

На правах рукописи



СЕРЕБРЕННИКОВА Ольга Юрьевна

**Создание и исследование оптоэлектронных приборов в средней инфракрасной области спектра на основе узкозонных гетероструктур  $A^3B^5$**

Специальность: 01.04.10 — физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Физико-техническом Институте им. А.Ф. Иоффе

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, проф., **Ю.П. Яковлев**  
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе)

Официальные оппоненты: доктор физ.-мат. наук, проф., **В.Г. Сидоров**  
(ГОУ высшего профессионального образования  
«Санкт-Петербургский Государственный  
Политехнический Университет»)

доктор тех. наук, проф., **Е.И. Теруков**  
(Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе)

Ведущая организация: Санкт-Петербургский Государственный  
Электротехнический Университет  
«ЛЭТИ» им.В.И. Ульянова-Ленина

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012г в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д-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 библиотеке Физико-технического Института им. А.Ф. Иоффе

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012г

Ученый секретарь диссертационного  
совета Д-002.205.02  
доктор физ.-мат. наук, проф.



**Л.М. Сорокин**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Оптоэлектронные приборы (светодиоды, фотодиоды, лазеры) в средней ИК-области спектра 1.6 – 5.0 мкм являются перспективными для науки и техники, экологического мониторинга окружающей среды и медицинской диагностики. В этом спектральном диапазоне находятся основные линии поглощения многих промышленных и природных газов и жидкостей [1], таких как CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O и др., что открывает широкие перспективы для создания оптических анализаторов газов и жидкостей. Перспективными материалами для изготовления таких устройств являются узкозонные твёрдые растворы полупроводников A<sup>3</sup>B<sup>5</sup>, изопериодичные с подложками GaSb и InAs.

Конструкция оптоэлектронного прибора оказывает большое влияние на физические параметры, поэтому разработка новых, более эффективных конструкций приборов, а также разработка технологии их создания, является важнейшей задачей инфракрасной оптоэлектроники. Важную роль в разработке оптоэлектронных приборов играет постростовая обработка гетероструктур, выращенных эпитаксиальными методами. Постростовая обработка гетероструктур позволяет создавать оптоэлектронные приборы различной формы (мезаструктуры плоской и выпуклой формы, мезаполоски, диски, флип-чип и др.), применяемые в современной оптоэлектронике. Для создания оптоэлектронных приборов различной формы, как правило, используется «жидкостное» химическое травление. Химическое травление многослойных структур, состоящих из разнородных по составу материалов, имеет существенные ограничения, вызванные сильным различием химических свойств материалов. Поэтому возникает острая потребность в разработке новых методов химического травления, которые позволили бы формировать необходимые профили и конфигурации мезаструктур. Требования к методам постростовой обработки так же различны, как и конфигурации и формы приборов, создаваемые для различных целей. Электролюминесцентные и фотоэлектрические свойства оптоэлектронных приборов существенно зависят от формы и конфигурации созданных приборов.

**Цель работы.** Создание новых конструкций оптоэлектронных приборов для средней ИК-области спектра на основе эпитаксиальных гетероструктур GaSb и InAs и исследование влияния формы приборов на их электролюминесцентные и фотоэлектрические свойства.

### **Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:**

1. Разработка принципиально новых методов постростовой обработки эпитаксиальных гетероструктур, как с целью создания нового типа полупроводникового лазера, так и для существенного улучшения электролюминесцентных характеристик светодиодов и фотоэлектрических характеристик фотодиодов для средней ИК-области спектра;
2. Исследование влияния формы оптоэлектронного прибора на внешний оптический выход излучения лазеров и светодиодов;
3. Исследование влияния конфигурации фотодиодного чипа на быстродействие и эффективность фотодиодов, работающих в средней ИК-области спектра.

### **Научная новизна результатов, полученных в работе состоит в следующем:**

- Предложены и разработаны методики постростовой обработки многослойных гетероструктур соединений InAs/InAsSb для создания высокоэффективных светодиодов с диффузно-рассеивающим рельефом на световыводящей поверхности, в которых достигается увеличение внешнего квантового выхода излучения, что позволяет увеличить внешнюю квантовую эффективность;
- Предложены и разработаны методики постростовой обработки многослойных гетероструктур соединений  $A^3B^5$  на основе гетероструктуры InAs/InAsSb для создания фотодиодов с малой площадью кольцевой мезы относительно площади светопоглощающей поверхности диода и отражающим рельефом на тыльной стороне структуры, что позволяет увеличить квантовую эффективность прибора;
- Предложены и разработаны методики постростовой обработки многослойных гетероструктур узкозонных соединений  $A^3B^5$  на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для создания p-i-n-фотодиодов мостиковой конструкции для диапазона 1.2-2.4 мкм, что позволяет увеличить быстродействие;
- Предложены и разработаны методики постростовой обработки соединений  $A^3B^5$  на основе квантоворазмерной гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb/GaInAsSb для создания как одиночных, так и связанных дисковых лазеров, работающих на модах шепчущей галереи (WGM-лазеров);
- По итогам проведенных в работе исследований созданы опытные образцы светодиодов, быстродействующих фотодиодов и связанных WGM-лазеров.

### **Научная и практическая значимость работы:**

Разработаны новые методы постростовой обработки, пригодные как для улучшения, так и для создания принципиально новых приборов инфракрасной оптоэлектроники: светодиодов, фотоприемников и лазеров на основе узкозонных материалов InAs и GaSb. На основе разработанных технологических методик созданы быстродействующие фотодиоды, WGM-лазеры с повышенной добротностью и светодиоды с повышенной квантовой эффективностью.

### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. В светодиодах на основе гетеропереходов в системе InAs/InAsSb с созданным диффузно-рассеивающим рельефом на световыводящей поверхности происходит увеличение внешнего квантового выхода излучения за счет изменения направления световых потоков в кристалле при многократных отражениях от диффузно-рассеивающей поверхности.

2. В фотодиодах на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, в которых область поглощения излучения и область омического контакта разделены воздушным контактным мостиком, достигается максимальное быстродействие за счет уменьшения емкости всего прибора.

3. В фотодиодах на основе гетероструктуры InAs/InAsSb с малой площадью кольцевой мезы относительно светопоглощающей площади диода и отражающим рельефом на тыльной стороне структуры в виде криволинейных поверхностей, состоящих из вытравленных полусфер, достигается увеличение квантовой эффективности за счет изменения направления световых потоков в кристалле при многократных отражениях света от криволинейных поверхностей фотодиодной структуры с последующим поглощением света в активной области.

4. В оптически связанных дисковых лазерах на основе квантоворазмерной гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb, работающих на модах шепчущей галереи (WGM-лазерах), с резонаторами, находящимися друг от друга на расстоянии порядка длины волны излучения, за счет оптической связи двух колебательных систем, возникает одночастотная генерация при подаче положительного смещения одновременно на оба лазера.

**Личный вклад автора:** Вклад диссертанта состоит в том, что О.Ю.Серебрянниковой была разработана технология постростовой обработки кристаллов и гетероструктур на основе узкозонных полупроводниковых соединений  $A^3B^5$  для создания светодиодов, фотоприемников и лазеров. Диссертантом были проведены экспериментальные исследования различных этапов постростовой технологии, по результатам которых были созданы опытные партии оптоэлектронных приборов (светодиодов, фотоприемников и WGM-лазеров различных конфигураций). Были проведены экспериментальные исследования электролюминесценции и фотоэлектрических свойств приборов, а также дана интерпретация результатов и формулировка выводов.

**Апробация работы.** Результаты работы опубликованы в авторитетных реферируемых журналах и докладывались на различных конференциях. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XI Всероссийской молодежная конференция по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С-Петербург, Россия, 2009 г);
- XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Орион, Москва, Россия, 2010г);
- International Scientific and Applied Conference Opto-Nano Electronics and Renewable Energy Sources (Varna, Bulgaria , 2010);
- Российская конференция и школа по актуальным проблемам полупроводниковой нанофотоэлектроники (Новосибирск, Россия, 2011).

**Публикации.** Основное содержание работы изложено в 9 печатных работах, список которых приведен в конце диссертации, также есть заявка на патент N2011124578/28, приоритет от 16.06.2011.

**Гранты.** Работа поддержана грантом У.М.Н.И.К. 2009-2011г Номер проекта: 14029, номер Госконтракта: 8945p/14029 от 19.04.2011.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет \_\_\_\_страницы, включая \_\_\_\_ рисунков и \_\_\_\_ таблиц. Список цитируемой литературы включает \_\_\_\_ наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

**Первая глава.** В этой главе изложены методы формирования излучателей и фотоприемников на основе полупроводниковых гетероструктур узкозонных соединений  $A^3B^5$ .

Глава посвящена обзору основных этапов технологии изготовления оптоэлектронных приборов на основе соединений  $A^3B^5$ .

Рассмотрены основные физико-химические свойства полупроводниковых материалов, используемых для изготовления оптоэлектронных приборов. Детально описаны основные этапы постростовой технологии и возможности их усовершенствования для создания оптоэлектронных приборов на основе узкозонных  $A^3B^5$ .

Анализ литературных данных показал:

Светодиоды, p-i-n-фотодиоды и лазеры для среднего инфракрасного (ИК) диапазона находят широкое практическое применение. Для создания оптоэлектронных приборов в средней ИК области спектра могут быть использованы материалы  $A^2B^6$ ,  $A^4B^4$ ,  $A^3B^5$ . Наиболее перспективными являются соединения  $A^3B^5$ , т.к. они обладают рядом преимуществ, а именно: наиболее высокой эффективностью излучательной рекомбинации, большой теплопроводностью и механической прочностью. Для синтеза этих материалов применяются методы ЖФЭ, МОГФЭ и МПЭ. Постростовая обработка полупроводниковых структур достаточно хорошо разработана для создания приборов в ближней ИК-области спектра (0,8-1,5 мкм). Технология создания оптоэлектронных приборов в средней ИК-области спектра требует значительных усилий исследователей по совершенствованию постростовой технологии узкозонных гетероструктур. Постростовая технология включает в себя литографические операции - формирование на поверхности полупроводниковой пластины рельефного покрытия с изображением элементов прибора из светочувствительного химически стойкого материала (резиста); а также последующие операции переноса изображения на подложку: создание мезоструктур «жидкостным» химическим травлением, создание качественных омических контактов, пассивация p-n-перехода, электрохимические операции в растворах электролитов и т.д.. Формирование приборных структур на основе четверных твердых растворов мало изучено и представляет исследовательский интерес, т.к. в качестве материалов гетероструктур могут быть использованы разнообразные полупроводниковые материалы – от широкозонных (AlGaAsSb, InAsSbP) до узкозонных (GaInAsSb, InAsSb). Постростовая обработка таких систем представляет особую сложность,

т.к. химическое травление многослойных структур, состоящих из разнородных по свойствам материалов, имеет существенные ограничения. Поэтому возникает острая необходимость разработки новых методов химического травления, позволяющих создавать приборные структуры с заданной формой. Для создания оптоэлектронных приборов с качественно новыми параметрами на основе узкозонных соединений  $A^3B^5$  требуется существенное усовершенствование различных этапов постростовой обработки, разработка сложных сочетаний технологических операций и проведение разносторонних исследований, протекающих при этом процессов.

**Вторая глава** описывает создание и исследование светодиодов на основе InAs/InAsSb/InAsSbP.

Глава посвящена основным этапам технологии создания светодиодов на основе InAs и его твердых растворов, исследованию их электролюминесцентных характеристик, а также способам увеличения внешней квантовой эффективности.

В первом параграфе второй главы раскрывается проблема вывода излучения из кристалла светодиода. Из светящегося кристалла может быть выведена только часть генерируемого p-n-переходом излучения, наиболее значительны потери на полное внутреннее отражение излучения. В связи с большим различием показателей преломления полупроводника ( $n_n$ ) и воздуха ( $n_v$ ) доля выходящего излучения определяется значением критического угла ( $\Theta_{пр}$ ) между направлением светового луча и нормалью к поверхности

$$\Theta_{пр} = \arcsin n^{-1},$$

где  $n=n_n/n_v$ . Излучение, падающее на поверхность раздела полупроводник-воздух под углом, меньшим критического выводится из кристалла. В работе приводятся методы увеличения внешней оптической эффективности, такие как применение кристаллов сложной формы (полусферический кристалл, усеченная сфера и др.), нанесение антиотражающих покрытий на световыводящую поверхность и создание диффузно-рассеивающих поверхностей. Самым простым вариантом улучшения вывода излучения является создание диффузно-рассеивающего рельефа на световыводящей поверхности [2], что улучшает условия вывода излучения для лучей падающих на границу раздела под углом большим критического и тем самым приводит к увеличению  $\eta_{вн}$ .

Во втором параграфе рассматриваются результаты разработки методики получения диффузно-рассеивающей поверхности на пластинах InAs ориентации (100).

В результате проведенных исследований предложена и разработана методика получения диффузно-рассеивающей поверхности на пластинах InAs ориентации (100). Разработан травитель, обеспечивающий анизотропию травления плоской поверхности InAs и



позволяющий формировать диффузно-рассеивающий рельеф на световыводящей поверхности светодиодов.

В третьем параграфе описано создание инфракрасных светодиодов на основе InAs и его твердых растворов с конструкцией флип-чип (flip-chip), и диффузно-рассеивающим рельефом на световыводящей поверхности. В этом же параграфе приведены результаты измерения вольтамперных, спектральных и мощностных характеристик этих приборов, и произведено их сравнение с характеристиками аналогичных приборов без диффузно-рассеивающей световыводящей поверхности [A2].

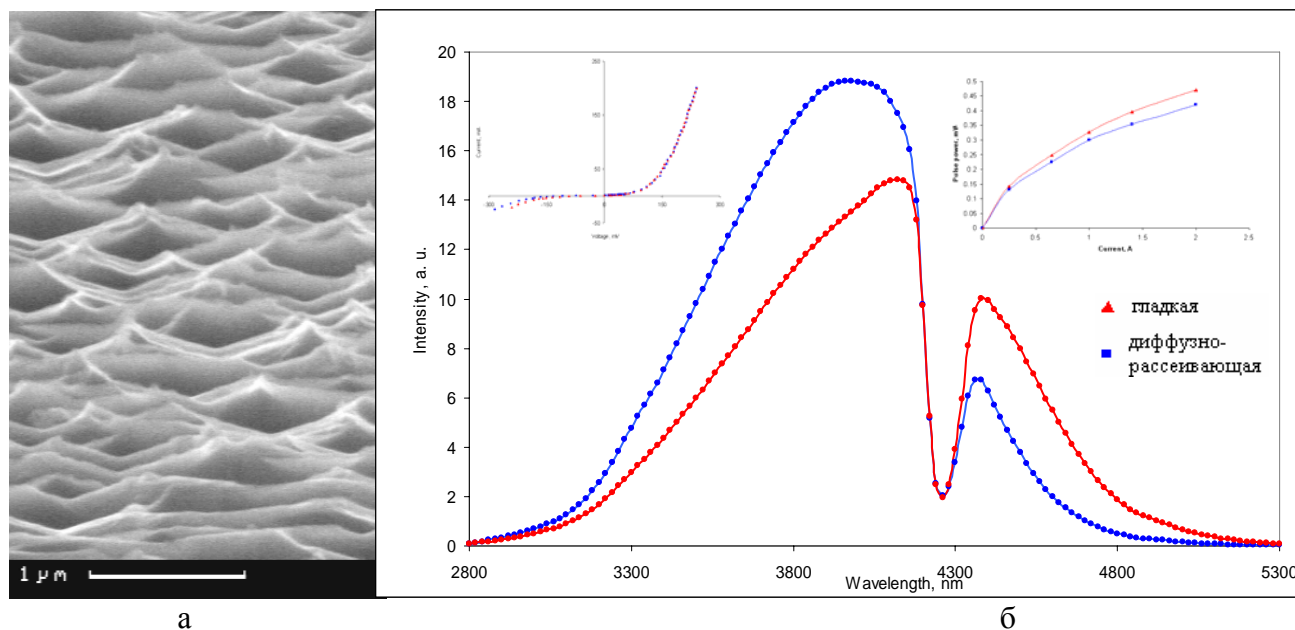


Рис.1. а. Изображение тыльной – световыводящей поверхности светодиода с диффузно-рассеивающим рельефом, полученное с помощью растрового электронного микроскопа; б. спектры электролюминесценции светодиодов на основе InAs/InAsSb/InAsSbP - стандартных светодиодов с гладкой световыводящей поверхностью (красный) и светодиодов с диффузно-рассеивающей световыводящей поверхностью (синий); левая врезка — вольтамперная характеристика светодиодов обоих типов; правая врезка — зависимость мощности излучения от тока в квазинепрерывном режиме для светодиодов обоих типов.

В результате исследования зависимости мощности излучения от тока для светодиодов с длиной волны излучения в максимуме ( $\lambda \approx 4000\text{nm}$ ), было показано, что светодиоды с диффузно-рассеивающей поверхностью, имеют мощность излучения на 20-30% больше, чем светодиоды с гладкой световыводящей поверхностью. Это связано с изменением направления световых потоков внутри кристалла за счет многократного переотражения от неровностей диффузно-рассеивающей поверхности, при этом создаются условия для вывода излучения за пределы кристалла. Для данных светодиодов получено значение мощности при комнатной температуре в QCW режиме 30 мкВт при токе 200мА и 0.6мВт в импульсном режиме при токе 2А.

**Третья глава** посвящена созданию и исследованию быстродействующих р-і-п-фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, а также длинноволновых фотодиодов (2.5-4.8 мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP с повышенной квантовой эффективностью.

В первом параграфе третьей главы приводятся основные способы увеличения быстродействия оптоэлектронных приборов в целом, и в частности р-і-п-фотоприемников на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для диапазона 1.5-2.4 мкм. Как известно, быстродействие фотодиода определяется тремя факторами — временем диффузии созданных излучением носителей до области пространственного заряда (ОПЗ), временем пролета ОПЗ носителями и постоянной времени  $RC$ . Использование низкого уровня легирования активного слоя GaInAsSb ( $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) позволяет добиться низкой емкости фотодиода. Фотодиоды, исследованные в настоящей работе, сконструированы так, чтобы обеспечить генерацию носителей в области пространственного заряда и, таким образом, исключить диффузионную составляющую. Поэтому, учитывая, что время пролета ОПЗ составляет, по нашим оценкам, десяток пикосекунд ( $t = 10^{-11}-10^{-12} \text{ с}$ ), определяющее значение имеет собственная емкость фотодиода. В работе был выбран комплексный метод, который, с одной стороны, обеспечивал получение концентрации носителей в активной области близкие к собственной, а с другой, использовал топографию прибора, обеспечивающую минимальный размер фоточувствительной площадки.

Во втором параграфе третьей главы приведены экспериментальные результаты исследования методов роста и разработки структуры для ИК р-і-п-фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с целью увеличения быстродействия. В фотодиодах с р-і-п структурой отсутствует медленная составляющая времени фотоответа, определяемая диффузией носителей к обедненному слою. Для того чтобы скорость фотоответа действительно определялась только временем зарядки-разрядки барьерной емкости фотодиода, необходимо создать материал с низкой концентрацией носителей, близкой к собственной  $n_i \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . При легировании твердых растворов  $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$  теллуrom, удалось воспроизводимо получать слаболегированный материал п или р - типа проводимости, с концентрацией носителей вплоть до  $n, p \sim (1-2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

В третьем параграфе приводятся результаты разработки методики получения быстродействующих р-і-п-фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с длинноволновой границей спектральной чувствительности  $\lambda = 2.4 \text{ мкм}$  и диаметром фоточувствительной площадки 100 мкм.

На первом этапе мы сконцентрировали свои усилия на создании быстродействующих фотоприемников меза-конструкции каплевидной формы с диаметром фоточувствительной площадки 100 мкм. Омический контакт располагался в узкой части «капли» и имел площадь 50 мкм. Исследования *p-i-n*-фотодиодов такой конструкции показали, что низкий уровень легирования активного слоя ( $10^{14}-10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) в сочетании с описанной формой мезы, позволяет добиться низкой емкости фотодиода (менее 1 пФ) и получить быстродействие на уровне  $\sim 150$  пс, что соответствует частоте 1-1,5 ГГц. Созданные фотодиоды [А3] характеризуются малой величиной обратного темнового тока (500–1000 нА, при обратном смещении 1–3 В) и обнаружительной способностью, достигающей  $9 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{ВТ}^{-1}$  в спектральном диапазоне максимальной чувствительности 1.9–2.2 мкм ( $T=300\text{K}$ ).

Как видно из соотношения площадей – фоточувствительной области ( $\varnothing 100$  мкм) и площади контакта ( $\varnothing 50$  мкм), дальнейшее уменьшение площади мезы в данной конструкции вряд ли возможно, так как дальнейшее уменьшение площади контакта исключает возможность корректной сборки прибора. Поэтому нами была предложена новая конструкция и разработан другой метод формирования фотодиодов для средней ИК-области спектра, позволяющий создавать приборы с диаметром фоточувствительной площадки менее 100 мкм.

В четвертом параграфе приводятся результаты разработки методики создания *p-i-n*-фотоприемников на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с длинноволновой границей спектральной чувствительности  $\lambda = 2.4$  мкм и диаметром фоточувствительной площадки 50 мкм. В результате проведенных исследований предложена и разработана новая конструкция фотоприемника на основе GaSb, включающая две отдельно стоящие мезы (рис.2 а,б) (фоточувствительную и контактную) с перекинутым между ними воздушным контактным «мостиком» (ширина  $\sim 20$  мкм и длина  $\sim 60$  мкм). Эквивалентная емкостная схема всей конструкции «мостикового» фотоприемника изображена на рис 2в. В этом случае емкость всей конструкции будет определяться, главным образом, емкостью фоточувствительной мезы ( $C_{\text{мезы}}$ ), а емкость контактной мезы будет существенно меньше (последовательное соединение емкостей). Разработана методика травления, позволяющая в одном процессе создать две отдельно стоящие мезы с перекинутым между ними воздушным контактным «мостиком». Разработана методика создания двухслойной диэлектрической площадки (первый слой – анодный окисел GaAlAsSb толщиной  $\sim 0,1$  мкм, второй слой –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , толщиной  $\sim 0,1$  мкм) для электрической изоляции между контактной мезой и расположенной на ней металлической контактной площадкой. Разработана технология постростовой обработки структур на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, позволяющая создавать быстродействующие *p-i-n*-фотоприемники с диаметром фоточувствительной

мезы 50 мкм и вынесенной на отдельную мезу контактной площадкой [A10].

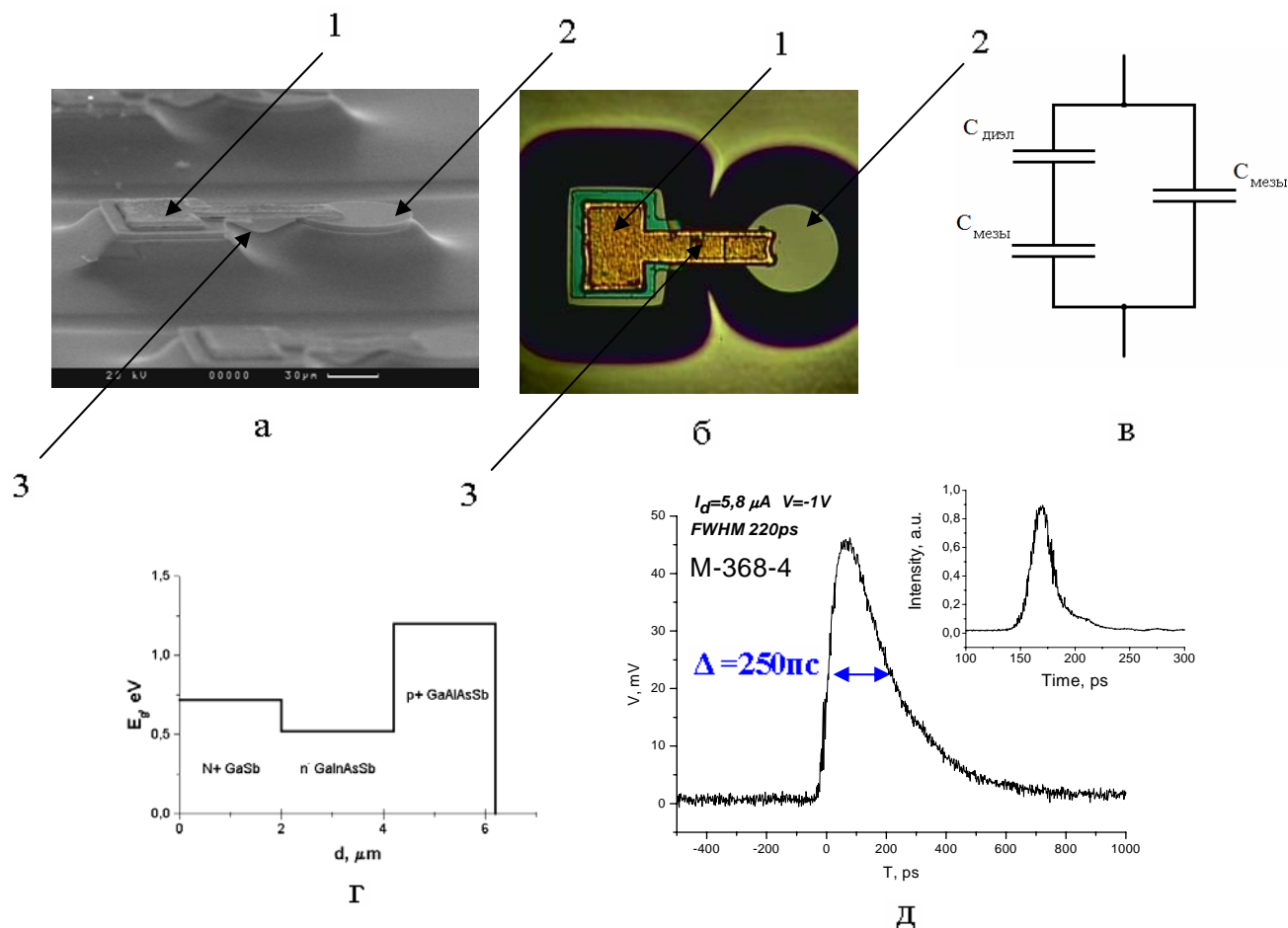


Рис.2 Изображение, полученное с помощью растрового электронного микроскопа (а), микрофотография (б) и эквивалентная схема (в) фотодиода «мостиковой» конструкции. 1. меза с контактной площадкой, 2. фоточувствительная меза, 3. место разделения мез. Зависимость  $E_g$  по координате (г) в гетероструктуре GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb. Осциллограмма фототовета (д) фотодиода при освещении импульсом излучения с длиной волны 1.3 мкм. На вставке осциллограмма импульса накачки.

Приведены результаты измерения следующих характеристик: вольтамперных, спектральных, емкостных и скорости фототовета  $p-i-n$ -фотоприемников с диаметром фоточувствительной площадки 50 мкм и «мостиковым» контактом. Быстродействие  $p-i-n$ -фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb исследовалось при накачке импульсами излучения от полупроводникового лазера с длиной волны  $\lambda = 1.3$  мкм, полуширина импульса накачки составляла 25 пс, в то время как полуширина импульса фототовета составила около 250 пс (Рис.2 д). Быстродействие фотодиода, определяемое по времени нарастания импульса фототоклика на уровне 0.1–0.9, составило величину  $t_{0.1-0.9} = 100-110$  пс, что соответствует предельной частоте 2-3 ГГц [A7].

В пятом параграфе третьей главы приводятся результаты разработки методики получения длинноволновых фотодиодов (2.5-5.0 мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP со встроенным внутренним отражателем.

В результате проведенных исследований предложена и разработана методика получения глубокого рельефа на пластинах InAs ориентации (100). Предложена и разработана новая конструкция фотоприемника, содержащая кольцевую меза-структуру на лицевой части чипа. Проведено сравнение характеристик фотоприемников с кольцевой мезой на лицевой стороне и различными отражающими «поверхностями» на тыльной стороне чипа. Показано, что в случае использования криволинейной многократно отражающей поверхности на тыльной стороне фотодиодного чипа в виде глубоких полусферических ямок травления (рис. 3в), наблюдается повышение квантовой эффективности фотодиода.

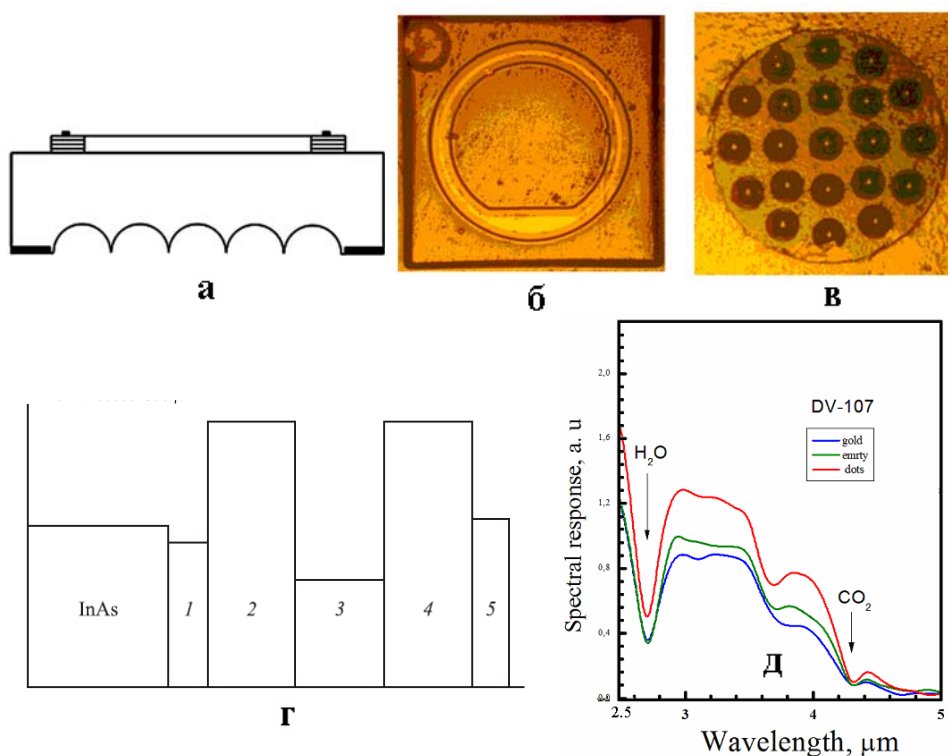


Рис.3 Схема разреза чипа фотодиода с внутренними отражателями, вид сбоку (а); микрофотография «лицевой» (б) и тыльной (в) поверхности фотодиода; (г). зависимость  $E_g$  от координаты в гетероструктуре 1. InAs<sub>0.94</sub>Sb<sub>0.06</sub> (h=5мкм), 2. InAsSbP<sub>0.3</sub>(h=2,5мкм), 3. InAs<sub>0.88</sub>Sb<sub>0.12</sub>(h=3,5мкм), 4. InAsSbP<sub>0.3</sub>(h=2,5мкм), 5. InAs (h=0,3мкм); (д). спектр фототовета фотодиода при комнатной температуре для различных отражателей на тыльной стороне чипа: зеленый – плоский полупроводник, синий – омический контакт, красный – встроенный полусферический отражатель.

Лицевая сторона фотоприемника представляет собой кольцевую мезу (рис.3.б), площадь мезы, а, следовательно, и р-п-перехода, в 10-20 раз меньше площади поверхности, на которую попадает излучение. Поэтому, только малая часть падающего излучения поглощается в кольцевой мезе, а большая часть свободно проходит внутрь кристалла. Тыльная сторона чипа содержит глубокие сферические фигуры травления, представляющие собой встроенные в кристалл полусферические отражатели (рис.3.в). За счет многократного

переотражения света от полусферических отражателей, направление световых потоков меняется, и возрастает вероятность их попадания в область р-п-перехода со стороны подложки. В результате квантовая эффективность прибора увеличивается в 1,5-1,7 раза во всем исследованном интервале длин волн 2.5-5.0 мкм (Рис.3.д.) по сравнению с квантовой эффективностью прибора такой же конструкции, но не имеющего встроенных отражателей.

Для фотодиодов из серии с криволинейной многократно отражающей поверхностью тыльной стороны чипа, достигнуты [А8] величины вольтамперной чувствительности на длинах волн 2.0 мкм, 3.0 мкм, 4.0 мкм, соответственно, 1.1 А/Вт (0.7), 0.8 А/Вт (0.33) и 0.6 А/Вт (0.19). Таким образом, предложен новый метод повышения квантовой эффективности фотодиодов.

**Четвертая глава.** Создание и исследование WGM-лазеров на основе GaSb и его твердых растворов.

Глава посвящена основным этапам технологии создания WGM-лазеров на основе GaSb и его твердых растворов, а также влиянию формы прибора на его характеристики.

В первом параграфе приведено описание WGM-лазеров (Whispering Gallery Modes – WGM) для ИК диапазона [3,4] и их отличие от лазеров других конструкций. Исследования, разработка и внедрение полупроводниковых приборов, излучающих в среднем ИК диапазоне требуют преодоления трудностей, обусловленных небольшой величиной коэффициента усиления, связанного с высокой эффективностью безизлучательной Оже-рекомбинации в узкозонных полупроводниках. Следовательно, возрастают требования к добротности лазерного резонатора, заключающего в себе активную область и обеспечивающего обратную связь для вынужденного излучения света. Резонатор во многом определяет не только размер и форму лазера, но и параметры излучения: мощность, направленность и спектральные характеристики лазера [5]. Добротность резонатора Фабри-Перо не достаточна для перехода традиционных полосковых лазеров в средней ИК-области спектра в режим генерации при комнатной температуре.

В лазерах с кольцевым резонатором обратная связь осуществляется с замыканием луча света. Преимущества лазеров с дисковым и кольцевым резонатором – технологичность, высокая добротность резонатора, низкие значения порогового тока, позволяющие использовать материалы для активной области с низким оптическим усилением. Одной из особенностей WGM-лазеров является наличие нескольких пространственных радиальных мод.

Во втором параграфе данной главы приведены общие сведения о WGM-лазерах, их конструкции и влиянии искажения формы лазера на вывод излучения. Лазер с дисковым и

кольцевым резонатором работает на модах шепчущей галереи. Область локализации света в таком резонаторе составляет несколько длин волн от края резонатора. Основным механизмом оптических потерь, обуславливающих пороговый ток, является рассеяние света на неоднородностях краев резонатора. В ИК-диапазоне из-за относительно большой длины волны качество границы «полупроводник-воздух» не так существенно, как для видимого диапазона.

В третьем параграфе приводятся разработанные методики создания WGM-лазеров на основе GaSb/GaAlAsSb и результаты исследования таких лазеров. Приведены сведения об особенностях травления мезоструктур, для улучшения добротности оптического резонатора.

Создание методом химического травления резонатора, имеющего выпуклую форму, выступающую за пределы мезы (рис.4б), позволяет удерживать WGM-моду в резонаторе.

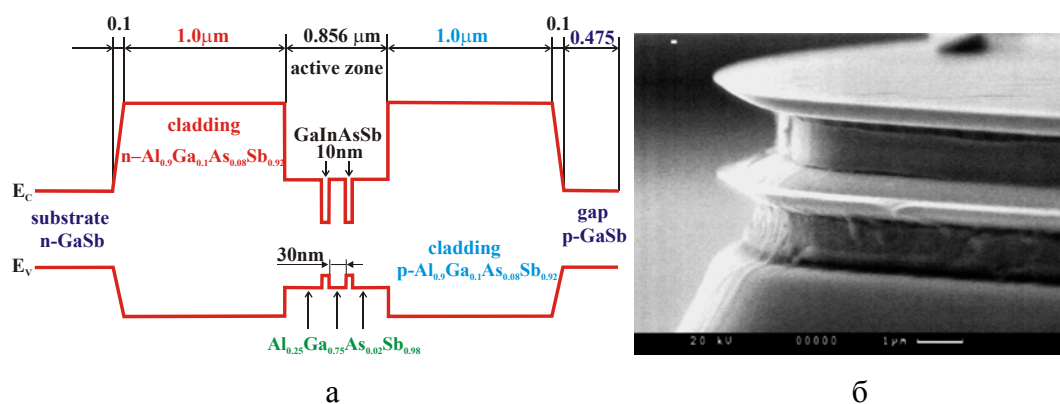


Рис 4. а. энергетическая диаграмма гетероструктуры на основе QW AlGaAsSb/GaInAsSb, выращенной методом МПЭ; б. вид боковой поверхности мезы с выступающей активной областью, изображение получено с помощью растрового электронного микроскопа.

Разработаны конструкция и технология создания дисковых лазеров на основе квантоворазмерных гетероструктур GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, работающих на модах шепчущей галереи (WGM). В работе показано, что дисковый лазер работает на модах шепчущей галереи, при этом экспериментально измеренное межмодовое расстояние удовлетворительно описывается выражением:

$$\Delta\lambda_{WGM} = \frac{\lambda^2}{2\pi R n},$$

где R – радиус мезы, а  $n = 3.5$  — коэффициент преломления света в активной области.

В четвертом параграфе приводится разработанная методика получения «связанных» WGM-лазеров а также результаты исследования зависимости спектра излучения прибора от взаимного расположения дисковых резонаторов. «Связанные» WGM-лазеры представляют собой прибор, состоящий их двух близко расположенных дисковых лазерных диодов, оптически связанных в пару (рис.5а).



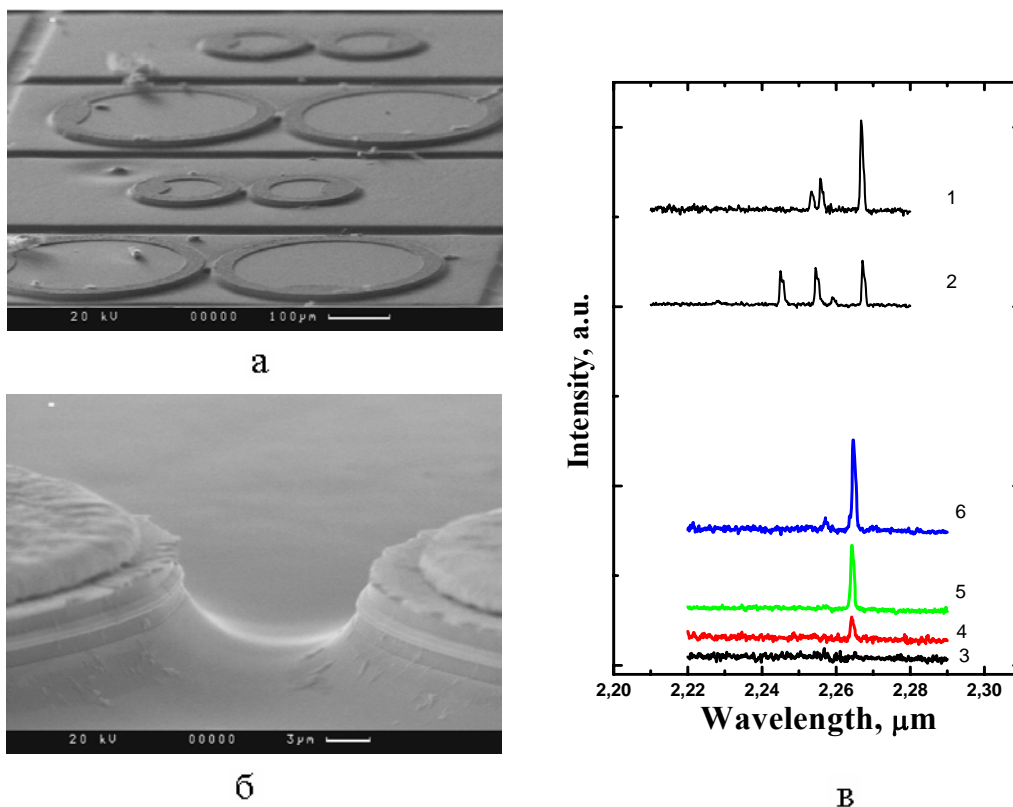


Рис.5. (а) Изображение «связанных» дисковых WGM- лазеров и (б) вид профилей резонаторов, полученные с помощью растрового электронного микроскопа; в. спектры излучения ИК-источника на оптически связанных дисковых резонаторах. Спектры 1, 2 соответствуют многомодовой генерации при подаче тока ( $I=300$  мА) на первый (1) или второй (2) резонаторы по отдельности; спектры 3-6 соответствуют одномодовой генерации при одновременной подаче тока на оба диска, расположенных на расстоянии  $L$ ,  $0 < L < 5\lambda$ , мкм (при разных токах накачки: спектр 3-250 мА, 4-300 мА, 5-350 мА, 6-400 мА).

Наши исследования [А9] показали, что при включении по отдельности каждый из лазеров имеет многомодовую генерацию. Если расстояние  $L$  между дисковыми резонаторами не превосходит 5 длин волн излучения,  $0 < L < 5\lambda_{\text{в}}$  (где  $\lambda_{\text{в}}$  – длина волны излучения полупроводникового источника инфракрасного излучения на воздухе, мкм), при подаче напряжения одновременно на оба дисковых резонатора происходит выделение одной моды, и лазерная система входит в одномодовый режим генерации (рис.5в). При большем удалении резонаторов ( $L > 5\lambda_{\text{в}}$ ) в режиме лазерной генерации при подаче напряжения последовательно как на один из дисковых резонаторов, так и на оба резонатора одновременно, наблюдается только многомодовая генерация когерентного излучения.

**В заключении** диссертации сформулированы основные результаты выполненных исследований:

1. Изготовлены флип-чип светодиоды с длиной волны 4.3 мкм на основе гетероструктур InAs/InAsSb, выращенных методом газовой эпитаксии из металлоорганических



соединений. Изготовлены два типа конструкции светодиодов с гладкой световыводящей поверхностью и с развитым рельефом на поверхности. Исследованы электролюминесцентные свойства. Светодиоды с развитой световыводящей поверхностью имеют более высокие значения оптической мощности по сравнению со светодиодами с гладкой световыводящей поверхностью, что связано с увеличением выхода излучения из кристалла за счет многократного переотражения. Получено значение мощности при комнатной температуре в QCW режиме 30 мВт при токе 200 мА и 0.6 мВт в импульсном режиме при токе 2А.

2. Созданы и исследованы неохлаждаемые быстродействующие GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb p-i-n-фотодиоды с длинноволновой границей спектральной чувствительности  $\lambda = 2.4$  мкм и диаметром фоточувствительной площадки 100 мкм. Получение низкого уровня легирования активного слоя ( $10^{15}$  см<sup>-3</sup>) позволило добиться низкой емкости фотодиода (менее 1.0 пФ при диаметре чувствительной площадки 100 мкм) и рекордного быстродействия (на уровне ~150 пс). Предельное быстродействие фотодиодов достигает значения 1-1,5 ГГц. Фотодиоды характеризуются малой величиной обратного темнового тока (500–1000 нА при смещении 1–3 В) и обнаружительной способностью до  $9 \cdot 10^{10}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> в максимуме спектральной чувствительности 1.9–2.2 мкм (T=300K).

3. Разработана технология создания фотоприемников «мостиковой» конструкции с разделением фоточувствительной и контактной областей. Проведены исследования фотоприемников такой конструкции, созданных на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAs. При этом для разработанного фотоприемника «мостиковой» конструкции были достигнуты более низкие значения обратных темновых токов и более высокое значение быстродействия, чем для 100 мкм фотоприемников стандартной конструкции. В соответствии с оценкой времени нарастания/спада импульса фотоответа, приведенной выше, уменьшение концентрации носителей до  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> в структуре с диаметром мезы 50 мкм позволит ожидать увеличения предельного быстродействия рассматриваемых фотодиодов до 10 ГГц. Такие фотодиоды перспективны для задач лазерной дальнометрии, гетеродинного приема квантовых каскадных лазеров, информационных технологий.

4. Проведены сравнительные исследования ватт-амперной чувствительности фотодиодов, содержащих как поглощающие, так и отражающие тыльные стороны фотодиодного чипа. Показано, что в случае использования криволинейной многократно отражающей поверхности на тыльной стороне фотодиодного чипа в виде полусферических ямок травления глубиной 60 мкм наблюдается повышение квантовой эффективности фотодиода в 1.3-1.7 раза во всем исследованном интервале длин волн 2.5-5.0 мкм. Полученные результаты служат подтверждением преимущества искривленных светоотражающих (и световыводящих)

поверхностей при изготовлении оптоэлектронных приборов для среднего ИК-диапазона.

5. Разработаны конструкция и технология создания дисковых лазеров на основе квантоворазмерных гетероструктур GaAlAsSb/GaInAsSb/GaAlAsSb, работающих на модах шепчущей галереи (WGM). Резонатор в данной конструкции представляет собой активную область, выдающуюся за пределы мезы в виде диска, с такой гладкостью стенки, когда размер неровностей меньше длины волны излучения. Созданы лазеры со «связанными» резонаторами, и показано, что в полупроводниковом источнике инфракрасного излучения с двумя оптически «связанными» дисковыми резонаторами при включении по отдельности каждый из лазеров показывает многомодовую генерацию. При соблюдении условий, когда расстояние  $L$  между дисковыми резонаторами не превосходит 5 длин волн излучения,  $0 < L < 5\lambda$ , при подаче напряжения одновременно на оба дисковых резонатора происходит выделение одной моды, и лазерная система входит в одномодовый режим генерации.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

A1. Астахова, АП; Головин, АС; Ильинская, НД; Калинина, КВ; Кижаяев, СС; Серебренникова, ОЮ; Стоянов, НД; Horvath, ZsJ; Яковлев, ЮП «Мощные светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектроскопии метана ( $\lambda \sim 3.3$  мкм)» // 2010, ФТП, т.44, 2 страницы: 278-284

A2. Головин, АС; Астахова, АП; Кижаяев, СС; Ильинская, НД; Серебренникова, ОЮ; Яковлев, ЮП «Светодиоды на основе гетероструктур InAs/InAsSb для спектроскопии CO<sub>2</sub> ( $\lambda = 4.3$  мкм)» // 2010, Письма ЖТФ, т.36, 1 страницы: 105-110

A3. Андреев, ИА; Серебренникова, ОЮ; Соколовский, ГС; Куницына, ЕВ; Дюделев, ВВ; Гаджиев, ИМ; Дерягин, АГ; Гребенщикова, ЕА; Коновалов, ГГ; Михайлова, МП; Ильинская, НД; Кучинский, ВИ; Яковлев, ЮП «Быстродействующие р-і-n-фотодиоды для спектрального диапазона 0.9-2.4 мкм» // 2010, Письма ЖТФ, т.36, 9 страницы: 43-49

A4. Старостенко, ДА; Шерстнев, ВВ; Алексеев, ПА; Андреев, ИА; Ильинская, НД; Коновалов, ГГ; Серебренникова, ОЮ; Яковлев, ЮП «Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5-4.8 мкм на основе гетероструктур InAs/InAs<sub>0.88</sub>Sb<sub>0.12</sub>/InAsSbP, работающие при комнатной температуре» // 2011, Письма ЖТФ, т.37, 19 страницы: 95-103

A5. Шерстнев, ВВ; Старостенко, Д; Андреев, ИА; Коновалов, ГГ; Ильинская, НД; Серебренникова, ОЮ; Яковлев, ЮП «Фотодиоды на основе гетероструктур InAs/InAs<sub>0.88</sub>Sb<sub>0.12</sub>/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5-4.9 мкм» // 2011, Письма ЖТФ, т.37, 1 страницы: 11-17

A6. Именков, АН; Шерстнев, ВВ; Монахов, АМ; Тарасов, ДС; Ильинская, НД; Серебренникова, ОЮ; Баранов, АН; Яковлев, ЮП «Анизотропная поляризация излучения в квантово-размерных лазерах работающих на модах шепчущей галереи» // 2012, Письма ЖТФ, т.38, 3 страницы: 4-9

A7. Серебренникова, ОЮ, Андреев, И.А., Соколовский, Г.С., Куницына, Е.В., Дюделев, В.В.,

Коновалов, Г.Г., Ильинская, Н.Д., Яковлев, Ю.П. «Быстродействующие фотодиоды средней ИК-области спектра с полосой пропускания 2-3 ГГц» // 2012, Письма ЖТФ, в печати.

А8. Гребенщикова, Е.А., Старостенко, Д.А., Шерстнев, В.В., Коновалов, Г.Г., Андреев, И.А., Серебрянникова, О.Ю., Ильинская, Н.Д., Яковлев, Ю.П. «Повышение квантовой эффективности фотодиодов за счет изменения направления световых потоков в кристалле (на примере гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP)» // 2012, Письма ЖТФ, в печати.

А9. Гребенщикова, Е.А., Шерстнев, В.В., Ларченков, М.И., Серебрянникова, О.Ю., Ильинская, Н.Д., Монахов, А.М., Teissier, R., Баранов, А.Н., Яковлев, Ю.П. «Источники излучения в средней инфракрасной области спектра на основе связанных дисковых резонаторов» // 2012, Письма ЖТФ, в печати

А10. Заявка на патент. Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Серебрянникова О.Ю., Соколовский Г.С., Куницына Е.В., Дюделев В.В., Яковлев Ю.П. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ФОТОДИОД ДЛЯ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ. Заявка N2011124578/28, приоритет от 16.06.2011.

### Цитируемая литература

1. R.H. Pierson, A.N. Fletcher and E.S. Gantz. Catalog of infrared spectra for qualitative analysis of gases // Anal. Chem., 1956, v.28, p.1218-1239

2. Н.В.Зотова, Н.Д.Ильинская, С.А.Карандашев, Б.А.Матвеев, М.А.Ременный, Н.М.Стусь. Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия. Обзор. // ФТП 42 (6), 641 (2008)

3. A.F.J. Levi, R.E. Slusher, S.L. McCall, S.J. Pearton, W.S. Hobson «Room-temperature lasing action in In<sub>0.51</sub>Ga<sub>0.49</sub>P/In<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>As microcylinder laser diodes» // Appl. Phys. Lett., 62, 2021 (1993)

4. В.В.Шерстнев, А.М.Монахов, А.П.Астахова, А.Ю.Кислякова, Ю.П.Яковлев, Н.С.Аверкиев, A.Krier, G.Hill Полупроводниковые WGM-лазеры среднего инфракрасного диапазона // ФТП, 2005, том 39, выпуск 9

5. Н.С. Аверкиев, В.В. Шерстнев, А.М. Монахов, Е.А. Гребенщикова, А.Ю. Кислякова, Ю.П. Яковлев, A. Krier, D.A. Wright Физические принципы работы полупроводниковых дисковых лазеров // Физика низких температур, 2007, т.33, № 2/3, с.378-387