Гайслер Алексей Владимирович

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК InGaAs КВАНТОВЫХ ТОЧЕК ДЛЯ СОЗДАНИЯ МИНИАТЮРНЫХ НЕКЛАССИЧЕСКИХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель:

Щеглов Дмитрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Войцеховский Александр Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, заведующий кафедрой «Квантовой электроники и фотоники».

Драгунов Валерий Павлович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Новосибирский государственный технический университет, заведующий отделом подготовки кадров высшей квалификации.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита состоится «23» июня 2015 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 003.037.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090 Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 13.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук: http://isp.nsc.ru/comment.php?id_dissert=778
Автореферат разослан «____» 2015 г.

Ученый секретарь диссертационного совета доктор физико-математических наук

Погосов Артур Григорьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Полупроводниковые структуры нанометрового размера, в которых носители заряда локализованы в трех направлениях (нульмерные структуры или квантовые точки (КТ) [С1 - С6]), по праву называют «искусственными атомами», так как их электронный спектр представляет собой набор дискретных уровней, но в отличие от «природных атомов» электронный спектр полупроводниковых КТ не строго задан, а может быть «искусственно» модифицирован и адаптирован под конкретную физическую или прикладную задачу.

Квантовые точки на основе InGaAs [C1 - C5] относятся к числу наиболее интенсивно исследуемых систем, поскольку они представляют большой интерес для практических применений, а также могут быть использованы в качестве модельного объекта при решении фундаментальных задач физики твердого тела. Уникальной особенностью InGaAs КТ является широкий спектральный диапазон, достигающий ~400 нм, включающий в себя первый и второй телекоммуникационные стандарты (~0,9 мкм, 1,3 мкм).

Использование InGaAs KT значительно расширяет возможности полупроводниковой наноэлектроники и нанофотоники, открывает перспективы создания приборов нового поколения: элементов памяти с быстрым временем записи и большим временем хранения информации, эффективных фотоприемников, лазеров, а также неклассических излучателей, таких как излучатели одиночных фотонов (ИОФ) и излучатели фотонных пар (ИФП), запутанных по поляризации [С7 - С15].

Создание эффективных излучателей одиночных фотонов и излучателей фотонных пар является абсолютным пределом миниатюризации светоизлучателей и потому является одной из наиболее актуальных и фундаментальных проблем оптики и квантовой электроники в целом, а также, как и твердотельной нанофотоники, в частности.

Эффективные излучатели одиночных фотонов могут найти разнообразные применения в системах квантовой криптографии, квантовых вычислений, создании эталонов оптической мощности и проведении прецизионных спектральных экспериментов, включая эксперименты в области квантовой электродинамики. Излучатели фотонных пар, запутанных по поляризации, также могут являться важным ресурсом для реализации ряда протоколов квантовой криптографии и квантовых вычислений.

Излучатель одиночных фотонов - фотонный источник, в котором под действием управляющего сигнала (и только под действием этого сигнала) излучается один (и только один) фотон. Его излучение характеризуется неклассической суб-пуассоновской статистикой, а

идеальный ИОФ генерирует однофотонные Фоковские состояния (световой поток с нулевым шумом) [С14 – С16]. ИОФ может быть реализован только на основе изолированной квантовой системы: одиночного атома, молекулы, центра окраски или «искусственного атома» (полупроводниковой квантовой точки). Приборная реализация эффективных излучателей одиночных фотонов относится к числу наиболее сложных задач нанотехнологий. Для ее выполнения необходимо:

- 1. локализовать квантовую систему
- 2. эффективно накачать ее
- 3. эффективно собрать излучение

Все три перечисленные выше проблемы принципиально разрешимы с использованием современных полупроводниковых технологий, позволяющих интегрировать одиночную полупроводниковую квантовую точку (КТ) в полупроводниковый микрорезонатор. Неоспоримым достоинством полупроводниковых ИОФ является также возможность токовой накачки КТ, что позволяет разрабатывать полностью твердотельные излучатели в виде миниатюрных светоизлучающих диодов.

В последние годы направления исследований в этой области сосредоточены на поисках оптимальных технологий получения и позиционирования квантовых точек, на разработке наиболее эффективных способов накачки полупроводниковых квантовых точек, на разработке конструкции микрорезонатора, обеспечивающего максимальную внешнюю квантовую эффективность и минимальную расходимость излучения [С4, С14, С17 – С21].

В работе О. Бенсона и др. [C22] было обосновано, что пары запутанных фотонов могут излучаться одиночными полупроводниковыми КТ в процессе каскадной рекомбинации биэкситона и экситона в случае, если экситонные состояния вырождены по энергии или же их расщепление ΔE_{FS} не превышает естественную ширину экситонных уровней $\Gamma_X = \hbar/\tau_X$, где τ_X – время жизни экситона. В этом случае излучается пара фотонов, запутанных по поляризации [C14, C22]. Важно подчеркнуть, что ИФП на основе полупроводниковых КТ также может быть реализован в виде миниатюрного светоизлучающего диода.

В реальных КТ расщепление экситонных состояний ΔE_{FS} , как правило, многократно превышает естественную ширину экситонных уровней Γ_X , что обусловлено отклонением формы КТ от идеальной, наличием пьезопотенциала, индуцированного встроенными механическими напряжениями [С14, С23, С24]. Это является основным препятствием в создании излучателей фотонных пар с запутанной поляризацией на основе КТ. Исследование факторов, задающих величину ΔE_{FS} , а также условий, при которых расщепление экситонных состояний подавляется до

уровня Γ_X является наиболее актуальной задачей на пути практической реализации ИФП на базе полупроводниковых КТ.

В соответствии с этим, были сформулированы две основные цели диссертационной работы:

Разработка и реализация полностью полупроводникового высокоэффективного Брэгговского микрорезонатора для излучателей одиночных фотонов с токовой накачкой селективно позиционированных InGaAs квантовых точек.

Поиски условий, при которых расщепление экситонных состояний в InGaAs квантовых точках подавляется до уровня $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$, необходимого для генерации пар запутанных фотонов.

Для их достижения были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1. Изучение структурных и оптических характеристик InGaAs KT с использованием методов атомно-силовой микроскопии (ACM) и фотолюминесценции (Φ Л), с целью получения структур с заданной низкой плотностью KT ($d \le 10^8$ см⁻²) и малой дисперсией их размеров.
- 2. Разработка и реализация способа селективного позиционирования InAs KT, при котором KT формируются лишь в пределах заданной апертуры микронного размера.
- 3. Разработка конструкции полностью полупроводникового Брэгговского микрорезонатора на основе селективно позиционированных InGaAs KT с токовой накачкой. Расчет и оптимизация оптических характеристик микрорезонатора с целью достижения высокой внешней квантовой эффективности и низкого уровня расходимости выходного излучения. Расчет электрофизических характеристик полупроводникового микрорезонатора и оптимизация его конструкции с целью достижения высокого уровня токового ограничения в пределах AlGaAs апертуры.
- 4. Создание лабораторных образцов Брэгговских микрорезонаторов на основе селективно позиционированных InGaAs КТ и исследование их оптических и электрофизических характеристик с целью экспериментальной проверки возможности использования данного типа микрорезонаторов для приборной реализации излучателей одиночных фотонов.
- 5. Исследование методом криогенной микрофотолюминесценции тонкой структуры экситонных состояний InAs KT, полученных по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста, с целью выявления субансамблей KT с низким уровнем расщепления экситонных состояний $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$.

Научная новизна работы

- 1. Предложен подход к селективному позиционированию InGaAs KT в пределах AlGaAs апертуры микронного размера, обеспечивающий формирование KT лишь в пределах апертуры и токопроводящих слоев, не содержащих KT за ее пределами.
- 2. Обнаружены и интерпретированы эффекты немонотонного поведения параметров модового объема, фактора Парселла, внешней квантовой эффективности от значений апертуры микрорезонатора, что позволило определить оптимальные значения апертур для достижения максимальной внешней квантовой эффективности.
- 3. В структурах с InAs KT, выращенными по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста, обнаружены подгруппы KT с расщеплением экситонных состояний, не превышающим естественную ширину экситонных уровней Γ_X .

Практическая значимость работы

- 1. Практическую ценность представляет способ формирования массивов InGaAs КТ низкой плотности, основанный на использовании механизма Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста.
- 2. Практическую значимость имеет конструкция разработанного брэгговского микрорезонатора, сочетающая в себе эффективное токовое и оптическое ограничение в пределах AlGaAs апертуры, высокую внешнюю квантовую эффективность и низкий уровень расходимости выходного излучения. Данный тип резонатора может быть использован не только для создания ИОФ, а также и при создании лазеров с вертикальным резонатором.
- 3. Практическую значимость имеют результаты исследования расщепления экситонных состояний InAs KT, демонстрирующие $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$, что открывает перспективы создания излучателей фотонных пар на основе структур данного типа.

Научные положения, выносимые на защиту

- 1. Процесс формирования InAs KT по механизму Странского Крастанова с малым временем прерывания роста является эффективным способом получения массивов KT с низкой плотностью ($d \le 10^8$ см⁻²) и малой дисперсией размера ($\sim 10\%$).
- 2. Выращивание InAs KT в пределах GaAs площадок микронного размера, окруженных слоями AlGaAs, является эффективным методом селективного позиционирования KT, обеспечивающим формирование KT лишь в пределах AlGaAs апертуры и токопроводящих слоев, не содержащих KT за ее пределами.

- 3. Разработанный полностью полупроводниковый брэгговский микрорезонатор для ИОФ не содержит оксидных слоев, задающих высокий уровень механических напряжений, что делает его устойчивым к термоциклированию и работе при криогенных температурах. Микрорезонатор сочетает в себе эффективное токовое и оптическое ограничение, характеризуется высоким уровнем внешней квантовой эффективности (до 80 %) и низким уровнем расходимости выходного излучения (NA ≤ 0,2).
- 4. Структуры InAs KT, выращенные по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста, содержат субансамбли KT с $\Delta E_{\rm FS} \approx \Gamma_{\rm X}$, пригодных для создания излучателей фотонных пар, запутанных по поляризации.

Достоверность и надежность представленных в диссертационной работе результатов обеспечиваются применением современных методов экспериментального исследования, использованием апробированных моделей для расчета электрофизических и оптических характеристик структур, воспроизводимостью результатов исследуемых совпадением экспериментальных данных с расчетными.

Личный вклад соискателя в работу заключался в участии в постановке целей и задач исследования, проведении спектральных экспериментов, а также экспериментов с использованием методики ACM, проведении расчетов оптических и электрофизических характеристик Брэгговских микрорезонаторов, в экспериментальном исследовании этих характеристик, анализе и интерпретации экспериментальных данных, написании научных статей и подготовке докладов на конференции, а также представлении полученных результатов на конференциях.

Апробация работы

Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур, г. Новосибирск, (2014).
- XVIII Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника», Нижний Новгород, (2014).
- XI Российская конференция по физике полупроводников, Санкт-Петербург, (2013).
- 2nd International Conference "Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications", Russia, Berdsk, Novosibirsk (2013).
- Научная студенческая конференция «Дни науки НГТУ-2011», Новосибирск, (2011).
- Научная студенческая конференция «Дни науки НГТУ-2010», Новосибирск, (2010).

• 16th International Symposium "Nanostructures: Physics and Technology", Russia, Vladivostok, (2008).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 12 работ, 5 статей (из них 4 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК), а также 7 работ в сборниках тезисов российских и международных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации составляет 172 страницы, включая 46 рисунков и 4 таблицы. Список цитированной литературы включает 169 наименований, список работ автора по теме диссертации – 12 наименований [A1 – A12].

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель работы и основные задачи, показана научная новизна и практическая значимость диссертации, изложены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения о структуре и содержании работы, кратко изложено содержание диссертации.

Первая глава носит обзорный характер, в ней приводятся данные о методах получения InGaAs квантовых точек, методах селективного позиционирования КТ, энергетическом спектре КТ, возможности использования InGaAs квантовых точек в качестве основы сверхминиатюрных излучателей - излучателей одиночных фотонов и излучателей фотонных пар, запутанных по поляризации. В ней представлены данные о типах полупроводниковых микрорезонаторов, которые могут быть использованы для создания сверхминиатюрных неклассических излучателей света. Дается обоснование, что Брэгговский микрорезонатор представляет наибольший интерес для практической реализации ИОФ и ИФП с высокой внешней квантовой эффективностью. Рассмотрены эффекты квантовой электродинамики микрорезонаторов: эффекты слабой и сильной связи, и отмечено, что эффекты слабой связи (эффект Парселла) имеют первостепенное значение для разработки микрорезонаторов для ИОФ и ИФП, так как фактором Парселла F_P в значительной мере определяются параметры внешней квантовой эффективности и быстродействия излучателей.

Вторая глава посвящена описанию методик исследования, используемых автором лично при выполнении работы.

К числу экспериментальных методик относятся:

- 1. Методика атомно-силовой микроскопии (ACM), которая использовалась для изучения профилей поверхности исследуемых структур. Она применялась для определения размеров и плотности InGaAs KT, характера распределения KT по поверхности. ACM методика использовалась так же для контроля ряда технологических операций: контроля качества поверхности GaAs перед повторным ростом и точного определения глубины травления.
- 2. Спектральные методики, которые использовались для регистрации спектров фотолюминесценции, электролюминесценции и отражения.

Для разработки конструкции Брэгговского микрорезонатора и расчета его характеристик, а также для отработки режимов роста многослойных структур, применялись две расчетные модели:

- 1. Одномерная модель характеристических матриц.
- 2. Трехмерная модель собственных мод.

Третья глава содержит результаты исследования InGaAs KT с использованием методики ACM и фотолюминесценции. С использованием данных ACM и ФЛ, проанализирован набор параметров KT, таких как, плотность, размеры, дисперсия размеров, характер распределения KT по поверхности, энергетический спектр KT. На основе полученных результатов сформулирован подход для формирования структур InGaAs KT с низкой плотностью и высокой однородностью, необходимых для создания устройств на основе одиночных KT.

Если для ряда приборов на основе КТ (лазеры, фотоприемники) с целью увеличения коэффициентов квантового усиления и поглощения, требуются массивы КТ максимальной плотности, то при разработке сверхминиатюрных излучателей (ИОФ, ИФП) актуальной является противоположная задача: получение массивов со сверхнизкой плотностью $d \leq 10^8$ см⁻², что является необходимым условием для адресации к одиночной квантовой точке.

Исследуемые структуры выращивались на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) Riber-C21 по механизму Странского-Крастанова на нелегированных GaAs подложках с ориентацией (001), послойное описание структур приведено в Таблице 1. Рис. 1 иллюстрирует зонную диаграмму исследуемых структур.

Данные структуры оптимизированы для одновременного проведения АСМ и ФЛ исследований. Они содержат два слоя КТ, которые выращивались по абсолютно идентичным технологиям. Верхний слой, расположенный на поверхности структуры, (QD2) используется для проведения АСМ исследований. Нижний слой (QD1) предназначен для исследований методом ФЛ. Этот слой QD1 окружен слоями GaAs (C1, C2) и AlGaAs барьерами (B1, B2). Барьеры В1, В2 препятствуют поверхностной рекомбинации и диффузии электронно-дырочных пар в глубину кристалла, и обеспечивают, таким образом, эффективную локализацию электронно-дырочных пар

в пределах области C1 – C2 вблизи слоя QD1. Толщины слоев GaAs (C1, C2) выбраны таким образом, чтобы большая часть лазерного излучения поглощалась в данной области.

Таблица 1. Конструкция исследуемых структур.

Шифр	Состав: Al _X Ga _{1-X} As In _Y Ga _{1-Y} As	Толщина слоя, нм	Примечание
QD2	Y=1	~2	КТ для АСМ
	X=0	10	
B2	X=0.6	50	
C2	X=0	75	
QD1	Y=1	~2	КТ для ФЛ
C1	X=0	75	
B1	X=0.6	50	
	Х=0 (буфер)	500	
	GaAs (001)		GaAs
	подложка.		подложка

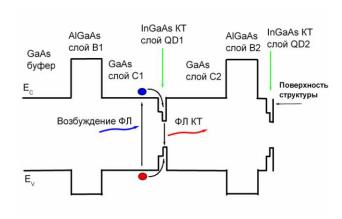


Рис.1. Зонная диаграмма исследуемых структур.

Согласно данным ACM (рис. 2) InGaAs KT преимущественно располагаются вблизи InAs мономолекулярных ступеней (рис. 2 а, б, в). В ряде исследованных структур этот эффект проявляется наиболее ярко (рис. 2 г, д).

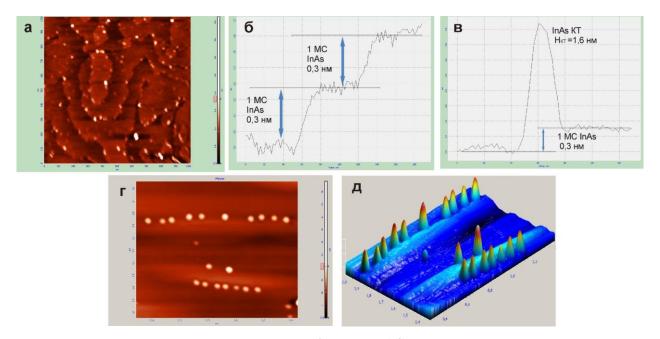


Рис. 2. Данные АСМ.

Квантовые точки не только локализованы вблизи мономолекулярных ступеней, но они образуют группы линейно и эквидистантно расположенных КТ с малым разбросом по размерам. Так для верхнего ряда, состоящего из десяти InGaAs КТ (рис. 2 г, д), дисперсия размеров по высоте составляет $\sigma_{KT} = 4$ %, для нижнего ряда (семь КТ) $\sigma_{KT} = 2.5$ %. Обнаруженный эффект

группирования может представлять интерес для развития методов селективного позиционирования KT.

Плотность InGaAs KT, выращиваемых по механизму Странского-Крастанова, может варьироваться в широких пределах от нулевых значений до очень высоких $d \ge 10^{10}$ см⁻², что определяется набором технологических параметров (толщина InAs слоя, температура подложки, время ростовой паузы τ_{GI} перед заращиванием InAs слоем GaAs). Зависимость плотности КТ от толщины InAs слоя носит резкий пороговый характер. Если слой InAs не достигает критического значения (~1.8 MC), КТ не формируются, по ее достижении плотность КТ резко возрастает с увеличением толщины слоя. Эта зависимость представлена на рис.3. При увеличении времени роста на 1 секунду (увеличение толщины InAs слоя на ~2%) плотность КТ возрастает на порядок.

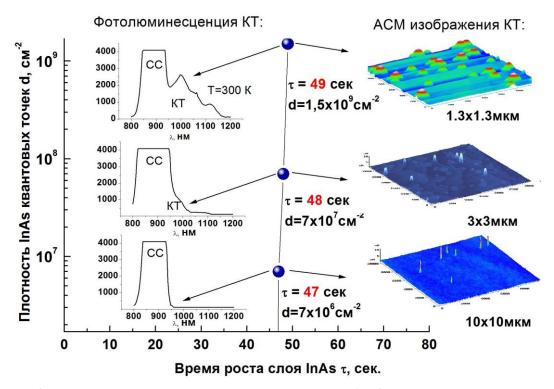


Рис. 3. Пороговый характер зависимости плотности InAs KT от времени роста InAs слоя. На вставках данные $\Phi \Pi$ (слева) и ACM (справа).

Важным фактором, определяющим параметры массива КТ, является и время ростовой паузы τ_{GI} перед заращиванием InAs слоем GaAs. С увеличением τ_{GI} до $10^{1}\div10^{2}$ с формируются массивы КТ высокой плотности (до 10^{10} см⁻² и выше), возрастает средний размер КТ, а также дисперсия их размеров. Напротив, использование в ростовом эксперименте малых τ_{GI} (единицы секунд) является эффективным способом получения массива КТ низкой плотности, при этом формируются КТ минимального размера с малой дисперсией размера. На рис. 4 приведены данные АСМ и ФЛ, иллюстрирующие сказанное. Значение высоты КТ H_{KT} определялось непосредственно по данным АСМ, величина ширины КТ Γ_{KT} вычислялась на основе экспериментальных данных АСМ с учетом

аппаратной функции методики АСМ Γ_{ACM} , задаваемой радиусом кривизны иглы кантилевера. В свою очередь, аппаратная функция методики АСМ определялась из экспериментов, в которых регистрировался профиль мономолекулярных ступеней InAs (Рис. 2 б).

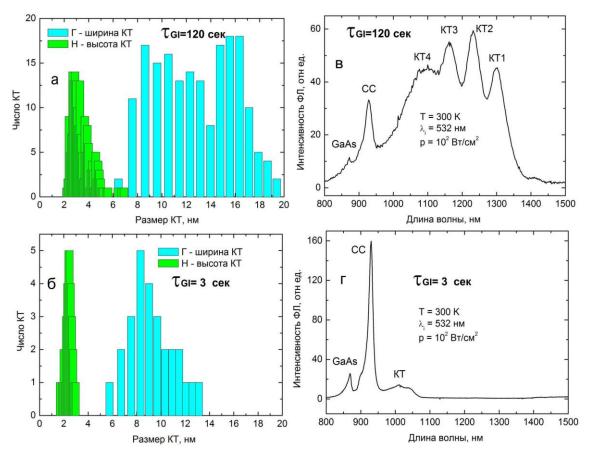


Рис. 4. Гистограммы распределения размеров КТ для двух структур, выращенных с временем прерывания τ_{GI} =120 сек (а) и τ_{GI} =3 сек (б) и спектры фотолюминесценции этих структур (в, г).

Рис. 4 демонстрирует значительную разницу характеристик первого (τ_{GI} = 120 сек) и второго (τ_{GI} = 3 сек) образца. В первом образце плотность КТ достигает ~10¹⁰ см⁻², КТ характеризуются значительной дисперсией размеров, спектр ФЛ содержит широкую полосу излучения КТ в интервале от 0.95 до 1.35 мкм. Пики люминесценции, обозначенные на рис.4 в как КТ1, КТ2 ..., отвечают мультимодальному распределению КТ по размерам. Размеры КТ, образующих субансамбли КТ1, КТ2 ..., отличаются на один монослой. Для второго образца люминесценция КТ проявляется в виде низкоинтенсивного пика с максимумом вблизи 1 мкм, в спектре доминирует пик смачивающего слоя (СС) – квантовой ямы, образованной слоем InAs. Снижение интенсивности и интервала энергий люминесценции соответствует значительному уменьшению плотности КТ и уменьшению дисперсии их размеров. По данным АСМ плотность КТ d =2·10⁸ см⁻², дисперсия высоты КТ H_{KT} не превышает 10% от среднего размера.

На основе полученных результатов был сформулирован следующий подход к выращиванию InGaAs КТ низкой плотности: 1) использование методики дифракции быстрых электронов для

определения момента перехода от двумерного механизма роста к трехмерному, 2) использование пониженной температуры ($T \approx 430^{\circ}$ C) и низкой скорости роста (~ 0.02 MC/c) InAs с целью точного и воспроизводимого задания критической толщины InAs слоя, 3) использование малых времен τ_{GI} на уровне единиц секунд. Предложенный подход позволил получить структуры с InGaAs KT с низкой плотностью $d \leq 10^{8}$ см⁻² вплоть до 10^{6} см⁻², результаты исследований этих структур представлены в 4 и 5 главах диссертации.

Во второй части **третьей главы** приведены результаты разработки метода селективного позиционирования InGaAs KT в пределах AlGaAs апертуры микронного размера. Разработанный метод селективного позиционирования InGaAs KT основан на использовании специально подготовленных площадок GaAs микронного размера, которые находятся в окружении AlGaAs слоев. Схема метода представлена на рис. 5.

Исходная структура содержит слой $Al_XGa_{1-X}As$ (~ 100 нм, $X \approx 0.6$), который выращен на поверхности GaAs (рис. 5 а). На необходимых участках верхний слой AlGaAs удаляется, при этом формируются площадки GaAs (зона A на рис. 5 б). После чего на подготовленной таким образом структуре осуществляется повторный рост слоев GaAs и InGaAs KT. Квантовые точки формируются только в зоне A.

Площадки GaAs формируются с использованием жидкостного травления.

В диссертации приведены характеристики жидкостных травителей, обеспечивающих наибольшую точность глубины травления и задающие наименьшую концентрацию загрязнений поверхности, что исключительно важно для успешного проведения повторного роста.

Условия для повторного роста в зоне A (GaAs) и В (AlGaAs) (рис. 5 б, в) существенно отличаются друг от друга. В пределах зоны A формируются высококачественные КТ, что подтверждается данными ФЛ (рис. 5 д). В зоне В повторный рост начинается со слоя $Al_xGa_{1-x}As$ (X=0.6), содержащего трудно

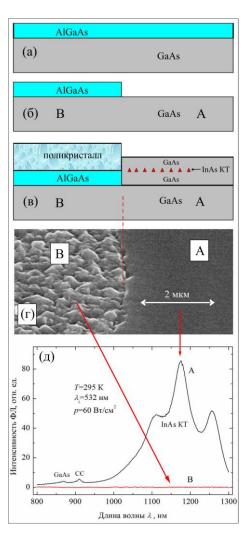


Рис.5. (а) - (в) - схема метода селективного позиционирования InGaAs KT, (г) - СЭМ изображение поверхности структуры после повтороного роста, (д) - спектры фотолюминесценции участков A и B структуры после повторного роста.

устранимые окислы алюминия, что приводит к значительному ухудшению качества выращиваемых слоев, к образованию поликристаллических областей (рис. 5 в, г). В этих условиях КТ практически не образуются или образуются дефектные КТ с нулевой квантовой эффективностью, что подтверждается спектральными данными по фотолюминесценции (рис. 5 д).

Названные факторы обеспечивают эффективное позиционирование КТ в пределах GaAs площадок (зона A). Разработанный метод селективного позиционирования используется в конструкции Брэгговского микрорезонатора для ИОФ (Глава 4).

диссертации приводятся четвертой главе результаты разработки полностью полупроводникового Брэгговского микрорезонатора для излучателей одиночных фотонов, сочетающего в себе токовую накачку селективно позиционированных InGaAs KT, высокую внешнюю квантовую эффективность и низкий уровень расходимости выходного излучения. В отличие от предыдущих конструкций, где за основу была взята схема лазера с вертикальным резонатором (ЛВР) с оксидной апертурой, предлагаемый микрорезонатор не содержит оксидных слоев, задающих высокий уровень механических напряжений, что делает его устойчивым к термоциклированию и работе при криогенных температурах. Микрорезонатор содержит два полупроводниковых брэгговских отражателя (РБО) р- и п-типа легирования. Верхнее выходное зеркало содержит N_T пар $\lambda/4$ чередующихся слоев GaAs и Al_{0.9}Ga_{0.1}As, нижнее зеркало образовано N_B парами $\lambda/4$ чередующихся слоев GaAs и AlAs. Между зеркалами располагается нелегированный слой GaAs толщиной λ . По середине GaAs слоя в максимуме стоячей волны микрорезонатора находится слой InAs KT, которые возбуждаются при пропускании тока через *p-i-n* структуру. Схема Брэгговского микрорезонатора для ИОФ приведена на рис. 6. Слой *i*-GaAs c InGaAs KT имеет форму диска с диаметром D_A . Этот слой окружен кольцом $Al_XGa_{1-X}As$ p-типа легирования толщиной $\lambda/4$ с внешним диаметром D_M . Кольцо $p\text{-Al}_X\text{Ga}_{1\text{-X}}\text{As}$ задает токовую и оптическую апертуру излучателя (зона А). Над этим кольцом (зона В) располагается поликристаллическое кольцо р-типа проводимости, из которого осуществляется инжекция дырок в апертурную область. Из-за наличия широкозонного $Al_XGa_{1-X}As$ кольца (х \approx 0,6), ток преимущественно протекает в пределах апертурной области, образованной слоем GaAs, содержащего InAs KT. Согласно расчетам вольт-амперных характеристик для гетероструктур зоны А и зоны В, эффективность токового ограничения, задаваемая отношением плотностей тока в этих зонах $K_{\rm CC} = j_{\rm A}/j_{\rm B}$ находится на уровне не ниже 10³, что подтверждается экспериментальными данными.

При разработке микрорезонатора его конструкция оптимизировалась с целью достижения максимального значения внешней квантовой эффективности фундаментальной моды и минимальной расходимости выходного излучения [A1, A2, A6]. Были проведены расчеты основных характеристик фундаментальной моды, таких как: частота (резонансная длина волны)

фундаментальной моды ω_{cavity} (λ_{FP}), распределение электрических и магнитных полей внутри и вне резонатора, распределение потока электромагнитной энергии (вектор Пойтинга), добротность микрорезонатора для фундаментальной моды Q, эффективный объем фундаментальной моды V_{eff} , ее эффективный диаметр D_{eff} и фактор Парселла F_P . Расчеты выполнялись с использованием одномерной модели характеристических матриц (МХМ) и трехмерной модели собственных мод (МСМ).

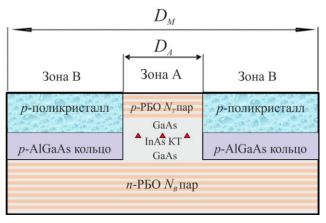


Рис.6. Схема Брэгговского микрорезонатора. Микрорезонатор образован двумя полупроводниковыми брэгговскими зеркалами p — и n — типа легирования, содержащими N_T и N_B пар $\lambda/4$ слоев, соответственно. Между зеркалами расположен нелегированный слой GaAs толщиной λ , в середине которого находится слой InGaAs квантовых точек. Токовая и оптическая апертура микрорезонатора задается кольцом p-AlGaAs толщиной $\lambda/4$.

Эффективная локализация энергии электромагнитного поля в латеральном направлении в данном резонаторе обеспечивается $Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ апертурным кольцом (рис. 7 а, б). Параметром, характеризующим эффективность локализации поля в латеральном направлении, является эффективный диаметр моды D_{eff} . На рис. 7 приведены результаты расчетов эффективного диаметра моды D_{eff} и эффективного объема V_{eff} . Зависимость эффективного диаметра моды D_{eff} от диаметра апертуры D_A представлена на рис. 7 г. Зависимость D_{eff} (D_A) носит немонотонный характер. По мере уменьшения диаметра апертуры D_A , диаметр моды D_{eff} уменьшается (зависимость носит линейный характер). Однако при очень малых значениях $D_A \le \lambda$ апертура уже не обеспечивает эффективную локализацию энергии моды в латеральном направлении, в этой области с уменьшением D_A диаметр моды возрастает. Минимальное значение D_{eff} достигается при $D_A \approx 0.7$ мкм. При $D_A \to 0$ мода преобразуется в плоскую волну, при этом $D_{eff} \to \infty$.

Эффективность оптического ограничения в латеральном направлении для данного типа микрорезонаторов иллюстрирует рис. 7 д. На рисунке приведена зависимость коэффициента K_{OC} =

 D_{eff} / D_A от диаметра апертуры. Из рисунка видно, что при $D_A \le 5$ мкм и вплоть до значений $D_A \approx 0.7$ мкм, обеспечивается высокая эффективность оптического ограничения: D_{eff} / $D_A < 1$.

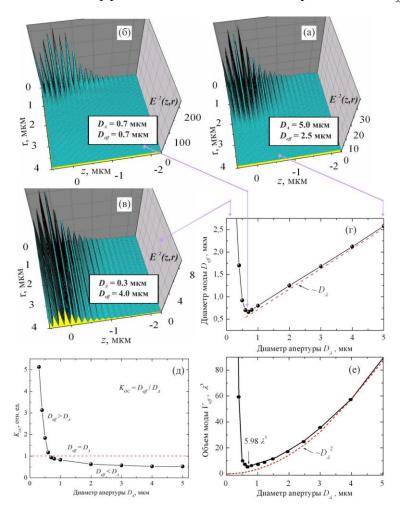


Рис.7. (а) — (в) - профили квадрата амплитуды электрического поля моды $E^2(r,z)$ для микрорезонатора с $N_T=2$ и $N_B=15$ и диаметрами апертур $D_A=5$ мкм, 0.7 мкм, 0.3 мкм. (г) — зависимость эффективного диаметра моды D_{eff} от диаметра апертуры D_A . (д) — зависимость K_{OC} (D_A). (е) — зависимость объема моды V_{eff} от диаметра апертуры D_A .

На рис. 7 е приведена зависимость V_{eff} от диаметра апертуры D_A для микрорезонатора с $N_T=2$ и $N_B=15$, объем моды задается в единицах λ^3 . Эта зависимость также носит немонотонный характер и определяется, главным образом, зависимостью D_{eff} (D_A). При $D_A<0.7$ мкм с уменьшением диаметра апертуры объем моды резко возрастает. Минимальный объем моды достигается при $D_A\approx0.7$ мкм и составляет около $6\lambda^3$.

На рис. 8 а представлены результаты расчетов внешней квантовой эффективности $\eta_{external}$ для микрорезонатора, содержащего N_B =15 пар слоев в нижнем зеркале (коэффициент отражения зеркала 97.8 %), варьируемыми параметрами являлись диаметр апертуры D_A и число пар слоев в верхнем зеркале N_T . Как видно из рисунка, зависимость имеет экстремум. Максимальное значение $\eta_{external}$ =59 % достигается при D_A = 0.7 мкм и N_T = 8.

Дальнейшее увеличение внешней квантовой может быть достигнуто в микрорезонаторах с предельно высоким уровнем добротности ~10⁴. микрорезонаторов Расчеты ДЛЯ $N_B = 35$ (коэффициент отражения нижнего зеркала составляет 99.85 %) и N_T в интервале 15 \div 25 демонстрируют значения $\eta_{external} \ge 80 \%$ (рис. 8 б). Максимальное значение $\eta_{external} = 88.4\%$ получено при расчете характеристик микрорезонатора с N_B =35 и N_T =19. В этом случае добротность достигает значения $Q = 1.03 \times 10^4$, фактор Парселла F_{P} =12.5. Большое значение фактора Парселла приводит к значительному снижению времени жизни экситона, которое можно оценить как $au_{\text{X-in}} = au_{\text{X-out}} / F_P \approx 10^{-10} \text{ c.}$ Это предоставляет потенциальные возможности для существенного увеличения быстродействия ИОФ, вплоть 10 ГГц.

На рис. 9 приведены результаты расчета расходимости излучения фундаментальной моды микрорезонатора и профили электрического поля моды внутри и вне резонатора для различных значений апертуры D_A . Угол расходимости α_{div} определялся по уровню $1/e^2$ плотности мощности

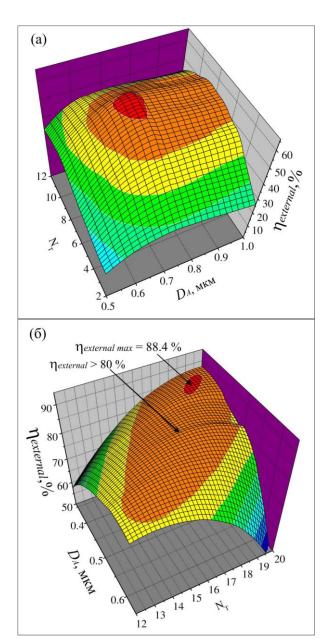


Рис. 8. (а) — зависимость $\eta_{external}$ (D_A , N_T) для микрорезонатора с $N_B = 15$. (б) — зависимость $\eta_{external}(D_A, N_T)$ для микрорезонатора с $N_B = 35$.

выходного излучения. Результаты расчета для микрорезонатора с N_B =15 и N_T =2 приведены на рис. 9 г, где представлена зависимость числовой апертуры $NA = \sin (\alpha_{div})$ от диаметра апертуры микрорезонатора D_A . Согласно полученным данным, угол расходимости определяется главным образом значением эффективного диаметра моды D_{eff} , $\alpha_{div} \sim 1/D_{eff}$.

При $D_A \to 0$, $D_{eff} \to \infty$, мода преобразуется в плоскую волну и $\alpha_{div} \to 0$. С увеличением $D_A > 0.7$ мкм D_{eff} также возрастает (рис. 9 г), что приводит к уменьшению угла расходимости. Максимальный уровень расходимости $NA \approx 0.21$ достигается при $D_A \approx 0.7$ мкм, где эффективный диаметр моды D_{eff} имеет наименьшее значение (рис. 7 г). Как видно из рисунка, разработанный

микрорезонатор характеризуется низким уровнем расходимости излучения $NA \le 0.2$, что обеспечивает высокую эффективность ввода излучения в стандартное оптическое волокно.

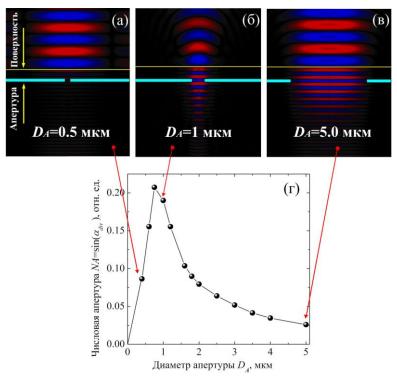


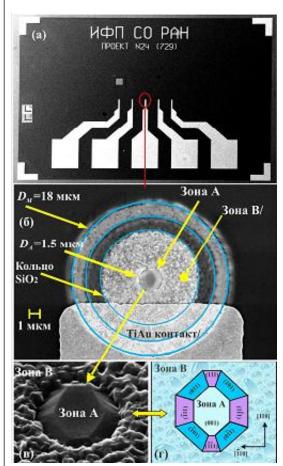
Рис.9. (а) - (в) - профили электрического поля фундаментальной моды внутри и вне резонатора для различных значений диаметров апертуры D_A . (г) Зависимость расходимости выходного излучения NA от диаметра апертуры D_A для микрорезонатора с $N_T = 2$ и $N_B = 15$.

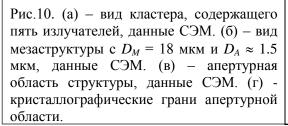
На основе разработанной конструкции были изготовлены лабораторные образцы излучателей (рис. 10). В лабораторных образцах использовались микрорезонаторы с $N_T = 2$ и $N_B = 15$.

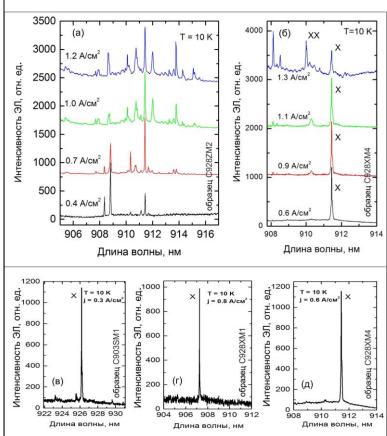
Были получены структуры, в которых при криогенных температурах в пределах резонансной полосы в спектрах электролюминесценции проявляются узкие линии, отвечающие излучению нескольких КТ, в том числе и одиночных InGaAs КТ.

На рис. 11 приведены спектры электролюминесценции, записанные при T=10 K для набора излучателей. На рис. 11а представлены спектры электролюминесценции излучателя, записанные при различных уровнях токового возбуждения, где проявляется вклад нескольких KT (предположительно двух). Рис. 11 б — Γ демонстрируют спектры электролюминесценции трех других лабораторных образцов излучателей, где проявляется вклад одиночных $InGaAs\ KT$. При наименьших уровнях токового возбуждения, спектры содержат одиночные узкие пики, отвечающие рекомбинации экситонов (рис. $11\ B-J$).

Приведенные данные экспериментально подтверждают возможность создания неклассических излучателей на базе разработанной конструкции микрорезонатора.







пики нескольких КТ. (б) - (д) - спектры электролюминесценции одиночных КТ. На рис. (б) и (д) приведены данные, полученные на одном образце.

Рис.11. (а) – спектры электролюминесценции, содержащие

Пятая глава посвящена исследованию тонкой структура экситонных состояний InGaAs квантовых точек. Исследовались структуры со сверхнизкой плотностью КТ (~10⁶ см⁻²), полученные по механизму Странского-Крастанова с использованием малых времен прерывания роста. Среднее расстояние между КТ в этом случае составляет ~10 мкм, диаметр лазерного пятна на поверхности образца в методике микрофотолюминесценции ~2 мкм, что уверенно позволяет возбуждать и анализировать люминесценцию одиночных InGaAs квантовых точек, не прибегая к дополнительным нанотехнологическим операциям, таким как формирование субмикронных мез или формирование субмикронных апертур в слоях металла, нанесенного на поверхность структуры.

Спектр микро-ФЛ образца с низкой плотностью InGaAs КТ приведен на рис. 12. Он содержит два узких пика, отвечающих люминесценции экситона (X) биэкситона (XX) одиночной InGaAs квантовой точки. Интерпретация пиков люминесценции одиночных проводилась c использованием зависимостей интенсивностей пиков от плотности мошности излучения возбуждающего лазера. При наименьших плотностях мощности спектрах

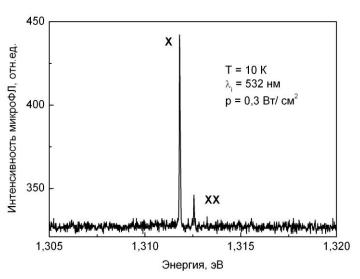


Рис. 12. Спектр микролюминесценции одиночной InGaAs KT.

люминесценции в первую очередь проявляются пики экситонов X и зависимость их интенсивности от плотности мощности линейна. При больших плотностях мощности в спектрах появляются пики биэкситонов XX, интенсивность которых возрастает по квадратичному закону от мощности лазера.

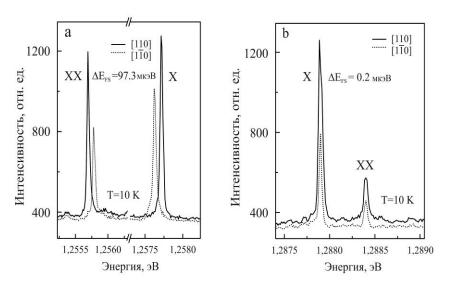


Рис. 13. Спектры микролюминесценции для двух InGaAs KT. (а) — спектр одиночной KT с $\Delta E_{\rm FS} = 97$ мкэВ. (б) — спектр одиночной KT, для которой расщепление экситонных состояний не превышает погрешности измерений ± 1.6 мкэВ.

Расщепление экситонных состояний ΔE_{FS} определялось из спектров микролюминесценции, зарегистрированных для двух скрещенных положений поляризатора, ориентированного вдоль кристаллографических направлений [110] и [1 $\overline{1}$ 0] (рис. 13).

Для увеличения точности определения параметра ΔE_{FS} экспериментальные контуры пиков люминесценции аппроксимировались контурами Лоренца. С использованием данной процедуры погрешность в определении параметра ΔE_{FS} составляла $\sigma_{FS}=\pm 1.6$ мкэВ, что сравнимо с естественной шириной экситонных пиков Γ_X .

Параметр ΔE_{FS} был определен для 135 одиночных КТ. На рис. 14 приведены полученные экспериментальные данные для ΔE_{FS} , по горизонтальной оси отложена энергия экситона КТ.

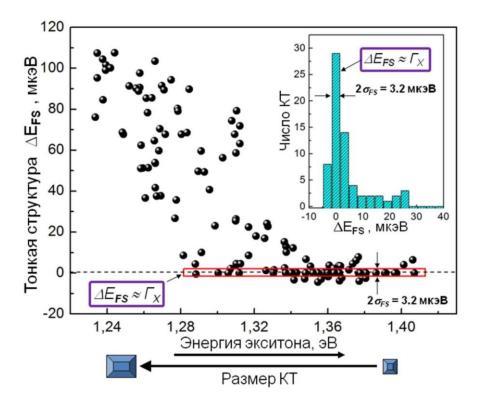


Рис. 14. Расщепление экситонных состояний $\Delta E_{\rm FS}$ для 135 InAs KT.

Наиболее важной особенностью полученной зависимости является наличие группы КТ с энергией экситонов в интервале $1.3 \div 1.4$ эВ, для которых ΔE_{FS} близка к нулю в пределах точности измерений ± 1.6 мкэВ. К этой группе относятся КТ наименьшего размера, где пьезопотенциал не приводит к заметному расщеплению экситонных состояний. На рис. 14 эта группа отмечена прямоугольной рамкой. На вставке рис. 14 приведена гистограмма распределения числа КТ от ΔE_{FS} для интервала ΔE_{FS} от -10 до 40 мкэВ, ширина столбца равна удвоенной погрешности измерений 3.2 мкэВ. Как видно из гистограммы максимум распределения приходится на КТ с ΔE_{FS} = 0 ± 1.6 мкэВ. Таким образом, показано, что структуры с InAs КТ, выращенными по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста, содержат субансамбли КТ с $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$, пригодных для создания излучателей пар запутанных фотонов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

- 1. С использованием методик атомно-силовой микроскопии и фотолюминесценции установлено, что процесс формирования InGaAs КТ по механизму Странского Крастанова с малым временем прерывания роста является эффективным способом получения массивов КТ с низкой плотностью ($d_{KT} \le 10^8$ см⁻²), необходимых для создания устройств на основе одиночных квантовых точек.
- 2. Показано, что выращивание InGaAs КТ в пределах GaAs площадок микронного размера, окруженных слоями AlGaAs, является эффективным методом селективного позиционирования КТ, обеспечивающим формирование КТ лишь в пределах апертуры, задаваемой внутренним диаметром AlGaAs кольца.
- 3. Разработан полностью полупроводниковый брэгговский микрорезонатор для миниатюрных неклассических излучателей, состоящий из согласованных по параметру решетки полупроводниковых слоев, что делает его устойчивым к термоциклированию и работе при криогенных температурах. Микрорезонатор сочетает в себе эффективную токовую накачку селективно позиционированных КТ, высокий уровень оптического ограничения фундаментальной моды в пределах апертуры, высокий уровень внешней квантовой эффективности и низкий уровень расходимости выходного излучения.
- 4. Проведены расчеты электрофизических характеристик pin гетероструктуры брэгговского микрорезонатора, демонстрирующие эффективность токового ограничения $K_{\rm CC}=j_A/j_B \ge 10^3$, что соответствует полученным экспериментальным данным.
- 5. Проведены расчеты основных оптических характеристик брэгговского микрорезонатора. Обнаружены и интерпретированы эффекты немонотонного поведения параметров модового объема, фактора Парселла, внешней квантовой эффективности от значений апертуры микрорезонатора, что позволило определить оптимальные значения апертур для достижения максимальной внешней квантовой эффективности. Максимальное значение внешней квантовой эффективности составляет $\eta_{external} = 88$ % при диаметре AlGaAs апертуры $D_A = 0.7$ мкм и значении добротности $Q \approx 10^4$.
- 6. Показано, что расходимость выходного излучения для фундаментальной моды микрорезонатора не превышает NA=0.2, что задает высокую эффективность ввода излучения в стандартное оптоволокно.
- 7. Изготовленные лабораторные образцы излучателей при криогенных температурах в пределах резонансной области демонстрируют в спектрах электролюминесценции узкие пики, отвечающие излучению одиночных InGaAs KT, что является экспериментальным

- подтверждением возможности создания $ИО\Phi$ на основе предложенной конструкции микрорезонатора.
- 8. Методом криогенной микрофотолюминесценции исследована тонкая структура экситонных состояний InGaAs KT. Установлено, что структуры InGaAs KT, выращенные по механизму Странского-Крастанова с малым временем прерывания роста, содержат субансамбли КТ с $\Delta E_{FS} \approx \Gamma_X$, пригодных для создания излучателей фотонных пар, запутанных по поляризации.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- А1. Гайслер В.А. Эффективные излучатели одиночных фотонов на основе селективно позиционированных InAs квантовых точек и брэгговских микрорезонаторов / В. А. Гайслер, А. В. Гайслер, А. С. Ярошевич, И. А. Деребезов, М. М. Качанова, Ю. А. Живодков, Т. А. Гаврилова, А. С. Медведев, Л. А. Ненашева, К. В. Грачев, В. К. Сандырев, А. С. Кожухов, В. М. Шаяхметов, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, Д. В. Дмитриев, А. И. Торопов, Д. В. Щеглов, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Физика и техника полупроводников. 2015. Т.49. Вып.1 С.35-40.
- А2. Гайслер А.В. Полупроводниковый брэгговский микрорезонатор для излучателей одиночных фотонов / А. В. Гайслер, Д. В. Щеглов // Доклады АН ВШ РФ. −2014. № 4 (25) C. 21 32.
- А3. Гайслер А.В. Тонкая структура экситонных состояний InAs квантовых точек / А. В. Гайслер, А. С. Ярошевич, И. А. Деребезов, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. В. Щеглов, В. А. Гайслер, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Письма в ЖЭТФ. 2013. Т. 97. Вып. 5 С. 313-318.
- А4. Гайслер А.В. Спектроскопия одиночных InAs квантовых точек / А. В. Гайслер, А. С. Ярошевич, И. А. Деребезов, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. В. Щеглов, В. А. Гайслер, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // **Автометрия.** − 2013. − Т. 49. №5 − С. 93-99.
- А5. Гайслер В.А. Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых нанострутур / В. А. Гайслер, А. В. Гайслер, И. А. Деребезов, А. С. Ярошевич, А. К. Бакаров, Д. В. Дмитриев, А. К. Калагин, А. И. Торопов, М. М. Качанова, Ю. А. Живодков, Т. А. Гаврилова, А. С. Медведев, Л. А. Ненашева, В. М. Шаяхметов, О.И. Семенова, К. В. Грачев, В. К. Сандырев, А. С. Кожухов, Д. В. Щеглов, Д.Б. Третьяков, И.И.Бетеров, В.М.Энтин, И.И.Рябцев, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Юбилейный сборник избранных

- трудов трудов Института физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН (1964-2014) , г. Новосибирск, изд. «Параллель», ISBN 978-5-98901-144-5, -2014. -C.378-400.
- Аб. Гайслер В.А. Эффективные излучатели одиночных фотонов на основе полупроводниковых квантовых точек и брэгговских микрорезонаторов / В. А. Гайслер, А. В. Гайслер, А. С. Ярошевич, И. А. Деребезов, М. М. Качанова, Ю. А. Живодков, Т. А. Гаврилова, А. С. Медведев, Л. А. Ненашева, К. В. Грачев, В.К. Сандырев, А. С. Кожухов, В. М. Шаяхметов, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. В. Щеглов, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Труды XVIII Международного симпозиума «Нанофизика и наноэлектроника», 10-14 марта 2014 г., Нижний Новгород, Издательство Нижегородского госуниверситета. 2014. Т. 2. С.427-428.
- А7. Гайслер В.А. Сверхминиатюрные излучатели на основе полупроводниковых квантовых ям и квантовых точек / В. А. Гайслер, А. В. Гайслер, И. А. Деребезов, А. С. Ярошевич, А. К. Бакаров, Д. В. Дмитриев, А. К. Калагин, А. И. Торопов, М. М. Качанова, Ю. А. Живодков, Т. А. Гаврилова, А. С. Медведев, Л. А. Ненашева, В. М. Шаяхметов, О.И. Семенова, К. В. Грачев, В. К. Сандырев, А. С. Кожухов, Д. В. Щеглов, Д.Б. Третьяков, И.И.Бетеров, В.М.Энтин, И.И.Рябцев, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Тезисы докладов Конференции и школы молодых ученых по актуальным проблемам физики полупроводниковых структур, 15-18 сентября 2014 г. Новосибирск. 2014. С.39.
- А8. Гайслер А.В. Исследование тонкой структуры экситонных состояний InAs квантовых точек / А.В. Гайслер, А. С. Ярошевич, И. А. Деребезов, А. К. Калагин, А. К. Бакаров, А. И. Торопов, Д. В. Щеглов, В. А. Гайслер, А. В. Латышев, А. Л. Асеев // Тезисы XI Российской конференции по физике полупроводников, Санкт-Петербург, 16-20 сентября 2013г., Физико-технический институт им.А.Ф.Иоффе, 2013. С.52.
- A9. Gaysler A.V. Excitonic States Spectroscopy of InAs Quantum Dots / A. V. Gaysler, A. S. Jaroshevich, I. A. Derebezov, A. K. Kalagin, A. K. Bakarov, A. I. Toropov, D. V. Sheglov, V. A. Gaysler, A. V. Latyshev, A. L. Aseev // Proceedings of 2nd International Conference "Mesoscopic Structures: Fundamentals and Applications", 23 June 29 June 2013, Hotel Bylina, Berdsk, Novosibirsk. 2013. P.43-44.
- А10. Гайслер А.В. Исследование структурных и оптических характеристик InGaAs квантовых точек / А.В. Гайслер // Материалы научной студенческой конференции «Дни науки НГТУ-2011», Новосибирск. 2011. С.35.
- А11. Гайслер А.В. Локальное анодное окисление поверхности полупроводников с использованием атомно-силового микроскопа / А.В. Гайслер // Материалы научной студенческой конференции «Дни науки НГТУ-2010», Новосибирск. 2010. С.25.

A12. Gaisler A.V. Nanopatterning of oxide thin films using atomic force microscopy local anodic oxidation / A.V. Gaisler, D.V. Sheglov, A.V. Latyshev // Proceedings of International school for young scientists within the framework of 16th international symposium "Nanostructures: Physics and Technology", July 14-18, 2008, Vladivostok, Russia. – 2008. – P.48.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- C1. Bimberg D. Quantum dot heterostructures / D. Bimberg, M. Grundmann, N. N. Ledentsov // Toronto: John Wiley & Sons, 2001. 328 p.
- С2. Леденцов Н.Н. Гетероструктуры с квантовыми точками: получение, свойства, лазеры / Н.
 Н. Леденцов, В. М, Устинов, В. А. Щукин, П. С. Копьев, Ж. И. Алферов, Д. Бимберг // Физика и техника полупроводников. –1998. Т.32, №4. С.385 410.
- C3. Nano-optoelectronics: Concepts, Physics and Devices / ed. M. Grundmann // Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. –2002. –442 p.
- C4. Semiconductor Nanostructures / ed. Bimberg D. // Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. –2008. –357 p.
- C5. Single Quantum Dots Fundamentals, Application and New Concepts / ed. P. Michler// Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag. –2003, –352 p.
- C6. Ivchenko E.L. Optical Spectroscopy of Semiconductor Nanostructures / E.L. Ivchenko // Alpha Science International Ltd., -2005, -427 p.
- C7. Bimberg D. A tribute to Zhores Ivanovitch Alferov, a pioneer who changed our way of daily life / D.Bimberg// Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 010301-1-3.
- C8. Ledentsov N.N. Quantum dot laser / N. N. Ledentsov // Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014001-1-8.
- C9. Stock E. High-speed single-photon source based on self-organized quantum dots / E. Stock, W. Unrau, A. Lochmann, J. A. Tofflinger, M. Ozturk, A. I. Toropov, A. K. Bakarov, V. A. Haisler, D. Bimberg // Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014003-1-4.
- C10. Zhukhov E. Quantum dot lasers with controllable spectral and modal characteristics / E. Zhukov, M. V. Maximov, N. Yu. Gordeev, A. V. Savelyev, D. A. Livshits, A. R. Kovsh// Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014004-1-7.
- C11. Fiol G. 1.3 μ m range 40 GHz quantum-dot mode-locked laser under external continuous wave light injection or optical feedback / G. Fiol, M Kleinert, D. Arsenijevic and D Bimberg // Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014006-1-5.

- C12. Kim. J. Influence of the pump wavelength on the gain and phase recovery of quantum-dot semiconductor optical amplifiers /J. Kim, C. Meuer, D. Bimberg, G. Eisenstein // Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014007-1-7.
- C13. Marent A. The QD-Flash: a quantum dot-based memory device / A. Marent, T. Nowozin, M. Geller, D. Bimberg // Semicond. Sci. Technol. –2011. –Vol. 26, –P. 014026-1-7.
- C14. Single Semiconductor Quantum Dots / ed. P. Michler // Springer, Berlin. –2009. –389 p.
- C15. Gisin N. Quantum cryptography / N. Gisin, G. Ribordy, W. Tittel, H. Zbinden //, Rev. Modern Phys. –2002. –Vol. 74, –P. 145 195.
- C16. Walls F. Quantum Optics/ F. Walls, G. J. Milburn // Springer-Verlag, Berlin. –2008. –357 p.
- C17. Lochmann A. Electrically driven single quantum dot polarised single photon emitter /A. Lochmann, E. Stock, O. Schulz, F. Hopfer, D. Bimberg, V.A. Haisler, A.I. Toropov, A.K. Bakarov, A.K. Kalagin // Electr. Lett., −2006. −Vol.42, №13. −P.774-775.
- C18. Lochmann A. Electrically pumped, micro-cavity based single photon source driven at 1 GHz /A. Lochmann, E. Stock, J.A. Tofflinger, W. Unrau, A. Toropov, A. Bakarov, V. Haisler, D. Bimberg // Electr. Lett., −2009. −Vol.45, №11. −P.566-567.
- C19. Munnix M.C. Quantum-Dot-Based Single Photon Emitters / M. C. Munnix, A. Lochmann, D. Bimberg, V.A. Haisler // IEEE J. Quant. Electr. −2009. −Vol.45, №19. −P.1084-1088.
- C20. Strittmatter A. Lateral positioning of InGaAs quantum dots using a buried stressor /A. Strittmatter, A. Schliwa, J.-H. Schulze, T. D. Germann, A. Dreismann, O. Hitzemann, E. Stock, I. A. Ostapenko, S. Rodt, W. Unrau, U. W. Pohl, A. Hoffmann, D. Bimberg, V. Haisler // Appl. Phys. Lett. –2012. –Vol.100. –P.093111–1–3.
- C21. Self-Assembled Quantum Dots / ed. Z.M. Wang // Springer Science+Business Media, LLC, N.Y. -2008. -463 p.
- C22. Benson O. Regulated and Entangled Photons from a Single Quantum Dot / O. Benson, C. Santori, M.Pelton, Y. Yamamoto // Phys. Rev. Lett. −2000. −Vol.84, №11. −P.2513−2516.
- C23. Seguin R. Control of fine-structure splitting and excitonic binding energies in selected individual InAs/GaAs quantum dots / R. Seguin, A. Schliwa, T.D. Germann, S. Rodt, K. Potschke, A. Strittmatter, U. W. Pohl, D. Bimberg, M. Winkelnkemper, T. Hammerschmidt, P. Kratzer // Appl. Phys. Lett. –2006. –Vol.89. –P.263109–1–3.
- C24. Seguin R. Quantum dot size dependence of exciton fine structure splitting / R. Seguin, A. Schliwa, S. Rodt, K. Potschke, U. W. Pohl, D. Bimberg // Physica E. 2006. Vol. 32. P. 101 103.