

На правах рукописи



КОНОВАЛОВ ГЛЕБ ГЕОРГИЕВИЧ

**СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ФОТОДИОДОВ
ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИК-ОБЛАСТИ СПЕКТРА (2-5 МКМ) НА ОСНОВЕ
УЗКОЗОННЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР A^3B^5**

специальность 01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Научный руководитель: к.ф.-м.н. Андреев Игорь Анатольевич
старший научный сотрудник
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Тришенков Михаил Алексеевич
профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики»

д.ф.-м.н., проф. Кузнецов Владимир Владимирович
профессор
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный политехнический
университет»

Защита состоится 16 октября 2014 г. в 10:00 на заседании диссертационного
совета Д 002.205.02 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской
академии наук по адресу:

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Физико-техническом
институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Автореферат разослан 11 сентября 2014 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 002.205.02

д.ф.-м.н.



Сорокин Л.М.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В настоящее время средняя инфракрасная (ИК) область спектра (2-5 мкм) становится всё более востребованной благодаря развитию эффективных излучающих светодиодных и лазерных систем. Улучшение характеристик излучателей требует объективного улучшения параметров и характеристик согласованных с ними по длине волны приёмников и фотоприёмных устройств. Оптоэлектронные приборы, работающие в ИК-области, широко используются в настоящее время для обнаружения и слежения за наземными, надводными и подводными целями, в приборах ночного видения, тепловой разведки местности, а также для регистрации коротких лазерных импульсов. Для ИК-области спектра разработаны различные типы широкополосных полупроводниковых лазеров, работающих при комнатной температуре [1, 2], а также мощные компактные твердотельные лазеры на основе кристаллов YAG и Nd-KGW, легированных ионами Ho, Tm и Er [3].

Для создания быстродействующих приёмников излучения в средней ИК-области спектра наиболее перспективными материалами являются соединения A^3B^5 и их твёрдые растворы: в диапазоне 1.0-2.5 мкм – многокомпонентные узкозонные твёрдые растворы системы GaSb-InAs [4, 5], в диапазоне 2.5-5.0 мкм – полупроводниковые соединения InAs, InSb и их твёрдые растворы [6, 7].

Наиболее актуальными задачами в инфракрасной оптоэлектронике в настоящее время являются повышение быстродействия существующих приёмников, расширение их спектрального диапазона чувствительности [8], создание эффективных приёмников на основе квантово-размерных структур.

Цель диссертационной работы заключалась в создании и исследовании высокоэффективных неохлаждаемых сверхбыстродействующих фотодиодов на основе объёмных, квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 и их твёрдых растворов, для спектрального диапазона 1.0-5.0 мкм.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1. Проведение анализа факторов, влияющих на быстродействие $p-i-n$ -фотодиода и ограничивающих его. Разработка оптимальной меза-конструкции фотодиодного чипа, оценка его параметров.

2. Разработка и создание быстродействующих фотодиодов на основе объёмной гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм, фотодиодов на основе двойной гетероструктуры InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм, а также фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP для спектрального диапазона 2.5-4.9 мкм.

3. Исследование электрических, фотоэлектрических характеристик и параметров созданных быстродействующих фотодиодов.

4. Разработка методики определения быстродействия фотодиодов при возбуждении фотосигнала ультракороткими лазерными импульсами.

5. Повышение квантовой эффективности фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа.

6. Разработка быстродействующих фотодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 с глубокими квантовыми ямами, исследование их электрических, фотоэлектрических характеристик и параметров.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в следующем:

1. Впервые созданы быстродействующие $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм меза-конструкции, с разделёнными чувствительной ($d=50$ мкм) и контактной мезами, соединёнными фронтальным мостиковым металлическим контактом. Использование оригинальной конструкции контактной мезы с дополнительным диэлектрическим слоем Si_3N_4 , толщиной $l=0.3$ мкм, под металлическим контактом позволило снизить как собственную ёмкость фотодиода, так и значения обратных темновых токов. Собственная ёмкость фотодиодов достигла значений: $C_0=3-5$ пФ при нулевом напряжении смещения и $C=0.8-1.5$ пФ при $U=-3.0$ В. Фотодиоды обладали быстродействием $\tau=50-100$ пс, которому соответствует частотная полоса пропускания $\Delta f=3-5$ ГГц.

2. Созданы фотодиоды на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP с диаметром чувствительной площадки $d=300$ мкм и фотодиоды на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.94}Sb_{0.06}/InAsSbP/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAsSbP с размером чувствительной площадки 0.45×0.45 мкм, работающие при комнатной температуре в диапазонах 2.5-4.9 мкм и 1.0-4.8 мкм, соответственно. Отличительной особенностью фотодиодов является высокое значение сопротивления при нулевом смещении, достигающего значений $R_0=700-800$ Ом.

3. В фотодиодах на основе гетероструктуры InAs/InAs_{0.88}Sb_{0.12}/InAs_{0.50}Sb_{0.20}P_{0.30} с узкозонной активной областью ($E_g=0.2-0.3$ эВ) достигнуто увеличение квантовой эффективности и удельной обнаружительной способности в 1.5-1.7 раза, в интервале длин волн 2.2-4.8 мкм. Такое увеличение реализуется за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа, благодаря формированию криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, на фотодиодном чипе со стороны подложки. Криволинейная отражающая поверхность позволяет направлять оптическое излучение к активной области

фотодиода. Достигнута квантовая эффективность $\eta=0.24$ (электрон/фотон) на длине волны $\lambda=3$ мкм.

4. Показано, что в наногетероструктуре p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с глубокими квантовыми ямами InAsSb увеличение их числа приводит к пропорциональному уменьшению удельной ёмкости структуры за счёт последовательного соединения емкостей p - n -переходов.

Результатом диссертационной работы являются следующие научные положения, вносимые на защиту:

ПОЛОЖЕНИЕ I.

Разделение площади p - i - n -фотодиода на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb на изолированные фоточувствительную и контактную площадки и соединение их между собой фронтальным металлическим мостиковым контактом обеспечивает высокое быстродействие $\tau=50$ -100 пикосекунд за счёт малого времени зарядки-разрядки барьерной ёмкости прибора.

ПОЛОЖЕНИЕ II.

В асимметричной наногетероструктуре на основе p -InAs с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb при комнатной температуре реализуются интенсивная положительная и отрицательная электролюминесценция, что обеспечивает работу структуры в светодиоде или фотодиоде режиме при переключении полярности напряжения.

ПОЛОЖЕНИЕ III.

В наногетероструктуре, выращенной на подложке n -GaSb с глубокой электронной квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb и содержащей два электронных уровня, излучательная рекомбинация осуществляется при переходе носителей между первым электронным и первым дырочным уровнями с энергией излучаемого фотона $E_{hv}=0.669$ эВ ($\lambda\approx 1.85$ мкм), а фоточувствительность в фотовольтаическом режиме обеспечивается за счёт переходов между двумя электронными уровнями, что соответствует энергии фотона в максимуме спектральной чувствительности $E_{hv}=0.826$ эВ ($\lambda\approx 1.55$ мкм).

ПОЛОЖЕНИЕ IV.

В фотодиоде на основе наногетероструктуры n -GaSb/AlAsSb/InAsSb/AlAsSb/ p -GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области лавинное умножение в слабом электрическом поле ($E<10^4$ В/см) обеспечивается за счёт ударной ионизации электронами, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости $\Delta E_c=1.27$ эВ между потенциальным барьером AlSb и первым электронным уровнем $E_{e_1}=0.394$ эВ.

Практическая ценность:

Созданные высокоэффективные быстродействующие фотодиоды расширяют номенклатурную линейку существующей элементной базы приборов ИК оптоэлектроники. Развитие целого ряда применений, таких как высокоскоростная связь в открытом атмосферном канале, спектроскопия и анализ газов, лазерная локация в безопасном для зрения человека диапазоне, становится возможным благодаря новым быстродействующим фотодиодам. Показан новый подход увеличения эффективности фотодиодов для средней ИК-области спектра за счёт изменения направления излучения внутри фотодиодного чипа, благодаря формированию криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, на фотодиодном чипе со стороны подложки.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались на конференции по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 27-28 октября 2010 г.), на 12-й Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 25-29 октября 2010 г.), на конференции по физике и астрономии для молодых учёных Санкт-Петербурга и Северо-Запада «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 26-27 октября 2011 г.), на 13-й Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 21-25 ноября 2011 г.), на VII международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012» (Санкт-Петербург, 15-19 октября 2012 г.), на российской молодёжной конференции по физике и астрономии «Физика.СПб» (Санкт-Петербург, 24-25 октября 2012 г.), на 14-й Всероссийской молодёжной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 26-30 ноября 2012 г.), на 15-ом Международном симпозиуме по сверхбыстрым явлениям в полупроводниках (Вильнюс, Литовская республика, 25-28 августа 2013 г.), на VIII международной конференции молодых учёных и специалистов «Оптика – 2013», (Санкт-Петербург, 14-18 октября 2013 г.).

Публикации.

Основные положения диссертации отражены в девяти научных публикациях ведущих рецензируемых изданий, включенных в Перечень журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, рекомендованные Высшей аттестационной комиссией. Список публикаций приведён в конце автореферата. Получен патент РФ на изобретение №2488916 от 27 июля 2013 г.

Гранты.

Работа частично поддержана грантом У.М.Н.И.К. 2012-2014 г. Проекты №16805 и №17282, контракт №1001p/16805 от 01.02.2012 г.

Личный вклад автора заключается в разработке и реализации новых конструкций меза-фотодиодов для средней ИК-области на основе узкозонных полупроводниковых соединений A^3B^5 , проведении экспериментов, направленных на исследование их параметров и характеристик, определение оптимальных меза-конструкций высокоэффективных быстродействующих фотодиодов, в обработке экспериментальных данных, участии в обсуждении результатов и подготовке статей.

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы, содержит 168 страниц, включая 72 рисунка и 3 таблицы. Список цитированной литературы содержит 118 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационного исследования, его новизна, сформулированы цель и основные задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко представлена структура диссертации.

Первая глава.

Глава 1 является обзором, в ней описаны основные физические принципы работы, параметры и характеристики фотодиодов, кратко изложены основные схемы их включения. В главе 1 рассмотрены физические свойства полупроводниковых узкозонных (или узкощелевых) соединений A^3B^5 , в особенности GaSb, InAs и твёрдых растворов на их основе, используемых для разработки фотоприёмников для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм, а также представлен обзор существующих фотоприёмников для указанного диапазона, их конструкций и параметров. Уделено особое внимание важности правильного выбора подходящей конструкции для создания быстродействующих фотоприёмников.

Вторая глава.

В главе 2 детально описаны методы исследования электрических и фотоэлектрических характеристик, параметров созданных фотодиодов, а также методика исследования магнитотранспортных свойств слоёв фотодиодных гетероструктур. Представлены схемы (или блок-схемы) измерительных установок.

В разделе 2.1 кратко описаны основные качественные характеристики объектов исследования.

В разделе 2.2 изложен метод определения вольт-амперных характеристик фотодиодов, изображена блок-схема установки для их получения.

В разделе 2.3 изложен метод определения ёмкости приёмников, изображён общий вид схемы измерительной установки вольт-фарадных характеристик фотодиодов.

В разделе 2.5 представлено описание метода исследования быстродействия фотодиодов на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb со структурой $p-i-n$. Представлена блок-схема измерительной установки для определения быстродействия фотодиодов.

В разделе 2.6 описан метод исследования магнитотранспортных свойств слоёв квантово-размерных гетероструктур.

Третья глава.

Глава 3 посвящена исследованиям, направленным на разработку, создание и изучение свойств высокоэффективных быстродействующих $p-i-n$ -фотодиодов для спектрального диапазона 1.0-2.4 мкм на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb.

В разделе 3.1 проведён анализ факторов ограничивающих быстродействие $p-i-n$ -фотодиодов. Определены требования, которым должны удовлетворять гетероструктуры и меза-конструкции фотодиодных чипов. Показано, что для $p-i-n$ -фотодиодов, изготовленных на основе технологически оптимизированных гетероструктур, быстродействие определяется дрейфовым временем пролёта фотогенерированных носителей области пространственного заряда (ОПЗ) t_{dr} и длительностью зарядки-разрядки собственной ёмкости $p-n$ -перехода $\tau = R_L C$, т.е. величинами его ёмкости C и нагрузочного сопротивления R_L . При толщине ОПЗ $W=1-2$ мкм $p-i-n$ -фотодиодов, равной длине поглощения излучения дрейфовое время $t_{dr}=10-20$ пс, т.е. быстродействие, с величинами отклика более t_{dr} , определяется исключительно величиной собственной ёмкости $p-i-n$ -фотодиодов C .

В разделе 3.2 описаны высокоэффективные быстродействующие фотодиоды на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb со структурой $p-i-n$, диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм. Предложена меза-конструкция фотодиода с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм (рис. 1), для обеспечения высокой внешней квантовой эффективности контактная область была смещена относительно приёмной площадки. Показано, что такая подконтактная область мезы вносит вклад в величину ёмкости $p-n$ -перехода, увеличивая её на 20-25%.

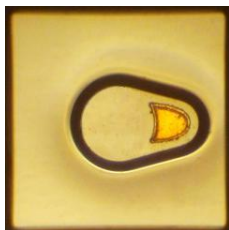


Рис. 1. Микрофотография фотодиодного чипа с диаметром чувствительной площадки $d=100$ мкм.

Активным слоем в фотодиодной структуре был твёрдый раствор $Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82}$ с шириной запрещённой зоны $E_g=0.53$ эВ, который определял длинноволновый край спектральной чувствительности. Остаточная концентрация основных носителей в активной области составила $n_i=(0.7-2.0)\cdot 10^{15}$ см⁻³. При нулевом напряжении смещения фотодиоды имели собственную ёмкость $C_0=2.0-3.0$ пФ, смещении $U=-3.0$ В ёмкость фотодиода составляла величину $C=0.9-1.2$ пФ.

Фотодиоды имели чувствительность в диапазоне 0.9-2.4 мкм (рис. 2). Токовая монохроматическая чувствительность на длине волны $\lambda_{\max}=2.1$ мкм составила $S_I=0.9-1.1$ А/Вт, что соответствует квантовой эффективности $\eta=0.6-0.7$. Удельная обнаружительная способность фотодиодов в максимуме спектра $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1)=9.0 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}.

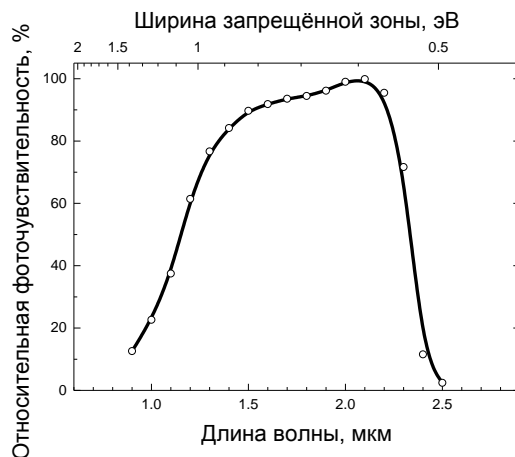


Рис. 2. Спектральное распределение fotocувствительности *p-i-n*-фотодиода на основе гетероструктуры GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb при комнатной температуре.

Быстродействие фотодиода, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика составило величину $\tau_{0.1-0.9}=130-150$ пс, что соответствует частотной полосе пропускания $\Delta f \approx 2$ ГГц.

В разделе 3.3 объяснены причины уменьшения чувствительной площадки *p-i-n*-фотодиода и поиска новой меза-конструкции [9]. Описан новый подход к проектированию конструкции фотодиода, с разделёнными чувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, соединёнными металлическим мостиковым контактом (рис. 3). Фотодиодный чип имел прямоугольное основание размерами 0.38×0.25 мм, контактная меза прямоугольной формы с размерами 50×70 мкм, контактный мостик имел ширину 20 мкм, длину 85 мкм. Металлический контакт, расположенный на контактной мезе, обладал размерами 40×60 мкм. Металлический слой толщиной $l=3-6$ мкм отделён от верхнего широкозонного слоя GaAlAsSb диэлектрическим анодным окислом полупроводника и дополнительным слоем диэлектрика Si_3N_4 .

Проанализирована эквивалентная ёмкость фотодиода с разделёнными мезами. Аналитически рассмотрено влияние дополнительного слоя диэлектрика Si_3N_4 . Показано, что благодаря Si_3N_4 под металлическим контактом, электрическая ёмкость фотодиода может быть равна барьерной ёмкости чувствительной мезы C_{p-n} .

Фотодиодные чипы с разделёнными мезами (рис. 3) были изготовлены с диэлектрическим слоем Si_3N_4 в подконтактной области и без него.

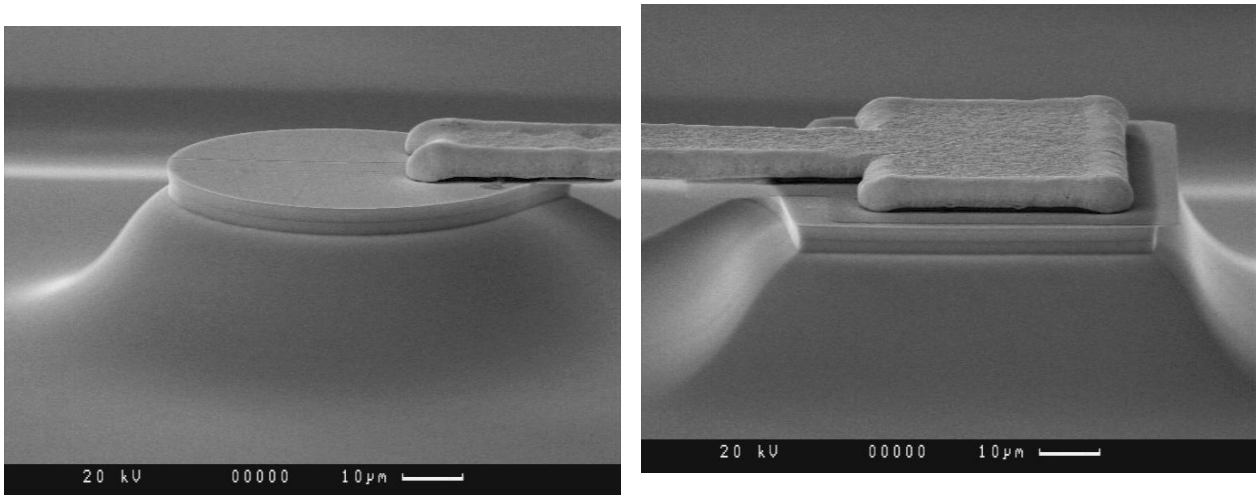


Рис. 3. Сверхбыстродействующий фотодиодный чип с разделенными чувствительной (диаметр $d=50$ мкм) и контактной мезами, мостиковым металлическим контактом (СЭМ-фото), вид сбоку.

Исследование влияния диэлектрического слоя Si_3N_4 на электрические характеристики фотодиода показало, что Si_3N_4 препятствует прохождению тока через контактную мезу, понижая общий уровень темнового тока фотодиода. При использовании варианта чипа с Si_3N_4 между опорной мезой и контактной площадкой ёмкость $p-i-n$ -фотодиода при нулевом смещении была в 2 раза ниже ($C_0^{\text{Si}_3\text{N}_4} = 6$ пФ), чем на аналогичном приборе без диэлектрического слоя ($C_0 = 12$ пФ).

Ширина зарегистрированного импульса отклика фотодиода с разделёнными мезами составила $\text{FWHM} \sim 220$ пс. Длительность фронтов нарастания и спада импульса фототока составило величину $\tau_{0.1-0.9} = 50-100$ пс (рис. 4), что соответствовало частотной полосе пропускания $\Delta f = 2-5$ ГГц.

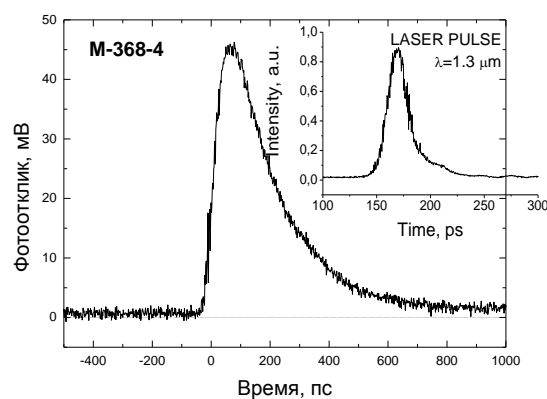


Рис. 4. Осциллограмма импульса фотоотклика $p-i-n$ -гетерофотодиода $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при воздействии лазерным импульсом с длиной волны $\lambda = 1.3$ мкм (на вставке).

В разделе 3.4 приведены основные выводы главы 3.

Четвёртая глава.

Глава 4 посвящена созданию и исследованию фотоэлектрических свойств неохлаждаемых быстродействующих InAs/InAsSbP фотодиодов с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda_{sp}=3.8$ мкм и InAsSb/InAsSbP фотодиодов с $\lambda_{sp}=4.8$ (4.9) мкм.

В разделе 4.1 описаны результаты работы, направленной на создание быстродействующих фотодиодов с активной областью InAs для спектрального диапазона 1.5-3.8 мкм. Впервые изготовлены фотодиоды меза-конструкции на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP со смещённым металлическим контактом относительно чувствительной площадки (диаметр $d=100$ мкм). Изложены технология создания фотодиодов, результаты исследования их параметров и характеристик. Достигнуты значения ёмкостей InAs/InAsSbP фотодиодов с диаметром площадки $d=100$ мкм при нулевом смещении $C_0=17$ пФ, при напряжении смещения $U \approx -1$ В ёмкость снижается до единиц пикофарад, при $T=300$ К и $T=77$ К получены высокие значения токовой монохроматической чувствительности $S_I=1.4$ А/Вт и $S_I=1.6$ А/Вт в максимуме спектральной чувствительности $\lambda_{max}=3.0-3.3$ мкм, соответственно.

В разделе 4.2 изложены результаты работы направленной на создание фотодиодов на основе неизопериодной гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP с активной областью $\text{In}_{0.88}\text{As}_{0.12}\text{Sb}$. Существенной отличительной особенностью предложенной фотодиодной структуры является введение промежуточного буферного слоя $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$ между подложкой InAs и активной областью на основе твёрдого раствора $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$.

Для снижения дислокаций несоответствия между подложкой InAs и узкозонной областью поглощения $\text{InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}$ выращивался промежуточный буферный слой $\text{InAs}_{0.94}\text{Sb}_{0.06}$. Из гетероструктур были изготовлены два варианта конструкции фотодиодного чипа. Фотодиодные чипы размером 500×500 мкм с размерами фоточувствительной площадки 450×450 мкм и с диаметром фоточувствительной площадки $d=300$ мкм.

Были определены спектры относительной чувствительности фотодиодных гетероструктур InAsSb/InAsSbP с широким спектром (WS, вариант *a*) и узким спектром (NS, вариант *b*) при $T=300$ К. На рис. 5 показаны спектры чувствительности фотодиодов, диапазон чувствительности 2.5-4.9 мкм для NS фотодиодов и 1.0-4.8 мкм для WS фотодиодов.

Значения дифференциального сопротивления в нуле смещения фотодиодов с диаметром чувствительной площадки $d=300$ мкм находились в диапазоне $150 \leq R_0 \leq 700$ Ом, фотодиодов с размером чувствительной площадки 450×450 мкм $20 \leq R_0 \leq 100$ Ом. Значения плотности обратных темновых токов при напряжении смещения $U=-0.2$ В не превышали значений $j=(1.0-7.5) \cdot 10^{-2}$ А/см².

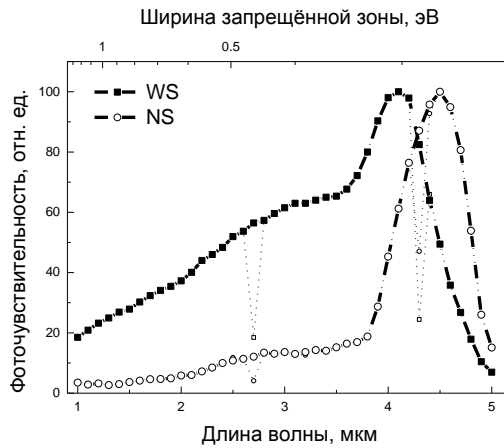


Рис. 5. Спектры относительной чувствительности фотодиодных гетероструктур InAsSb/InAsSbP с широким спектром (WS, вариант *a*) и узким спектром (NS, вариант *б*) при комнатной температуре ($T=300$ К).

Фотодиоды обладали низкой токовой монохроматической чувствительностью $S_I=0.6-0.8$ А/Вт, которой соответствует квантовая эффективность $\eta=0.15-0.20$. Для повышения эффективности фотодиодов впервые была предложена идея изменить направление излучения внутри фотодиодного чипа, благодаря сформированной криволинейной отражающей поверхности, образованной селективным травлением, со стороны подложки фотодиодного чипа.

Были изготовлены образцы (рис. 6):

- a*) с плоской тыльной поверхностью со сплошным омическим контактом,
- б*) с центральной частью диаметром $d=880$ мкм свободной от контакта,
- в*) с полусферическими углублениями на центральной части фотодиодного чипа со стороны подложки.

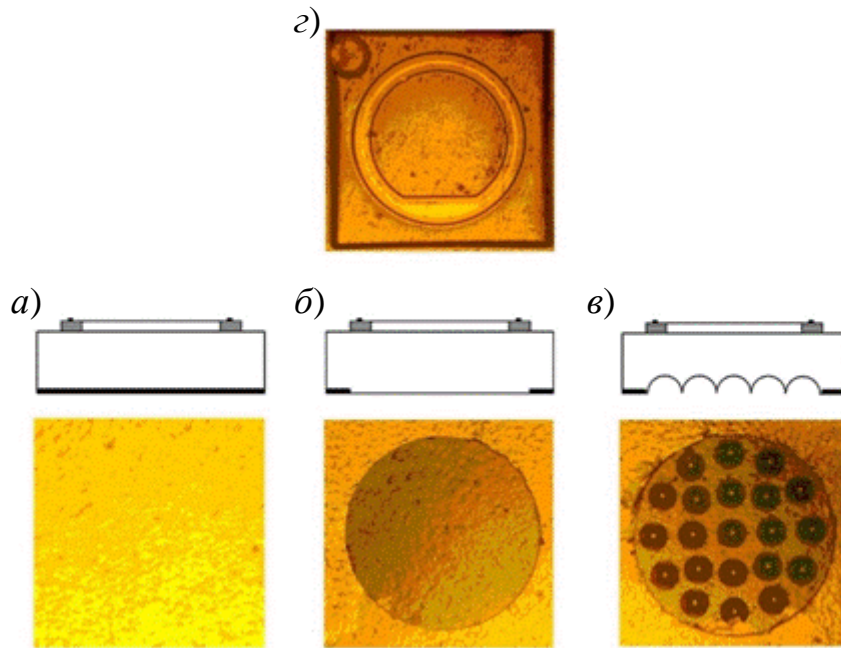


Рис. 6. *а), б), в)* – схемы поперечного сечения фотодиодных чипов и микрофотографии их граней со стороны подложки, различающихся по рельефу и по площади омического контакта; *г)* микрофотография чипа со стороны эпитаксиального слоя.

Проведённые измерения показали, что создание криволинейной отражающей поверхности в виде множества полусфер на фотодиодном чипе, со стороны подложки, позволяет увеличить квантовую чувствительность до значения $\eta = 0.24$ (электрон/фотон) в максимуме спектра на длине волны $\lambda = 3.1$ мкм, в расчёте на площадь $p-n$ -перехода ($S = 0.151 \text{ мм}^2$) $\eta = 1.43$ (электрон/фотон). Квантовая эффективность и удельная обнаружительная способность увеличиваются в 1.5-1.7 раза в области длин волн 2.5-4.5 мкм по сравнению с фотодиодами с поглощающим омическим контактом (рис. 7, кривая 1) или с плоской частично не металлизированной стороной чипа (рис. 7, кривая 2).

Обнаружено, что собственная ёмкость фотодиодов на основе гетероструктур InAsSb/InAsSbP стремительно падает с увеличением напряжения смещения и уже при напряжении смещения $U = -0.6$ В составляет несколько единиц пикофард. Без смещения фотодиоды имеют собственную ёмкость $C_0 = 30-60$ пФ.

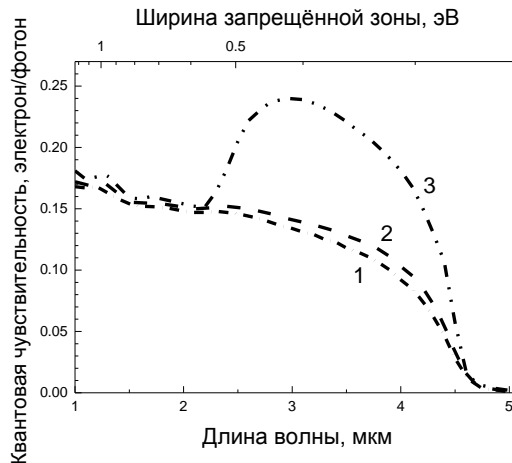


Рис. 7. Спектры квантовой чувствительности фотодиодов трёх типов: 1, 2 — с плоской поверхностью со стороны подложки, со сплошным омическим контактом (1, вариант *а*) и с центральной частью, свободной от контакта (2, вариант *б*); 3 — с полусферическими углублениями в центральной части фотодиодного чипа со стороны подложки (вариант *в*).

Быстродействие фотодиодов при полученных значениях собственной ёмкости можно оценить значением $\tau=1-10$ нс, что является типичным для приборов на основе соединений A^3B^5 .

В разделе 4.3 приведены основные выводы главы 4.

Пятая глава.

В пятой главе изложены результаты исследования параметров и характеристик фотодиодов на основе квантово-размерных гетероструктур узкозонных соединений A^3B^5 для спектрального диапазона 1.6-5.0 мкм.

В разделе 5.1 изложены результаты исследования фотодиодов меза-конструкции с диаметром чувствительной площадки $d=300$ мкм на основе асимметричных гетероструктур II-типа p -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ p -GaSb с одной и тремя глубокими квантовыми ямами на гетерогранице. При исследовании зависимостей положительной и отрицательной электролюминесценции меза-диодов в интервале температур $T=77-300$ К в диапазоне длин волн 1-4 мкм обнаружено, что описанные в работе приборы могут работать при высоких температурах в режиме светодиод-фотодиод при переключении прикладываемого напряжения смещения. Фотодиоды продемонстрировали высокую токовую монохроматическую чувствительность $S_I=0.9-1.4$ А/Вт и удельную обнаружительную способность $D^*=3.5 \cdot 10^{11}-10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2} при $T=77-200$ К в максимуме спектральной чувствительности на длине волны $\lambda_{max}=3$ мкм. Наблюдалось резкое падение электрической ёмкости диода в зависимости от приложенного обратного напряжения смещения (до $C=1.5$ пФ при $U=-1$ В, $T=300$ К) фотодиодов с тремя квантовыми ямами в активной области, что соответствует величине быстродействия $\tau=75$ пс в

случае ограничения быстродействия RC -компонентой, частотной полосе пропускания $\Delta f \approx 5$ ГГц.

Проанализированы схемы эквивалентных ёмкостей гетероструктур с одной и тремя квантовыми ямами. Показано, что увеличение числа квантовых ям $\text{AlSb/InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{AlSb}$ приводит к появлению дополнительных ёмкостей, образованных барьерами квантовых ям, в эквивалентных схемах меза-диодов. Показано, что в наногетероструктуре $p\text{-InAs/AlSb/InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{AlSb}/p\text{-GaSb}$ с глубокими квантовыми ямами увеличение их числа приводит к пропорциональному уменьшению удельной ёмкости структуры за счёт последовательного соединения ёмкостей p - n -переходов, образованных этими ямами. Действительно, в трёхъямном образце есть несколько последовательно соединённых p - n -переходов, образованных слоями p - AlSb и n - InAsSb . При этом, в первом приближении, быстродействие в таком фотодиоде не должно зависеть от размера чувствительной площадки.

Сравнивались электрические характеристики фотодиодов на основе структур с одной и тремя квантовыми ямами. Обнаружено, что значения темновых токов для трёхъямной структуры в 1.5-2.5 раза ниже, чем для структуры с одной квантовой ямой.

В разделе 5.2 изложены результаты исследований свойств фотодиодов, работающих в ИК-диапазоне, созданных на основе наногетероструктуры с глубокой квантовой ямой и узкозонным твёрдым раствором в активной области $\text{Al(As)Sb/InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al(As)Sb}$. Наногетероструктура была выращена на подложке n - GaSb .

Меза-диоды были изготовлены с диаметром чувствительной площадки $d \approx 500$ мкм. Максимум чувствительности при комнатной температуре наблюдался на длине волны $\lambda_{\text{max}} = 1.55$ мкм. Квантовая эффективность и удельная обнаружительная способность в максимуме спектра при комнатной температуре достигали величин $\eta = 0.6-0.7$ и $D^* = (5-7) \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}, соответственно.

Обнаружено, что в наногетероструктуре, выращенной на подложке n - GaSb , с глубокой квантовой ямой $\text{Al(As)Sb/InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al(As)Sb}$, электролюминесценция осуществляется при переходе носителей между первым электронным $E_{e_1} = 0.394$ эВ и первым дырочным $E_{h_1} = 0.029$ эВ уровнями с энергией излучаемого фотона $E_{h\nu} = 0.669$ эВ ($\lambda \approx 1.85$ мкм), а фоточувствительность в фотовольтаическом режиме обеспечивается за счёт переходов между двумя электронными уровнями $E_{e_2} = 1.22$ эВ и $E_{e_1} = 0.394$ эВ, что соответствует энергии фотона в максимуме спектральной чувствительности $E_{h\nu} = 0.826$ эВ ($\lambda \approx 1.55$ мкм).

Проведены исследования характеристик фотодиодов при обратном смещении до $U = -3$ В. При малых напряжениях смещения до $U = -1$ В, что соответствует напряжённости поля $E < 10^4$ В/см, и при воздействии излучения с

длинами волн $\lambda=1.1$ мкм и $\lambda=1.6$ (1.55) мкм наблюдалось увеличение фототока в 15 раз (рис. 8). Предложено объяснение наблюдаемому явлению – лавинное умножение носителей с коэффициентом $M=15$ генерированными носителями, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости.

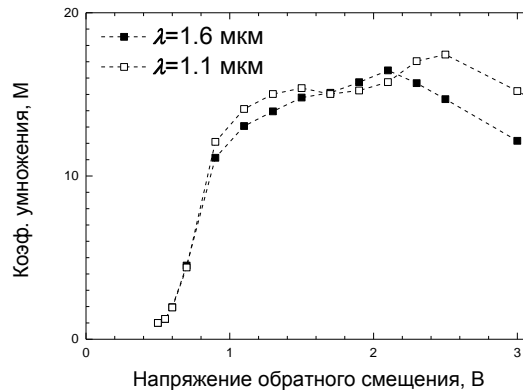


Рис. 8. Зависимость коэффициента умножения M от напряжения обратного смещения U .

Обнаружено, что в фотодиоде на основе наногетероструктуры n -GaSb/Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb/ p -GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области, лавинное умножение в слабом электрическом поле ($E < 10^4$ В/см) обеспечивается за счёт ударной ионизации электронами, дополнительно разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости $\Delta E_c = 1.27$ эВ между потенциальным барьером AlSb и первым электронным уровнем $E_{e1} = 0.394$ эВ. Обнаруженное явление подтвердило предположение об ударной ионизации носителей на скачке потенциала, которое приводило к суперлинейной зависимости оптической мощности электролюминесценции от возбуждающего тока в гетероструктуре на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb в активной области [10].

При комнатной температуре было обнаружено низкое значение ёмкости в интервале напряжения смещения до $U = -1$ В. Падение значений ёмкости, от $C_0 = 50$ пФ до единиц пФ при $U = -1$ В, может обеспечить высокое быстродействие таких фотодиодов.

Показано, что также как для фотодиодов с квантовыми ямами, описанными в разделе 5.1, эквивалентная ёмкостная схема фотодиодов на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb может быть представлена в виде цепочки последовательно соединённых ёмкостей.

В разделе 5.3 приведены основные выводы главы 5.

Основные положения диссертации отражены в следующих научных публикациях:

- 1А. Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Куницына Е.В., Дюделев В.В., Гаджиев И.М., Дерягин А.Г., Гребенщикова Е.А., Коновалов Г.Г., Михайлова М.П., Ильинская Н.Д., Кучинский В.И., Яковлев Ю.П. Быстродействующие $p-i-n$ -фотодиоды для спектрального диапазона 0.9-2.4 μm // *Письма в ЖТФ*. 2010 г., Т. 36, 9, стр. 43-49.
- 2А. Шерстнев В.В., Старостенко Д.А., Андреев И.А., Коновалов Г.Г., Ильинская Н.Д., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П. Фотодиоды на основе гетероструктур $\text{InAs/InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$ для спектрального диапазона 2.5-4.9 μm // *Письма в ЖТФ*. 2011 г., Т. 37, 1, стр. 11-17.
- 3А. Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Алексеев П.А., Андреев И.А., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Серебренникова О.Ю., Яковлев Ю.П. Фотодиоды с расширенным спектральным диапазоном 1.5-4.8 μm на основе гетероструктур $\text{InAs/InAs}_{0.88}\text{Sb}_{0.12}/\text{InAsSbP}$, работающие при комнатной температуре // *Письма в ЖТФ*, 2011 г., Т. 37, 19 стр. 95-103.
- 4А. Михайлова М.П., Андреев И.А., Моисеев К.Д., Иванов Э.В., Коновалов Г.Г., Михайлов М.Ю., Яковлев Ю.П. Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb в активной области для среднего инфракрасного диапазона // *ФТП*, 2011 г., Т. 45, 2. стр. 251-255.
- 5А. Konovalov G.G., Mikhailova M.P., Andreev I.A., Moiseev K.D., Ivanov E.V., Mikhailov M.Yu., Yakovlev Yu.P. Photovoltaic Detector Based on Type II Heterostructure with Deep AlSb/InAsSb/AlSb Quantum Well in the Active Region for the Mid-Infrared Spectral Range // *J. Phys.: Conf. Ser.*, v. 461 ArtNo: #012026 (2013) IOP PUBLISHING ISSN: 1742-6588 15th Russian Youth Conference on Physics and Astronomy (PhysicA.SPb) 23–24 October 2012, St Petersburg, Russia.
- 6А. Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Ильинская Н.Д., Яковлев Ю.П. Повышение квантовой эффективности фотодиодов за счёт изменения направления световых потоков в гетероструктуре $\text{InAs/InAsSb/InAsSbP}$ // *Письма ЖТФ*, 2012 г., Т. 38, 10, стр. 43-49.
- 7А. Андреев И.А., Серебренникова О.Ю., Соколовский Г.С., Дюделев В.В., Ильинская Н.Д., Коновалов Г.Г., Куницына Е.В., Яковлев Ю.П. Быстродействующие фотодиоды для средней инфракрасной области спектра 1.2-2.4 μm на основе гетероструктур $\text{GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb}$ с полосой пропускания 2-5 ГГц // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 8, стр. 1109-1115.
- 8А. Михайлова М.П., Андреев И.А., Иванов Э.В., Коновалов Г.Г., Гребенщикова Е.А., Яковлев Ю.П., Hulicius E., Hospodkova A., Pangrac Y. Фотоэлектрические и люминесцентные свойства наногетероструктур на основе GaSb с глубокой квантовой ямой $\text{Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb}$,

выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 8, стр. 1037-1042.

9А. Именков А.Н., Гребенщикова Е.А., Старостенко Д.А., Шерстнев В.В., Коновалов Г.Г., Андреев И.А., Яковлев Ю.П. Повышение квантовой чувствительности фотодиодов на основе гетероструктуры InAs/InAsSb/InAsSbP // *ФТП*, 2013 г., Т. 47, 5, стр. 690-695.

Список литературы

1. **Kelemen, Márk T., et al., et al.** Diode laser systems for 1.8 to 2.3 μm wavelength range. *Proc. of SPIE*. 2010, Vol. 7686, 20, pp. 76860N-1-76860N-8. doi: 10.1117/12.850745.
2. **Chen, J., et al., et al.** Type-I GaSb based diode lasers operating at room temperature in 2 to 3.5 μm spectral region. *Proc. of SPIE*. May 4, 2010, Vol. 7686, pp. 76860S-1-76860S-5. doi:10.1117/12.852208.
3. **Mu, Xiaodong, Meissner, Helmuth and Lee, Huai-Chuan.** High-efficiency high-power 2.097- μm Ho:YAG laser pumped mid-infrared ZGP optical parametric oscillation. *Proc. of SPIE*. May 4, 2010, Vol. 7686, pp. 76860T-1-76860T-7. doi:10.1117/12.851507.
4. **Bowers, J. E., et al., et al.** High-speed GaInAsSb/GaSb pin-photodetectors for wavelengths to 2.3 μm . *Electr.Let.* 1986, Vol. 22, 3, pp. 137-139.
5. **Srivastava, A. K., et al., et al.** High performance GaInAsSb/GaSb p-n photodiodes for the 1.8-2.3 μm wavelengths. *Applied Physics Letters*. April 7, 1986, Vol. 48, 14, pp. 903-904. doi: 10.1063/1.96653.
6. **Shellenbarger, Zane, et al., et al.** GaInAsSb and InAsSbP photodetectors for mid-Infrared wavelengths. *Proc. of SPIE*. 1997, Vol. 2999, pp. 25-33. doi: 10.1117/12.271198.
7. **Gao, H. H., Krier, A. and Sherstnev, V. V.** Room-temperature InAs_{0.89}Sb_{0.11} photodetectors for CO detection at 4.6 μm . *Applied Physics Letters*. August 7, 2000, Vol. 77, 6, pp. 872-874. doi: 10.1063/1.1306656.
8. **Joshi, Abhay, Datta, Shubhashish and Lange, Mike.** 2.2 Micron, Uncooled, InGaAs Photodiodes and Balanced Photoreceivers up to 25 GHz Bandwidth. [ed.] Bjørn F. Andresen, et al., et al. *Proc. of SPIE*. 2013, Vol. 8704, pp. 87042G-1-87042G-8. doi: 10.1117/12.2015593.
9. **Joshi, Abhay M, Heine, Frank and Feifel, Thomas.** Rad-hard, Ultra-fast, InGaAs Photodiodes for Space Applications. [ed.] Richard T. Howard and Robert D. Richards. *Proc. of SPIE*. 2006, Vol. 6220, pp. 622003-1-622003-14. doi: 10.1117/12.666055.
10. **Калинина, К. В., и др., и др.** Суперлинейная электролюминесценция в гетероструктурах на основе GaSb с высокими потенциальными барьерами. [ред.] Л. В. Шаронова. *ФТП*. 2013 г., Т. 47, 1, стр. 75-82.