

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. А. Ф. Иоффе

На правах рукописи

ЖУКОВ Алексей Евгеньевич

УДК 681.7.069.24

**ИНЖЕКЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ОСНОВЕ
САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КВАНТОВЫХ ТОЧЕК**

(специальность 01.04.10 – физика полупроводников)

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор

Андронов А.А.

Доктор физико-математических наук профессор

Воробьев Л.Е.

Доктор физико-математических наук профессор

Конников С.Г.

Ведущая организация:

Институт аналитического приборостроения РАН, Санкт-Петербург

Защита состоится “___” _____ 200__ г. в _____ час. на заседании специализированного совета Д 002.205.02 при Физико-техническом институте им. А.Ф.Иоффе РАН (194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе РАН

Отзывы о диссертации в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу ученому секретарю специализированного совета.

Автореферат разослан “___” _____ 200__ г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук



Сорокин Л.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы, объект исследования

Изобретение инжекционного лазера на основе полупроводниковых гетероструктур [1*] произвело переворот в электронике, открыв новое направление науки и техники – оптоэлектронику. В настоящее время полупроводниковые лазеры широко используются в качестве компактных источников когерентного излучения в системах передачи данных, накачки твердотельных лазеров, системах считывания информации и других применениях. Однако, до настоящего времени актуальной остается задача улучшения приборных характеристик инжекционных лазеров в зависимости от требований конкретных применений. Большинство характеристик инжекционного лазера тесно связаны с энергетической зависимостью плотности состояний в активной области лазера. Изобретение лазера на основе квантовой ямы [2*] показало, что зонная структура активной области может быть целенаправленно изменена с помощью использования эффектов размерного квантования, улучшая приборные характеристики лазерного диода. К настоящему времени приборные характеристики лазеров на основе квантовых ям практически достигли своих теоретически предсказанных пределов. Дальнейший прогресс технологии полупроводниковых лазеров связан с использованием структур с размерностью ниже чем два – квантовых проволок и квантовых точек. Для лазера на основе квантовых точек теоретически предсказаны более резкая зависимость оптического усиления от тока накачки, что должно приводить к дальнейшему снижению порогового тока лазера, а также подавление зависимости порогового тока от температуры [3*]. Обнаруженный эффект самоорганизации при эпитаксиальном росте определенного класса полупроводниковых гетероструктур [4*] открыл путь созданию массивов полупроводниковых квантовых точек непосредственно в процессе выращивания активной области лазера. В качестве объекта исследования были выбраны инжекционные лазеры с активной областью на основе массивов квантовых точек, сформированных с использованием методов самоорганизации.

Однако, практическая реализация преимуществ лазеров на основе квантовых точек возможна лишь при условии, что будет вскрыта взаимосвязь приборных характеристик инжекционного лазера со свойствами массива квантовых точек и проведена целенаправленная оптимизация этих свойств. К моменту начала выполнения данной работы были проведены первые эксперименты по исследованию инжекционных лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек, однако их характеристики значительно уступали не только теоретическим предсказаниям для лазера на квантовых точках, но и существующим лазерам на квантовых ямах, а научные основы для оптимизации

отсутствовали. Целью настоящей работы являлось создание научных основ и разработка воспроизводимой технологии создания низкороговых высокоэффективных инжекционных лазеров с активной областью на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек для научных исследований нуль-мерных полупроводниковых систем и применений в лазерных диодах оптической накачки и волоконной связи.

Применение массивов самоорганизующихся квантовых точек в качестве активной области лазера возможно лишь при условии, что будут созданы гетероструктуры, свойства которых близки к модельным. Дефекты, неконтролируемые примеси, случайные вариации состава могут привести к подавлению и даже полному исчезновению ожидаемых эффектов. Массивы квантовых точек, предназначенные для использования в качестве активной области прибора, должны быть помещены в матрицу более широкозонного материала, допускающую возможность инжекции током, удовлетворять требованию отсутствия дефектов на границе с матрицей. Для реализации высоких значений усиления необходимо получать плотные массивы точек, достаточно однородных по форме и размерам. Для приборных применений желательно, чтобы энергетическое разделение между нижним уровнем размерного квантования и вышележащими уровнями или континуумом превосходило несколько $k_B T$ при комнатной температуре. Кроме того, для удовлетворения требований специфических приборных применений в лазере на основе квантовых точек необходимо достижение заданной длины волны излучения. В частности, на сегодняшний день одними из важнейших являются спектральные диапазоны, отвечающие длинам волн около 1,3 мкм и 1 мкм, используемые в волоконно-оптических линиях связи и в лазерах накачки, соответственно. Выполнение перечисленных выше условий предъядвляет жесткие требования к технологии создания гетероструктур и требует тщательной оптимизации как самой структуры лазера, так и условий ее роста. Для достижения поставленной цели, в ходе работы решались следующие основные задачи:

- экспериментальное и теоретическое исследование оптического усиления в лазерах на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек, исследование влияния поверхностной плотности и степени разупорядоченности массива квантовых точек, а также более высоко лежащих состояний на усиление и пороговые характеристики,
- увеличение эффективности и снижение пороговой плотности тока лазеров на квантовых точках за счет преодоления проблемы насыщения оптического усиления, подавления безызлучательной рекомбинации и заселения носителями более высоко лежащих состояний (возбужденных уровней квантовых точек, смачивающего слоя и матрицы),

- разработка технологии лазеров на квантовых точках, работающих в непрерывном режиме,
- разработка новых методов формирования сверхплотных упорядоченных массивов квантовых точек для использования в мощных лазерах, исследование и оптимизация характеристик мощных лазеров на основе субмонослойных квантовых точек,
- исследование влияния материала и ширины запрещенной зоны матрицы на структурные и спектральные характеристики массива квантовых точек, а также приборные характеристики инжекционных лазеров (пороговую плотность тока, внутренние потери),
- разработка метода формирования массивов квантовых точек на подложках GaAs, излучающих в спектральном диапазоне 1,3 мкм, на основе обнаруженного эффекта стимулированного распада напряженного твердого раствора.

На защиту выносятся следующие основные положения.

1. Результаты исследований оптического усиления, пороговых характеристик и дифференциальной эффективности в лазерах на основе самоорганизующихся квантовых точек, позволившие решить проблему насыщения усиления и создать низкопороговые высокоэффективные инжекционные лазеры, работающие в непрерывном режиме.
2. Метод получения массивов квантовых точек для использования в мощных лазерах, технология создания и конструкция мощных лазеров на основе квантовых точек.
3. Метод получения массивов квантовых точек, технология создания и конструкция инжекционных лазеров на основе квантовых точек на подложках арсениде галлия, излучающих в диапазоне 1,3 мкм.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

- Впервые проведено комплексное исследование пороговых характеристик и оптического усиления лазеров на квантовых точках, их взаимосвязи с плотностью массива квантовых точек, неоднородным уширением плотности состояний и термическим выбросом носителей из квантовых точек.
- Показано, что для достижения низких значений пороговой плотности тока и высоких значений внешней дифференциальной эффективности в лазерах на основе самоорганизующихся квантовых точек требуется увеличить максимальное (насыщенное) оптическое усиление, определяемое плотностью массива квантовых точек, и подавить тепловое заселение более высоко лежащих состояний, зависящее от энергии локализации основного состояния КТ.
- Предложены и реализованы методы эпитаксиального роста, позволяющие формировать плотные однородные массивы квантовых

точек (субмонослойные квантовые точки), пригодные для применений в мощных лазерах диапазона длин волн около 1 мкм.

- Впервые продемонстрировано, что изменение ширины запрещенной зоны матрицы, окружающей массив квантовых точек, позволяет управлять длиной волны излучения из квантовых точек и подавлять выброс носителей из квантовых точек.
- Впервые обнаружен эффект активированного распада напряженного твердого раствора InGaAs при его осаждении над массивом напряженных квантовых точек; этот эффект использован для расширения спектрального диапазона квантовых точек вплоть до 1,3 мкм.

Таким образом, в ходе работы проведено комплексное исследование приборных характеристик лазеров на основе квантовых точек, вскрыта их взаимосвязь с электронными и структурными параметрами массива квантовых точек.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней:

- Впервые созданы и исследованы низкопороговые лазеры на основе квантовых точек, работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре, продемонстрирована рекордная для лазеров на основе квантовых точек выходная мощность и внешняя дифференциальная эффективность.
- Впервые созданы инжекционные лазеры на основе квантовых точек, выращенных на подложках GaAs, работающие в спектральном диапазоне 1,3 мкм, по своим характеристикам превосходящие существующие лазеры волоконной связи на основе InP.
- Впервые созданы инжекционные лазеры на основе квантовых точек, выращенных на подложках InP, и впервые продемонстрирована возможность расширения спектрального диапазона инжекционных лазеров на квантовых точках до длины волны около 2 мкм.

Таким образом, в ходе работы созданы научные основы и разработана воспроизводимая технология создания низкопороговых высокоэффективных инжекционных лазеров с активной областью на основе квантовых точек, пригодных для применения в системах оптической накачки и волоконной связи.

Апробация работы.

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на Всероссийских и международных конференциях и симпозиумах: 2, 3, 4 Российских конференциях по физике полупроводников (Зеленогорск, 1997; Москва, 1998; Новосибирск, 1999); 8, 9, 10, 11 Международных конференциях по молекулярно-пучковой эпитаксии (Осака, Япония, 1994; Малибу, США, 1996; Канны, Франция, 1999; Пекин, Китай, 2000); Международных симпозиумах “Наноструктуры: Физика и Технология” (Санкт-Петербург, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2000, 2001);

Осенних и весенних международных конференциях Общества исследования материалов (MRS) (Бостон, США, 1995, 1997, 1999; Сан-Франциско, США, 1996); 2, 3 Международной школе по приборам на основе низкоразмерных полупроводниковых структур (Созопол, Болгария, 1995, 1996); 2, 3 Международной конференции по низкоразмерным структурам и приборам (Лиссабон, Португалия, 1997; Анталия, Турция, 1999); 23, 24 Международных конференциях по физике полупроводников (Берлин, Германия, 1996; Иерусалим, Израиль, 1998); 23, 26 Международных симпозиумах по полупроводниковым соединениям (Санкт-Петербург, 1996; Берлин, Германия, 1999); 8, 9, 10 Европейских симпозиумах по молекулярно-пучковой эпитаксии (Сиерра-Невада, Испания, 1995; Оксфорд, Великобритания, 1997; Ле-Арк, Франция, 1999); 10 Международной конференции по полупроводниковым и изолирующим материалам (Беркли, США, 1998); 39 Международной конференции по электронным материалам (Форт-Коллинз, США, 1997); Международных симпозиумах по наноструктурам и квантовым точкам (Саппоро, Япония, 1998, Сан-Диего, США, 1999); Международном семинаре по оптоэлектронике (Санкт-Петербург, 1998). Результаты исследований опубликованы в 115 научных статьях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 частей и заключения, содержит 336 страниц текста, включая 8 таблиц, 94 рисунка и список литературы из 97 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определен объект исследования, сформулирована цель работы, задачи, которые необходимо решить исходя из цели работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

1. Основные принципы лазера на основе квантовых точек; самоорганизующиеся массивы квантовых точек

В первой главе рассмотрены фундаментальные принципы инжекционных лазеров на основе полупроводниковых гетероструктур и сформулированы основные требования к их рабочим характеристикам. Описана взаимосвязь пороговых характеристик и оптического усиления. Проведен анализ влияния квантово-размерных эффектов на вид энергетической зависимости плотности состояний в активной области лазера и на оптическое усиление. Рассмотрены теоретические преимущества лазера на основе идеального массива квантовых точек. Во второй главе проводится обзор современных методов формирования структур с пониженной размерностью (квантовых проволок и квантовых точек). Особое внимание уделено методам, основанным на использовании эффектов самоорганизации. Обсуждаются структурные и оптические свойства массивов самоорганизующихся

квантовых точек на примере наиболее исследованной системы материалов InGaAs/GaAs.

1.1. Влияние плотности состояний на оптическое усиление. Лазер на основе идеального массива квантовых точек

Одной из основных внутренних характеристик инжекционного лазера, во многом определяющей его пороговую плотность тока и внешнюю эффективность, является вид зависимости оптического усиления от плотности тока накачки. Параметры усиления (плотность тока прозрачности, дифференциальное усиление, насыщенное усиление) взаимосвязаны и не могут быть оптимизированы одновременно в рамках конкретной функции плотности состояний (ФПС) активной области лазера. Показано, что для одновременной оптимизации всех параметров усиления требуется такая модификация ФПС, при которой носители заряда преимущественно заполняют состояния, отвечающие энергии лазерного перехода, тогда как заполнение других энергетических состояний подавлено. ФПС может быть целенаправленно изменена с помощью понижения размерности активной области, т.е. последовательного перехода от объемного материала к квантовым ямам, массиву квантовых проволок и, в предельном случае, к массиву квантовых точек (КТ). В случае идеального массива КТ, под которым понимается ансамбль идентичных полупроводниковых островков, ФПС представляет собой набор дельта-функций, и носители заряда могут занимать лишь состояния, отвечающие уровням размерного квантования. В отличие от других типов активной области, характеристики усиления лазера на основе идеального массива КТ не зависят от температуры, а величина пороговой плотности тока может быть значительно снижена. Существует максимальное достижимое (насыщенное) усиление лазера на основе КТ, определяемое поверхностной плотностью массива КТ. Минимальный пороговый ток и максимальная дифференциальная эффективность достигаются при такой конструкции лазерного резонатора, которая обеспечивает потери на вывод излучения, близкие к величине насыщенного усиления. Увеличение насыщенного усиления позволяет одновременно снизить минимальный пороговый ток и увеличить максимальную дифференциальную эффективность.

1.2. Структурные и оптические свойства самоорганизующихся массивов квантовых точек

Способы формирования структур с пониженной размерностью (квантовые проволоки или квантовые точки) могут быть разделены на пост-ростовые методы (литографические, затворных потенциалов и др.) и методы, в которых образование массива КТ или квантовых проволок происходит непосредственно в процессе эпитаксиального выращивания гетероструктуры. Недостатки, внутренне присущие первой группе методов, связанные с ограничениями на минимальные размеры или с вносимыми

повреждениями, не позволяют сформировать массивы КТ, пригодные для лазерных применений. В то же время, использование эффектов самоорганизации при эпитаксиальном выращивании напряженных гетероструктур позволяет сформировать массив квантово-размерных островков, свободный от повреждений и дислокаций. Причиной их формирования является возможность снижения полной энергии системы за счет частичной упругой релаксации напряжения на вершинах трехмерных островков. Структурные свойства массива самоорганизующихся КТ определяются в основном внутренними энергетическими параметрами системы. Однако, существует множество варьируемых ростовых параметров, таких как температура подложки, скорость роста, давление мышьяка, прерывания роста, которые воздействуют на поверхностную энергию и скорость установления равновесия, обеспечивая методы преднамеренного контроля характеристик массива КТ. Показано, что массив самоорганизующихся КТ характеризуется разбросом размеров островков, входящих в его состав, что приводит к неоднородному уширению ФПС. Также в КТ большого размера может существовать один или несколько возбужденных уровней. Показано, что длина волны излучения самоорганизующихся КТ InAs в матрице GaAs в длинноволновом пределе ограничена значениями около 1,22–1,24 мкм при комнатной температуре. Управление длиной волны излучения обусловлено изменением среднего размера островков при изменении количества осажденного материала. В случае осаждения InAs на GaAs режим формирования упруго-напряженных КТ возможен в узком интервале толщин от 1,7 монослоев (МС) (начало формирования трехмерных островков) до ~4 МС (пластическая релаксация напряжения за счет формирования дислокаций).

2. Оптимизация режимов эпитаксиального роста и конструкции структур с массивами самоорганизующихся квантовых точек для лазерных применений

В настоящем разделе описаны примененные нами методы эпитаксиального выращивания и изготовления лазерных диодов, а также использованные методики исследования структурных и оптических свойств массивов самоорганизующихся КТ и приборных характеристик лазеров на их основе. Описана проведенная оптимизация режимов эпитаксиального выращивания, а также конструкции активной области лазеров на основе массивов КТ, позволившая достичь высокого структурного и оптического совершенства, добиться управляемого изменения длины волны излучения и подавления выброса носителей из квантовых точек в более высоко лежащие состояния, изменения поверхностной плотности массива КТ.

2.1. Экспериментальные методы получения и исследования инжекционных лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек

Выбранная эпитаксиальная технология – молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ) – позволяет надежно контролировать режимы осаждения структур, содержащих массивы самоорганизующихся КТ. Это достигается благодаря возможности управлять толщинами эпитаксиальных слоев на уровне монослоев, а также применением методов контроля непосредственно в процессе выращивания. Использование метода дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение от поверхности роста позволяет установить переход от двумерного (послойного) режима роста к островковому (трехмерному). Применение таких методов как рентгеновская дифракция, просвечивающая и сканирующая электронная микроскопия и фотолюминесценция дополняет данные, полученные с помощью ДБЭ, и позволяет провести комплексное исследование основных структурных и оптических свойств массивов самоорганизующихся КТ, предназначенных для лазерных применений, и установить их взаимосвязь с приборными характеристики лазеров. В качестве базовой конструкции лазерной структуры с квантовыми точками выбрана геометрия двойной гетероструктуры с отдельным ограничением световой волны и носителей заряда в системе материалов AlGaAs/GaAs. В работе применялись резонаторы трех типов: с четырьмя сколотыми гранями, позволяющие минимизировать потери на вывод излучения и достичь наименьшей пороговой плотности тока; типа мелкая меза с широким полоском для исследований пороговых, мощностных и других приборных характеристик инжекционных лазеров, в том числе работающих в непрерывном режиме; типа гребешковый волновод для исследований лазеров, работающих в пространственно-одномодовом режиме. Приборные характеристики лазеров на основе квантовых ям, излучающих в диапазоне 0,98 мкм, полученные с использованием имеющегося экспериментального оборудования, хорошо согласуются с опубликованными данными для аналогичных лазерных структур, что свидетельствует о высоком уровне технологии, достигнутом в исследовательской группе.

2.2. Оптимизация режимов выращивания массивов самоорганизующихся КТ для применений в инжекционных лазерах

Выбор оптимальной температуры осаждения активной области лазера на основе самоорганизующихся КТ In(Ga)As определяется, с одной стороны, улучшением оптического качества индий-содержащих соединений при использовании высоких температур роста вследствие подавления образования структурных дефектов и, с другой стороны, возможностью избежать переиспарения и сегрегации индия при низких температурах. Увеличение потока мышьяка приводит к формированию более плотного массива КТ, однако размер островков снижается. Оптимальная температура осаждения определена равной 485⁰С, а оптимальный диапазон значений потока мышьяка $(1,2-1,5) \times 10^{-5}$ Тор. Массивы КТ, сформированные в таких

условиях, обладают высокой поверхностной плотностью $(4-5) \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$, а средний размер островков достаточно велик, позволяя достичь длины волны 1,24 мкм в КТ структурах в матрице GaAs. Использование бинарного соединения (InAs) в качестве материала КТ, а также замена низкотемпературного слоя GaAs, прикрывающего КТ, на InGaAs с малым содержанием In позволяет подавить формирование центров безызлучательной рекомбинации, связанных с низкотемпературным ростом Ga-содержащих слоев. Использование толщины низкотемпературного слоя, прикрывающего массив КТ, равной 5 нм, позволяет предотвратить переиспарение индия и изменение формы и размеров КТ при последующем наращивании. При осаждении верхних эмиттерных слоев AlGaAs при 700°C применение высокой скорости роста ($\sim 0.5 \text{ нм/сек}$) позволяет минимизировать влияние высокотемпературного наращивания на положение линии излучения массива КТ. Использование нескольких рядов КТ позволяет увеличить полную поверхностную плотность массива КТ в активной области лазера. Существует максимальное число рядов КТ и минимальная толщина разделяющих (спейсерных) слоев, позволяющие избежать возникновения пластической релаксации напряжения. Определен возможный диапазон изменения этих параметров для массивов КТ, излучающих в различном спектральном диапазоне, с учетом снижения фактора оптического ограничения для боковых плоскостей КТ. Для КТ, излучающих в более длинноволновом диапазоне, может быть повторно выращено меньшее число рядов КТ вследствие большего количества напряженного материала, осажденного в каждом из рядов.

2.3. Управление длиной волны излучения и энергией локализации основного состояния массива самоорганизующихся квантовых точек

Одними из важнейших характеристик массива КТ, определяющими возможность его применения в инжекционных лазерах, являются длина волны излучения и энергия локализации основного состояния КТ по отношению к окружающей матрице. Длина волны излучения массива самоорганизующихся КТ может быть изменена в определенных пределах изменением количества осажденного материала. Однако, при этом происходит также изменение и структурных свойств – плотности массива КТ и их размеров. Представлен метод независимого управления длиной волны излучения массива КТ, не оказывающий влияния на основные структурные характеристики. Метод основан на чувствительности линии люминесценции КТ к ширине запрещенной зоны материала матрицы: линия люминесценции сдвигается в коротковолновую (длинноволновую) сторону при увеличении (соответственно, уменьшении) ширины запрещенной зоны. В качестве более широкозонного по отношению к GaAs материала матрицы использован $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 10-30\%$), а в качестве более узкозонного материала – напряженная квантовая яма $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 10-$

30%). Предложенный метод позволяет управляемо изменять длину волны излучения массива КТ в существенно большем диапазоне, чем с помощью изменения количества осажденного материала. Длина волны излучения, достижимая в структурах с КТ на подложках GaAs, перекрывает спектральный диапазон от $\sim 0,9$ до $1,3$ мкм, что позволяет применять массивы КТ в качестве активной области лазеров самого широкого спектра применений – от накачки твердотельных лазеров ($0,94$ мкм) и легированных Eg волоконных усилителей ($0,98$ мкм) до излучателей в волоконно-оптических линиях связи ($1,3$ мкм). Ширина запрещенной зоны материала матрицы оказывает также влияние на энергию локализации основного состояния КТ. В частности, энергия локализации может быть увеличена в случае использования в качестве материала матрицы AlGaAs вместо GaAs. Это позволяет подавить термическое заселение состояний матрицы при повышении температуры, что, как будет показано, является причиной резкого возрастания пороговой плотности тока при повышении температуры в лазерах на основе массивов самоорганизующихся КТ.

2.4. Оптимизация конструкции активной области на основе самоорганизующихся квантовых точек для лазерных применений

Возрастание пороговой плотности тока и коротковолновый сдвиг линии генерации при увеличении температуры, наблюдаемые в лазерах на основе одного ряда КТ, обусловлены малым оптическим усилением в сочетании с термическим выбросом носителей из КТ. Применение многослойных массивов КТ позволяет увеличить насыщенное усиление, достичь генерации через основное состояние КТ при комнатной температуре, существенно снизить пороговую плотность тока в лазерах полосковой конструкции (до 300 А/см² в лазере на основе 10 рядов КТ) и реализовать лазерную генерацию в непрерывном режиме. Использование матрицы Al_{0.15}Ga_{0.85}As позволяет подавить заселение более высоко лежащих состояний, сохранить высокий фактор оптического ограничения и снизить пороговую плотность тока (до 18 и 63 А/см² при 150 и 300 К, соответственно). Участок отрицательной характеристической температуры, обусловленный переходом от неравновесного к равновесному заполнению состояний КТ, становится более явно выраженным при увеличении энергии локализации основного состояния КТ (в лазерах, использующих матрицу AlGaAs). Внешняя дифференциальная эффективность возрастает при увеличении поверхностной плотности массива КТ и энергии локализации основного состояния, что обусловлено резким снижением внутренних потерь (до $1,5$ см⁻¹). Внутренние потери лазера на основе самоорганизующихся КТ в основном обусловлены свободными носителями в волноводном слое (матрице). Поверхностная плотность массива КТ может быть увеличена в несколько раз (до 2×10^{11} см⁻² на один ряд КТ) с помощью композитных КТ. Метод основан на использовании эффекта вертикального

совмещения КТ соседних рядов и применении плотного массива островков $\text{In}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ в качестве центров зародышеобразования при последующем осаждении рядов КТ $\text{In}(\text{Ga})\text{As}$. Энергия локализации носителей заряда в композитных КТ определяется шириной запрещенной зоны InGaAs -частей. Использование композитных КТ позволяет снизить относительный вклад смачивающего слоя в пороговую плотность тока, увеличить насыщенное усиление, расширить диапазон генерации через основное состояние КТ и снизить пороговую плотность тока в режиме больших потерь на вывод излучения.

3. Оптическое усиление и пороговые характеристики лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек

В разделе рассмотрены специфические особенности массивов КТ, полученных методом самоорганизации, и их влияние на приборные характеристики лазеров. Приведены результаты моделирования характеристик усиления лазеров с активной областью на основе массивов самоорганизующихся КТ, позволившие указать основные факторы, определяющие пороговую плотность тока и ее температурную стабильность в подобных лазерах – поверхностную плотность массива КТ, энергию локализации основного состояния и неоднородное уширение, обусловленное разбросом размеров КТ. Исследовано влияние этих параметров, а также возбужденных состояний на оптическое усиление. Достигнутое понимание особенностей лазеров на основе самоорганизующихся КТ позволило проводить целенаправленную модификацию активной области, режимов ее выращивания и конструкции, с целью оптимизации приборных характеристик.

3.1. Специфические особенности и взаимосвязь усиления с плотностью тока в лазере на основе самоорганизующихся квантовых точек

Специфические особенности массива КТ, сформированного с использованием методов самоорганизации, отличающие его от идеального случая, заключаются в наличии флуктуаций размеров островков и других параметров, влияющих на энергетическое положение уровня размерного квантования, а также в существовании набора более высоко лежащих состояний (возбужденных состояний КТ, состояний смачивающего слоя и матрицы). ФПС массива самоорганизующихся КТ управляется вероятностью распределения квантового уровня в ансамбле. Разброс размеров островков приводит к неоднородному уширению ФПС и частичному перекрытию подзон основного и возбужденных состояний КТ. Максимальное достижимое (насыщенное) усиление лазера на основе массива КТ пропорционально ФПС в максимуме (на энергии квантового уровня, отвечающего наиболее вероятному размеру КТ). Неоднородное уширение снижает величину насыщенного усиления. Термическое

заселение более высоко лежащих состояний дает дополнительный вклад в пороговую плотность тока. Возбужденные уровни КТ обладают большей степенью вырождения, что обуславливает возможность перехода от генерации через основное состояние КТ к генерации через возбужденное состояние КТ (перескока длины волны) при увеличении потерь. Насыщенное усиление может быть увеличено использованием нескольких плоскостей КТ и/или более плотных массивов островков. Однако, это приводит к возрастанию тока прозрачности. Существует оптимальная плотность массива КТ при данном неоднородном уширении, позволяющая достичь минимальной пороговой плотности тока для заданного уровня оптических потерь.

3.2. Аналитическое выражение для оптического усиления КТ лазеров с учетом факторов неидеальности. Переход к генерации через возбужденное состояние.

Представлена модель, позволяющая в аналитическом виде описать связь между оптическим усилением и плотностью тока с учетом факторов неидеальности самоорганизующегося массива КТ. Модель описывает случай, когда неоднородное уширение не превышает $4k_B T$, что типично для самоорганизующихся массивов КТ. В случае значительного энергетического удаления более высоко лежащих состояний, связь усиления и тока накачки имеет такой же математический вид, как и в случае идеального массива КТ. Она характеризуется линейной зависимостью вплоть до уровня насыщенного усиления, определяемого плотностью массива КТ и обратно пропорционального неоднородному уширению. Учет влияния состояний возбужденных уровней КТ, а также смачивающего слоя и матрицы приводит к появлению двух дополнительных членов в выражении для пороговой плотности тока, соответствующих вкладу этих состояний. Зависимость усиления от плотности тока остается приблизительно линейной в области малых усилений (однако дифференциальное усиление снижается) и становится сублинейной в области больших усилений. Если термическое заселение матрицы велико вследствие слабой локализации основного состояния КТ, величина пороговой плотности тока определяется в основном вкладом состояний смачивающего слоя и матрицы. При увеличении оптических потерь происходит скачкообразное смещение длины волны генерации в коротковолновую сторону – переход к генерации через 1-е возбужденное состояние. Этот переход происходит при уровне потерь несколько меньшем, чем насыщенное усиление основного состояния. На момент перехода пороговая плотность тока близка к току прозрачности возбужденного состояния. Модель находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, полученными для самоорганизующихся КТ In(Ga)As в матрице (Al)GaAs и InGaAs при соответствующем выборе

параметров усиления. Насыщенное усиление основного состояния типично лежит в диапазоне 3–4 см⁻¹ на один слой квантовых точек, имеющих поверхностную плотность около 5x10¹⁰ см⁻². Экспериментальное значение отношения насыщенного усиления на 1-м возбужденном состоянии к насыщенному усилению на основном состоянии КТ близко к 3–4.

3.3. Зависимость характеристик усиления и пороговой плотности тока от поверхностной плотности массива КТ

Современное состояние эпитаксиальной технологии получения массивов самоорганизующихся КТ не позволяет существенно (в разы) улучшить однородность массива КТ. В то же время, плотность массива КТ может быть увеличена с помощью, например, использования нескольких рядов КТ, повторно осажженных в вертикальном направлении. С использованием предложенной модели для характеристик усиления КТ лазера и выведенных их эксперимента значений параметров усиления, вычислена зависимость пороговой плотности тока от поверхностной плотности массива КТ для различных значений полных оптических потерь. Увеличение плотности массива КТ приводит к возрастанию как насыщенного усиления, так и тока прозрачности. Если необходимый уровень усиления слишком велик для данной плотности массива КТ и превышает насыщенное усиление, лазерная генерация на основном состоянии КТ не будет достигнута ни при каком токе, однако она возможна на возбужденном состоянии. Увеличение плотности массива КТ приводит на начальном участке к снижению пороговой плотности тока вследствие возрастания насыщенного усиления и затем к возрастанию пороговой плотности тока как результат увеличения тока прозрачности. Существует оптимальная плотность массива КТ, которая позволяет достичь наименьшей возможной пороговой плотности тока при заданном уровне потерь. Оптимальная плотность массива КТ и соответствующая ей минимальная пороговая плотность тока приблизительно линейно зависят от полных оптических потерь. Уровню потерь в лазере полосковой конструкции, необходимому для достижения высокой внешней дифференциальной эффективности (более 10 см⁻¹), отвечает оптимальная плотность КТ свыше 10¹¹ см⁻², что в несколько раз превосходит типичные значения на один ряд самоорганизующихся КТ (около 5x10¹⁰ см⁻²). Использование около пяти рядов самоорганизующихся КТ позволяет при таком уровне потерь достичь лазерной генерации на основном состоянии с пороговой плотностью тока около 100 А/см². Таким образом, массивы КТ потенциально позволяют сочетать как низкую пороговую плотность тока, так и высокую внешнюю дифференциальную эффективность, если поверхностная плотность массива КТ специальным образом оптимизирована.

3.4. Температурная зависимость усиления КТ лазера с неоднородно уширенной плотностью состояний

Неоднородное уширение плотности состояний самоорганизующегося массива КТ обуславливает зависимость пороговых характеристик от температуры даже в тех случаях, когда основное состояние КТ сильно локализовано по отношению к смачивающему слою и матрице. Предложена модель, которая позволяет в аналитическом виде описать температурную зависимость оптического усиления и пороговой плотности тока в лазерах на основе массивов квантовых точек с неоднородно уширенной плотностью состояний. Показано, что при достаточно высоких температурах эти зависимости носят универсальный характер, т.е. они определяются исключительно величиной уширения ФПС, а не ее специфической формой. Нижний температурный предел применимости представленного подхода определяется температурой $T_{cr} \approx \Delta / 2k_B$, где Δ – неоднородное уширение плотности состояний и, таким образом, лежит вблизи или ниже комнатной температуры в типичных случаях. Полученные выражения позволяют также оценить влияние неоднородного уширения на пороговые характеристики. Показано, что формирование более однородных массивов КТ, позволяет значительно снизить пороговую плотность тока.

4. Инжекционные лазеры на основе самоорганизующихся массивов квантовых точек

Первые инжекционные лазеры на основе самоорганизующихся квантовых точек обладали характеристиками, весьма далекими от поведения, предсказанного для идеального случая. Высокие пороговые плотности тока и низкие значения дифференциальной эффективности не позволяли говорить о каких-либо приборных применениях подобных структур и ставили, по существу, под сомнение саму концепцию формирования активной области лазера на основе эффектов самоорганизации. Соответственно, основные усилия на начальных этапах исследований структур с КТ были направлены на улучшение пороговых характеристик и оптического усиления, не уделяя значительного внимания многим другим важным аспектам, например, спектральным характеристикам. Проведенная нами оптимизация режимов выращивания и конструкции как активной области, так и лазера в целом, подкрепленные проведенными теоретическими изысканиями, позволила в значительной степени преодолеть основные негативные факторы: безызлучательную рекомбинацию в активной области и матрице, насыщение усиления и тепловое заполнение более высоко лежащих состояний. В отличие от методов оптимизации, описанных в разделе 2, которые применимы к лазерам на основе самоорганизующихся КТ безотносительно их

спектрального диапазона или режима выходной мощности, настоящий раздел посвящен разработке конструкции лазеров, имеющих определенную приборную направленность. В главе 4.1 описаны длинноволновые лазеры на КТ, предназначенные для применений в устройствах волоконно-оптической связи, а глава 4.3 посвящена мощным лазерам на основе КТ. Несколько особняком в этом отношении стоит глава 4.2, посвященная лазерам на основе квантовых точек на подложках InP. В этом случае достигнутые характеристики не позволяют пока делать выводы о возможном приборном применении. Однако, исследования подобных лазерных структур обобщают и дополняют результаты, полученные в КТ лазерах на подложках GaAs, что и позволило нам включить их в настоящий раздел.

4.1. Длинноволновые лазеры на основе квантовых точек на подложках GaAs

Глава посвящена исследованиям в области создания и оптимизации лазеров, излучающих в диапазоне длин волн 1,3 мкм, перспективных для применения в волоконно-оптических линиях связи. Применение специальных методов осаждения массивов самоорганизующихся КТ позволяет сформировать на подложках GaAs активную область лазера, излучающую на требуемой длине волны. Подобные лазеры не только позволяют расширить спектральный диапазон, достижимый в приборах на GaAs, но и добиться существенного улучшения приборных характеристик, благодаря особенностям нуль-мерной активной области в сочетании с сильной локализацией носителей заряда.

Помещение массива КТ InAs во внешнюю квантовую яму InGaAs позволяет в структурах на подложках GaAs достичь длины волны излучения 1,3 мкм, соответствующей оптическому диапазону волоконной связи средней дальности. Показано, что при осаждении In-содержащего слоя (InGaAs или InAlAs) над массивом КТ имеет место “стимулированный распад” твердого раствора: атомы In твердого раствора имеют тенденцию собираться в тех областях, где упругое напряжение несколько меньше, т.е. над островками InAs. Таким образом, содержание In в квантовой яме вблизи квантовых точек выше среднего значения в осаждаемом материале. Как следствие, эффективный размер островков становится больше по сравнению с тем, что наблюдается при наращивании слоем GaAs. Длинноволновый сдвиг линии излучения в подобных структурах обусловлен также уменьшением (по сравнению с GaAs) ширины запрещенной зоны матрицы. В отличие от альтернативного метода формирования длинноволновых КТ (атомно-слоевая эпитаксия), не происходит снижения плотности массива КТ. Положение линии люминесценции управляется мольной долей InAs в квантовой яме и ее шириной, а также размером исходных КТ. Минимизация полного

количества осажденного InAs до $\sim 4,9$ МС и использование спейсерных слоев толщиной около 30 нм позволяет избежать образования дислокаций и достичь высокой интенсивности излучения в многослойных (до 10 рядов КТ) структурах.

В лазерах на основе однослойных массивов подобных КТ при увеличении уровня потерь или температуры наблюдается последовательный переход к генерации через одно из четырех возбужденных состояний КТ. Использование двух и более слоев КТ позволяет в лазерах полосковой конструкции достичь лазерной генерации через основное состояние КТ на длине волны около 1,3 мкм при комнатной температуре с пороговой плотностью тока около 100 А/см^2 . Плотность тока прозрачности составляет около $6\text{--}8 \text{ А/см}^2$ на один ряд КТ. Это свидетельствует о пренебрежимом вкладе более высоко лежащих состояний и каналов безызлучательной рекомбинации в пороговую плотность тока подобных лазеров. Помещение массива КТ во внешнюю квантовую яму увеличивает внутреннюю дифференциальную эффективность до 95–100% (по сравнению с $\sim 70\%$ для КТ в матрице GaAs). Увеличение числа рядов КТ приводит к возрастанию насыщенного усиления (до $\sim 23 \text{ см}^{-1}$), снижению внутренних потерь (до $1,2 \text{ см}^{-1}$) и возрастанию характеристической температуры порогового тока ($\sim 150 \text{ К}$). Внешняя дифференциальная эффективность превышает 75% (максимально 88%) в результате совокупного эффекта снижения внутренних потерь, увеличения внутренней дифференциальной эффективности и возможности использовать высокие потери на вывод излучения. Достигнутые результаты являются рекордными для лазеров 1,3-мкм как на подложках InP, так и GaAs с любым типом активной области.

4.2. Лазеры на основе квантовых точек на подложках InP

В случае использования подложек GaAs, содержание In в матрице ограничено значениями $\sim 30\%$, что приводит к трудности продвижения в диапазон длин волн, превышающих 1,3 мкм. В то же время, увеличение диапазона излучения, достижимого в структурах с КТ, является актуальной задачей для применений в системах волоконной оптической связи и контроля загрязнения окружающей среды. Как будет показано, использование массивов квантовых островков InAs, помещенных в матрицу (In,Ga)As, выращенную на подложке InP (100), позволяет достичь длины волн излучения около 2 мкм. Нами впервые были выполнены работы в области создания методом МПЭ и исследования структурных и оптических свойств подобных массивов КТ, а также лазеров на их основе. Сравнение свойств формируемых в этой системе КТ и сопоставление характеристик инжекционных лазеров с более традиционной системой на подложках GaAs позволяет выявить общие закономерности, присущие самоорганизующимся структурам и лазерам на их основе.

Использование подложек InP позволяет увеличить мольную долю InAs в материале матрицы до 53% и достичь большей длины волны излучения по сравнению со структурами на GaAs. Формирование массива КТ InAs на поверхности слоя $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, согласованного по параметру решетки с InP, наблюдается по достижении критической толщины около 3,3 МС. Свыше 9 МС InAs происходит пластическая релаксация напряжения. Средний диаметр основания КТ (около 50 нм) и поверхностная плотность массива КТ (около $1 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$) примерно в пять раз больше (соответственно, меньше) значений для массивов КТ в системе материалов (In,Ga)As/GaAs, характеризующейся таким же рассогласованием постоянных решеток. Длина волны излучения зависит от количества осажденного InAs, определяющего размер островков, и достигает 1,95 мкм при 77 К. В структуре, содержащей три ряда КТ, достигнута лазерная генерация на длине волны 1,894 мкм с пороговой плотностью тока $11,4 \text{ А/см}^2$ (77 К). Насколько нам известно, этот является наибольшей длиной волны в лазерах на основе самоорганизующихся КТ In(Ga)As. При увеличении оптических потерь наблюдается последовательный переход к генерации через возбужденное состояние КТ и состояния смачивающего слоя. Зависимость усиления от тока на этих участках может быть хорошо описана в рамках рассмотренной модели. Отношение значений насыщенного усиления на возбужденном и основном состояниях КТ близко к 4, в согласии с типичными значениями для лазеров на основе КТ в матрице GaAs. Увеличение температуры приводит к резкому возрастанию пороговой плотности тока ($T_0 \sim 25 \text{ К}$) и снижению внутренней дифференциальной эффективности. Таким образом, исследования КТ в этой системе материалов подтверждают выводы, сделанные при исследовании лазеров на подложках GaAs: увеличение длины волны излучения КТ при уменьшении ширины запрещенной зоны матрицы; возможность достижения низких значений пороговой плотности тока при генерации через основное состояние КТ; переход к генерации через возбужденное состояние КТ при возрастании потерь; сильная температурная чувствительность характеристик в случае малой энергии локализации КТ по отношению к матрице (в данном случае около 150 мэВ).

4.3. Мощные лазеры на основе самоорганизующихся квантовых точек

Представлены результаты исследований в области создания инжекционных лазеров на квантовых точках, способных излучать высокую оптическую мощность в непрерывном режиме. Мощные лазерные диоды представляют собой особый класс полупроводниковых лазеров, и их специфика диктует особые методы оптимизации конструкции, несколько отличающиеся от случаев, например, относительно маломощных лазеров для волоконно-оптической связи. В частности, особое внимание должно быть уделено механизмам ограничения выходной мощности и коэффициента полезного

действия. Основное внимание уделено характеристикам и оптимизации лазеров диапазонов длин волн 1,3 мкм, а также 0,94 мкм. Для создания мощных лазеров диапазона 0,94 мкм был разработан специальный метод формирования активной области с использованием массивов субмонослойных квантовых точек, отличающихся высокой плотностью и однородностью.

Показано, что использование многослойных массивов КТ позволяет преодолеть ограничение выходной мощности, обусловленное конечным временем заполнения состояний КТ в процессе лазерной генерации. Применение эмиттерных слоев $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и волноводного слоя $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ позволяет увеличить порог разрушения зеркал, улучшить диаграмму направленности лазерного излучения и снизить последовательное сопротивление диода, однако уменьшение фактора оптического ограничения должно быть компенсировано применением массивов КТ высокой плотности. Развита модель, позволяющая оптимизировать конструкцию резонатора лазера на основе КТ для достижения максимального КПД при заданном уровне выходной мощности и связать эти характеристики с параметрами активной области. Максимальный КПД слабо зависит от величины плотности тока прозрачности и резко уменьшается, когда дифференциальное усиление становится меньше чем $\beta \sim 0.05\text{--}0.06 \text{ см/А}$.

Низкие пороговая плотность тока и внутренние потери в лазерах на основе КТ InAs в матрице InGaAs позволили впервые реализовать лазерную генерацию в непрерывном режиме в КТ лазерах на подложках GaAs, работающих в диапазоне длин волн 1,3 мкм. Максимальная мощность излучения составила 2,7 Вт в лазерах геометрии широкого полосока и 335 мВт (110 мВт в одномодовом режиме) в лазерах гребешковой конструкции, что является наибольшими значениями для длинноволновых лазерах на основе КТ. Лазеры этого спектрального диапазона с активной областью на основе КТ в квантовой яме демонстрируют существенно более высокую выходную мощность по сравнению с лазерами, активная область которых сформирована методом АСЭ, вследствие более высокого насыщенного усиления, обусловленного большей плотностью массива КТ. Мощность, излучаемая одиночной КТ, оценена равной 50–60 нВт, что в несколько раз превышает соответствующее значение для КТ в матрице GaAs. Это обусловлено уменьшением времени захвата носителей на состояния КТ (до 2,5 пс) при помещении массива КТ во внешнюю квантовую яму.

В то же время, лазеры на основе самоорганизующихся КТ In(Ga)As, сформированных по механизму Странски-Крастанова (СК), плохо пригодны для применений в устройствах накачки (длина волны около 1 мкм) вследствие низкого дифференциального усиления, что обусловлено

малой энергией локализации и большим неоднородным уширением подобных КТ. На основе концепции субмонослойного (СМЛ) осаждения напряженных слоев, разработан метод, позволяющий формировать массивы КТ высокой плотности ($\sim 5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$). Длина волны управляется количеством циклов осаждения субмонослойных рядов InAs и GaAs, толщиной прослоек GaAs, а также соотношением циклов InAs/GaAs, влияющими на высоту трехмерных островков и их эффективную ширину запрещенной зоны. СМЛ КТ характеризуются примерно в 3,5 раза меньшим неоднородным уширением вследствие одинаковой высоты (1 МС) всех InAs островков, формирующих трехмерный кластер. Высокая плотность и хорошая однородность массивов СМЛ КТ приводят к высоким значениям насыщенного усиления (22 см^{-1} на один ряд) и дифференциального усиления ($0,06 \text{ см/Å}$). Это позволяет в коротковолновых ($\sim 0,94 \text{ мкм}$) лазерах на основе СМЛ КТ по сравнению с лазерами на основе СК КТ того же спектрального диапазона: достичь высокой стабильности длины волны излучения и низкой пороговой плотности тока в режиме высоких оптических потерь; снизить внутренние потери и повысить внешнюю дифференциальную эффективность (до 89%); преодолеть ограничение выходной мощности, обусловленное разогревом активной области; использовать сильно-легированные эмиттерные слои для снижения последовательного сопротивления (до $6,7 \times 10^{-5} \text{ Ом см}^2$); использовать широкий профиль оптической моды для повышения порога разрушения зеркал. Максимальная выходная мощность СМЛ КТ лазера в непрерывном режиме составляет 6 Вт, максимальный КПД – 59%. Эти значения, насколько нам известно, являются лучшими для любого типа лазеров на основе самоорганизующихся КТ. В диапазоне $10\text{--}60^\circ\text{C}$ температурная зависимость порогового тока описывается значением характеристической температуры $T_0 = 150 \text{ К}$. Это величина является наибольшей для КТ лазеров, имеющих КПД выше 50%.

Заключение

В ходе работы нами были созданы и исследованы инжекционные лазеры на основе самоорганизующихся квантовых точек в различных системах материалов. В лазерах на подложках GaAs, излучающих на длине волны около 1 мкм, активная область представляла собой массив квантовых точек In(Ga)As, сформированный по механизму Странски-Крастанова либо субмонослойным осаждением. В лазерах на подложках GaAs, излучающих вблизи 1,3 мкм, квантовые точки InAs были помещены во внешнюю квантовую яму InGaAs/GaAs. Также нами были исследованы лазеры на основе КТ в матрице InGaAs/InP. При всем многообразии исследованных лазеров, прослеживаются общие закономерности, которые, как нам представляется, присущи всем лазерам на основе самоорганизующихся

квантовых точек. Полученные экспериментальные данные были обобщены с помощью предложенной модели, позволяющей количественно описать зависимость оптического усиления от тока накачки для инжекционного лазера с активной областью на основе КТ. Модель учитывает влияние неоднородного уширения, а также тепловое заселение более высоко лежащих состояний. Модель позволяет оценить влияние характеристик усиления КТ лазера на пороговые характеристики. С использованием модели, в частности, была изучена зависимость пороговых характеристик лазера и КПД от параметров массива самоорганизующихся квантовых точек и полных оптических потерь. Основные выводы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Неоднородное уширение плотности состояний массива самоорганизующихся КТ, обусловленное разбросом размеров и других факторов, влияющих на положение уровня размерного квантования КТ, в сочетании с относительно невысокой поверхностной плотностью массива КТ, составляющей около $5 \times 10^{10} \text{ см}^{-2}$ на один слой КТ, приводят к невысоким значениям максимально достижимого (насыщенного) оптического усиления около $3\text{--}4 \text{ см}^{-1}$ на основном состоянии КТ при типичном дизайне лазерного волновода.
2. Существование максимального (насыщенного) оптического усиления, достигаемого на основном состоянии КТ, приводит при увеличении в лазерной структуре потерь на вывод излучения к резкому возрастанию пороговой плотности тока и далее к переходу к генерации через возбужденное состояние КТ, сопровождающемуся коротковолновым перескоком длины волны генерации. Первое возбужденное состояние характеризуется в 3–4 раза более высоким насыщенным усилением вследствие вырождения возбужденного уровня.
3. Тепловое заселение возбужденных состояний самих КТ, смачивающего слоя и матрицы приводит к возрастанию пороговой плотности тока, увеличению внутренних потерь и снижению внутренней дифференциальной эффективности, а также является причиной сильной зависимости приборных характеристик от температуры в области высоких температур. В случае низких температур или сильной локализации КТ, зависимость пороговой плотности тока от температуры обусловлена неоднородным уширением плотности состояний КТ.
4. В случае использования таких конструкций лазерного резонатора, которые обеспечивают малые потери на вывод излучения, пороговая плотность тока в большей степени определяется током прозрачности активной области на основе массива КТ. В таком режиме, пороговая плотность тока может быть снижена с помощью использования массивов КТ с малой поверхностной плотностью. Однако, для увеличения внешней дифференциальной эффективности и коэффициента полезного действия,

а также увеличения максимальной выходной мощности лазеров на основе квантовых точек требуется применение лазерных резонаторов с большими потерями на вывод излучения. В этом случае требуется применение плотных массивов КТ, обеспечивающих достижение высокого насыщенного усиления.

5. В диапазоне полных оптических потерь, при котором лазерная генерация происходит через основное состояние КТ, пороговая плотность тока уменьшается, а коэффициент полезного действия увеличивается при увеличении дифференциального усиления. Дифференциальное усиление слабо зависит от поверхностной плотности массива квантовых точек, но увеличивается при улучшении однородности массива КТ, а также при подавлении рекомбинации через более высоко лежащие состояния.
6. Относительный вклад заселения более высоко лежащих состояний определяется не только энергией локализации основного состояния квантовых точек, но и в существенной степени соотношением между насыщенным усилением и полными оптическими потерями. Таким образом, нежелательные эффекты, обусловленные заселением более высоко лежащих состояний, могут быть подавлены увеличением энергии локализации основного состояния квантовых точек и увеличением насыщенного усиления.
7. Когда полное количество КТ, участвующих в лазерной генерации, мало, максимальная выходная мощность лазера на основе КТ может быть ограничена темпом захвата носителей на основное состояние КТ. В КТ лазерах с узким полоском это приводит к уширению линии лазерной генерации.

Новые экспериментальные методы и явления

Достигнутое понимание взаимосвязи электронных и структурных свойств массивов самоорганизующихся квантовых точек с характеристиками КТ лазеров позволило предложить новые экспериментальные методы оптимизации режимов выращивания и конструкции активной области для целенаправленного изменения внутренних параметров массивов самоорганизующихся квантовых точек (таких, как их поверхностная плотность, энергия локализации основного состояния, неоднородное уширение) с целью улучшения приборных характеристик, и обнаружить новые явления.

1. Продемонстрировано, что изменение ширины запрещенной зоны матрицы, окружающей массив квантовых точек, позволяет управлять длиной волны излучения из квантовых точек. Тепловой выброс носителей из квантовых точек может быть подавлен с помощью использования более широкозонного материала матрицы, например, AlGaAs вместо GaAs.

2. Показано, что значение насыщенного усиления лазера на основе КТ может быть увеличено с помощью повторения в активной области нескольких рядов КТ, разделенных тонкими прослойками (спейсерами) материала матрицы. Максимальное количество рядов КТ ограничено снижением фактора оптического ограничения для боковых плоскостей, а также релаксацией напряжения. Последний эффект наиболее сильно проявляется в структурах с длинноволновыми КТ.
3. Квантовые точки, формирующиеся при осаждении $\text{In}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$ ($x \sim 0,5$) в матрице AlGaAs , характеризуются примерно в четыре раза большей поверхностной плотностью ($\sim 2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$) по сравнению с КТ In(Ga)As . Предосаждение слоя InAlAs КТ приводит к тому, что квантовые точки In(Ga)As в последующих слоях формируются непосредственно над местоположением квантовых точек InAlAs . Подобные массивы композитных КТ характеризуются высокой поверхностной плотностью, задаваемой свойствами массива InAlAs КТ, и большой энергией локализации, определяемой свойствами In(Ga)As составляющей композитных КТ.
4. Спектральный диапазон излучения из квантовых точек, осаждаемых на подложках GaAs , может быть расширен вплоть до 1,3 мкм с помощью помещения массива квантовых точек InAs во внешнюю квантовую яму InGaAs . Длинноволновый сдвиг излучения совместно обусловлен уменьшением ширины запрещенной зоны матрицы и активированным распадом напряженного твердого раствора, приводящим к увеличению эффективного размера квантовых точек. При использовании предложенного метода длинноволновый сдвиг излучения из квантовых точек не сопровождается уменьшением поверхностной плотности массива, т.е. не происходит снижения насыщенного усиления.
5. Длина волны излучения массивов квантовых точек, зарощенных квантовой ямой (КТКЯ), управляется как размером исходного массива квантовых точек, так и параметрами внешней квантовой ямы, влияющими на положение уровня размерного квантования – содержанием индия (шириной запрещенной зоны) и толщиной квантовой ямы. Оптимальным является такой набор, при котором полное содержание индия в КТКЯ структуре минимально (около 4,5 монослоев).
6. Осаждение напряженного слоя InAs на поверхности InGaAs или InAlAs , согласованных по параметру решетки с подложкой InP , приводит к формированию массива квантовых точек. Наибольшая длина волны излучения, достижимая с помощью КТ InAs в матрице InGaAs/InP , составляет около 1,9 мкм (77 К).
7. Многократное осаждение слоев InAs с эффективной толщиной менее одного монослоя, чередующихся тонкими слоями GaAs , приводит к образованию плотных однородных массивов квантовых точек,

формирующихся не по механизму Странски-Крастанова (субмонослойные квантовые точки), пригодных для применений в мощных лазерах диапазона длин волн около 1 мкм.

Основные результаты оптимизации приборных характеристик лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек

Усовершенствование конструкции лазера, а также самой активной области и режимов ее выращивания позволили достичь следующих основных результатов оптимизации приборных характеристик инжекционных лазеров на основе самоорганизующихся квантовых точек.

1. Предложена и разработана технология формирования массивов квантовых точек, обеспечивающих высокое значение насыщенного оптического усиления на основном состоянии. В лазерах на основе многослойных квантовых точек и субмонослойных квантовых точек измерено насыщенное усиление около 23 см^{-1} .
2. На основе разработанной технологии многослойных квантовых точек впервые созданы низкопороговые лазеры на основе квантовых точек ($J_{\text{th}} \leq 100 \text{ А/см}^2$), работающие в непрерывном режиме при комнатной температуре.
3. Впервые на подложках GaAs созданы инжекционные лазеры с активной областью на основе массива квантовых точек, работающие в спектральном диапазоне 1,3 мкм, по своим характеристикам превосходящие существующие лазеры этого спектрального диапазона на основе InP: максимальная внешняя дифференциальная эффективность составила 88%, пороговая плотность тока около 100 А/см^2 , характеристическая температура порогового тока около 150 К. Максимальное значение выходной мощности в пространственно-одномодовом режиме составило 110 мВт. В многомодовых лазерах в конструкции широкого полоска максимальная мощность составила 2,7 Вт.
4. На основе разработанной технологии лазеров с активной областью, содержащей массив квантовых точек InAs в матрице InGaAs, согласованной по параметру решетки с подложкой InP, впервые созданы инжекционные лазеры на основе квантовых точек, излучающие в спектральном диапазоне 1,9 мкм (при 77 К).
5. В лазерах на основе субмонослойных квантовых точек диапазона 0,94 мкм достигнуты приборные характеристики, рекордные для лазеров на основе квантовых точек какого-либо типа: максимальная внешняя дифференциальная эффективность составляет 89%, максимальный КПД – 59%, максимальная выходная мощность в непрерывном режиме – 6 Вт (в лазере полосковой конструкции шириной 100 мкм).

Таким образом, в ходе работы проведено комплексное исследование приборных характеристик лазеров на основе квантовых точек, вскрыта их взаимосвязь с электронными и структурными параметрами массива

квантовых точек, созданы научные основы и разработана воспроизводимая технология создания низкопороговых высокоэффективных инжекционных лазеров с активной областью на основе квантовых точек, пригодных для применения в системах оптической накачки и волоконной связи.

Список публикаций, включенных в диссертацию

1. А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков, П. С. Копьев и др., "Влияние условий осаждения на процесс формирования квантовых кластеров (In,Ga)As в матрице GaAs", *ФТП* **28**(8), 1439-1444 (1994).
2. Н. Н. Леденцов, В. М. Устинов, А. Ю. Егоров и др., "Оптические свойства гетероструктур с квантовыми кластерами InGaAs-GaAs", *ФТП* **28**(8), 1483-1487 (1994).
3. А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков, П. С. Копьев и др., "Выращивание квантово-размерных гетероструктур (In,Ga)As/GaAs методом осаждения "субмонослойных" напряженных слоев InAs", *ФТП* **28**(4), 604-610 (1994).
4. N. N. Ledentsov, P. D. Wang, C. M. Sotomayor-Torres *et al.*, "Optical spectroscopic studies of InAs layer transformation on GaAs surfaces", *Phys. Rev. B* **50**(16), 12171-12174 (1994).
5. M. Grundmann, J. Christen, N. N. Ledentsov *et al.*, "Ultrannarrow luminescence lines from single quantum dots", *Phys. Rev. Lett.* **74**(20), 4043-4046 (1995).
6. M. Grundmann, N. N. Ledentsov, R. Heitz *et al.*, "InAs/GaAs quantum dots radiative recombinations from zero-dimensional states", *Phys. Stat. Solidi. (b)* **188**, 249-258 (1995).
7. Ж. И. Алферов, Д. Бимберг, А. Ю. Егоров и др., "Напряженные субмонослойные гетероструктуры и гетероструктуры с квантовыми точками", *Успехи физических наук* **165**(2), 224-225 (1995).
8. S. V. Zaitsev, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov *et al.*, "Peculiarities of recombination processes in injection lasers based on (In,Ga)As quantum dots leading to the single mode operation at room temperature", *Proc. SPIE* **2648-45**, 287-293 (1995).
9. V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov *et al.*, "Formation of stacked self-assembled InAs quantum dots in GaAs matrix for laser applications", *MRS Symp. Proc.* **417**, 141-146 (1996).
10. N. N. Ledentsov, M. Grundmann, N. Kirstaedter *et al.*, "Ordered arrays of quantum dots: Formation, electronic spectra, and relaxation phenomena", *Solid State Electron.* **40**, 785-798 (1996).
11. S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, M. P. Soshnikov *et al.*, "Room temperature quantum dots injection lasers: electroluminescent characteristics", *Proc. SPIE* **2693-80**, 80-85 (1996).
12. R. Heitz, M. Grundmann, N. N. Ledentsov *et al.*, "Multiphonon-relaxation processes in self-organized InAs/GaAs quantum dots", *Appl. Phys. Lett.* **68**(3), 361-363 (1996).
13. S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, V. M. Ustinov *et al.*, "Room temperature quantum dot lasers: From basic experiments to first device oriented structures", *Proc. IEEE LEOS* **1**, 320-321 (1996).
14. O. G. Schmidt, N. Kirstaedter, M.-H. Mao *et al.*, "Overcoming gain saturation in InAs/GaAs quantum dot lasers", *Proc. IEEE LEOS* **1**, 324-325 (1996).

15. R. Heitz, M. Grundmann, N. N. Ledentsov *et al.*, "Exciton relaxation in self-organized InAs/GaAs quantum dots", *Surf. Sci.* **361/362**, 770-773 (1996).
16. D. Bimberg, N. N. Ledentsov, N. Kirstaedter *et al.*, "InAs-GaAs quantum dot lasers: in situ growth, radiative lifetimes and polarization properties", *Jpn. J. Appl. Phys.* **35(2B)**, Part 1, 1311-1319 (1996).
17. Ж. И. Алферов, Н. А. Берг, А. Ю. Егоров и др., "Инжекционный гетеролазер на основе массивов вертикально совмещенных квантовых точек InAs в матрице GaAs", *ФТП* **30(2)**, 351-356 (1996).
18. D. Bimberg, N. N. Ledentsov, M. Grundmann *et al.*, "InAs-GaAs quantum dots: From growth to lasers", *Phys. Stat. Sol. (b)* **194**, 159-173 (1996).
19. N. N. Ledentsov, J. Bohrer, D. Bimberg *et al.*, "3D arrays of quantum dots for laser applications", *MRS symp. proc.* **421**, 133-136 (1996).
20. P. D. Wang, N. N. Ledentsov, C. M. Sotomayor-Torres *et al.*, "Resonant exciton effects in InAs monolayer insertions in a GaAs matrix", *J. Appl. Phys.* **79(9)**, 7164-7168 (1996).
21. P. S. Kop'ev, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov *et al.*, "Self-organized InAs-GaAs quantum dots injection laser structures", *Tech. Dig. Series* **10**, 383-384 (1996).
22. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. Yu. Egorov *et al.*, "MBE growth of (In,Ga)As self-assembled quantum dots for optoelectronic applications", in *"Deviced Based on Low-Dimensional Semiconductor Structures"*, Kluwer Academic Publishers, ed. by M. Balkanski, NATO ASI Series 3: High Technology - Vol. 14, pp.91-94 (1996).
23. А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков, П. С. Копьев и др., "Оптический диапазон излучения структур с напряженными квантовыми точками InAs в GaAs", *ФТП* **30(8)**, 1345-1352 (1996).
24. V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov, A. R. Kovsh *et al.*, "Low-threshold injection lasers based on vertically coupled quantum dots", *J. Cryst. Growth* **175/176**, 689-695 (1997).
25. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. Yu. Egorov *et al.*, "Extremely low threshold AlGaAs/InGaAs quantum dot injection laser", *Inst. Phys. Conf. Ser.* No 155(7), 557-560 (1997).
26. N. Kirstaedter, O. G. Schmidt, N. N. Ledentsov *et al.*, "Gain and differential gain of single layer InAs/GaAs quantum dot injection lasers", *Appl. Phys. Lett.* **69(9)**, 1226-1228 (1996).
27. А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков, П. С. Копьев и др., "Формирование вертикально совмещенных массивов напряженных квантовых точек InAs в матрице GaAs(100)", *ФТП* **30(9)**, 1682-1690 (1996).
28. А. Ф. Цацульников, Н. Н. Леденцов, М. В. Максимов и др., "Фотолюминесценция массивов вертикально связанных напряженных квантовых точек InAs в матрице GaAs(100)", *ФТП* **30(10)**, 1822-1830 (1996).
29. А. Ф. Цацульников, Н. Н. Леденцов, М. В. Максимов и др., "Идентификация каналов излучательной рекомбинации в структурах с квантовыми точками", *ФТП* **30(10)**, 1793-1804 (1996).
30. A. O. Kosogov, P. Werner, U. Gosele *et al.*, "Structural and optical properties of InAs-GaAs quantum dots subjected to high temperature annealing", *Appl. Phys. Lett.* **69(20)**, 3072-3074 (1996).
31. N. N. Ledentsov, V. A. Schukin, M. Grundmann *et al.*, "Direct formation of vertically coupled quantum dots by Stranski-Krastanov growth", *Phys. Rev. B* **54(12)**, 8743-8750 (1996).

32. O. G. Schmidt, N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov *et al.*, "Prevention of gain saturation by multi-layer quantum dot lasers", *Electron. Lett.* **32**(14), 1302-1304 (1996).
33. М. В. Максимов, Ю. М. Шерняков, С. В. Зайцев и др., "Оптические свойства вертикально связанных квантовых точек InGaAs в матрице GaAs", *ФТП* **31**(6), 670-673 (1997).
34. S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, Yu. M. Sherniakov *et al.*, "Radiation characteristics of injection lasers based on vertically coupled quantum dots", *Superlat. Microstruct.* **21**(4), 559-564 (1997).
35. A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov *et al.*, "Negative characteristic temperature of InGaAs quantum dot injection laser", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**(6B), Part 1, 4216-4218 (1997).
36. S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, V. I. Kopchatov *et al.*, "Vertically coupled quantum dot lasers: first device oriented structures with high internal quantum efficiency", *Jpn. J. Appl. Phys.* **36**(6B), Part 1, 4219-4220 (1997).
37. С. В. Зайцев, Н. Ю. Гордеев, В. М. Устинов и др., "Исследование свойств низкопороговых гетеролазеров с массивами квантовых точек", *ФТП* **31**(5), 539-544 (1997).
38. А. Е. Жуков, А. Ю. Егоров, А. Р. Ковш и др., "Термическая стабильность массивов вертикально совмещенных квантовых точек InAs-GaAs", *ФТП* **31**(1), 105-109 (1997).
39. А. Ф. Цацульников, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков и др., "Модуляция потенциала квантовой ямы с помощью массива квантовых точек", *ФТП* **31**(1), 110-114 (1997).
40. А. Е. Жуков, А. Ю. Егоров, А. Р. Ковш и др., "Инжекционный лазер на основе массива вертикально совмещенных квантовых точек InGaAs в матрице AlGaAs", *ФТП* **31**(4), 483-487 (1997).
41. Ю. М. Шерняков, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков и др., "Инжекционный гетеролазер с квантовыми точками, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре с выходной мощностью 1 Вт", *Письма в ЖТФ*, **23**(4), 51-54 (1997).
42. М. М. Соболев, А. Р. Ковш, В. М. Устинов и др., "Нестационарная спектроскопия глубоких уровней InAs/GaAs лазерных структур с вертикально-связанными квантовыми точками", *ФТП* **31**(10), 1249-1255 (1997).
43. N. N. Ledentsov, D. Bimberg, Yu. M. Shernyakov *et al.*, "Properties of strained (In,Ga,Al)As lasers with laterally modulated active region", *Appl. Phys. Lett.* **70**(21), 2888-2890 (1997).
44. J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov *et al.*, "Vertical cavity lasers based on vertically coupled quantum dots", *Electron. Lett.* **33**(13), 1150-1151 (1997).
45. С. В. Зайцев, Н. Ю. Гордеев, В. И. Копчатов и др., "Лазеры на квантовых точках: основные компоненты пороговой плотности тока", *ФТП* **31**(9), 1106-1108 (1997).
46. В. М. Устинов, А. Е. Жуков, А. Ф. Цацульников и др., "Массивы напряженных квантовых точек InAs в матрице (In,Ga)As, выращенные на подложках InP методом молекулярно-пучковой эпитаксии", *ФТП* **31**(10), 1256-1260 (1997).
47. А. Ф. Цацульников, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков и др., "Латеральное объединение вертикально связанных квантовых точек", *ФТП* **31**(7), 851-854 (1997).

48. А. Ф. Цацульников, Б. В. Воловик, Н. Н. Леденцов и др., “Формирование квантовых точек InAs в матрице GaAs при росте на разориентированных подложках”, *ФТП* **32**(1), 95-100 (1998).
49. А. Е. Zhukov, V. M. Ustinov, and Zh. I. Alferov, “Device characteristics of low-threshold quantum-dot lasers”, *Int. J. High Speed Electron. Syst.* **9**(4), 1109-1138 (1998).
50. А. Е. Zhukov, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov *et al.*, “Injection lasers based on InGaAs quantum dots in an AlGaAs matrix”, *J. Electron. Mat.* **27**(3), 106-109 (1998).
51. V. M. Ustinov, E. R. Weber, S. Ruvimov *et al.*, “Effect of matrix on InAs self-organized quantum dots on InP substrate”, *Appl. Phys. Lett.* **72**(3), 362-364 (1998).
52. А. Е. Zhukov, V. M. Ustinov, A. Yu. Egorov *et al.*, “Injection lasers based on vertically coupled quantum dots”, in *Advanced Electronic Technologies and Systems Based on Low-Dimensional Quantum Devices*, Kluwer Academic Publishers, ed. by M. Balkanski and N. Andreev, NATO ASI Series 3: High Technology - Vol. 42, pp. 93-95 (1998).
53. А. R. Kovsh, А. Е. Zhukov, M. A. Odnoblyudov *et al.*, “Quantum dot laser with high temperature stability of threshold current density”, in *Advanced Electronic Technologies and Systems Based on Low-Dimensional Quantum Devices*, Kluwer Academic Publishers, ed. by M. Balkanski and N. Andreev, NATO ASI Series 3: High Technology - Vol. 42, pp. 207-208 (1998).
54. В. М. Устинов, А. Р. Ковш, А. Е. Жуков и др., “Низкопороговый инжекционный гетеролазер на основе квантовых точек с длиной волны генерации 1,84 мкм”, *Письма в ЖТФ* **24**(1), 49-54 (1998).
55. А. F. Tsatsul'nikov, A. Yu. Egorov, P. S. Kop'ev *et al.*, “Optical properties of InAlAs quantum dots in an AlGaAs matrix”, *Appl. Surf. Sci.* **123/124**, 381-384 (1998).
56. Ю. М. Шерняков, А. Ю. Егоров, Б. В. Воловик и др., “Рабочие характеристики и их анизотропия в мощном лазере (1,5 Вт, 300 К) с активной областью на основе квантовых точек”, *Письма в ЖТФ* **24**(9), 50-55 (1998).
57. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. Yu. Egorov *et al.*, “Low threshold quantum dot injection laser emitting at 1.9 μm ”, *Electron. Lett.* **34**(7), 670-672 (1998).
58. А. Е. Жуков, А. Ю. Егоров, А. Р. Ковш и др., “Исследование приборных характеристик низкопорогового лазера на квантовых точках, излучающего на 1,9 мкм”, *ФТП* **32**(7), 892-895 (1998).
59. M. V. Maximov, Yu. M. Shernyakov, A. F. Tsatsul'nikov *et al.*, “High-power continuous-wave operation of a InGaAs/AlGaAs quantum dot laser”, *J. Appl. Phys.* **83**(10), 5561-5563 (1998).
60. А. Р. Ковш, А. Е. Жуков, А. Ю. Егоров и др., “Влияние поверхностной концентрации квантовых точек в активной области на характеристики инжекционных лазеров”, *ФТП* **32**(9), 1114-1118 (1998).
61. А. F. Tsatsul'nikov, M. V. Belousov, N. A. Bert *et al.*, “Lateral association of vertically-coupled quantum dots”, *Microelectronic Engineering* **43-44**, 37-43 (1998).
62. А. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik, N. N. Ledentsov *et al.*, “Lasing in structures with InAs quantum dots in an (Al,Ga)As matrix grown by submonolayer deposition”, *J. Electron. Mat.* **28**(5), 537-541 (1999).
63. M. M. Sobolev, A. R. Kovsh, V. M. Ustinov *et al.*, “Metastable population of self-organized InAs/GaAs quantum dots”, *J. Electron. Mat.* **28**(5), 491-495 (1999).

64. A. R. Kovsh, A. E. Zhukov, A. Yu. Egorov *et al.*, "Molecular beam epitaxy (MBE) growth of composite (In,Al)As/(In,Ga)As vertically coupled quantum dots and their application in injection lasers", *J. Cryst. Growth* **201-202**(1), 1117-1120 (1999).
65. А. Е. Жуков, А. Р. Ковш, В. М. Устинов и др., "Характеристики усиления инжекционных лазеров на квантовых точках", *ФТП* **33**(9), 1111-1114 (1999).
66. S. V. Zaitsev, N. Yu. Gordeev, V. I. Kopchatov *et al.*, "Multi-stacked InAs/InGaAs/InP quantum dot laser ($J_{th}=11 \text{ A/cm}^2$, $\lambda=1.9 \mu\text{m}$ (77 K))", *Jpn. J. Appl. Phys.* **38**(1B), Part 1, 601-604 (1999).
67. А. Р. Ковш, А. Е. Жуков, А. Ю. Егоров, и др., "Особенности усиления в инжекционных лазерах на основе самоорганизующихся квантовых точек", *ФТП* **33**(2), 215-223 (1999).
68. А. Е. Жуков, А. Р. Ковш, А. Ю. Егоров и др., "Фото- и электролюминесценция вблизи 1,3 мкм структур с квантовыми точками на подложках GaAs", *ФТП* **33**(2), 180-183, (1999).
69. Чжао Чжень, Д. А. Бедарев, Б. В. Воловик и др., "Исследование влияния состава и условий отжига на оптические свойства квантовых точек (In,Ga)As в матрице (Al,Ga)As", *ФТП* **33**(1), 91-96 (1999).
70. А. Е. Zhukov, A. R. Kovsh, V. M. Ustinov *et al.*, "Gain characteristics of quantum dot injection lasers", *Semicond. Sci. Technol.* **14**(1), 118-123 (1999).
71. V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov *et al.*, "InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3 μm ", *Appl. Phys. Lett.* **74**(19), 2815-2817 (1999).
72. А. Р. Ковш, Д. А. Лившиц, А. Е. Жуков и др., "Инжекционный гетеролазер на основе квантовых точек с выходной мощностью излучения 3,3 Вт", *Письма в ЖТФ* **25**(11), 41-46 (1999).
73. А. Е. Zhukov, V. M. Ustinov, A. R. Kovsh *et al.*, "Control of the emission wavelength of self-organized quantum dots: main achievements and present status", *Semicond. Sci. Technol.* **14**(6), 575-581 (1999).
74. Н. А. Малеев, А. Е. Жуков, А. Р. Ковш и др., "Структуры InGaAs/GaAs с квантовыми точками в вертикальных оптических резонаторах для диапазона длин волн вблизи 1,3 мкм", *ФТП* **33**(5), 629-633 (1999).
75. Yu. M. Shernyakov, D. A. Bedarev, E. Yu. Kondrat'eva *et al.*, "1.3 μm GaAs-based laser using quantum dots obtained by activated spinodal decomposition", *Electron. Lett.* **35**(11), 898-900 (1999).
76. Б. В. Воловик, А. Ф. Пацульников, Д. А. Бедарев и др., "Длинноволновое излучение в структурах с квантовыми точками, полученными при стимулированном распаде твердого раствора на напряженных островках", *ФТП* **33**(8), 990-995 (1999).
77. А. Р. Ковш, А. Е. Жуков, Н. А. Малеев и др., "Лазерная генерация с длиной волны излучения в районе 1,3 мкм в структурах на основе квантовых точек InAs", *ФТП* **33**(8), 1020-1023 (1999).
78. A. R. Kovsh, A. E. Zhukov, D. A. Livshits *et al.*, "3.5 W CW operation of quantum dot laser", *Electron. Lett.* **35**(14), 1161-1163 (1999).
79. А. Е. Zhukov, А. Р. Ковш, Н. А. Малеев *et al.*, "Long-wavelength lasing from multiply stacked InAs/InGaAs quantum dots on GaAs substrate", *Appl. Phys. Lett.* **75**(13), 1926-1928 (1999).

80. A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, V. M. Ustinov *et al.*, “Continuous wave operation of long-wavelength quantum dot diode laser on a GaAs substrate”, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11**(11), 1345-1347 (1999).
81. A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, V. M. Ustinov *et al.*, “3.5 W continuous wave operation from quantum dot laser”, *Mat. Sci. Eng. B* **74**, 70-74 (2000).
82. P. Yu, W. Langbein, K. Leosson *et al.*, “Optical anisotropy in vertically coupled quantum dots”, *Phys. Rev. B* **60**(24), 16680-16685 (1999).
83. А. Е. Жуков, А. Р. Ковш, В. М. Устинов, “Температурная зависимость усиления лазеров на основе массивов квантовых точек с неоднородно уширенной плотностью состояний”, *ФТП* **33**(11), 1395-1400 (1999).
84. A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, S. S. Mikhrin *et al.*, “3.9W CW power from sub-monolayer quantum dot diode laser”, *Electron. Lett.* **35**(21), 1845-1847 (1999).
85. M. V. Maximov, Yu. M. Shernyakov, I. N. Kaiander *et al.*, “Single transverse mode operation of long wavelength (~1.3 μm) InAs GaAs quantum dot laser”, *Electron. Lett.* **35**(23), 2038-2039 (1999).
86. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh *et al.*, “MBE growth, structural and optical characterization of InAs/InGaAlAs self-organized quantum dots”, *MRS Symp. Proc.* **583**, 57-62 (2000).
87. A. F. Tsatsul'nikov, A. R. Kovsh, A. E. Zhukov *et al.*, “Volmer-Weber and Stranski-Krastanov InAs-(Al,Ga)As quantum dots emitting at 1.3 μm ”, *J. Appl. Phys.* **88**(11), 6272-6275 (2000).
88. С. С. Михрин, А. Е. Жуков, А. Р. Ковш и др., “Пространственно одномодовый лазер диапазона 1,25–1,28 мкм с квантовыми точками InAs на подложке GaAs”, *ФТП* **34**(1), 117-120 (2000).
89. А. Ф. Цацульников, Б. В. Воловик, Д. А. Бедарев и др., “Механизмы распада твердого раствора InGaAlAs, стимулированного квантовыми точками InAs”, *ФТП* **34**(3), 330-333 (2000).
90. M. Paillard, X. Marie, E. Vanelle *et al.*, “Time-resolved photoluminescence in self-assembled InAs/GaAs quantum dots under strictly resonant excitation”, *Appl. Phys. Lett.* **76**(1), 76-78 (2000).
91. Н. А. Малеев, А. Е. Жуков, А. Р. Ковш и др., “Гетероструктуры с несколькими слоями InAs/InGaAs-квантовых точек для источников оптического излучения диапазона длин волн 1,3 мкм”, *ФТП* **34**(5), 612-616 (2000).
92. А. Е. Жуков, А. Р. Ковш, С. С. Михрин и др., “Эффективность преобразования лазерных диодов на основе квантовых точек”, *ФТП* **34**(5), 628-632 (2000).
93. V. M. Ustinov, A. R. Kovsh, D. A. Livshits *et al.*, “High output power CW operation of a quantum dot laser”, *Inst. Phys. Conf. Ser. No.* **166**(4), 277-280 (2000).
94. J. A. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov *et al.*, “InAs-InGaAs quantum dot VCSELs on GaAs substrates emitting at 1.3 μm ”, *Electron. Lett.* **36**(16), 1384-1385 (2000).
95. V. M. Ustinov and A. E. Zhukov, “GaAs-based long-wavelength lasers”, *Semicond. Sci. Technol.* **15**(8), R41-R54 (2000).
96. A. E. Zhukov, V. M. Ustinov, and Zh. I. Alferov, “Device characteristics of low-threshold quantum-dot lasers”, in “*Advances in semiconductor lasers and applications to optoelectronics*” World Scientific, ed. by M. Dutta and M. A. Stroschio, Selected Topics in Electronics and Systems vol. 16, pp. 263-292 (2000).

97. M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, A. E. Zhukov *et al.*, "Carrier relaxation in InGaAs-GaAs quantum dots formed by activated alloy phase separation", *Nanotechnology* **11**(4), 309-313 (2000).
98. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh *et al.*, "Long wavelength quantum dot lasers on GaAs substrates", *Nanotechnology* **11**(4), 397-400 (2000).
99. M. Grundmann, F. Heinrichsdorf, N. N. Ledentsov *et al.*, "Progress in quantum dot lasers: 1100 nm, 1300 nm, and high power applications", *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**(4B), 2341-2343 (2000).
100. M. V. Maximov, I. L. Krestnikov, Yu. M. Shernyakov *et al.*, "InGaAs-GaAs Quantum Dots for application in longwavelength (1.3 micron) resonant vertical cavity enhanced devices", *J. Electron. Mat.* **29**(3), 487-494 (2000).
101. M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik *et al.*, "Optical properties of quantum dots formed by activated spinodal decomposition for GaAs-based lasers emitting at ~1.3 micron", *Microelectronic Engineering* **51-52**, 61-72 (2000).
102. N. N. Ledentsov, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff *et al.*, "Quantum-dot heterostructure lasers", *IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron.* **6**(3), 439-451 (2000).
103. S. S. Mikhrin, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh *et al.*, "0.94 μm diode lasers based on Stranski-Krastanow and sub-monolayer quantum dots", *Semicond. Sci. Technol.* **15**(11), 1061-1064 (2000).
104. M. V. Maximov, A. F. Tsatsul'nikov, B. V. Volovik *et al.*, "Tuning quantum dot properties by activated phase separation of an InGa(Al)As alloy grown on InAs stressors", *Phys. Rev. B* **62**(24), 16671-16680 (2000).
105. N. A. Maleev, I. L. Krestnikov, A. R. Kovsh *et al.*, "InAs/InGaAs quantum dot microcavity diode structures on GaAs substrates emitting in the 1.25–1.33 μm wavelength range", *Phys. Stat. Sol. (b)* **224**(3), 803-806 (2001).
106. Н. А. Малеев, А. Ю. Егоров, А. Е. Жуков и др., "Сравнительный анализ длинноволновых (1,3 мкм) вертикально-излучающих лазеров на подложках арсенида галлия", *ФТП* **35**(7), 881-888 (2001).
107. I. L. Krestnikov, N. A. Maleev, A. V. Sakharov *et al.*, "1.3 μm resonant-cavity InGaAs/GaAs quantum dot light-emitting devices", *Semicond. Sci. Technol.* **16**(10), 844-848 (2001).
108. M. V. Maximov, L. V. Asryan, Yu. M. Shernyakov *et al.*, "Gain and threshold characteristics of long wavelength lasers based on InAs/GaAs quantum dots formed by activated alloy phase separation", *IEEE J. Quantum Electron.* **37**(5), 676-683 (2001).
109. A. E. Zhukov and V. M. Ustinov, "Growth and study of long-wavelength InAs/GaAs quantum dots and their application in diode lasers", *Semiconductor News* **10**(1&2), 31-35 (2001).
110. V. M. Ustinov, A. E. Zhukov, N. A. Maleev *et al.*, "1.3 μm InAs/GaAs quantum dot lasers and VCSELs grown by molecular beam epitaxy", *J. Cryst. Growth* **227-228**, 1155-1161 (2001).
111. В. М. Устинов, Н. А. Малеев, А. Е. Жуков и др., "Вертикально-излучающие приборы на основе структур с квантовыми точками", *Успехи физических наук* **171**(8), 855-856 (2001).

112. N. A. Maleev, A. V. Sakharov, C. Moeller *et al.*, “1300 nm GaAs-based microcavity LED incorporating InAs/GaInAs quantum dots”, *J. Cryst. Growth* **227-228**, 1146-1150 (2001).
113. D. Bimberg, M. Grundmann, F. Heinrichsdorff *et al.*, “Quantum dot lasers: Theory and experiment”, *AIP Conference Proceedings* **560**(1), 178-197 (2001).
114. D. Bimberg, N. N. Ledentsov, M. Grundmann *et al.*, “InAs-GaAs quantum dots: From growth to lasers”, *Phys. Stat. Sol.* **40**, 359-373 (2001).
115. A. Yu. Egorov, A. E. Zhukov, and V. M. Ustinov, “1.3 μm GaAs-based quantum well and quantum dot lasers: Comparative analysis”, *J. Electron. Mat.* **30**(5), 477-481 (2001).

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1*]. Ж. И. Алферов и Р. Ф. Казаринов, “Полупроводниковый лазер с электрической накачкой”, *Авторское свидетельство* № 181737 от 27.02.1966, заявлено 30.03.1963.
- [2*]. J. P. van der Ziel, R. Dingle, R. C. Miller, W. Wiegmann, and W. A. Nordland Jr., “Laser oscillation from quantum states in very thin GaAs-Al_{0.2}Ga_{0.8}As multilayer structures”, *Appl. Phys. Lett.* **26**, 463-465. (1975).
- [3*]. Y. Arakawa and H. Sakaki, “Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current”, *Appl. Phys. Lett.* **40**, 939-941 (1982).
- [4*]. L. Goldstein, F. Glas, J. Y. Marzin, M. N. Charasse, and G. Le Roux, “Growth by molecular beam epitaxy and characterization of InAs/GaAs strained-layer superlattices”, *Appl. Phys. Lett.* **47**(10), 1099-1101 (1985).