

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ имени А.Ф.ИОФФЕ

На правах рукописи

Гребенщикова Елена Александровна

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИСТОЧНИКОВ СПОНТАННОГО И
КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ $A^{III}V$ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИК-
ОБЛАСТИ СПЕКТРА ($\lambda=2\div 5$ мкм)**

Специальность 01.04.10 - физика полупроводников

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

**Санкт-Петербург
2007**

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Ю.П.Яковлев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
А.Н.Титков

доктор физико-математических наук,
профессор
В.В.Кузнецов

Ведущая организация: Государственный университет
«Ленинградский электротехнический
институт им. Ульянова-Ленина»

Защита состоится « » мая 2007 г. в час. мин. на заседании
диссертационного совета К-002.205.02 при Физико-техническом институте им.
А.Ф. Иоффе РАН
по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая улица, д. 26.

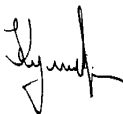
С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан « » апреля 2007 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета К-002.205.

кандидат физико-математических на



Г.С.Куликов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электроника на гетероструктурах широко используется во многих областях человеческой деятельности – это телекоммуникационные системы, основанные на лазерах с двойной гетероструктурой (ДГС), системы спутникового телевидения с диодами Гана, солнечные элементы на гетероструктурах, а также приборы для экологического мониторинга, медицины и контроля различных технологических процессов, включающие в себя светодиоды, диодные лазеры и фотодиоды. Большой интерес для практического применения представляют оптоэлектронные приборы, работающие в средней инфракрасной (ИК) области спектра (2-5 мкм).

Этот спектральный диапазон актуален для задач лазерной диодной спектроскопии газов и молекул. Освоение этой области инфракрасного спектра исключительно важно для решения задач экологического мониторинга и медицинской диагностики. В связи с этим возникает необходимость создания оптоэлектронных приборов, перекрывающих диапазон ИК-области спектра. Для создания таких оптоэлектронных приборов перспективными являются многослойные гетероструктуры на основе соединений $A^{III}B^V$ (InAs, GaSb). Среди задач, стоящих перед исследователями, важнейшими являются повышение эффективности вывода излучения из кристалла, увеличение мощности излучения и повышение рабочих температур выше комнатной. Все это требует создания светодиодных и лазерных структур новых типов и на их основе – чипов новой конструкции. Таким образом, создание высокоэффективных оптоэлектронных приборов требует новых подходов и методов постростовой обработки оптоэлектронных гетероструктур.

Цель работы. Создание оптоэлектронных источников спонтанного и когерентного излучения для средней ИК-области спектра (2-5 мкм) на основе многослойных гетероструктур соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов.

Для достижения намеченной цели решались следующие задачи:

1. Разработка и оптимизация технологии постростовой обработки гетероструктур на основе многослойных соединений $A^{III}B^V$ и создание

светодиодных и лазерных чипов для высокоэффективных оптоэлектронных приборов (светодиодов и лазеров) средней ИК-области спектра (2-5 мкм).

2. Создание светодиодных чипов различной геометрии.

Исследования влияния геометрических размеров и формы меза-структур на электролюминесцентные свойства светодиодов.

3. Исследование возможности создания методики неселективного травления слоев многослойной системы InAsSbP/GaInAsSb/InAs с целью получения ровного профиля мезаструктуры и гладкой полированной поверхности мез.

4. Разработка методики создания омических контактов различной формы. Исследования влияния формы омических контактов на электролюминесцентные характеристики светодиодов.

5. Разработка методики электрохимического травления для создания принципиально новых конструкций лазеров для средней ИК-области спектра.

6. Создание и исследование лазеров на основе гетероструктур для спектрального диапазона 2÷4 мкм.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Впервые на основе узкозонных материалов $A^{III}B^V$ созданы светоизлучающие гетероструктуры для инфракрасной области спектра (2-5 мкм) методами жидкостной эпитаксии и газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений.

2. Предложены и разработаны методики постростовой обработки многослойных гетероструктур соединений $A^{III}B^V$ для создания светодиодных и лазерных чипов.

3. Впервые созданы светодиодные чипы для высокоэффективных источников спонтанного излучения в диапазоне 2–5 мкм, работающих при комнатной температуре:

- впервые для увеличения квантового выхода излучения светодиодов на основе GaSb был создан светодиодный чип, имеющий форму ступенчатой пирамиды со сглаженными ступенями;

- предложена и разработана технология создания омических контактов нового типа, а именно, сетчатых, обуславливающих значительное улучшение рабочих характеристик прибора.
4. Впервые созданы лазерные чипы для высокоэффективных источников когерентного излучения для диапазона 1.8–2.4 мкм, работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре:
- созданы лазерные чипы полосковой геометрии на основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb. В лазерах, созданных на этих чипах, получено рекордно низкое значение порогового тока в широком интервале температур (77-300K);
 - созданы лазерные чипы канального зарощенного типа с серповидной активной областью и изготовлены лазеры, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре $T=300\text{K}$ на длине волны $\lambda=2.0$ мкм;
 - впервые созданы лазерные чипы полосковой геометрии для высокоэффективных источников когерентного излучения для спектрального диапазона 3.0-3.1 мкм, работающие в импульсном режиме в интервале температур 77-180K;
 - на основе гетероструктур InAs/InAsSbP созданы полосковые лазеры с рекордной мощностью излучения ($P=2-5$ кВт) на длине волны 3.3 мкм при криогенной температуре (77-110K);
 - на основе двойной гибридной гетероструктуры (Al,Ga)SbAs/InAs/(Cd,Mg)Se с гетеровалентным интерфейсом $A^{III}B^V/A^{II}B^{VI}$ впервые продемонстрирована возможность лазерной генерации в среднем ИК диапазоне ($\lambda=2.775$ мкм при $T=77$ K) при инжекционной накачке.

Научная и практическая значимость работы.

1. Созданы светодиоды для спектрального диапазона $\lambda=2-5$ мкм на основе изопериодных к антимониду галлия и арсениду индия твердых растворов, полученных методами жидкофазной эпитаксии и газотранспортной эпитаксии из металлоорганических соединений, работающие при комнатной температуре. Для создания светодиодных чипов была предложена и

разработана технология постростовой обработки многослойных гетероструктур.

2. Разработаны лазерные чипы и созданы источники когерентного излучения для средней ИК- области спектра 2÷4мкм:
 - создан лазер ($\lambda=2.5$ мкм при $T=300K$) на основе твердых растворов GaInAsSb вблизи границы несмешиваемости, работающий в импульсном режиме;
 - разработан канальный зарощенный длинноволновый лазер с серповидной активной областью, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре ($T= 300K$, $\lambda=2$ мкм);
 - на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP созданы лазеры, работающие на длине волны $\lambda = 3.0\div 3.6$ мкм при $T=77K$ в импульсном режиме;
 - созданы лазеры на основе двойной гибридной гетероструктуры (AlGa)SbAs/InAs/CdMgSe с гетеровалентным интерфейсом $A^{III}B^V/A^{II}B^{VI}$, работающие при криогенной температуре ($T=77-110$ K), $\lambda=2.775$ мкм.
3. Методом многоэтапной фотолитографии с электрохимическим травлением созданы светодиодные кристаллы различной формы, в том числе с сильно развитой световыводящей поверхностью. Разработана технология изготовления омических контактов разной конфигурации. Показано, что сетчатые омические контакты имеют преимущество перед точечными (круглыми).

Научные положения, выносимые на защиту.

1. В светодиодном кристалле на основе p-n-гетероструктуры GaInAsSb/GaSb наличие сильноразвитой криволинейной световыводящей поверхности обуславливает увеличение внешнего квантового выхода за счет многократного отражения от такой поверхности и попадания излучения на поверхность под углом, меньшим угла полного внутреннего отражения за счет изменения направления светового потока в кристалле.
2. В светодиодном кристалле на основе p-n-гетероструктуры GaInAsSb/GaSb с сильноразвитой криволинейной световыводящей поверхностью, имеющем

первоначальное двухполосное излучение, одна из полос которого обусловлена переходами электронов из зоны проводимости на уровень двухзарядного акцептора, а другая, более коротковолновая – на уровень однозарядного акцептора, трансформируется в излучение, спектр которого имеет только одну длинноволновую полосу.

3. Внешний квантовый выход излучения светодиодов при $T=300\text{K}$ на основе гетероструктур GaInAsSb/GaSb и InAsSb/InAsSbP, работающих в диапазоне длин волн от 1.8 до 4.6 мкм уменьшается почти на 2 порядка при возрастании длины волны излучения светодиодов за счет усиления роли безызлучательной Оже-рекомбинации.
4. В светодиодных кристаллах на основе p-n-гетероструктуры GaInAsSb/GaSb плотность тока под омическими контактами сетчатой формы в ~ 20 раз меньше, чем под круглыми. Это значительно уменьшает вклад безызлучательной Оже-рекомбинации и позволяет получать большую мощность излучения.
5. В лазерах полосковой геометрии наименьшие значения порогового тока достигаются у канально-зарощенных лазеров с серповидной активной областью, имеющих двухстороннее оптическое ограничение, по сравнению с лазерами мезаполосковой геометрии, имеющими одностороннее оптическое ограничение.

Личный вклад автора. Все новые результаты, сформулированные в диссертации, получены лично диссертантом. Вклад диссертанта состоит в том, что им была предложена и разработана технология постростовой обработки полупроводниковых кристаллов. Диссертантом были проведены экспериментальные исследования, интерпретация их результатов и формулировка выводов.

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе подтверждается удовлетворительным согласием расчетных и экспериментальных данных.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция по оптоэлектронным приборам для средней ИК-области спектра MIOMD-V (Maryland USA, 2002); Международная конференция по физике полупроводников (ICPS-2002); Международная конференция по вопросам, связанным с методом молекулярно-пучковой эпитаксии- MBE (Сан-Франциско, сентябрь 2002).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы изложено в 14 печатных работах, список которых приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертации составляет 178 страниц, включая 37 рисунка и 6 таблиц. Список цитируемой литературы включает в себя 128 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, обозначена ее цель, изложены основные результаты исследований, сформулированы представляемые к защите научные положения.

В первой главе приведен краткий обзор достижений в области создания источников спонтанного и когерентного излучения для диапазона длин волн 2÷5 мкм, а также рассмотрены имеющиеся к началу постановки данной работы методы формирования излучателей на основе полупроводниковых гетероструктур. Рассмотрены основные физико-химические свойства полупроводниковых материалов, используемых для изготовления оптоэлектронных структур. Здесь же описывается технология создания светодиодов и лазеров, включающая в себя методы синтеза полупроводниковых гетероструктур и их постростовую обработку. Процессу постростовой обработки уделено особое внимание в связи с тем, что при этом формируются необходимые конструкции оптоэлектронных чипов и создаются приборы с требуемыми параметрами.

Анализ литературных данных показал:

Светодиоды и лазеры для среднего инфракрасного (ИК) диапазона находят широкое практическое применение. Однако их излучательная эффективность

невысока при комнатной температуре и они зачастую требуют криогенного охлаждения. Для создания светоизлучающих приборов в средней ИК области спектра могут быть использованы материалы $A^{II}B^{VI}$, $A^{IV}B^{VI}$, $A^{III}B^V$. Наиболее перспективными являются соединения $A^{III}B^V$, т.к. обладают рядом преимуществ, а именно: наиболее высокой эффективностью излучательной рекомбинации, большой теплопроводностью и механической прочностью. Однако узкозонные материалы $A^{III}B^V$ практически не использовались для создания оптоэлектронных приборов. Для синтеза этих материалов применяются методы ЖФЭ, МОГФЭ и МЛЭ. Постростовая обработка полупроводниковых структур достаточно хорошо разработана для создания приборов в ближней ИК-области спектра (0.8-1.5 мкм). Технология создания оптоэлектронных приборов для средней ИК-области спектра совершенно не развита и требует значительных усилий исследователей по совершенствованию постростовой обработки узкозонных гетероструктур. Формирование светодиодных и лазерных чипов на основе четверных твердых растворов мало изучено, особенно для средней ИК-области спектра, когда может быть использована широкая гамма полупроводниковых материалов различного состава: от широкозонных (AlGaAsSb, InAsSbP) до узкозонных (GaInAsSb, InAsSb). Постростовая обработка таких систем представляет особую сложность. Химическое травление многослойных структур, состоящих из разнородных по свойствам материалов, имеет существенные ограничения. Поэтому возникает острая необходимость разработки новых методов химического травления, которые позволили бы формировать ровные склоны мезоструктур, а также создавать чипы различной конфигурации.

Вторая глава посвящена разработке технологии создания оптоэлектронных мезоструктур. Основное внимание во второй главе уделено разработке методов постростовой обработки эпитаксиальных гетероструктур.

В §1 приводится методика синтеза многослойных гетероструктур методом жидкофазной эпитаксии. Разработаны методы эпитаксиального наращивания различных гетероструктур на основе соединений $A^{III}B^V$, в том числе с серповидной активной областью. В §2 приводятся результаты работы по подбору травителя для постростовой обработки многослойных гетероструктур на основе $A^{III}B^V$.

В результате проведенных исследований предложена и разработана методика химического травления для состава InAsSbP. Разработан травитель, обеспечивающий

неселективное травление слоев гетероструктуры на основе InAs и позволяющий формировать мезы с ровной боковой поверхностью.

Разработана методика электрохимического травления, определены величины плотности тока, напряжения, температура травителя, продолжительность травления.

В §3 рассмотрены условия создания омических контактов к полупроводниковым структурам методом термического вакуумного напыления.

Третья глава посвящена разработке, созданию и исследованию светодиодов и лазеров на основе узкозонных соединений $A^{III}B^V$ для ИК-диапазона 1.6-2.5 мкм.

В §1 описывается методика создания светодиодных чипов на основе гетероструктур GaSb/GaInAsSb, которые были использованы для изготовления светодиодов в этом спектральном диапазоне. В §2 рассматривается методика создания светодиодов на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из Pb-содержащих растворов-расплавов для среднего ИК-диапазона. Приводятся результаты исследований электролюминесцентных характеристик. В §3 представлены результаты исследований влияния геометрической формы меза-структуры на спектральные характеристики и диаграммы направленности излучения. Изучены возможности увеличения внешнего квантового выхода излучения за счет изменения формы светодиодных чипов. Для придания светодиодному кристаллу специальной формы был развит метод электрохимического травления. Для экспериментов были изготовлены чипы различной конфигурации, вырезанные из одного кристалла, состоящего из подложки GaSb с эпитаксиальными слоями, а именно: в виде прямоугольного параллелепипеда; параллелепипеда с глубоко вытравленными мезами, а также чип в виде ступенчатой пирамиды. В случае чипов в виде прямоугольного параллелепипеда при выводе излучения через эпитаксиальные слои в направлении, перпендикулярном плоскости р-п-перехода наблюдается практически неискаженный спектр рекомбинационного излучения двухзарядного акцептора, вследствие малой длины пути излучения в кристалле. При выводе излучения через подложку светодиоды, имеющие развитую криволинейную поверхность, излучают практически одну длинноволновую полосу. Наибольшую мощность излучения, а также наибольший квантовый выход фотонов имеют светодиоды с кристаллом в форме ступенчатой пирамиды со сглаженными ступенями.

Таким образом, методом электрохимической огранки подложечной части светоизлучающих кристаллов увеличено число граней кристалла, что приводит к повышению внешнего квантового выхода излучения. Экспериментально показано, что увеличение отношения площади светодиодного кристалла к его объему увеличивает внешний квантовый выход фотонов, вплоть до величины 5.5-6.0% при 300К. Достигнута оптическая мощность в непрерывном режиме 3.7 мВт. Максимальная мощность в импульсе достигала 7мВт при скважности 2, частоте следования 512 Гц, токе 300 мА и 190 мВт при скважности 200, частоте следования 1 кГц, токе 1.4 А.

В §4 представлены результаты исследований влияния формы омических контактов на электролюминесцентные характеристики светодиодов. Для повышения внешнего квантового выхода излучения необходимо уменьшение толщины кристаллов. Однако, при этом возникает проблема снижения сосредоточения излучения и большой плотности тока под контактом. Для изучения влияния формы и размеров омических контактов на свойства светодиодов из одной светоизлучающей структуры были изготовлены светодиодные чипы как с круглыми контактами разных размеров, так и сетчатого вида. Исследованы спектры излучения, диаграммы его направленности и зависимости мощности излучения от тока для светодиодов с круглыми и сетчатыми контактами. Установлено, что светодиоды с сетчатыми контактами способны работать до больших токов и давать больший внешний квантовый выход и большую мощность излучения, чем светодиоды с круглыми контактами. Показано, что светодиоды с расположением активной области вблизи наружной лицевой грани и с круглым, и с сетчатым омическим контактом излучают как коротковолновую, так и длинноволновую полосу, обусловленную двухзарядным акцептором. Слабая зависимость формы спектров излучения от тока говорит, что излучение генерируется в р-области, где заполнение двухзарядных центров почти не зависит от тока. Подложечная n-область играет основную роль в нефотоактивном поглощении из-за своей большой толщины.

Значительно меньшая плотность тока под контактом в случае сетчатого контакта подтверждается большей протяженностью линейного участка характеристики оптическая мощность – ток (от 0 до 200мА) для сетчатого контакта по сравнению с линейным участком для светодиодов с круглыми контактами (от 0 до 10 мА). Низкая плотность тока под сетчатыми контактами приводит к уменьшению под ними

безызлучательной Оже-рекомбинации. Поэтому внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации почти не уменьшается при увеличении тока до 300 мА. В результате мощность излучения при токе 300 мА достигает больших величин: 2.5 ÷ 3.5 мВт. Большая излучательная эффективность объясняется равномерностью распределения тока по площади р-п-перехода в светодиодах с сетчатым контактом, что позволяет ввести всю активную область в оптимальный излучательный режим.

Предложена и разработана технология создания омических контактов сетчатой формы, плотность тока под которыми в 20 раз меньше, чем под круглыми. Это значительно уменьшает вклад безызлучательной Оже-рекомбинации и позволяет получать большую мощность излучения до 3,5 мВт при токе 300 мА.

В §5 изложены методы создания лазеров для ИК-диапазона (1.8–2.5) мкм на основе GaInAsSb/GaAlAsSb и результаты исследований их свойств.

Здесь описывается технология постростовой обработки гетероструктур для создания лазерных чипов мезаполосковой геометрии канального зарощенного лазера с серповидной активной областью. Анализ экспериментальных данных показал, что наименьшие значения порогового тока были у канально-зарощенных лазеров с серповидной активной областью. В случае лазерных структур полоскового типа на основе узкозонных твердых растворов GaInAsSb, для достижения высокотемпературной непрерывной генерации когерентного излучения была предложена структура неинжекционного лазера на гетеропереходах II типа. Такая структура позволяет локализовать носители на границе и получить рекордно низкое значение порогового тока при $T=100\text{K}$. Разработан канальный зарощенный лазер с серповидной активной областью, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре ($T=20\text{C}$, $\lambda=2.0\text{ мкм}$). Пороговый ток для таких лазеров составлял при температурах 4.2; 77 и 300 К соответственно 6-15, 14-30, 120-500 мА.

Четвертая глава посвящена разработке, созданию и исследованию светодиодов и лазеров на основе узкозонных соединений $A^{III}B^V$ для спектрального диапазона 3÷5 мкм. В §1 изложены результаты разработки метода химического травления для формирования оптоэлектронных чипов из гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP, слои которых образованы твердыми растворами изопериодными InAs, выращенными методом жидкофазной эпитаксии. Основная сложность заключается в том, что при создании чипов на основе многослойных структур необходимо формировать мезы с

ровным профилем и полированной поверхностью. Для решения этой задачи в случае гетероструктур, содержащих в эмиттерных слоях индий, был разработан метод химического травления. Создан травитель $\text{CrO}_3/\text{HF}/\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}$, позволяющий травить с одинаковой скоростью слои твердых растворов различного химического состава. Экспериментально показано, что скорость травления четырехкомпонентных твердых растворов $\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_y\text{P}_x$, где $x \leq 0,32$; $y \leq 0,15$, близка по величине к скорости травления InAs и не зависит от состава твердого раствора. Для формирования мезаструктур с ровным профилем в двойной гетероструктуре с эмиттерами, содержащими алюминий, был разработан метод электрохимического травления.

Созданы меза-светодиоды (диаметр мезы ~ 300 мкм) для спектрального диапазона 3.0-4.6 мкм на основе гетероструктур $\text{InAsSb}/\text{InAsSbP}$ и исследованы их электролюминесцентные характеристики. Полуширина спектра излучения составила 0.4-0.6 мкм. Мощность излучения созданных светодиодов максимальна для $\lambda = 3.3$ мкм и составляет 100 мкВт (при $T = 300\text{K}$, в непрерывном режиме), плавно уменьшаясь почти на порядок ($P = 10$ мкВт) для $\lambda = 4.6$ мкм.

В §2 приводятся результаты исследований светодиодов, созданных на основе твердых растворов $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ).

В §3 описывается методика создания лазеров на основе твердых растворов $\text{InAs}(\text{Sb})/\text{InAsSbP}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии. Приведены результаты экспериментальных исследований при различных температурах зависимости интенсивности излучения от тока. Созданы лазеры полосковой конструкции с шириной полоска от 10 до 30 мкм на основе гетероструктуры $\text{InAsSbP}/\text{InAs}(\text{Sb})/\text{InAsSbP}$, мощность которых в интервале температур 77-180K составляет 2-5 мВт.

В §4 представлены результаты исследований лазеров на основе твердых растворов $\text{InGaAsSb}/\text{AlGaSbAs}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии. Описана методика формирования мезаполоскового лазера на основе двойной гетероструктуры методом электрохимического травления. Приведены экспериментально полученные спектральные и вольтамперные характеристики лазеров. Впервые получено когерентное излучение в диапазоне 3-4 мкм в лазерных диодах, работающих в интервале температур 77-120K. В §5 описаны разработанные инжекционные ИК лазеры ($\lambda = 2.775$ мкм) на основе двойной гибридной гетероструктуры $(\text{AlGa})\text{AsSb}/\text{InAs}/\text{CdMgSe}$, с гетеровалентным

интерфейсом $A^{III}B^V/A^{II}B^{VI}$ на границе InAs активной области, выращенной методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Для создания лазерных чипов был использован разработанный метод электрохимического травления.

В результате создан лазер, впервые продемонстрировавший возможность лазерной генерации в среднем ИК диапазоне ($\lambda = 2.775$ мкм при $T = 77$ К) при инжекционной накачке созданной двойной гибридной гетероструктуры.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Предложена и разработана технология постростовой обработки светодиодных и лазерных чипов:

- предложен метод многоступенчатой фотолитографии с электрохимическим травлением и определены величины плотности тока, напряжения, температуры травителя и продолжительности травления;
- определен состав травителя и разработана технология неселективного химического травления четырехкомпонентных твердых растворов $Ga_x In_{1-x} As_{1-y} Sb_y$, где $x \leq 0.2$, $y \leq 0.35$; $InAs_{1-x-y}Sb_yP_x$, где $x \leq 0.32$, $y \leq 0.15$, на основе InAs, позволяющая получить ровный профиль межи и полированную поверхность структуры;
- разработана методика создания омических контактов различной формы к светодиодным чипам.

II. Созданы и исследованы светодиоды для средней ИК-области спектра (2-5 мкм):

- на основе разработанной технологии электрохимического травления гетероструктур GaSb/GaInAsSb разработаны методики создания светодиодных чипов заданной конфигурации и созданы светодиодные чипы с сильно развитой криволинейной световыводящей поверхностью;
- созданы высокоэффективные светодиоды, излучающие в спектральном диапазоне 1.8-2.5 мкм, работающие при $T = 300$ К с максимальной мощностью излучения в непрерывном режиме $P = 2 \div 3.3$ мВт, внешним

квантовым выходом излучения $\eta=4-6\%$, шириной спектра излучения ~ 0.2 мкм;

- изучены диаграммы направленности излучения светодиодов различной конфигурации и экспериментально установлено, что квантовый выход фотонов повышается с увеличением площади световыводящей поверхности. Так, квантовый выход светодиодов с формой поверхности, близкой к сферической, в 1,5 раза больше, чем светодиодов с плоской поверхностью. Полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с теоретическими расчетами;
- изучено влияние формы омических контактов на электролюминесцентные характеристики светодиодов. Установлено, что плотность тока под сетчатыми контактами в 20 раз меньше, чем под круглыми. Это значительно уменьшает скорость безызлучательной Оже-рекомбинации и позволяет получать большую мощность излучения вплоть до 3,5мВт при токе 300мА;
- созданы светодиоды на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов. Максимум излучения светодиодов наблюдается на длинах волн $\lambda = 2.3$ и 2.44 мкм. Внешний квантовый выход при $T=300\text{K}$ составил 1.6 и 0.11% соответственно;
- с использованием предложенного травителя созданы светодиоды на основе гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP для спектрального диапазона $\lambda=2.7\div 4.6$ мкм, работающие при комнатной температуре с мощностью излучения в непрерывном режиме от 100мкВт до 10мкВт соответственно.

III. Созданы и исследованы лазеры для средней ИК- области (2-4 мкм):

- на основе предложенной технологии электрохимического травления гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP созданы лазерные чипы с мезаструктурой, обладающей ровной боковой поверхностью;
- на основе предложенной технологии постростовой обработки созданы лазерные чипы полосковой геометрии. В полосковых лазерах, созданных на

- основе гетероструктур GaInAsSb/GaAlAsSb, достигнута генерация при комнатной температуре в импульсном режиме ($I_{\text{пор}}=2$ А, $T=300\text{К}$);
- созданы лазерные чипы канального зарощенного типа с серповидной активной областью для лазеров, работающих в непрерывном режиме ($T=300\text{К}$, $\lambda=2.0$ мкм). Пороговый ток составлял при температурах 4.2; 77 и 300К соответственно 6-15, 14-30, 120-500 мА. Пороговая плотность тока увеличивалась по закону $I_{\text{th}} \sim \exp(T/T_0)$, где характеристическая температура $T_0=98$ К;
 - исследованы электролюминесцентные характеристики полосковых лазеров на основе гетероструктур InAs(Sb)/InAsSbP для спектрального диапазона $\lambda=3.0\div 3.6$ мкм. Рекордная мощность излучения полосковых лазеров достигает 3-5 мВт на длине волны 3.3 мкм при криогенной температуре;
 - создан лазер, впервые продемонстрировавший возможность лазерной генерации в среднем ИК диапазоне ($\lambda= 2.775$ мкм при $T=77$ К) при инжекционной накачке двойной гибридной гетероструктуры. Лазерный чип для данных лазеров был изготовлен с использованием электрохимического травления двойной гибридной гетероструктуры (Al,Ga)SbAs/InAs/(Cd,Mg)Se с гетеровалентным интерфейсом $A^{\text{III}}B^{\text{V}}/A^{\text{II}}B^{\text{VI}}$ на границе InAs активной области .

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1А. А.Н.Баранов, Е.А.Гребенщикова, А.Н.Именков, Б.Е.Журтанов, Т.Н.Данилова, Ю.П.Яковлев «Длинноволновые лазеры на основе твердых растворов GaInAsSb вблизи границы несмешиваемости ($\lambda = 2,5\text{мкм}$, $T = 300\text{К}$)», Письма в ЖТФ, 1988, Т.14, В.20, с.1839–1843.
- 2А. А.А.Андаслаева, А.Н.Баранов, Е.А.Гребенщикова, А.А.Гусейнов, А.Н.Именков, А.А.Рогачев, Г.М.Филаретова, Ю.П.Яковлев «Спонтанная электролюминесценция в гетеропереходах II-типа на основе InGaAsSb ($\lambda=2,5\text{мкм}$, $T=300\text{К}$)», ФТП, 1989, Т.23, В.8, с. 1373-1377;
- 3А. Е.А.Гребенщикова, В.В.Шерстнев., А.М.Литвак, Н.А.Чарыков «Травитель для обработки бинарных полупроводниковых материалов $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$ и твердых растворов на их основе», а.с. 1619971, 1989;
- 4А. Е.А.Гребенщикова, О.Г.Ершов., Б.Е.Журтанов, А.Н.Именков, Н.М.Колчанова, Ю.П.Яковлев. «Исследование спонтанного и когерентного излучения в диапазоне длин волн 3 - 4 мкм в лазерной структуре на основе InGaAsSb/AlGaSbAs» Письма в ЖТФ, 1997, Т.23, В.22, с.66-71;

- 5А. Е.А.Гребенщикова., А.М.Литвак, В.В.Шерстнев, Ю.П.Яковлев «Формирование оптоэлектронных структур на основе твердых растворов InAsSb/InAsSbP», Письма в ЖТФ, 1998, Т.24, В.15, с.27-33;
- 6А. Е.А.Гребенщикова, Н.В.Зотова, С.С.Кижаяев, С.С.Молчанов, Ю.П.Яковлев. «InAs/InAsSbP светоизлучающие структуры, выращенные методом газофазной эпитаксии», ЖТФ, 2001, Т.71, В.9, с.58-60;
- 7А. С.С.Кижаяев., С.С.Молчанов., Н.В.Зотова., Е.А.Гребенщикова, Ю.П.Яковлев, Е.Hulicius, T.Simicek, K.Melichar, J.Pangrac. «Разъединенный гетеропереход в системе p-GaSb-n-InAs_{1-x}Sb_x (0 ≤ x ≤ 0.18)», Письма в ЖТФ, 2001, Т.27, В.22, с.66-72.
- 8А. S.V. Ivanov, V.A. Kaygorodov, S.V. Sorokin, B.Ya. Meltser, V.A. Solov'ev, Ya.V. Terent'ev, O.G. Lyublinskaya, K.D. Moiseev, E.A. Grebenshchikova, M.P. Mikhailova, A.A. Toropov, Yu.P. Yakovlev, P.S. Kop'tv and Zh.I. Alferov «A 2.78- μ m laser diode based on hybrid AlGaAsSb/InAs/CdMgSe double heterostructure grown by molecular-beam epitaxy», Applied physics letters, 2003, V.82, N21, pp. 3782-3784
- 9А. С.В.Иванов, К.Д.Моисеев, В.А.Кайгородов, В.А.Соловьев, С.В.Сорокин, Б.Я.Мельцер, Е.А.Гребенщикова, И.В.Седова, Я.В.Терентьев, А.Н.Семенов, А.П.Астахова, М.П.Михайлова, А.А.Торопов, Ю.П.Яковлев, П.С.Копьев, Ж.И.Алферов. ФТП 2003, 37(6), 762-766 «Инфракрасный инжекционный лазер ($\lambda=2, 775$ мкм) на основе двойной гибридной гетероструктуры, выращенной МПЭ»
- 10А. Е.А.Гребенщикова, А.Н.Именков, Б.Е.Журтанов, Т.Н.Данилова, А.В.Черняев, Н.В.Власенко, Ю.П.Яковлев. «Свойства светодиодов на основе GaSb, полученных путем химической огранки подложечной части светодиодных кристаллов», ФТП, 2003, Т.37, В.12, с.1465-1471.
- 11А. Е.А.Гребенщикова, А.Н.Именков, Б.Е.Журтанов, Т.Н.Данилова, М.А.Сиповская, Н.В.Власенко, Ю.П.Яковлев. «Трансформация коротковолновой полосы излучения двухзарядного природного акцептора в длинноволновую в светодиодах на основе GaSb» ФТП, 2004, Т.38, В.6, с.745-751.
- 12А. А.Н.Именков, Е.А.Гребенщикова, Б.Е.Журтанов, Т.Н.Данилова, М.А.Сиповская, Н.В.Власенко, Ю.П.Яковлев. «Свойства светодиодов на основе GaSb с сетчатыми омическими контактами» ФТП, 2004, Т.38, В.11, с.1399-1407.
- 13А. Я.А.Пархоменко, А.П.Астахова, Е.А.Гребенщикова, Э.В.Иванов, Е.В., Куницына Яковлев Ю.П. «Светодиоды на основе твердых растворов Ga_{1-x}In_xAs_ySb_{1-y}, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов» ЖТФ, 2004, Т.30, В.13, с.1-6.
- 14А. А.П.Астахова, Е.А.Гребенщикова, Э.В.Иванов, А.Н.Именков., Е.В.Куницына, Я.А. Пархоменко, Ю.П.Яковлев. «Инфракрасные светодиоды на основе твердых растворов GaInAsSb, выращенных из содержащих свинец растворов-расплавов» ФТП, 2004, Т.38, В.12, с. 1466.