

Самарцев Илья Владимирович

**Излучающие и фоточувствительные гетероструктуры на длины волн более 1 мкм,
выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs и Si**

Специальность 1.3.11. – Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель:

Дорохин Михаил Владимирович,

доктор физико-математических наук, доцент,
ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Научно-исследовательский
физико-технический институт, заведующий лабораторией

Официальные оппоненты:

Мармалюк Александр Анатольевич,

доктор технических наук,
Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха», Научно-
производственный комплекс «Квантовая электроника и
радиофотоника», начальник научно-технического центра

Литвинов Владимир Георгиевич,

доктор физико-математических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Рязанский
государственный радиотехнический университет имени
В.Ф. Уткина», кафедра «Микро- и наноэлектроника»,
заведующий кафедрой

Ведущая организация:

**Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина)**

Защита состоится «18» июня 2025 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.340.01 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 3, ауд. 227 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (<https://diss.unn.ru/1529>).

Автореферат разослан «___» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.01,
кандидат физико-математических наук

Марычев Михаил Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Постоянный рост потоков информации обуславливает необходимость развития и совершенствования коммуникационных систем. Основными элементами волоконно-оптических систем приема/передачи информации являются лазерные излучатели, кварцевое оптическое волокно, а также приемники излучения. Для создания излучателей и фотоприемников телекоммуникационного диапазона 1,3-1,55 мкм чаще всего используют структуры на основе полупроводниковых прямозонных материалов, подходящих по ширине оптического окна, в частности, структуры, выращенные на подложке фосфида индия (InP) [1, 2, 3].

Наиболее распространенным материалом для создания активной области излучающих и фоточувствительных приборов, работающих в указанном диапазоне длин волн, является $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием In около 53 %. Такой твердый раствор согласован по параметру решетки с подложками InP. Преимуществом решений на основе InP является высокая дрейфовая скорость носителей заряда и высокий коэффициент теплопроводности подложек. Недостатки InP как основы фоточувствительных и излучающих приборов: высокая стоимость, хрупкость и небольшой (по сравнению с приборами на GaAs) диаметр пластин. Все это делает технологию изготовления оптоэлектронных приборов на подложках InP дорогостоящей.

Более привлекательной основной для построения приборов оптоэлектроники является GaAs. Однако ни сам GaAs, ни материалы, согласованные с GaAs по параметру решетки, невозможно использовать для создания приборов, работающих в спектральной области 1,55 мкм, в силу различия параметров решеток InP и GaAs на уровне 4 %. Поэтому значительные усилия направляются на разработку методов, позволяющих создавать излучающие и фоточувствительные структуры на подложках GaAs, функционирующие в области длин волн более 1 мкм. Главной проблемой таких структур является наличие большого числа дефектов в активном слое, возникающих из-за рассогласования параметров кристаллических решеток.

Наиболее перспективным методом решения указанной проблемы является применение в эпитаксиальном процессе метаморфных буферных слоев (МБС) [1]. Значительные успехи в технологии подобного вида слоев достигнуты с применением метода молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Однако этот метод является относительно малопродуктивным по сравнению с другим распространенным методом — МОС-гидридной эпитаксии, который используется для формирования большинства промышленно выпускаемых полупроводниковых лазеров и фотодиодов. Поэтому необходимость создания оптоэлектронных компонентов для массовой электроники ставит задачу по получению гетероструктур именно этим методом.

Другим не менее значимым направлением развития эпитаксиальных методов для задач оптоэлектроники, является разработка гибридных устройств, в которых структура A^3B^5 выращивается на кремниевой подложке. Полупроводники A^3B^5 , будучи встроены в кремниевые интегральные схемы, в силу своих уникальных характеристик, таких, как прямозонность и высокая подвижность носителей заряда, позволяют осуществлять переход от электрического к оптическому способу передачи информации. Который является более быстродействующим и помехозащищенным. Вместе с этим низкая стоимость и широкое распространение подложек кремния обеспечивает коммерческую привлекательность данной задачи.

При этом стоит отметить, что, несмотря на устойчивый прогресс в создании излучающих и фоточувствительных A^3B^5 структур на длину волны более 1 мкм на подложках GaAs, разработанные к настоящему времени лабораторные образцы приборов все еще значительно уступают по уровню выходных характеристик аналогичным приборам, выращенным на согласованных подложках InP. Это обусловлено образованием большого количества дефектов, возникающих из-за рассогласования кристаллических решеток подложки и активной области. Еще более сложной с точки зрения снижения количества дефектов остается ситуация с получением на подложках кремния гибридных структур высокого кристаллического качества.

Таким образом, существует необходимость поиска новых и совершенствования существующих способов создания на подложках GaAs и Si полупроводниковых лазерных излучателей и фотодиодов, способных работать в области длин волн более 1 мкм, что определяет актуальность настоящей работы.

Цели и задачи работы

Цель работы: изучение взаимосвязи механизмов роста методом МОС-гидридной эпитаксии на подложках GaAs и Si слоев A^3B^5 с сильным рассогласованием параметров кристаллической решетки (метаморфного роста) и функциональных характеристик фоточувствительных и лазерных структур на основе таких слоев.

Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи:**

1. Обзор существующих представлений относительно метаморфного роста полупроводниковых материалов A^3B^5 на подложках GaAs и Si.
2. Описание процесса эпитаксиального роста слоев полупроводника большой толщины (>1 мкм) при условии рассогласования параметров кристаллической решетки.
3. Исследование закономерностей эпитаксиального выращивания материалов для излучающих и фоточувствительных структур с метаморфными слоями на **подложке GaAs**.
4. Исследование закономерностей эпитаксиального выращивания материалов для излучающих и фоточувствительных структур с метаморфными слоями на **подложке Si**.

5. Создание экспериментальных образцов свето- и фотодиодов на основе структур с метаморфными слоями, исследование и анализ их характеристик.

Научная новизна работы

1. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии сформированы фоточувствительные $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ гетероструктуры с дискретным метаморфным буферным слоем на подложке GaAs приборного качества, т.е. с плотностью прорастающих дислокаций ниже 10^6 см^{-2} .

2. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии сформированы фотодиоды с фоточувствительной областью $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ на подложке GaAs с диаметром мезаструктуры 560 мкм и темновым током при комнатной температуре и обратном смещении -5 В равным 2×10^{-7} А.

3. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии на неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным Ge буферным слоем получена фоточувствительная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.

4. Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии была создана лазерная структура с метаморфным буферным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и КЯ $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si (001) и продемонстрированы фотолюминесценция и стимулированное излучение на длинах волн 1,45 мкм и 1,3 мкм соответственно.

Практическая значимость работы

1. Разработана лабораторная технология формирования методом МОС-гидридной эпитаксии слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ приборного качества на подложке GaAs с долей Sb около 10% и 20 % с использованием метаморфных буферных слоев.

2. Разработана лабораторная технология выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии буферных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ со ступенчатым изменением состава. Изготовлены фотодиоды с диаметром фоточувствительной площадки 560 мкм. Темновой ток фотодиодов при комнатной температуре составил 6 нА (-5 В). Данное значение темнового тока близко к значению темнового тока фотодиодов, выращенных на согласованных подложках, но получено на структурах, сформированных с использованием более дешевого технологического процесса.

3. Методом МОС-гидридной эпитаксии получена лазерная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и квантовыми ямами $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным Ge буферным слоем, излучающая при оптической накачке на длине волны 1,3 мкм.

4. Методом МОС-гидридной эпитаксии получена фоточувствительная структура на длины волн до 1,8 мкм с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ на неотклоненной подложке Si (001) с релаксированным буферным слоем Ge.

5. Разработана лабораторная технология эпитаксиального выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ фотодиодных структур на основе дискретного метаморфного буферного слоя $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ на подложке GaAs, отличающаяся низкой плотностью темнового тока (8×10^{-5} А/см² при комнатной температуре и обратном смещении -5 В).

6. Разработана лабораторная технология формирования «виртуальных» подложек InP/GaAs. С использованием полученных подложек изготовлены СВЧ-диоды, диодные микросборки и тройной балансный смеситель с диапазоном частот входного сигнала и гетеродина 2-40 ГГц, диапазон промежуточных частот 0,5-20 ГГц. Применение InP/GaAs-диодов позволило в 20 раз снизить мощность сигнала гетеродина без увеличения потерь преобразования во всем диапазоне частот смесителя.

Положения, выносимые на защиту

1. Скорость роста метаморфных слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ на подложке GaAs в условиях МОС-гидридной эпитаксии оказывает нелинейное влияние на оптическое качество слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, что проявляется в изменении интегральной интенсивности фотolumинесценции (ФЛ): варьирование скорости роста в пределах (4 - 8 Å/с) не изменяет интенсивность ФЛ, снижение скорости роста до 2 Å/с приводит к повышению интенсивности ФЛ на порядок величины.

2. Метаморфный буферный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ со ступенчатым изменением состава в пределах x от 0,49 до 0,7, состоящий из восьми ступеней, при росте на подложках GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии обеспечивает снижение плотности прорастающих дислокаций по сравнению с однородным метаморфным буферным слоем до значения 10^4 см⁻².

3. В диодах с дискретным $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ метаморфным буферным слоем и фоточувствительной областью $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ действует два основных механизма протекания темнового тока: генерационно-рекомбинационный и термически активированное туннелирование. Эффективность механизмов зависит от температуры измерений и плотности прорастающих дислокаций.

4. Составной метаморфный буферный слой, состоящий из дислокационного фильтра и ступенчатой многослойной структуры обеспечивает снижение плотности прорастающих дислокаций при росте рассогласованных A^3B^5 структур на подложке Ge/Si, что позволяет сформировать активную область лазерной структуры.

5. При выращивании структур A^3B^5 на подложке Ge/Si методом МОС-гидридной эпитаксии соотношение скоростей роста антифазных доменов A^3B^5 немонотонно зависит от состава дислокационного фильтра. При составе, который соответствует минимуму соотношения скоростей, формирование одного из антифазных доменов подавляется.

Достоверность результатов

Достоверность результатов в экспериментальной части работы обеспечена использованием взаимодополняющих методов анализа, воспроизводимостью характеристик исследуемых объектов, многократной экспериментальной проверкой результатов измерений, использованием метрологически аттестованного измерительного оборудования. Комплексный подход к изучению полученных структур и приборов на их основе обеспечивает надежность проведенных исследований.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на Международных симпозиумах «Нанозеллектроника и наноэлектроника» (Нижний Новгород, 2016-2022 гг.); Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2017 г.); XVI Международной школе-конференции "Проблемы физики твердого тела и высоких давлений" (Сочи, 2017 г.); международных конференциях «SPBOpen» (Санкт-Петербург, 2017-2024 гг.); Всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2016-2023 гг.); Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2018); 12-ом Белорусско-Российском семинаре (Минск, 2019 г.); а также на семинарах физического факультета и НИФТИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 46 научных работ, включая 9 статей, входящих в перечень ВАК.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность исследований, цель и задачи работы, в соответствии с которыми проводились исследования, а также обоснование научной новизны и практической значимости. Представлены сведения об апробации работы, достоверности результатов, личном вкладе автора диссертации, публикациях, информация о структуре и объеме диссертации. Во введении также изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассмотрены физические механизмы, лежащие в основе эпитаксиального роста. Описаны условия осуществления метаморфного эпитаксиального выращивания слоев полупроводниковых структур. Рассмотрены основные виды дефектов, возникающих при метаморфном росте слоев и их влияние на функциональные характеристики выращиваемых приборных гетероструктур. Представлено современное состояние исследований по получению излучающих и фоточувствительных структур на длины волн более 1 мкм, выращенных с помощью метаморфных буферных слоев на подложках GaAs и Si.

В первой части **второй главы** приведено описание метода МОС-гидридной эпитаксии — базовой технологии, применяемой в исследовании. Рассмотрены технологические особенности используемой установки, основные параметры роста, влияющие на характеристики гетероструктур, получаемых в данном технологическом процессе. Также рассмотрены основные химические реакции, протекающие в реакторе при эпитаксиальном росте.

Во второй части второй главы выполнен анализ эффективности применения различных конструкций метаморфных слоев с целью подавления прорастающих дислокаций в зависимости от степени рассогласования параметров решеток подложки и функционального слоя. Представлены схемы и технологии получения структур, исследуемых в настоящей работе.

Структуры с малым рассогласованием параметров решетки (<2 %).

Практическим основанием для исследования роста данного вида слоев является разработка лабораторной технологии изготовления светодиодов, излучающих на длине волны 1,3 мкм. С этой целью рассмотрена система материалов $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}/\text{GaAs}$, где твердый раствор $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ выполняет функцию МБС со ступенчатым изменением состава. Сформирована серия структур А1-А7, в которой выполнено варьирование технологических ростовых параметров, таких как скорость и температура роста. При параметрах роста, обеспечивающих наилучшее кристаллическое качество слоев, были сформированы структуры с квантовыми ямами (КЯ) А8, А9, из которых изготовлены лабораторные образцы светоизлучающих диодов.

Вторым практическим основанием для роста структур является создание лабораторных образцов фотодиодов на подложках GaAs с низким темновым током, функционирующих на длине волны более 1 мкм. С этой целью были выращены структуры с $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ метаморфным буферным слоем со ступенчатым изменением состава (структуры Б1 и Б2).

Структуры с рассогласованием от 2 % до 4 %.

Примером подобного вида структур являются слои $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с содержанием In около 30 %, сформированные на подложках GaAs (структуры В1, В2). Практическим основанием для исследования таких структур является разработка лабораторной технологии фотодиодов для спектрального диапазона до 1,3 мкм.

Другим видом слоев с таким рассогласованием выступили образцы на основе гетероструктур $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}/\text{InP}$ на подложках GaAs (структуры Г1 и Г2). Практическим основанием для исследования роста таких структур является разработка лабораторной технологии низкобарьерных диодов для применения в СВЧ-технике.

Структуры с разнородными материалами и рассогласованием от 2 % до 4 %.

При росте материалов A^3B^5 на подложках Si происходит образование антифазных границ. Для снижения плотности таких дефектов стандартным подходом является формирование

многослойной сверхрешетки, которую называют «дислокационным фильтром». Метод заключается в выращивании нескольких пар чередующихся напряженных, тонких слоев (около 10 нм). В результате формируются области с локальным механическим напряжением вблизи гетерограниц, которые препятствуют распространению дислокаций в объем структуры за счет изгиба и замыкания дислокаций на напряженной границе. В настоящей работе изучена возможность снижения плотности антифазных границ за счет варьирования состава многослойной структуры. С этой целью была получена серия тестовых структур (серия Д). На предварительно подготовленной «виртуальной» подложке Ge/Si выращивались слои A^3B^5 методом МОС-гидридной эпитаксии. Образцы в серии отличались зародышевыми слоями $Al_xGa_{1-x}As$, где x имел значения 0; 0,3; 0,6 и 1 (структуры Д1, Д2, Д3 и Д4 соответственно).

С целью разработки лабораторной технологии изготовления A^3B^5 фоточувствительных структур на Si подложке на длины волн более 1 мкм была выращена структура Е. Рост осуществлялся в три этапа. 1) Методом горячей проволоки выращивалась «виртуальная» подложка Ge/Si. 2) В установке МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении выращивался «дислокационный фильтр» AlAs (10 нм)/GaAs (50 нм) и слой GaAs (1000 нм). 3) Методом МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении выращивался МБС $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ и $p-i-n$ -структура. Состав четверного раствора изменялся ступенчатым образом при изменении потоков In и As.

Другим видом приборной структуры являлась лазерная структура с МБС $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ и квантовыми ямами $In_{0,58}Ga_{0,42}As$, выращенными на подложке Si (001) с релаксированным буферным слоем Ge (структура Ж, рисунок 1). Лазерная структура была выращена аналогичным образом в три этапа. 1) Методом молекулярно-лучевой эпитаксии формировалась «виртуальная» подложка Ge/Si. 2) В установке МОС-гидридной эпитаксии при пониженном давлении выращивался «дислокационный фильтр» AlAs (25 нм)/GaAs (50 нм), $In_{0,1}Ga_{0,9}As$ (10 нм)/GaAs

$In_{0,28}Ga_{0,72}As$ 720 нм
$[In_{0,28}Ga_{0,72}As$ 120 нм / КЯ $In_{0,58}Ga_{0,42}As$ 12 нм] \times 3
$In_{0,28}Ga_{0,72}As$ 1480 нм
МБС $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ 630 нм
$In_{0,49}Ga_{0,51}P$ 180 нм
GaAs 2550 нм
$[In_{0,1}Ga_{0,9}As$ 10 нм / GaAs 80 нм] \times 5
$[AlAs$ 25 нм / GaAs 50 нм] \times 2
Подложка Ge/Si

Рисунок 1 – Схематическое изображение конструкции излучающей гибридной структуры Ж

(80 нм) и слой GaAs (2000 нм). 3) В установке МОС-гидридной эпитаксии при атмосферном давлении формировались МБС $In_xGa_{1-x}As_yP_{1-y}$ со ступенчатым изменением состава и лазерная структура. Все описанные выше структуры, исследуемые в настоящей диссертации, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Структуры, исследуемые в диссертации.

Серия структур	Назначение структуры	Варьируемый параметр	Рассогласование
А1-А4	Исследование влияния скорости роста GaAs _{1-x} Sb _x МБС на кристаллическое качество эпитаксиальных слоев	Скорость роста: А1 – 2 Å/с; А2 – 4 Å/с; А3 – 6 Å/с; А4 – 8 Å/с	<2 %
А5-А7	Исследование влияния температуры роста GaAs _{1-x} Sb _x МБС на кристаллическое качество эпитаксиальных слоев	Температура роста: 540 °С; 570 °С; 600 °С	<2 %
А8, А9	Исследование влияния метода прерывания роста GaAs _{1-x} Sb _x МБС на кристаллическое качество эпитаксиальных слоев	Скорость роста: А8 – 2 Å/с (540 °С); А9 – от 2 Å/с до 0 Å/с дискретно (прерывание роста) (540 °С)	<2 %
А10	Структура с In _x Ga _{1-x} As МБС. Сравнение свойств структур с GaAs _{1-x} Sb _x и In _x Ga _{1-x} As МБС		<2 %
Б1, Б2	Исследование влияния количества ступеней в In _x Ga _{1-x} P МБС на кристаллическое качество и функциональные характеристики диодов	Количество ступеней в МБС	<2 %
В1, В2	Исследование влияния количества периодов в дискретном In _x Ga _{1-x} As/GaAs МБС на кристаллическое качество и функциональные характеристики диодов	Количество пар чередующихся материалов	от 2% до 4%
Г1, Г2	Выявления влияния конструкции метаморфного буферного слоя на функциональные характеристики диодов	Дизайн метаморфного буферного слоя	от 2% до 4%
Д1-Д4	Исследование влияния состава «дислокационного фильтра» на скорость образования антифазных доменов	Состав зародышевого слоя дислокационного фильтра Al _x Ga _{1-x} As Д1 – x=0; Д2 – x=0,3; Д3 – x=0,6; Д4 – x=1	Разнородные материалы и рассогласование от 2% до 4%
Е	Фоточувствительные структуры A ³ B ⁵ /Si на рабочую длину волны более 1 мкм		Разнородные материалы и рассогласование от 2% до 4%
Ж	Лазерные структуры A ³ B ⁵ /Si на рабочую длину волны более 1 мкм		Разнородные материалы и рассогласование от 2% до 4%

В третьей главе представлены результаты исследования структур с различным рассогласованием, сформированных на подложке GaAs. Также в рамках 3 главы рассматриваются использованные методы экспериментального исследования. С целью оценки кристаллического качества и излучательных свойств структур проводились измерения спектров фото- и электролюминесценции. Исследование рельефа поверхности проводилось с помощью интерференционной микроскопии белого света и атомно-силовой микроскопии. Исследование состава, кристаллического качества и определение наличия механических напряжений в слоях проводилось с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света. Для исследования структурных свойств слоев применялась просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения. Для исследования приборных свойств изготовленных диодов проводились измерения вольтамперных характеристик, фоточувствительности, спектральной зависимости фототока. Результаты данной главы опубликованы в работах [A3, A4, A5, A7].

Первая из рассмотренных серий образцов была разработана в рамках решения задачи создания светоизлучающих диодов с длиной волны 1,3 мкм. Для этого были сформированы структуры на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ метаморфного буферного слоя со ступенчатым изменением состава (структуры A1-A9). В серии A1-A4 варьировалась скорость роста путем изменения потока компонентов 3 группы (Таблица 1), в серии A5-A7 варьировалась температура роста. Основным экспериментальным методом исследования для данных структур выступило измерение интегральной интенсивности фотолюминесценции (ФЛ). Было показано [4], что данный параметр позволяет оценивать степень кристаллического совершенства. Кроме того, интенсивность ФЛ позволяет судить о функциональных характеристиках приборных структур.

На рисунке 2 представлены зависимости интегральной интенсивности ФЛ слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ от скорости выращивания. Видно, что максимальное значение интенсивности ФЛ достигается при минимальной скорости роста из серии A1-A4, а именно 2 Å/с. При увеличении скорости роста происходит существенное снижение интенсивности ФЛ, что, видимо, связано с повышением концентрации дефектов и их скоплений в слое. Подобный эффект может объясняться тем, что при большей скорости роста адсорбированные на поверхности подложки атомы покрываются последующими слоями раньше, чем достигается их термодинамическое равновесие с подложкой. В этих условиях атомы осаждаемого вещества не занимают равновесных позиций, в результате чего формируется значительное число вакансий.

Температура роста, при которой достигается наибольшее значение интенсивности ФЛ для слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, составляет 540 °C (зависимость интенсивности ФЛ от температуры роста показана на вставке рисунка 2; структуры A5, A6, A7 соответственно). Вероятно, при понижении температуры роста увеличивается степень относительного пересыщения — отношение

количества атомов, падающих на подложку, к количеству атомов, покидающих ее. Чем выше степень пересыщения, тем больше количество атомов, адсорбирующихся на подложку, тем ниже вероятность формирования вакансий в растущем слое.

На основе полученных результатов были сформированы структуры А8, А9, на базе которых были изготовлены образцы светодиодов, включающие квантовую яму $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}/\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ (рисунок 3). Структуры А8 и А9 имели одинаковую конструкцию (рисунок 3), но при росте структуры А9 с целью улучшения кристаллического качества буферного слоя и квантовой ямы был предложен технологический подход, заключающийся в прерывании роста: в процессе роста метаморфного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ каждые 100 нм прекращалась подача Ga на 10 секунд.

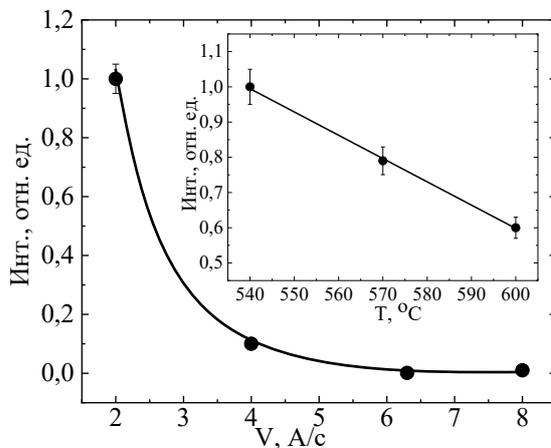


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности фотолюминесценции слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ от скорости роста метаморфного буфера (точки соответствуют структурам А1, А2, А3, А4)

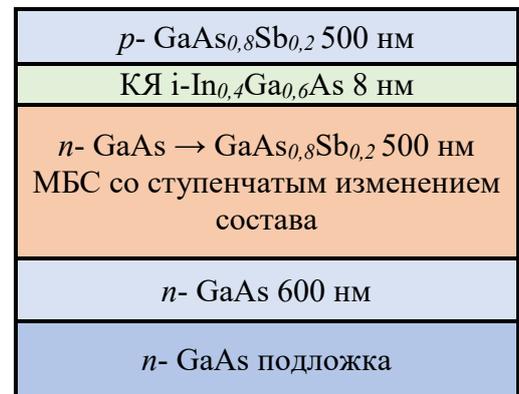


Рисунок 3 – Схематическое изображение конструкции светоизлучающих структур А8 и А9

На рисунке 4 представлены спектры ФЛ сформированных структур, измеренные при комнатной температуре и температуре кипения жидкого азота. На спектрах ФЛ структур А8 и А9 (рисунки 4 а) и 4 б) соответственно)) при комнатной температуре наблюдаются два пика: первый – с длиной волны 1,04-1,18 мкм, соответствует излучению буферного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, второй пик с длиной волны 1,32-1,35 мкм соответствует излучению КЯ. Из рисунка 4 а) видно, что интенсивность ФЛ от КЯ практически не изменяется при повышении температуры от 77 К до 300 К. На спектре ФЛ структуры А9 видно, что пик, соответствующий КЯ, имеет более высокую интенсивность, как при комнатной температуре, так и при температуре жидкого азота, что говорит о более высоком кристаллическом качестве структуры А9 по сравнению со структурой А8.

Процесс температурного гашения ФЛ можно описать с помощью классической теории Шокли-Рида, в этом случае можно записать уравнение равновесия:

$$\frac{dn}{dt} = g - \frac{n_{QW}}{t_{QW}} - \frac{n_M}{t_{nr}}, \quad (1)$$

где $n = n_M + n_{QW}$, n_M , n_{QW} — концентрация электронов в объемном слое и квантовой яме соответственно, g — скорость образования электронно-дырочных пар, t_{QW} , t_{nr} — время излучательной рекомбинации в квантовой яме и время безызлучательной рекомбинации в объемном слое соответственно.

Величины t_{QW} и t_{nr} описываются выражениями:

$$t_{QW} = t_r^{(0)} \frac{1}{K_{QW}^2} \exp\left[\frac{E_F + E_g - E_{QW}^{(h)}}{kT}\right], \quad (2)$$

$$t_{nr} = t_{nr}^{(0)} \left(1 + \frac{n_1}{p_0}\right), \quad (3)$$

$$n_1 = N_C \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right), \quad (4)$$

где $E_C - E_t$ — энергетический уровень ловушек, p_0 — равновесная концентрация дырок в объемном слое, $t_r^{(0)}$, $t_{nr}^{(0)}$ — константы, определяющиеся параметрами материала, E_g — ширина запрещенной зоны, E_F — уровень Ферми, $E_{QW}^{(h)}$ — энергетический уровень дырок в квантовой яме, k — постоянная Больцмана, T — температура, K_{QW} — интеграл перекрытия волновых функций электронной и дырочной оболочек в КЯ, N_C — концентрация носителей в зоне проводимости.

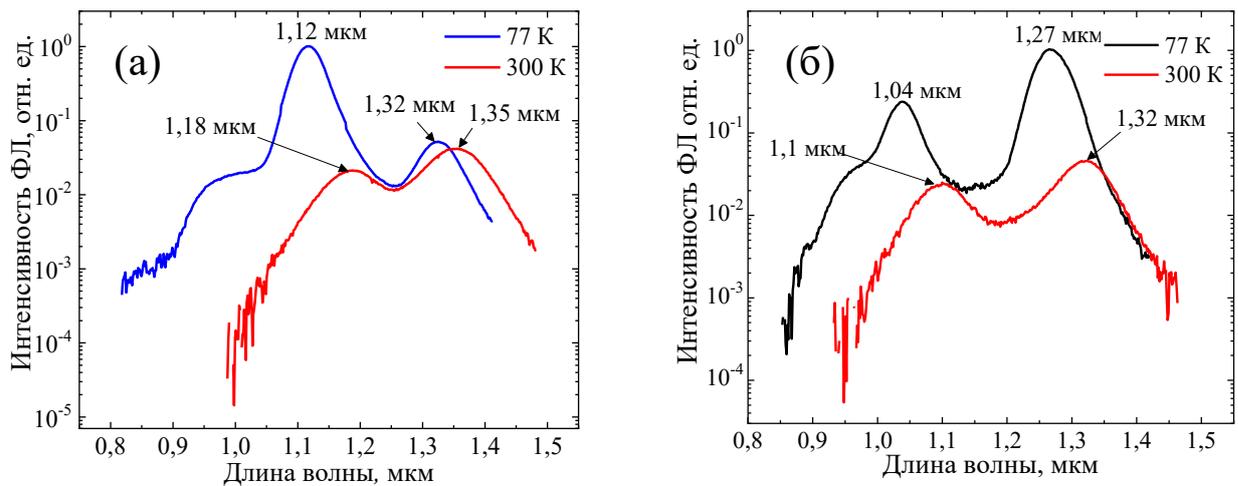


Рисунок 4 – Спектры фотолуминесценции структур с метаморфным буферным слоем $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и квантовой ямой $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ при температуре жидкого азота (77 К) и комнатной температуре (300 К) для структур А8 (а) и А9 (б)

При рекомбинации носителей заряда в КЯ происходят два конкурирующих безызлучательных процесса: термический выброс из КЯ и безызлучательная рекомбинация. Из уравнения (3) видно, что с ростом температуры при заданной концентрации дефектов время безызлучательной рекомбинации t_{nr} увеличивается, а, следовательно, эффективность данного процесса понижается. Вероятность термического выброса носителей, напротив, с ростом температуры повышается. В силу высокой концентрации дефектов в КЯ эффективность двух указанных процессов сопоставима, поэтому при изменении температуры они компенсируют друг

друга. Это объясняет слабое изменение интенсивности ФЛ квантовой ямы при повышении температуры от 77 до 300 К для структуры А8. В структуре А9 концентрация дефектов в КЯ значительно меньше, по сравнению со структурой А8, о чем свидетельствует более высокая интенсивность ФЛ. Поэтому доминирующим безызлучательным процессом является термический выброс носителей, для которого характерно снижение интенсивности ФЛ с ростом температуры. Таким образом, наличие температурного гашения ФЛ в структуре А9 косвенно подтверждает ее более высокое кристаллическое качество.

Таким образом, предложенный нами технологический подход (периодическое кратковременное прерывание роста) способствует улучшению кристаллического качества структуры. При прерывании роста большая доля адсорбированных на поверхности подложки атомов достигает термодинамического равновесия с подложкой, что приводит к уменьшению числа вакансий в слое. Для структуры А9 была получена стабильная электролюминесценция, спектр которой при комнатной температуре показан на рисунке 5. На спектре виден пик на длине волны 1,31 мкм, связанный с излучательной рекомбинацией носителей в квантовой яме. Пик с

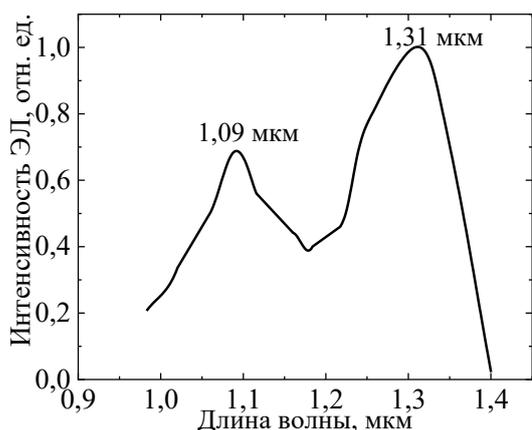


Рисунок 5 – Спектр электролюминесценции структуры А9 с метаморфным буферным слоем $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ и квантовой ямой $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ при комнатной температуре. Ток диода – 10 мА.

длиной волны 1,09 мкм соответствует излучению от буферного слоя $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$.

Во второй части третьей главы рассмотрены результаты технологических экспериментов по формированию фоточувствительных структур на поверхности метаморфных буферных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$. В рамках исследований было показано, что применение МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$, выращенного на подложке GaAs, способствует

получению более высокого качества фоточувствительной области $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, по сравнению с МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, исследованным ранее [5].

Снижение плотности дефектов в фоточувствительном слое было достигнуто за счет формирования буферного слоя со ступенчатым изменением состава. Рассмотрено два варианта метаморфных слоев, которые содержали 6 и 8 ступеней в буферном слое - структуры Б1 и Б2 соответственно (рисунок 6 а)). Для исследований функциональных характеристик были изготовлены фотодиоды с диаметром мезаструктуры 560 мкм (рисунок 6 б)). Плотность прорастающих дислокаций в поверхностном слое, рассчитанная с помощью метода селективного травления и АСМ составила $6 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ (структура Б1). Это является удовлетворительным

результатом для метаморфных структур, поскольку превышает плотность дефектов в подложках GaAs, которые использовались в настоящем эксперименте, менее чем на два порядка [6].

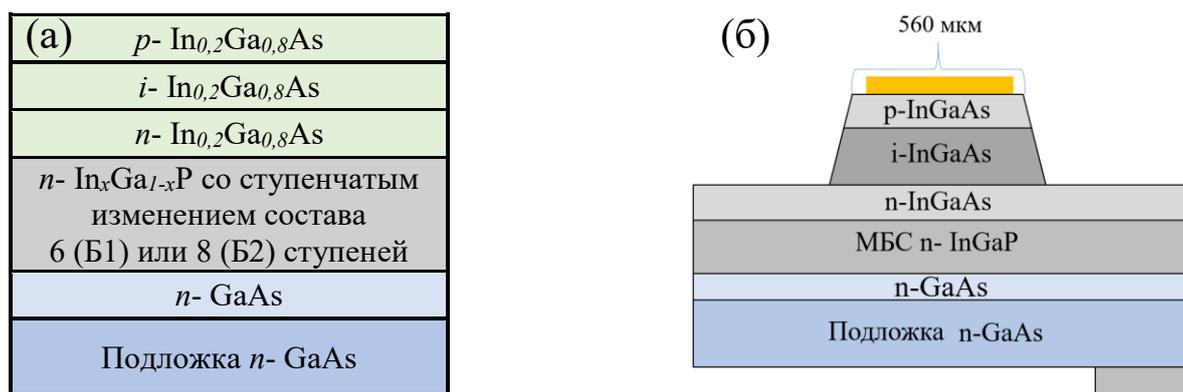


Рисунок 6 – а) Схематическое изображение конструкции исследуемых фоточувствительных структур Б1 и Б2; б) дизайн мезаструктуры

Темновой ток фотодиода является одним из важнейших параметров, величина которого тесно связана с кристаллическим совершенством структур [6]. Механизмы протекания темнового тока можно разделить на: дрейфовый, генерационно-рекомбинационный, межзонное туннелирование, туннелирование через уровни ловушек. Для обратного тока можно записать соотношение:

$$I_d \sim \exp\left[-\frac{E_a}{kT}\right], \quad (5)$$

где E_a – энергия активации, для каждого из механизмов темнового тока характерно определенное значение.

Согласно (5), природу темнового тока можно определить из зависимости тока I_d от температуры. С этой целью были проведены исследования обратной ветви вольтамперной характеристики (ВАХ) в диапазоне температур 230-350 К (рисунок 7 а)). Измерения ВАХ проводились в криостате замкнутого цикла Janis CCS 300S/202. На рисунке 7 б) приведены прямая и обратная ветви ВАХ, измеренные при температуре 300 К.

Энергия активации процесса протекания темнового тока E_a определялась из зависимости логарифма темнового тока от температуры при заданном значении обратного напряжения. Линейная аппроксимация экспериментальных точек с коэффициентом корреляции $R = 0,9$ позволяет определить показатель экспоненты функции (5), откуда находится $E_a = 0,1$ эВ. Поскольку значение E_a много меньше ширины запрещенной зоны твердого раствора $\text{In}_{0,2}\text{Ga}_{0,8}\text{As}$ ($E_g = 1,16$ эВ), то наблюдаемый темновой ток, вероятно, связан с туннелированием носителей через уровни ловушек, которые расположены в запрещенной зоне. Источниками этих уровней могут являться точечные дефекты, возникающие в процессе выращивания эпитаксиальных слоев, или неконтролируемые примеси.

На основе выполненных исследований и анализа полученных экспериментальных результатов, была проведена оптимизация конструкции фоточувствительной гетероструктуры. В структурах, рассмотренных выше, метаморфный буферный слой со ступенчатым изменением состава состоял из 6 ступеней (структура Б1), в модернизированной структуре МБС имел аналогичную конструкцию, но содержал в себе 8 слоев (структура Б2). Таким образом, был уменьшен шаг по изменению состава в пределах одной ступени, с целью формирования более плавных переходов между постоянными решетки. Кроме того, в модернизированной структуре толщина активной области была увеличена от 450 нм до 900 нм, а толщина МБС уменьшена от 1200 нм до 1000 нм, с целью уменьшения упругих напряжений на границе метаморфного слоя с функциональным слоем.

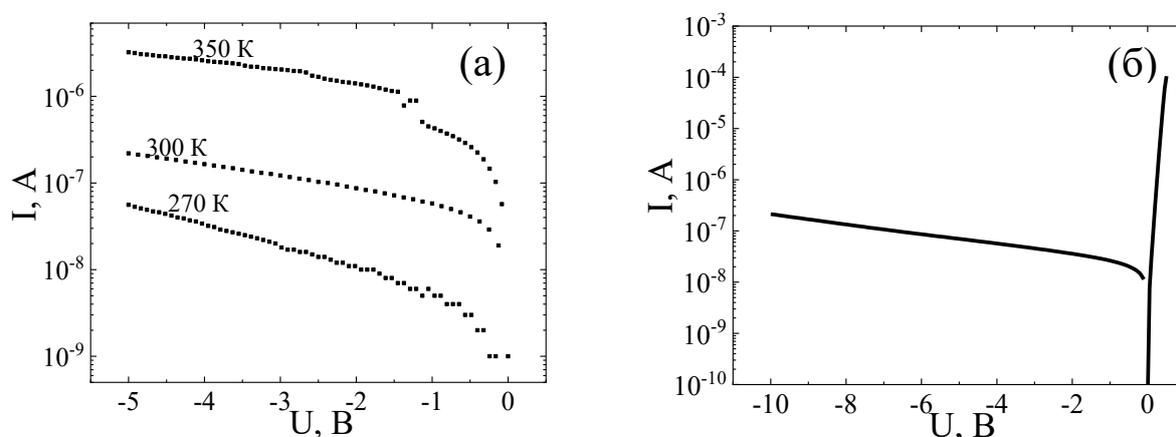


Рисунок 7 – а) Обратные ветви вольтамперных характеристик фотодиодов при различных температурах измерений; б) прямая и обратная ветви ВАХ, измеренные при температуре 300 К

В результате изменений в технологии роста для структуры Б2 зарегистрировано снижение плотности дислокаций относительно структуры Б1 с $6 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ до 10^4 см^{-2} . На диодах, изготовленных на основе структуры Б2, было получено снижение темнового тока до 6 нА при обратном смещении минус 5 В, что соответствует плотности тока $2,5 \times 10^{-6} \frac{\text{А}}{\text{см}^2}$. Подчеркнем, что данное значение всего на порядок выше, чем плотность тока фотодиодов аналогичной конструкции, выращенных на согласованных подложках. Фоточувствительность диодов, изготовленных на основе модернизированной структуры, на длине волны 1,06 мкм составила 0,4 А/Вт (значение фоточувствительности промышленных диодов, выращенных на согласованных подложках, лежит в диапазоне 0,8-1,1 А/Вт).

В заключительном разделе главы 3 был предложен модифицированный способ формирования дискретного метаморфного буферного слоя на подложке GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии с целью смещения рабочей длины волны фотодиода в область 1,3 мкм. Способ заключался в формировании периодического буферного слоя $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ и варьировании количества периодов. Исследованы гетероструктуры и фотодиоды, изготовленные

на их основе, содержащие 16 и 23 периода в дискретном МБС (структуры В1 и В2 соответственно). Схематическое изображение конструкций гетероструктур с дискретным МБС показано на рисунке 8.

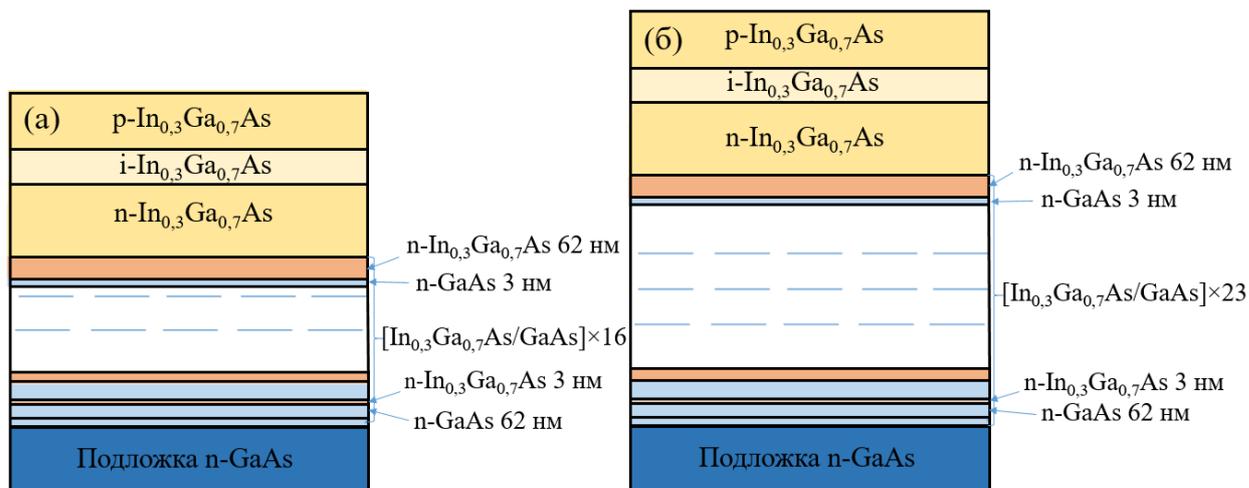


Рисунок 8 – Схематическое изображение конструкции фотодиодных гетероструктур на основе дискретного МБС для структур типа В1 (а) и В2 (б)

Значение плотности дислокаций в структуре В1, выявленное методом селективного травления и АСМ, составило $1,25 \times 10^6 \text{ см}^{-2}$. Согласно литературным данным [6], такое значение считается удовлетворительным результатом для структур с метаморфными слоями.

Исследование оптических свойств гетероструктур серии В осуществлялось с помощью спектроскопии фотолюминесценции. На спектре наблюдались два пика: первый – с длиной волны 0,88 мкм, соответствует излучению подложки GaAs, второй пик с длиной волны 1,241 мкм соответствует излучению фоточувствительной области In_{0,3}Ga_{0,7}As.

Для исследований электрофизических характеристик полученных структур были изготовлены лабораторные образцы фотодиодов с диаметром 560 мкм и глубиной мезоструктуры 1,5 мкм. Дизайн мезоструктуры аналогичен мезоструктуре, представленной на рисунке 6 б). С целью определения природы темнового тока исследованы температурные зависимости вольтамперных характеристик образцов. На рисунке 9 а) представлены характерные для исследуемых фотодиодов вольтамперные характеристики, измеренные при различных температурах в диапазоне температур 9 – 290 К. На рисунке 9 б) представлена зависимость темнового тока фотодиода при смещении минус 5 В от обратной температуры в полулогарифмическом масштабе.

В общем виде зависимость от температуры объемного темнового тока фотодиода может быть описана выражением (5) с разными значениями энергии активации на различных участках [А3]. На рисунке 9 б) можно выделить два диапазона температур (200-290) К и (9-200) К с энергиями активации 0,43 и 0,08 эВ соответственно. Известно, что ширина запрещенной зоны твердого раствора In_{0,3}Ga_{0,7}As при комнатной температуре составляет $E_g = 1,01 \text{ эВ}$. Таким

образом, значения энергий активации составляют около 50 % и 10 % от ширины запрещенной зоны твердого раствора, образующего р-п-переход. Можно предположить, что в диапазоне температур (200-290) К наибольший вклад в общий темновой ток вносит генерационно-рекомбинационная компонента. При обратном смещении повышается плотность генерационного тока за счет увеличения ширины ОПЗ. При этом происходит эффективное удаление дырок из ОПЗ, что снижает вероятность рекомбинации электронов.

При пониженных температурах (9-200) К преобладает ток, обусловленный туннелированием носителей через уровни ловушек, расположенных вблизи краев зон. Источниками этих уровней могут являться дефекты, возникающие в процессе выращивания эпитаксиальных слоев или неконтролируемые примеси.

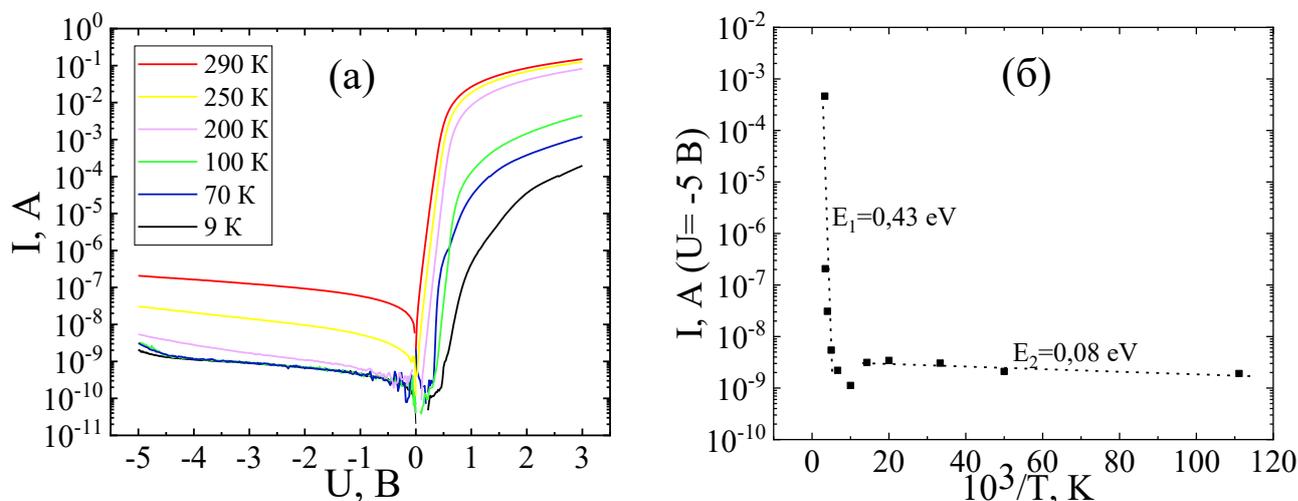


Рисунок 9 – а) Типичные ВАХ фотодиода, измеренные в диапазоне температур 9 – 290 К для структуры В2; б) зависимость темнового тока фотодиода при напряжении минус 5 В от температуры для структуры В2

В четвертой главе приведены результаты исследования структурных свойств и функциональных характеристик структур на основе слоев A^3B^5 , выращенных на подложке Si. Выполнены исследования гибридных излучающих и фоточувствительных гетероструктур с метаморфными буферными слоями A^3B^5 , выращенных на виртуальных подложках Ge/Si. Результаты опубликованы в работах [A1, A2, A6, A8].

Образцы серии Д получены с целью выявления зависимости формирования антифазных границ (АФГ) от состава «дислокационного фильтра», в котором изменялся состав зародышевого слоя $Al_xGa_{1-x}As$. Конструкция исследуемых структур представлена на рисунке 10.

Исследования методом оптической микроскопии показали, что для образца с зародышевым слоем $AlAs$ ($x = 1$) можно точно выделить доминантную фазу GaAs, внутри которой есть включения антифазных доменов (рисунок 11 а)). Для образца с зародышевым слоем GaAs ($x = 0$) можно заключить, что обе фазы приблизительно равнозначны и занимают примерно

одинаковую площадь. В образцах, имеющих зародышевый слой с $x = 0,3$ и $0,6$, границы антифазных доменов на изображениях не наблюдаются.

GaAs 1100 нм
$Al_xGa_{1-x}As$ 25 нм
GaAs 50 или 90 нм
$Al_xGa_{1-x}As$ 25 нм
Подложка Ge/Si

Рисунок 10 – Схематическое изображение конструкции гетероструктур серии Д

Более подробное исследование методом АСМ выявило, что в образцах с $x = 0,3$ и $0,6$ антифазные домены присутствуют, а их границы характеризуются резкими перепадами по высоте на поверхности структур. Однако относительная площадь антифазных доменов для структур с $x = 0,3$ и $0,6$ сравнительно мала. Так, для образца с AlAs домены занимают около 35% площади поверхности, а для GaAs – 40%. Наименьшее количество доменов наблюдается для структур со слоями

$Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ и $Al_{0,6}Ga_{0,4}As$. Занимаемая доменами площадь в этих образцах составила 0,05% и 0,36% соответственно.

Детализированные АСМ-исследования показали, что для образцов со слоем $Al_xGa_{1-x}As$ при $x = 0,3$ и $0,6$ домены локализованы во внутренних слоях буферного слоя. Можно заключить, что состав выращиваемого слоя может влиять на соотношение скоростей роста разных фаз, приводя к постепенному зарастиванию антифазных доменов слоем «основной» фазы.

Снижение плотности антифазных доменов сказывается на интенсивности фотолюминесценции. Так, было получено, что значение интенсивности ФЛ при комнатной температуре значительно выше для структур с $x = 0,3$ и $0,6$, что свидетельствует о более высоком оптическом качестве данных образцов вследствие уменьшения количества и размеров антифазных дефектов (рисунок 11 б)). Для образцов с меньшим количеством антифазных дефектов характерен также и меньший разброс интенсивности, что показывает более высокую однородность слоя по площади образца.

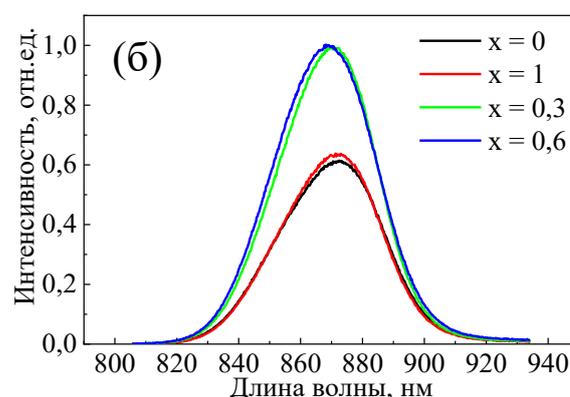
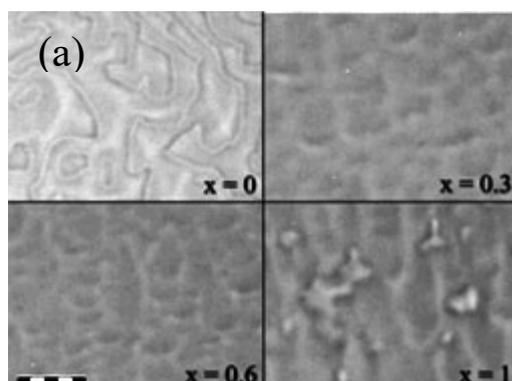


Рисунок 11 – а) Фотографии поверхности образцов GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ /Ge/Si, с варьируемым содержанием Al. Шкала в левом нижнем углу соответствует 5 мкм; б) спектры фотолюминесценции образцов GaAs/ $Al_xGa_{1-x}As$ /Ge/Si

Таким образом, введенные в начальную стадию роста слои $Al_xGa_{1-x}As$ позволяют получить структуры с относительно малым количеством антифазных доменов, выходящих на поверхность,

при общей толщине структуры, не превышающей 1,2 мкм. Состав зародышевого слоя влияет на соотношение скоростей роста соседних доменов, что приводит к доминированию одной из фаз и «зарастиванию» другой. Наименьшей плотностью дефектов обладает образец с зародышевым слоем $\text{Al}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$.

Во второй части главы 4 представлены результаты исследования A^3B^5 фоточувствительной структуры, выращенной на подложке Ge/Si (структура E) (рисунок 12 а)). На рисунке 12 б) представлено схематическое изображение мезаструктуры фотодиодов изготовленных на основе этой структуры.

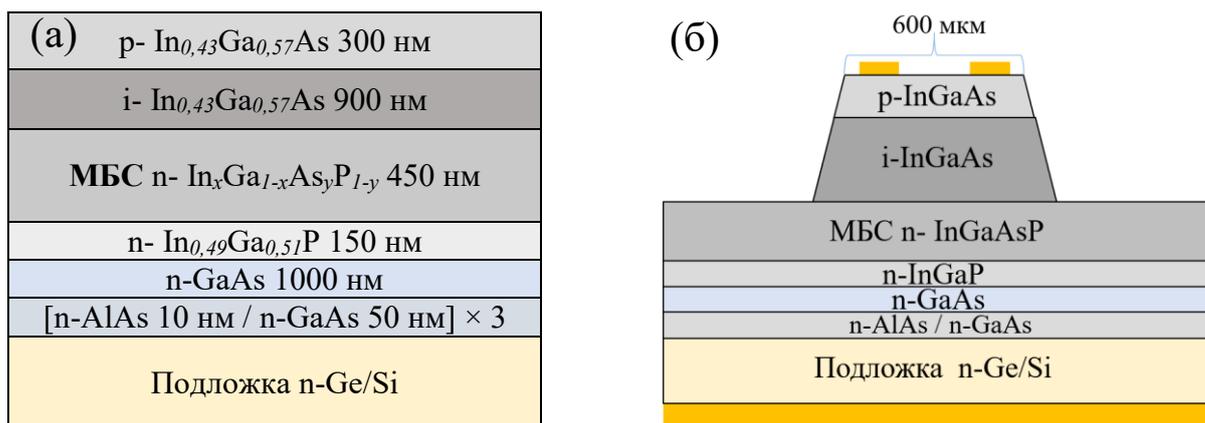


Рисунок 12 – а) Схематическое изображение конструкции исследуемой фотодиодной структуры E; б) дизайн мезаструктуры

На электронно-микроскопическом изображении поперечного среза структуры E, представленном на рисунке 13, разрешаются следующие слои: GaAs, $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$, метаморфный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, фоточувствительный слой $\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$. Видно, что метаморфный слой содержит большое количество прорастающих дислокаций, откуда можно сделать вывод, что слой является релаксированным. При этом в фоточувствительном слое $\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$

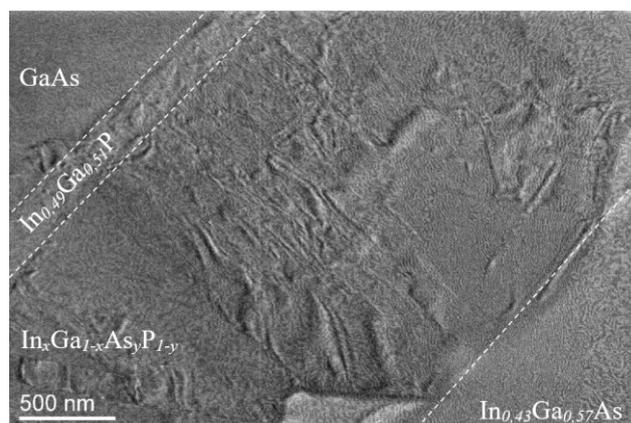


Рисунок 13 – ПЭМ-изображение поперечного среза структуры E, на котором присутствуют слои: GaAs, $\text{In}_{0,49}\text{Ga}_{0,51}\text{P}$, метаморфный слой $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, фоточувствительный слой $\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$

плотность прорастающих дислокаций значительно ниже, чем в МБС. Следовательно, основная доля прорастающих дислокаций остается в буферном слое, что положительно влияет на приборные характеристики фотодиодов, изготовленных на основе данных структур.

В спектре ФЛ структуры E при комнатной температуре наблюдаются два пика. Длинноволновый пик (1,33 мкм) соответствует излучению фоточувствительной области

$\text{In}_{0,43}\text{Ga}_{0,57}\text{As}$, а коротковолновый (1,05 мкм) — излучению буферного слоя $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$. При этом интенсивность ФЛ из фоточувствительной области превышает интенсивность ФЛ из буферного слоя.

На основе полученных структур были изготовлены лабораторные образцы фотодиодов (рисунок 12 б)). Исследования спектра фотоэдс показали, что максимум фоточувствительности расположен на длине волны 1,44 мкм при ширине спектра на полувысоте 0,49 мкм. Плотность темнового тока при напряжении обратного смещения минус 5 В для полученных диодов составила $2,5 \times 10^{-1}$ А/см². Данная величина значительно выше, чем значения обратного тока, полученные для структур, сформированных на подложке GaAs, описанных в главе 3. Это связано со сложностью рассматриваемых структур и большим количеством разновидностей дефектов по сравнению с гетероструктурами на основе одной группы материалов. Тем не менее, в рамках настоящей работы изучалась принципиальная возможность создания фоточувствительных структур на длину волны более 1 мкм на подложке Ge/Si с помощью МБС $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$.

В третьей части главы 4 рассмотрена гибридная светоизлучающая структура (структура Ж, рисунок 1). На рисунке 14 а) показаны измеренные спектры фотолюминесценции этой структуры в условиях постоянной накачки. При температуре 77 К в спектре ФЛ наблюдаются два широких (шириной более 100 нм) пика. Длинноволновый пик (1,45 мкм) соответствует излучению КЯ $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$, а коротковолновый (1,13 мкм) — излучению барьерных слоев. Интересно отметить, что интенсивность ФЛ из барьерных слоев значительно превышает интенсивность ФЛ квантовой ямы. При комнатной температуре наблюдается один широкий пик (1,2 мкм), соответствующий излучению из барьерных слоев. Относительно малый вклад КЯ в общий сигнал ФЛ образца при температуре 77 К и отсутствие фотолюминесценции, связанной с квантовой ямой, при комнатной температуре можно объяснить малой энергетической глубиной потенциального барьера для дырок в КЯ, что приводит к выбросу дырок в барьерные слои, причем процесс вносит заметный вклад в ФЛ уже при температуре 77 К.

В спектре ФЛ в условиях мощной импульсной накачки при плотности мощности возбуждающего излучения 260 кВт/см² наблюдается резкое увеличение интенсивности ФЛ, при этом возникает узкая (ширина спектра менее 17 нм) интенсивная линия излучения на длине волны 1,3 мкм (рисунок 14 б)). Указанная линия эмиссии наблюдается при сборе излучения с торца структуры и не выражена при наблюдении ФЛ с поверхности образца. Таким образом, она имеет все признаки стимулированного излучения (СИ). В то же время, спектральное положение наблюдаемой линии СИ не соответствует положению линий излучения КЯ (1,45 мкм) либо барьерных слоев (1,13 мкм) в спектрах стационарной ФЛ. Проведенные поляризационные измерения показали, что излучение на длине волны 1,3 мкм практически полностью

поляризовано, при этом вектор электрического поля лежит в плоскости роста образца. Это позволяет соотнести наблюдаемое излучение с оптическими переходами именно в квантовой яме [8]. Расхождение в длинах волн, на которых наблюдаются ФЛ и СИ, обусловлено тем, что переходы, ответственные за излучение в режиме ФЛ, осуществляются с основного состояния носителей в квантовой яме, а переходы, ответственные за СИ — с возбужденного состояния.

Расчеты энергетического спектра электронов и дырок в КЯ $\text{In}_{0,28}\text{Ga}_{0,72}\text{As}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в зависимости от состава твердого раствора $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ в КЯ показали, что соответствие энергии перехода между основными состояниями электронов и дырок в КЯ длине волны излучения, регистрируемой в спектрах стационарной ФЛ (1,45 мкм), достигается при доле In в КЯ $x \sim 0,58$. В этом случае длина волны (1,3 мкм), на которой наблюдается СИ, действительно соответствует оптическому переходу между вторыми подзонами электронов и дырок в КЯ.

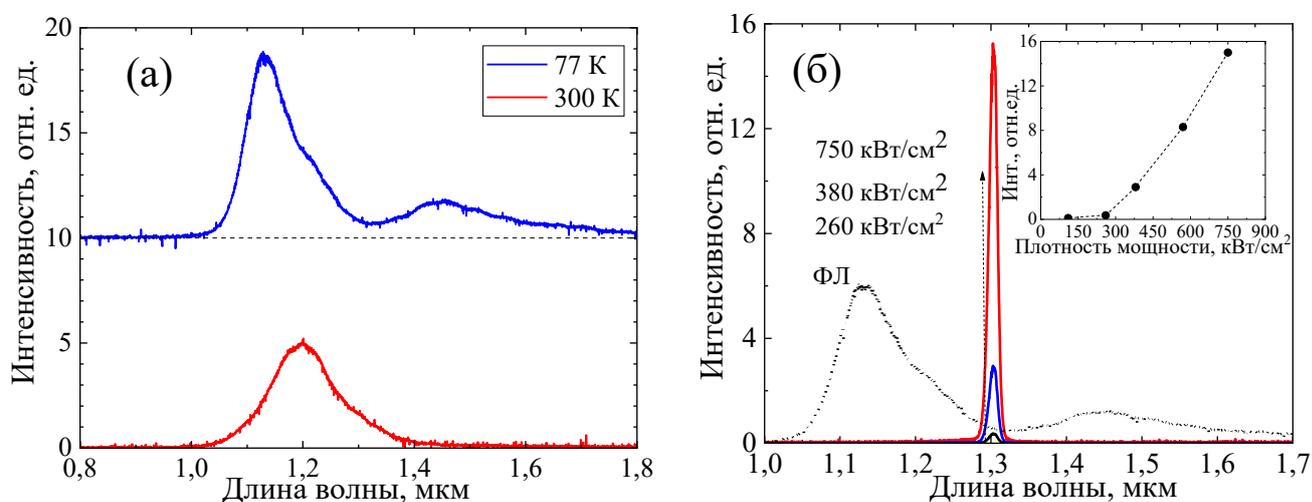


Рисунок 14 – а) Спектры фотолюминесценции структуры Ж; б) спектры излучения структуры Ж при импульсной накачке, в сравнении со спектром фотолюминесценции ($T = 77$ К).

На вставке: зависимость интенсивности излучения образца от плотности мощности импульсной накачки

Таким образом, в работе впервые методом МОС-гидридной эпитаксии была создана структура для лазерной генерации с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и КЯ $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si (001) и продемонстрировано стимулированное излучение на длине волны 1,3 мкм при температуре жидкого азота.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

- Методом МОС-гидридной эпитаксии получены гетероструктуры с метаморфными буферными слоями $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$. Снижение скорости роста метаморфных буферных слоев $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ со ступенчатым изменением состава до $2 \text{ \AA}/\text{с}$ при температуре роста $540 \text{ }^\circ\text{C}$ позволяет повысить кристаллическое качество буферного слоя. На основе гетероструктур с такими буферными слоями изготовлены излучающие структуры с квантовой ямой $\text{In}_{0,4}\text{Ga}_{0,6}\text{As}$ и

зафиксирована стабильная электролюминесценция на длине волны 1,31 мкм при комнатной температуре.

- Разработана лабораторная технология выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии буферных слоев $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ со ступенчатым изменением состава. Изготовлены фотодиоды с диаметром мезаструктуры 560 мкм и входом излучения через подложку. Темновой ток фотодиодов при комнатной температуре составил 6 нА (-5 В). Данное значение темнового тока соответствует темновому току фотодиодов, выращенных на подложках InP (длина волны 1,06 мкм). Изучена природа обратного темнового тока для фотодиодов на основе данного типа структур.

- Разработана лабораторная технология эпитаксиального выращивания методом МОС-гидридной эпитаксии $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}$ фотодиодных структур на основе дискретного метаморфного буферного слоя $\text{In}_{0,3}\text{Ga}_{0,7}\text{As}/\text{GaAs}$ на подложке GaAs. Выбранные режимы синтеза обеспечивают работу фоточувствительного элемента, отличающуюся низкой плотностью темнового тока (8×10^{-5} А/см² при комнатной температуре и обратном смещении -5 В).

- Исследована и продемонстрирована возможность фотоотклика на структуре с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$, сформированной методом МОС-гидридной эпитаксии на неотклоненной подложке Si с релаксированным Ge буферным слоем.

- Впервые методом МОС-гидридной эпитаксии создана лазерная структура с метаморфным слоем $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ и КЯ $\text{In}_{0,58}\text{Ga}_{0,42}\text{As}$ на неотклоненной подложке Si (001), продемонстрированы фотолюминесценция и стимулированное излучение на длинах волн 1,45 мкм и 1,3 мкм, соответственно, при температуре жидкого азота.

Список цитированной литературы

1. On the problem of internal optical loss and current leakage in laser heterostructures based on AlGaInAs/InP solid solutions / D.A. Veselov, I.S. Shashkin, K.V. Bakhalov et al. // *Semiconductors*. – 2016. – V. 50. – P. 1225–1230.
2. AlGaInAs/InP semiconductor lasers with an increased electron barrier / A.A. Marmalyuk, A.V. Ivanov, V.D. Kurnosov et al. // *Quantum Electronics*. – 2019. – V. 49, № 6. – P. 519.
3. Lasing characteristics of 1.3- μm npn-AlGaInAs/InP transistor laser – Dependence of the base layer structure / T. Yoshida, M. Yukinari, T. Kaneko et al. // *26th IPRM*. – IEEE. – 2014. – P.1–2.
4. Further insight into the temperature quenching of photoluminescence from InAs/GaAs self-assembled quantum dots / A. Chahboun, M. I. Vasilevskiy, N. V. Baidus et al. // *J. Appl. Phys.* – 2008. – V. 103, № 8. – P. 083548.
5. Канская Л. М., Куликов А. Ю. Узкополосные ИК фотодиоды (1,0–1,2 мкм) на напряженных селективных эпитаксиальных структурах GaAs/InGaAs // *ПЖТФ*. – 1995. – Т. 21, № 5. – С. 21.
6. Improved performances of 2,6 μm $\text{In}_{0,83}\text{Ga}_{0,17}\text{As}/\text{InP}$ photodetectors on digitally-graded metamorphic pseudo-substrates / Y. Shi, Y. MA, Y. Gu et al. // *J. Infrared Milli. Terahz. Waves*. – 2019. – V. 38, № 3. – P. 275–280.

7. Исследование фотоэлектрических характеристик диодов в макетных фоточувствительных пикселях для монолитного матричного ИК фотоприемника / А.В. Сорочкин, В.С. Варавин, А.В. Предеин и др. // ФТП. – 2012. – Т. 4, № 46. – С. 551.
8. Chow W.W., Koch S.W. Semiconductor – Laser Fundamentals. Physics of the Gain Materials. – Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1999. – V. 3. – P. 245.

Список основных опубликованных работ автора по теме диссертации

- A1. Monolithically integrated InGaAs/GaAs/AlGaAs quantum well laser grown by MOCVD on exact Ge/Si (001) substrate / V.Ya. Aleshkin, N.V. Baidus, A.A. Dubinov, A.G. Fefelov, Z.F. Krasilnik, K.E. Kudryavtsev, S.M. Nekorkin, A.V. Novikov, D.A. Pavlov, I.V. Samartsev, E.V. Skorokhodov, M.V. Shaleev, A.A. Sushkov, A.N. Yablonskiy, P.A. Yunin, D.V. Yurasov // Applied Physics Letters. – 2016. – V. 109, № 6. – P. 061111.
- A2. Технология изготовления лазерных диодов из структур GaAs/InGaAs/AlGaAs, выращенных на Ge/Si подложке / В.Я. Алешкин, Н.В. Байдусь, А.А. Дубинов, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, А.В. Рыков, И.В. Самарцев, А.Г. Фефелов, Д.В. Юрасов, З.Ф. Красильник // Физика и техника полупроводников. – 2017. – Т. 51, № 11. – С. 1530–1533.
- A3. Фотоприемники с активной областью InGaAs и метаморфным буферным слоем InGaP, выращенные на подложках GaAs / И.В. Самарцев, С.М. Некоркин, Б.Н. Звонков, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, И.Ю. Пашенькин, Н.В. Дикарева, А.Б. Чигинева // Физика и техника полупроводников. – 2018. – Т. 52, № 12. – С. 1460–1463.
- A4. 1,06 μm wavelength photodetectors with metamorphic buffer layers grown on GaAs substrates / I.V. Samartsev, S.M. Nekorkin, B.N. Zvonkov, N.V. Dikareva, A.V. Zdoroveyshchev, A.V. Rykov, N.V. Baidus // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing. – 2018. – V. 1124, № 4. – P. 041037.
- A5. InGaAs фотодиод с пониженным темновым током на диапазон 1,17–1,29 мкм с дискретным метаморфным буферным слоем / И.В. Самарцев, Б.Н. Звонков, Н.В. Байдусь, А.Б. Чигинева, К.С. Жидяев, Н.В. Дикарева, А.В. Здоровейщев, А.В. Рыков, С.М. Планкина, А.В. Нежданов, А.В. Ершов // Физика и техника полупроводников. – 2023. – Т. 57, № 6. – P. 495–500.
- A6. Стимулированное излучение на длине волны 1,3 μm в метаморфной структуре InGaAs/InGaAsP с квантовыми ямами, выращенной на подложке Ge/Si (001) / В.Я. Алешкин, Н.В. Байдусь, О.В. Вихрова, А.А. Дубинов, Б.Н. Звонков, З.Ф. Красильник, К.Е. Кудрявцев, С.М. Некоркин, А.В. Новиков, А.В. Рыков, И.В. Самарцев, Д.В. Юрасов // Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44, № 16. – С. 67–74.
- A7. Epitaxial structures for low-barrier mixing microwave diodes grown on a GaAs substrate / I.V. Samartsev, S.M. Nekorkin, B.N. Zvonkov, A.V. Rykov, A.B. Chigineva, Yu.I. Chechenin, A.A. Chilikov, S.V. Pankov // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – V. 87, № 6. – P. 857–861.
- A8. Влияние состава зародышевого слоя AlGaAs на формирование антифазных доменов в структурах (Al)GaAs, выращенных газофазной эпитаксией на подложках Ge/Si(100) / А.В. Рыков, Р.Н. Крюков, И.В. Самарцев, П.А. Юнин, В.Г. Шенгуров, А.В. Зайцев, Н.В. Байдусь // Письма в Журнал технической физики. – 2021. – Т. 47, № 8. – С. 37.
- A9. Методы переключения поляризации излучения в GaAs лазерных диодах / М.В. Дорохин, Б.Н. Звонков, П.Б. Демина, Н.В. Дикарева, А.В. Здоровейщев, А.В. Кудрин, О.В. Вихрова, И.В. Самарцев, С.М. Некоркин // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91, № 9. – С. 1409.