

На правах рукописи

Волков Никита Александрович

**ЛАЗЕРНЫЕ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ GaAs и InP
С УЛУЧШЕННОЙ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ**

Специальность 05.27.03 – Квантовая электроника

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2022 г.

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский институт «Полюс» имени М.Ф. Стельмаха»

Научный руководитель: Мармалюк Александр Анатольевич, доктор технических наук, начальник НТЦ АО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники имени В.Г. Мокерова Российской академии наук

Защита состоится «__» _____ 2022 г. в 15.00 часов на заседании диссертационного совета при Московском физико-техническом институте (МФТИ) по адресу: 141701, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский переулок, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) <https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>

Работа представлена «__» _____ 2022 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В последние годы значительно возросла потребность в мощных полупроводниковых лазерах ближнего ИК-диапазона для использования в качестве накачки твердотельных и волоконных лазеров, применения в лазерных системах прямого действия технологических установок обработки материалов, в системах передачи информации, медицинской технике и научном приборостроении.

Основными приборными параметрами таких полупроводниковых лазеров являются выходная оптическая мощность и КПД, а основным препятствием на пути достижения повышенных мощностей – тепловое насыщение ватт-амперной характеристики (ВтАХ) в результате саморазогрева лазера в процессе работы.

Помимо повышения температуры активной области, один из ведущих механизмов насыщения для мощных лазеров, особенно, при больших токах накачки – оптические потери на делокализованных носителях, особенно на электронах в r -части волновода, которые приводят к снижению дифференциальной квантовой эффективности и росту тепловыделения. Это, в свою очередь, увеличивает пороговый ток и снижает квантовую эффективность, замыкая круг отрицательной обратной связи. В результате выходная оптическая мощность полупроводниковых лазеров с ростом тока накачки насыщается. Вместе с тем, улучшение локализации электронов, как правило, связано с использованием более широкозонных волноводных слоев, характеризующихся увеличенным последовательным и тепловым сопротивлением. Работа таких приборов будет сопровождаться повышенным тепловыделением и, следовательно, быстрым насыщением выходной оптической мощности. Улучшение вольт-амперной характеристики (ВАХ) полупроводниковых лазеров во многих случаях позволяет повысить их КПД, снизить тепловой разогрев и отодвинуть момент насыщения выходной мощности. Всё это приводит к необходимости разработки конструкций гетероструктур, направленных на поиск компромисса между выбросом электронов из квантовых ям (КЯ) активной области, их накоплением в волноводе и саморазогревом лазеров.

Настоящая работа посвящена развитию существующих подходов и поиску новых решений по созданию эпитаксиальных гетероструктур (ГС) на основе GaAs и InP для полупроводниковых лазеров ближнего ИК-диапазона повышенной мощности, сочетающих улучшение ВАХ при поддержании оптических потерь на низком уровне.

Цель и основные задачи работы

Целью диссертационной работы являлась разработка и получение методом МОС-гидридной эпитаксии гетероструктур на основе GaAs и InP для полупроводниковых лазеров ближнего ИК-диапазона повышенной мощности с улучшенной ВАХ, а также изучении выходных характеристик таких излучателей.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Исследовать влияние ширины волноводных слоёв на выходные характеристики полупроводниковых лазеров, созданных на основе гетероструктур AlGaInAs/InP.
2. Создать гетероструктуры со сверхузкими волноводными слоями на основе системы материалов AlGaInAs/InP и изучить выходные характеристики полупроводниковых лазеров на их основе.
3. Проанализировать влияние уменьшения толщин волноводного слоя со стороны р-части гетероструктур AlGaInAs/InP на ВАХ и ВТАХ лазерных излучателей.
4. Сравнить выходные характеристики лазеров AlGaInAs/InP с расширенным, сильно асимметричным и сверхузким волноводами.
5. Предложить подходы по улучшению ВАХ при сохранении низких оптических потерь полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с расширенным асимметричным волноводом.
6. Изучить влияние снижения мольной доли AlAs в волноводных слоях AlGaAs на характеристики насыщения ВТАХ.
7. Исследовать влияние легирования волноводных слоев в лазерах InGaAs/AlGaAs/GaAs на их выходную мощность и КПД.

Научная новизна работы

1. Показано, что использование сверхузкого волновода ($d=0,05-0,1$ мкм) в полупроводниковых лазерах на основе гетероструктур AlGaInAs/InP способствует сохранению наклона ВТАХ при увеличении тока накачки и позволяет реализовать выходную мощность до 5 Вт на длинах волн 1450-1500 нм в непрерывном режиме генерации.

2. Установлено, что уменьшение р-части волновода в конструкциях лазерных гетероструктур AlGaInAs/InP с сильно асимметричным волноводом позволяет обеспечить низкие оптические потери и высокую дифференциальную квантовую эффективность, что дает возможность достигнуть в непрерывном режиме работы 5 Вт выходной мощности на длинах волн 1450-1500 нм.

3. Продемонстрировано, что применение легированных волноводов позволяет снизить последовательное сопротивление полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с расширенным асимметричным волноводом.

4. Представлены результаты исследования снижения мольной доли AlAs в волноводных слоях AlGaAs лазерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с расширенным асимметричным волноводом на характеристики насыщения ВТАХ.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Использование сверхузкого волновода в ГС AlGaInAs/InP способствует снижению последовательного сопротивления и уменьшению накопления носителей в волноводе, что отодвигает предел насыщения ВТАХ и позволяет достигнуть 5 Вт в непрерывном и 20 Вт в импульсном режиме работы.

2. Уменьшение ширины р-части волновода асимметричной лазерной гетероструктуры AlGaInAs/InP позволяет улучшить теплоотвод от активной области и обеспечить достижение 5 Вт в непрерывном и 30 Вт в импульсном режиме работы.

3. Переход к более узкозонным волноводным слоям в ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs, обеспечивающим барьер для электронов 150-200 мэВ, улучшает ВАХ и позволяет снизить темп насыщения ВТАХ при высоких уровнях накачки для лазеров с длиной волны излучения 900-1000 нм.

4. Снижение последовательного сопротивления и напряжения отсечки ВАХ при ограничении внутренних оптических потерь позволяет улучшить КПД лазеров на основе ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs до 72% в непрерывном режиме генерации.

Практическая значимость результатов работы

Наибольшее практическое значение имеют следующие результаты:

1. Получены ГС AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом, позволившие создать на их основе полупроводниковые лазеры с выходной мощностью 5 Вт в непрерывном и 20 Вт в импульсном режиме, работающие в спектральном диапазоне 1450-1500 нм.

2. Разработан подход по уменьшению р-части волновода лазерных гетероструктур AlGaInAs/InP, который позволил создать полупроводниковые лазеры с выходной мощностью 5 Вт в непрерывном режиме генерации и 30 Вт в импульсном режиме генерации.

3. Продемонстрирована повышенная температурная стабильность лазеров с улучшенной ВАХ, благодаря снижению саморазогрева на рабочих токах.

4. Представлены результаты разработки конструкции и технологии легирования волноводных слоев лазерных ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs, которые позволили снизить электрическое сопротивление при сохранении уровня внутренних оптических потерь.

5. Разработаны и исследованы полупроводниковые ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs со сниженной мольной долей AlAs в волноводных слоях AlGaAs. Показано, что благодаря предложенному подходу снижается последовательное сопротивление и уменьшается напряжение отсечки ВАХ, что при обеспечении барьера для электронов в диапазоне 150-250 мэВ способствует снижению насыщения ВтАХ при увеличении тока накачки для лазеров, работающих в диапазоне длин волн 900-1000 нм.

6. Представлены результаты разработки и создания полупроводниковых лазеров на основе ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs с увеличенным КПД до 72%.

Научная обоснованность и достоверность результатов

Достоверность научных результатов обеспечивается адекватностью и корректностью расчётов и методов исследования на современном технологическом и контрольно-измерительном оборудовании, использованием апробированных методов исследования, проведением экспериментов на большом числе однотипных образцов, демонстрирующих воспроизводимые характеристики, широкой апробацией работы на отечественных и международных конференциях и публикацией результатов в рецензируемых журналах.

Личный вклад автора

В настоящей работе личный вклад автора состоит в проведении численных расчетов конструкции гетероструктур, их получении методом МОС-гидридной эпитаксии, изучении характеристик гетероструктур и полупроводниковых лазеров, изготовленных на их основе, обработке и анализе результатов исследования, определении выводов и публикации научных работ. Личный вклад автора в результаты, вошедшие в диссертацию, был определяющим.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы были представлены и обсуждены на X юбилейной международной научной конференции «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии» (2010, Ставрополь), III международной конференции «Кристаллические материалы» (2010, Харьков), XIV международной конференции по лазерной оптике (2010, Санкт-Петербург), IV симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (2013, Москва), XV Европейской конференции по металлоорганической газофазной эпитаксии (2013, Аахен), XIV Российской конференции по физике полупроводников (2019, Новосибирск), XXV международном симпозиуме «Нанофизика и наноэлектроника» (2021, Нижний Новгород), VIII международном симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (2021, Москва)

Публикации

По результатам диссертации имеется 17 печатные научные работы, из которых 8 опубликованы в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus, RSC и входящих в перечень ведущих периодических изданий, рекомендованных в действующем перечне ВАК, а 9 в тезисах и материалах Российских и международных конференций. Список научных публикаций приведен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов и списка литературы. Работа содержит 118 страниц, включая 78 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 83 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, представлена цель работы и перечислены задачи для ее достижения, приведены научная новизна и практическая значимость, сформулированы научные положения, выносимые на защиту, описана апробация работы, даны ее структура и объем.

Первая глава посвящена рассмотрению квантоворазмерных гетероструктур (ГС) на основе GaAs и InP для полупроводниковых лазеров повышенной

мощности. Изучены основные конструкции и методы получения лазерных ГС. Проанализированы причины насыщения выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров и рассмотрены подходы по ее повышению [1-4]. Установлено, что температурная делокализация электронов является одной из ведущих причин, ограничивающих рост выходной мощности с увеличением тока накачки в непрерывном режиме работы. Отмечается важная роль последовательного электрического сопротивления в повышении КПД лазерных излучателей. Показано, что не существует универсальных подходов и требуется разработка конструкции лазерной ГС в зависимости от используемой системы материалов, требуемой выходной мощности, режимов работы и длины волны излучения.

Во **второй главе** описаны методики получения и исследования свойств полупроводниковых гетероструктур на основе GaAs и InP. Гетероструктуры формировались методом МОС-гидридной эпитаксии, а для исследования их характеристик использовались оптическая и электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия, фотолюминесцентная спектроскопия, CV-профилометрия.

Третья глава посвящена созданию гетероструктур AlGaInAs/InP со сверхузкими и сильно асимметричными волноводами и изучению полупроводниковых лазеров на их основе.

Для улучшения выходных характеристик лазеров диапазона длин волн 1400-1600 нм в конструкции гетероструктур использованы напряжённые квантовые ямы, способствующие снижению вероятности протекания безызлучательных процессов Оже-рекомбинации [5], и упруго-компенсированные квантовые ямы с увеличенной энергетической глубиной, снижающие выброс носителей в волновод из активной области. Переход от широкого волновода к сверхузкому (рисунок 1) позволил снизить оптические потери, обусловленные выброшенными в волновод носителями при увеличении тока накачки, а также улучшить теплоотвод от активной области при монтаже р-стороной кристалла вниз.

Лазеры на основе сверхузкого волновода показали более высокие значения предельной мощности в непрерывном режиме генерации по сравнению с лазерами на основе широкого симметричного волновода (рисунок 2). При этом углы наклонов ВТАХ рассматриваемых образцов совпадают на начальном участке, но выходная мощность лазеров с широким волноводом начинает насыщаться раньше по причине их большего саморазогрева.

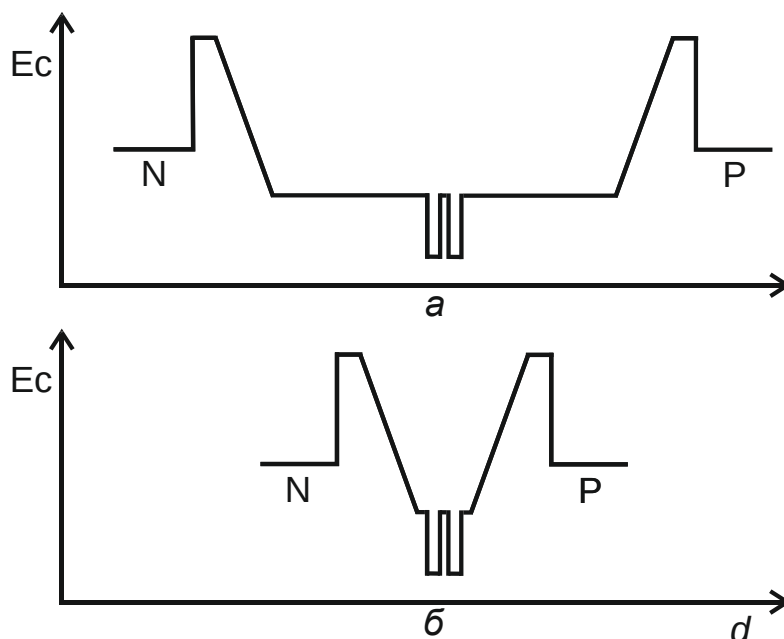


Рисунок 1. Схематическое изображение зонной диаграммы активной области полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP с симметричным широким (а) и сверхузким (б) волноводами.

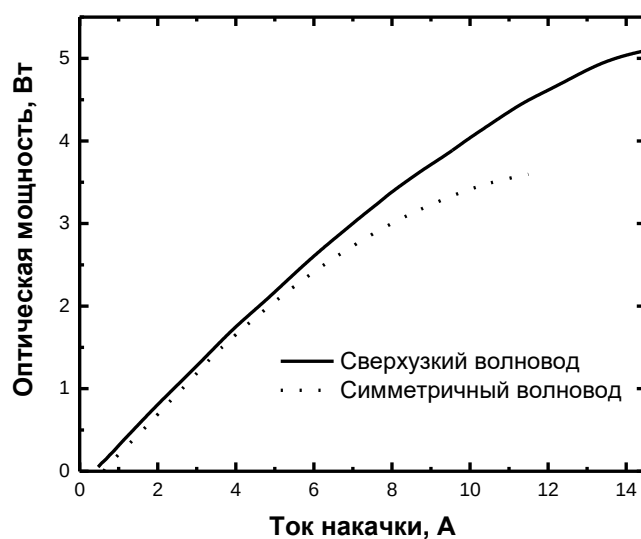


Рисунок 2. Ватт-амперные характеристики полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP со сверхузким и широким симметричным волноводом в непрерывном режиме генерации.

При всех достоинствах лазеров со сверхузким волноводом, для них характерен достаточно высокий уровень внутренних оптических потерь ($\alpha_i=2-3 \text{ см}^{-1}$) из-за сильного проникновения оптической моды в легированные эмиттерные слои. В лазерах с широким волноводом излучение преимущественно распространяется в пределах нелегированных волноводных слоев, что обуславливает низкие

значения внутренних оптических потерь ($\alpha_i=1-2 \text{ см}^{-1}$). Попыткой объединить преимущества сверхузкого волновода в части хорошего теплоотвода и широкого волновода в части низких оптических потерь служит конструкция с сильно асимметричным волноводом (рисунок 3). Сравнение ВТАХ таких излучателей с лазерами с широким симметричным волноводом представлено на рисунке 4. Видно, что смещение квантовой ямы вплотную к р-эмиттеру повышает угол наклона ВТАХ и увеличивает предел насыщения выходной мощности.

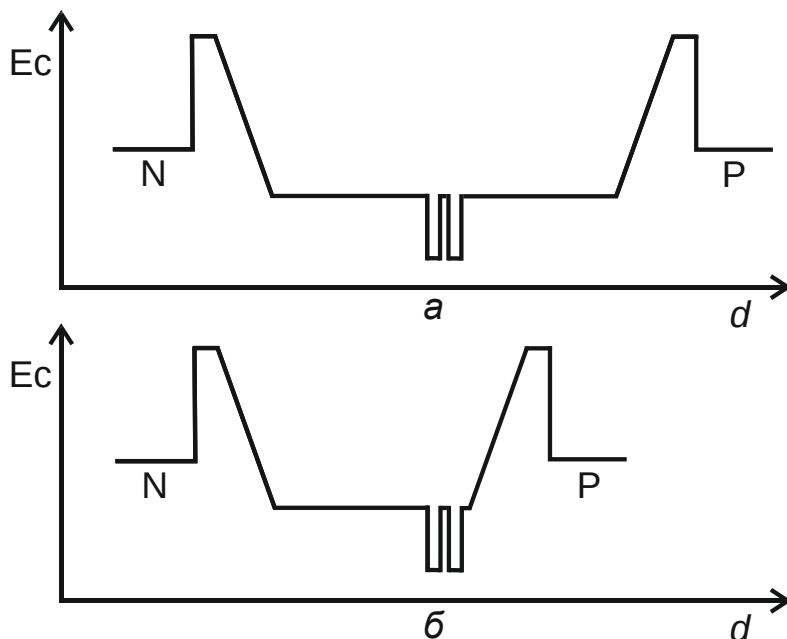


Рисунок 3. Схематическое изображение зонной диаграммы активной области полупроводниковых лазеров на основе AlGaInAs/InP со сверхузким (а) и асимметричным (б) волноводами.

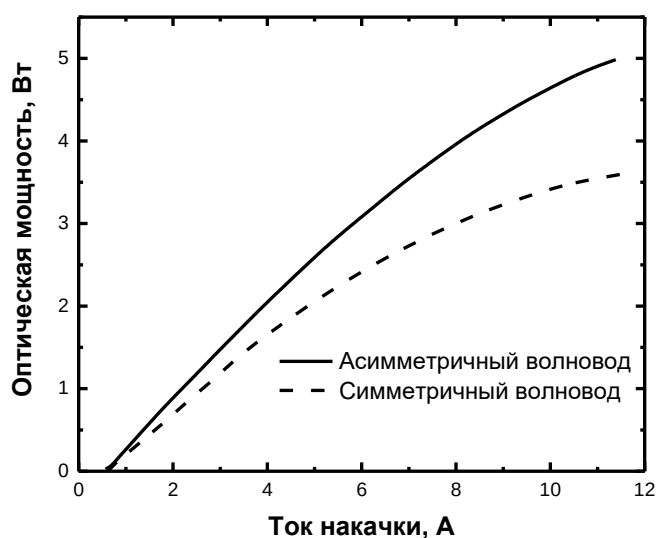


Рисунок 4. Ватт-амперные характеристики полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с асимметричным и симметричным волноводом в непрерывном режиме генерации.

Представляет интерес сравнение характеристик лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP со сверхузким и асимметричным волноводом, т.к. оба типа лазеров продемонстрировали свое преимущество перед традиционной конструкцией с широким симметричным волноводом. Так, лазеры с асимметричным и сверхузким волноводом с полосковым контактом шириной 100 мкм достигали выходной оптической мощности 5 Вт (при токах накачки 11,5 А и 14 А, соответственно) в непрерывном режиме работы при комнатной температуре на длине волны генерации 1450-1500 нм, тогда как максимальная оптическая мощность лазеров с симметричным волноводом в указанном диапазоне генерации составила всего 3,6 Вт при токе 11 А.

Сравнение зависимостей наклонов ВтАХ лазеров с асимметричным и сверхузким волноводом в непрерывном режиме генерации от тока накачки представлено на рисунке 5. Видно, что наклон ВтАХ лазеров на основе асимметричного волновода на начальном участке заметно выше, чем у образцов со сверхузким волноводом. Однако, по мере увеличения тока накачки, скорость падения наклона ВтАХ лазера со сверхузким волноводом меньше.

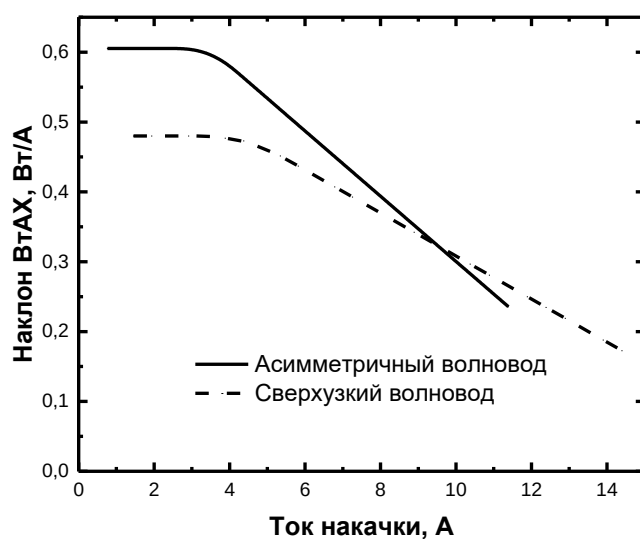


Рисунок 5. Наклон ватт-амперных характеристик полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с асимметричным и сверхузким волноводом в непрерывном режиме генерации от тока накачки.

Плотность тока прозрачности ($J_0=120-150$ А/см²) и внутренняя квантовая эффективность ($\eta_i=0,93-0,96$) в лазерах со сверхузким и асимметричным волноводом оказались близки (рисунок 6), а вот уровень внутренних оптических

потерь в излучателе с асимметричным волноводом ожидаемо оказался ниже ($\alpha_i=1,0-1,5 \text{ см}^{-1}$), чем у образца со сверхузким волноводом ($\alpha_i=2,0-2,5 \text{ см}^{-1}$).

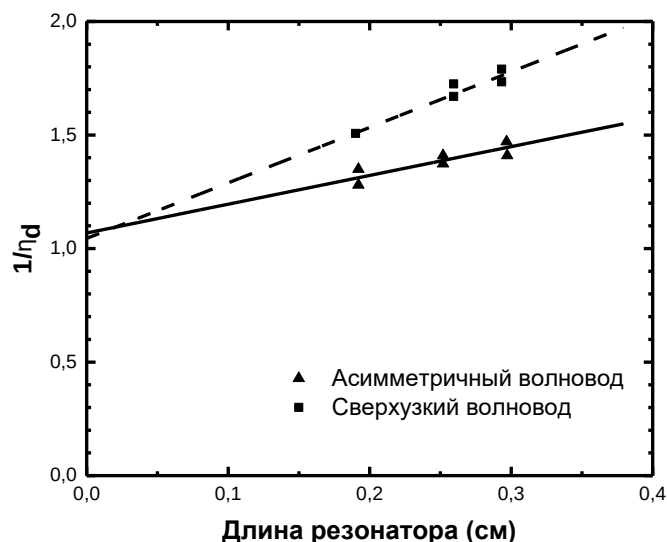


Рисунок 6. Зависимость обратной дифференциальной квантовой эффективности от длины резонатора полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с асимметричным и сверхузким волноводом.

Характер зависимости значения длины волн пика генерации от тока накачки для лазеров обоих типов указал на более эффективный теплоотвод у лазеров со сверхузким волноводом. Для таких лазеров увеличение длины волны излучения оказалось не таким значительным (рисунок 7).

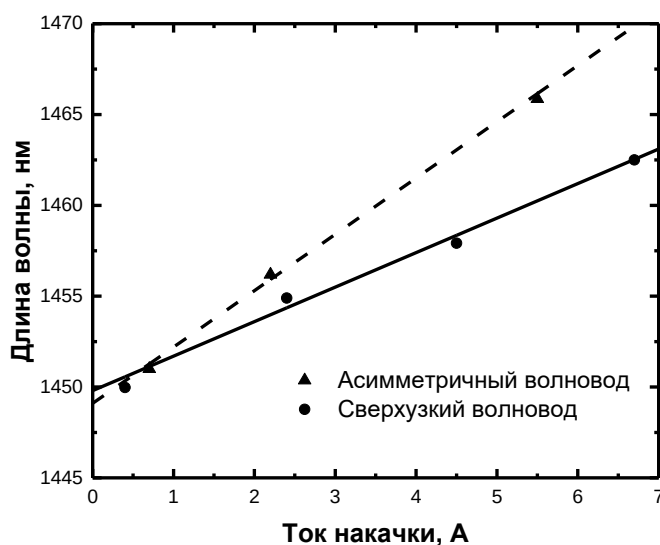


Рисунок 7. Зависимость длины волны генерации полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с асимметричным и сверхузким волноводом от тока накачки в непрерывном режиме генерации.

Снижение саморазогрева лазеров и улучшение теплоотвода от активной области позволяют достигнуть более высокой выходной мощности. Этому способствует использование конструкций гетероструктур, в которых квантовые ямы активной области максимально приближены к р-эмиттеру.

В четвертой главе представлены результаты создания гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с вариацией ширины запрещенной зоны и уровня легирования волноводов, а также произведено изучение полупроводниковых лазеров на их основе.

Одной из основных причин насыщения выходной оптической мощности полупроводниковых лазеров в непрерывном режиме генерации является делокализация носителей заряда из активной области [6]. Одним из способов снижения интенсивности процесса делокализации носителей заряда является использование КЯ с энергетической глубиной для электронов свыше 250 мэВ [7], что соответствует использованию волноводов в системе материалов AlGaAs с мольной долей AlAs соответствующей 0.25-0.3 в исследуемом диапазоне длин волн 940-980 нм. При этом, повышение мольной доли AlAs в волноводных слоях приводит к повышению рабочего напряжения лазеров при тех же токах накачки, что усиливает саморазогрев приборов. Данный эффект усиливает делокализацию носителей заряда из КЯ и может приводить к раннему насыщению выходной мощности [8]. Для улучшения мощностных характеристик таких лазеров можно использовать подходы, связанные с частичным легированием волноводов и понижением мольной доли AlAs в них.

Легирование волноводных слоев, с одной стороны, позволяет снизить последовательное сопротивление и понизить рабочее напряжение полупроводниковых лазеров, а, с другой – увеличивает внутренние оптические потери. Следовательно, на практике необходим поиск оптимума между изменениями указанных характеристик. Для этого в работе исследовались полупроводниковые лазеры с преднамеренно нелегированными ($1 \div 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и легированными ($10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$) волноводными слоями. Для образцов с легированными волноводами использовались более узкозонные волноводные слои $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{As}$, а для образцов с нелегированными волноводами – более широкозонные $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$. Из полученных гетероструктур изготавливались полупроводниковые лазеры с полосковым контактом шириной 100 мкм.

Лазеры с легированным волноводом продемонстрировали снижение последовательного сопротивления ($R_s=55-70$ мОм по сравнению с $R_s=95-110$ мОм для лазеров с нелегированным волноводом) и уменьшение напряжения отсечки ($U_0=1.41-1.44$ В против $U_0=1.50-1.53$ В) ВАХ (рисунок 8).

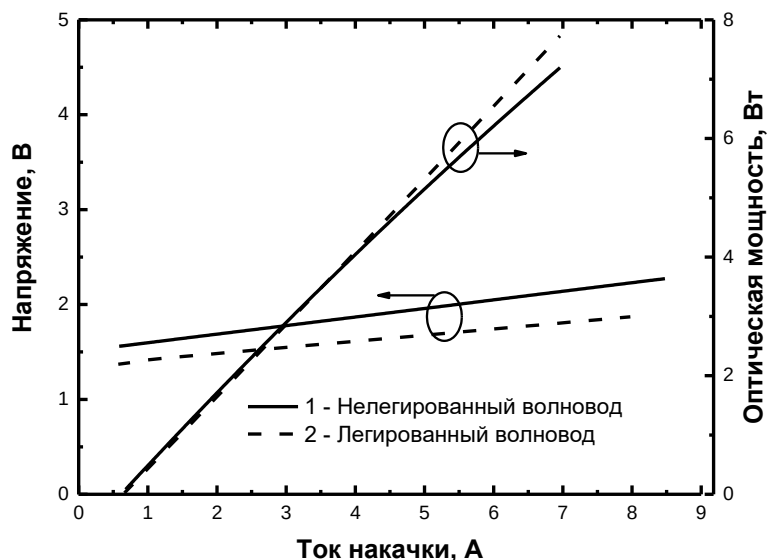


Рисунок 8. ВАХ и ВТАХ полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом.

Улучшение ВАХ при прочих равных условиях, должно способствовать снижению насыщения выходной оптической мощности при больших токах накачки благодаря увеличению КПД (Рисунок 9). Видно, что снижение последовательного сопротивления и уменьшение напряжения отсечки лазеров с легированным волноводом при незначительном увеличении внутренних оптических потерь способствует сохранению наклона ВТАХ. Характер ее насыщения с ростом токи накачки хорошо виден на рисунке 9, где представлена токовая зависимость наклона ВТАХ.

Предложенная конфигурация лазерной гетероструктуры с легированным волноводом уменьшенного состава позволила поднять КПД таких излучателей до 72%.

В продолжение работы, для определения влияния состава волноводных слоёв на выходные характеристики лазеров, были проведены исследования трёх типов образцов с различной мольной долей AlAs в волноводных слоях $Al_xGa_{1-x}As$ ($x_w=0.3$, $x_w=0.15$ и $x_w=0.1$), легированных до уровня $10^{16}-10^{17}$ см⁻³. В последних двух вариантах структур энергетическая глубина КЯ составляла примерно 150-200 мэВ, что, с одной стороны, приводит к меньшему ограничению электронов в

КЯ, а с другой – к улучшенной ВАХ и к уменьшению насыщения ВТАХ на высоких токах.

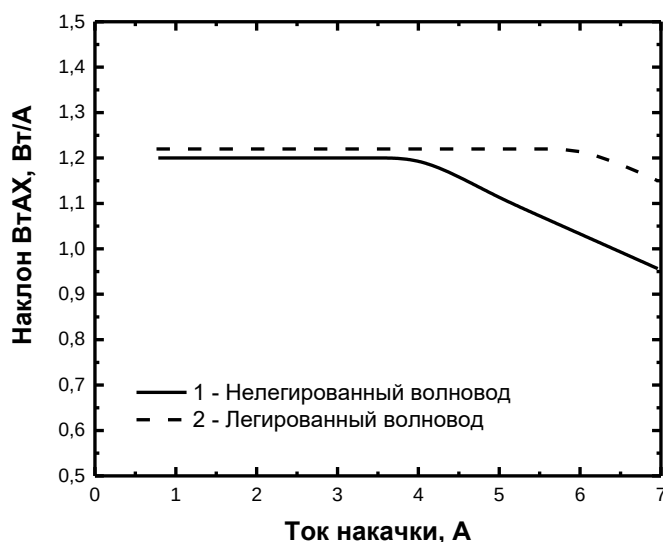


Рисунок 9. Зависимость наклона ВТАХ полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с нелегированным (1) и легированным (2) расширенным асимметричным волноводом от тока накачки в непрерывном режиме генерации.

Изготовленные полупроводниковые лазеры, как и в предыдущих случаях, имели полосковый контакт шириной 100 мкм. Последовательное сопротивление в образцах при снижении мольной доли AlAs в слоях AlGaAs уменьшилось, что видно по изменению наклона ВАХ (рисунок 10). Такое же поведение продемонстрировало и напряжение отсечки, уменьшившись с 1,4 В ($x_w=0.3$) до 1,32 В ($x_w=0.15$) и 1,29 В ($x_w=0.1$).

Улучшение ВАХ при прочих равных условиях способствовало снижению насыщения выходной оптической мощности при больших токах накачки. На рисунке 11 видно, что снижение последовательного сопротивления и уменьшение напряжения отсечки лазеров со сниженным составом Al в волноводных слоях отодвинули момент насыщения ВТАХ и сохранили наклон ВТАХ при увеличении рабочих токов. Это позволило повысить КПД таких образцов на 15-20%.

В данной работе показано, что снижение последовательного сопротивления и напряжения отсечки способствует сохранению наклона ВТАХ с ростом тока накачки и реализации повышенного КПД полупроводниковых лазеров с расширенным асимметричным волноводом даже при снижении энергетической глубины КЯ. Улучшение ВАХ при снижении состава Al в волноводных слоях $Al_xGa_{1-x}As$ способно компенсировать уменьшение энергетической глубины КЯ.

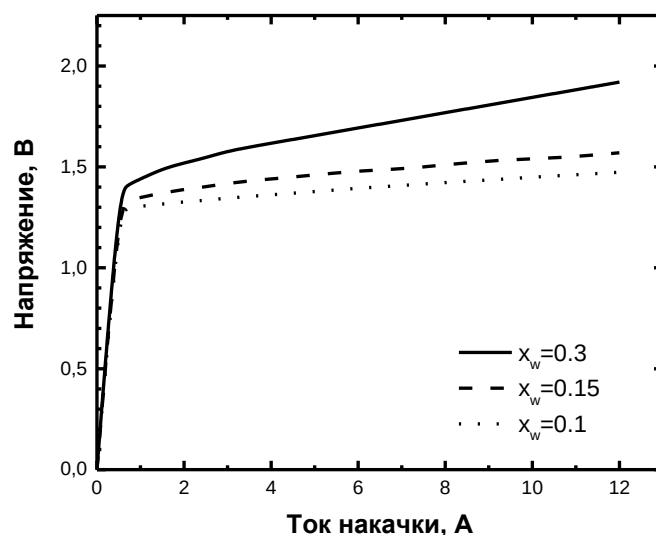


Рисунок 10. Вольт-амперная характеристика полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с вариацией состава волноводных слоев: 1 – $x_w=0.3$; 2 – $x_w=0.15$; 3 – $x_w=0.1$.

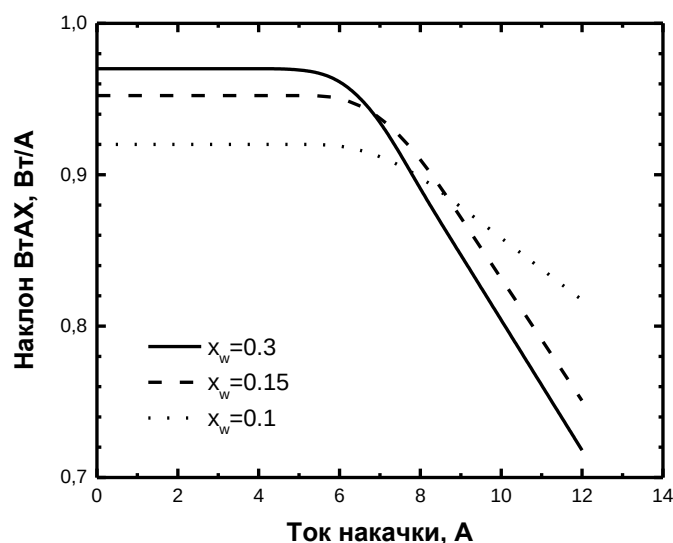


Рисунок 11. Зависимость наклона ватт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров на основе гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с вариацией состава волноводных слоев: 1 – $x_w=0.3$; 2 – $x_w=0.15$; 3 – $x_w=0.1$.

Основные результаты работы

При выполнении диссертационной работы были получены следующие основные результаты:

1. Рассчитаны и методом МОС-гидридной эпитаксии получены лазерные гетероструктуры AlGaInAs/InP со сверхузким волноводом. Для снижения

внутренних оптических потерь использовано профильное легирование. Показано, что полупроводниковые лазеры с таким волноводом характеризуются сохранением наклона ВТАХ при увеличении тока накачки.

2. Показано, что, хотя внутренние оптические потери в лазерах со сверхузким волноводом ($\alpha_i=2,0-2,5\text{см}^{-1}$) превышали аналогичный параметр в лазерах с расширенным волноводом ($\alpha_i=1,0-1,5\text{ см}^{-1}$), улучшение их ВАХ позволило достигнуть выходную мощность 5 Вт в непрерывном режиме работы, тогда как лазеры с расширенным волноводом достигали только 3 Вт.

3. Продемонстрировано, что уменьшение р-части волновода замедляет рост оптических потерь на делокализованных электронах с ростом тока накачки и отодвигает предел насыщения ВТАХ. Такой подход снижает последовательное электрическое и тепловое сопротивление по сравнению с традиционным расширенным волноводом.

4. Полупроводниковые лазеры на основе гетероструктур AlGaInAs/InP с сильно асимметричным волноводом продемонстрировали 5 Вт выходной мощности в непрерывном и 20 Вт в импульсном режиме работы.

5. Сравнение лазеров со сверхузким и сильно асимметричным типом волновода показали, что при сравнимой максимальной выходной мощности они демонстрируют различный характер поведения ВТАХ. Лазеры с сильно асимметричным волноводом имеют высокие значения дифференциальной квантовой эффективности на начальном участке ВТАХ, благодаря более низким внутренним оптическим потерям. Однако с ростом тока накачки их выходная мощность быстрее насыщается из-за повышенного последовательного сопротивления и, следовательно, усиленного саморазогрева. При этом, лазеры со сверхузким волноводом, проигрывая в начальной дифференциальной квантовой эффективности дольше сохраняли наклон ВТАХ, что позволило им достичь такой же выходной мощности.

6. Исследовано влияние ширины запрещенной зоны волновода ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs на выходные характеристики полупроводниковых лазеров, работающих в спектральном диапазоне 900-1000 нм. Установлено, что переход к более узкозонным слоям позволяет улучшить ВАХ и благодаря этому снизить насыщение ВТАХ, несмотря на снижение энергетической глубины КЯ InGaAs.

7. Легирование волноводных слоев на уровне $10^{16}-10^{17}\text{ см}^{-3}$ практически не сказывается на увеличении внутренних оптических потерь, но позволяет снизить последовательное электрическое сопротивление полупроводниковых лазеров и повысить их КПД.

8. Созданы ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs с вариацией энергетической глубины КЯ для электронов и изучены выходные характеристик лазеров на их основе. Показано, что при определенной комбинации параметров КЯ и волновода снижение саморазогрева лазеров с более мелкой КЯ позволяет сохранить наклон ВтАХ при высоких токах накачки.

9. Продемонстрировано, что использование волноводных слоев AlGaAs со сниженной мольной долей AlAs в ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs наряду с легированием расширенного асимметричного волновода позволяет увеличивать их КПД за счет уменьшения напряжения отсечки и последовательного сопротивления. Результатом разработки явилось создание ГС InGaAs/AlGaAs/GaAs для непрерывных лазеров с КПД до 72%.

Список цитированной литературы

1. Mawst L.J. 8 W continuous wave front-facet power from broad-waveguide Al-free 980 nm diode lasers / L.J. Mawst, A. Bhattacharya, J. Lopez, D Botez, D.Z. Garbuzov, L. DeMarco, J.C. Connolly, M. Jansen, F. Fang, R.F. Nabiev // 1996 - Appl. Phys. Lett. – Т. 69 – С.1532

2. Шашкин И.С. Температурная делокализация носителей заряда в полупроводниковых лазерах ($\lambda=1010-1070$ нм) / 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 // 2012 – ФТП - Т.46 – С.1230

3. Богатов А.П. Оптимизация волноводных параметров лазерных гетероструктур InGaAs/AlGaAs/GaAs с целью наибольшего увеличения ширины пучка в резонаторе и получения максимальной лазерной мощности / А.П. Богатов, Т.И. Гушик, А.Е. Дракин, А.П. Некрасов, В.В. Поповичев // 2008 - Квантовая электроника – Т.38 – С.935

4. Crump P. Efficient High-Power Laser Diodes / P. Crump, G.Erbert, H. Wenzel, C. Frevert, C. M. Schultz, K. H. Hasler, R. Staske, B. Sumpf, A. Maaßdorf, F. Bugge, S. Knigge, G. Trankle // 2013 - IEEE J. Quant. Electron. – 2013 - Т.19 - вып.4

5. Андреев А.Д. Оже-рекомбинация в напряженных квантовых ямах / А.Д. Андреев, Г.Г. Зегря // 1997 - ФТП. – Т.31 – С.358

6. Wenzel H. Theoretical and experimental investigations of the limits to the maximum output power of laser diodes / H. Wenzel P. Crump, A. Pietrzak, X. Wang, G. Erbert, and G. Tränkle // 2010 - New J. Phys. – Т.12

7. Kaul T. Suppressed power saturation due to optimized optical confinement in 9xx nm high-power diode lasers that use extreme double asymmetric vertical designs /

T. Kaul, G. Erbert, A. Maaßdorf, S. Knigge, P. Crump // 2018 - Semicond. Sci. Technol. – т.33 - 035005

8. Пихтин Н.А. К вопросу о температурной делокализации носителей заряда в квантово-размерных гетероструктурах GaAs/AlGaAs/InGaAs / Н.А. Пихтин, А.В. Лютецкий, Д.Н. Николаев, С.О. Слипченко. З.Н. Соколова. В.В. Шамахов. И.С. Шашкин, А.Д. Бондарев, Л.С. Вавилова, И.С. Тарасов – 2014 – ФТП – Т.48 – С.1377

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Андреева Е.В. Широкополосные суперлюминесцентные диоды ближнего ИК диапазона спектра на основе двуслойных квантоворазмерных гетероструктур / Е.В. Андреева, Н.А. Волков, Ю.О. Костин, П.И. Лапин, А.А. Мармалюк, Д.Р. Сабитов, С.Д. Якубович // 2008 - Квантовая электроника - Т. 38 - № 8 - С.744-746.

2. Marmalyuk A.A. MOVPE Grown III-V Heterostructures for Optoelectronic Applications / A.A. Marmalyuk, A.Yu., Andreev, M.A. Ladugin, A.A. Padalitsa, Yu.L. Ryaboshtan, K.Yu. Telegin, N.A. Volkov, I.V. Yarotskaya // 2010 - Program and Abstracts Book III-d International Conference «Crystal Materials'2010» - P. 51.

3. Marmalyuk A.A. Semiconductor laser emitters for pumping rubidium and cesium frequency standards / A.A. Marmalyuk, A.V. Ivanov, V.D. Kurnosov, K.V. Kurnosov, R.V. Chernov, V.I. Romantsevich, A.Y. Andreev, K.Y. Telegin, N.A. Volkov, A.N. Besedina, V.S. Golnerov // 2010 - Technical Program 14-th International Conference on Laser Optics - P. 71.

4. Волков Н.А. Квантовые ямы (Al)GaAs/AlGaAs и Ga(In)AsP/GaInP, полученные методом МОС-гидридной эпитаксии / Н.А. Волков, Ю.Л. Рябоштан, А.Ю. Андреев, К.Ю. Телегин, И.В. Яроцкая, П.В. Горлачук, А.А. Мармалюк // 2010 - Материалы X Юбилейной Международной научной конференции «Химия твердого тела: наноматериалы, нанотехнологии – С.130-132.

5. Иванов А.В. Спектральные характеристики излучателя, предназначенного для накачки и детектирования эталонного квантового перехода цезиевого стандарта частоты / А.В. Иванов, В.Д., Курносов, К.В. Курносов, В.И. Романцевич, Р.В. Чернов, А.А. Мармалюк, Н.А. Волков, В.С. Жолнеров // 2011 - Квантовая электроника - Т.41 - №8 - С.692–696.

6. Ladugin M. Optimization of GaAsP, AlGaAs and InGaAs quantum wells for 770-1100 nm high-power laser diodes / M. Ladugin, A. Marmalyuk, A. Padalitsa, A. Andreev, P. Gorlachuk, K. Telegin, I. Yarotskaya, T. Bagaev, A. Meshkov, N. Volkov, V. Konyaev, S. Sapozhnikov, V. Simakov // 2013 - Extended abstracts of XV European Workshop on Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (EW-MOVPE 2013) - P. 143-146.

7. Мармалюк А.А. Мощные лазерные излучатели на основе Al-содержащих и Al-free гетероструктур: выбор оптимальной системы материалов / А.А. Мармалюк, Н.А. Волков, В.П. Коняев, Ю.В. Курнявко, М.А. Ладугин, Е.И. Лебедева, А.В. Лобенцов, А.С. Мешков, А.В. Морозюк, А.А. Падалица, Ю.Л. Рябоштан, С.М. Сапожников // 2013 - Программа и тезисы докладов IV Симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур - С. 14.

8. Телегин К.Ю. Влияние легирования волноводных слоев на излучательные характеристики полупроводниковых лазеров на основе AlGaAs/GaAs / К.Ю. Телегин, М.А. Ладугин, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, Н.А. Волков, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, А.В. Лобинцов, С.М. Сапожников // 2019 - XIV Российская конференция по физике полупроводников - С.464.

9. Телегин К. Ю. Влияние легирования волновода на выходные характеристики лазерных излучателей на основе AlGaAs/GaAs / К. Ю. Телегин, М. А. Ладугин, А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, Н. А. Волков, А. А. Падалица, А. В. Лобинцов, А. Н. Апарников, С. М. Сапожников, А. А. Мармалюк // 2020 - Квантовая электроника – Т.50:5 – С.489–492.

10. Волков Н. А. Полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры ($\lambda = 1450 - 1500$ нм) с сильно асимметричным волноводом / Н. А. Волков А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, Ю. Л. Рябоштан, В. Н. Светогоров, М. А. Ладугин, А. А. Падалица, А. А. Мармалюк, С. О. Слипченко, А. В. Лютецкий, Д. А. Веселов, Н. А. Пихтин // 2021 - Квантовая электроника – Т.51:2 – С.133–136.

11. Сабитов Д.Р. Спектральные особенности полупроводниковых лазеров ближнего ИК-диапазона на основе квантовых ям / Д.Р. Сабитов, К.Ю. Телегин, Н.А. Волков, Т.А. Багаев, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, А.А. Мармалюк, А.В. Лобинцов, С.М. Сапожников, В.В. Кричевский, В.П. Коняев, В.А. Симаков // 2021 - Труды XXV международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника -Т.2 - С.832-833.

12. Телегин К.Ю. Повышение излучательной эффективности квантовых ям на основе AlGaAs / К.Ю. Телегин, Н.А. Волков, Д.Р. Сабитов, Т.А. Багаев, А.А. Падалица, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк // 2021 - Труды XXV международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника» -Т.2 - С. 871-872.

13. Волков Н. А. Сравнение полупроводниковых лазеров AlGaInAs/InP ($\lambda = 1450-1500$ нм) со сверхузким и сильно асимметричным типом волноводов / Н. А. Волков, В. Н. Светогоров, Ю. Л. Рябоштан, А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, М. А. Ладугин, А. А. Падалица, А. А. Мармалюк, С. О. Слипченко,

А. В. Лютецкий, Д. А. Веселов, Н. А. Пихтин // 2021 - Квантовая электроника – Т.51:4, С.283–286.

14. Волков Н. А. Полупроводниковые лазеры InGaAs/AlGaAs/GaAs ($\lambda = 900\text{--}920$ нм) с расширенным асимметричным волноводом и улучшенной вольт-амперной характеристикой / Н. А. Волков, Т. А. Багаев, Д. Р. Сабитов, А. Ю. Андреев, И. В. Яроцкая, А. А. Падалица, М. А. Ладугин, А. А. Мармалюк, К. В. Бахвалов, Д. А. Веселов, А. В. Лютецкий, Н. А. Рудова, В. А. Стрелец, С. О. Слипченко, Н. А. Пихтин // 2021 – Квантовая электроника - Т.51:10 – С.905 – 908.

15. Светогоров В.Н. Мощные полупроводниковые AlGaInAs/InP-лазеры спектрального диапазона 1.9–2.0 мкм со сверхузким волноводом / В. Н. Светогоров, Ю. Л. Рябоштан, Н. А. Волков, М. А. Ладугин, А. А. Падалица, А. А. Мармалюк, К. В. Бахвалов, Д. А. Веселов, А. В. Лютецкий, В. А. Стрелец, С. О. Слипченко, Н. А. Пихтин // 2021 – Квантовая электроника - Т.51:10 – С.909 – 911.

16. Волков Н.А. Влияние параметров волноводных слоёв и квантовых ям на эффективность полупроводниковых лазеров InGaAs/AlGaAs/GaAs / Н.А. Волков, К.Ю. Телегин, Д.Р. Сабитов, Л.И. Шестак, А.А. Козырев, В.А. Панарин // 2021 -Тезисы VIII Международного симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур - С.68.

17. Волков Н.А. Улучшение параметров вольт-амперной характеристики полупроводниковых лазеров InGaAs/AlGaAs/GaAs ($\lambda = 940\text{--}980$ нм) с расширенным асимметричным волноводом / Н.А. Волков, К.Ю. Телегин, Н.В. Гулькиков, Д.Р. Сабитов, А.Ю. Андреев, И.В. Яроцкая, А.А. Падалицаа, М.А. Ладугин, А.А. Мармалюк, Л.И. Шестак, А.А. Козырев, В.А. Панарин // 2022 – Квантовая электроника – Т.52:2 – С.179–181.