гетероструктура **№**1 имеет нелегированный волновод из Al₁₀Ga₉₀As толщиной 1.7 мкм. Гетероструктура №2 имеет расширенный волновод Al₁₀Ga₉₀As толщиной 3 мкм. Гетероструктура №3 имеет аналогичную конструкцию, как и в гетероструктуре №2, однако волновод изготовлен из подлегированного GaAs. Гетероструктуры №4-6 представляют собой конструкции со сверхузкими волноводами (доли микрона). В таких гетероструктурах лазерное излучение распространяется в материале эмиттеров, где концентрация носителей изменяется слабо. Уровень легирования эмиттеров вблизи волновода (в области распространения лазерного излучения) был понижен для того, чтобы минимизировать внутренние оптические потери и сохранить транспортные свойства эмиттеров. Волновод и активная область были нелегированы. Гетероструктура №4 имеет GaAs волновод толщиной 200 нм. Гетероструктура №5 отличается от предыдущей конструкции еще меньшей толщиной волновода – 100 нм. Гетероструктура №6 также имеет GaAs волновод толщиной 100 нм, но отличается наличием в её конструкции искусственных энергетических барьерных слоёв на границах волновод-эмиттер [9].

В параграфе 2.2 было проведено определение оптимальных технологических условий роста (скорость роста, температура, давление, поток и т.п.) эпитаксиальных слоев. На их основе были составлены регламенты роста для каждого типа эпитаксиальных слоёв, входящих в состав разработанных гетероструктур. Методом МОС-гидридной эпитаксии были выращены гетероструктуры №1-6. В параграфе 2.3 описан цикл постростовых технологических операций, необходимый для формирования активного элемента полупроводникового лазера. В результате были изготовлены наборы лазерных образцов с мезаполосковой конструкцией «глубокая меза» с шириной полоска 100 мкм. Длина резонатора, наличие и значения коэффициентов отражения диэлектрических покрытий зеркал выбирались исходя из поставленных экспериментальных задач. Образцы монтировались на медные теплоотводы гетероструктурой вниз.

Параграф 2.4 посвящен стандартным измерениям электрооптических характеристик изготовленных лазеров в непрерывном и импульсном режимах работы. Все изготовленные гетероструктуры обеспечивают стабильную лазерную генерацию в

непрерывном режиме с выходной мощностью в диапазоне от единиц до более 10 Вт и с пиковым КПД 40-65% в диапазоне 1040-1060 нм, что позволяет судить о высоком эпитаксиальном качестве гетероструктур. Выходные характеристики лазеров главным конструкцией гетероструктуры, образом определяются а не особенностями технологических процессов. На рисунке 1 представлены типичные ВтАХ лазеров на основе гетероструктур №1-3 (а) и №4-6 (б), работающих в импульсном режиме при температуре 25[°]C. С ростом тока накачки для всех структур наблюдается насыщение ВтАХ, однако оно происходит по-разному. Увеличение толщины волновода позволило существенно снизить эффект насыщения и увеличить линейность ВтАХ. Лазеры на основе гетероструктуры №2 продемонстрировали наибольшую выходную мощность. Среди сверхузкими волноводами лазеры на основе гетероструктуры лазеров со <u>№</u>6 продемонстрировали наибольшую мощность благодаря искусственным энергетическим барьерам. Уровень мощности лазеров на основе гетероструктуры №6 сопоставим с мощностью лазеров на основе стандартной лазерной гетероструктуры №1 при меньшей расходимости излучения.



Рисунок 1 - ВтАХ для лазеров на основе гетероструктур №1-3 (а) и №4-6(б). Импульсный режим, температура 25⁰С

Было показано, что различия дизайнов лазерных структур привели к заметным различиям электрооптических характеристик лазеров. Такая выборка является показательной с точки зрения исследования физических механизмов, в частности поглощения на свободных носителях.

<u>Третья глава</u> посвящена экспериментальным исследованиям внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности. *В параграфе 3.1* приведены этапы разработки уникальной экспериментальной методики исследования поглощения в волноводе работающего полупроводникового лазера. Методика основана на вводе зондирующего излучения в волновод полупроводникового лазера, где зондирующее излучение, аналогично собственному излучению лазера-образца, испытывает поглощение на свободных носителях (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальная установка для исследования изменения коэффициента поглощения

При протекании тока через исследуемый образец, увеличивается концентрация носителей заряда в волноводе и, следовательно, возрастает поглощение на свободных носителях, которое в свою очередь приводит к уменьшению интенсивности зондирующего излучения, прошедшего сквозь исследуемый образец. Изменение интенсивности зондирующего излучения (рисунок 3), обусловленное протеканием тока накачки через исследуемый лазер, позволяет рассчитать изменение коэффициента поглощения. Чтобы зондирующее излучение не усиливалось в материале активной области и не испытывало межзонного поглощения, а поглощалось только на свободных носителях, его спектр был смещен в длинноволновую сторону (около 1120 нм). Смещение спектра также позволило обеспечить селекцию зондирующего излучения с помощью длинноволновых фильтров.

Для измерений изменения коэффициента поглощения в работающем полупроводниковом лазере были изготовлены образцы с длиной резонатора 5100 мкм и

коэффициентами отражения обоих зеркал 5%. На начальных этапах разработки методики проводились исследования оптической схемы, качества ввода излучения, исследования пространственных параметров лазерного луча в точке фокусировки, исследование распределения зондирующего излучения в волноводе гетероструктуры лазерного образца. Было показано, что данная методика позволяет измерять оптическое поглощение на свободных носителях в слоях гетероструктур с высокой (0.1 см⁻¹) точностью при произвольных температурах и уровнях накачки лазера-образца.



Рисунок 3 – Типичные осциллограммы импульса зондирующего излучения, выходящего из волновода образца, и соответствующие им импульсы тока лазерного образца

В *параграфе 3.2* проведены измерения изменения коэффициента поглощения в гетероструктурах различных конструкций. Для всех исследуемых образцов зависимость изменения коэффициента поглощения от тока накачки представляет собой возрастающую функцию с резким изломом в области порога генерации. На рисунке 4 для примера приведены результаты измерения изменения коэффициента поглощения на свободных носителях в зависимости от тока накачки и температуры для лазеров на основе гетероструктуры №3.

Ниже порога генерации оптическое поглощение сильно зависит от плотности тока, что обусловлено накоплением носителей заряда в активной области. На пороге генерации концентрация в активной области достигает своего порогового значения и далее с ростом тока остается почти постоянной. Гетероструктуры со схожими конструкциями, у которых одинаковые активные области, одинаковые коэффициенты оптического ограничения и близкие пороговые концентрации носителей заряда, имеют близкие значения изменения коэффициента поглощения на пороге генерации. Выше порога генерации рост коэффициента поглощения преимущественно связан с накоплением носителей заряда в волноводе. Такой вид зависимости поглощения наблюдается для всех образцов, однако градиенты зависимости поглощения от тока и температурная стабильность разных гетероструктур заметно отличаются.



Рисунок 4 – Зависимость изменения поглощения на свободных носителях от тока накачки при различных температурах для лазеров на основе гетероструктуры №3

Исследования температурной зависимости коэффициента поглощения показали, что с ростом температуры увеличивается пороговый ток и соответствующее ему значение изменения коэффициента поглощения, а также увеличивается градиент зависимости ниже порога генерации, что характерно для всех образцов. Выше порога генерации зависимость коэффициента поглощения от температуры для лазеров на основе разных типов гетероструктур заметно отличаются.

Для лазеров с широкими волноводами наблюдается увеличение градиента зависимости потерь при увеличении температуры. У лазеров на основе гетероструктуры №3 с GaAs волноводом наблюдается сверхлинейная зависимость поглощения при высоких токах и температурах. Такое поведение объясняется относительно плохой локализацией носителей заряда в квантовых ямах. В лазерах с AlGaAs волноводами (гетероструктуры №1-2) даже при температуре 85⁰С нелинейности не было обнаружено.

Для лазеров на основе гетероструктуры №4 с волноводом толщиной 200 нм температурная зависимость изменения коэффициента поглощения свыше порога генерации выражена слабо. В целом она аналогична результатам, полученным для лазеров с широкими волноводами. Для лазеров с волноводами 100 нм (гетероструктуры №5-6)

наблюдается аномальная температурная зависимость поглощения. С ростом температуры снижается градиент зависимости внутренних оптических потерь от тока накачки.

На основе значений изменения коэффициента поглощения и внутренних оптических потерь на пороге генерации были определены значения встроенных, не зависящих от тока, оптических потерь. Сумма встроенных потерь и измеренных значений изменения коэффициента поглощения определяет полную зависимость внутренних оптических потерь от тока накачки. Внутренняя квантовая эффективность определялась по формуле 1:

$$\eta_i(I) = \frac{P_{out}(I)}{(I-I_{th})} \frac{e}{h\vartheta} \frac{(\alpha_{out} + \alpha_i(I))}{\alpha_{out}},\tag{1}$$

где I – ток накачки, P_{out} – выходная мощность, I_{th} – пороговый ток, е – заряд электрона, $h\vartheta$ – энергия фотона, α_{out} – внешние и α_i – внутренние оптические потери, для этого дополнительно были измерены ВтАХ для тех же лазеров, для которых проводились измерения коэффициента поглощения. Для всех гетероструктур были получены зависимости внутренних оптических потерь и рассчитаны зависимости внутренней квантовой эффективности от тока и температуры.

Зависимости ВКЭ от тока и температуры отличаются для разных гетероструктур. Для гетероструктур №1-2 с волноводом из AlGaAs ВКЭ близок к 100%, и слабо зависит как от температуры, так и тока накачки. В лазерах со сверхузкими (100-200 нм) волноводами и лазерах со слабой локализацией носителей заряда в активной области наблюдается заметное падение внутренней квантовой эффективности с ростом тока и температуры.

Был проведен сравнительный анализ результатов, выявлены и описаны зависимости внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности от конструкции гетероструктуры. На рисунке 5 представлено сравнение зависимостей внутренних оптических потерь и ВКЭ от тока накачки при температуре 25⁰C для лазеров с расширенными (а) и сверхузкими (б) волноводами.

Среди лазеров с широкими волноводами гетероструктура №1 обладает наибольшим градиентом зависимости потерь от тока. Возможно, причина быстрого роста потерь заключается в большой оптической плотности мощности в ее волноводе. Учитывая слабую зависимость ВКЭ от тока накачки, насыщение мощности при высоком уровне тока вызвано именно быстрым ростом внутренних оптических потерь. Гетероструктуры №2 и №3 обладают меньшими внутренними оптическими потерями и более слабой их зависимостью от тока, чем гетероструктура №1. Гетероструктура №3 имеет пороговое значение внутренних оптических потерь выше, чем гетероструктура №2, но градиент

14

зависимости внутренних оптических потерь от тока при этом значительно ниже. При токах выше 25 А гетероструктура №3 демонстрирует меньшие потери, чем гетероструктура №2. Это связано с тем, что гетероструктура №3 имеет легированный GaAs волновод с улучшенным транспортом носителей заряда, что приводит к меньшей зависимости внутренних оптических потерь от тока. В то же время использование GaAs волновода приводит к плохой локализации носителей заряда в КЯ и падению ВКЭ с ростом тока. ВКЭ для гетероструктуры №3 с ростом тока накачки снижается до 88 % при 15 кА/см². Падение ВКЭ и высокие пороговые потери в лазерах на основе гетероструктуры №3 стали причиной меньшей оптической мощности, по сравнению с лазерами на основе гетероструктуры №2.



Рисунок 5 – Зависимости внутренних оптических потерь и ВКЭ от тока накачки при температуре 25⁰С для лазеров с расширенными (а) и сверхузкими (б) волноводами

Для гетероструктур №4-6 со сверхузкими волноводами градиенты зависимости внутренних оптических потерь от тока накачки заметно различаются. Максимальный градиент потерь наблюдается у гетероструктуры №4 с волноводом толщиной 200 нм. В сочетании с сильным падением ВКЭ, лазеры из гетероструктуры №4 продемонстрировали наименьшую линейность ВтАХ и наименьшую выходную оптическую мощность. Сужение волновода до 100 нм в гетероструктуре №5, позволило значительно подавить роста внутренних оптических потерь, но при этом понизилась и ВКЭ. В целом для гетероструктуры №5 это привело к некоторому улучшению мощностных характеристик. Введение барьерных слоев в конструкцию гетероструктуры №6 с одной стороны позволило повысить пороговую ВКЭ до 97% (при этом его зависимость от тока накачки осталась примерно такой же, как и для гетероструктуры №5). С другой стороны, наличие барьерных слоев привело к сильному увеличению внутренних оптических потерь на пороге, но зато позволило снизить их градиент зависимости от тока накачки. Повышение ВКЭ и снижение градиента внутренних оптических потерь в сумме скомпенсировали увеличение порогового значения потерь так, что лазеры на основе гетероструктуры №6 продемонстрировали более линейную BTAX и большую оптическую мощность. Выходная оптическая мощность для лазеров на основе гетероструктуры №6 оказалась сопоставимой с лазерами на основе гетероструктуры №1.

Параграф 3.3 посвящен исследованию внутренних оптических потерь и внутренней квантовой эффективности в непрерывном режиме работы. Анализ внутренних оптических потерь в непрерывном режиме лазерной генерации проводился на основе токовых и температурных зависимостей внутренних оптических потерь, измеренных в импульсном режиме работы (параграф 3.2), с учетом саморазогрева активной области лазера. Для этого дополнительно были проведены измерения температуры кристалла при заданном токе, а также порогового тока (или плотности тока) при заданной температуре. Зависимость внутренних оптических потерь и ВКЭ от тока накачки для двух близких по конструкции гетероструктур №2 и №3, отличающихся составом волновода, представлены на рисунке 6.

С учётом влияния температуры зависимость внутренних оптических потерь от тока накачки приобретает явно сверхлинейный характер. Было показано, что в непрерывном режиме работы основной причиной роста потерь становится именно рост температуры: в зависимости потерь он проявляется прямо с порога генерации. Потери, вызванные протеканием тока, также вносят свой вклад, но в отличие от импульсного режима работы, они не являются доминирующим механизмом.

ВКЭ для обеих гетероструктур до тока накачки 9 А близок к 100%. При дальнейшем увеличении тока ВКЭ для гетероструктуры №3 начинает плавно падать до 90%. Причина такого падения ВКЭ состоит в делокализации носителей из мелких КЯ. Было показано, что для лазеров на основе гетероструктуры №3 как внутренние оптические потери, так и ВКЭ сильнее зависят от температуры. Именно это обстоятельство приводит к полному насыщению ВтАХ даже несмотря на высокий максимальный КПД и меньшую выделяемую тепловую мощность.

Сопоставление зависимости внутренних оптических потерь от тока накачки в импульсном и непрерывном режимах работы показало, что процессы роста имеют различные физические причины. В непрерывном режиме главную роль играет температурная стабильность гетероструктуры, а в импульсном режиме работы – транспортные свойства волновода.



Рисунок 6 – Внутренние оптические потери и ВКЭ в непрерывном режиме работы для лазеров на основе гетероструктур №2 и №3

<u>В главе четыре</u> представлены результаты достижения максимальных мощностных характеристик для самых перспективных лазерных гетероструктур, разработанных в главе 2. Предложено два пути для получения максимальной мощности: прокачка высокой плотности тока и экстремальное охлаждение лазера. Для лазеров на основе гетероструктуры №2 с расширенным AlGaAs волноводом в импульсном режиме была достигнута максимальная линейность BtAX. Лазеры на основе этой гетероструктуры продемонстрировали пиковую мощность 90 Вт при накачке током амплитудой 200 А. Дальнейшее увеличение мощности было ограничено насыщением BtAX.

Была разработана система охлаждения, позволяющая проводить измерения BTAX при температуре 120 К. Для лазеров на основе гетероструктуры №3 с расширенным GaAs волноводом были проведены измерения электрооптических характеристик при пониженной до 120 К температуре в импульсном и непрерывном режимах. Снижение температуры лазера до 120 К позволило значительно увеличить линейность BTAX лазера как в импульсном, так и в непрерывном режимах благодаря сильному снижению внутренних оптических потерь. Однако полностью избавиться от роста внутренних оптических потерь не удалось, на рисунке 7 все также наблюдается насыщение BTAX. При 120 К с апертуры 100 мкм были достигнуты максимальные оптические мощности 27 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режимах, ограниченные оптической прочностью выходного зеркала.



Рисунок 7 – ВтАХ лазеров на основе гетероструктуры №3 с расширенным GaAs волноводом при комнатной температуре и температуре 120 К в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах работы

Пятая глава посвящена математическому моделированию полученных экспериментальных данных для гетероструктур №2 и №3 с расширенными волноводами. B параграфе 5.1 была разработана самосогласованная математическая модель, включающая основные внутренние механизмы: рост концентрации носителей заряда в волноводе, вызванный необходимостью обеспечения диффузионного тока [3], увеличение модального усиления и связанное с ним увеличение концентрации носителей заряда в активной области, излучательная рекомбинация и безызлучательная Оже-рекомбинация носителей заряда в слоях гетероструктуры [10], поглощение на свободных носителях [6,7], первичный [4,11] и вторичный [4] эффекты двухфотонного поглощения. В параграфе 5.2 представлены результаты математического моделирования характеристик лазеров на основе гетероструктур №2 и №3, работающих в импульсном режиме. Было достигнуто хорошее согласие с экспериментальными данными не только по мощностным характеристикам лазеров, но и по значениям внутренних оптических потерь, измеренных в главе 3. Моделирование позволило подробно рассмотреть каждый физический механизм, протекающий внутри лазера, и оценить их вклад в снижение эффективности лазера. Было показано, что потери в активной области достаточно велики на пороге генерации, однако слабо зависят от тока накачки. Потери, связанные с двухфотонным поглощением также слабо растут с током накачки, но даже при высокой накачке достаточно малы для обеих гетероструктур. Было теоретически подтверждено, что наибольший вклад в рост внутренних оптических потерь с ростом тока накачки вносит именно поглощение на свободных носителях в волноводных слоях, а наибольший вклад в токи рекомбинации вносит излучательная рекомбинация в волноводе.

В *параграфе 5.3* представлена математическая модель расчета характеристик лазера в непрерывном режиме работы, учитывающая саморазогрев лазера и его влияние на все физические процессы. Результаты моделирования лазеров на основе гетероструктур №2 и №3 приведены в *параграфе 5.4*, построенная модель показала приемлемое соответствие экспериментальных и теоретических данных. Был подтвержден сверхлинейный характер зависимости внутренних оптических потерь от тока накачки в непрерывном режиме работы. Было показано, что именно рост паразитного тока рекомбинации с ростом тока накачки приводит к заметному падению ВКЭ в гетероструктуре №3 со слабой локализаций заряда в активной области.

На основе предложенных моделей в *параграфе 5.5* было проведено моделирование характеристик лазеров на основе гетероструктуры №3 при пониженной температуре теплоотвода. Было показано, что повышение линейности ВтАХ при снижении температуры достигнуто главным образом благодаря сильному снижению внутренних оптических потерь. При уменьшении температуры увеличивается подвижность носителей заряда, уменьшается сечение поглощения, носители заряда в КЯ перераспределяются на более низкие энергетические состояния, за счет чего вырастает материальное усиление и снижается температурная делокализация.

<u>В заключении</u> представлены основные результаты работы:

- На основании обзора литературы определён набор физических механизмов, ответственных за насыщение BtAX лазеров в импульсном и непрерывном режимах, показано, что на сегодняшний момент не существует единой и непротиворечивой модели, полностью описывающей наблюдаемые экспериментально явления.
- 2. Были разработаны, изготовлены и протестированы полупроводниковые лазеры различных конструкций. Все изготовленные гетероструктуры обеспечивают стабильную лазерную генерацию в непрерывном режиме с выходной мощностью в диапазоне от единиц до более 10 Вт и с пиковым КПД 40-65%. Лазеры на основе гетероструктур с расширенными волноводами могут использоваться для изготовления мощных многомодовых лазеров. Гетероструктуры со сверхузкими волноводами могут использоваться для изготовления и прикладных проектов.
- Зависимость внутренних оптических потерь от плотности тока накачки для лазеров с различными параметрами резонатора (длина, коэффициенты отражения зеркал) поразному влияет на насыщение BtAX и максимальную оптическую мощность.

- 4. Разработана методика исследования поглощения на свободных носителях в работающем полупроводниковом лазере при различных уровнях токовой накачки и температуры. Методика основана на вводе зондирующего излучения в волновод исследуемого образца, в котором зондирующее излучение испытывает поглощение на свободных носителях. Она позволяет обеспечить измерение величины коэффициента поглощения с точностью не хуже 0.1 см⁻¹.
- 5. Экспериментально показано, что в AlGaAs/InGaAs/GaAs лазерах насыщение BTAX в импульсном режиме определяется ростом внутренних оптических потерь и падением внутренней квантовой эффективности стимулированного излучения, пропорциональными росту плотности тока накачки лазера.
- 6. Экспериментально показано, что форма зависимостей внутренних оптических потерь от тока накачки зависит от конструкции лазерной гетероструктуры. Для лазеров с расширенным волноводом выше порога генерации зависимость близка к линейной в диапазоне тока накачки до 60 А и температурах 25-65 °C. Характерные значения внутренних оптических потерь составляют около 1.7 см⁻¹ при плотности тока накачки 10 кА/см². Для лазеров со сверхузким волноводом (100-200 нм) выше порога генерации зависимость сублинейна и меньше зависит тока. При плотности тока накачки 10 кА/см² внутренние оптические потери для них находятся в диапазоне 2-3 см⁻¹.
- 7. Экспериментально показано, что для лазеров с расширенным до 3 мкм волноводом из GaAs при высоких плотностях тока накачки (20 кА/см²) и при повышенных температурах (более 50⁰C) наблюдается сверхлинейный рост внутренних оптических потерь с плотностью тока накачки, который сопровождается падением внутренней дифференциальной квантовой эффективности лазера, в силу делокализации носителей заряда из активной области.
- 8. Экспериментально показано, что в лазерах с расширенным волноводом (1.7-3 мкм) падение ВКЭ стимулированного излучения невелико 88% и наблюдается только для лазеров со слабой локализацией носителей заряда при высоких токах и температурах.
- 9. Экспериментально показано, что эффекты делокализации носителей заряда можно практически полностью подавить, используя в составе волновода лазера Al₁₀Ga₉₀As. при этом наблюдается увеличение градиента токовой зависимости внутренних оптических потерь. За счёт подавления падения квантовой эффективности удалось добиться повышения пиковой оптической мощности до 60 Вт при 100 А (ширина полоска 100 мкм, температура теплоотвода 25 ⁰C, частота 1 кГц, длительность импульса 100 нс).

- Экспериментально показано, что в лазерах со сверхузким волноводом (100-200 нм) падение ВКЭ стимулированного излучения велико. Для некоторых типов таких гетероструктур ВКЭ составляет всего 60% при плотности тока 12 кА/см² при исходном значении 85-95% на пороге генерации.
- 11. Повысить ВКЭ в лазерах со сверхузким волноводом (100-200 нм) можно за счёт применения искусственных барьерных слоёв на границе волновод-эмиттер.
- 12. Для лазеров со сверхузкими волноводами (< 200 нм) наблюдается аномальное снижение внутренних оптических потерь с ростом температуры.
- 13. Экспериментально показано, что в AlGaAs/InGaAs/GaAs лазерах насыщение ВтАХ в непрерывном режиме работы определяется ростом внутренних оптических потерь, пропорциональным росту тока накачки и температуры лазера. При более высоких токах в непрерывном режиме наблюдается падение ВКЭ стимулированного излучения.
- 14. Для лазеров на основе гетероструктуры с расширенным AlGaAs волноводом в импульсном режиме достигнута максимальная линейность ВтАХ. Была достигнута пиковая оптическая мощность более 65 Вт (в две стороны) для длинных образцов с обеими просветлёнными гранями и пиковая оптическая мощность 90 Вт для стандартных образцов с выводом излучения через переднее зеркало.
- 15. Снижение температуры лазера до 120 К позволяет значительно увеличить линейность ВтАХ лазера как в импульсном, так и в непрерывном режимах благодаря сильному снижению внутренних оптических потерь. При 120 К с апертуры 100 мкм достигнуты максимальные оптические мощности 27 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режимах, ограниченные оптической прочностью выходного зеркала.
- 16. Теоретически описаны экспериментальные результаты, полученные для лазеров с расширенными волноводами. Моделирование позволило оценить вклады различных внутренних механизмов в рост внутренних оптических потерь и падение внутренней квантовой эффективности и обосновать полученные результаты.
- 17. Результаты настоящей работы использовались для выполнения ряда НИР и НИОКР в ФТИ им. А.Ф.Иоффе, в том числе: грант РНФ (№19-79-30072 «Физикотехнологические принципы создания интегральных многоэлементных фотонных схем на основе полупроводниковых наногетероструктур для мощных источников лазерного излучения с использованием технологии селективной эпитаксии»), гранты РФФИ (№ 18-32-00151 "Исследование внутренних оптических потерь в гетероструктурах мощных полупроводниковых лазеров при высоких уровнях токовой накачки" и №19-

32-90070 от 2019 г. «Исследование поглощения на свободных носителях в мощных полупроводниковых лазерах»).

Основные результаты диссертационной работы изложены в 16 работах.

Публикации в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

- Веселов Д.А. Исследование импульсных характеристик полупроводниковых лазеров с расширенным волноводом при низких температурах (110-120 К) / Веселов Д.А., Шашкин И.С., Бобрецова Ю.К., Бахвалов К.В., Лютецкий А.В., Капитонов В.А., Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. // Физика и техника полупроводников. – 2016. – Т.50, №10. – С. 1414.
- Veselov D.A. Measurements of internal optical loss inside an operating laser diode / Veselov D.A., Bobretsova Y.K., Leshko A.Y., Shamakhov V.V., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A. // J. Appl. Phys. – 2019. – Vol. 126, №21. – P.213107.
- Бобрецова Ю.К. AlGaAs/GaAs/InGaAs-лазеры со сверхузким волноводом / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Климов А.А., Вавилова Л.С., Шамахов В.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49, №7. – С.661.
- Veselov D.A. Internal optical loss and internal quantum efficiency of a high-power GaAs laser operating in the CW mode / Veselov D.A., Bobretsova Y.K., Klimov A.A., Bakhvalov K.V., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A. // Semicond. Sci. Technol. 2021. Vol. 36, №11. P. 115005.
- Бобрецова Ю.К. Экспериментальная методика исследования оптического поглощения в волноводных слоях полупроводниковых лазерных гетероструктур / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Подоскин А.А., Воронкова Н.В., Слипченко С.О., Ладугин М.А., Багаев Т.А., Мармалюк А.А., Пихтин Н.А. // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, №2. – С.124.
- Бобрецова Ю.К. Оптическое поглощение в волноводе AlGaAs-гетероструктуры птипа / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Климов А.А., Бахвалов К.В., Шамахов В.В., Слипченко С.О., Андрюшкин В.В., Пихтин Н.А. // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51, №11. – С.987.

Труды конференций:

 Бобрецова Ю.К. Исследование рабочих характеристик мощных полупроводниковых лазеров при низких температурах / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Слипченко С.О., Пихтин Н.А., Соколова З.Н., Тарасов И.С. // Программа и тезисы докладов 5-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». – 2016.

- Бобрецова Ю.К. Рост внутренних оптических потерь в гетероструктурах лазеров спектрального диапазона 1 – 1.1 мкм / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Пихтин Н.А. // Сборник тезисов VI Международный симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур. – 2017.
- Veselov D.A. Current and temperature dependencies of internal optical loss in laser heterostructures / Veselov D.A., Bobretsova Y.K., Klimov A.A., Shamakhov V.V., Leshko A.Y., Sokolova Z.N., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A. // Proc. of International conference laser optics ICLO. – 2018. – P. 147.
- 4. Веселов Д.А., Исследование внутренних оптических потерь в лазерных гетероструктурах методом ввода зондирующего излучения / Веселов Д.А., Бобрецова Ю.К., Лютецкий А.В., Бахвалов К.В., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. // Сборник тезисов 6-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». 2018. С.32.
- 5. Климов А.А. AlGaAs/GaAs/InGaAs лазеры со сверхузким волноводом для импульсных применений / Климов А.А., Веселов Д.А., Бобрецова Ю.К., Слипченко С.О., Вавилова Л.С., Шамахов В.В., Пихтин Н.А. // Сборник тезисов 6-й Российский симпозиум с международным участием «Полупроводниковые лазеры: физика и технология». – 2018. – С.94.
- 6. Бобрецова Ю.К. Полупроводниковые лазеры со сверхузким волноводом / Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А., Климов А.А., Рудова Н.А., Ладугин М.А., Рябоштан Ю.Л., Мармалюк А.А., Слипченко С.О., Пихтин Н.А. // Сборник тезисов 12-й Белорусско-Российский семинар «Полупроводниковые лазеры и системы на их основе». 2019. С.102.
- Веселов Д.А. Оптические потери в лазерных волноводах различных конструкций / Веселов Д.А., Бобрецова Ю.К., Климов А.А., Слипченко С.О., Ладугин М.А., Мармалюк А.А., Пихтин Н.А. // Сборник тезисов XIV Российская конференция по физике полупроводников. – 2019. – С.423.
- Климов А.А. Аномальная температурная зависимость внутренних оптических потерь в лазерах со сверхузкими волноводами / Климов А.А., Бобрецова Ю.К., Веселов Д.А. // Сборник тезисов XXI Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике. – 2019. – С.98.

- Veselov D.A. High-power laser diodes with ultra-narrow waveguides for pulse operation / Veselov D.A., Bobretsova Y.K., Golovin V.S., Nikolaev D.N., Slipchenko S.O., Pikhtin N.A., Kop'ev P.S. // Proc. SPIE LASE. – 2020. – Vol. 11301.
- Slipchenko S.O. Energy balance model of high-power semiconductor lasers at high-pumping current / Slipchenko S.O., Soboleva O.S., Bobretsova Y.K., Gavrina P.S., Rudova N.A. // // Proc. SPIE LASE. 2020. Vol. 11274.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Wenzel H. et al. Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes / Wenzel H., Crump P., Pietrzak A., Wang X., Erbert G., Tränkle G. // New Journal of Physics. – 2010. – Vol. 12. – P. 085007.
- Piprek J. On the reliability of pulse power saturation models for broad-area GaAs-based lasers / Piprek J. // Optical and Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 51, №2. – P. 1.
- Ryvkin B. Non-uniform carrier accumulation in optical confinement layer as ultimate power limitation in ultra-high-power broad-waveguide pulsed InGaAs/GaAs/AlGaAs laser diodes / Ryvkin B., Avrutin E. // Electronics Letters. – 2006. – Vol. 42, № 22. – P. 1283.
- Avrutin E.A. Theory of direct and indirect effect of two-photon absorption on nonlinear optical losses in high power semiconductor lasers / Avrutin E.A., Ryvkin B.S. // Semiconductor science and technology. 2017. Vol. 32, № 1. P. 015004.
- Piprek J. What Causes the Pulse Power Saturation of GaAs-Based Broad-Area Lasers? / Piprek J., Li Z.M. // IEEE Photonics Technology Letters. – 2018. – Vol. 30, № 10. – P. 963.
- Соколова З.Н. Рост внутренних оптических потерь с увеличением тока накачки и выходная мощность лазеров на квантовых ямах / Соколова З.Н., Веселов Д.А., Пихтин Н.А., Тарасов И.С., Асрян Л.В. // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 7. – Р. 998.
- Пихтин Н.А. Внутренние оптические потери в полупроводниковых лазерах / Пихтин Н.А., Слипченко С.О., Соколова З.Н., Тарасов И.С. // Физика и техника полупроводников. – 2004. – Т. 38, № 3. – Р. 374.
- Wang X. Root-Cause Analysis of Peak Power Saturation in Pulse-Pumped 1100 nm Broad Area Single Emitter Diode Lasers / Wang X., Crump P., Wenzel H., Liero A., Hoffmann T., Pietrzak A., Schultz C., Klehr A., Ginolas A., Einfeldt S., Bugge F., Erbert

G., Trankle G. // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2010. – Vol. 46, № 5. – P. 658.

- Zhukov A.E. Improvement of temperature-stability in a quantum well laser with asymmetric barrier layers / Zhukov A.E., Kryzhanovskaya N.V., Zubov F.I., Shernyakov Y.M., Maximov M.V., Semenova E.S., Yvind K., Asryan L.V. // Applied Physics Letters. - 2012. – Vol. 100, № 2. – P. 021107.
- Соколова З.Н. Захват носителей заряда и выходная мощность лазера на квантовой яме / Соколова З.Н., Тарасов И.С., Асрян Л.В. // Физика и техника полупроводников. – 2011. – Vol. 45, № 11. – Р. 1553.
- Dogan M. Two photon absorption in high power broad area laser diodes / Dogan M., Michael C., Zheng Y., Zhu L., Jacob J. // High-Power Diode Laser Technology and Applications XII. – 2014. – Vol. 8965. – P. 89650P.