

На правах рукописи

Дикарева Наталья Васильевна

**Полупроводниковые лазерные гетеронаноструктуры с вытекающей модой,
волноведущими квантовыми ямами и смешиванием мод резонатора**

05.27.01 - твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и
наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород - 2017 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Некоркин Сергей Михайлович

кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией эпитаксиальной
технологии НИФТИ ННГУ

Официальные оппоненты:

Мармалюк Александр Анатольевич

доктор технических наук, начальник НТЦ,
Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
«Полюс» им. М.Ф. Стельмаха»

Слипченко Сергей Олегович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, Федеральное
государственное бюджетное учреждение
науки «Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Физический институт
им. П.Н. Лебедева Российской академии
наук»

Защита состоится 28.11. 2017 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.01 при Национальном исследовательском Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на сайте <https://diss.unn.ru/764>.

Автореферат разослан «__» октября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.166.01

кандидат физико-математических наук

Михаил Олегович Марычев

Введение

В конце XX века интенсивное развитие получили лазеры на гетероструктурах с квантово-размерной активной областью – наиболее важная разновидность полупроводниковых инжекционных лазеров, привлекающая все большее внимание благодаря перспективам их широкого применения в системах волоконно-оптической связи, в вычислительной технике, голографии и других областях.

Со времени создания полупроводниковых лазеров в 1962 г. был пройден весьма длинный путь для улучшения характеристик излучения этих приборов. Разработаны конструкции лазерных излучателей, генерирующих в непрерывном режиме работы и позволяющие достигать мощностей излучения в десятки Вт [1, 2]. Созданы одномерные и двумерные решётки лазерных диодов с киловаттным уровнем выходной мощности [3]. Рассмотрены возможные пути улучшения пространственных свойств лазерного излучения [2, 4] и приближения его к аксиальной симметрии [5]. Разработаны конструкции гетеролазеров, работающих в диапазонах длин волн от ультрафиолетовой до терагерцовой области спектра [6-8]. Работы по совершенствованию энергетических и спектрально-угловых характеристик полупроводниковых лазеров ведутся и в настоящее время. Для расширения сферы использования полупроводниковых лазеров необходимо не только дальнейшее увеличение мощности, существенное сужение диаграммы направленности излучения, адаптация излучателей к специальным диапазонам длин волн, но и снижение затрат и числа технологических операций при изготовлении лазерных диодов.

В связи с этим, **тема диссертационной работы** – полупроводниковые лазерные гетеронаноструктуры с вытекающей модой, волноведущими квантовыми ямами и смешиванием мод резонатора, является **актуальной**.

Сегодня известно, что одной из основных проблем, существенно ограничивающих получение большой выходной мощности, является разогрев активной области протекающим через гетероструктуру током [9, 10], а большая расходимость излучения полупроводниковых лазеров в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу, определяется дифракционным пределом, и, следовательно, толщиной волноводного слоя структуры [11].

В настоящей диссертационной работе рассматриваются лазерные гетеронаноструктуры, перспективные с точки зрения выходной оптической мощности и картины дальнего поля излучения (лазерная гетероструктура с расширенной активной областью и выходом излучения через подложку, лазерная гетероструктура с волноводным эффектом квантовых ям (КЯ)).

Еще одной проблемой, ставящей задачу поиска новых материалов и их систем, является высокая стоимость и сложность конструкции лазерных приборов среднего, дальнего инфракрасного (ИК) и терагерцового диапазонов. Сегодня в этом отношении большие надежды возлагаются на полупроводниковые источники когерентного излучения, которые хорошо зарекомендовали себя в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах и в последние годы стали активно развиваться также в терагерцовом и дальнем ИК диапазонах [12]. В связи с этим проведенные в настоящей диссертационной работе исследования нелинейно-оптических эффектов, обусловленных внутрирезонаторным смешением мод и сопровождающихся обогащением спектра излучения в конструкциях полупроводниковых лазеров на основе структур с активной областью GaAsSb, а так же в лазерных диодах на основе GaAs/InGaAs структур, выращенных на Ge подложке, тоже являются актуальными.

Цель диссертационной работы

Экспериментальное исследование лазерных гетеронаноструктур с вытекающей модой, волноведущими квантовыми ямами и нелинейным смешиванием мод резонатора, позволяющих не только существенно увеличить выходную оптическую мощность полупроводниковых лазеров, уменьшить расходимость излучения, но и преобразовать частоту излучения за счет квадратичной решеточной нелинейности GaAs.

Задачи исследования

- 1) разработка и исследование мощного лазерного диода с долей излучения в узком пучке, вытекающем через подложку, более 80% на основе InGaAs/GaAs/InGaP гетеронаноструктуры;
- 2) создание и исследование полупроводниковой лазерной гетеронаноструктуры с волноводом, сформированным InGaAs квантовыми ямами;
- 3) создание, изучение свойств излучения и нелинейного внутрирезонаторного взаимодействия в двух частотных полосах в полупроводниковых лазерах на основе гетеронаноструктуры с активной областью GaAsSb;
- 4) создание, изучение свойств излучения и нелинейного внутрирезонаторного взаимодействия полей в полупроводниковых лазерах с составным резонатором, на основе гетеронаноструктур на Ge подложках.

Объект исследования

Объектом исследования служили лазерные гетеронаноструктуры и изготовленные на их основе полупроводниковые GaAs лазеры, созданные в НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Предмет исследования

Предметом исследования являлись параметры генерации этих лазеров, в частности, энергетические и спектрально-угловые характеристики их излучения, а также ответственные за них физические явления, связанные со спектральной и пространственной конкуренцией генерируемых мод и нелинейно-оптическими эффектами, обусловленными квадратичной нелинейностью диэлектрической проницаемости полупроводниковой решётки.

Методы исследования

В работе были использованы апробированные методы исследования, такие как метод спектроскопии фотолюминесценции гетероструктур, регистрация ватт-амперных и вольт-амперных характеристик лазеров, измерение спектральных и пространственных характеристик излучения, измерение энергии лазерного излучения, и т.п.

Научная новизна

Все полученные в диссертации экспериментальные результаты являются оригинальными. Было установлено, что применение конструкций лазерных гетеронаноструктур с вытеканием излучения через подложку и гетеронаноструктур с волноводным эффектом квантовых ям открывают широкие возможности управления энергетическими и пространственными свойствами гетеролазеров. Также было установлено, что структуры лазерных диодов, выращенные на Ge подложках, и структуры с активной областью GaAsSb способствуют обогащению спектральных характеристик гетеролазеров. Эти возможности обусловлены обнаруженными и исследованными в диссертации физическими закономерностями, которые кратко сформулированы далее и составляют научную новизну работы.

Методология, теоретическая и практическая значимость

Проведенные экспериментальные исследования указывают на новые пути эффективного управления энергетическими и спектрально-угловыми свойствами полупроводниковых лазеров. Эти пути основаны на таких принципах как: 1) вывод излучения через подложку в лазерных структурах с увеличенной активной областью;

2) селекция мод за счет квантовых ям в волноводе без ограничивающих слоев; 3) использовании составных резонаторов; 4) использовании нелинейных оптических свойств полупроводниковых кристаллов A_3B_5 . **Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в предложенных оригинальных конструкциях лазерных гетеронаноструктур, позволяющих реализовать вышеуказанные принципы в реальных устройствах, и детальном экспериментальном изучении новых гетеролазеров.

По материалам диссертации разработано и издано в электронном виде два учебно-методических пособия для студентов старших курсов физического факультета ННГУ.

Положения, выносимые на защиту

1. В лазерных диодах на основе гетеронаноструктур с вытеканием излучения через подложку, в допороговом режиме основным механизмом уширения диаграммы направленности для излучения мод в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу, является уширение, связанное с шириной линии спонтанной люминесценции.
2. В полупроводниковых лазерах на основе гетеронаноструктур с трапециевидной активной областью и вытеканием излучения через подложку реализуется сверхузкая диаграмма направленности как в плоскости p - n -перехода, так и в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.
3. В лазерных структурах на основе GaAs и InP без ограничительных слоев имеет место волноводный эффект квантовых ям InGaAs и GaAsSb за счет большего показателя преломления материалов квантовой ямы InGaAs и GaAsSb по сравнению с показателем преломления GaAs и InP.
4. В полупроводниковом лазере на основе гетероструктуры с активной областью GaAsSb реализуется генерация в двух частотных полосах, обусловленных прямыми и непрямыми в пространстве переходами (в случае гетероперехода второго рода). Наблюдается генерация суммарной частоты в результате нелинейного внутрирезонаторного взаимодействия полей.

Достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов, обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечены использованием апробированных методов исследования, проведением исследований на большом числе однотипных образцов, демонстрирующих эквивалентные характеристики, корректными

теоретическими представлениями при анализе и интерпретации экспериментальных результатов.

Личный вклад соискателя

Соискателем внесен определяющий вклад в получение основных экспериментальных результатов. Соискатель лично принимала участие в разработке конструкций лазерных гетеронаноструктур и постростовой технологии изготовления полупроводниковых лазеров (формирование омических контактов и монтаж чипов на теплоотводящие элементы) [A1]. Все лазерные гетеронаноструктуры, на основе которых были созданы образцы полупроводниковых лазеров, были выращены методом гидридной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) в НИФТИ ННГУ Б.Н. Звонковым.

Соискатель самостоятельно проводила экспериментальные исследования электрофизических, спектральных, пространственных и энергетических характеристик лазерных гетероструктур и изготовленных на их основе полупроводниковых лазеров, в частности, было составлено учебно-методическое пособие по измерению энергетических характеристик гетеролазеров [A2]. Экспериментальные исследования полупроводниковых лазерных структур, предназначенных для оптической накачки, были проведены научным сотрудником ИФМ РАН А.Н. Яблонским. Планирование экспериментов, обсуждение и анализ результатов проводились совместно с научным руководителем С.М. Некоркиным. Кроме того, соискатель совместно с научным руководителем, сотрудниками ИФМ РАН В.Я. Алешкиным, А.А. Дубиновым, сотрудниками БГУ А.А. Афоненко, Д.В. Ушаковым проводила подготовку материала и написание статей по результатам исследований и докладывала результаты на научных семинарах, симпозиумах и конференциях.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в настоящей диссертационной работе, докладывались на 18 и 19-м Международных симпозиумах «Нанофизика и наноэлектроника» (Нижний Новгород 2014-2015 гг.); 3-м, 4-м и 5-м российских симпозиумах с международным участием: Полупроводниковые лазеры: физика и технология (Санкт-Петербург, 2012, 2014 и 2016 гг.); 8-м, 9-м Белорусско-Российских семинарах: Полупроводниковые лазеры и системы на их основе (Беларусь, Минск, 2011 и 2013 гг.); Всероссийской молодежной школе-семинаре «Диагностика наноматериалов и наноструктур» (Рязань, 2013); 16, 17, 19 - 21 научных конференциях по радиофизике (Нижний Новгород, 2011 – 2016 гг.); 10-й Международной научно-технической

конференции "Квантовая электроника 2015" (Беларусь, Минск, 2015), а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 29 работ, включая 12 статей в журналах из перечня ВАК, 15 публикаций в материалах конференций и два учебно-методических пособия.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 129 страниц, включая 49 рисунков и 8 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 133 наименования, список работ автора по теме диссертации – 29 наименований.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны её основные задачи, цели и положения.

В **первой главе** диссертации рассматриваются основные подходы к управлению энергетическими, характеристиками полупроводниковых лазеров. Приведен литературный обзор наиболее известных конструкций мощных лазерных диодов, подробно рассмотрена конструкция лазерного диода с вытекающей модой и экспериментально исследованы ее модификации, позволяющие увеличить мощность и уменьшить расходимость излучения.

В **разделе 1.1** подробно описываются конструктивные особенности лазерного диода с выходом излучения через подложку, отличительной чертой которых от модели обычной лазерной структуры является использование туннельно-прозрачного для излучения нижнего ограничивающего слоя.

Раздел 1.2 посвящен исследованию диаграммы направленности электролюминесценции полупроводникового лазера на основе гетеронаноструктур с вытекающей модой, содержащего шесть квантовых ям. При исследовании диаграмм направленности излучения в допороговом режиме (спонтанное излучение) наблюдается несколько пиков, соответствующих основной и возбужденным модам. Расчеты исследованной лазерной структуры, проведенные сотрудниками ИФМ РАН В.Я. Алешкиным и А.А. Дубиновым подтверждают, что возможен выход излучения на четырех модах, получено хорошее совпадение положений максимумов вычисленных и измеренных диаграмм направленности. Однако значения ширины экспериментальных и теоретических пиков сильно различались. Различие можно объяснить двумя механизмами

уширения экспериментальных кривых. В первом случае неопределенность эффективного волнового вектора распространения может вызываться широким резонатором лазера, а также параметрами экспериментальной установки по измерению диаграммы направленности (механизм уширения не зависит от тока накачки). По оценке разброс угла выхода для первого механизма уширения в нашем случае составляет 2° . Второй механизм связан со спектральной шириной линии люминесценции, поскольку эффективный волновой вектор распространения зависит как от частоты излучения, так и от тока накачки. Сравнение экспериментальной диаграммы направленности (рис. 1, кривая 1) с диаграммами, вычисленными без учета (рис. 1, кривая 2) и с учетом (рис. 1, кривая 3) спектральной ширины линии люминесценции (для тока 0.15 А составляет 30 нм), показало, что в последнем случае наблюдается хорошее согласие с экспериментом.

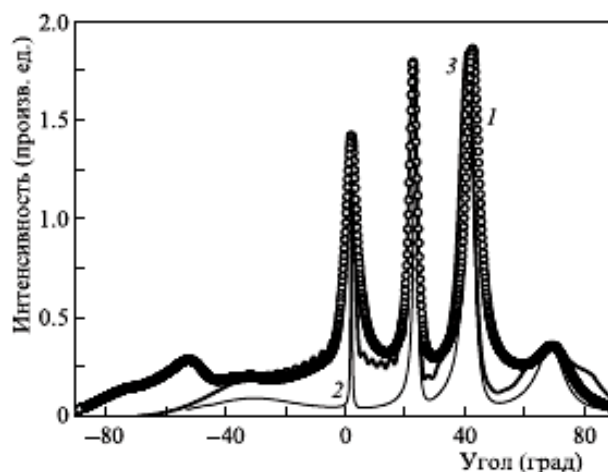


Рис. 1. Экспериментальная диаграмма направленности (кривая 1) и расчетные диаграммы направленности без учета (кривая 2) и с учетом (кривая 3) спектральной ширины линии люминесценции для тока 0.15А

При токе 10 А ширина линии излучения на полувысоте пика составляет 2 нм, поэтому характерная ширина диаграммы направленности должна быть около 0.1° , однако в эксперименте она составляет 2° и не уменьшается с ростом тока. Следовательно, можно сделать вывод, что при допороговых накачках основной механизм уширения связан с широкой линией спонтанной люминесценции, а при токах, превышающих порог лазерной генерации, основным механизмом уширения является неопределенность эффективного волнового вектора распространения. Обнаружено резкое сужение диаграммы направленности с началом стимулированного излучения. Показано, что изменение положения пиков на диаграмме направленности обусловлено изменением не только эффективного показателя преломления моды из-за разогрева центрального слоя и

увеличения концентрации носителей в нем, но и изменением спектра излучения при вариации тока накачки.

В разделе 1.3 рассмотрен способ обуздания диаграммы направленности как в плоскости p - n -перехода, так и перпендикулярно ей в лазерах на основе гетеронаноструктур с выходом излучения через подложку путем применения трапецевидной конструкции активной области.

Принцип действия лазеров такой геометрии основан на том, что основная поперечная мода имеет минимальную дифракционную расходимость, а моды высокого порядка сильнее выходят из расширяющейся активной области и испытывают значительное затухание в неактивных слоях.

Лазерные диоды, изготовленные на основе представленной конструкции (рис. 2), с длиной резонатора 1 мм и шириной оснований трапецевидного контакта 25 мкм и 125 мкм генерировали узкополосное излучение (ширина спектральной линии 3 нм) на длине волны (0.963 ± 0.003) мкм. Порог генерации составил (10 ± 0.5) А в режиме импульсной накачки (длительность импульса 360 нс, частота следования примерно 1.43 кГц). Ширина диаграммы направленности излучения лазерного диода в режиме генерации в плоскости, параллельной p - n -переходу составила 1.5° и 2° в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

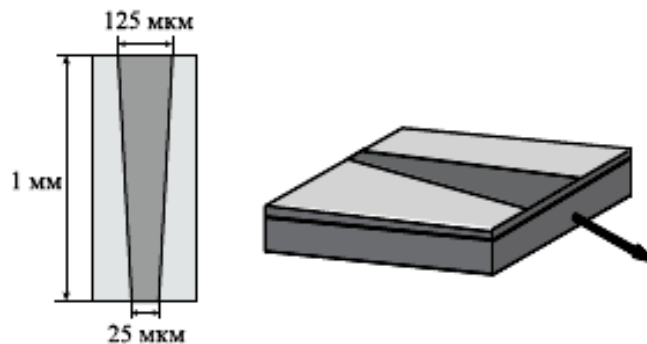


Рис. 2 Размеры и расположение трапецевидной активной области на лазерном чипе

Таким образом, было экспериментально показано, что полупроводниковые лазеры с трапецевидной активной областью и значительным вытеканием излучения в подложку в небольшом диапазоне токовой накачки способны генерировать узконаправленное излучение.

В разделе 1.4 представлены результаты исследования излучательных характеристик мощного полупроводникового лазера, изготовленного на основе гетероструктуры со значительным выходом излучения через подложку, с улучшенными пространственными и

энергетическими характеристиками. Активная область лазера содержала 6 квантовых ям InGaAs. В конструкцию выращенной структуры были внесены 3 основных изменения в отличие от структуры, изученной в [4, 13]. Во-первых, произведено уменьшение толщины ограничивающего слоя n -InGaP с 80 до 67 нм и волновода GaAs с 1800 до 1730 нм. Это сделано для увеличения амплитуды электрического поля в подложке, по сравнению с амплитудой поля в волноводе, а, следовательно, для увеличения доли выходящего из подложки излучения. Второе отличие - отсутствие легированной p -области волновода, что приводит к уменьшению потерь в лазере. Третье - увеличение уровня легирования ограничивающего слоя p -InGaP с 10^{18} до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, что необходимо для компенсации отсутствия легированной p -области волновода.

Измерение спектральных зависимостей и диаграмм направленности излучения проводилось при накачке лазера импульсами тока длительностью 220 нс с частотой повторения 1.43 кГц. Генерация наблюдалась на длине волны $(1.020 \pm 0.003) \text{ мкм}$. Ширина диаграммы направленности излучения в плоскости p - n -перехода составила 5° , а в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу - 1° – 2° . Пороговый ток лазерных диодов составил $(6.0 \pm 0.3) \text{ А}$. Анализ диаграмм направленности в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу, показал, что через подложку выходит $(94 \pm 0.5) \%$ всего излучения и только $(6 \pm 0.5) \%$ из волноводного слоя. Энергетические характеристики снимались с помощью измерителя мощности и энергии лазерного излучения (Coherent, 0340J10R). Энергия излучения лазерных диодов на основе усовершенствованной структуры при накачке одиночными импульсами тока длительностью 5 мкс достигала величины $(280 \pm 10) \text{ мкДж}$, что превосходит значение для аналога [4, 13] на 65%.

Вторая глава посвящена изучению волноводных свойств квантовых ям в составе активной среды лазерных диодов. Приведен литературный обзор наиболее известных конструкций полупроводниковых лазеров, позволяющих уменьшить расходимость излучения. Рассмотрена возможность реализации лазерного волновода на основе квантовых ям в активной среде лазерного диода. Приводятся результаты экспериментальных исследований волноводного эффекта InGaAs квантовых ям в полупроводниковых лазерных структурах на основе GaAs и InP, квантовых ям GaAsSb в лазерных гетероструктурах на основе GaAs, а также InGaAs квантовых ям в GaAs лазерах на Si подложке.

Раздел 2.1 посвящен изучению волноводного эффекта InGaAs квантовых ям в полупроводниковых лазерах на основе GaAs и InP.

В случае симметричного волновода (когда слой с большим показателем преломления заключен между неограниченными слоями с меньшим показателем преломления) возможно существование TE_0 и TM_0 мод при любой сколь угодно малой толщине волновода [14]. Следовательно, электромагнитная мода может быть локализована в окрестности волноводного слоя, толщина которого на порядки меньше длины волны этой моды. В случае полупроводниковых лазеров, генерирующих в области длин волн порядка 1 мкм, таким волноведущим слоем может выступать слой даже толщиной порядка 10 нм.

Сотрудниками ИФМ РАН А.А. Дубиновым и В.Я. Алешкиным была рассмотрена модельная задача, которая описывает моды в лазерной структуре с волноведущим слоем толщиной d_{tr} .

Расчет показал, что для структуры $GaAs/In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ коэффициент оптического ограничения на порядок меньше, чем в случае использования для этой системы обычного волновода с ограничивающими слоями $InGaP$. В тоже время в лазере на основе структуры $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ с 6 квантовыми ямами шириной каждая 10 нм коэффициент оптического ограничения будет таким же, как и в лазере с широким волноведущим слоем $InGaAsP$, а, значит, наличие этого слоя не является обязательным.

Экспериментальные исследования $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ структуры, показали наличие стимулированного излучения при плотности мощности накачки непрерывным Nd:YAG лазером с удвоением частоты (длина волны 532 нм) 260 Вт/см^2 при температуре 77 К, при этом лазерное излучение можно было наблюдать только со скола структуры, что означает практически отсутствие его рассеяния в волноводе. Это обстоятельство указывает на хорошие волноведущие свойства предложенного волновода. Порог генерации при температуре 293 К был выше 5 кВт/см^2 при накачке параметрическим генератором света МОРО-SL ("Spectra-Physics") с длиной волны 530 нм, длительностью импульса 10 нс и частотой повторения импульсов 10 Гц. Предположительно, столь большая разница в порогах генерации для температур 77 К и 293 К связана с существенным увеличением частоты Оже-рекомбинации при увеличении температуры для $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ квантовых ям, согласованных по постоянной решетки с InP .

Продемонстрирована однолепестковая диаграмма направленности излучения полупроводниковых $InP/In_{0.65}Ga_{0.35}As$ лазеров, измеренная в режиме импульсной электрической накачки (220 нс, 1.43 кГц). Ширина на полувысоте максимума составила 19° .

Раздел 2.2 посвящен изучению волноводного эффекта квантовых ям GaAsSb в лазерной структуре на основе GaAs.

Исследуемая структура содержала 3 квантовые ямы GaAsSb толщиной 10 нм каждая, разделенных барьерами GaAs толщиной 100 нм. Качество гетероструктуры проверялось методом спектроскопии фотолюминесценции при температуре 77 К при возбуждении аргоновым лазером с длиной волны 480.8 нм. Максимумы спектра фотолюминесценции, отвечающие квантовым ямам GaAsSb, приходятся на 1.26 и 1.32 эВ, что вероятно вызвано неравномерным распределением сурьмы в квантовых ямах. В среднем, доля Sb в составе раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ составляла $(18 \pm 1) \%$.

Порог плотности мощности накачки при переходе в суперлюминесцентный режим на длине волны (935 ± 3) нм, соответствующей оптическому переходу в объемном GaAs, составил 2 кВт/см^2 . При значительно меньших плотностях мощности накачки в спектре превалировала люминесценция из квантовых ям GaAsSb. Но при дальнейшем увеличении плотности мощности накачки люминесценция на этой длине волны незаметна на фоне люминесценции из GaAs. Предположительно, большая интенсивность излучения из GaAs, по сравнению с излучением от квантовых ям, обусловлена малой долей фотоносителей, доходящих до квантовых ям при возбуждении аргоновым лазером.

Несмотря на все вышесказанное, показатель преломления в квантовых ямах значительно превосходит показатель преломления GaAs и эти КЯ играли роль волноводных слоев для излучения с длиной волны (835 ± 3) нм. Отметим, что в структуре без квантовых ям суперлюминесценция не наблюдалась, что также подтверждает волноводный эффект квантовых ям GaAsSb в лазерной структуре на основе GaAs.

Раздел 2.3 посвящен экспериментальному исследованию излучательных характеристик лазерных диодов, изготовленных на основе гетероструктур с волноводными квантовыми ямами.

Методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении на подложках n^+ -GaAs (100) были выращены два типа лазерных гетероструктур. Структура 1-го типа включала в себя буферный слой n -GaAs, шесть квантовых ям InGaAs, разделенных слоями нелегированного GaAs, p -GaAs и контактный p^+ -GaAs – 200 нм. Главным отличием структуры 2-го типа являлось наличие тонких (25 нм) ограничительных слоев InGaP, изоморфных подложке GaAs, дополнительно введенных для улучшения электронного ограничения. На основе гетероструктур были изготовлены и исследованы лазерные диоды с длиной резонатора 1.5 мм и шириной полоскового контакта 100 мкм. Зеркалами служили

отражающие (98%) и просветляющие (5%) диэлектрические покрытия, нанесенные на сколы структуры.

Лазерные диоды генерировали на длинах волн (966 ± 3) нм и (974 ± 3) нм, а ширина диаграмм направленности на полувысоте пика составила 5.5° и 3° в плоскости p - n -перехода и 11° и 10° - перпендикулярно p - n -переходу для лазерных диодов на основе структуры 1-го и 2-го типа, соответственно. Образцы генерировали на одной основной моде, максимум интенсивности которой соответствовал угловому положению 0° на диаграмме направленности в плоскости, перпендикулярной плоскости p - n -перехода, что свидетельствует о наличии хороших селективных свойств лазерных структур. Пороговые токи лазерных диодов составляли (45 ± 2) А, а максимальная пиковая мощность излучения лазерных диодов на основе гетероструктуры 1-го и 2-го типа составляла (16.0 ± 0.5) Вт в режиме накачки одиночными импульсами тока, длительностью 5 мкс.

Существование сформированной диаграммы направленности в плоскости структуры без ограничительных слоев и перпендикулярно ей, является прямым доказательством наличия волноводного эффекта квантовых ям, и внесение дополнительных тонких широкозонных слоев InGaP изоморфных GaAs не нарушает волноводные свойства гетероструктуры.

Интерес к лазерным гетеронаноструктурам с волноводом на основе квантовых ям обусловлен преимуществами лазеров с широким волноводом: более узкой диаграммой направленности и пониженной нагрузкой на зеркала из-за широкой области локализации моды. Однако еще одним, не менее важным, обстоятельством, привлекающим внимание к таким лазерам, является отсутствие необходимости в применении широкозонных ограничительных слоев, что делает такие конструкции перспективными для разработки интегрированных A_3B_5/Si излучающих и лазерных структур. В связи с этим **раздел 2.4** посвящен изучению волноводного эффекта квантовых ям InGaAs в GaAs структуре на Si подложке с тонким Ge буферным слоем. В данном разделе диссертационной работы подробно описан процесс подготовки Ge/Si подложек методом молекулярно-лучевой эпитаксии, играющий важную роль при последующем изготовлении лазерной структуры методом МОС-гидридной эпитаксии.

На начальном этапе роста лазерной структуры на Ge/Si подложке была сформирована сверхрешетка GaAs/GaAsP/InGaAs для улучшения качества активной области, содержащей 2 квантовые ямы InGaAs толщиной 6.4 нм и разделенных слоем GaAs толщиной 76.5 нм.

Спектральный максимум, соответствующий излучению квантовых ям InGaAs в активной области гетероструктур, наблюдался на длине волны (905 ± 3) нм при 60 мА, но стимулированного излучения во всем диапазоне токовой накачки не наблюдалось. Возможной причиной данного результата может являться невысокое качество зеркал лазерного резонатора, которыми служили сколотые грани структуры, ввиду наличия толстой кремниевой подложки.

Для исследования оптических свойств выращенный образец раскалывался на полоски шириной 3 мм. При накачке образца излучением параметрического генератора света Spectra-Physics MPO-SL (длительность импульса 10 нс, частота повторения 10 Гц, длина волны 650 нм), сфокусированным в полоску с размерами 0.1×3 мм², наблюдалось возникновение нескольких линий стимулированного излучения в области энергий 1350–1360 мэВ.

Пороговая плотность мощности генерации стимулированного излучения была на уровне 35 кВт/см^2 . Наблюдалось сразу несколько интенсивных линий излучения, расстояние между которыми почти постоянно и составляло 3–4 мэВ, что примерно на 2 порядка величины больше расстояния между продольными модами. Карта поверхности структуры, сделанная с помощью оптического профилометра на основе интерферометра белого света Talysurf CCI 2000, показала наличие квазипериодической (33 мкм) дислокационной сетки, причем, только в направлении, параллельном длинным сколам полоски, которое перпендикулярно направлению распространения излучения. Возможно, эта дислокационная сетка играет роль своеобразной дифракционной решетки с отражением в высоком порядке, определяющей в итоге наблюдаемый характер генерации на нескольких линиях.

В **третьей главе** приведен литературный обзор различных источников излучения среднего и дальнего инфракрасного диапазонов, рассмотрены механизмы генерации вторых гармоник и суммарной частоты. Источники, основанные на нелинейно-оптическом преобразовании двух длин волн ближнего ИК диапазона, могут быть альтернативным источником дальнего ИК излучения (генерация разностной гармоники). В связи с этим в данной главе диссертации экспериментально исследуются особенности генерации двух типов лазерных структур (GaAs структура с активной областью GaAsSb и InGaAs/GaAs структура, выращенная на подложке Ge), предназначенных для наблюдения нелинейного взаимодействия мод в структурах полупроводниковых лазеров.

В **разделе 3.1** рассматриваются механизм генерации второй гармоники в лазерных волноводах и нелинейные эффекты в лазерных волноводах.

При воздействии на среду мощного электромагнитного лазерного излучения с частотой ω ее отклик содержит не только компоненты на частоте ω , но и на кратных ей частотах $2\omega, 3\omega, \dots, n\omega$. Это так называемые гармоники. Наличие четных гармоник ($2\omega, 4\omega, \dots, 2n\omega$) определяется симметрией среды и возможно только в нецентросимметричных кристаллах [15]. В изотропных средах, примером которых являются газы, возможны только нечетные гармоники $3\omega, 5\omega$ и т.д.

В результате генерации второй гармоники два кванта с энергией $\hbar\omega_1$ образуют квант с энергией $\hbar\omega_2=2\hbar\omega_1$. Это явление можно представить как генерацию суммарной частоты, когда два кванта с различными энергиями $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ образуют третий квант $\hbar\omega_3=\hbar\omega_1+\hbar\omega_2$. Выражения, связывающие энергии квантов, представляют собой закон сохранения энергии.

Наибольший интерес представляет генерация разностной частоты, когда два кванта с различными энергиями $\hbar\omega_1$ и $\hbar\omega_2$ образуют третий квант $\hbar\omega_3=\hbar\omega_1-\hbar\omega_2$. Поскольку частота генерируемого излучения меньше, чем у исходного, данное явление может применяться для генерации излучения в среднем, дальнем инфракрасном и терагерцовых диапазонах длин волн.

В разделе 3.2 проведены исследования влияния температуры в ростовом процессе на излучательные свойства структур с квантовой ямой GaAsSb. Представлены результаты экспериментальных исследований GaAs/InGaP лазерных диодов на основе гетероструктуры с активной областью GaAsSb, генерирующих в области 1 мкм, изучаются особенности генерации в таких лазерах.

При выращивании лазерных структур на системе материалов A_3B_5 с активной областью, содержащей наноразмерные слои GaAsSb, необходимо учитывать, что верхний ограничивающий слой p -типа выращивается при температуре, значительно превышающей оптимальную температуру роста материала GaAsSb, что может вызвать сегрегацию сурьмы.

Были исследованы два типа структур, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии. Структура 1 содержала буферный слой GaAs толщиной 0.2 мкм, двухслойную квантовую яму, состоящую из слоя GaAsSb ($x_{Sb} \sim 0.25$) толщиной 10 нм и слоя InGaAs ($x_{In} \sim 0.33$) толщиной 5 нм, и покровный слой GaAs толщиной около 40 нм. Структура 2 включала в себя буферный слой GaAs толщиной 0.2 мкм, квантовую яму GaAsSb ($x_{Sb} \sim 0.25$) толщиной 10 нм и покровный слой GaAs толщиной 30 нм. Структуры подвергались термическому отжигу в потоке азота при 620°C в течение 25 мин. Температура и время отжига были выбраны в соответствии с условиями выращивания

верхнего ограничивающего слоя InGaP *p*-типа в процессе формирования лазерных структур методом МОС-гидридной эпитаксии.

Проведенные исследования показали, что увеличение температуры до 620°C при формировании верхнего *p*-InGaP слоя в процессе выращивания лазерной структуры GaAs/InGaP оказывает влияние на излучательные свойства активной области, содержащей квантовые ямы GaAsSb или GaAsSb/InGaAs, сформированные при температурах (560-570)°C. Причем, в случае активной области, содержащей одиночную квантовую яму GaAsSb, наблюдается увеличение интенсивности и энергии фотолуминесцентного излучения квантовой ямы, а в случае двухслойной квантовой ямой GaAsSb/InGaAs – значительное уменьшение этих параметров.

Была выращена InGaP/GaAs лазерная структура с одиночной квантовой ямой GaAsSb в активной области. В качестве источника Sb использовалась триметилсурьма. Квантовая яма GaAsSb толщиной 10 нм формировалась при 580°C. Отношение элементов V/III групп при этом поддерживалось на уровне 1.3 и отношение потоков триметилгаллия/арсин – на уровне 0.95. На основе данной структуры были изготовлены лазерные диоды с шириной полоскового контакта 100 мкм, длиной резонатора 1 мм. Зеркалами служили сколотые грани структуры.

Продемонстрирована устойчивая лазерная генерация на прямых (1.027 ± 0.003) мкм и не прямых (1.054 ± 0.003) мкм в оптическом пространстве переходах, что свидетельствует о наличии гетероперехода II рода в системе GaAs/GaAsSb. Суммарная мощность излучения при условии одновременной генерации в двух частотных полосах составила (1.00 ± 0.07) Вт.

С целью исследования эффективности смешения мод были проведены исследования нелинейного внутрирезонаторного взаимодействия полей полупроводникового GaAsSb/GaAs/InGaP лазера, генерирующего на прямых и не прямых оптических переходах в двух частотных полосах при комнатной температуре. Внутрирезонаторное взаимодействие мод, связанное с квадратичной нелинейностью решетки GaAs, было достаточно сильным, наблюдалось уже при достаточно малом (5.0 ± 0.3) А импульсном токе и проявлялось в широких пределах накачки.

Таким образом, было показано, что лазерные GaAs/InGaP гетероструктуры с активной областью на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ перспективны для обогащения спектра благодаря преобразованиям лазерного излучения за счет квадратичной решеточной нелинейности GaAs и наличие двухполосной генерации на прямых и не прямых оптических переходах

при эволюции зонной диаграммы от I ко II типу гетероперехода с изменением доли сурьмы в твердом растворе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

В разделе 3.3 изучается нелинейное смешение гармоник в $\text{InGaAs}/\text{InGaP}/\text{GaAs}$ лазере на Ge подложке. Выполнить условие фазового синхронизма для двух основных мод и значительно снизить фононное поглощение в GaAs позволяет использование слаболегированной Ge подложки для лазера на основе GaAs [16].

На подложке Ge были выращены два типа лазерных гетероструктур: 1 - с буферным слоем GaAs и 2 – с буферным слоем $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$, обладающим параметром решетки, наиболее приближенным к параметру решетки Ge.

Экспериментальные результаты исследования лазерных диодов, изготовленных на основе полученных гетероструктур, показали, что лазер на основе $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ имеет более близкую к идеальной вольт-амперную характеристику, что говорит о лучшем качестве структуры с $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ слоями по сравнению со структурой с GaAs слоями. Вероятно, ключевую роль здесь оказывает граница гетероперехода между Ge и $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ (GaAs). С одной стороны наблюдается проникновение атомов Ge в растущий слой $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ (GaAs), а с другой стороны наблюдается диффузия атомов In, Ga и As в Ge.

Пороговый ток в лазере на основе GaAs/Ge оказался почти в 20 раз выше, по сравнению с пороговым током в лазере на основе $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}/\text{Ge}$, а мощность излучения в лазере на основе GaAs/Ge меньше на три порядка величины, чем в другом лазере.

Таким образом, было показано, что использование более согласованного по решетке с Ge раствора $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ по сравнению с GaAs предпочтительнее для создания совершенных лазерных структур.

На основе GaAs гетероструктуры с буферным слоем $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ были изготовлены лазерные диоды с шириной активной области 100 мкм и длиной резонатора 1 мм. Зеркалами служили сколотые грани структуры. Порог генерации лазерных диодов, изготовленных на основе данной структуры, составлял 0.7-1 А в зависимости от температуры. Для исключения разогрева активной области измерения проводились при накачке импульсами тока длительностью 360 нс с частотой повторения 1.5 кГц. Генерация наблюдалась на длине волны 1 мкм, а ширина спектральной линии составила 4 нм.

Для демонстрации нелинейного преобразования излучения во вторые и суммарную гармоники была применена конструкция двухчипового лазера с составным резонатором, состоящего из расположенных на одном теплоотводе в непосредственной близости друг от друга двух одночастотных лазеров с квантовыми ямами, генерирующих в непрерывном

режиме две длины волны ближнего ИК диапазона при температуре жидкого азота. В этой схеме оба лазера генерировали на основной поперечной моде с разными длинами волн, и излучение одного вводилось в волновод другого лазера (по нормали поперечной грани волновода). Лазером, в который вводилось излучение, служил описанный выше лазер на германиевой подложке с длиной волны (0.930 ± 0.003) мкм при $T = 77$ К, другой лазер представлял собой обычную конструкцию гетеролазера [17] на GaAs подложке, генерирующего на длине волны (1.030 ± 0.003) мкм при $T = 77$ К. Результаты наблюдений демонстрируют присутствие вторых гармоник для мод с длинами волн (0.930 ± 0.003) и (1.030 ± 0.003) мкм, а также сигнала с суммарной частотой этих мод на длине волны (0.488 ± 0.003) мкм. Это наблюдение является прямым доказательством возможности смешения частот внутри резонатора лазера.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. В лазерных диодах на основе гетероструктур с вытеканием излучения через подложку в допороговом режиме основным механизмом уширения диаграммы направленности для излучения мод в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу, является уширение, связанное с шириной линии спонтанной люминесценции.
2. Впервые создан полупроводниковый лазерный диод с долей излучения, выходящего через подложку $(94 \pm 0.5)\%$.
3. Установлено, что в полупроводниковых лазерах на основе структур с трапециевидной активной областью и вытеканием излучения через подложку реализуется сверхузкая диаграмма направленности как в плоскости *p-n*-перехода, так и в плоскости, перпендикулярной *p-n*-переходу.
4. Экспериментально установлен волноводный эффект квантовых ям InGaAs и GaAsSb в лазерных структурах на основе GaAs и InP без ограничительных слоев за счет большего показателя преломления материалов квантовой ямы InGaAs и GaAsSb по сравнению с показателем преломления GaAs и InP.
5. Экспериментально подтверждено, что лазеры на основе структур с волноводными квантовыми ямами обладают преимуществами лазеров с широким волноводом: более узкой диаграммой направленности и пониженной нагрузкой на зеркала из-за широкой области локализации моды.

6. Экспериментально установлено, что в отличие от лазеров с широкими волноводами лазеры с волноводными квантовыми ямами обладают отличной селективностью мод.
7. Сравнительные исследования электрофизических и излучательных свойств лазеров на основе GaAs и $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ гетероструктур с квантовыми ямами, выращенных на подложке Ge показали, что применение раствора $\text{In}_{0.01}\text{Ga}_{0.99}\text{As}$ в качестве буферного слоя по сравнению с GaAs предпочтительнее для создания совершенных лазерных структур.
8. Полученная генерация суммарной и вторых гармоник показала возможность реализации нелинейного преобразования частоты в $\text{InGaAs/InGaP/GaAs/Ge}$ лазере с квантовыми ямами, при использовании конструкции двухчипового лазера с составным резонатором.
9. В полупроводниковом лазере на основе структуры с активной областью GaAsSb реализуется нелинейное внутрирезонаторное взаимодействие полей в двух частотных полосах, обусловленных прямыми и непрямыми в оптическом пространстве переходами, при комнатной температуре в широких пределах токовой накачки.

Список цитированной литературы

1. Мощные лазеры ($\lambda=940\text{-}980$ нм) на основе асимметричной GaInAs/GaInAsP/AlGaAs-гетероструктуры раздельного ограничения / Д.А. Винокуров, А.Л. Станкевич, В.В. Шамахов, и др. // ФТП – 2006. – Т.40(6). – С.764-767.
2. Мощные полупроводниковые лазеры на основе асимметричных гетероструктур раздельного ограничения/ Д.А. Винокуров, С.А. Зорина, В.А. Капитонов, и др. // ФТП – 2005. – Т.39(3). – С.388-392.
3. Evans G.A. Surface Emitting Semiconductor Lasers and Arrays / Evans G.A. (Ed), Hammer J.M. (Ed). – Boston: Academic Press, Inc. Harcourt Brace & Company, Publishers, 1993. – 420 p.
4. Полупроводниковый лазер с выводом излучения через подложку с улучшенными энергетическими характеристиками и сверхузкой диаграммой направленности/ В.Я. Алешкин, Т.С. Бабушкина, А.А. Бирюков, и др. // Квантовая электроника – 2010. - Т.40(10). – С.855–857.
5. Инжекционные полупроводниковые лазеры InGaAs/GaAs с волноводом на одиночной квантовой яме / С.О. Слипченко, А.А. Подоскин, Н.А. Пихтин, и др. // Письма в ЖТФ – 2013. – Т. 39(8). – С.9–16.
6. Спонтанное и стимулированное излучение в среднем ультрафиолетовом диапазоне квантово-размерных гетероструктур на основе AlGaIn-соединений, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии на подложках с-сапфира / Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий, В.Н. Павловский, и др. // ФТП – 2013. - Т.55(10). - С.2058-2066.
7. Генерация излучения разностной частоты в двухчиповом лазере / Б.Н. Звонков, А.А. Бирюков, С.М. Некоркин, и др. // ФТП – 2009. - Т.43(2). - С.220-223.

8. Terahertz quantum cascade lasers with metal-metal copperwaveguides operating up to 178 K / M. A. Belkin, J.A. Fan, S. Hormoz, F. Capasso, et al // Opt. Exp. – 2008. - V.16. - P. 3242–3248.
9. Свойства гетеролазеров на основе InGaAsP/InP с широким мезаполосковым контактом / Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, и др.// ФТП - 2000. – Т.34(7). - С.886-890.
10. Мощные InGaAsP/InP лазеры, излучающие на длине волны 1.8 μm / Е.Г. Голикова, В.А. Курешов, А.Ю. Лешко, и др. // ПЖТФ – 2002. - Т.28(3). - С.66-72.
11. Некоркин С.М. Экспериментальные исследования конкуренции мод и нелинейных эффектов в InGaAs/GaAs/InGaP гетеролазерах с комбинированными квантовыми ямами с резонаторами различного типа: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 05.27.01: защищена 07.12.05/ Некоркин Сергей Михайлович – Н.Новгород – ННГУ - 2005.
12. Дубинов А.А. Механизмы генерации излучения среднего и дальнего инфракрасных диапазонов при продольном транспорте электронов и смещении оптических мод в полупроводниковых микроструктурах АЗВ5: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 05.27.01: защищена 6.10. 05/Дубинов Александр Алексеевич – Н.Новгород - ИФМ РАН – 2005.
13. Патент 2535649 Российская Федерация МПК⁷H01S5/323 Полупроводниковый лазер / В.Я. Алешкин, А.В.Крюков, С.М. Некоркин, В.А. Токарев, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, А.Г. Шаврин, - №2013125883/28 заявл. 04.06.2013; опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35 – 14с.
14. Yariv, A. Optical waves in crystals / A. Yariv, P. Yeh - John Wiley & Sons, Inc.: New York, USA – 1984. - 589 p.
15. Слабко, В.В. Резонансная нелинейная оптика / В.В. Слабко // Соросовский Образовательный Журнал - 2000. – Т.6(11). – С. 77-82.
16. Алешкин, В.Я. Генерация излучения на разностной частоте в дальнем и среднем ИК диапазонах в двухчиповом лазере на основе арсенида галлия с германиевой подложкой / В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // Квантовая электроника – 2008. – Т. 38(9). – С. 855-858.
17. Лазеры с длиной волны излучения 0.98 μm на основе гетероструктур InGaP/GaAs/InGaAs, выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии / И.А. Авруцкий, Л.М. Батукова, Е.М. Дианов, Б.Н. Звонков, и др. // Квантовая электроника - 1994. – Т. 21(10). – С.921-924.

Список публикаций по теме диссертации

Публикации в изданиях из «перечня ВАК»

- A1. Модовая структура в дальнем поле излучения многоямного лазера с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, **Н.В. Дикарева**, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // Квантовая электроника - Т.42(10). - 2012. - С.931 – 933.
- A2. Мощный полупроводниковый лазер с улучшенными пространственными и энергетическими характеристиками / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков,

- М.Н. Колесников, **Н.В. Дикарева**, В.Я. Алёшкин, А.А. Дубинов // Вестник ННГУ им. Лобачевского - Т.1(1). - 2012. - С.30-32.
- A3. Волноводный эффект квантовых ям в полупроводниковых лазерах / В.Я. Алешкин, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский // Квантовая электроника - 2013.- Т.43(5). - С.401-406.
- A4. Волноводный эффект квантовых ям GaAsSb в лазерной структуре на основе GaAs / В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.В. Морозов, С.М. Некоркин // Физика и техника полупроводников - 2013. - Т.47(11). - С. 1486.
- A5. Экспериментальное определение оптимального количества квантовых ям в многоямных гетеролазерах с вытеканием излучения через подложку / С.М. Некоркин, М.В. Карзанова, **Н.В. Дикарева**, Б.Н. Звонков, В.Я. Алешкин // Письма в Журнал технической физики - 2014. - Т. 40(10). - С. 52-57.
- A6. Полупроводниковый лазер с вытеканием излучения через подложку и трапецевидной активной областью / **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин, М.В. Карзанова, Б.Н. Звонков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, А.А. Афоненко // Квантовая электроника - 2014. - Т. 44(4). - С. 286 -288.
- A7. Волноводный эффект квантовых ям InGaAs в GaAs структуре на Si подложке с Ge буферным слоем / В.Я. Алешкин, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, П.А. Юнин, Д.В. Юрасов // Письма в Журнал технической физики – 2015. - Т.41(13). - С.72-78.
- A8. Влияние температурной обработки на излучательные свойства гетероструктур с квантово-размерным слоем GaAsSb / **Н.В. Дикарева**, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, С.М. Некоркин, А.В. Пирогов, Д.А. Павлов // Физика и техника полупроводников - 2015. - Т.49(1). - С.11-14.
- A9. Излучательные характеристики лазерных диодов на основе Al_{0.3}B_{0.5}, выращенных на германиевой подложке / В.Я. Алёшкин, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, З.Ф. Красильник, С.М. Некоркин // Письма в Журнал технической физики – 2015. - Т.41(6). - С.105-110.
- A10. Нелинейное смешение гармоник в InGaAs/InGaP/GaAs лазере на Ge подложке / **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // Квантовая электроника - 2015. Т.45(3). - С.204-206.
- A11. Влияние "объема" активной среды на излучательные свойства лазерных гетероструктур с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, **Н.В. Дикарева**, О.В. Вихрова, А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков // Физика и техника полупроводников - 2017. - Т.51(1). - С.75-78.
- A12. Двухчастотный GaAs/InGaP лазерный диод с квантовой ямой GaAsSb / **Н.В. Дикарева**, Б.Н. Звонков, О.В. Вихрова, С.М. Некоркин, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // Физика и техника полупроводников - 2017. – Т.51 (10). – С.1410-1413.

Прочие публикации

- A13. Особенности генерации лазерных диодов на квантовых ямах GaAsSb / О.В. Вихрова, **Н.В. Дикарева**, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, С.М. Некоркин, В.Я. Алешкин,

- А.А. Дубинов // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сборник статей 8-го Белорусско-Российского семинара - 2011. - С. 56 – 59.
- A14. Двухчастотная генерация излучения в лазерных диодах на квантовых ямах GaAsSb / О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, М.Н. Колесников, **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин // Труды XV научной конференции по радиофизике, посвященная 110-й годовщине со дня рождения А.А. Андропова - 2011. - С.36-37.
- A15. Модовая структура в дальнем поле излучения многоямного лазера с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, **Н.В. Дикарева**, М.В. Карзанова, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // Труды XVI научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.Н. Бархатова - 2012. - С.45 – 46.
- A16. Модовая структура в дальнем поле излучения лазера с выходом излучения через подложку / С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, **Н.В. Дикарева**, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // 3й международный симпозиум: Полупроводниковые лазеры: физика и технология - 2012. - С.27.
- A17. Волноводный эффект квантовых ям в полупроводниковых лазерах / В.Я. Алешкин, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский // 3й международный симпозиум: Полупроводниковые лазеры: физика и технология - 2012. - С.22.
- A18. Модовая структура многоямных полупроводниковых лазеров с вытеканием излучения через подложку / М.В. Карзанова, **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков // Всероссийская молодежная школа-семинар "Диагностика наноматериалов и наноструктур" - Рязань - октябрь 2013. - С.109.
- A19. Волноводный эффект квантовых ям InGaAs и GaAsSb в лазерах на основе GaAs и InP / **Н.В. Дикарева**, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, М.В. Карзанова, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.Н. Яблонский // Полупроводниковые лазеры и системы на их основе: Сборник статей 9-го Белорусско-Российского семинара - 2013.- С.33.
- A20. Волноводный эффект квантовых ям GaAsSb в лазерной структуре на GaAs / В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.В. Морозов, С.М. Некоркин // XVII международного симпозиума «Нанофизика и нанoeлектроника» - 2013. - С.443-444.
- A21. Полупроводниковые лазеры на основе GaAs с волноведущими квантовыми ямами InGaAs / **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, А.А. Дубинов, В.Я. Алешкин // XVII научная конференция по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения В.С. Троицкого - 2013, - С.31-32.
- A22. Влияние температурной обработки на излучательные свойства гетероструктур с квантово-размерным слоем GaAsSb / **Н.В. Дикарева**, О.В. Вихрова, Б.Н. Звонков, Н.В. Малехонова, С.М. Некоркин, А. В. Пирогов, Д. А. Павлов // XVIII международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» - 2014. - С.452-453.
- A23. Мощностные характеристики InGaAs/GaAs/InGaP-лазеров с вытекающей модой // А.А. Афоненко, Д.В. Ушаков, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, **Н.В. Дикарева** // Труды 10-й Международной научно-технической конференции "Квантовая электроника 2015". - 2015. - С.92.

- A24. Влияние числа квантовых ям на излучательные свойства лазерных гетероструктур с вытеканием излучения через подложку / **Н.В. Дикарева**, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, О.В. Вихрова // XIX международный симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника» - 2015. - С.491-492.
- A25. Конструктивные особенности активной среды полупроводниковых лазеров с вытеканием излучения через подложку / **Н.В. Дикарева**, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, Н.В. Байдусь, О.В. Вихрова, П.А. Юнин // Труды XIX научной конференции по радиофизике посвященной 70-летию радиофизического факультета - 2015. - С.31-32.
- A26. Оптимизация InGaP/GaAs/InGaAs гетеролазеров с туннельно-связанными волноводами / И.В. Самарцев, В.Я. Алешкин, **Н.В. Дикарева**, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, Д.А. Колпаков, С.М. Некоркин // Физика и техника полупроводников – 2015. - Т.49(12). - С.1619-1622.
- A27. Оптимизация InGaP/GaAs/InGaAs гетеролазеров с туннельно-связанными волноводами / Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, **Н.В. Дикарева**, И.В. Самарцев, Д.А. Колпаков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов // XIX международный симпозиум «Нанопизика и нанопэлектроника» - 2015. - С. 650-651.
- A28. Дикарева Н.В. Измерение энергетических параметров излучения полупроводниковых лазерных диодов с помощью измерителя Lab Max-Top [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Н.В. Дикарева, М.В. Карзанова С.М. Некоркин - <http://www.unn.ru/books/resources.html>. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, - 2012. - 535.12.05 – 37с.
- A29. Карзанова М.В. Высокоточный монтаж лазерных чипов с помощью установки Fineplacer lambda-96 [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / М.В. Карзанова, Н.В. Дикарева, С.М. Некоркин - <http://www.unn.ru/books/resources.html>. - Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, - 2014. - 666.14.05 – 85 с.