

Учреждение Российской академии наук
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

На правах рукописи

Кузьменков Александр Георгиевич

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЕРТИКАЛЬНО-ИЗЛУЧАЮЩИЕ ЛАЗЕРЫ
НА ОСНОВЕ САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ КВАНТОВОРАЗМЕРНЫХ
ГЕТЕРОСТРУКТУР В СИСТЕМЕ МАТЕРИАЛОВ InGaAs-AlGaAs**

Специальность: 01.04.10 - Физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2008 г.

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, чл.-кор. РАН, профессор В.М. Устинов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор Л.Е. Воробьёв

доктор физико-математических наук, доцент В.И. Зубков

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Институт аналитического приборостроения РАН

Защита состоится “24” декабря 2008 г. в 12 часов на заседании Диссертационного Совета Д 002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

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

Автореферат разослан “24” ноября 2008 г.

Ученый секретарь

Диссертационного Совета

д.ф.-м.н., с.н.с.



Сорокин Л.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Полупроводниковые лазерные диоды (ЛД) традиционной полосковой конструкции в настоящее время активно и успешно используются для самого широкого спектра практических приложений: волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС), оптических системах записи и хранения информации, оптических датчиках и сенсорах, устройствах накачки твердотельных лазеров, медицинской аппаратуре, контрольно-измерительной аппаратуре, оптических системах обработки информации и др. [1]. Однако существует несколько принципиальных недостатков традиционной полосковой конструкции ЛД, к числу которых относятся:

- невозможность адекватного тестирования приборных структур на пластине (подложке) до их разделения на индивидуальные кристаллы и монтажа на кристаллодержатель;
- несимметричная диаграмма выходного излучения ЛД и ее достаточно высокая угловая расходимость, что затрудняет ввод излучения в оптическое волокно и требует использования прецизионной сборки для модулей излучателей ВОЛС;
- достаточно сильная температурная зависимость длины волны лазерного излучения для наиболее простой в реализации конструкции ЛД (лазеры с резонатором Фабри-Перо без дополнительных мер по стабилизации длины волны);
- как правило, заметное возрастание порогового тока ЛД с ростом температуры;
- необходимость применения весьма сложных конструкций приборов для обеспечения высокого быстродействия (10 Гбит/с и выше) при использовании наиболее простого и удобного метода прямой токовой модуляции.

Попытки преодолеть указанные недостатки стимулировали поиск альтернативных вариантов конструкций ЛД, к числу которых относятся полупроводниковые инжекционные лазеры с вертикальным оптическим микрорезонатором (далее – полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры (ВИЛ), vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs)). Современные варианты конструкции

ВИЛ основаны на использовании вертикальных оптических микрорезонаторов с зеркалами в виде распределенных брэгговских отражателей (РБО) [2-4]. При этом в качестве активной области используются одна или несколько квантовых ям (КЯ), помещенных вблизи пучностей оптического поля. Активная область прибора (область протекания тока и излучательной рекомбинации носителей) ограничивается с помощью селективного окисления апертурных слоев AlGaAs или с помощью имплантации протонов. К числу основных преимуществ ВИЛ по сравнению с традиционными инжекционными лазерами полосковой конструкции относятся малая угловая расходимость и симметричная диаграмма направленности выходного оптического излучения, возможность обеспечения субмиллиамперных пороговых токов, повышенная температурная и радиационная стабильность, групповая технология изготовления и возможность тестирования приборов непосредственно на пластине. Планарная технология ВИЛ позволяет формировать двумерные матрицы с большим числом индивидуально адресуемых излучателей. В последние годы полупроводниковые вертикально-излучающие лазеры находят все более широкое применение в быстродействующих оптоволоконных системах передачи и обработки информации, датчиках и сенсорах различного типа, высокопроизводительных компьютерных системах [5-7]. Другое активно развивающееся направление исследований связано с созданием матричных излучателей на основе ВИЛ с большим количеством индивидуально адресуемых элементов. Гибридная интеграция таких матричных излучателей с кремниевыми интегральными схемами (Si ИС) открывает новые возможности для построения высокопроизводительных вычислительных систем и устройств обработки информации [8], а также совершенствования бортовых комплексов с активными фазированными антенными решетками за счет решения проблемы электрических межсоединений, лимитирующей сегодня их развитие [9].

Актуальной проблемой современной технологии полупроводниковых ВИЛ является получение приборов с пространственно-одномодовым выходным излучением и субмиллиамперными пороговыми токами, перспективных для соз-

дания датчиков различного типа, а также внутрисистемных оптических межсоединений. Практическая реализация таких приборов требует уменьшения размеров токовой апертуры ВИЛ до единиц мкм. Возможности использования традиционных структур с КЯ активной областью ограничены латеральным растеканием носителей заряда и ростом внутренних потерь при существенном снижении размеров апертуры [3]. В то же время, использование массивов самоорганизующихся квантовых точек (КТ) потенциально позволяет создавать приборы с субмикронной апертурой без существенной деградации плотности порогового тока [10-12]. Это не только открывает возможность для снижения рабочего тока и потребляемой мощности ВИЛ, что особенно актуально для реализации оптических коммуникаций между отдельными компонентами вычислительных устройств, но и может быть положено в основу создания источников одиночных фотонов. Однако следует отметить, что практическая реализация ВИЛ на основе массивов КТ с малым размером апертуры требует серьезных исследований в направлении оптимизации свойств реальных массивов самоорганизующихся КТ в сочетании с оптимизацией конструкции приборных структур.

Еще одна проблема в технологии ВИЛ связана с поиском новых полупроводниковых материалов, пригодных для создания приборов, работающих в основных спектральных диапазонах современных систем волоконно-оптической связи (1300 и 1550 нм). Несмотря на успешное развитие промышленной технологии ВИЛ для спектральных диапазонов 650, 850 и 980 нм, создание аналогичных приборов для диапазонов длин волн 1300 и 1550 нм требует решения ряда принципиальных проблем [3]. Основные ограничения при использовании традиционной системы материалов InGaAsP/InP связаны с относительно плохими характеристиками РБО. Это обусловлено меньшей (по сравнению с используемой в коротковолновой спектральной области системой материалов AlGaAs/GaAs) разницей коэффициентов преломления слоев InGaAsP, InAlGaAs и InP, а также низкой теплопроводностью четверных соединений. Кроме того, для лазерных диодов на подложках InP характерна относительно низкая температурная стабильность основных характеристик. В последние годы предложен

ряд новых полупроводниковых гетероструктур, излучающих в диапазоне длин волн 1200-1500 нм, которые могут быть синтезированы на подложках GaAs [13]. К их числу относятся структуры с квантовыми ямами InGaAsN [14] и GaAsSb [15], а также структуры с массивами квантовых точек In(Ga)As [16,17]. При этом использование в качестве активной области длинноволновых ВИЛ массивов самоорганизующихся InGaAs КТ на подложках GaAs является одним из наиболее перспективных направлений [11]. Однако практическая реализация длинноволновых ВИЛ на основе массивов КТ возможна только при тщательной оптимизации параметров и технологии формирования активной области, оптимальном выборе конструкции вертикального оптического микрорезонатора и тщательной отработки технологии создания приборных структур.

Наконец, общей задачей современной технологии ВИЛ является снижение пороговой плотности тока, повышение дифференциальной эффективности и достижение максимальной выходной мощности в пространственно-одномоновом режиме в сочетании с высоким быстродействием в режиме прямой токовой модуляции. Специфические подходы к формированию массивов самоорганизующихся КТ InGaAs позволяют успешно продвинутся в указанном направлении [18].

На основании вышеизложенного следует, что создание вертикально-излучающих лазеров с активной областью на основе гетероструктур с самоорганизующимися квантовыми точками является актуальной задачей современной физики и техники полупроводников, решение которой позволит преодолеть ряд ограничений существующей технологии ВИЛ.

Целью настоящей работы является:

Исследования физических процессов, разработка конструкции и технологии изготовления полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров на основе гетероструктур с самоорганизующимися квантовыми точками в системе материалов AlGaAs-InGaAs-GaAs

Для достижения поставленной цели в ходе работы решались следующие **основные задачи:**

1. Разработка методов получения и исследование характеристик самоорганизующихся квантоворазмерных гетероструктур с квантовыми точками в системе материалов AlGaAs-InGaAs-GaAs для их использования в качестве активных областей полупроводниковых вертикально-излучающих лазеров.

2. Развитие технологии молекулярно-пучковой эпитаксии для получения эпитаксиальных гетероструктур вертикально-излучающих лазеров.

3. Расширение рабочего спектрального диапазона длин волн вертикально-излучающих лазеров на подложках арсенида галлия

4. Реализация пространственно-одномодовых приборов с субмиллиамперными пороговыми токами

5. Разработка базовых элементов технологии вертикально-излучающих лазеров с внутривибраторными контактами, селективно-окисленными апертурами и различными вариантами используемых РБО

6. Проведение математического моделирования и расчет вариантов конструкции эпитаксиальных гетероструктур вертикально-излучающих лазеров с квантоворазмерными активными областями в системе материалов AlGaAs-InGaAs-GaAs, позволяющих минимизировать внутренние оптические потери, улучшить однородность распределения тока в активной области и оптимизировать распределение оптического поля в вертикальном микрорезонаторе.

7. Разработка конструкции и технологии изготовления матричных излучателей вертикально-излучающих лазеров с индивидуальной адресацией активных элементов, пригодных для гибридной интеграции и монтажа методом перевернутого кристалла.

8. Экспериментальные исследования и анализ характеристик созданных вертикально-излучающих лазеров и матричных излучателей на их основе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Самоорганизующиеся квантоворазмерные гетероструктуры в системе материалов AlGaAs-InGaAs позволяют реализовать вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона от 960 до 1300 нм на подложках арсенида галлия.

2. Формирование распределенных брэгговских отражателей и токовой апертуры микрорезонатора вертикально-излучающего лазера в едином процессе селективного окисления возможно при условии выбора оптимального сочетания скоростей селективного окисления отдельных слоев эпитаксиальной гетероструктуры.

3. Создание низкопороговых эффективных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs, обладающих низким оптическим усилением, возможно при использовании оптических микрорезонаторов с нелегированными полупроводниковыми или диэлектрическими распределенными брэгговскими зеркалами.

4. В вертикально-излучающих лазерах на основе гетероструктур с субмонослойными квантовыми точками InGaAs, обладающих высоким оптическим усилением, при малых размерах селективно-окисленной апертуры наблюдается ярко выраженная самопульсация, обусловленная формированием насыщающегося поглотителя.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней:

1. В результате комплекса теоретических и экспериментальных исследований показана возможность создания ВИЛ с активной областью на основе гетероструктур с самоорганизующимися InGaAs КТ на подложках GaAs, обладающих низким пороговым током и высокой дифференциальной эффективностью в спектральном диапазоне от 960 до 1300 нм.

2. Исследованы ограничения на условия формирования вертикального оптического микрорезонатора при одновременном селективном окислении в парах воды РБО на основе чередующихся слоев GaAs и AlGaAs и токовых апертурных слоев на основе AlGaAs с высоким содержанием Al.

3. Проведены сравнительные экспериментальные исследования вариантов конструкции оптических микрорезонаторов ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм на основе массивов самоорганизующихся КТ InAs/InGaAs

4. Обнаружены и экспериментально исследованы явления самопульсации в ВИЛ на основе массивов субмонослойных КТ InGaAs.

Практическая значимость работы состоит в том, что в ней

1. Разработаны и исследованы варианты конструкции и базовые элементы технологии изготовления ВИЛ с электрическими контактами к внутренним слоям вертикального оптического микрорезонатора, РБО различного типа и селективно-окисленными апертурными слоями, позволяющие успешно реализовать ВИЛ с активной областью на основе самоорганизующихся InGaAs КТ и матричные излучатели на их основе.

2. Развита методика изготовления структур с вертикальными оптическими микрорезонаторами с использованием промежуточного контроля спектров отражения в шлюзовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии с последующей корректировкой толщин слоев, обеспечивающая выращивание структур ВИЛ с отклонением резонансной длины волны от проектного значения не более 1 %.

3. Разработана технология прецизионного глубокого (до 5 мкм) ионно-лучевого травления многослойных структур ВИЛ под маской фоторезиста с контролируемым наклоном стенок меза-структур.

4. Предложена методика оптимального выбора состава для обеспечения необходимых размеров токовой апертуры и предотвращения «переокисления» при одновременном селективном окислении в парах воды верхнего РБО на основе чередующихся слоев GaAs и AlGaAs и токовых апертурных слоев на основе AlGaAs с высоким содержанием Al

5. Продемонстрированы высокоэффективные одномодовые ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с активной областью на основе субмонослойных КТ InGaAs, имеющие пороговый ток 0.3 мА, максимальную выходную мощность более 4 мВт (в одномодовом режиме) и внешнюю дифференциальную эффективность более 56%.

6. Разработана конструкция матричного лазерного излучателя диапазона 960-980 нм на основе ВИЛ с расположением контактов в одной плоскости и продемонстрированы матричные излучатели с числом индивидуально адресуе-

мых элементов 8×8 , перспективные для использования в оптических коммутаторах и высокопроизводительных вычислительных системах.

Результаты диссертации использованы в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, СПб ФТНОЦ РАН, Минском НИИ радиоматериалов (Республика Беларусь) и Industrial Technology Research Institute (Taiwan) при разработке конструкции и технологии ВИЛ и матричных излучателей на их основе.

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертационную работу, докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях:

5-ом Белорусско–Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы» (5th Belarusian-Russian Workshop «SEMICONDUCTOR LASERS AND SYSTEMS») (Республика Беларусь, Минск, 2005), 13-й Международной конференции НАНОСТРУКТУРЫ: Физика и Технология (13th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology) (Санкт-Петербург, 2005), 14-й Международной конференции НАНОСТРУКТУРЫ: Физика и Технология (14th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology) (Санкт-Петербург, 2006), VII Международном российско-украинском семинаре «Нанофизика и нанoeлектроника» (Санкт-Петербург, 2006), 6-ом Белорусско–Российском семинаре «Полупроводниковые лазеры и системы» (6th Belarusian-Russian Workshop «SEMICONDUCTOR LASERS AND SYSTEMS») (Республика Беларусь, Минск, 2007), Международной конференции по лазерам и электрооптике (Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Europe) (Германия, Мюнхен, 2007).

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 15 печатных работах (в том числе 7 в научных журналах и 8 в материалах конференций).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, одного приложения и заключения. Общий объем диссертации составляет 236 страниц, включая 79 рисунков, 10 таблиц и список цитируемой литературы из 170 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определен объект исследования, сформулирована цель работы, решаемые задачи, отмечена её научная новизна и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются основные достоинства вертикально-излучающих лазеров, история появления ВИЛ, существующие и перспективные области их применения. Описан принцип действия и основные особенности ВИЛ по сравнению с лазерными диодами традиционной конструкции, рассматривается основная базовая конструкция современных вертикально-излучающих лазеров. Рассмотрены элементарные модели ВИЛ, позволяющие сформулировать требования к параметрам вертикального оптического микрорезонатора. Обсуждается необходимость введения понятия эффективной длины вертикального оптического микрорезонатора и использования корректного варианта формулировки порогового условия лазерной генерации. Приводятся основные соотношения, позволяющие оценить величину порогового тока, дифференциальную эффективность и выходную мощность прибора. Рассматривается базовая конструкция ВИЛ спектрального диапазона 850 нм, приводятся примеры её экспериментальной реализации и достигнутые значения рабочих параметров. Описываются проблемы создания длинноволновых ВИЛ, которые не могут быть эффективно решены в рамках традиционно применяемой для данного спектрального диапазона системы материалов InGaAsP. Приводятся предлагаемые варианты модернизации традиционного подхода, позволяющие создавать длинноволновые ВИЛ, но существенно усложняющие технологию изготовления. Обозначены перспективы возможного решения данной задачи на базе использования самоорганизующихся наногетероструктур в системе материалов AlGaAs-InGaAs(N)-GaAs. Отдельный параграф посвящён матричным излучателям на основе ВИЛ. В нём рассмотрены конструктивные особенности и рабочие характеристики ВИЛ, пригодных для использования в качестве единичных элементов матричных излучателей. Обсуждаются возможно-

сти практического применения таких излучателей в качестве элемента быстрой оптической связи между цифровыми интегральными схемами, а также для гибридных цифровых сигнальных процессоров. В конце данной главы рассматриваются современный уровень и актуальные проблемы технологии ВИЛ на основе массивов самоорганизующихся КТ. Приводятся примеры их успешной реализации и обсуждаются проблемы, ограничивающие достигнутый уровень приборных характеристик.

Во второй главе приведено описание методов, используемых в работе для расчёта вариантов конструкции ВИЛ. В начале главы кратко рассматриваются основные явления и физические модели процессов, происходящих во время функционирования ВИЛ. Далее рассмотрены методы моделирования вертикального оптического микрорезонатора, включая расчет распределения электромагнитного поля, зонной диаграммы, растекания тока и отвода выделяемого тепла. Рассмотрен ряд ключевых аспектов проектирование структур ВИЛ (формулировка требований к оптическому микрорезонатору исходя из свойств активной области, расчёт конструкции микрорезонатора, расчёт протекания тока и последовательных сопротивлений, расчёт тепловых режимов).

Третья глава посвящена рассмотрению базовых элементов технологии ВИЛ и матричных излучателей на их основе, в том числе: получение гетероструктур вертикальных оптических микрорезонаторов методом молекулярно-пучковой эпитаксии с промежуточным контролем спектров отражения в высоковакуумной камере, технология селективного окисления слоев AlGaAs для формирования токовых апертур и распределенных брэгговских отражателей, особенности построения технологического процесса изготовления ВИЛ с внутррезонаторной инжекцией носителей, технология глубокого травления многоступенчатых меза-структур. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие эффективность предложенных конструктивно-технологических решений. В качестве демонстрации возможностей разработанных технологий приводятся результаты создания матричных излучателей на основе ВИЛ, содержащих 8×8 индивидуально-адресуемых излучателя и пригодных для монта-

жа методом «перевернутого кристалла». Для всех элементов матрицы выходная оптическая мощность превышала 1 мВт, а пороговый ток не превышал 1.5 мА. Ширина диаграммы направленности по уровню половины максимальной мощности не превышала 12°.

В четвертой главе рассмотрены результаты исследований по созданию вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм на подложках GaAs, имеющих активную область на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs. Рассматриваются особенности технологии и оптические характеристики активной области на основе массивов КТ InAs/InGaAs, получаемых методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Проводится анализ вариантов конструкции длинноволновых ВИЛ на подложках GaAs и обосновывается выбор конструкции длинноволновых ВИЛ с электрическими контактами к внутренним слоям вертикального оптического микрорезонатора. Приводятся результаты экспериментальной реализации низкопороговых эффективных вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 1300 нм на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaA. На рис.1 представлены варианты конструкции реализованных ВИЛ, а в табл.1 приведены их основные приборные характеристики.

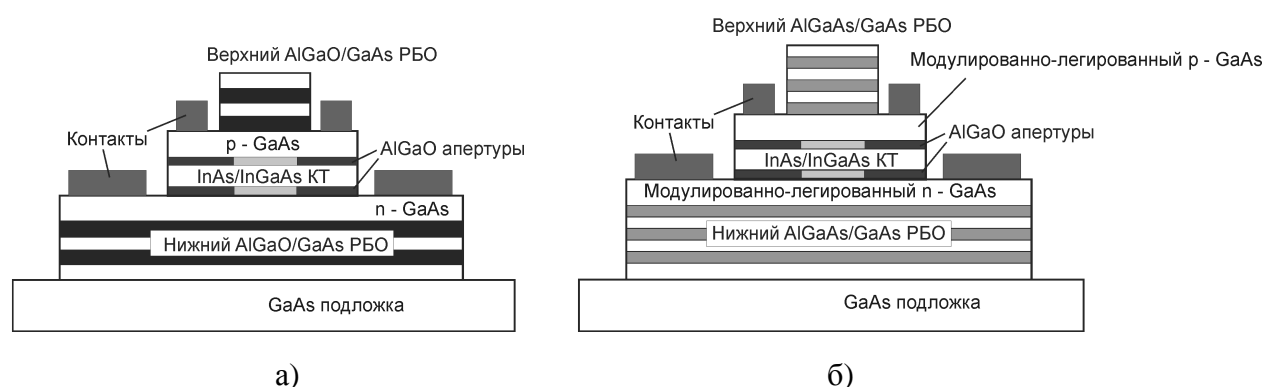


Рис.1. Схематическое изображение двух реализованных конструкций длинноволновых ВИЛ на основе массивов КТ InAs/InGaAs: а) конструкция с двумя AlGaO/GaAs PBO, однородно легированными контактными слоями; б) конструкция с двумя AlGaAs/GaAs PBO, неоднородно легированными контактными слоями.

Таблица 1. Сравнительные характеристики реализованных конструкций длинноволновых ВИЛ на основе массивов КТ InAs/InGaAs.

Конструкция	Рабочая длина волны, нм	Пороговый ток, мА	Дифференциальная эффективная мощность, мВт/мА	Макс. выходная оптическая мощность, мВт
Внутрирезонаторные контакты и AlO/GaAs РБО	1298	1.2	0.4	1.0
Внутрирезонаторные контакты и AlGaAs/GaAs РБО	1301	2.2	0.41	2.0

Пятая глава посвящена экспериментальным результатам, полученным для вертикально-излучающих лазеров на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs. Приводятся экспериментальные результаты по созданию высокоэффективных одномодовых ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с активной областью на основе субмонослойных КТ InGaAs, имеющих пороговый ток менее 1 мА, максимальную выходную мощность более 4 мВт (в одномодовом режиме) и внешнюю дифференциальную эффективность более 56% (рис.2).

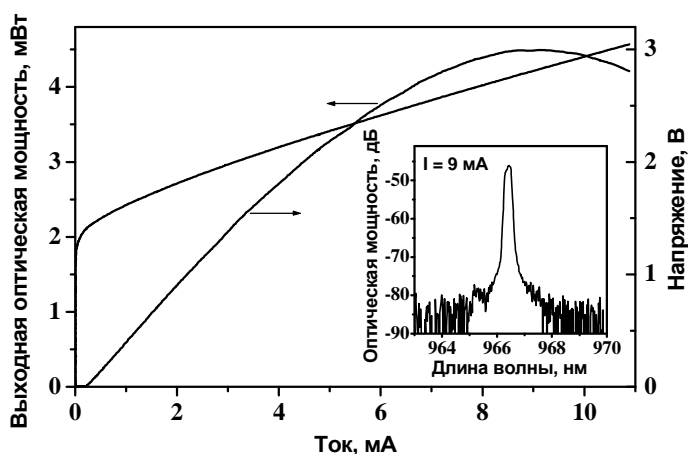


Рис.2 Вольт-амперная и ватт-амперная характеристики СМЛ КТ ВИЛ с диаметром токовой апертуры 3.5 мкм, а также спектр излучения при токе 9 мА.

Рассматриваются явления самопульсации, обнаруженные для ВИЛ на основе субмонослойных квантовых точек InGaAs при малых размерах селективно-окисленной апертуры (рис.3). Обсуждается возможная модель механизма возникновения самопульсаций, в основе которой лежит формирование насыщающегося поглотителя в периферийных областях по периметру токовой апертуры.

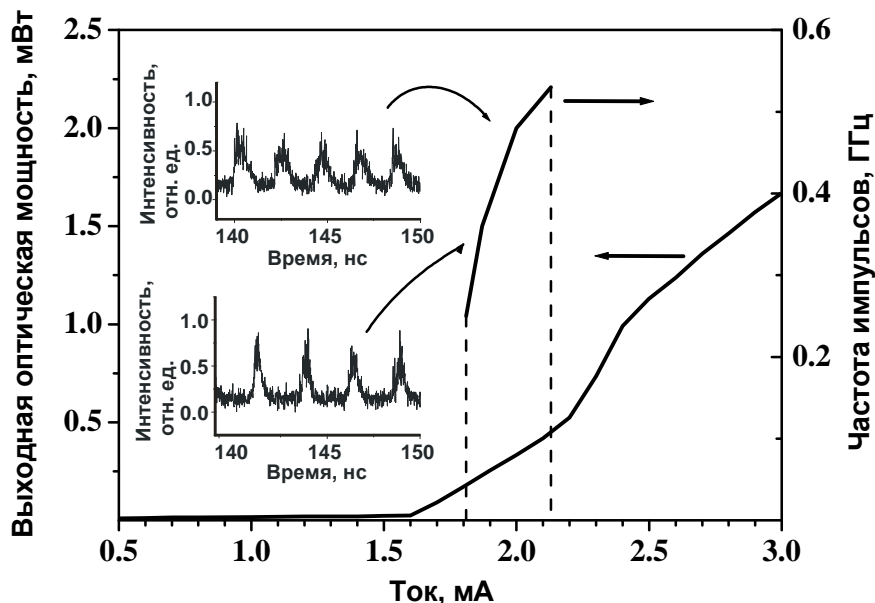


Рис.3. Ватт-амперная характеристика СМЛ КТ ВИЛ с токовой апертурой менее 1.5мкм, осциллограммы детектированных световых импульсов при двух токах накачки и зависимость частоты самопульсаций от тока накачки.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы, представлен список используемой литературы.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

В результате выполнения настоящей работы получены следующие основные результаты:

1. Теоретически и экспериментально исследована возможность создания ВИЛ спектрального диапазона от 960 до 1300 нм с активной областью на основе гетероструктур с самоорганизующимися InGaAs КТ на подложках GaAs. Исследовано влияние характеристик массива самоорганизующихся КТ на требования к оптическому микрорезонатору ВИЛ, реализованы варианты конструкций и технологические методы, позволяющие обеспечить создание низкопороговых пространственно одномодовых приборов
2. Разработан метод изготовления структур с вертикальными оптическими микрорезонаторами с использованием промежуточного контроля спектров отражения в шлюзовой камере установки молекулярно-пучковой эпитаксии, обеспечиваю-

щий выращивание структур ВИЛ с отклонением резонансной длины волны от проектного значения не более 1 %.

3. Исследованы ограничения на условия формирования вертикального оптического микрорезонатора при одновременном селективном окислении в парах воды РБО на основе чередующихся слоев GaAs и AlGaAs и токовых апертурных слоев на основе AlGaAs с высоким содержанием Al и предложена методика оптимального выбора состава этих слоев.

4. Разработана технология прецизионного глубокого (до 5 мкм) ионно-лучевого травления многослойных структур ВИЛ под маской фоторезиста с контролируемым наклоном стенок меза-структур.

5. Проведены сравнительные расчетные и экспериментальные исследования вариантов конструкции оптических микрорезонаторов ВИЛ спектрального диапазона 1300 нм на основе массивов самоорганизующихся КТ InAs/InGaAs. Показано, что использование оптических микрорезонаторов с нелегированными полупроводниковыми или диэлектрическими распределенными брэгговскими зеркалами позволяет на основе массивов самоорганизующихся квантовых точек InAs/InGaAs создавать низкопороговые (пороговые токи 1-2 мА) вертикально-излучающих лазеры спектрального диапазона 1300 нм с выходной мощностью 1-2 мВт.

6. Предложена и экспериментально реализована конструкция матричного излучателя на основе ВИЛ с числом индивидуально адресуемых излучателей 8x8, оптимизированная для монтажа методом перевернутого кристалла.

7. На основе активной области с массивом субмонослойных КТ InGaAs реализованы одномодовые ВИЛ спектрального диапазона 980 нм с пороговым током менее 1 мА и максимальной выходной мощностью более 4 мВт.

8. Для ВИЛ на основе обладающих высоким оптическим усилением массивов субмонослойных КТ InGaAs при малых размерах токовой апертуры обнаружен эффект самопульсации и проведены экспериментальные исследования его зависимости от параметров конструкции и режима работы приборов. Предложено объяснение причин возникновения самопульсации на базе формирования на-

сыщающегося поглотителя в периферийных областях прибора, окружающих токовую апертуру.

Основные результаты диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, А.Е. Жуков, А.П. Васильев, А.С. Шуленков, С.В. Чумак, Е.В. Никитина, С.А. Блохин, М.М. Кулагина, Е.С. Семенова, Д.А. Лившиц, М.В. Максимов, В.М. Устинов, «Конструкция и технология изготовления матриц вертикально-излучающих лазеров», ФТП, 2005 Т.39, вып.4, сс. 487-491.
2. N. A. Maleev, A. G. Kuzmenkov, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, A. P. Vasil'ev, S. A. Blokhin, M. M. Kulagina, A. S. Shulenkov, S. V. Chumak, M. V. Maximov, V. M. Ustinov, «Intracavity-contacted quantum well and quantum dot VCSELs with AlGaO/GaAs and AlGaAs/GaAs DBRs», 5th Belarussian-Russian Workshop "SEMICONDUCTOR LASERS AND SYSTEMS", 1-5 June 2005, Minsk, Belarus (Proceedings, p. 164)
3. S.V. Chumak, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.S. Shulenkov, A.E. Zhukov, A.P. Vasil'ev, S.A. Blokhin, M.M. Kulagina, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, «Matrix of vertical-cavity surface-emitting lasers with combined AlGaO/GaAs-AlGaAs/GaAs DBRs», 13th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology, Russia, St Petersburg, June 20–25, 2005, p.100
4. S.A. Blokhin, A.N. Smirnov, A.G. Gladdyshev, N.V. Kryzhanovskaya, N.A. Maleev, A.A. Zhukov, A.G. Kuzmenkov, A.P. Vasil'ev, E.S. Semenova, E.V. Nikitina, M.V. Maximov, N.N. Ledentsov and V.M. Ustinov. «Mechanical stress in selective oxidized GaAs/(AlGa)_xAs_y structures», 13th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology (Russia, St Petersburg, June 20–25, 2005) p.312.
5. С.А. Блохин, А.В. Сахаров, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, А.Р.Ковш, С.С. Михрин, G. Lee, J.Y.Chi, «Экспериментальное исследование температурной зависимости пороговых характеристик в полупровод-

- никовых вертикально излучающих лазерах на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек», ФТП, 2006, Т.40, вып.10, сс.1264-1269.
6. С.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.Г. Кузьменков, Ю.М. Шерняков, И.И. Новиков, Н.Ю. Гордеев, В.В. Дюделев, Г.С. Соколовский, В.И. Кучинский, М.М. Кулагина, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Н.Н. Леденцов, «Вертикально-излучающие лазеры на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs», ФТП, 2006, Т.40, вып.5, сс. 633-638.
 7. S.A.Blokhin, N.A.Maleev, A.G.Kuzmenkov, A.V.Sakharov, M.M.Kulagina, Yu.M.Shernyakov, I.I.Novikov, M.V.Maximov, V.M.Ustinov, A.R.Kovsh, S.S.Mikhrin, N.N.Ledentsov, G.Lin, J.Y.Chi, «Vertical-cavity surface-emitting lasers based on submonolayer InGaAs quantum dots», IEEE J. Quantum Electron., 2006, V.42, No.9-10, pp. 851-858.
 8. A.G. Kuzmenkov, S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.P.Vasil'ev, A.E.Zhukov, V.M. Ustinov, «Optimal composition of microcavity structures with selectively oxidized apertures and DBRs», 14th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology (Russia, St Petersburg, June 26–30, 2006) p.105
 9. S.A. Blokhin, N.A. Maleev, A.G. Kuzmenkov, A.V. Sakharov, M.M. Kulagina, Yu.M. Shernyakov, I.I. Novikov, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, A.R. Kovsh, S.S. Mikhrin, N.N. Ledentsov, G. Lin and J.Y. Chi. «High-performance vertical-cavity surface-emitting lasers based on sub-monolayer InGaAs quantum dots», 14th International Symposium NANOSTRUCTURES: Physics and Technology (Russia, St Petersburg, June 26–30, 2006) p.9
 10. А.Г.Кузьменков, Н.А.Малеев, С.А.Блохин, М.В.Максимов, В.М.Устинов, «Вертикально-излучающие лазеры на основе полупроводниковых гетероструктур с квантовыми точками», Материалы VII Международного российско-украинского семинара «Нанопизика и наноэлектроника», 1-4 октября 2006 г, Санкт-Петербург, сс.44-45
 - 11.S.A.Blokhin, A.V.Sakharov, N.A.Maleev, M.M.Kulagina, Yu.M.Shernyakov, I.I.Novikov, N.Y.Gordeev, M.V.Maximov, A.G.Kuzmenkov, V.M.Ustinov, N.N.Ledentsov, A.R.Kovsh, S.S.Mikhrin, G.Lin, J.Y.Chi, «The impact of thermal

effects on the performance of vertical-cavity surface-emitting lasers based on submonolayer InGaAs quantum dots», *Semicond. Sci. Technol.*, 2007, V.22, No.3 ArtNo: #005.

12. А.Г. Кузьменков, С.А. Блохин, Н.А. Малеев, А.В. Сахаров, В.Г. Тихомиров, М.В. Максимов, В.М. Устинов, А.Р. Ковш, С.С. Михрин, Н.Н. Леденцов, Н.Р.Д. Yang, G. Lin, R.S. Hsiao, J.Y. Chi, «Использование пространственно упорядоченных массивов травленых отверстий для создания одномодовых вертикально излучающих лазеров на основе субмонослойных InGaAs-квантовых точек», *ФТП*, 2007, т.41, вып.10, сс.1241-1246.
13. A.G.Kuzmenkov, V.M.Ustinov, G.S.Sokolovskii, N.A.Maleev, S.A.Blokhin, A.G.Deryagin, S.V.Chumak, A.S.Shulenkov, S.S.Mikhrin, A.R.Kovsh, A.D.McRobbie, W.Sibbett, M.A.Cataluna, E.U.Rafailov, «Self-sustained pulsation in the oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers based on submonolayer InGaAs quantum dots», *Appl. Phys. Lett.*, 2007, V.91, No.12, ArtNo: #121106.
14. А.Г.Кузьменков, Н.А.Малеев, Г.С.Соколовский, С.А.Блохин, Е.В.Никитина, М.М.Кулагина, А.С.Шуленков, С.В.Чумак, С.С.Михрин, А.Р.Ковш, В.М.Устинов, «Самопульсация в вертикально-излучающих лазерах на основе субмонослойных InGaAs квантовых точек», 6th Belarussian-Russian Workshop «SEMICONDUCTOR LASERS AND SYSTEMS», 4-8 June 2007, Minsk, Belarus, Book of papers, pp.20-22
15. G.S.Sokolovskii, N.A.Maleev, A.G.Kuzmenkov, S.A.Blokhin, A.D.McRobbie, M.A.Cataluna, A.G.Deryagin, S.V.Chumak, A.S.Shulenkov, S.S.Mikhrin, A.R.Kovsh, V.I.Kuchinskii, V.M.Ustinov, W.Sibbett, E.U.Rafailov, «Self-sustained pulsation and signal peaking in the oxide-confined VCSELs based on submonolayer InGaAs quantum dots», CB7-6-WED, Int. Conf. on Lasers and Electro-Optics (CLEO-Europe), Munich, Germany, 17-22 June 2007

Цитированная литература

- [1] L.A.Coldren, and S.W.Corzine, «Diode lasers and photonic integrated circuits», Wiley, New York (1995)
- [2] K.D.Choquette and H.Q.Hou, «Vertical cavity surface emitting lasers: Moving from research to manufacturing», *Proc. IEEE*, **85**, 1730 (1997)
- [3] Ed. L.A.Coldren, H.Temkin and C.W.Wilmsen, «Vertical cavity surface emitting lasers» Cambridg Univ. Press (1999)
- [4] E. Towe, R. F. Leheny, and A. Yang, «A Historical perspective of the development of the vertical-cavity surface-emitting laser», *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **6**, 1458-1464 (2000).
- [5] J. S. Harris, Jr., «Tunable long-wavelength vertical-cavity lasers: the engine of next generation optical networks?», *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **6**, 1145-1160 (2000).
- [6] K.M. Geib et al., «Fabrication and performance of two-dimensional matrix addressable arrays of integrated vertical-cavity lasers and resonant cavity photodetectors», *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol.8, pp.943-947 (2002)
- [7] D.V. Plant et al., «256-channel bi-directional optical interconnect using VCSELs and photodiodes on CMOS», *J. Lightwave Techn.*, vol.19, pp.1093-1103 (2001)
- [8] «IBM and Agilent start optical interconnect program», *Compound Semiconductor*, 11 September (2003)
- [9] A.Chrvyakov, Y.Bely «Radar phased arrays for fighters», *Military Parade*, Sept. 2002
- [10] V.M.Ustinov, A.E.Zhukov, A.Y.Egorov and N.A.Maleev, «Quantum dot lasers», Oxford University Press (2003)
- [11] V. M.Ustinov, N. A.Maleev, A. R.Kovsh, and A. E.Zhukov, «Quantum dot VCSELs», *Phys. Stat. Sol. (a)*, **202**, 396 (2005)
- [12] J.K. Kim, R.L. Naone, L.A. Coldren, «Lateral carrier confinement in miniature lasers using quantum dots», *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **6**, 504 (2000)
- [13] V.M.Ustinov, A.E.Zhukov, «GaAs-based long-wavelength lasers, Semicond», *Semicon. Sci. Technol.*, **15**, R41 (2000)
- [14] K. Nakahara, M. Kondow, T. Kitatani, M.C. Larson and K. Uomi, «1.3- μm continuous-wave lasing operation in GaInNAs quantum-well lasers», *IEEE Photon. Technol. Lett.* **10**, 487 (1998)
- [15] T. Anan, K. Nishi, S. Sugou, M. Yamada, K. Tokutome, and A. Gomyo, «GaAsSb: A novel material for 1.3 μm VCSELs», *Electron. Lett.*, **34**, 2127 (1998)
- [16] D.L. Huffaker, G. Park, Z. Zhou, O.B. Shchekin and D.G. Deppe, «1.3 μm Room Temperature GaAs-Based Quantum Dot Laser», *Appl. Phys. Lett.* **73**, 2564 (1998)
- [17] V.M. Ustinov, N.A. Maleev, A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, A.Yu. Egorov, A.V. Lunev, B.V. Volovik, I.L. Krestnikov, Yu.G. Musikhin, N.A. Bert, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, N.N. Ledentsov and D. Bimberg, «InAs/InGaAs quantum dot structures on GaAs substrates emitting at 1.3 μm », *Appl. Phys. Lett.* **74**,2815 (1999)
- [18] Блохин С.А., Малеев Н.А., Кузьменков А.Г., Шерняков Ю.М., Новиков И.И., Гордеев Н.Ю., Дюделев В.В., Соколовский Г.С., Кучинский В.И., Кулагина М.М., Максимов М.В., Устинов В.М., Ковш А.Р., Михрин С.С., Леденцов Н.Н. «Вертикально-излучающие лазеры на основе массивов субмонослойных квантовых точек InGaAs» ФТП, Т.40, вып.5, сс. 633-638 (2006).