

На правах рукописи

УСИКОВА АННА АЛЕКСАНДРОВНА

ФОРМИРОВАНИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОСТРУКТУР НА ОСНОВЕ
IN-СОДЕРЖАЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АЗ-В5 С
ВЫВОДЯЩИМИ ИЗЛУЧЕНИЕ БРЭГГОВСКИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

с п е ц и а л ь н о с т ь

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель: Шубина Татьяна Васильевна,
доктор физико-математических наук,
ФТИ им. А. Ф. Иоффе

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Максимов Михаил Викторович,
Санкт-Петербургский Академический университет -
научно-образовательный центр нанотехнологий РАН
(Академический университет)

доктор физико-математических наук
Шашкин Владимир Иванович,
Учреждение Российской Академии наук
Институт физики микроструктур РАН

Ведущая организация: Учреждение Российской Академии наук
Институт Радиотехники и электроники
им. В.А. Котельникова

Защита состоится “ _____ ” _____ 2012 г. в _____ час.
на заседании диссертационного совета
Д 002.205.02 при ФТИ им. А. Ф. Иоффе по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по
вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан “ _____ ” _____ 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Сорокин Л. М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Полупроводниковые соединения А3-В5 являются перспективными материалами для практического применения в оптоэлектронике и нанофотонике. Среди основных бинарных составов (InSb, InAs, InP, GaSb, GaP, AlSb, GaN, InN) половина относится к In-содержащим соединениям (пниктогидам In). С фосфором, мышьяком и сурьмой индий образует по одному стехиометрическому соединению InP, InAs и InSb, причем нестехиометрических не образуется вовсе. Эти соединения кристаллизуются в кубической сингонии (типа сфалерита). Нитрид индия InN обычно кристаллизуется в гексагональной решётке типа вюрцита.

Благодаря особенностям зонной структуры (ширина запрещенной зоны варьируется от 0.18 эВ до 1.35 эВ при комнатной температуре), оптическим и электрофизическим свойствам In-содержащих полупроводниковых соединений А3-В5, приборы на их основе способны работать в инфракрасной (ИК) и терагерцовой (ТГц) областях спектра. В настоящее время, лазерные структуры с активной областью на основе самоорганизующихся квантовых точек InAs занимают лидирующее положение в системах оптоволоконных коммуникаций в ближнем ИК диапазоне [1]. Необходимость освоения более длинноволновых диапазонов диктуется рядом важных моментов.

Средний и дальний ИК диапазон являются уникальной областью спектра. В нем расположены окна прозрачности атмосферы (3-5 мкм, 8-12 мкм и др.), где излучение менее подвержено влиянию погодных условий или рассеянию, чем излучения ближнего ИК, видимого или ультрафиолетового диапазонов. В среднем ИК диапазоне лежат линии поглощения колебательных переходов - “маркеров”, характерных “отпечатков пальцев” разнообразных молекул: воды и её паров, метана, углекислого газа, угарного газа, ацетона, аммиака, сложных органических молекул [2]. Следует отметить, что проблема загрязнения окружающей среды продуктами деятельности человека всё острее встаёт перед современным обществом. Заметный вклад в загрязнение окружающей среды вносят техногенные выбросы различных газов, углеводороды, которые активно используются самыми разными отраслями современного производства и транспортом. Мониторинг примесей в окружающей среде – задача, решаемая в рамках специальных программ развитых стран мира. Излучатели ИК диапазона необходимы также для таких областей как медицинская хирургия и офтальмология, тепловидение с повышенным температурным контрастом, системы безопасности, беспроводная оптическая связь.

Особенность ТГц участка спектра заключается в том, что присущие ему волны слишком длинны для применения хорошо развитой оптической техники и в то же время слишком коротки для перенесения в него радиометодов. Применительно к нему часто

используется название “терагерцовая брешь” (“terahertz gap”). Интенсивность характерных для инфракрасной области спектра источников теплового излучения здесь очень мала. В то же время одежда и отчасти ткани человеческого тела прозрачны для ТГц излучения, причем его воздействие на человеческий организм более мягкое, чем рентгеновское излучение. Дефектоскопия с помощью портативных ТГц излучателей обладает высоким разрешением и может быть выполнена в полевых условиях. Существующие в настоящее время системы ТГц излучателей не удовлетворяют требованиям к промышленно выпускаемым приборам [3]. Поэтому продолжается поиск новых материальных систем, принципов генерации и вывода ТГц излучения.

Таким образом, детекторы и излучатели для ИК и ТГц диапазонов на основе In-содержащих полупроводников необходимы для мониторинга загрязнений, медицинских целей, дефектоскопии, диагностики и антитеррористического контроля. Дальнейший прогресс в области их создания требует решения ряда задач:

- совершенствование методов роста и постростовой обработки для формирования ИК и ТГц диапазона структур и установления связи между технологией их изготовления и оптическими характеристиками;
- развитие возможностей методов постростовой обработки для создания элементов, предназначенных для эффективного вывода излучения;
- исследование механизмов излучения в среднем и дальнем ИК диапазонах и в области “терагерцовой брешки”.

Основная цель настоящего исследования заключается в исследовании возможностей постростовых технологий применительно к наноструктурам на основе In-содержащих соединений для ИК и ТГц спектральных диапазонов, а именно для формирования меза-структур светоизлучающих приборов и вывода излучения посредством применения специальных брэгговских элементов (фотонных кристаллов, брэгговских решеток). Достижение цели предполагает исследование механизмов излучения из квантовых точек и приповерхностных аккумуляционных слоев нанометровой толщины.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Показано, что существует возможность увеличения точности стандартной оптической фотолитографии при формировании структур на основе пниктогенидов In путем использования четырёхстадийной обработки с инвертированием топологического изображения в активных средах при специально подобранном температурном режиме.
2. Продемонстрировано, что двойные гетеровалентные лазерные гетероструктуры с активной областью, содержащей субмонослойные вставки InSb/InAs и использующие в

качестве *n*-эмиттера широкозонные соединения на основе Cd(Mg,Te)Se, изорешёточные к подложкам, обладает достаточным оптическим и электронным ограничениями для получения стимулированного излучения в среднем инфракрасном диапазоне.

3. Продемонстрировано, что совокупность применения травления мез с наклонными стенками, отражающих омических контактов и фотонных кристаллов на световыводящей поверхности, наряду с варьированием составами растворов травителей и инвертированием рисунка фоторезиста, позволяет повысить не менее чем вдвое эффективность средневолновых светодиодов и светодиодных линеек с активной областью на основе системы InGaAsSb.

4. Предложен и исследован новый механизм излучения с характерными частотами в терагерцовом диапазоне за счет поверхностных плазмон-поляритонов, которые возбуждаются при электрической накачке в аккумуляционных слоях вблизи поверхности In-содержащих вырожденных полупроводников и преобразуются в электромагнитное излучение при рассеянии на структурных неоднородностях, спонтанно формируемых или специально созданных ростовыми и постростовыми методами.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработана совокупность технологических приемов для формирования:

- мез травления заданного профиля для светоизлучающих структур на основе In-содержащих соединений с необходимыми геометрическими параметрами (минимальными размерами элементов, глубиной и размерами мез, глубиной травления рельефа, шагом периодических элементов и наклоном стенок);
- фотонных кристаллов и брэгговских решеток для вывода излучения светодиодов среднего ИК диапазона и терагерцовых излучателей;
- обычных и отражающих омических контактов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Четырёхстадийная обработка фоторезиста с инвертированием топологического изображения путём термообработки в активной (аммиачной) среде является прецизионным методом реализации рисунка для формирования полупроводниковых наноструктур с применением оптической фотолитографии с точностью, превышающей разрешение стандартной технологии.
2. Совокупность применения травлённых меза-структур с наклонными стенками, отражающих омических контактов и фотонных кристаллов на световыводящей поверхности, наряду с варьированием состава растворов травителей и инвертированием рисунка фоторезиста, позволяет повысить не менее чем вдвое

внешний квантовый выход светодиодов и светодиодных линеек среднего инфракрасного диапазона с активной областью на основе системы InGaAsSb.

3. Двойные гетеровалентные лазерные гетероструктуры с активной областью, состоящей из 3-х плоскостей субмонослойных вставок InSb/InAs и использующие в качестве *n*-эмиттера широкозонные соединения MgCdSe и CdSeTe, изорешёточные к подложкам InAs и GaSb, соответственно, обладает достаточным оптическим и электронным ограничениями для получения стимулированного излучения в диапазоне 3.1-3.9 микрон.
4. Поверхностные плазмон-поляритоны, возбуждаемые термически при электрической накачке в поверхностном аккумуляционном слое In-содержащих вырожденных полупроводников, преобразуются в электромагнитное излучение с характерными частотами в терагерцовом диапазоне при рассеянии на структурных неоднородностях, спонтанно формируемых или специально созданных ростовыми и постростовыми методами.

Апробация работы. Результаты, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в авторитетных реферируемых российских и международных журналах и докладывались на различных международных и российских конференциях и симпозиумах: 18 International Symposium “Nanostructures: Physics and Technology”, St. Petersburg, Russia, June 21 - June 26, 2010; SPIE Photonic and Photonic Crystals Materials and Devices X, San Francisco, USA, 2010; II симпозиум по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, Звенигород, Россия, 16-18 ноября 2009; SPIE Photonic and Photonic Crystals Materials and Devices IX, Strasbourg, France, 2009; VIII Российской конференции по физике полупроводников (Екатеринбург 2007); X Симпозиума "Нанопизика и наноэлектроника", Н.Новгород, Россия, (2006); VII российской конференции по физике полупроводников, Москва, Россия, 272 (2005); 5th Belarussian-Russian Workshop “Semiconductor lasers and systems”, 1–5 June, Minsk, Belarus, (2005).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 работ, список которых приведен в Заключение.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка цитируемой литературы, включающего 78 наименований. Общий объем диссертации составляет 112 страниц, включая 44 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель, научная новизна и практическая значимость работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава “Физические свойства и технология формирования наноструктур на основе In-содержащих соединений” представляет собой обзор наиболее важных свойств данных полупроводников и основных методов формирования наноструктур на их основе. Приводятся данные по различному приборному применению данных наноструктур.

§1.1 посвящен рассмотрению особенностей непараболочной зонной структуры соединений. Описываются проявления эффекта Бурштейна-Мосса в оптике. Анализируются характеристики прямозонных и непрямозонных оптических переходов.

§1.2 рассматривает особенности эпитаксиального роста слоев и наноструктур на основе In-содержащих полупроводников. Раздел 1.2.1 посвящен росту методом высокоточной молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) и методам диагностики *in-situ*. Проводится сравнение различных гетеропар. Детально обсуждаются структуры InSb/InAs, в которых реализуется гетеропереходы типа II с не перекрывающимися полностью запрещёнными зонами. Описаны перспективы использования гетеровалентных гетероструктур, сочетающих в себе III-V и II-VI соединения. Отмечается, что МПЭ рост нитрида индия имеет крайне узкий допустимый диапазон варьирования температуры и соотношения потоков. Выход за его пределы приводит к отклонению от стехиометрии. Характерной особенностью InN и ряда вырожденных In-содержащих полупроводников является аккумуляционный слой вблизи поверхности, в котором могут возбуждаться плазменные волны.

Раздел 1.2.2. посвящен In-содержащим гетероструктурам для светоизлучающих приборов средней ИК-области спектра Традиционным методом их получения является жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ), хотя ряд перспективных результатов был получен и с применением метода МПЭ. Обоснован выбор в качестве активной области для светодиодов средней ИК области спектра узкозонного твердого раствора InGaAsSb. Широкое применение светодиодов сдерживается невысокой эффективностью, что связано, в числе прочего, с низким коэффициентом вывода излучения из полупроводникового кристалла, имеющего показатель преломления примерно в три раза больший, чем у воздуха.

Одним из наиболее перспективных направлений для снижения потерь, связанных с полным внутренним отражением, является использование двумерных фотонных

кристаллов (ФК) [4]. Формирование двумерного периодического рельефа на световыводящей поверхности используется при создании светодиодов видимого и ближнего ИК диапазона, однако для средней ИК области спектра (3÷5 мкм) имеются лишь единичные работы, в которых исследования были ограничены, в основном, светодиодами с поверхностным рельефом, не создающим фотонных зон [5].

§1.3 рассматривает базовые принципы постростовой обработки сложных полупроводниковых структур, выполненных из слоёв твёрдых растворов разных составов, значительно отличающимися по своим химическим свойствам. Основой данного процесса является технология фотолитографии, которая варьируется в зависимости от поставленной задачи и типа изготавливаемых структур. Каждый этап фотолитографии зависит от физико-химических свойств подложки, активных слоёв, состояния поверхности и требует своих приемов нанесения и термообработки фоторезиста. При создании рисунка маленького размера (~1 мкм) для устранения нежелательных оптических эффектов - коллективной дифракции, дефокусировки и т.п. - применяют специальный комплекс мер.

Формирование рельефа осуществляется различными видами травления. Рассмотрены особенности методов мокрого и сухого ионно-лучевого и плазменного химического травления.

Для создания электродов и омических контактов используют методы термического напыления в вакууме и электронно-лучевого напыления. Часто контакты являются многослойными системами, содержащими адгезивный слой, контактный слой, барьерный слой и верхний проводящий слой. Для получения омических характеристик и уменьшения величины сопротивления проводят вжигание контактов и их усиление посредством электрохимического осаждения золота или серебра нужной толщины. Пассивирующие диэлектрические и просветляющие покрытия наносят, как правило, методами плазмохимического осаждения и реактивного магнетронного напыления.

Вторая глава “Постростовые методы формирования наноструктур с высокой точностью” посвящена основным приёмам создания приборов оптоэлектроники на основе соединений АЗ-В5. В ней приводятся результаты оригинальных исследований, позволивших увеличить точность и качество стандартной оптической литографии.

§2.1 рассматривает аспекты применения двух основных методов: прямой и взрывной фотолитографии. Взрывной метод фотолитографии является щадящим по отношению к поверхности верхнего слоя, поскольку требуемый материал наносится только на определённые топологические участки. Однако его реализация предъявляет особые требования к маске фоторезиста.

§2.2 посвящён методу инвертирования рисунка фоторезиста (*Image Reversal*), применяемого к формированию структур на основе соединений АЗ-В5 впервые в данной работе. Этот метод допускает использование фоторезистов разных марок с разной толщиной и чувствительностью, позволяя таким образом гибко менять параметры маски в зависимости от последующих технологических операций. «Переворачивание» рисунка фоторезиста осуществляется в 4 стадии: экспонирование плёнки фоторезиста через шаблон, обработка фоторезиста в среде аммиака при повышенной температуре, сплошное экспонирование по полю, проявление (Рис. 1).

При экспонировании участков плёнки фоторезиста через шаблон светочувствительный компонент нафтохинондиазид (НХД) в засвеченных областях превращается в инденкарбоновую кислоту, которая растворяется в щелочных растворах. После экспонирования образец подвергается термической обработке в среде аммиака. В этом процессе инденкарбоновая кислота вступает в реакцию с молекулами аммиака превращается в инден, который является ингибитором растворения в водных щелочных проявителях. Следующим этапом следует сплошное экспонирование (по полю, без шаблона) всей плёнки фоторезиста, при этом НХД в неэкспонированных до этого областях превращается в инденкарбоновую кислоту. Таким образом, при последующем проявлении в слабом щелочном растворе области, подвергнутые предварительно экспонированию через шаблон, не изменяются, а подвергнутые экспонированию по полю – проявляются, и изображение инвертируется или «переворачивается».

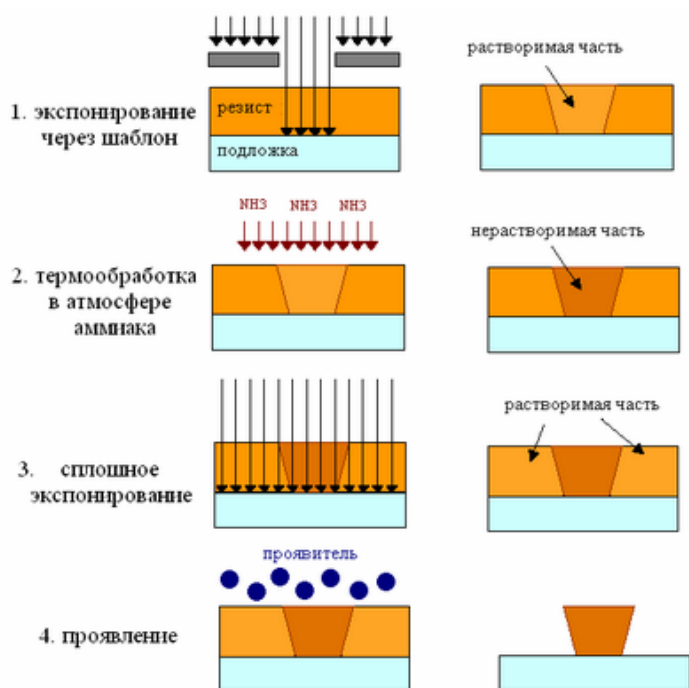


Рис. 1. Последовательность операций при «переворачивании» фоторезиста. (1) – экспонирование через шаблон; (2) – термообработка в атмосфере аммиака, при сшивке химических связей в экспонированной области эти участки фоторезиста становятся нерастворимыми в проявителе; (3) – сплошное экспонирование по полю, незасвеченные участки при экспонировании через шаблон становятся растворимыми в проявителе; (4) – проявление и конечный результат.

Варьирование параметров процесса «переворачивания» (температура и время обработки в среде аммиака, дозы экспонирования через шаблон и по полю, время и

концентрация проявителя) позволяют контролируемо изменять угол наклона боковой стенки (прямой, обратный, вертикальный) маски фоторезиста и получать ровные границы.

§2.3 рассматривает возможности эффективного использования маски фоторезиста со специальным обратным профилем для взрывной фотолитографии и электрохимического осаждения металлов.

§2.4 посвящен особенностям создания топологических элементов с размерами ~ 1 мкм методами стандартной оптической фотолитографии. В разделе 2.4.1 рассматриваются нежелательные оптические эффекты (дифракция, дефокусировка, стоячая волна, преломление излучения в фоторезисте), приводящие к искажению топологии рисунка (различного вида удвоения, перемычки), размытию профиля, уходу линейных размеров и утрате фиксированной толщины плёнки фоторезиста. В результате получение однородного массива элементов стандартными методами весьма затруднительно.

Использование технологии «переворачивания» фоторезиста позволяет создать качественную маску из фоторезиста. Поскольку коэффициент растворимости НХД - приблизительно 0.11 нм^{-1} , а коэффициент растворимости индена - приблизительно 0.01 нм^{-1} , т.е. значительно меньше, последний имеет более высокую стойкость к процессу проявления, что обеспечивает резкие границы рисунка и его высокую однородность по площади. Это позволяет значительно повысить разрешающую способность процесса фотолитографии и воспроизводимо создавать рисунки порядка 1 мкм (Рис. 2) в толстых слоях фоторезиста.

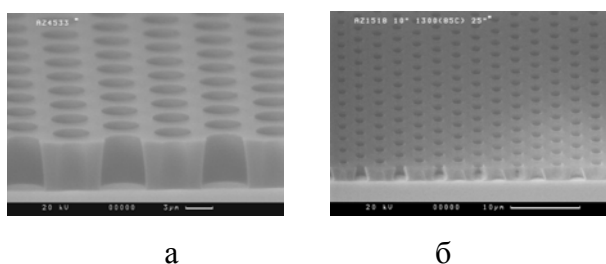


Рис. 2. Однородный массив элементов фотонного кристалла на поверхности подложки InAs. (а) фоторезист AZ 4533 толщиной 5.7 мкм, размер элемента $D=3.3$ мкм, (б) фоторезист AZ1518 толщиной 1.7 мкм, размер элемента $D=1.3$ мкм.

Данная технологии использовалась для создания однородных массивов гексагонально упакованных элементов фотонного кристалла на подложках InAs и InN с характерными размерами $0.5 \div 2$ мкм и шагом между элементами ~3 мкм.

В разделе 2.4.2 рассматривается метод сухого ионно-лучевого травления для формирования фотонных кристаллов и брэгговских решеток на подложках InAs и слоях InN. В случае одинаковых скоростей травления маски и подложки для получения

глубины травления материала на 2 мкм необходимая толщина фоторезиста должна была бы превышать 2,5 мкм. Точность формирования рисунка при таких толщинах невелика. Специальная подготовка маски фоторезиста и подбор режимов травления позволяет получить соотношение скоростей травления маски и материала подложки 1:3 и использовать меньшие толщины фоторезиста. Комбинированное задубливание – термостабилизация и фотостабилизация – позволяет зафиксировать полученный профиль и размеры маски и делает её более стойкой к травлению. После «сухого» травления маска фоторезиста удалялась в кислородной плазме. Продукты переосаждения материала в процессе травления удалялась механически по специальной методике с помощью химически стойкого лака. Основной рельеф при этом сохранялся (Рис. 3).

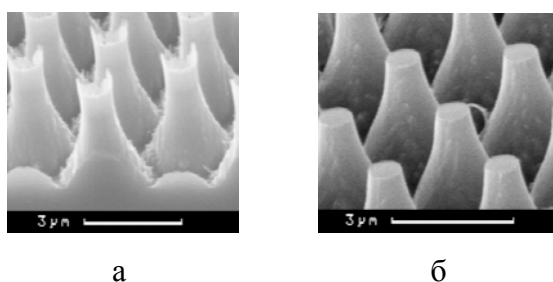


Рис. 3. Поверхность InAs после ионно-лучевого травления элементов фотонного кристалла с продуктами переосаждения (а) и после обработки с помощью ХСЛ (б).

Таким образом, на основе методов контактной оптической фотолитографии и ионно-лучевого травления была разработана технология создания массивов фотонных кристаллов и брэгговских решеток различной конфигурации.

§2.5 рассматривает особенности постростовой обработки структур с глубоким рельефом. Раздел 2.5.1 описывает способы решения проблемы проведения качественной фотолитографии по глубокому рельефу. При работе с меза-структурами или канавками глубиной более 10 мкм значимую роль начинают играть такие нежелательные эффекты как образование валиков, обрывов на углах, что приводит к появлению закороток, остаточных вуалей и искажению размеров. В связи с этим в данной работе предложена и разработана специальная методика работы по глубокому рельефу, включающая:

- использование многослойной маски из высококонтрастного фоторезиста со средней вязкостью;
- скругление углов мезы после травления;
- использование ступенчатой ИК-сушки для удаления остаточного растворителя из фоторезиста.

Раздел 2.5.2 рассматривает жидкостное химическое травление, приводятся результаты исследования и оптимизации данного процесса. Необходимость развития этого метода обусловлена созданием структур, состоящих из слоёв, обладающих разными

химическими свойствами, и высокими требованиями геометрии и качеством боковой поверхности задаваемого рельефа.

Для травления структур светодиодных линеек, в состав которых входит InAs и его твердые растворы разных составов (InGaAsSb, InAsSbP, InAsSb) нами был разработан травитель на основе H_2O_2 и HBr, который позволяет решить эту проблему при проведении травления на глубины от единиц до нескольких сотен микрон через маску фоторезиста. Он позволяет получать гладкий профиль мез с расширением в горизонтальной части для увеличения доли излучения, выводящегося через прозрачную подложку.

Закругление острых углов (рёбер) существенно облегчает дальнейшие технологические операции по работе с глубокой мезой и рисунком сложной топологии. Был проведён ряд экспериментов по скруглению углов мезы InGaAsSb/InAsSbP с использованием нескольких вариантов травителя на основе H_2O_2 и HBr, который позволяет проводить обработку структур уже со сформированным рельефом после снятия фоторезиста, поскольку предложенные составы травителя пассивны по отношению к металлам омического контакта.

§2.6 описывает оптимизацию режимов нанесения и формирования омических контактов к *n*- и *p*-GaSb и In-содержащим составам. Поскольку антимонид галлия является химически активным материалом, то непосредственно перед напылением предложено использовать сухую обработку контактного слоя пучком Ar на 200 Å. На светодиодных структурах *n*-InAs/InGaAsSb/*p*-InAsSbP для среднего ИК-диапазона к широкозонному окну *p*-InAsSbP был сделан контакт Cr/AuZn5%/Ni/Au с предварительной мокрой обработкой, тогда как контакт к подложке *n*⁺-InAs формировался после сухой обработки пучком Cr/Au/Ni/Au. Уточнены параметры режима вжигания контактов к различным структурам. Создание рисунка металлических контактов осуществлялось методами взрывной фотолитографии и вакуумного термического испарения. В случае светодиодов для уменьшения сопротивления и возможности распайки проводилось усиление контактов гальваническим осаждением Au толщиной 2 - 3 мкм.

§2.7 описывает особенности постростовой обработки гетеровалентных A3-B5/A2-B6 структур, состоящих из слоёв с очень сильно отличающимися физико-химическими свойствами. Для повышения качества рисунка в сопряженных слоях проводились два отдельных процесса травления, «сухим» и «мокрым» способами, с разными масками, для формирования ступенчатой мезы. В ходе проведённых исследований слои A2-B6 показали свою температурную нестабильность. Были предложены специальные меры по

защите поверхности для предотвращения их деградации при отжиге. В гетеровалентных лазерных структурах в качестве контакта к А2-В6 использовался In.

Третья глава “Наноструктуры для среднего ИК диапазона, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии” посвящена рассмотрению технологии изготовления и оптических свойств наноструктур, перспективных для оптоэлектроники среднего ИК диапазона.

§3.1 рассматривает наноструктуры InSb/InAs II типа с субмонослойными вставками InSb. В разделе 3.1.1 описывается МПЭ рост таких наноструктур на установке RIBER 32P. Активная область структуры состояла из слоя InAs толщиной 0.1 мкм с расположенной в центре одиночной субмонослойной вставкой (СМС) InSb или InSb/InAs многослойной вставкой, период которой варьировался от 6.5 до 11 нм в зависимости от образца. Вставка ограничивалась барьерами $Al_{0.2}In_{0.8}As$ с двух сторон. Верхний барьер прикрывался слоем InAs толщиной 10 нм. СМС InSb формировались посредством выдержки поверхности роста InAs в течение 20 сек под потоком Sb_4 за счёт реакции замещения атомов As атомами Sb [6]. Определяющим фактором данного процесса является температура подложки (T_p). Номинальная толщина InSb вставок увеличивалась с 0,6 до 1 монослоя с уменьшением T_p с 485°С до 430°С. Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показали хорошее структурное качество слоев со вставками InSb, а также сильное влияние температуры роста на морфологию вставок, которая менялась от образований типа квантовых точек до гладких напряженных слоев [1*].

В разделе 3.1.2 описывается методика измерения фотолюминесценции (ФЛ) и приводятся спектры ФЛ выращенных структур. Спектры ФЛ имеют два максимума. Слабо-изменяющийся максимум на 3.05 мкм соответствует краю поглощения InAs. Положение другого максимума изменяется от 3.4 мкм до 3.8 мкм как функция T_p . Этот пик относится к излучательной рекомбинации дырок локализованных на InSb СМС и электронов в окружающем InAs, связанных с дырками через кулоновское взаимодействие. Анализ температурной зависимости спектра InSb/InAs многослойной СМС показал, что InSb СМС можно рассматривать как массив электронно связанных КТ II типа [1*]. Спектральный диапазон ФЛ наноструктур InSb/InAs при комнатной температуре составляет 3.9-4.3 мкм. Интегральная интенсивность InSb ФЛ при 300 К в 15-20 раз меньше чем при 80 К. Такая слабая зависимость отражает достаточно глубокую локализацию дырок в слоях InSb и низкий уровень безызлучательной рекомбинации, что делает эти наноструктуры перспективными в качестве активной области лазеров среднего ИК диапазона.

§3.2 описывает наноструктуры InSb/InAsSb. Потенциальным преимуществом изменения матрицы является бóльшая энергия локализации носителей вследствие более глубокой потенциальной ямы и изменение длины волны в широких пределах (3-5 мкм) за счет размерного ограничения. Большое интегральное перекрытие волновых функций электронов и дырок приводит к возрастанию квантовой эффективности люминесценции при 300 К. Раздел 3.2.1 описывает особенности МПЭ квантовых точек InSb в матрице InAsSb с использованием выдерживания под потоком сурьмы для образования вставки InSb с номинальной толщиной $t \sim 1$ МС и последующем досаждении методом эпитаксии с повышенной миграцией (ЭПМ). Исследования морфологии таких СМС продемонстрировало самоформирование плотного массива КТ InSb, характерный латеральный размер которых составляет 2.5 ± 1.5 нм, а поверхностная плотность превышает значение 10^{12} см⁻². Найдено, что превышение критической толщины пластической релаксации ($t \sim 1.7$ МС) приводит к образованию дислокаций в островках и катастрофической деградации структурных и оптических свойств КТ InSb/InAs.

Спектры фотолюминесценции таких структур описаны в разделе 3.2.2. Наноструктуры с КТ продемонстрировали яркую ФЛ в диапазоне длин волн 3.4-4.5 мкм ($T=80$ К), причем при повышении температуры до 300 К интегральная интенсивность ФЛ из КТ уменьшилась менее чем в 20 раз. Использование матрицы InAsSb позволяет сдвинуть длину волны излучения в область 4.5-5 мкм при толщине вставки InSb менее 1 МС без снижения интенсивности ФЛ. В остальном ФЛ из этих структур напоминала излучение, связанное с непрямыми переходами из InSb/InAs наноструктур.

В §3.3 приводятся данные о получении стимулированного излучения из двойных гетеровалентных лазерных структур различного дизайна. Структуры с выращивались на 2-х установках МПЭ для роста соединений А3-В5 и А2-В6. Высокое качество интерфейса между А3-В5 и А2-В6 частями достигалось химической серной пассивацией для защиты поверхности при прерывании процесса в момент переноса в другую ростовую камеру. Исследование электролюминесценции из четырёхсклоотых образцах с омическими контактами показало что она, как и ФЛ, соответствует излучательным переходам в КТ II типа. [2*]

Структуры инжекционных лазеров на основе двойной гетеровалентной гетероструктуры AlGaAsSb/InAs/MgCdSe с активной областью, состоящей из 3-х плоскостей 0.8 МС-InSb/InAs-КТ, разделённых барьерами InAs толщиной 20 нм, были выращены также на подложках InAs. Использование в качестве *n*-эмиттера широкозонного соединения MgCdSe, изорешётчатого к InAs при содержании Mg 10%, позволяет обеспечить достаточное ограничение дырок в InAs. Большая разница

показателей преломления ($n_{\text{InAs}}=3.4$, $n_{\text{CdSe}}=2.55$) обуславливает сильное оптическое ограничение в подобной структуре. В структуре AlGaAsSb/InAs/MgCdSe диода была получена лазерная генерация в импульсном режиме (150 нс, 3.2 кГц) при температуре 60 К с пороговой плотностью тока $J_{\text{пор}} \sim 3.5 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$ и длиной волны $\lambda = 3.075 \text{ мкм}$ (Рис.4).

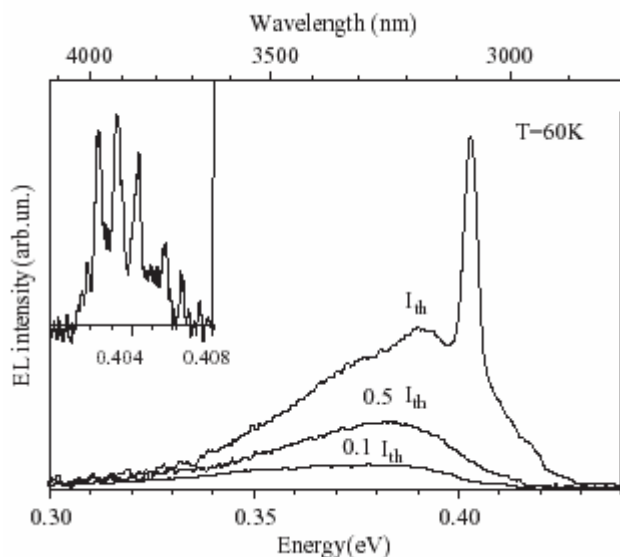


Рис. 4. Низкотемпературные (60 К) спектры ЭЛ гибридной лазерной гетероструктуры при разных токах инжекции. Вставка отображает многомодовый спектр лазерной генерации [2*].

Гетеровалентные структуры A3-B5/A2-B6 лазерных диодов были выращены также на подложках p-GaSb. В качестве n-эмиттера использовался твёрдый раствор $\text{CdSe}_{0.96}\text{Te}_{0.04}$, изорешеточный к GaSb. Для увеличения длины волны генерации была использована активная область, представляющая собой три одиночных вставки квантовых точек (1MC-InSb) или же три сверхрешётки $(0.8 \text{ MC-InSb} / 2 \text{ нм InAsSb})_3$, разделённых барьерами 15-20 нм InAsSb. Оба типа структур продемонстрировали лазерную генерацию в импульсном режиме (200 нс, 3.2 кГц) при 77К. Длина волны генерации составила $\lambda = 3.86 \text{ мкм}$ при $J_{\text{пор}} \sim 2 \text{ кА} \cdot \text{см}^{-2}$. Преимущества по оптическому и электронному ограничению, наряду с легкостью n-легирования верхнего эмиттера, определяют перспективность исследования таких структур для создания излучателей среднего ИК диапазона.

Четвертая глава “Светодиоды и светодиодные линейки для среднего инфракрасного диапазона спектра с фотонным кристаллом” описывает результаты создания двумерных фотонных кристаллов для вывода излучения из светодиодных структур.

В §4.1 выводятся оптимальные геометрические характеристики фотонных кристаллов для ИК диапазона. Выбранный для исследования гексагональный тип решётки является промежуточным случаем между анизотропным и изотропным выводами излучения [7]. Существующие расчетные методики позволяют получить соотношения между длиной волны излучения λ_0 , коэффициентом преломления,

периодом решетки (a), диаметром элемента решетки (D), коэффициентом заполнения (f) и глубиной полученного рельефа (d). Анализ уравнений Брэгга для дифракции излучения первого порядка в изотропном приближении [8] позволяет определить соотношение для оптимальной постоянной решётки ФК как $1 < \lambda_0/a < n$. Оптимальное значение λ_0/a зависит от соотношения d/λ : чем больше d/λ , тем меньше значение λ_0/a . Как правило, $D/a=0.5-0.7$ соответствует эффективной дифракции мод излучения [16]. В данной работе были выбраны глубины, примерно в 2 раза превышающие длину волны излучения в полупроводнике. Для СД средней ИК области спектра (при $a \sim 3 \mu\text{м}$, $\lambda_0 \sim 3.6 \mu\text{м}$ и $n \sim 3.5$) получены следующие соотношения: $a/\lambda_0=0.83$; $D/a=0.7$; $f=0.44$; $d/\lambda = 1.9$.

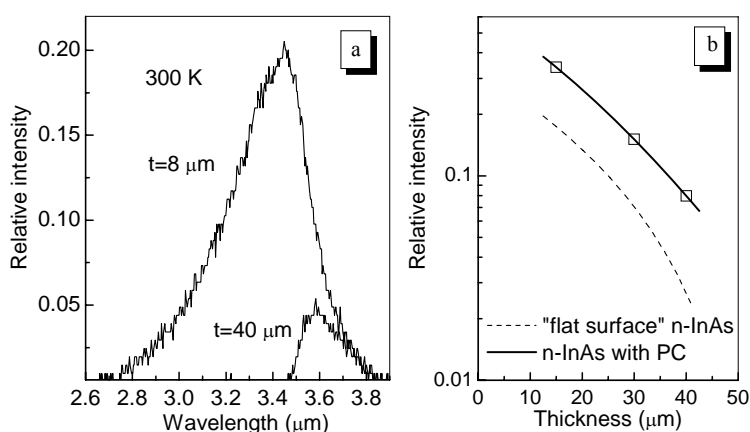


Рис. 5. (а) Спектры ФЛ плоскопараллельной пластины InAs с ФК при накачке лазером ($\lambda=1.3 \mu\text{м}$) со стороны поверхности, свободной от микрорельефа; (б) зависимость интенсивности фотолюминесценции от толщины пластины в геометрии на просвет для образцов с ФК на излучающей поверхности и без него [3*].

§4.2 описывает свойства фотонных кристаллов в составе светодиодных структур. Исследуемые образцы представляли собой плоскопараллельные пластины n-InAs (111) и эпитаксиальные структуры $n^0\text{-InAs}/n^+\text{-InAs}$ (111), в которых на поверхности был сформирован рельеф, состоящий из гексагонально упакованных элементов (пирамид или ямок) с $D=0.5 \div 2 \mu\text{м}$ и $a \sim 3 \mu\text{м}$. Спектры люминесценции и отражения измерялись при комнатной температуре; угол сбора излучения составлял ~ 30 угл. град. Измерение отражения структур с фотонным кристаллом на поверхности $n^+\text{-InAs}$ показало наличие стоп-зоны (резкого падения отражения) в диапазоне 2.2-3.7 мкм. Создание периодического рельефа увеличивает интенсивность люминесценции в геометрии на просвет приблизительно в два раза по сравнению с «плоскими» образцами (Рис. 5).

§4.3 посвящен свойствам фотонных кристаллов в светодиодах с электрической накачкой, которые исследовались на примере диодных однорядных линеек 1×4 на основе гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP с индивидуальной адресацией, излучающих на длине волны $\lambda=3.6-3.7 \mu\text{м}$ [4*]. Создание однородных массивов таких линеек, описанное в разделе 4.3.1, проводилось по технологии, приведенной в Главе 2. Исследования, проведенные с помощью инфракрасного микроскопа (раздел 4.3.2), показали, что

излучение элементов линейки достаточно однородно по поверхности [5*]. Из количественного анализа распределения излучения в ближнем поле в линейках двух типов с одинаковой глубиной травления (~10 мкм), но с существенно различающимися поперечными размерами мез (70x70 мкм и 130x130 мкм), можно заключить, что излучающие элементы с наибольшим значением отношения глубины мезы к её поперечному размеру имеют при прочих равных условиях более высокий коэффициент преобразования излучения. Наклонные боковые стенки мезы в разработанных линейках перенаправляли излучение, первоначально выходящее из активной области диода под углами, большим угла полного внутреннего отражения, увеличивая коэффициент преобразования. Увеличению интенсивности направленного излучения способствовали также отражающие контакты.

Характеристики диодных линеек с фотонными кристаллами приведены в §4.4. Анализ спектров излучения СД подтверждает несущественность влияния теплового разогрева на характеристики диода, поскольку положение максимума электролюминесценции не зависило от тока. Более того, при низких температурах имел место динамический эффект Бурштейна-Мосса, поскольку спектр смещался в коротковолновую область при увеличении тока. Спектры отражения четко обозначают наличие периодической структуры на поверхности InAs, так как содержат минимумы, отсутствующие в образцах без ФК. Влияние дифракции на излучательные характеристики СД можно обнаружить также и в картине дальнего поля излучения (на поверхности Si экрана, находящегося от СД на расстоянии 150 мкм).

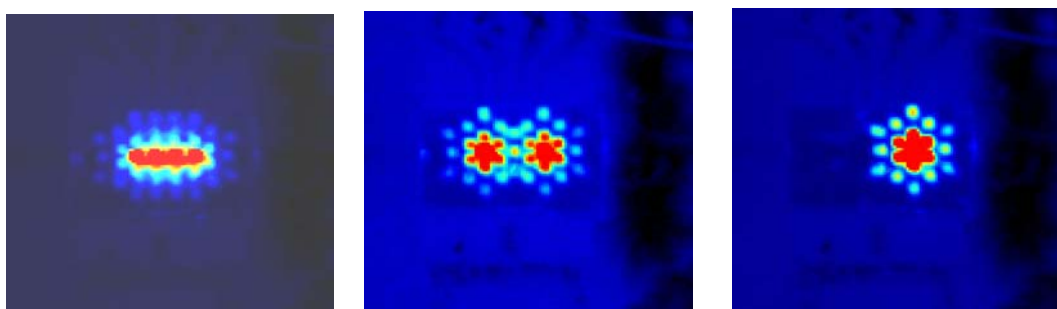


Рис. 6. Изображения светодиодной линейки с 4-мя, 2-мя и одним включенным элементами [6*].

Созданная конструкция предполагает возможность поочередного и независимого подключения элементов линейки к источнику питания; включением различных комбинаций элементов светодиодной линейки можно получить различные картины перекрытия дифракционных рисунков, как показано на Рис. 6. Источники обладают устойчивой картиной распределения интенсивности по поверхности, связанной с выполнением дифракционных условий. Можно предположить, что линейки,

аналогичные представленным в данном разделе, могут найти применение в фотоприёмных системах, работающих в средней ИК области спектра.

Пятая глава “In-содержащие соединения и структуры для терагерцового диапазона” посвящена исследованию возможности получения ТГц излучения из тонких слоев вырожденных полупроводников со случайной или специально созданной брэгговской решеткой.

§5.1 рассматривает основные моменты, касающиеся дисперсии поверхностных плазмонов и условий их излучения в терагерцовом диапазоне. Отмечается, что в металлах характерные частоты поверхностных плазмонов лежат в видимом диапазоне, тогда как в полупроводниках эти частоты могут оказаться в ИК или ТГц диапазоне в зависимости от концентрации носителей и диэлектрической проницаемости материала. Заполнение плазменных состояний может осуществляться термически посредством повышения электронной температуры [9].

Дисперсия поверхностных плазмонов, возбуждаемых в тонких слоях, характеризуется корневой зависимостью от волнового вектора q [10]. Причем на одной и той же частоте волновой вектор плазмона всегда больше волнового вектора света и связь плазменного возбуждения с электромагнитным излучением невозможна, т.е. плазмон не может превращаться в излучение. Однако эта связь реализуется при передаче избыточного момента брэгговской решетке, которая может быть периодической или почти случайной. Дизайн решетки может быть подобран таким образом, чтобы обеспечивать взаимодействие на определенных частотах. Однако для поддержания поверхностных плазменных волн и обеспечения их связи с электромагнитным полем тонкий слой толщиной d должен быть не только меньше длины волны излучения, но и удовлетворять одновременно условиям $[qd, qa] \ll 1$, где a – характерный период решетки.

§5.2 описывает взаимодействие плазмонов с электромагнитным излучением на случайных и специально сформированных периодических структурах. Передача избыточного импульса брэгговской решётке осуществляется при выполнении условия:

$$k_{\parallel} = k_0 \sin \theta = q \pm 2\pi m / a. \quad (1)$$

где k_{\parallel} - волновой вектор света в плоскости слоя, θ - угол регистрации, $m = 1, 2, \dots$ – целое число. Для оценки возможности такого взаимодействия со структурными дефектами в слоях InN был проведен расчет дисперсии плазмонов с использованием трехслойной модели. Дисперсия плазмонов определялась уравнением [11]:

$$\tanh(S_2 d) = -\varepsilon_2 S_2 (\varepsilon_1 S_3 + \varepsilon_3 S_1) / (\varepsilon_1 \varepsilon_3 S_2^2 + \varepsilon_2^2 S_1 S_3), \quad (2)$$

где $i=1,2,3$ и $S_i^2 = q^2 - \varepsilon_i k_0^2$. При этом полагалось, что металлоподобный слой расположен между вакуумом и остальной частью структуры, которая имеет меньшую концентрацию носителей заряда при прочих равных параметрах. Диэлектрическая проницаемость ε_i принималась постоянной для окружающих сред (вакуума и остальной части структуры). В металлоподобном слое она определялась на основе модели Друде.

В случайных брэгговских решетках, соответствующих типичным дефектам в InN, характеристический период примерно равен размеру нанокколонок (0.15-1.5 микрон). Сопоставление соответствующих волновых векторов с рассчитанными кривыми дисперсии с показывают, что толщина плазмонного слоя, d , должна быть мала, в пределах 5-30 нм, для обеспечения условий поддержания плазмон-поляритонных мод. Только в этом случае наблюдается пересечение дисперсионных кривых характерными волновыми векторами брэгговской решетки и, соответственно, излучение в диапазоне 2-10 ТГц, где оно и наблюдалось экспериментально. В качестве такого сверхтонкого слоя может выступать приповерхностный слой аккумулирующий электроны. Его существование в InN было подтверждено различными методами [12,13].

§5.3 приводит основные характеристики исследуемых слоев InN, выращенных методом МПЭ с плазменной активацией. Толщина образцов варьировалась от 1 до 3 мкм. Анализ снимков, полученных методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показал, что морфология этих слоёв InN изобилует различными структурными несовершенствами: наноколоннами, канавками между ними и порами, окруженными преципитатами In (Рис. 7).

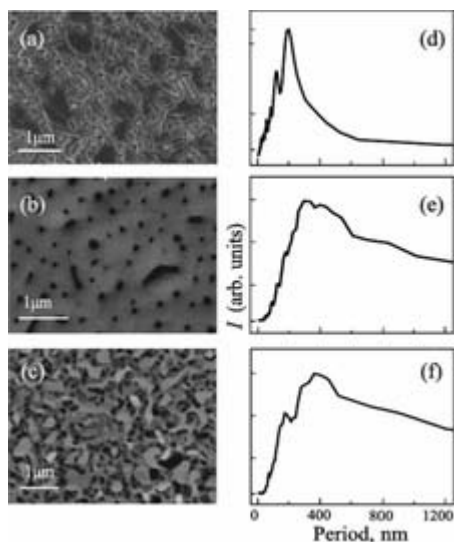


Рис. 7. (a), (b) и (c) - СЭМ изображения образцов со слоями InN, (d), (e) и (f) показывают распределение среднего расстояния между неоднородностями на этих образцах, соответственно [7*].

Все слои имели n-тип проводимости, холловская концентрация носителей в основных слоях была порядка $\sim(1-5) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, тогда как в приповерхностных слоях она достигала $(1-2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Преобразование Фурье полученных СЭМ снимков даёт статистическое распределение расстояния между наблюдаемыми неоднородностями

(случайного периода). Образцы характеризуются различной степенью периодичности, которую можно охарактеризовать шириной распределения случайного периода.

§5.4 рассматривает особенности спектральных характеристик терагерцового излучения в слоях InN. Приводится описание методики измерения спектров ТГц электролюминесценции (ЭЛ) при накачке электрическими импульсами, а также условий измерения мощностных зависимостей. Отмечается, что интенсивность излучения сильно зависит от степени периодичности (максимальна в образце А). Спектр излучения имеет сложную форму с несколькими пиками, положение которых варьируется от образца к образцу. Это согласуется с механизмом излучения за счет поверхностных плазмонов, при котором частота излучения зависит от концентрации электронов в плазмонном слое и наиболее выраженного среднего периода решетки.

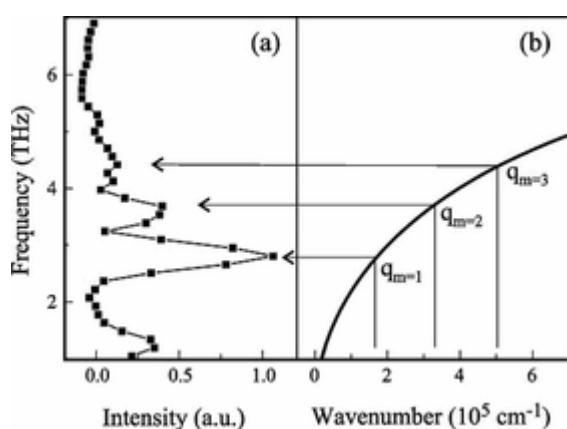


Рис. 8. (а) - спектр ТГц излучения образца с $a \sim 0.4$ мкм, (b) – дисперсия плазмонов, вычисленная для металлоподобного слоя с $N \sim 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ InN толщиной $d = 7$ нм [8*].

На Рис. 8 представлен спектр терагерцовой ЭЛ, зарегистрированный из образца со средним периодом $a \sim 0.4$ мкм с несколькими пиками, связанными с рассеянием более высоких порядков. Линии, проведенные из максимумов спектра ЭЛ до пересечения с кривой дисперсии, хорошо согласуются со значениями, вычисленными согласно условию (2) при $m=1, 2, 3$. Как правило, спонтанно сформированная периодическая структура (решётка) и, следовательно, спектр ТГц излучения имеют более сложную форму, чем показано на Рис. 8. Изменение периода вдоль слоя ведёт к образованию дополнительных пиков. Тем не менее, эти спектры могут быть также смоделированы, с использованием так называемого структурного фактора случайной решетки (статистики распределения волновых векторов) [13].

§5.5 рассматривает особенности мощностных характеристик ТГц излучения из слоев InN. Отмечается, что зарегистрированная мощность при плазмонном механизме оказалась выше величины, оцененной из средней электронной температуры равновесного электронного газа. Это может быть связано как с высокой скоростью опорожнения и заполнения плазмонных состояний, так и с локальным перегревом структуры.

Сравнение зависимостей интенсивности интегральной ТГц электролюминесценции от приложенной электрической мощности в структурах на основе InN, *n*-GaN эпитаксиальных слоев и *n*-GaAs/AlGaAs структур с квантовыми ямами, измеренных при одинаковых условиях, показало, что при высоких уровнях мощности накачки P_{el} излучение из InN становится более интенсивным вследствие степенного закона роста мощности излучения пропорционального $P_{el}^{1.3}$. Максимальное зарегистрированное значение интегральной интенсивности при этих исследованиях составляло ~ 0.03 мВт/см² (в области чувствительности Ge:Ga фотодетектора).

§5.6 рассматривает способы создания периодической структуры на поверхности слоев вырожденных полупроводников. Ряд узкозонных полупроводников (InAs, InSb), помимо InN, обладает поверхностным слоем, аккумулирующим электроны. Слои этих полупроводников, выращенные методом МПЭ, обладают высоким структурным качеством и высокой подвижностью носителей. Однако крайне низкая плотность дефектов в этих полупроводниках не может обеспечить эффективного рассеяния плазмон-поляритонов. Для намеренного формирования регулярных брэгговских решеток использовались два метода: 1) постростовая обработка слоев с применением фотолитографии; 2) МПЭ селективный рост на профилированных подложках.

Для создания периодического рельефа применялся метод стандартной контактной оптической фотолитографии с использованием ионно-лучевого травления на установке TECHNICS MIM TLA-20 пучком Ar. Фоторезистивная маска для травления рельефа была сформирована с помощью технологии переворачивания фоторезиста (см. Главу 2). Оба типа структур на основе InN демонстрировали ЭЛ в диапазоне 2-5 ТГц. Однако ее интенсивность была существенно слабее, чем у обычных слоев. Это отчасти определялось уменьшением активной площади. Кроме того, при ионном травлении происходило некоторое ухудшение поверхностных свойств, приводящее к подавлению плазменных мод. Тем не менее, в результате исследований продемонстрирована возможность создания регулярных брэгговских решеток на поверхности вырожденных полупроводников.

В Заключение приводятся основные результаты диссертационной работы:

1. Выполнен цикл работ по исследованию постростовых методов формирования светоизлучающих наноструктур с брэгговскими элементами на основе In-содержащих соединений АЗ-В5. Разработан оригинальный метод повышения точности и воспроизводимости рисунка на большой площади при использовании стандартной оптической литографии путем инвертирования маски фоторезиста.

2. Определены оптимальные режимы жидкостного и сухого (ионно-плазменного) травления и подобраны материальные компоненты (фоторезисты, маски, растворы). Показано, что варьирование составами растворов травителей является эффективным методом получения структур с необходимыми геометрическими параметрами. Подобраны металлы для контактов и отлажен процесс их формирования.
3. Исследована взаимосвязь структурных и оптических характеристик в гетеровалентных лазерных структурах с двойным ограничением и субмонослойными наноструктурами InSb/In(Sb)As в активной области. Показана возможность достижения оптического и электронного ограничения для получения стимулированного излучения в области среднего ИК диапазона.
4. Проведен цикл работ по созданию и исследованию фотонных кристаллов постростовыми методами на световыводящей поверхности светодиодов и светодиодных линеек. Продемонстрировано существование стоп-зон в спектрах отражения и увеличении внешнего квантового выхода люминесценции со стороны профилированной подложки не менее чем в два раза по сравнению с плоской поверхностью.
5. Обоснован дизайн светодиодов и светодиодных линеек ИК диапазона с активной областью на основе системы InGaAsSb, основанный на использовании мез травления с наклонными стенками, отражающих омических контактов и фотонных кристаллов для вывода излучения. Созданы прототипы линеек с индивидуальной адресацией на основе гетероструктур InGaAsSb/InAsSbP, излучающих на длине волны $\lambda=3.6-3.7$ мкм.
6. Предложен и исследован новый механизм ТГц излучения при электрической накачке из In-содержащих вырожденных полупроводников, обладающих аккумуляционным слоем. Показано, что источником ТГц излучения являются поверхностные плазмоны, возбуждаемые в тонких слоях и рассеиваемые случайной или регулярной брэгговской решеткой, в том числе созданной с помощью усовершенствованных постростовых методов.

Основные результаты диссертационной работы изложены в публикациях:

- 1*. S.V. Ivanov, A.N. Semenov, V.A. Solov'ev, O.G. Lyublinskaya, Ya.V. Terent'ev, B.Ya. Meltser, L.G. Prokopova, A.A. Sitnikova, A.A. Usikova, A.A. Toropov, P.S. Kop'ev, Molecular beam epitaxy of type II InSb/InAs nanostructures with InSb sub-monolayers, J. Cryst. Growth 278(1) 72-77 (2005).
- 2*. С.В. Иванов, В.А. Соловьев, А.Н. Семенов, Б.Я. Мельцер, С.В. Сорокин, О.Г. Люблинская, Я.В. Терентьев, А.А. Усикова, Т.В. Львова, П.С. Копьев, Наноструктуры InSb/InAsSb для оптоэлектроники среднего ИК-диапазона, Изв. РАН, сер. физ., 71(1) 85–88 (2007).
- 3*. Ю.М. Задиранов, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, Светодиоды ($\lambda=3.6$ мкм) с оптическим

возбуждением на основе фотонных кристаллов в арсениде индия, Письма в ЖТФ 34(10), 405-407 (2008).

4*. А.Л. Закгейм, Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, А.А. Усикова, А.Е. Черняков, Светоизлучающая диодная линейка ($\lambda=3.7$ мкм) на основе InGaAsSb, ФТП 43(4) 508-513 (2009).

5*. А. Л. Закгейм, Н. В. Зотова, Н. Д. Ильинская, С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, Н. М. Стусь, А. А. Усикова, А. Е. Черняков, ИК-изображения флип-чип-диодов на основе InAsSbP в спектральной области 3 мкм Прикладная физика 6, 143-148 (2008).

6*. B. A. Matveev, Yu. M. Zadiranov, A. L. Zakheim, N. D. Il'inskaya, S. A. Karandashev, M. A. Remennyi, N. M. Stus', A. A. Usikova, A. E. Chernyakov. InGaAsSb LEDs and arrays ($\lambda = 3.7 \mu\text{m}$) with photonic crystals, Photonic and Photonic Crystals Materials and Devices X, Proc. SPIE, v.7609, 1, pp. 76090I-1, 2010.

7*. T. V. Shubina, A. V. Andrianov, A. O. Zakhar'in, V. N. Jmerik, I. P. Soshnikov, T. A. Komissarova, A. A. Usikova, P. S. Kop'ev, S. V. Ivanov, V. A. Shalygin, A. N. Sofronov, D. A. Firsov, L. E. Vorob'ev, N. A. Gippius, J. Leymarie, X. Wang, A. Yoshikawa, Terahertz electroluminescence of surface plasmons from nanostructured InN layers. Appl. Phys. Lett., 96, 183106 (2010).

8*. T.V. Shubina, A.V. Andrianov, V.A. Shalygin, N.A. Gippius, A.O. Zakhar'in, V.N. Jmerik, I.P. Soshnikov, T.A. Komissarova, A.A. Usikova, A.N. Sofronov, D.A. Firsov, L.E. Vorob'ev, J. Leymarie, X. Wang, A. Yoshikawa, P.S. Kop'ev, and S.V. Ivanov, Terahertz electroluminescence of surface plasmon-polaritons from nanostructured InN, Proceedings of 18 Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology", June 21 - June 26, St. Petersburg, Russia, 69 (2010).

Список цитируемой литературы

- [1] D. Bimberg, N.N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorf, V.M. Ustinov, P.S. Kop'ev, M.V. Maximov, Zh.I. Alferov. Optical Properties and Lasing in Self-Organised Quantum Dots in Optics of Quantum Dots and Wires, ed. Garnett W. Bryant and Glenn S. Solomon (Artech House, Boston/London, 2005).
- [2] А. А. Андронов, Н. Г. Захаров, А. В. Маругин, А. П. Савикин Новые источники и приемники ИК и терагерцового диапазона. Нижний Новгород, 2007.
- [3] M. Tonouchi, Nature Photonics 1, 97 (2007).
- [4] H. Ichikawa, T. Baba., Appl. Phys. Lett., Volume 84, Issue 4, pp. 457-459 (2004)
- [5] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь., ФТП, 42, 641 (2008)
- [6] F. Hatami, et al., Appl. Phys. Lett. 67, 656 (1995)
- [7] Buss I. J., Nash G. R., Rarity J. G., and Cryan M. J., J. Opt. Soc. Am. B 25, 810–817 (2008).
- [8] Ruyopoulos S., J. Opt. Soc. Am. A 22, 2859-2871 (2005)
- [9] R.A. Hopfel et al., Phys. Rev. Lett. 49, 1667 (1982).
- [10] R.H. Ritchie, Phys. Rev. 106, 874 (1957); F. Stern, Phys. Rev. Lett. 18, 546 (1967).
- [11] J. J. Burke, G. I. Stegeman, and T. Tamir, Phys. Rev. B 33, 5186 (1986).
- [12] I. Mahboob, T. D. Veal, C. F. McConville, H. Lu, and W. J. Scha@, Phys. Rev. Lett. 92, 036804 (2004).
- [13] T.V. Shubina, N.A. Gippius, V.A. Shalygin, A.V. Andrianov, and S.V. Ivanov, Phys. Rev. B 83, 165312 (2011).