

На правах рукописи

ЕГОРОВ Антон Юрьевич

**АЗОТСОДЕРЖАЩИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ТВЕРДЫЕ
РАСТВОРЫ AlInV-N – НОВЫЙ МАТЕРИАЛ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность:

01.04.10 – физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургский Академический университет - научно-образовательный центр нанотехнологий РАН.

Официальные оппоненты:

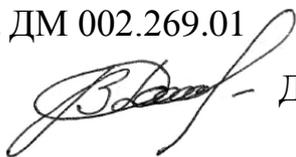
Академик РАН, доктор технических наук, профессор	Красников Геннадий Яковлевич
Доктор физико-математических наук, профессор	Новиков Борис Владимирович
Доктор физико-математических наук, профессор	Немов Сергей Александрович

Ведущая организация: Институт аналитического приборостроения РАН, г. Санкт-Петербург

Защита состоится «__» _____ 2011 г. в ____:____ час. на заседании объединенного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДМ 002.269.01 при Учреждении Российской академии наук Санкт-Петербургском Академическом университете - научно-образовательном центре нанотехнологий РАН по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д.8, корп.3, СПб АУ НОЦНТ РАН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПб АУ НОЦНТ РАН. Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю специализированного совета.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ДМ 002.269.01
доктор физико-математических наук  - Дубровский В.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Название диссертационной работы: «Азотсодержащие полупроводниковые твердые растворы A₃BV-N – новый материал оптоэлектроники».

Объект исследования

Новые полупроводниковые материалы, азотсодержащие твердые растворы GaAsN, InGaAsN, GaPN, GaAsPN, и композитные структуры на их основе (гетероструктуры), а также происходящие в них физические явления.

Области исследований

1. Физические основы технологических методов получения новых полупроводниковых материалов, азотсодержащих твердых растворов GaAsN, InGaAsN, композитных структур, структур пониженной размерности и полупроводниковых приборов на их основе.
2. Структурные и морфологические свойства новых полупроводниковых материалов, азотсодержащих твердых растворов GaAsN, InGaAsN, GaPN, GaAsPN, и композитных структур на их основе.
3. Дефекты в гетероструктурах InGaAsN.
4. Граница раздела полупроводников GaAsN/GaAs и InGaAsN/GaAs, полупроводниковые гетероструктуры InGaAsN/GaAsN/GaAs.
5. Электронные спектры полупроводниковых азотсодержащих твердых растворов GaAsN, InGaAsN.
6. Спонтанная и стимулированная люминесценция в полупроводниковых гетероструктурах InGaAsN/GaAsN/GaAs и полупроводниковые лазеры на их основе.
7. Оптические явления в структурах пониженной размерности.
8. Разработка физических принципов работы и создание приборов на базе полупроводниковых гетероструктур InGaAsN/GaAsN/GaAs.

Методы исследования

Синтез слоев азотсодержащих твердых растворов GaAsN, InGaAsN и их гетероструктур осуществлялся методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием газоразрядного источника атомарного азота. Структурные

свойства исследовались методами рентгеновской дифракции и просвечивающей электронной микроскопии. Оптические исследования выполнялись методом фотолюминесценции (ФЛ), возбуждения люминесценции (ВЛ), оптического отражения и инфракрасного поглощения. Для изготовления светоизлучающих приборов применялись фотолитография, сухое и жидкостное травление, вакуумная металлизация. Светоизлучающие лазерные диоды исследовались методом электролюминесценции.

Актуальность проблемы

Полупроводниковые твердые растворы со смешанными анионами, такие как $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ и $\text{GaP}_{1-x}\text{N}_x$ были введены в ряд классических полупроводников исследованиями, начатыми в 60х годах двадцатого столетия [1]. Уровень развития технологии того времени позволял реализовать твердые растворы $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ и $\text{GaN}_x\text{P}_{1-x}$ с низким содержанием азота (с концентрацией азота на уровне легирующей примеси). Последующее развитие технологии синтеза полупроводниковых соединений, таких методов синтеза как молекулярно-пучковая (МПЭ) и газофазная эпитаксия, позволило получить твердые растворы с существенно более высоким содержанием азота (конец 90х годов). Были синтезированы слои $\text{GaN}_x\text{As}_{1-x}$ и $\text{GaN}_x\text{P}_{1-x}$ с содержанием азота на уровне нескольких процентов [2,3], которые можно рассматривать как реальные тройные твердые растворы со смешанными анионами, в отличие от синтезируемых ранее бинарных соединений с изовалентным легированием.

Теоретической предпосылкой начала экспериментальных исследований послужило предсказание, в начале 90^х годов, существенной нелинейности композиционной зависимости ширины запрещенной зоны раствора GaAsN . Было предсказано, что ширина запрещенной зоны растворов GaAsN должна быстро уменьшаться по мере увеличения мольной доли азота. В четверных твердых растворах InGaAsN , добавление индия приводит к компенсации упругих напряжений вносимых азотом и к дальнейшему уменьшению ширины запрещенной зоны. Это открывает широкие возможности для исследования и апробирования новых концепций конструирования полупроводниковых

гетероструктур, синтез которых возможен на доступных подложках. Внедрение азота должно принципиально менять свойства нового материала по причине того, что электроотрицательность азота существенно выше, чем электроотрицательность мышьяка или фосфора. Внедрение азота, даже на уровне процента, должно приводить к полной модификации электронной структуры образованного твердого раствора. Замещение небольшой доли элементов пятой группы (As,P) атомами N в таких растворах должно существенно модифицировать зону проводимости, приводить к ее расщеплению и образованию двух непараболических подзон (E^- и E^+) [4-7].

$$E_{\pm} = 0.5((E^C(k) + E^L) \pm ((E^C(k) - E^L)^2 + 4V^2x)^{0.5}) \quad (1),$$

где $E^C(k)$ дисперсия зона проводимости соединения, атомы которого замещаются, E^L энергия локализованных состояний замещающих атомов (атомы азота). V параметр гибридизации локализованных состояний и состояний зоны проводимости. Предложенная модель (ВАС-модель) предсказывала уменьшение ширины запрещенной зоны твердого раствора при уменьшении постоянной кристаллической решетки твердого раствора, что кардинально отличается от свойств традиционных растворов Al₃B₅, увеличение эффективной массы зоны проводимости и изменение фундаментальных свойств соединений GaP_{1-x}N_x, переход от не прямой к прямой зонной структуре, уже при концентрациях азота менее одного процента [8]. Теоретические предсказания требовали экспериментального подтверждения.

Предсказанные значения ширины запрещенной зоны новых твердых растворов потенциально представляли интерес для создания источников излучения ближнего инфракрасного диапазона на подложках арсенида галлия и особенно вертикально-излучающих лазеров (ВИЛ). Характерной особенностью современного развития общества является быстрый рост информационно-телекоммуникационной индустрии. Внедрение перспективных информационных технологий во все сферы деятельности возможно только при наличии мощных систем передачи информации. Такие системы должны обеспечить высокие скорости передачи сообщений. Одним из основных

компонентов волоконно-оптических систем передачи являются передающие оптоэлектронные модули. Оптоэлектронные модули обеспечивают преобразование входного электрического сигнала в выходной оптический сигнал. Для этих целей используются инфракрасные светоизлучающие диоды или лазерные диоды способные поддерживать модуляцию излучаемого света с гигагерцовыми частотами.

Сегодня стандартные длины волн излучения лазеров используемых в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) - 850 нм и 1300 нм. Основные перспективы развития связаны с переходом на новую элементную базу, а именно на вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ). Основное достоинство ВИЛ – это эффективный ввод лазерного излучения в оптическое волокно. Преимущество длинноволнового стандарта, 1300 нм, обусловлено целым рядом технических аспектов. Прежде всего, минимальная дисперсия стандартного одномодового волокна на этой длине волны позволяет значительно увеличить скорость передачи информации. Намного меньший коэффициент поглощения в волокне на длине волны 1300 нм по сравнению с 850 нм обуславливает увеличение расстояния передачи информации. Стандарт 1300 нм позволяет в 1.5 раза снизить рабочее напряжение лазерного диода и в 10 раз повысить оптическую мощность в системах ВОЛС безопасную для человеческого глаза.

Не удивительно, почему ВИЛ, излучающие на длине волны 1300 нм, в настоящее время являются наиболее перспективным источником излучения для ВОЛС.

Система материалом AlAs/GaAs обладает целым рядом достоинств по сравнению с системой InGaAsP/InP с точки зрения практической реализации ВИЛ за исключением одного недостатка – сложности реализации эффективной рекомбинации носителей заряда с длиной волны излучения в спектральном диапазоне вблизи 1300 нм. Длинноволновая граница для гетероструктур с квантовыми ямами InGaAs/GaAs – 1200 нм.

Несомненные преимущества системы материалов AlAs/GaAs используемой для создания коротковолновых ВИЛ послужили предпосылкой

для поиска новых материалов, синтез которых возможен на подложках арсенида галлия и может обеспечить эффективную рекомбинацию носителей заряда с длиной волны излучения вблизи 1300 нм. Одним из направлений поиска, принесшим впоследствии положительные результаты, было исследование твердых растворов GaAsN и InGaAsN, с относительно низкой мольной долей соединения GaN (до 0.04) и относительно невысоким уровнем механических напряжений. Теоретически было предсказано, что ряд твердых растворов InGaAsN, вследствие сильного прогиба зависимости ширины запрещенной зоны от постоянной кристаллической решетки, может обладать запрещенной зоной в пределах от 1.42 эВ до нуля. Это, по сути, открывает возможность создания унифицированной технологии оптоэлектронных приборов на различные диапазоны длин волн на основе арсенида галлия. Экспериментальное доказательство этого предсказания требовало проведения широкомасштабных исследований физических свойств этого нового материала. Успешное выполнение подобных исследований осложнялось отсутствием технологии синтеза твердых растворов GaAsN и InGaAsN, и их гетероструктур, и требовало проведения детальных исследований физических основ технологии синтеза новых материалов.

Таким образом, **актуальность** настоящей диссертационной работы была определена несомненным интересом мирового научного сообщества к теоретически предсказанным необычным физическим свойствам нового класса твердых растворов, практически полным отсутствием экспериментальных подтверждений этих теоретических предсказаний, отсутствием опыта и знаний в области физики и технологии новых материалов и приборов на их основе.

В связи с изложенным выше, была определена **цель настоящей работы:** экспериментальное исследование физических свойств новых полупроводниковых материалов, азотсодержащих твердых растворов GaAsN, InGaAsN, GaPN, GaAsPN, и композитных структур на их основе (гетероструктур), а также происходящих в них физических явлений, разработка и исследование технологических процессов получения этих новых

полупроводниковых материалов и композитных структур на их основе, создание и исследование оригинальных полупроводниковых приборов, инжекционных лазеров на их основе.

Для достижения поставленной цели, в ходе работы решались следующие

основные задачи:

- Исследование физических основ технологии синтеза слоев GaAsN и InGaAsN методом молекулярно-пучковой эпитаксии на поверхности GaAs;
- Исследование методов создания квантоворазмерных гетероструктур InGaAsN/GaAsN/GaAs: гетероструктур с квантовыми ямами и гетероструктур с массивами самоорганизующихся квантовых точек;
- Исследование оптических и структурных свойств слоев нового класса твердых растворов и их квантоворазмерных гетероструктур;
- Исследование возможности использования новых твердых растворов в качестве активной среды оптоэлектронных приборов;
- Разработка физических принципов работы и создание инжекционных лазеров, на базе полупроводниковых гетероструктур InGaAsN/GaAsN/GaAs, полосковой конструкции и вертикально излучающих лазеров.

На защиту выносятся следующие основные положения:

Положение 1. Метод молекулярно-пучковой эпитаксии, с использованием высокочастотного газоразрядного источника атомарного азота, позволяет воспроизводимо получать слои и гетероструктуры нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN с заданными физическими свойствами, высокого структурного совершенства и управлять их химическим составом. Высокотемпературный отжиг, проводимый после эпитаксиального процесса, улучшает гомогенность эпитаксиальных слоев, существенно повышает эффективность излучательной рекомбинации в слоях и гетероструктурах нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN

и InGaAsN и приводит к коротковолновому сдвигу спектров фотолюминесценции.

Положение 2. Увеличение мольной доли азота, x , в слоях $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ приводит к быстрому уменьшению ширины запрещенной зоны твердого раствора одновременно с уменьшением постоянной кристаллической решетки. Для гомогенных псевдоморфных слоев твердого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ на поверхности арсенида галлия с ориентацией (100) при комнатной температуре в спектрах фотолюминесценции характерно существование двух линий обусловленных рекомбинацией электронов с легкой и тяжелой дырками. На гетерогранице GaAs/GaAsN образуется гетеропереход первого рода, а на гетерогранице InGaAs/GaAsN тип гетероперехода (I или II) определяется элементарным составом твердых растворов.

Положение 3. Величина ширины запрещенной зоны твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$, при значениях x и y более чем 0.018 и 0.30, соответственно, менее 0,95 эВ при комнатной температуре. Использование твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$, указанных составов, в качестве материала слоя квантовой ямы, с барьерными слоями GaAs, позволяет создавать квантоворазмерные гетероструктуры на поверхности арсенида галлия излучающие в спектральном диапазоне 1270-1500 нм при комнатной температуре. Квантоворазмерные гетероструктуры, излучающие в спектральном диапазоне вблизи длины волны 1300 нм, демонстрируют высокую эффективность излучательной рекомбинации при комнатной температуре.

Положение 4. Использование покрывающих азотсодержащих слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ вместо слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ в гетероструктурах с самоорганизующимися квантовыми точками, формирующимися из InAs, приводит к увеличению геометрических размеров квантовых точек, уменьшению энергии переходов между уровнями размерного квантования и длинноволновому сдвигу люминесценции в диапазон длин волн 1500 нм. Использование наногетероструктур специальной конструкции, состоящих из короткопериодных сверхрешеток $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x/\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$, в центр которых

помещается сверхтонкий слой InAs (монослой), позволяет расширить спектральный диапазон излучения для полупроводниковых гетероструктур, создаваемых на поверхности арсенида галлия, вплоть до длины волны 1800 нм, при комнатной температуре.

Положение 5. Использование квантоворазмерных гетероструктур GaAs/InGaAsN/GaAs в качестве активной усилительной среды позволяет реализовать эффективные низкопороговые лазеры на подложках арсенида галлия. Генерация в ближнем инфракрасном диапазоне, вблизи длины волны 1300 нм, наблюдается в непрерывном режиме, как при комнатной, так и при повышенных температурах, при выводе излучения боковой грани. Использование квантоворазмерных гетероструктур GaAsN/InGaAsN/GaAsN в качестве активной среды лазерных диодов приводит к существенному снижению пороговых токов лазерной генерации, по сравнению с гетероструктурами GaAs/InGaAsN/GaAs.

Положение 6. Результаты исследования гетероструктур с вертикальными микрорезонаторами, с распределенными брэгговскими отражателями AlGaAs/GaAs и активной областью на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAsN, позволившие впервые реализовать эффективные вертикально-излучающие лазеры на подложках арсенида галлия, работающие в непрерывном режиме генерации, как при комнатной, так и при повышенных температурах, в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, вблизи длины волны 1300 нм.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- Предложены и реализованы методы эпитаксиального выращивания новых полупроводниковых твердых растворов, позволяющие формировать однородные слои тройных твердых растворов GaAsN, и впервые продемонстрировать возможность создания совершенных слоев GaAsN на поверхности арсенида галлия;

- Впервые экспериментально наблюдался эффект расщепления энергетических подзон легкой и тяжелой дырок в упругонапряженном слое твердого раствора GaAsN на поверхности арсенида галлия;
- Экспериментально установлена взаимосвязь между параметром кристаллической решетки упругонапряженного твердого раствора GaAsN на поверхности арсенида галлия и шириной запрещенной зоны, проведена оценка влияния упругой деформации на энергетические зоны GaAsN и установлена зависимость между шириной запрещенной зоны и параметром кристаллической решетки для недеформированного твердого раствора GaAsN, уточнены параметры теоретической модели описывающей взаимодействие зоны проводимости с локализованным уровнем атома азота (ВАС модель);
- Впервые экспериментально продемонстрировано, что на границе GaAs-GaAsN образуется гетеропереход первого рода, а на гетерогранице InGaAs-GaAsN тип гетероперехода (I или II) определяется элементным составом твердых растворов;
- Предложены и реализованы методы эпитаксиального выращивания, позволяющие формировать однородные квантоворазмерные слои четверных твердых растворов InGaAsN на поверхности арсенида галлия, демонстрирующие относительно высокую эффективность излучательной рекомбинации в диапазоне длин волн вблизи 1300 нм;
- Экспериментально установлены зависимости энергии оптических переходов для гетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs различной толщины и элементного состава;
- Продemonстрировано, что использование нового класса твердых растворов GaAsN и InGaAsN позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения гетероструктур, синтез которых возможен на арсениде галлия, вплоть до длины волны 1800 нм;
- Впервые продемонстрировано, что использование квантовых ям InGaAsN/GaAs в качестве усилительной среды позволяет создавать

высокоэффективные низкопороговые инжекционные лазеры спектрального диапазона 1300 нм на подложках арсенида галлия;

- Впервые показано, что использование барьерных слоев GaAsN для формирования квантовой ямы InGaAsN/GaAsN/GaAs приводит к существенному уменьшению пороговой плотности тока лазерных диодов;
- Впервые созданы вертикально-излучающие лазеры диапазона длин волн 1300 нм удовлетворяющие требованиям их практического применения в качестве источников излучения для волоконно-оптических линий связи.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней:

- Получена новая детальная информация о процессе синтеза нового класса твердых растворов и физических основах технологии их создания методом молекулярно-пучковой эпитаксии;
- Получены новые знания о фундаментальных свойствах нового класса полупроводниковых твердых растворов;
- Разработаны научные основы и воспроизводимая технология создания инжекционных лазеров, с квантовыми ямами InGaAsN, излучающих как в плоскости слоя квантовой ямы, так и вертикальном направлении, для систем волоконно-оптических линий связи;
- Созданы и исследованы низкопороговые лазеры с квантовыми ямами InGaAsN, работающие в непрерывном режиме генерации, при комнатной и повышенных температурах, продемонстрированы рекордно низкие значения плотности порогового тока, рекордная выходная оптическая мощность;
- Созданы вертикально-излучающие лазеры диапазона длин волн 1300 нм с выходной оптической мощностью превышающей 1 мВт;
- Продемонстрирована способность передачи информации при использовании лазеров с квантовыми ямами InGaAsN в качестве источника излучения со скоростью до 10 ГБт/с.

В результате выполнения диссертационной работы сформировалось **новое научное направление** в физике полупроводников – светоизлучающие

азотсодержащие полупроводниковые гетероструктуры твердых растворов АШВV-N и лазеры на их основе.

Результаты настоящей работы могут быть использованы при фундаментальных и прикладных исследованиях полупроводниковых гетероструктур в учреждениях Российской Академии Наук (СПб АУ НОЦНТ РАН, С.-Петербург; ФТИ им.А.Ф.Иоффе, С.-Петербург; ФИАН им. П.Н.Лебедева, Москва; ИФТТ, Черноголовка; ИПП, Новосибирск; ИФМ, Н. Новгород), в ГОИ им. С.И.Вавилова, С.-Петербург, в СПбГПУ, С.-Петербург.

Апробация работы.

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: Международный симпозиум «Наноструктуры: Физика и технология» (Россия, Санкт-Петербург 1999, 2000, 2003, 2004(приглашенный доклад), 2006, 2007); 26 Международный симпозиум по полупроводниковым соединениям (Берлин, Германия, 1999); XI, XII Международные конференции по молекулярно-пучковой эпитаксии (Пекин, КНР, 2000; Сан-Франциско, США, 2002); Европейская конференция по молекулярно-пучковой эпитаксии «EURO-MBE 2003» (Бадхофгаштайн, Австрия, 2003); Совещание Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники "ФОТОНИКА 2003" (28-31 августа 2003г. Россия, Новосибирск); Совещание «НАНОФОТОНИКА» (Нижний Новгород, 17-20 марта 2003).

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались на конкурсе научных работ ФТИ им. А.Ф.Иоффе в 2003 и 2008 гг. Присуждены премии за лучшую работу ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Премия ФТИ в 2003 году за работу «Соединения InGaAsN: синтез, свойства и лазеры ближнего ИК диапазона на их основе» (Егоров А.Ю., Ковш А.Р. Жуков А.Е., Устинов В.М., Лившиц Д.А.). Премия ФТИ в 2008 за работу «Гигантская спиновая поляризация электронов в полупроводнике, обусловленная спин-зависимой рекомбинацией» (Калевич В.К., Ивченко Е.Л., Ширяев А.Ю., Афанасьев М.М., Егоров А.Ю., Устинов В.М.)

Публикации.

Основные результаты работы опубликованы в 69 печатных работах, в том числе 1 коллективная монография, 50 научных статей и 16 докладов в материалах конференций, 2 патента.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка публикаций включенных в диссертацию, списка цитированной литературы, изложенных на 335 страницах. Диссертация включает 134 рисунков, 14 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность настоящей диссертационной работы, сформулированы цель, задачи и положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе «Молекулярно-пучковая эпитаксия нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN» изложены общие физические основы метода молекулярно-пучковой эпитаксии твердых растворов A₃B₅, характерные особенности метода молекулярно-пучковой эпитаксии азотсодержащих твердых растворов A₃B₅ при использовании высокочастотного газоразрядного источника атомарного азота, описывается технологическое оборудование необходимое для проведения эпитаксиальных процессов. В главе подробно описан технологический процесс синтеза слоев нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN, InGaAsN и их гетероструктур, обсуждаются технологические режимы и специфические методики синтеза, позволившие решить проблему воспроизводимого получения слоев и многослойных гетероструктур твердых растворов с заданными физическими свойствами и методы управления композиционным составом эпитаксиальных слоев при молекулярно-пучковой эпитаксии. В главе подробно обсуждаются результаты исследования влияния основных параметров эпитаксиального процесса, таких как характеристики высокочастотного газового разряда, величины потоков элементов третьей (Ga,

In) и пятой группы (As, N) подаваемых эпитаксиальную поверхность, температура эпитаксии. В ходе выполнения работ установлена взаимосвязь между потоком молекулярного азота и мощностью, подводимыми к области высокочастотного разряда, и интенсивностью свечения газового разряда. Зависимости мольной доли азота, x , в эпитаксиальных слоях $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ от интенсивности свечения газового разряда, I , при фиксированном потоке элементов третьей группы (здесь поток галлия) и от отношения потоков элементов третьей группы F_{III}/F_{III}^0 , при фиксированной интенсивности свечения газового разряда, приведены на рис.1 (F_{III} – поток галлия на поверхность эпитаксии, F_{III}^0 соответствует потоку галлия, обеспечивающему скорость выращивания эпитаксиального слоя 0,1 нм/сек). Величина мольной доли азота прямо пропорциональна интенсивности свечения плазмы и обратно пропорциональна величине потока элементов третьей группы.

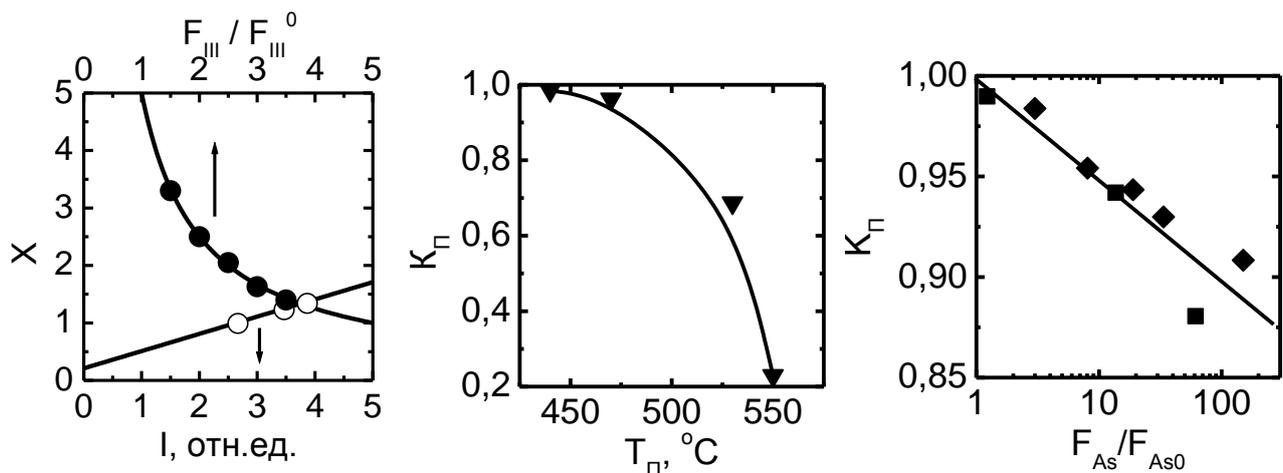


Рис.1. Зависимость мольной доли азота, x , в эпитаксиальных слоях $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ от интенсивности свечения газового разряда, I , при фиксированном потоке элементов третьей группы и от отношения потоков F_{III}/F_{III}^0 элементов третьей группы, при фиксированной интенсивности свечения газового разряда (слева). F_{III} – поток галлия на поверхность эпитаксии, F_{III}^0 – поток галлия, обеспечивающий скорость 0.1 нм/сек. Зависимость коэффициента прилипания атомарного азота к эпитаксиальной поверхности от температуры подложки (в середине) и зависимость коэффициента прилипания атомарного азота к эпитаксиальной поверхности от отношения потоков мышьяка при температуре выращивания 450°C (справа). F_{As} – поток мышьяка на поверхность эпитаксии, F_{As0} - поток мышьяка, соответствующий переходу от выращивания в условиях обогащения элементами V-группы к выращиванию в условиях обогащения элементами III-группы.

В ходе выполнения работы было установлено, что наиболее важным параметром эпитаксиального процесса является температура выращивания. В температурах ниже 450°C коэффициент прилипания (встраивания) атомарного азота в выращиваемый слой близок к единице и слабо зависит от потока мышьяка (см. рис. 1).

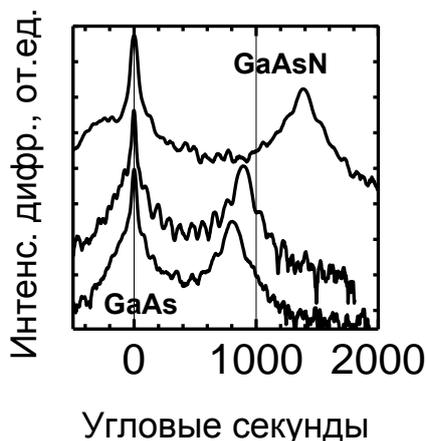


Рис.2. Рентгено-дифракционные кривые качания около симметричного рефлекса (004) арсенида галлия для слоев GaAsN выращенных на поверхности GaAs(100). Мольная доля азота в слоях твердого раствора 0.0156, 0.0175, 0.0273 (снизу вверх, соответственно). Пик в угловом положении 0 секунд соответствует дифракции от подложки GaAs, пики в диапазоне 700-1700 секунд соответствует дифракции от упругодеформированного эпитаксиального слоя GaAsN.

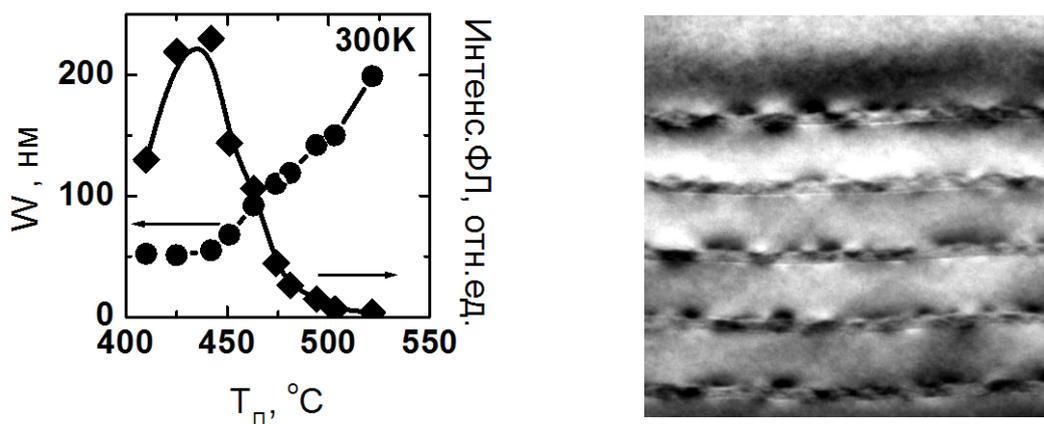


Рис.3. Зависимость интенсивности фотолуминесценции и ширины линии фотолуминесценции на полувывоте, W , гетероструктур с квантоворазмерными слоями InGaAsN от температуры подложки (слева). Микрофотография, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, гетероструктуры с квантоворазмерными слоями InGaAsN выращенная при температуре подложки 480°C (справа).

Для определения постоянной кристаллической решетки слоев GaAsN и InGaAsN, и соответствующей мольной доли азота, а также кристаллического совершенства созданных эпитаксиальных слоев использовался метод рентгеновской дифракции. Рентгено-дифракционные кривые качания около симметричного рефлекса (004) арсенида галлия для упругодеформированных слоев GaAsN выращенных на поверхности GaAs(100) приведены на рис.2. При температурах эпитаксии в диапазоне 400-450°C удается синтезировать слои высокого структурного совершенства, с достаточно однородным пространственным распределением атомов различных элементов в твердом растворе. Для таких слоев характерны пики рентгеновских кривых качания (рис.2) и спектры фотолюминесценции (рис.3) с относительно малыми значениями ширины на полувысоте. 100 угловых секунд для пиков кривых качания (при толщине слоя GaAsN 200 нм) и менее 100 мэВ для спектров фотолюминесценции. Повышение температуры эпитаксии приводит к уменьшению коэффициента встраивания азота, существенному увеличению флуктуаций элементного состава твердого раствора, значительному уширению кривых качания и линий фотолюминесценции, значительному уменьшению интегральной интенсивности фотолюминесценции, деградации поверхности растущей пленки. Зависимость интенсивности фотолюминесценции и ширины спектров фотолюминесценции гетероструктур с квантоворазмерными слоями InGaAsN от температуры подложки приведена на рисунке 3. Наибольшая интенсивность и наименьшая ширина (около 50 нм при комнатной температуре) наблюдается для гетероструктур выращенных при температурах в диапазоне 400±30°C. Микрофотография, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, гетероструктуры с квантоворазмерными слоями InGaAsN выращенная при температуре подложки 480°C (не оптимальная температура) приведена на рис.3, справа. При повышенной такой температуре эпитаксии наблюдается значительное ухудшение планарности гетерограниц, значительное ухудшение гомогенности слоев InGaAsN и образование

локальных областей обогащенных индием. Иными словами, твердый раствор начинает распадаться.

Важную роль при создании слоев азотсодержащих твердых растворов играет высокотемпературный отжиг. Отжиг может осуществляться непосредственно в эпитаксиальном реакторе в потоке мышьяка, либо в камере отжига в инертной атмосфере. Высокотемпературный отжиг, проводимый после эпитаксиального процесса, улучшает гомогенность эпитаксиальных слоев, существенно повышает эффективность излучательной рекомбинации в слоях и гетероструктурах полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN (интенсивность фотолюминесценции возрастает до 20 раз) и приводит к коротковолновому сдвигу спектров фотолюминесценции (до 50 нм для гетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN). Коротковолновый сдвиг, прежде всего, обусловлен размытием локальных областей обогащенных индием. Конкретные значения коротковолнового сдвига и увеличения интенсивности ФЛ зависят от продолжительности и температурного режима отжига, от структурной однородности слоя квантовой ямы InGaAsN, которая подвергается отжигу. При проведении отжига в эпитаксиальном реакторе, образцы плавно нагревались до температуры 700-770°C в потоке мышьяка, выдерживались при такой температуре в течение 5-30 минут, а затем плавно охлаждались до комнатной температуры. Было обнаружено, что модификация оптических свойств начинается при 650°C, но наиболее эффективно происходит при температуре 740-750°C в течение 10 минут. Дальнейшее увеличение времени отжига не приводит практически к каким-либо заметным изменениям. Увеличение температуры отжига более 750°C приводит к нарушению поверхности образца и к диффузии индия из области квантовой ямы в барьеры.

Во второй главе «Фундаментальные физические свойства слоев и гетероструктур нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN, InGaAsN, GaPN, GaAsPN» освещаются и обсуждаются результаты экспериментальных исследований физических свойств новых твердых

растворов, проводится сравнение полученных результатов с результатами других исследовательских групп. Глава состоит из четырех основных разделов.

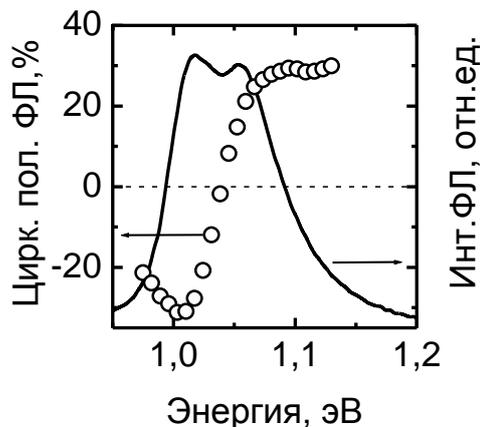


Рис.4. Спектры фотолюминесценции и циркулярной поляризации фотолюминесценции, упругодеформированного слоя $\text{GaAs}_{0.965}\text{N}_{0.035}$ выращенного на поверхности $\text{GaAs}(100)$, зарегистрированные при комнатной температуре. Знаки циркулярной поляризации подтверждают то, что низкоэнергетический и высокоэнергетический пики обусловлены рекомбинацией электрона с участием легкой и тяжелой дырок, соответственно.

В первом разделе «Исследование свойств твердых растворов GaAsN » приводятся и обсуждаются результаты экспериментальных исследований оптических и структурных свойств слоев твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ ($x < 0.04$). В ходе проведения исследований фотолюминесцентных свойств $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ впервые наблюдались спектры, состоящие из двух линий (рис.4), при комнатной температуре, при этом рентгеноструктурный анализ свидетельствовал о высоком структурном совершенстве и высокой однородности слоя твердого раствора. Было установлено, что эти две линии соответствуют рекомбинации электронов с участием легкой и тяжелой дырок. Таким образом, впервые экспериментально наблюдался эффект расщепления подзон легкой и тяжелой дырок под действием упругой деформации в упруго-напряженном слое твердого раствора GaAsN , на поверхности арсенида галлия при комнатной температуре. Для того чтобы экспериментально установить взаимосвязь между параметром кристаллической решетки упругонапряженного

твёрдого раствора GaAsN, которая напрямую связана с мольной долей азота в твёрдом растворе,

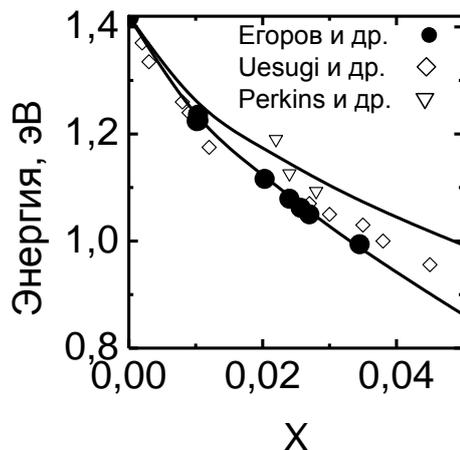


Рис.5. Экспериментально определенная зависимость ширины запрещенной зоны упругодеформированного твёрдого раствора от мольной доли азота, x , в эпитаксиальных слоях $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ на поверхности GaAs (100) (нижняя кривая). Расчетная зависимость ширины запрещенной недеформированного твёрдого раствора $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ (верхняя кривая). Для сравнения приведены экспериментальные результаты других исследовательских групп [13]. Результаты Uesugi и др. совпадают с данными, полученными в настоящей работе, небольшое отличие в области $x > 0.3$ очевидно связано с частичной релаксацией упругих напряжений в слоях синтезированных этим коллективом. Результаты Perkins и др. отличаются и более соответствуют расчетной зависимости для недеформированного твёрдого раствора. Это можно объяснить тем, что толщина эпитаксиальных слоев созданных этим коллективом превышала критическую толщину, что и привело к полной релаксации упругих напряжений.

методом молекулярно-пучковой эпитаксии на поверхности арсенида галлия с ориентацией (100) была выращена серия образцов GaAsN. Экспериментальные образцы исследовались методами фотолюминесценции и рентгеноструктурного анализа. Определенная на основании экспериментальных данных, зависимость ширины запрещенной зоны упругодеформированного твёрдого раствора GaAsN от мольной доли азота приведена на рис.5. Обнаруженный энергетический зазор между подзонами валентной зоны позволил провести оценку влияния упругой деформации на энергетические зоны GaAsN (валентную зону и зону проводимости) и установить зависимость ширины запрещенной зоны от

параметра кристаллической решетки для недеформированного твердого раствора GaAsN (рис.5). Расчет влияния упругой деформации на энергетические зоны GaAsN производился в соответствии с теорией изложенной в литературе [12]. Хорошее совпадение рассчитанной величины энергетического зазора между подзонами валентной зоны с величиной наблюдаемой в эксперименте (рис.4) позволяет говорить о достоверности полученных результатов.

Основной параметр модели (ВАС-модель), позволяющей вычислять ширину запрещенной зоны таких твердых растворов в зависимости от мольной доли азота, предложенной Кентом, Зунгером и др., - параметр гибридизации зоны проводимости GaAs и локализованного уровня азота в GaAs. Исследования, проведенные в настоящей работе, позволили определить величину параметра гибридизации как 2.25 эВ.

Одним из важных вопросов возникающих при конструировании гетероструктур новых материалов является величина разрыва энергетических зон на гетерогранице. Эксперименты, проведенные в ходе настоящей работы, впервые позволили оценить величину разрыва зоны проводимости и валентной на гетерогранице GaAs-GaAsN и продемонстрировать, что на гетерогранице GaAs-GaAsN образуется гетеропереход первого рода, а на гетерогранице InGaAs-GaAsN тип гетероперехода (I или II) определяется элементарным составом твердых растворов.

Во втором разделе главы «Исследование свойств твердых растворов InGaAsN и гетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN/GaAsN/GaAs» приводятся и обсуждаются результаты экспериментальных исследований оптических и структурных свойств слоев твердых растворов InGaAsN и гетероструктур твердых растворов с квантовыми ямами InGaAsN/GaAsN/GaAs. Гетероструктуры, содержащие слои четверных твердых растворов InGaAsN, исследовались методами фотолюминесценции (ФЛ), возбуждения фотолюминесценции, рентгеновской дифракции, инфракрасной Фурье-спектрометрии, просвечивающей электронной микроскопии. Для получения

достоверной информации, в ходе выполнения работы, методом молекулярно-пучковой эпитаксии, синтезированы многочисленные серии образцов с квантовыми ямами InGaAsN различного элементного состава и толщины.

Одним из принципиальных аспектов возникающих при исследовании твердых растворов InGaAsN вопрос, является ли взаимное расположение атомов различных элементов случайным как, например, для раствора InGaAs, или возникает какое-либо перераспределение, обусловленное внедрением азота. Экспериментальные методы исследования, такие как фотолюминесценция и рентгеновская дифракция не могут дать ответ на этот вопрос. Информация о локальном строении твердого раствора, локальном окружении атомов азота, была получена при помощи метода инфракрасной Фурье-спектрометрии (ИКФС).

Известно, что внедрение азота в арсенид галлия приводит к появлению локальной вибрационной моды (ЛВМ) с волновым числом 471 см^{-1} , а в арсенид индия ЛВМ с волновым числом 424 см^{-1} . Эти ЛВМ обусловлены появлением изолированных атомов азота в узлах анионной подрешетки, N_{As} [9]. Частота ЛВМ позволяет судить о локальном окружении атома азота, поскольку в сильной степени зависит от силы связи с ближайшими соседями и массы ближайших соседних атомов. Именно определение частоты таких локальных вибрационных мод посредством ИКФС может дать ответ о микроскопической структуре твердого раствора. В четверном твердом растворе $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}_{0.982}\text{N}_{0.018}$ со случайным распределением атомов элементов образующих твердый раствор вероятность того, что 4, 3, 2, 1 и 0 ближайших соседа атома азота будут атомы галлия – 0.18, 0.38, 0.31, 0.11 и 0.015. Для этих комплексов, теория предполагает существование различных частот ЛВМ, которые должны находиться в диапазоне между частотами ЛВМ комплексов N-Ga₄ и N-In₄ [10,11]. Однако обнаружить существование таких линий в спектрах ИКФС слоев InGaAsN выращенных методом МПЭ не удалось. В InGaAsN доминируют комплексы N-Ga₄, с волновым числом 471 см^{-1} , как и в слоях GaAsN. Таким образом, в слоях InGaAsN, синтезированных методом МПЭ с

содержанием азота до 0.03 и содержанием индия до 0.36, четыре ближайших соседа окружающие атом азота, по-видимому, атомы галлия, независимо от концентрации индия.

Используя полученные знания о локальном строении твердых растворов InGaAsN, можно предположить, что энергетическое положение локализованного уровня азота для InGaAsN такое же, как и для GaAsN (165 мэВ выше края зоны проводимости GaAs). Тогда, используя это значение, известные энергетические параметры для твердых растворов InGaAs и выражение 1, можно рассчитать структуру зоны проводимости и оценить ширину запрещенной зоны InGaAsN. Результаты расчетов на рис.6 (справа). При увеличении доли индия величина параметра гибридизации уменьшается, при этом достигается соответствие с результатами, полученными вторым способом. Второй способ опирался на результаты, полученные методом ФЛ. В ходе исследования фотолюминесцентных свойств гетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs (рис.6, слева) были экспериментально установлены зависимости энергии оптических переходов для гетероструктур с квантовыми ямами различной толщины и состава (рис.6, в центре). Используя известные значения эффективной массы, энергетические параметры для твердых растворов InGaAs, в предположении, что внедрение азота увеличивает только разрыв зоны проводимости на гетерогранице InGaAsN/GaAs, посредством численного решения уравнения Шредингера, был произведен расчет энергии оптических переходов и определена ширина запрещенной зоны InGaAsN. При расчетах ширина запрещенной зоны варьировалась до тех пор, пока расчетная энергии оптических переходов не совпадала с результатами полученными методом ФЛ, с точностью не хуже чем ± 10 мэВ. Полученные значения также показаны на рис.6 (справа) символами.

Увеличение концентрации, как индия, так и азота приводит к уменьшения ширины запрещенной зоны твердого раствора. Величина ширины запрещенной зоны твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$, при значениях x и y более чем 0.018 и 0.30, соответственно, менее 0,95 эВ при комнатной

температуре. Одновременно, при увеличении концентрации, как индия, так и азота наблюдается уширение спектров ФЛ. Такое поведение характерно для композиционно неоднородных слоев, в которых присутствуют локальные области различного состава, с различной энергией локализации носителей. Фактом, свидетельствующим о наличии композиционных флуктуаций в слое квантовой ямы, является так называемая «S-образная» характеристика температурной зависимости положения максимума спектра ФЛ для КЯ InGaAsN , в отличие от монотонно возрастающей зависимости, при уменьшении температуры, характерной для однородных твердых растворов.

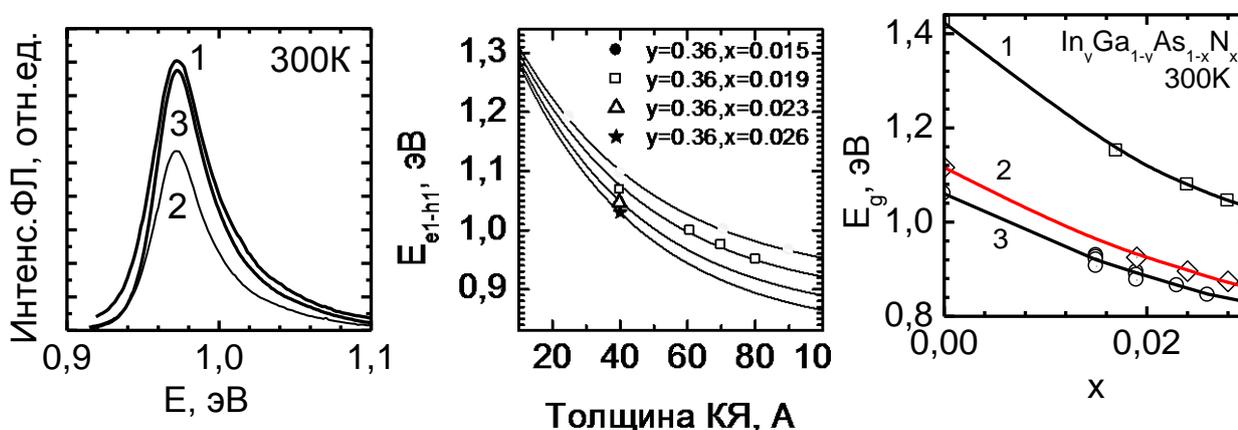


Рис.6. Спектры фотолюминесценции гетероструктур с квантовыми ямами (слева).

1- $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ ($y=0.35$, $x=0.019$, толщина 6.5 нм) / GaAs;

2- $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ ($y=0.35$, $x=0.019$, 6.0 нм) / $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ ($x=0.017$, 6.0 нм) / GaAs;

3- $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ ($y=0.35$, $x=0.019$, 5.8 нм) / $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ ($y=0.05$, $x=0.017$, 6.0 нм) / GaAs.

Зависимость энергии оптических переходов между основными состояниями электрона и дырки гетероструктур с квантовыми ямами $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ / GaAs от толщины квантовой ямы (в центре).

Ширина запрещенной зоны твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ (справа). Расчетные кривые по ВАС-модели: 1, 2 и 3, для твердых растворов мольными долями индия 0.0, 0.30 и 0.36, при значениях параметрах гибридизации 2.58, 2.22 и 2.15, соответственно. При увеличении доли индия величина параметра гибридизации уменьшается, при этом достигается соответствие с результатами, полученными вторым способом (символы). Символами показаны значения, рассчитанные вторым способом, на основании экспериментальных данных полученных методом ФЛ и при помощи решения уравнения Шредингера для гетероструктур с квантовыми ямами $\text{InGaAsN}/\text{GaAs}$.

Под действием отжига происходит перераспределение индия, и величина флуктуаций индия в слое четверного твердого раствора уменьшается. Слой квантовой ямы становится более однородным. Понижение температуры выращивания вплоть до 350°C позволяет изначально существенно уменьшать эффект формирования локальных областей различного состава и создавать квантоворазмерные слои InGaAsN высокой однородности.

В третьем разделе «Квантоворазмерные гетероструктуры излучающие в спектральном диапазоне 1300-1800 нм» продемонстрировано, что использование нового класса твердых растворов GaAsN и InGaAsN позволяет существенно расширить спектральный диапазон излучения гетероструктур, синтез которых возможен на арсениде галлия, вплоть до длины волны 1800 нм.

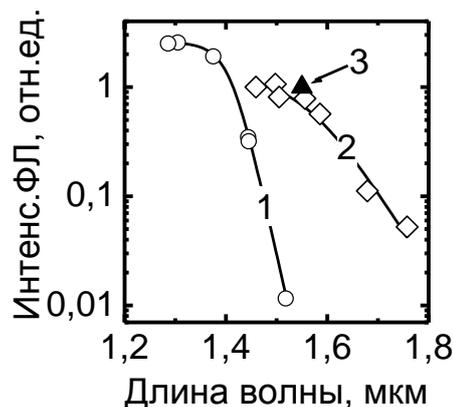


Рис.7. Интегральная интенсивность ФЛ (при 300К) наногетероструктур с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs (1), короткопериодными сверхрешетками InGaAsN/GaAsN со вставками InAs (2), квантовыми точками GaAsN/InAs/InGaAsN/GaAsN (3).

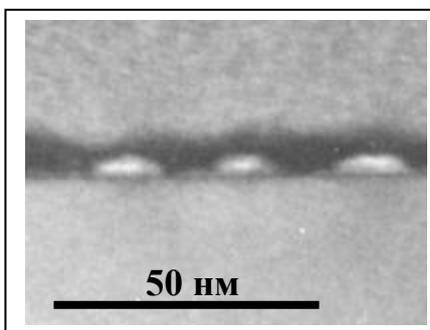
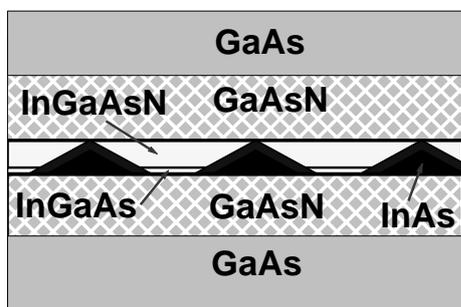


Рис.8. Конструкция и микрофотография, полученная методом просвечивающей электронной микроскопии, гетероструктуры GaAsN/InAs/InGaAsN/GaAsN с квантовыми точками на подложке арсенида галлия. Показанная конструкция демонстрирует наибольшую интенсивность фотолюминесценции. Гетероструктура излучает на длине волны 1550 нм.

Исследования велись в трех направлениях: наногетероструктуры с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs, с повышенным содержанием индия и азота; наногетероструктуры GaAsN/InAs/InGaAsN/GaAsN с самоорганизующимися квантовыми точками; наногетероструктуры состоящие из короткопериодных сверхрешеток InGaAsN/GaAsN, в центр которых помещался слой InAs толщиной 0.3-0.5 нм (рис.7). В ходе работы было установлено, наиболее эффективную ФЛ вблизи длины волны 1550 нм демонстрируют наногетероструктуры полученные вторым и третьим способами. Результаты сравнения интегральной интенсивности фотолюминесценции приведены на рис.7. Конструкция и микрофотография гетероструктуры с квантовыми точками показана на рис.8.

В четвертом разделе приведены результаты исследования оптических свойств твердых растворов $\text{GaN}_x\text{As}_y\text{P}_{1-x-y}$. В ходе выполнения работы оптические свойства слоев четверных полупроводниковых твердых растворов, с величинами мольных долей азота, x , и мышьяка, y , в диапазонах 0.006-0.012 и 0.00-0.18, соответственно, выращенных на поверхности подложки GaP(100) методом газофазной эпитаксии, исследовались методами ФЛ и ВЛ, в диапазоне температур 20-300К. Наблюдалась интенсивная фотолюминесценция в спектральном диапазоне 600-650 нм при комнатной температуре. Проведен сравнительный анализ полученных данных и установлены зависимости энергетического положения максимума линии ФЛ от элементного состава $\text{GaN}_x\text{As}_y\text{P}_{1-x-y}$ и соответствующего параметра кристаллической решетки (рис. 9).

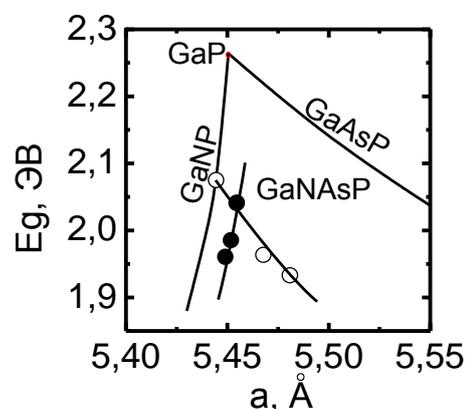


Рис.9. Постоянная кристаллической решетки и ширина запрещенной зоны слоев твердых растворов $\text{GaN}_x\text{As}_y\text{P}_{1-x-y}$ на поверхности подложки GaP(100), при комнатной температуре.

В третьей главе «Инжекционные лазеры с квантовыми ямами InGaAsN»

изложены основополагающие физические принципы работы полупроводниковых инжекционных лазеров и приводятся результаты прикладных исследований по созданию полосковых инжекционных лазеров с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs, в качестве усилительной среды. Рассматриваются лазеры, излучающие с боковой грани, в спектральном диапазоне вблизи длины волны 1300 нм. В ходе выполнения работы исследованы основные характеристики инжекционных лазеров: пороговые токи и токи прозрачности, внешняя и внутренняя квантовая эффективность. Оценены внутренние потери и коэффициент усиления среды с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs. Проведены исследования влияния конструкции активной области лазеров на их основные характеристики, указанные выше. Установлено, что использование квантоворазмерных гетероструктур GaAsN/InGaAsN/GaAsN в качестве активной среды лазерных диодов приводит к существенному снижению пороговых токов лазерной генерации, по сравнению с гетероструктурами GaAs/InGaAsN/GaAs.

В ходе выполнения работ впервые продемонстрировано, что использование InGaAsN в качестве усилительной среды позволяет создавать высокоэффективные низкопороговые инжекционные лазеры диапазона 1300 нм, работающие как в импульсном, так и в непрерывном режимах генерации, как при комнатной, так и при повышенных температурах (рис.10).

В ходе выполнения работы созданы и исследованы следующие оригинальные приборы:

- многомодовые инжекционные лазеры с широким полоском, с минимальной пороговой плотностью тока 340 A/cm^2 , дифференциальной эффективностью 0.57, максимальной оптической мощностью до 8Вт в непрерывном режиме генерации при комнатной температуре;

- поперечно одномодовые полосковые лазеры гребешковой конструкции, с минимальным пороговым током 16 мА, дифференциальной эффективностью 0.4, максимальной оптической мощностью более 20 мВт в непрерывном

режиме генерации при комнатной температуре (наименьший пороговый ток 11 мА продемонстрировал поперечно одномодовый лазер, апертура для протекания тока в котором сформирована методом латерального окисления эпитаксиального слоя соединения AlAs в атмосфере азота обогащенного парами воды).

В ходе выполнения проведены исследования температурной стабильности характеристик инжекционных лазеров, надежности, высокочастотной малосигнальной токовой модуляция полупроводниковых инжекционных лазеров с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs и InGaAsN/GaAsN.

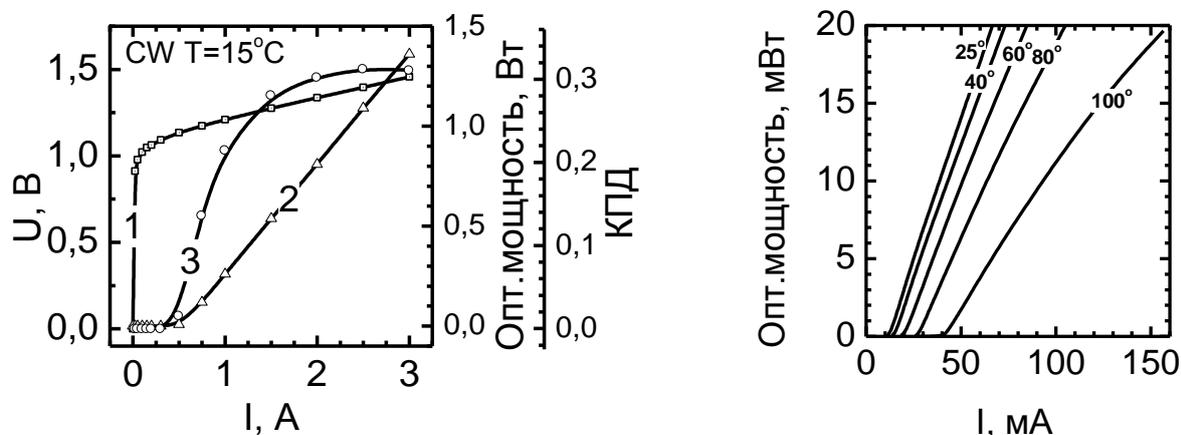


Рис.10. Вольт-амперные (1), ватт-амперные (2) и коэффициент полезного действия полоскового лазерного диода в непрерывно режиме генерации (3) при температуре 15⁰С (слева). Ширина полоска 100 мкм, длина полоска 1.54 мм, зеркала сформированы скалыванием. Дифференциальная эффективность 0.57, пороговый ток 530 мА, максимальный КПД 0.33, длина волны излучения 1290 нм. Импульсный режим работы поперечно одномодового полоскового лазера в температурном диапазоне 25-100⁰С (справа). Длина полоска 300 мкм, ширина лазера, определяющаяся размерами апертуры, 2.5 мкм.

Было установлено, что увеличение температуры лазерного чипа до 80-100⁰С не приводит к существенному увеличению порогового тока прибора, что свидетельствует высокой температурной стабильности прибора, генерация наблюдалась вплоть до температуры 120⁰С с высокой выходной оптической мощностью. Установлено, что активная область гетероструктур лазеров с квантовыми ямами InGaAsN, синтезированных методом МПЭ, испытывает незначительную деградацию в течение нескольких тысяч часов работы при

излучаемой оптической мощности более 1 Вт и температуре 40°C. Определена граничная частота, 9,5 ГГц, (при ослаблении 3 дБл) высокочастотной малосигнальной токовой модуляция и установлено, что приборы могут применяться для скоростной передачи данных.

Четвертая глава «Вертикально-излучающие лазеры с квантовыми ямами

InGaAsN» посвящена разработке физических принципов работы и созданию монолитных вертикально излучающих лазеров (ВИЛ) спектрального диапазоне 1300 нм на базе полупроводниковых гетероструктур InGaAsN на подложках арсенида галлия. В главе рассматриваются физические и конструктивно-технологические проблемы, возникающие при создании гетероструктур полупроводниковых вертикально излучающих лазеров с распределенными брэгговскими отражателями методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Освещаются технологические этапы изготовления ВИЛ. Приводятся результаты прикладных исследований приборных характеристик ВИЛ. Проводится сравнительный анализ выбранной конструкции ВИЛ с другими возможными вариантами конструкции. Проведенные исследования позволили впервые продемонстрировать монолитный ВИЛ с квантовыми ямами InGaAsN/GaAs и InGaAsN/GaAsN на подложке GaAs с характеристиками позволяющими говорить о возможном применении таких приборов в системах ВОЛС. Схематическое изображение поперечного сечения ВИЛ и ватт-амперные и вольт-амперные характеристики ВИЛ с квантовыми ямами InGaAsN/GaAsN, с апертурой, сформированной методом латерального окисления, приведены на рис.11. Малые размеры апертуры были выбраны для обеспечения однородной инжекции по всей области апертуры и получения поперечно одномодовой генерации. Малые размеры апертуры также позволяют уменьшить пороговый ток генерации и избежать проблем связанных с токовым нагревом. Первые образцы ВИЛ продемонстрировали пороговый ток 3.8 мА и дифференциальная эффективность 0.18, при температуре 25°C, в непрерывном режиме генерации, на длине волны 1284 нм. Впервые зарегистрирована выходная оптическая мощность более 400мВт. Генерация в непрерывном

режиме наблюдалась вплоть до температуры 60°C. Во всем диапазоне токов в спектре доминировала только основная поперечная мода. Соотношение между основной и боковыми модами превышало 40 дБ.

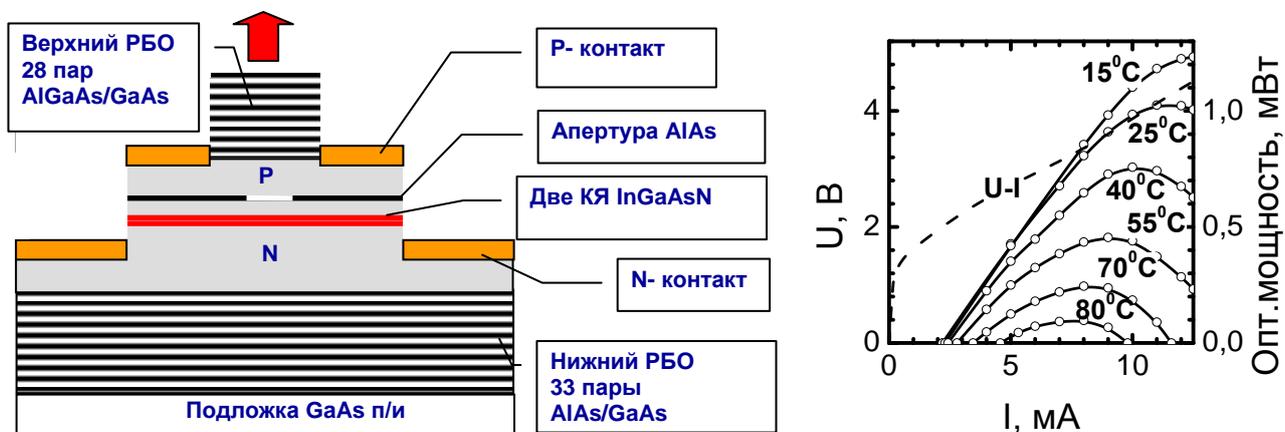


Рис.11. Схематическое изображение поперечного сечения ВИЛ с контактными слоями внутри резонатора (слева). Стрелкой показан выход лазерного излучения. Ватт-амперные и вольт-амперные характеристики ВИЛ с квантовыми ямами InGaAsN/GaAsN/GaAs, размеры апертуры 4.5x6.5 мкм² (справа). Пороговый ток 2.2 мА, дифференциальная эффективность 0.17, оптическая мощность более 1 мВт была зарегистрирована при температуре 25°C. Генерация на длине волны 1305 нм в непрерывном режиме наблюдалась вплоть до температуры 80°C. В спектре присутствовала одна основная поперечная мода при токе 4 мА и две при токах 7 мА и 10 мА. Последовательное сопротивление приборов 230 Ом.

Дальнейшие исследования конструкции активной области ВИЛ, а конкретно, использование составной квантовой ямы InGaAsN/GaAsN/GaAs, позволили значительно улучшить приборные характеристики ВИЛ. В непрерывном режиме генерации, при температуре 25°C, была продемонстрирована максимальная выходная оптическая мощность более 1 мВт, минимальное значение порогового тока генерации, 2.2 мА. Генерация в непрерывном режиме наблюдалась до температуры 80°C (рис.11).

Сравнение характеристик приборов впервые продемонстрированных в ходе выполнения настоящей работы, а также впоследствии реализованных другими научными коллективами, показывает, что с точки зрения получения минимального порогового тока генерации и максимального значения выходной

оптической мощности предпочтительна конструкция ВИЛ с непроводящими РБО и контактными слоями расположенными внутри микрорезонатора (рис. 11), конструкция ВИЛ с проводящими легированными РБО, по причине больших оптических потерь, не может обеспечить таких параметров. Характеристики, созданных входе настоящей работы, ВИЛ с квантовыми ямами InGaAsN/GaAsN/GaAs, с непроводящими РБО и контактными слоями расположенными внутри микрорезонатора, соответствуют требованиям стандартов ВОЛС и могут применяться для безошибочной скоростной передачи данных.

В заключении приводятся основные научные результаты работы, которые состоят в следующем:

1. Исследованы физические основы процесса синтеза нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN методом молекулярно-пучковой эпитаксии с высокочастотным газоразрядным источником атомарного азота. Продемонстрировано, что метод молекулярно-пучковой эпитаксии, позволяет воспроизводимо получать слои и гетероструктуры нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN с заданными физическими свойствами, высокого структурного совершенства и управлять их химическим составом. Высокотемпературный отжиг, проводимый после эпитаксиального процесса, улучшает гомогенность эпитаксиальных слоев, существенно повышает эффективность излучательной рекомбинации в слоях и гетероструктурах нового класса полупроводниковых твердых растворов GaAsN и InGaAsN. Предложены и реализованы методы эпитаксиального выращивания, позволяющие формировать однородные слои тройных твердых растворов GaAsN, и квантово-размерные гетероструктуры InGaAsN/GaAsN/GaAs на поверхности арсенида галлия, демонстрирующие высокую эффективность излучательной рекомбинации в диапазоне длин волн вблизи 1300 нм.

2. Исследованы фундаментальные физические свойства слоев и квантоворазмерных гетероструктур нового класса полупроводниковых твердых

растворов, в том числе гетероструктур с квантовыми ямами и квантовыми точками. Получены новые знания об электронной зонной структуре, оптических и структурных свойствах нового класса полупроводниковых твердых растворов, установлена их взаимосвязь. Экспериментально установлено, что увеличение мольной доли азота, x , в слоях $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ приводит к быстрому уменьшению ширины запрещенной зоны твердого раствора одновременно с уменьшением постоянной кристаллической решетки. Определена величина параметра гибридизации, 2.25 эВ, теоретической модели описывающей взаимодействие зоны проводимости с локализованным уровнем атома азота (ВАС-модель), дающая лучшее соответствие теории и эксперимента. Для гомогенных псевдоморфных слоев твердых растворов $\text{GaAs}_{1-x}\text{N}_x$ на поверхности $\text{GaAs}(100)$ в спектрах фотолюминесценции впервые обнаружено существование двух линий обусловленных рекомбинацией электронов с легкой и тяжелой дырками, при комнатной температуре. Эффект расщепления подзон легкой и тяжелой дырок обусловлен действием упругой деформации решетки твердого раствора GaAsN на поверхности арсенида галлия. Экспериментально установлено, что на гетерогранице GaAs/GaAsN образуется гетеропереход первого рода, а на гетерогранице $\text{InGaAs}/\text{GaAsN}$ тип гетероперехода (I или II) определяется элементарным составом твердых растворов. Экспериментально установлено, что величина ширины запрещенной зоны твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$, при значениях x и y более чем 0.018 и 0.30, соответственно, менее 0,95 эВ при комнатной температуре. Использование твердых растворов $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$, указанных составов, в качестве материала слоя квантовой ямы, с барьерными слоями GaAs , позволяет создавать квантоворазмерные гетероструктуры на поверхности арсенида галлия излучающие в спектральном диапазоне 1270-1500 нм при комнатной температуре. Использование покрывающих азотсодержащих слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{N}_x$ вместо слоев $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ в гетероструктурах с самоорганизующимися квантовыми точками приводит к увеличению геометрических размеров квантовых точек, уменьшению энергии переходов между уровнями размерного

квантования и длинноволновому сдвигу люминесценции в диапазон длин волн 1500 нм. Наногетероструктуры специальной конструкции, состоящие из короткопериодных сверхрешеток $\text{In}_Y\text{Ga}_{1-Y}\text{As}_{1-X}\text{N}_X/\text{GaAs}_{1-X}\text{N}_X$ в центр которых помещается сверхтонкий слой InAs позволяют расширить спектральный диапазон излучения для полупроводниковых гетероструктур, создаваемых на поверхности арсенида галлия, вплоть до длины волны 1800 нм, при комнатной температуре.

3. Разработаны физические принципы работы и созданы оригинальные лазеры полосковой конструкции на базе полупроводниковых гетероструктур $\text{InGaAsN}/\text{GaAsN}/\text{GaAs}$. Впервые продемонстрировано, что использование квантоворазмерных гетероструктур $\text{GaAs}/\text{InGaAsN}/\text{GaAs}$ в качестве активной усилительной среды позволяет реализовать эффективные низкопороговые лазеры на подложках арсенида галлия. Демонстрированы лазеры работающие в непрерывном режиме генерации, как при комнатной, так и при повышенных температурах, излучающие с боковой грани в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, вблизи длины волны 1300 нм. Впервые показано, что использование квантоворазмерных гетероструктур $\text{GaAsN}/\text{InGaAsN}/\text{GaAsN}$ приводит к существенному снижению пороговых токов лазерной генерации, по сравнению с гетероструктурами $\text{GaAs}/\text{InGaAsN}/\text{GaAs}$. В ходе выполнения работы исследованы основные характеристики инжекционных лазеров с квантовыми ямами InGaAsN : пороговые токи лазерных диодов и токи прозрачности активной среды с квантовыми ямами InGaAsN , внешняя и внутренняя квантовая эффективность лазерных диодов и оценены внутренние потери и коэффициент усиления среды с квантовыми ямами InGaAsN . Проведены исследования влияния конструкции активной области лазеров с квантовыми ямами InGaAsN на их основные характеристики, указанные выше.

4. Исследована возможность создания вертикально-излучающих лазеров с распределенными Брэгговскими отражателями AlAs/GaAs и активной областью на основе квантоворазмерных гетероструктур $\text{InGaAsN}/\text{GaAsN}/\text{GaAs}$ и созданы

эффективные вертикально-излучающие лазеры, работающие в непрерывном режиме генерации, как при комнатной, так и при повышенных температурах, в ближнем инфракрасном спектральном диапазоне, вблизи длины волны 1300 нм. Проведенные исследования позволили впервые продемонстрировать монолитный вертикально излучающий лазер на основе квантоворазмерных гетероструктур InGaAsN/GaAsN/GaAs синтезированный на подложке GaAs с характеристиками позволяющими говорить о возможном применении таких приборов в системах ВОЛС.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, ВЛЮЧЕННЫХ В ДИССЕРТАЦИЮ

1) Публикации в рецензируемых журналах и монографии в 1998-2010 гг.

1. А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, А.Р.Ковш, В.М.Устинов, В.В.Мамутин, С.В.Иванов, В.Н.Жмерик, А.Ф.Цацульников, Д.А.Бедарев, П.С.Копьев, Гетероструктуры GaAsN/GaAs и InGaAsN/GaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии, ПЖТФ, 24 (23), 81 (1998)
2. A.Yu.Egorov, D.Bernklau, D.Livshits, V.Ustinov, Zh.I.Alferov and H.Riechert, High power CW operation of InGaAsN lasers at 1.3um, Electron. Lett., 35(19) 1643-1644(1999)
3. B.Borchert, A.Y.Egorov, S.Illek, M.Komainda, H.Riechert, 1.29 μm GaInNAs multiple quantum-well ridge-waveguide laser diodes with improved performance, Electronics Letters, 35(25), 2204 -2206(1999)
4. D.A.Livshits, A.Yu.Egorov, H.Riechert, 8W continuous wave operation of InGaAsN lasers at 1.3 μm , Electronics Letters, 36(16), 1381 -1382(2000)
5. B.Borchert, A.Yu.Egorov, S.Illek, H.Riechert, A.Ultsch, Low threshold lasing operation of narrow stripe oxide-confined GaInNAs/GaAs multiquantum well lasers at 1.28 μm , Electronics Letters, 36(8), 725 -726(2000)
6. B.Borchert, A.Yu.Egorov, S.Illek, H.Riechert, Static and dynamic characteristics of 1.29- μm GaInNAs ridge-waveguide laser diodes, IEEE Photonics Technology Letters, 12(6), 597 -599(2000)
7. M.Hetterich, M.D.Dawson, A.Yu.Egorov, D.Bernklau, and H.Riechert, Electronic states and band alignment in GaInNAs/GaAs quantum-well structures with low nitrogen content, Applied Physics Letters, 76(8), 1030-1032(2000)
8. H.Ch.Alt, A.Yu.Egorov, and H.Riechert, B.Wiedemann, J.D.Meyer, R.W.Michelmann, and K.Bethge, Infrared absorption study of nitrogen in N-implanted GaAs and epitaxially grown GaAsN layers, Applied Physics Letters, 77(21), 3331-3333(2000)
9. S.Illek, A.Ultsch, A.Yu.Egorov, H.Riechert, B.Borchert, Low threshold lasing operation of narrow stripe oxide-confined GaInNAs/GaAs multiquantum well lasers at 1.28 μm , Electron. Lett., 36(8), 725-726 (2000)

10. H. Riechert, A. Yu. Egorov, D. Livshits, B. Borchert, S. Illek, InGaAsN/GaAs heterostructures for long-wavelength light-emitting devices, *Nanotechnology*, 11(4), 201-205(2000)
11. Н.А.Малеев, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, А.Р.Ковш, А.П.Васильев, В.М.Устинов, Н.Н.Леденцов, Ж.И.Алферов, Сравнительный анализ длинноволновых (1.3 мкм) вертикально-излучающих лазеров на подложках арсенида галлия, *ФТП*, 35(7), 881-888(2001)
12. H. Ch. Alt, A. Yu. Egorov, H. Riechert, B. Wiedemann, J. D. Meyer, R. W. Michelmann, K. Bethge, Local vibrational mode absorption of nitrogen in GaAsN and InGaAsN layers grown by molecular beam epitaxy, *Physica B*, 302/303, 282–290(2001)
13. H. Ch. Alt, A. Yu. Egorov, H. Riechert, B. Wiedemann, J. D. Meyer, Incorporation of nitrogen in GaAsN and InGaAsN alloys investigated by FTIR and NRA, *Physica B*, 308/310, 877-880(2001)
14. A. Yu. Egorov, H. Riechert, G. Steinle, Monolithic VCSEL with InGaAsN active region emitting at 1.28 μm and CW output power exceeding 500 μW at room temperature, *Electronics Letters*, 37(2), 93 -95(2001)
15. A. R. Adams, A. Y. Egorov, R. Fehse, S. Illek, E. P. O'Reilly, H. Riechert, S. J. Sweeney, Insights into carrier recombination processes in 1.3 μm GaInNAs-based semiconductor lasers attained using high pressure, *Electronics Letters*, 37(2), 92 -93(2001)
16. K. J. Ebeling, A. Y. Egorov, M. Kicherer, G. Kristen, F. Mederer, R. Michalzik, H. Riechert, G. Steinle, H. D. Wolf, Data transmission up to 10 Gbit/s with 1.3 μm wavelength InGaAsN VCSELs, *Electronics Letters*, 37(10), 632 -634(2001)
17. A. R. Adams, A. Yu. Egorov, R. Fehse, S. Illek, S. Jin, E. P. O'Reilly, H. Riechert, S. J. Sweeney, Evidence for large monomolecular recombination contribution to threshold current in 1.3 μm GaInNAs semiconductor lasers, *Electronics Letters*, 37(25), 1518 -1520(2001)
18. A. Yu. Egorov, D. Bernklau, B. Borchert, S. Illek, D. Livshits, A. Rucki, M. Schuster, A. Kaschner, A. Hoffmann, Gh. Dumitras, M. C. Amann, and H. Riechert, "Growth of high quality InGaAsN heterostructures and their laser application," *J. Cryst. Growth*, 227/228, 545–552(2001)
19. A. Yu. Egorov, D. Bedarev, D. Bernklau, G. Dumitras, and H. Riechert, Self-assembled InAs quantum dots in an InGaAsN matrix on GaAs, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 224(3), 839-843(2001)
20. A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, 1.3 μm GaAs-based quantum well and quantum dot lasers: Comparative analysis, *J. Electron. Mater.*, 30(5), 477-481(2001)
21. V. Grillo, M. Albrecht, T. Remmele, H. P. Strunk, A. Yu. Egorov, H. Riechert, Simultaneous experimental evaluation of In and N concentrations in InGaAsN quantum wells, *J. Appl. Phys.*, 90(8), 3792-3798(2001)
22. Д.А.Лившиц, А.Ю.Егоров, И.В.Кочнев, В.А.Капитонов, В.М.Лантратов, Н.Н.Леденцов, Т.А.Налет, И.С.Тарасов, Рекордные мощностные характеристики лазеров на основе InGaAs/AlGaAs/GaAs-гетероструктур, *ФТП*, 35(3), 380-384(2001)

23. V.A.Odnoblyudov, A.Yu.Egorov, A.R.Kovsh, A.E.Zhukov, N.A.Maleev, E.S.Semenova, V.M.Ustinov, Thermodynamic analysis of the MBE growth of GaInAsN, *Semicond. Sci. Technol.*, 16(10), 831-835(2001)
24. A.Pomarico, M.Lomascolo, R.Cingolani, A.Yu.Egorov, H.Riechert, Effects of thermal annealing on the optical properties of InGaAs/GaAs multiple quantum wells, *Semicond. Sci. Technol.*, 17(2), 145-149(2002)
25. А.Ю.Егоров, Е.С.Семенова, В.М.Устинов, Y.G.Hong, C.Tu, Экспериментальное наблюдение расщепления уровней энергии легких и тяжелых дырок в упругонапряженном GaAsN, *ФТП*, 36(9), 1056-1059(2002)
26. А.Ю.Егоров, В.А.Одноблюдов, Н.В.Крыжановская, В.В.Мамутин, В.М.Устинов, Взаимное расположение краев энергетических зон в гетероструктурах GaAs/GaAsN/InGaAs, *ФТП*, 36(12), 1440-1444 (2002)
27. В.А.Одноблюдов, А.Ю.Егоров, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, В.В.Мамутин, А.Ф.Цацульников, В.М.Устинов, Фотолюминесценция с длиной волны 1.55 мкм при температуре 300 К из структур с квантовыми точками InAs/InGaAsN на подложках GaAs, *Письма ЖТФ*, 28(22), 82-88(2002)
28. В.А.Одноблюдов, А.Р.Ковш, А.Е.Жуков, А.Ю.Егоров, Н.А.Малеев, С.С.Михрин, В.М.Устинов, Выращивание соединений (Al)GaAsN методом молекулярно-пучковой эпитаксии с использованием аммиака, *Письма ЖТФ*, 28(12), 62-71(2002)
29. I.G.Hong, A.Y.Egorov, C.W.Tu, Growth of GaInAs quaternaries using a digital alloy technique, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 20(3), 1163-1166(2002)
30. V.M.Ustinov, A.E.Zhukov, A.Yu.Egorov, N.A.Maleev, *Quantum Dot Lasers 300 стр.* (2003), OXFORD UNIVERSITY PRESS ISBN: 0-198-52679-2, коллективная монография
31. M.Hetterich, A.Grau, A.Yu.Egorov, H.Riechert, Influence of indium on the electronic states in GaInAs/GaAs quantum well structures, *J. Appl. Phys.*, 94(3), 1810-1813(2003)
32. В.А.Одноблюдов, А.Ю.Егоров, А.Р.Ковш, В.В.Мамутин, Е.В.Никитина, Ю.М.Шерняков, М.В.Максимов, В.М.Устинов, Длинноволновая лазерная генерация в структурах на основе квантовых ям InGaAs(N) на подложках GaAs, *Письма ЖТФ*, 29(10), 77-81(2003)
33. А.Ю.Егоров, В.А.Одноблюдов, В.В.Мамутин, А.Е.Жуков, А.Ф.Цацульников, N.V.Kryzhanovskaya, V.M.Ustinov, Y.G.Hong, C.W.Tu, Valence band structure of GaAsN compounds and band-edge lineup in GaAs/GaAsN/InGaAs heterostructures, *J. Cryst. Growth*, 251(1-4), 417-421(2003)
34. V.M.Ustinov, A.Y.Egorov, V.A.Odnoblyudov, N.V.Kryzhanovskaya, Y.G.Musikhin, A.F.Tsatsul'nikov, Z.I.Alferov, InAs/InGaAsN quantum dots emitting at 1.55 μm grown by molecular beam epitaxy, *J. Cryst. Growth*, 251(1-4), 388-391(2003)
35. В.М.Устинов, А.Ю.Егоров, А.Р.Ковш, В.А.Одноблюдов, В.В.Мамутин, Д.А.Лившиц, Н.В.Крыжановская, Е.С.Семенова, Е.В.Никитина, Ю.М.Шерняков, М.В.Максимов, Низкопороговые лазеры на основе InGaAsN для волоконно-оптических линий связи, *Изв. РАН, сер. физ.*, 68(1), 15-17(2004)

36. В.А.Одноблюдов, А.Ю.Егоров, М.М.Кулагина, Н.А.Малеев, Ю.М.Шерняков, Е.В.Никитина, В.М.Устинов, Низкопороговые инжекционные лазеры на основе одиночных квантовых ям InGaAsN, работающие в диапазоне длин волн 1.3 мкм, ФТП, 38(5), 630-633(2004)
37. И.П.Сошников, Н.В.Крыжановская, Н.Н.Леденцов, А.Ю.Егоров, В.В.Мамутин, В.А.Одноблюдов, В.М.Устинов, О.М.Горбенко, Н.Kirmse, W.Neumann, D.Bimberg, Структурные и оптические свойства гетероструктур с квантовыми точками InAs в квантовой яме InGaAsN, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, ФТП, 38(3), 354-357(2004)
38. В.К.Калевич, Е.Л.Ивченко, М.М.Афанасьев, А.Ю.Ширяев, А.Ю.Егоров, В.М.Устинов, Б.Пал, Я.Масумото, Спин-зависимая рекомбинация в твердых растворах GaAsN, Письма ЖЭТФ, 82(7), 509-512(2005)
39. Н.В.Крыжановская, А.Ю.Егоров, В.В.Мамутин, Н.К.Поляков, А.Ф.Цацульников, А.Р.Ковш, Н.Н.Леденцов, В.М.Устинов, Д.Бимберг, Оптические свойства гетероструктур с квантово-размерными слоями InGaAsN на подложках GaAs, излучающих в области 1.3-1.55 мкм, ФТП, 39(6), 735-740(2005)
40. A.Yu.Egorov, V.K.Kalevich, M.M.Afanasiev, A.Y.Shiryaev, V.M.Ustinov, M.Ikezawa, Y.Masumoto, Determination of strain-induced valence-band splitting in GaAsN thin films from circularly polarized photoluminescence, J. Appl. Phys., 98(1), #013539(2005)
41. N.V.Kryzhanovskaya, A.Yu.Egorov, V.V.Mamutin, N.K.Polyakov, A.F.Tsatsulnikov, Y.G.Musikhin, A.R.Kovsh, N.N.Ledentsov, V.M.Ustinov, D.Bimberg, Properties of InGaAsN heterostructures emitting at 1.3-1.55 μm , Semicond. Sci. Technol., 20(9), 961-965(2005)
42. Л.Е.Воробьев, Д.А.Фирсов, В.А.Шалыгин, В.Ю.Паневин, А.Н.Софронов, Д.В.Цой, А.Ю.Егоров, А.Г.Гладышев, О.В.Бондаренко, Примесный пробой и люминесценция терагерцового диапазона в электрическом поле в микроструктурах p-GaAs и p-GaAsN, Письма ЖТФ, 32(9), 34-41(2006)
43. Мамутин, ВВ; Бондаренко, ОВ; Егоров, АЮ; Крыжановская, НВ; Шерняков, ЮМ; Устинов, ВМ, Излучательные свойства гетероструктур InAs/InGaAsN/GaAsN с компенсацией напряжений в диапазоне 1.3-1.55 μm , Письма ЖТФ, 32(5), 89-94(2006)
44. В.С.Михрин, А.П.Васильев, Е.С.Семенова, Н.В.Крыжановская, А.Г.Гладышев, Ю.Г.Мусихин, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, В.М.Устинов, Гетероструктуры с квантовыми ямами и квантовыми точками InAs/InGaAsN/GaAsN, излучающие в спектральном диапазоне 1.4-1.8 мкм, ФТП, 40(3), 347-350(2006)
45. V.K.Kalevich, A.Yu.Shiryaev, E.L.Ivchenko, A.Yu.Egorov, L.Lombez, D.Lagarde, X.Marie, T.Amand, Spin-dependent electron dynamics and recombination in GaAs_{1-x}N_x alloys at room temperature, Письма ЖЭТФ, 85(3), 208-212(2007)
46. В.В.Мамутин, О.В.Бондаренко, А.П.Васильев, А.Г.Гладышев, А.Ю.Егоров, Н.В.Крыжановская, В.С.Михрин, В.М.Устинов, Исследование оптических свойств сверхрешеток InAs/InGaAsN/GaAsN с компенсацией напряжений, Письма ЖТФ, 33(9), 53-60(2007)

47. В.В.Мамутин, А.Ю.Егоров, Н.В.Крыжановская, В.С.Михрин, А.М.Надточий, Е.В.Пирогов, Методы управления длиной волны излучения в гетероструктурах InAs/GaAsN/InGaAsN на подложках GaAs, ФТП, 42(7), 823-830(2008)
48. В.В.Мамутин, А.Ю.Егоров, Н.В.Крыжановская, А.М.Надточий, А.С.Паюсов, Влияние дизайна напряженно-компенсированных сверхрешеток InAs/InGaAsN/GaAsN на их оптические свойства, Письма ЖТФ, 34(4), 24-31(2008)
49. А.А.Гуткин, П.Н.Брунков, А.Ю.Егоров, Коротковолновый край собственной фотолюминесценции в слабых твердых растворах GaN_xAs_{1-x}, ФТП, 43(10), 1308-1311(2009)
50. О.И.Румянцев, П.Н.Брунков, Е.В.Пирогов, А.Ю.Егоров, Исследование дефектов в гетероструктурах с квантовыми ямами GaPAsN и GaPN в матрице GaP, ФТП, 44(7), 923-927(2010)
51. А.Ю.Егоров, Н.В.Крыжановская, Е.В.Пирогов, М.М.Павлов, Оптические свойства четверных полупроводниковых твердых растворов GaN_xAs_yP_{1-x-y}, ФТП, 44(7), 886-890(2010)

2) Публикации в материалах научных мероприятий в 1998-2010 гг.

1. D.Bernklau, S.W.Bland, J.I.Davies, M.D.Dawson, A.Yu.Egorov, M.D.Geen, M.Hetterich, H.Riechert, Comparison of GaInNAs/GaAs and strain-compensated InGaAs/GaAsP quantum wells for 1200-1300 nm diode lasers, 12th Annual Meeting Lasers and Electro-Optics Society 1999. IEEE LEOS '99, 1, 368 -369(1999)
2. В.Borchert, А.Yu.Egorov, S.Illek, H.Riechert, Low threshold current operation of 1.3 μm GaInNAs/GaAs laser diodes, 13th Annual Meeting IEEE LEOS, 1, 125 - 126(2000)
3. В.Borchert, G.Ebbinghaus, А.Yu.Egorov, S.Illek, H.Riechert, GaInNAs/GaAs multiple quantum-wells (MQWs) for 1.3 μm laser applications, Conference Proceedings. 2000 International Conference on Indium Phosphide and Related Materials, 537 -540(2000)
4. H.Riechert, А.Yu.Egorov, D.Livshits, В.Borchert, S.Illek, InGaAsN/GaAs heterostructures for long-wavelength light-emitting devices, Proc. 8th Intern. Symp. Nanostruc.: Phys. and Tech., 2-5(2000)
5. А.Yu.Egorov, D.Bernklau, D.Livshits, V.Ustinov, Z.I.Alferov, H.Riechert, 1.3 μm CW operation of InGaAsN lasers, В книге (сборнике): Compound semiconductors 1999, Inst. Phys. Conf., 166, 359-362(2000)
6. А.Yu.Egorov, G.Kristen, M.Popp, H.Riechert, G.Steinle, H.D.Wolf, Novel monolithic VCSEL devices for datacom applications, Electronic Components and Technology Conference, Proceedings, 218 -222(2001)
7. K.J.Ebeling, А.Y.Egorov, G.Kristen, F.Mederer, R.Michalzik, H.Riechert, G.Steinle, Up to 10 Gbit/s data transmission with 1.3 μm wavelength InGaAsN VCSELs, ECOC'01, 27th European Conference on Optical Communication, 2001, 2 , 218 -219(2001)

8. A.R.Adams, A.Yu.Egorov, R.Fehse, S.Illek, S.Jin, E.P.O'Reilly, H.Riechert, S.J.Sweeney, The temperature dependence of the recombination processes in 1.3 μm GaInNAs-based edge emitting lasers, LEOS 2001, The 14th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 1, 330 -331(2001)
9. A.Yu.Egorov, V.M.Ustinov, Comparative analysis of 1.3- μm InGaAs quantum dots and InGaAsN quantum well lasers, В книге (сборнике): IEEE 15th International Conference on Indium Phosphide & Related Materials (IPRM), 261-262(2003)
10. А.Ю.Егоров и др., Long-wavelength InGaAsN/GaAs heterostucture lasers, , Proceedings of the 12th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 3-6(2004)
11. В.К. Калевич и др, Optical pumping and spin-dependent recombination in GaAsN alloys, Proceedings of the 14th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 59-60(2006)
12. В.К. Калевич и др, Долгоживущая спиновая поляризация при комнатной температуре в твердых растворах GaAsN, 7 Российской конференции по физике полупроводников, тезисы докладов, 36(2005)
13. В.К. Калевич и др, Spin dynamics controlled by spin-dependent recombination in GaAsN alloys at room temperature, Proceedings of the 28th International Conf. on the Physics of Semiconductors, , тезисы докладов, 231(2006)
14. В.К.Калевич и др., Optical pumping and spin-dependent recombination in GaAsN alloys, Proceedings of the 14th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 59-60(2006),
15. А.Ю.Егоров и др., Optical study of band gap dependence on nitrogen content in GaAsN thin layers, Proceedings of the 14th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", 158-159(2006)
16. А.Ю.Егоров, "III-N-V semiconductor alloys: physical properties and potential applications", International workshop on opto- and nanoelectronics, St. Petersburg, Russia (<http://www.ioffe.ru/oe35/>) (2008)

3) Патенты

1. H.Riechert, A.Yu.Egorov (NFINEON TECHNOLOGIES AG, Germany), SEMICONDUCTOR LASER STRUCTURE, Pub.No.:WO/2001/052373 (19.07.2001), Intern.Appl.No.:PCT/DE2000/004317(04.12.2000)
2. В.В.Мамутин, А.Ю.Егоров, В.М.Устинов (ФТИ им. А.Ф.Иоффе), Светоизлучающая структура и способ изготовления, Патент РФ N 2257640, (2005)

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. D.G.Thomas, J.J.Hopfield, C.J.Frosch. Phys. Rev. Lett., 15, 857 (1965).
2. А.Ю.Егоров, Е.С.Семенова, В.М.Устинов, Y.G.Hong, С.Ту. ФТП, 36(9), 1056 (2002).
3. H.Ch.Alt, A.Yu.Egorov, H.Riechert, B.Wiedemann, J.D.Meyer. Physica B 308–310, 877 (2001).
4. P.R.C.Kent, A.Zunger. Phys. Rev. B, 64, 115 208 (2001).
5. W.Shan, W.Walukiewicz, J.W.Ager III, E.E.Haller, J.F.Geisz, D.J.Friedman, J.M. Olson, S.R.Kurtz, Phys. Rev. Lett., 82, 1221 (1999).
6. C.Skierbiszewski, P.Perlin, E.Wisniewski, W.Knap, T.Suski, W.Walukiewicz, W. Shan, K.M.Yu, J.W.Ager III, E.E.Haller, J.F.Geisz, J.M.Olson. Appl. Phys. Lett., 76, 2409 (2002).
7. W.Shan, W.Walukiewicz, K.M.Yu, J.Wu, J.W.Ager III, E.E.Haller, H.P.Xin, C.W. Tu. Appl. Phys. Lett., 76, 325 (2000).
8. V.A.Odnoblyudov, C.W.Tu. Appl. Phys. Lett., 89, 11 192 (2006).
9. H.Ch.Alt, B.Wiedemann, and K.Bethge, in *Materials Science Forum*, Vols. 258-263 (Zurich: Trans Tech, 1997), p. 867.
10. M.J.L.Sangster, R.C.Newman, G.A.Geldhill, and S.B.Upadhyay, *Semicond. Sci. Technol.* **7**, 1295 (1992).
11. H.Ono and N.Furuhata, *Appl. Phys. Lett.* **59**, 1881 (1991).
12. M.P.C.M.Krijn, *Semicond. Sci. Technol.* **6**, 2731 (1991)
13. K.Uesugi, N.Morooka, and I.Suemune, *Appl. Phys. Lett.* **74** 1254-1256 (1999)