

На правах рукописи



ПЕТУХОВ Андрей Александрович

Высокотемпературные светодиоды для среднего ИК-диапазона на основе узкозонных гетероструктур соединений A^3B^5

Специальность
01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
2013

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

Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук, проф., Яковлев Юрий Павлович
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук)

Официальные оппоненты:
доктор физ.-мат. наук, проф., Иванов-Омский Владимир Иванович
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук)

доктор физ.-мат. наук, проф., Кузнецов Владимир Владимирович
(Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»)

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

Защита состоится «17» октября 2013 г. в 11.30 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:
Санкт-Петербург, Политехническая улица, д.26

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

Автореферат разослан «16» сентября 2013 г.

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



Л.М. Сорокин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На протяжении последних десятилетий в ФТИ им. А.Ф. Иоффе ведутся исследования, направленные на создание светодиодов для среднего инфракрасного диапазона на основе соединений A^3B^5 . Спектральная область 1.5-5.0 мкм актуальна для решения задач в области газового анализа, экологического мониторинга, промышленной безопасности и неинвазивной медицинской диагностики, поскольку в данном спектральном диапазоне находятся характеристические полосы поглощения многих органических и неорганических веществ (метана, аммиака, ацетона, воды, монооксида и диоксида углерода, сероводорода, азота, и т.д.) [1-4].

Для решения многих прикладных задач необходимо обеспечить стабильную работу и заданные технические характеристики светодиодов при повышенных температурах: вплоть до 425 К (150°C). Однако, исследование светодиодных гетероструктур для средней инфракрасной области спектра, как правило, ограничено диапазоном температур от 77 К до 300 К. На данный момент комплексного изучения высокотемпературной электролюминесценции светодиодных гетероструктур на основе соединений A^3B^5 не проводилось, поэтому отсутствует понимание физических ограничений на эффективность излучательной рекомбинации при повышенных температурах в диапазоне от 300 К до 470 К (25-200°C). Поэтому представляет значительный научный и практический интерес исследование люминесцентных и рекомбинационных свойств светодиодных гетероструктур на основе соединений A^3B^5 при повышенных температурах. Также актуальна задача увеличения квантовой эффективности и мощности излучения светодиодов, излучающих в спектральной области 4-5 мкм [5,6].

Цель работы: Исследование люминесцентных, рекомбинационных и электрических свойств светодиодных гетероструктур на основе гетеропереходов I и II типа для средней инфракрасной области спектра (1.6-5.0 мкм) в системах твердых растворов GaSb-InAs-AlSb и InAs-InSb-InP при повышенных температурах в диапазоне от 300 К до 470 К (25-200°C).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Исследование люминесцентных и электрических свойств, процессов излучательной и безызлучательной рекомбинации в симметричных и несимметричных светодиодных гетероструктурах на основе гетеропереходов первого (n -GaInAsSb/ p -AlGaAsSb) и второго типа (n -GaInAsSb/ p -GaSb), выращенных методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), для спектральной области 1.6-2.4 мкм в диапазоне температур от 90 К до 470 К.

- Исследование люминесцентных, рекомбинационных и электрических характеристик длинноволновых светодиодных гетероструктур ($\lambda_{max}=3-5$ мкм), выращенных методами ЖФЭ и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ), на подложке n -InAs с использованием узкозонных твердых растворов $InAs_{1-x}Sb_x$ ($0 < x < 0.12$) в качестве активной области и широкозонных твердых растворов InAsSbP для ограничения носителей заряда в диапазоне температур от 300 К до 470 К.

- Исследование высокотемпературной электролюминесценции изотипной $n\text{-GaSb}/n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-InGaAsSb}$ и анизотипной $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ светодиодных гетероструктур, выращенных методом ЖФЭ, с узкозонной активной областью $n\text{-InGaAsSb}$ ($E_g=0.28$ эВ) и высоким потенциальным барьером в зоне проводимости ($\Delta E_C=0.8\div 1.1$ эВ) в зависимости от тока накачки ($0<I<2.5$ А) и температуры ($300\text{ К}<T<470\text{ К}$).

Научная новизна результатов, полученных в работе состоит в следующем:

- Исследованы люминесцентные и рекомбинационные свойства светодиодных гетероструктур на основе GaSb с четверным твердым раствором Ga_xInAsSb ($0.84<x<0.95$) в активной области ($\lambda_{max}=1.6\text{-}2.4$ мкм) в широком диапазоне температур от 90 К до 470 К. Установлено, что при повышении температуры мощность излучения экспоненциально уменьшается вследствие увеличения скорости безызлучательной оже-рекомбинации СННС-типа (рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением тяжелой дырки в спин-орбитально отщепленную зону) и уменьшения скорости излучательной рекомбинации.

- Исследованы люминесцентные и рекомбинационные свойства светодиодных гетероструктур на основе $n\text{-InAs}$ с твердым раствором $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0<x<0.12$) в активной области для спектрального диапазона 3-5 мкм при повышенных температурах в диапазоне от 300 К до 470 К. Показано, что экспоненциальное уменьшение мощности излучения при увеличении температуры обусловлено действием безызлучательной оже-рекомбинации СНСС-типа (рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением электрона зоны проводимости) и “резонансной” рекомбинации СННС-типа, когда ширина запрещенной зоны активной области близка к энергии спин-орбитального расщепления валентной зоны.

- Установлено, что при повышении температуры в диапазоне от 300 К до 470 К ширина запрещенной зоны E_g твердых растворов InAsSb_x ($0<x<0.12$) и Ga_xInAsSb ($0.84<x<0.95$) линейно уменьшается пропорционально $dE_g/dT=-(1.5\div 3.3)\cdot 10^{-4}$ эВ/К и $dE_g/dT=-(3.6\div 3.9)\cdot 10^{-4}$ эВ/К соответственно.

- Впервые обнаружено увеличение мощности излучения светодиодной гетероструктуры $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ с высоким потенциальным барьером в зоне проводимости, в которой имеет место ударная ионизация, инициируемая разогретыми на скачке потенциала электронами, с ростом температуры. Установлено, что при нагреве от 300 К до 340 К происходит сверхлинейное, а при $T>340\text{ К}$ – линейное увеличение мощности излучения. Показано, что рост мощности излучения при увеличении температуры обусловлен снижением пороговой энергии ударной ионизации, вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны активной области $n\text{-InGaAsSb}$.

- Показано, что в светодиодной гетероструктуре $n\text{-GaSb}/n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ II типа при протекании тока в прямом направлении происходит термоэлектрическое охлаждение $p\text{-}n$ -перехода и активной области $n\text{-Ga}_{0.9}\text{InAsSb}$ ($E_g=0.62$ эВ при $T=300\text{ К}$).

Практическая значимость работы:

- Предложен новый способ увеличения мощности излучения инфракрасных светодиодов для спектрального диапазона 3-5 мкм, предназначенных для работы при

повышенных температурах ($T=300\div 470$ К), за счет использования гетероструктур типа $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ с высоким потенциальным барьером в зоне проводимости на гетерогранице $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}$ и узкозонной активной областью $n\text{-InGaAsSb}$.

- Впервые показано, что светодиоды на основе $n\text{-GaSb}$ для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм с активной областью $n\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ ($0.84 < x < 0.95$, $0.57 \text{ эВ} < E_g < 0.67 \text{ эВ}$) и широкозонными ограничительными слоями AlGaAsSb могут эффективно работать как при комнатной температуре, так и при повышенных температурах вплоть до $T \approx 440$ К.

- Разработан оригинальный метод измерения температуры $p\text{-}n$ -перехода светоизлучающих диодов, который может быть использован в электрических схемах температурной компенсации оптических адсорбционных сенсоров.

- Установлено, что использование буферного полуизолирующего слоя $p\text{-GaSb}$ в светодиодной гетероструктуре $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-Ga}_{0.945}\text{InAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ для предотвращения утечки дырок из активной области $n\text{-Ga}_{0.945}\text{InAsSb}$ эффективно вплоть до температуры $T \approx 440$ К, выше которой увеличение собственной концентрации носителей заряда с ростом температуры стимулирует протекание оже-процессов и приводит к резкому падению мощности излучения при нагреве гетероструктуры.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. В светодиодных гетероструктурах на основе $n\text{-GaSb}$ для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм с узкозонной активной областью $n\text{-Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ ($0.84 < x < 0.95$, $0.57 \text{ эВ} < E_g < 0.67 \text{ эВ}$) и широкозонными ограничительными слоями AlGaAsSb при повышении температуры в диапазоне от 300 К до 470 К мощность излучения экспоненциально уменьшается, что обусловлено ростом скорости безызлучательной оже-рекомбинации СННС-типа (рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением второй дырки в спин-орбитально отщепленную зону) в области температур $T=300\text{-}340$ К и снижением скорости излучательной рекомбинации в области температур $T=300\text{-}470$ К.

2. В светодиодных гетероструктурах на основе $n\text{-InAs}$, излучающих в спектральном диапазоне 3.3-4.5 мкм, с узкозонной активной областью $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 < x < 0.12$, $0.26 \text{ эВ} < E_g < 0.35 \text{ эВ}$) и широкозонными ограничительными слоями на основе InAsSbP при увеличении температуры в интервале от 300 К до 470 К экспоненциальное уменьшение мощности излучения обусловлено действием двух безызлучательных оже-процессов: “резонансного” СННС-процесса, когда ширина запрещенной зоны активной области близка к энергии спин-орбитального расщепления валентной зоны, и СНСС-процесса (рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением электрона зоны проводимости), при этом вклад последнего процесса в суммарную скорость безызлучательной рекомбинации при повышении температуры увеличивается.

3. В светодиодных гетероструктурах на основе антимонида галлия $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$, излучающих в спектральном диапазоне 4.3-4.5 мкм, с высоким потенциальным барьером в зоне проводимости на гетерогранице $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}$ ($\Delta E_C = 0.79 \text{ эВ}$), существенно превышающим ширину запрещенной зоны активной области InGaAsSb ($E_g = 0.284 \text{ эВ}$, $T=300$ К), в которой при комнатной температуре имеет место суперлинейная люминесценция и увеличение оптической мощности за счет создания

дополнительных электронно-дырочных пар при ударной ионизации электронами, разогретыми на скачке потенциала ΔE_c , при повышении температуры в диапазоне от 300 К до 340 К наблюдается сверхлинейное, а при температуре свыше 340 К – линейное увеличение мощности излучения, что обусловлено уменьшением пороговой энергии ударной ионизации электронов, вследствие температурного сужения запрещенной зоны активной области.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах: IX международная научная конференция «Лазерная физика и оптические технологии» (30 мая - 2 июня 2012, г. Гродно, республика Беларусь); Четырнадцатая всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектроники (26-30 ноября 2012, г. Санкт-Петербург); VII международная конференция "Фундаментальные проблемы оптики" ФПО-2012 (15-19 октября 2012, г. Санкт-Петербург); Российская молодежная конференция по физике и астрономии для молодых ученых «ФизикА.СПб» (24–25 октября 2012, г. Санкт-Петербург); XI Российская конференция по физике полупроводников (16-20 сентября 2013, г. Санкт-Петербург).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 работах, библиографический список публикаций приведен в конце диссертации.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 192 страницы, включая 124 рисунка, 5 таблиц. Список цитируемой литературы включает 101 наименование.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цели, отмечены научная новизна и практическая ценность, изложены представляемые к защите научные положения.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена описанию свойств полупроводниковых соединений A^3B^5 , электрических и люминесцентных характеристик светодиодных гетероструктур на их основе.

В §1.1 описаны основные свойства бинарных соединений GaSb, InAs и InSb и твердых растворов на их основе InAsSb и GaInAsSb, использующихся при создании оптоэлектронных приборов для средней инфракрасной области спектра в качестве материалов активной области. Приведены основные параметры зонной структуры полупроводниковых соединений AlGaAsSb и InAsSbP, которые применяются в качестве широкозонных ограничительных слоев в светодиодных гетероструктурах для спектрального диапазона 2-5 мкм.

В §1.2 рассмотрены электрические и люминесцентные свойства гетероструктур на основе соединений A^3B^5 .

Подпараграф 1.2.1 посвящен описанию механизмов протекания тока в гетеропереходах и особенностям их вольт-амперных характеристик. В **подпараграфе 1.2.2**

сообщается о люминесцентных свойствах гетероструктур, особенностях излучательной и безызлучательной рекомбинации носителей заряда в гетероструктурах в зависимости от типа гетероперехода.

Твердые растворы в системах GaSb-InAs-AlSb и InAs-InSb-InP образуют гетеропереходы I и II типа. В гетероструктурах на основе гетеропереходов I типа электроны и дырки локализируются и рекомбинируют в узкозонном слое. В случае гетеропереходов II типа носители заряда локализируются по обе стороны границы раздела в самосогласованных потенциальных ямах: электроны в узкозонном материале, а дырки в широкозонном, поэтому рекомбинационный процесс происходит преимущественно посредством туннелирования носителей заряда через интерфейс с энергией излучения меньше ширины запрещенной зоны узкозонного материала.

Помимо излучательной рекомбинации в узкозонных гетероструктурах на основе соединений A^3B^5 существенную роль играет безызлучательная оже-рекомбинация носителей заряда, лимитирующая работу оптоэлектронных приборов при повышенных температурах. Для твердых растворов на основе GaSb и InAs характерна оже-рекомбинация СНСС-типа (рекомбинация электронно-дырочной пары с передачей энергии второму электрону зоны проводимости) и СННС-типа (рекомбинация электронно-дырочной пары с возбуждением тяжелой дырки в спин-орбитально отщепленную зону) [7].

В однородных полупроводниках, в силу ограничений, накладываемых законами сохранения энергии и импульса на систему взаимодействующих частиц, оже-процессы являются пороговыми. В этом случае скорость безызлучательной рекомбинации при повышении температуры экспоненциально увеличивается [7]. Однако в гетероструктурах вблизи интерфейса при низких температурах ($T < 300$ К) возможны беспороговые механизмы оже-рекомбинации, при этом зависимость скорости безызлучательной рекомбинации от температуры носит степенной характер [8,9].

В §1.3 рассмотрены результаты работ по исследованию электролюминесцентных свойств светодиодов на основе антимонида галлия с активной областью GaInAsSb для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм, а также светодиодов на основе арсенида индия с активной областью InAsSb для спектрального диапазона 3-5 мкм.

Параграф 1.4 посвящен обзору немногочисленных экспериментальных исследований электролюминесцентных свойств светодиодов среднего инфракрасного диапазона при повышенных температурах в интервале от 290 К до 455 К.

Вторая глава является методической и содержит описание методов жидкофазной и газофазной эпитаксии, экспериментальных установок для измерения спектральных и вольт-амперных характеристик светодиодов в широком диапазоне температур от 90 К до 525 К ($-180^\circ\text{C} < T < 250^\circ\text{C}$). Рассмотрена оригинальная методика определения локальной температуры светодиодов в зависимости от режима работы: амплитуды, длительности и частоты следования импульсов тока.

Третья глава посвящена исследованию симметричных и несимметричных светодиодных гетероструктур на основе гетеропереходов первого (n -GaInAsSb/ p -AlGaAsSb) и второго типа (n -GaInAsSb/ p -GaSb) для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм в расширенном диапазоне температур от 90 К до 470 К.

В §3.1 представлены результаты исследования люминесцентных и электрических свойств гетероструктур II типа с активной областью на основе $Ga_xInAsSb$ ($0.84 < x < 0.95$, $0.57 \text{ эВ} < E_g < 0.67 \text{ эВ}$) [A1, A2, A3].

В §3.1.1 рассмотрены свойства несимметричных светодиодных гетероструктур $n-GaSb/n-Ga_xInAsSb/p-GaSb/p-AlGaAsSb$, выращенных методом ЖФЭ, с активной областью состава $x=0.845$ и 0.89 . При комнатной температуре спектры излучения светодиодов содержали только межзонную полосу излучения с максимумом при $h\nu_{max}=0.570 \text{ эВ}$ ($\lambda_{max}=2.18 \text{ мкм}$) для состава $x=0.845$ и при $h\nu_{max}=0.608 \text{ эВ}$ ($\lambda_{max}=2.04 \text{ мкм}$) для $x=0.89$. С ростом температуры, вследствие сужения запрещенной зоны активной области, спектры электролюминесценции смещались в область больших длин волн. При этом зависимость положения максимума электролюминесценции $h\nu_{max}$ от температуры носила линейный характер. На основе экспериментальных данных, исходя из выражения для прямых межзонных излучательных переходов $E_g=h\nu_{max}-kT/2$ [10], был рассчитан температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны при повышенных температурах ($300 \text{ К} < T < 470 \text{ К}$): $dE_g/dT = -3.90 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ и $-3.71 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ для твердого раствора $Ga_xIn_{1-x}AsSb$ с содержанием галлия $x=0.845$ и 0.90 соответственно.

При увеличении температуры от 290 К до 470 К мощность электролюминесценции P экспоненциально уменьшалась пропорционально $P \propto \exp(-E_a/kT)$, где E_a – характеристическая энергия (рис.1). На температурной зависимости оптической мощности $P = f(T)$ для исследованных гетероструктур можно выделить три участка, характеризующиеся разным значением энергии E_a : первый участок в диапазоне от 290 К до 340 К с $E_a \sim 0.1 \text{ эВ}$, второй участок в области $360 \text{ К} < T < 430 \text{ К}$ с $E_a \sim 0.2 \text{ эВ}$ и третий при температуре выше $T > 440 \div 450 \text{ К}$ где наблюдался резкий спад мощности излучения ($E_a > 1 \text{ эВ}$).

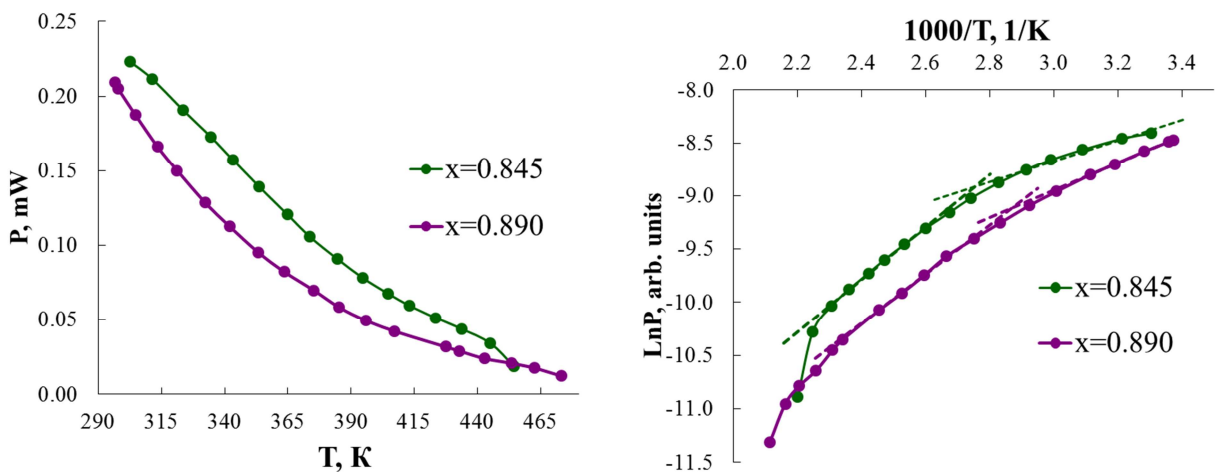


Рис.1. Мощность излучения светодиодных гетероструктур $n-GaSb/n-Ga_xInAsSb/p-GaSb/p-AlGaAsSb$ в зависимости от температуры

В §3.1.1 показано, что в активной области из твердого раствора $Ga_xInAsSb$ ($0.89 < x < 0.845$) реализуется преимущественно два канала рекомбинации носителей заряда: излучательная рекомбинация и безызлучательная оже-рекомбинация СННС-типа

(аннигиляция электронно-дырочной пары сопровождается возбуждением тяжелой дырки в спин-орбитально отщепленную зону). При этом экспоненциальное уменьшение мощности обусловлено ростом скорости безызлучательного “резонансного” оже-процесса СННС-типа в области температур $T=290\div 340$ К и снижением скорости излучательной рекомбинации в области температур $T=290\div 470$ К

В работе [11] для предотвращения утечки дырок из активной области $n\text{-GaInAsSb}$ и увеличения мощности электролюминесценции было предложено использовать гетероструктуру $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ с дополнительным полуизолирующим слоем из $p\text{-GaSb}$. Поскольку данный метод может быть эффективен и при повышенных температурах были исследованы электролюминесцентные свойства подобной гетероструктуры с активной областью на основе твердого раствора $\text{Ga}_{0.945}\text{InAsSb}$ ($E_g=0.67$ эВ при $T=300$ К).

При температуре $T=300$ К энергия фотона в максимуме спектра излучения гетероструктуры $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-Ga}_{0.945}\text{InAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ составляла $h\nu_{max}=0.681$ эВ ($\lambda_{max}=1.82$ мкм), а при нагреве уменьшалась пропорционально $d h\nu_{max}/dT=4.45\cdot 10^{-4}$ эВ/К. При этом характер изменения мощности излучения в зависимости от температуры был аналогичен случаю описанных выше светодиодных гетероструктур $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$, включая участок резкого спада мощности электролюминесценции при $T>440$ К (рис.2). Анализ зонной диаграммы гетероструктуры и параметров твердого раствора $n\text{-Ga}_{0.945}\text{InAsSb}$ показал, что использование дополнительного полуизолирующего слоя $p\text{-GaSb}$ для предотвращения утечки дырок из активной области эффективно и при повышенных температурах вплоть до 470 К. Однако увеличение собственной концентрации носителей заряда в активной области гетероструктуры $n\text{-GaInAsSb}$ при повышении температуры стимулирует протекание безызлучательных оже-процессов СНСС и СННС-типа и приводит к резкому спаду мощности излучения при $T>440$ К.

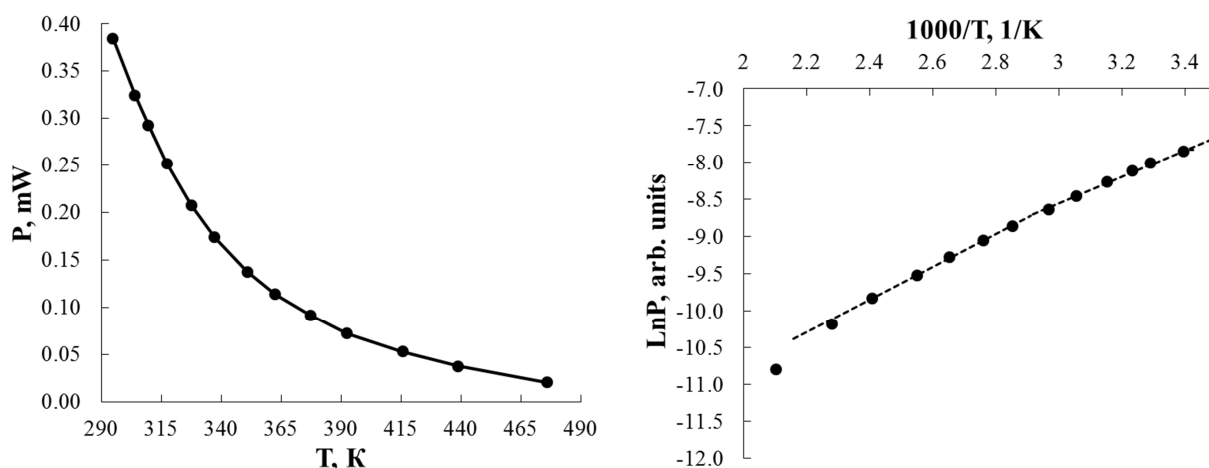


Рис.2. Зависимость мощности излучения гетероструктуры $n\text{-GaSb}/p\text{-GaSb}/n\text{-Ga}_{0.945}\text{InAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ от температуры

В §3.1.2, §3.2 и §3.3 представлены результаты исследования электрических и люминесцентных свойств симметричных гетероструктур на основе гетероперехода I типа $n\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-Ga}_{0.9}\text{InAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ и на основе гетероперехода II типа $n\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}/n\text{-Ga}_{0.9}\text{InAsSb}/p\text{-GaSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ в диапазоне температур от 90 К до 470 К. При повышенных температурах ($T > 290$ К) электролюминесцентные свойства симметричных и рассмотренных выше несимметричных светодиодных гетероструктур подобны, причем уменьшение мощности излучения не зависит от типа гетероперехода и определяется исключительно объемными рекомбинационными процессами.

В §3.4 представлены результаты сравнительного исследования локальной температуры активной области $n\text{-Ga}_{0.9}\text{InAsSb}$ и $p\text{-}n$ -перехода симметричных светодиодных гетероструктур $n\text{-GaSb}/n\text{-AlGaAsSb}/n\text{-GaInAsSb}/(p\text{-GaSb})/p\text{-AlGaAsSb}$ на основе гетероперехода I и II типа в зависимости от режима работы: амплитуды ($I = 0 \div 400$ мА) и длительности ($\tau = 0.6 \div 20$ мкс) питающих импульсов тока (при частоте $f = 16$ кГц). В гетероструктуре II типа при протекании тока в прямом направлении обнаружено и исследовано термоэлектрическое охлаждение $p\text{-}n$ -перехода $n\text{-GaInAsSb}/p\text{-GaSb}$ [12].

В четвертой главе диссертации представлены результаты исследования высокотемпературных электрических и люминесцентных свойств ($T = 290 \div 470$ К) светодиодных гетероструктур на основе $n\text{-InAs}$, излучающих в спектральном диапазоне 3-5 мкм, с узкозонной активной областью $n\text{-InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ ($0 < x < 0.12$) и широкозонными ограничительными слоями на основе InAsSbP [A4].

В § 4.1 рассмотрены электрические и спектральные свойства светодиодов на основе гетероструктуры $n\text{-InAs}/p\text{-InAs}/p\text{-InAs}_{0.48}\text{Sb}_{0.17}\text{P}_{0.50}$ ($\lambda_{\max} \sim 3.4$ мкм при $T = 300$ К) в двух конструктивных исполнениях: с верхним точечным контактом и типа *flip-chip* [A5, A6, A7]. Существенных отличий в электрических и люминесцентных свойствах двух типов светодиодов во всем исследованном диапазоне температур (290 ÷ 470 К) обнаружено не было. При комнатной температуре максимум спектра излучения находился при $h\nu_{\max} = 0.368$ эВ ($\lambda_{\max} = 3.37$ мкм), а мощность излучения составляла $P = 40$ мкВт. При увеличении температуры спектр излучения светодиода смещался в область больших длин волн, при этом зависимость положения максимума электролюминесценции $h\nu_{\max}$ от температуры носила линейный характер. Из экспериментальных данных был рассчитан температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны арсенида индия для области повышенных температур: $dE_g/dT = -3.29 \cdot 10^{-4}$ эВ/К при $290 \text{ К} < T < 470 \text{ К}$.

При увеличении температуры мощность излучения экспоненциально уменьшалась, при этом характеристическая энергия $E_a = d(\ln P)/(1/kT)$ монотонно увеличивалась от 0.15 эВ при $T = 290$ К до 0.50 эВ при $T = 440$ К. Дальнейший нагрев гетероструктуры от 440 К до 470 К сопровождался резким падением мощности излучения: величина E_a возрастала от 0.60 эВ до 2.75 эВ.

В § 4.2 сообщается о результатах сравнительного исследования локального разогрева $p\text{-}n$ -перехода светодиодов на основе гетероструктуры $n\text{-InAs}/p\text{-InAs}/p\text{-InAsSbP}$ в двух вариантах конструктивного исполнения, описанных в § 4.1.

В § 4.3 рассмотрены спектральные и электрические свойства симметричной гетероструктуры с тройным твердым раствором в активной области $n\text{-In}_x\text{As}_{1-x}\text{Sb}$

($x=0.09-0.093$) и широкозонными ограничительными слоями из $\text{InAs}_{0.55}\text{Sb}_{0.15}\text{P}_{0.30}$ ($\lambda_{max}=3.85-3.95$ мкм при $T=290$ К) [A8].

При комнатной температуре протекание тока через гетероструктуру определялось туннельным механизмом независимо от полярности приложенного напряжения. По этой причине обратная ветвь вольт-амперной характеристики не имела участка насыщения тока, а прямая ветвь хорошо описывалась эмпирическим выражением: $I \propto \exp(AU)\exp(BT)$, где A и B – константы [13]. При увеличении температуры в прямой ветви вольт-амперной характеристики проявлялась термическая эмиссия носителей заряда: дырки из активной области $n\text{-InAsSb}$ частично уходили в широкозонный слой $n\text{-InAsSbP}$. При этом в обратной ветви вольт-амперной характеристики появлялась диффузионная составляющая тока, вклад которой в суммарный ток через гетероструктуру увеличивался с ростом температуры.

Спектры излучения рассматриваемой гетероструктуры имели уширение в области коротковолнового крыла, вызванное излучательной рекомбинацией носителей заряда в широкозонном слое $n\text{-InAs}_{0.55}\text{Sb}_{0.15}\text{P}_{0.30}$ [14]. При нагреве от 290 К до 470 К вклад коротковолновой компоненты спектра в интегральную оптическую мощность увеличивался, что приводило к немонотонному характеру зависимости величины максимума электролюминесценции от температуры.

При повышении температуры мощность излучения экспоненциально уменьшалась, при этом характеристическая энергия E_a монотонно увеличивалась от 0.12 эВ при $T=290$ К до 0.50 эВ при $T=470$ К. В § 4.3 показано, что в светодиодных гетероструктурах с активной областью из InAsSb_x ($0 < x < 0.12$) экспоненциальное уменьшение мощности излучения обусловлено действием двух безызлучательных оже-процессов: СНСС-процесса, сопровождающегося возбуждением электрона зоны проводимости, и “резонансного” СННС-процесса, сопровождающегося возбуждением тяжелой дырки в зону проводимости. При увеличении температуры, а также с ростом концентрации антимионда индия в растворе InAsSb_x , вследствие увеличения пороговой энергии СННС-процесса и уменьшения пороговой энергии СНСС-процесса, скорость рекомбинации СНСС-типа увеличиваться, в то время как СННС-типа – уменьшаться.

В § 4.4 приводятся результаты исследования электролюминесцентных и вольт-амперных характеристик симметричной светодиодной гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}_{0.06}/n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}_{0.12}/p\text{-InAsSbP}$ с активной областью $n\text{-InAsSb}_{0.12}$ ($E_g=0.26$ эВ при $T=290$ К), выращенной методом жидкофазной эпитаксии. При комнатной температуре максимум спектра излучения находился при $h\nu_{max}=0.276$ эВ ($\lambda_{max}=4.5$ мкм), мощность излучения составляла $P=0.95$ мВт. При повышении температуры от 290 К до 470 К спектр излучения смещался в область больших длин волн, что соответствовало сужению запрещенной зоны активной области $\text{InAsSb}_{0.12}$ пропорционально $dE_g/dT = -1.52 \cdot 10^{-4}$ эВ/К, при этом мощность излучения экспоненциально уменьшалась ($P_{290K}/P_{470K} \approx 70$ раз). Причем при температуре $T \approx 390$ К характеристическая энергия $E_a = d(\ln P)/d(1/kT)$ увеличивалась от 0.14 до 0.65 эВ (рис.3, слева). В § 4.4 показано, что увеличение энергии E_a при повышении температуры обусловлено переходом твердого раствора активной области

InAsSb_{0.12} в область собственной проводимости: рост концентрации носителей заряда в InAsSb_{0.12} стимулирует протекание безызлучательных оже-процессов СНСС и СННС-типа и приводит к резкому спаду мощности излучения при $T > 390$ К.

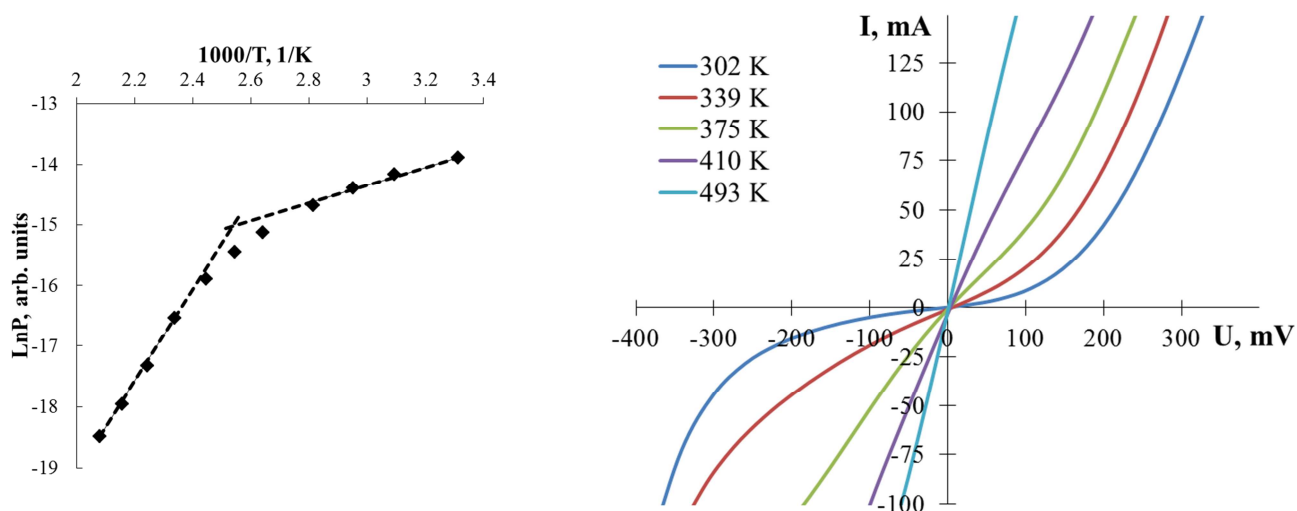


Рис.3. Зависимость мощности излучения светодиодной гетероструктуры $n\text{-InAs}/n\text{-InAsSb}_{0.06}/n\text{-InAsSbP}/n\text{-InAsSb}_{0.12}/p\text{-InAsSbP}$ от обратной температуры в полулогарифмических координатах (слева). Семейство вольт-амперных характеристик (справа)

При $T=290$ К прямая ветвь вольт-амперной характеристики имела диодный вид (рис.3, справа). При повышении температуры от 290 К до 420 К, вследствие увеличения собственной концентрации носителей заряда в активной области, напряжение отсечки U_{cut} , характеризующее высоту потенциального барьера p - n -перехода, линейно уменьшалось от 190 мВ до нуля. При температуре большей $T > 420$ К вольт-амперная характеристики принимала омический вид. При этом, несмотря на исчезновение p - n -перехода, при положительном смещении гетероструктура продолжала люминесцировать.

Пятая глава посвящена исследованию высокотемпературной электролюминесценции в светодиодных гетероструктурах на основе антимонида галлия с узкозонной активной областью $n\text{-InGaAsSb}$ ($E_g \sim 0.3$ эВ) и высоким потенциальным барьером в зоне проводимости ($\Delta E_c > E_g$, где ΔE_c – скачок потенциала в зоне проводимости, E_g – ширина запрещенной зоны активной области $n\text{-InGaAsSb}$), в которых, согласно работе [15] при температурах $T=77$ К и 300 К имела место суперлинейная люминесценция и увеличение оптической мощности за счет создания дополнительных электронно-дырочных пар при ударной ионизации электронами, разогретыми на скачке потенциала зоны проводимости [A9].

При комнатной температуре в спектре электролюминесценции гетероструктуры $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ ($\Delta E_c=0.79$ эВ, $E_g=0.284$ эВ при $T=300$ К) наблюдалось два пика: длинноволновый E_1 ($h\nu_{max}=0.28$ эВ), соответствующий излучательной рекомбинации в активной области гетероструктуры $n\text{-InGaAsSb}$, и коротковолновый E_2 ($h\nu_{max}=0.64$ эВ), обусловленный излучательной рекомбинацией в широкозонном слое $n\text{-GaSb}$ (рис.4).

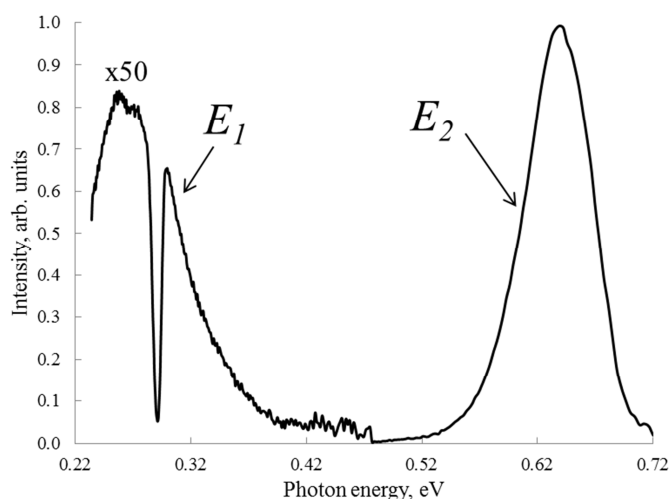


Рис.4. Спектр излучения гетероструктуры $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ при температуре $T=300\text{ K}$

В ходе исследований было обнаружено anomальное поведение мощности излучения длинноволновой компоненты спектра E_1 в зависимости от температуры: при нагреве в интервале температур от 290 К до 340 К наблюдалось сверхлинейное, а при температуре выше $T>340\text{ K}$ – линейное увеличение мощности излучения (рис.5). В тоже время при повышении температуры от 290 К до 340 К и токе накачки величиной $I=0.3\text{ A}$ мощность излучения коротковолновой компоненты спектра E_2 незначительно возростала, а при более высоких температурах ($340\text{ K} < T < 470\text{ K}$) – линейно уменьшалась.

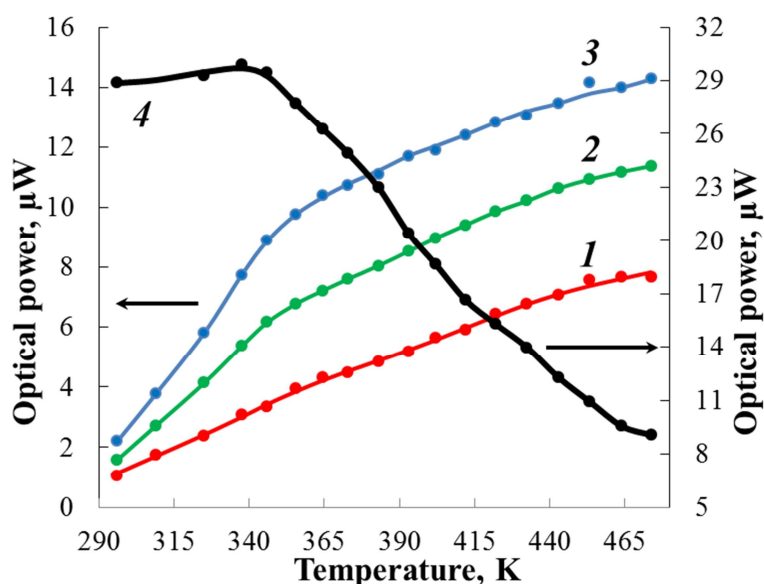


Рис.5. Зависимость мощности излучения длинноволновой полосы E_1 от температуры при нескольких значениях тока: 1 – 310 мА, 2 – 560 мА, 3 – 810 мА, и мощности коротковолновой полосы E_2 при токе 310 мА (4)

При $T=290\text{ K}$ ватт-амперная характеристика длинноволновой полосы E_1 имела явно выраженный сверхлинейный характер и хорошо аппроксимировалась степенной функцией

вида: $P = A \cdot I^B$, где A – подгоночный параметр, $B=1.54$ – показатель степени, характеризующий нелинейность электролюминесценции. В то же время, для коротковолновой полосы E_2 ватт-амперная характеристика имела более сложный характер. При токе меньшем $I < 1.2$ А мощность излучения E_2 сверхлинейно возрастала ($B=1.54$), а при увеличении тока свыше $I > 1.2$ А данная зависимость носила сублинейный характер.

При нагреве гетероструктуры вид ватт-амперных характеристик менялся. В случае длинноволновой компоненты спектра E_1 , повышение температуры сопровождалось уменьшением показателя степени B , и при $T > 330$ К зависимость мощности излучения от тока накачки носила сублинейный характер. В случае коротковолновой компоненты спектра E_2 , на фоне общего уменьшения мощности, ватт-амперная характеристика спрямлялась и при температуре $T > 330$ К была близка к линейной ($B = 1 \pm 0.1$).

Для объяснения полученных результатов рассмотрим зонную диаграмму данной гетероструктуры (рис.6). При приложении прямого смещения электроны из слоя n -GaSb, разогретые на скачке потенциала $\Delta E_c = \chi_{InGaAsSb} - \chi_{GaSb} = 0.79$ эВ (χ – электронное сродство), обладают энергией, превышающей ширину запрещенной зоны твердого раствора в ~ 2.8 раза, и поступают в узкозонный слой n -InGaAsSb, где посредством ударной ионизации могут создавать дополнительные дырки, участвующие в излучательной рекомбинации. Пороговая энергия ударной ионизации, инициируемая электронами, в узкозонном слое при $T=290$ К составляет $\varepsilon_{ie} = E_g [1 + m_e / (m_e + m_h)] = 0.30$ эВ (m_e и m_h – эффективные массы электронов и тяжелых дырок) [15]. Дырки, образуемые в узкозонном слое в процессе ударной ионизации, частично рекомбинирует с электронами, давая вклад в полосу E_1 , а также под действием электрического поля переходят в подложку n -GaSb, где локализуется в потенциальной яме на гетерогранице n -GaSb/ n -InGaAsSb и излучательно рекомбинирует с электронами, вызывая появление коротковолновой компоненты спектра E_2 (рис.6).

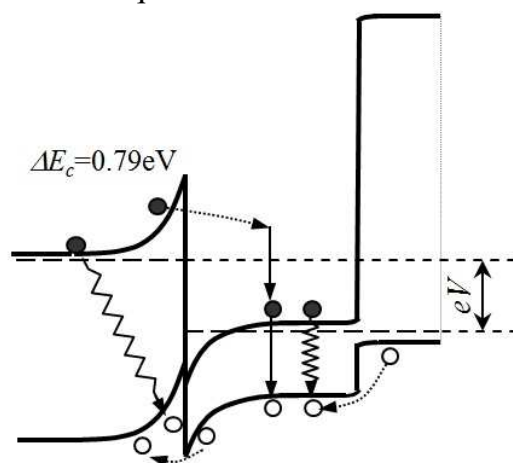


Рис.6. Зонная диаграмма гетероструктуры n -GaSb/ n -InGaAsSb/ p -AlGaAsSb при прямом смещении

При повышении температуры, вследствие сужения запрещенной зоны активной области, пороговая энергия ударной ионизации уменьшается от 0.30 эВ при $T=290$ К до 0.23 эВ при $T=470$ К [15,16], поэтому при нагреве гетероструктуры количество дырок, образуемых в узкозонном слое посредством ударной ионизации, увеличивается, что

приводит к росту скорости излучательной рекомбинации в n -InGaAsSb и мощности излучения длинноволновой компоненты спектра E_2 . Повышение температуры также сопровождается увеличением скорости безызлучательной оже-рекомбинации СНСС-типа: обратного процесса ударной ионизации инициируемой электронами. Потому при $T > 330$ К ватт-амперные характеристики длинноволновой компоненты спектра имеют сублинейный вид. В слое n -GaSb при комнатной температуре и увеличении тока накачки рост концентрации дырок, поступающих из активной области, стимулирует протекание безызлучательно СННС-процесса, поэтому характер зависимости мощности излучения от тока накачки меняется от сверхлинейного к сублинейному.

В заключении сформулированы основные результаты проведенных исследований:

1. Исследованы люминесцентные, рекомбинационные и электрические свойства симметричных и несимметричных светодиодных гетероструктур для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм на основе антимонида галлия с активной областью из твердого раствора $Ga_xInAsSb$ ($0.84 < x < 0.95$) в широком диапазоне температур от 90 К до 470 К. Установлено, что увеличение температуры сопровождается экспоненциальным уменьшением мощности излучения, обусловленное снижением скорости излучательной рекомбинации и влиянием “резонансного” СННС-процесса оже-рекомбинации.

2. Проведены сравнительные исследования локальной температуры p - n -перехода в симметричных светодиодных гетероструктурах первого n -GaSb/ p -AlGaAsSb/ n -Ga_{0.9}InAsSb/ p -AlGaAsSb и второго типа n -GaSb/ p -AlGaAsSb/ n -Ga_{0.9}InAsSb/ p -GaSb/ p -AlGaAsSb в зависимости от режима работы (амплитуды и длительности питающих импульсов тока). Установлено, что в гетероструктуре I типа перегрев p - n -перехода не превышает $\Delta T_{j-a} < 20$ К, а в гетероструктуре II типа, вследствие термоэлектрического охлаждения p - n -перехода, величина ΔT_{j-a} не превышает 10 К.

3. Исследованы люминесцентные, рекомбинационные и электрические свойства светодиодных гетероструктур на основе арсенида индия для спектрального диапазона 3-5 мкм с узкозонной активной областью из n -InAs_{1-x}Sb_x ($0 < x < 0.12$) и широкозонными ограничительными слоями InAsSbP при повышенных температурах в диапазоне от 300 К до 470 К. Установлено, что с ростом температуры экспоненциальное уменьшение мощности излучения обусловлено действием двух безызлучательных оже-процессов: “резонансного” СННС-процесса, когда ширина запрещенной зоны активной области близка к энергии спин-орбитального расщепления валентной зоны, и СНСС-процесса, при этом вклад последнего процесса в суммарную скорость безызлучательной рекомбинации при повышении температуры увеличивается

4. Показано, что предельная рабочая температура инфракрасных светодиодов с активной областью на основе твердого раствора $Ga_xInAsSb$ ($0.84 < x < 0.95$) для спектрального диапазона 1.6-2.4 мкм составляет не менее 430 К, а для светодиодов с активной областью на основе InAs_{1-x}Sb_x ($0 < x < 0.12$) для спектрального диапазона 3-5 мкм – не менее 390 К. Показано, что максимальная рабочая температура светодиодов для средней инфракрасной области спектра близка к температуре перехода активной области к собственной проводимости.

5. Установлено, что в диапазоне температур от 300 К до 470 К температурное сужение запрещенной зоны твердых растворов InAsSb_x ($0 < x < 0.12$) и Ga_xInAsSb ($0.84 < x < 0.95$) носит линейный характер и определяется преимущественно электрон-фононным взаимодействием. Найдены соответствующие значения температурных коэффициентов: $dE_g/dT = -(1.5 \div 3.3) \cdot 10^{-4}$ эВ/К для InAsSb и $dE_g/dT = -(3.6 \div 3.9) \cdot 10^{-4}$ эВ/К для GaInAsSb .

6. Впервые обнаружено увеличение мощности излучения при повышении температуры в диапазоне от 300 К до 470 К светодиодной гетероструктуры $n\text{-GaSb}/n\text{-In}_{0.956}\text{Ga}_{0.044}\text{AsSb}/p\text{-AlGaAsSb}$ с высоким потенциальным барьером в зоне проводимости на гетерогранице $n\text{-GaSb}/n\text{-InGaAsSb}$ ($\Delta E_C = 0.79$ эВ), существенно превышающим ширину запрещенной зоны активной области InGaAsSb ($E_g = 0.284$ эВ, $T = 300$ К), в которой при комнатной температуре имеет место суперлинейная люминесценция и увеличение оптической мощности за счет создания дополнительных электронно-дырочных пар при ударной ионизации электронами, разогретыми на скачке потенциала ΔE_C . Установлено, что нетипичная температурная зависимость мощности электролюминесценции обусловлена снижением пороговой энергии ударной ионизации, вследствие уменьшения ширины запрещенной зоны активной области $n\text{-InGaAsSb}$.

Список основных публикаций по теме диссертации

A1. А.А. Петухов, Б.Е. Журтанов, С.С. Молчанов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев «Электролюминесцентные характеристики светодиодов среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур $\text{InGaAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при высоких рабочих температурах» // ЖТФ, **81** (4), С.91-96 (2011).

A2. А.А. Петухов, Б.Е. Журтанов, Ю.П. Яковлев «Электролюминесцентные свойства светодиодов среднего ИК-диапазона для приборов медицинской диагностики при высоких рабочих температурах» // Сборник трудов VII международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2012» 15-19 октября, Санкт-Петербург, С.511-513 (2012).

A3. А.А. Петухов, Б.Е. Журтанов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев «Электролюминесцентные свойства светодиодов среднего ИК-диапазона на основе гетероструктур $\text{GaInAsSb}/\text{GaAlAsSb}$ при высоких рабочих температурах» // Сборник тезисов IX международной научной конференции «Лазерная физика и оптические технологии» 30 мая – 2 июня 2012, Гродно, С.188 (2012).

A4. А.С. Головин, А.А. Петухов, С.С. Кижаяев, Ю.П. Яковлев «Светодиоды на основе гетероструктур $\text{InAsSbP}/\text{InAsSb}$ ($\lambda = 4.7$ мкм) для детектирования угарного газа» // Письма в ЖТФ, **37** (11), С. 15-19 (2011).

A5. А.А. Петухов, Н.Д. Ильинская, С.С. Кижаяев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев «Влияние температуры на электролюминесцентные свойства *flip-chip* светодиодов среднего ИК-диапазона на основе гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ » // ФТП, **45** (11), С. 1560-1563 (2011).

А6. А.А. Петухов, Ю.П. Яковлев «Электролюминесцентные свойства светодиодов среднего ИК-диапазона ($\lambda_{max} \approx 3.4$ мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP при высоких рабочих температурах» // Тезисы докладов 14 всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 26-30 ноября, Санкт-Петербург, С.84 (2012).

А7. А.А. Петухов, С.С. Кижаяев, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев «Электролюминесцентные свойства светодиодов среднего ИК-диапазона ($\lambda_{max} \approx 3.4$ мкм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP при температуре 20-200°C» // Тезисы докладов Российской молодежной конференции по физике и астрономии 24-25 октября, Санкт-Петербург, С.137-139 (2012).

А8. А.А. Петухов, С.С. Кижаяев, С.С. Молчанов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев «Электрические и электролюминесцентные свойства светодиодов $\lambda=3.85-3.95$ мкм на основе InAsSb в интервале температур 20-200 °C» // ЖТФ, **82** (1), С.73-76 (2012).

А9. А.А. Петухов, Б.Е. Журтанов, К.В. Калинина, Н.Д. Стоянов, Х.М. Салихов, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев «Высокотемпературная люминесценция в светодиодной гетероструктуре n -GaSb/ n -InGaAsSb/ p -AlGaAsSb с высоким потенциальным барьером» // ФТП, **47** (9), С. 1270-1275 (2013).

Цитируемая литература

- [1] В. Stuart «Infrared spectroscopy: fundamentals and applications», 2004, John Wiley & Sons, Ltd ISBNs: 0-470-85427-8 (HB); 0-470-85428-6 (PB).
- [2] N. Yamazoe. Sensors and Actuators B, **108**, 2-14 (2005).
- [3] E. Hawe, P. Chambers, C. Fitzpatrick, E. Lewis. Meas. Sci. Technol. **18**, 3187-3194 (2007).
- [4] С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова, М.А. Ременный. ЖТФ, **79** (6), 112 (2009).
- [5] Т.Н. Данилова, Б.Е. Журтанов, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. ФТП, **39** (11), 1281 (2005).
- [6] Н.В. Зотова, Н.Д. Ильинская, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь. ФТП, **42** (6), 641 (2008).
- [7] Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясиевич И.Н. «Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках», СПб.:ПИЯФ, 1997. 375 с.
- [8] Г.Г. Зегря, В.А. Харченко. ЖЭТФ, **101** (1), 327 (1991).
- [9] Г.Г. Зегря, А.Д. Андреев. ЖЭТФ, **109** (2), 615 (1996).
- [10] М. Айдаралиев., Н.В. Зотова, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Н.М. Стусь, Г.Н. Талалакин. ФТП, **35** (12), 1431 (2001).
- [11] Стоянов Н.Д., Журтанов Б.Е., Именков А.Н., Астахова А.П., Михайлова М.П., Яковлев Ю.П. ФТП, **41** (7), 878 (2007).
- [12] В.И. Стафеев. ФТП, **43** (10), 1321 (2009).
- [13] Шарма Б.Л., Пурохит Р.К «Полупроводниковые гетеропереходы», М.: "Сов.радио", 1979
- [14] W.J. Duncan, A.S.M. Ali, E.M. Marsh, P.C. Spurdens J. Cryst. Growth. 1994. V. 143. P. 155-161.
- [15] К.В. Калинина, М.П. Михайлова, Б.Е. Журтанов, Н.Д. Стоянов, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47** (1), 75 (2013).
- [16] I. Vurgaftman, J.R. Meyer. J. Appl. Phys. **89** (11), 5815-5875 (2001).