

На правах рукописи



НАДТОЧИЙ Алексей Михайлович

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НОВЫХ ТИПОВ  
ПОВЕРХНОСТНО-ИЗЛУЧАЮЩИХ ЛАЗЕРОВ  
С ВЕРТИКАЛЬНЫМ МИКРОРЕЗОНАТОРОМ

Специальность:

01.04.10 — физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2011

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

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

М.В. Максимов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

В.Ф. Агекян

СПбГУ

доктор физико-математических наук, профессор

Л.Е. Воробьев

СПбГПУ

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), кафедра радиотехнической электроники факультета электроники.

Защита состоится «15» декабря 2011 г. в 11<sup>30</sup> час. на заседании диссертационного совета Д002.205.02 при Учреждении Российской академии наук Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим высылать по вышеуказанному адресу ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «15» ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор физико-математических наук



Л.М. Сорокин

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## **Актуальность темы**

В настоящее время оптическая технология приема-передачи информации прочно заняла ведущие позиции в мире телекоммуникаций и является одной из самых быстро развивающихся областей науки и техники. Одним из ключевых элементов таких систем являются поверхностно-излучающие лазеры на основе вертикального микрорезонатора (ПИЛВМ). В отличие от традиционных полосковых лазеров, конструкция ПИЛВМ обеспечивает вывод излучения в вертикальном направлении, перпендикулярном плоскости полупроводниковой подложки, с существенно более узкой и симметричной диаграммой направленности [1]. К другим важным достоинствам ПИЛВМ относятся относительно высокая температурная стабильность, более высокое быстродействие, низкие пороговые токи вследствие малого объема резонатора и экономичная групповая/планарная технология изготовления приборов. Как результат, поверхностно-излучающие лазерные диоды находят применение не только в цифровых оптических системах связи, но и в устройствах ввода-вывода на оптических принципах (компьютерные «мыши» и др. манипуляторы), а также в датчиках и сенсорах различного типа [2].

Стремительно растущее с каждым годом количество пользователей компьютеров и глобальной информационной сети Internet накладывает новые требования к принципам и характеристикам функционирования ПИЛВМ. Так, необходимо повышать быстродействие лазеров в режиме прямой модуляции в 4 раза каждые 5 лет, что представляет собой огромную проблему. В самом деле, скорость передачи данных в режиме прямой токовой модуляции определяется шириной полосы модуляции лазера. В свою очередь, ширина полосы модуляции лазера ограничена, с одной стороны, эффектами насыщения усиления, которые препятствуют ускорению релаксационных эффектов с увеличением плотности мощности в резонаторе. С другой стороны, большая плотность мощности, необходимая для достижения высокой частоты релаксационных колебаний, приводит к перегреву, уменьшающему максимальное усиление. Кроме того, заметно ухудшаются спектральные характеристики (растёт ширина спектра излучения и сдвиг линии генерации с током, «чирп») и пространственное качество излучения [2]. Более того, большая часть излучения уходит в волноводные моды, приводя к возникновению режима само-пульсации (self-pulsation), увеличению оптических потерь в непрокачиваемых областях лазера и дополнительному падению максимального усиления активной среды [3], и, в конечном счете, к деградации динамических характеристик лазеров. Таким образом, повышение быстродействия ПИЛВМ может быть достигнуто путем увеличения дифференциального усиления активной области, а также использования лазерных резонаторов, свободных от существующих недостатков. В связи с этим данная диссертационная работа, направленная как на совершенствование традиционных ПИЛВМ путем

использования новых типов наноструктур для активной области, а также конструкций резонатора, позволяющих подавить паразитные волноводные моды, так и на исследование вертикально излучающих приборов принципиально новых конструкций (ПИЛВМ с монолитным электро-оптическим модулятором) представляется весьма актуальной.

**Основная цель работы** заключалась в теоретическом и экспериментальном исследовании новых типов быстродействующих ПИЛВМ в системе материалов Ga(In,Al)As диапазона излучения 850/980 нм, поиске путей оптимизации их активной области и конструкции с целью повышения эффективности и быстродействия.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- 1) Впервые теоретически исследованы процессы спонтанного излучения в различных типах ПИЛВМ и обнаружен эффект увеличения скорости спонтанного излучения в вертикальном направлении в антиволноводной конструкции поверхностно-излучающих лазеров, основанной на использовании вертикального микрорезонатора с показателем преломления меньшим, чем эффективный показатель преломления распределенных брегговских отражателей;
- 2) Впервые исследованы структурные и оптические свойства наногетероструктур на основе InAs нановнедрений, сформированных в GaAs/AlGaAs квантовой яме путем осаждения InAs с эффективной толщиной меньше критической (1.6 монослоя), и продемонстрирована перспективность их применения в качестве активной области для быстродействующих (>40 Гб/с) ПИЛВМ оптического диапазона 850 нм;
- 3) Впервые экспериментально исследованы динамические характеристики нового оптоэлектронного прибора - ПИЛВМ с интегрированным электро-оптическим модулятором и продемонстрирована температурная независимость эффективности модуляции;
- 4) Впервые показана принципиальная возможность передачи данных с помощью ПИЛВМ с интегрированным электро-оптическим модулятором на скоростях более 10 Гб/с.

### **Практическая значимость результатов:**

1. Использование субмонослойных внедрений InAs в качестве активной области, а также конструкций, основанных на принципе подавлении паразитных мод (антиволноводный дизайн) перспективно для повышения эффективности и быстродействия ПИЛВМ диапазона 850/980 нм. Такие приборы могут найти широкое применение в сетях хранения данных и локальных вычислительных сетях (СХД/ЛВС), а также при межчиповой передаче данных в суперкомпьютерах;
2. ПИЛВМ с интегрированным электро-оптическим модулятором представляет собой новый тип миниатюрного оптического источника для

передачи информации. Благодаря использованию не прямой модуляции излучения данные приборы лишены некоторых ограничений в быстродействии и условиях работы, характерных для обычных ПИЛВМ, и могут совершить прорыв в оптоволоконных коммуникациях, предоставив возможность передачи информации со скоростью до 100 Гб/с на один канал.

### **Научные положения, выносимые на защиту**

1. В антиволноводной конструкции поверхностно-излучающих лазеров, основанной на использовании вертикального микрорезонатора с показателем преломления меньшим, чем эффективный показатель преломления распределенных брегговских отражателей, излучение в волноводные моды, распространяющиеся в горизонтальном направлении, подавлено, а скорость спонтанной излучательной рекомбинации в вертикальном направлении возрастает по сравнению с поверхностно-излучающими лазерами на основе вертикального микрорезонатора традиционной конструкции;
2. В поверхностно-излучающих лазерах антиволноводной конструкции использование вертикального микрорезонатора на основе AlGaAs с содержанием алюминия более 80% позволяет увеличить толщину оксидной апертуры и повысить частоту отсечки паразитной РС цепочки, образованной элементами конструкции.
3. Использование InAs нановнедрений, сформированных в GaAs/AlGaAs квантовой яме путем осаждения InAs с эффективной толщиной меньше критической (1.6 монослоя), в качестве активной области поверхностно-излучающих лазеров с вертикальным микрорезонатором позволяет реализовывать длину волны генерации в диапазоне 850 нм, а также достигать малых значений К-фактора (0.33-0.38 нс).
4. Модуляция излучения поверхностно-излучающего лазера с вертикальным микрорезонатором с помощью монолитного электро-оптического модулятора, сформированного в верхнем распределенном брегговском отражателе и осуществляющего сдвиг его стоп-зоны под действием прикладываемого электрического поля, позволяет реализовать сверхскоростную передачу данных скоростью более 10 Гб/с. Эффективность модуляции такого прибора температурно независима.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

- Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и северо-запада, Санкт-Петербург, 29-30 октября, 2009;

- Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и северо-запада, Санкт-Петербург, 27-28 октября, 2010;
- 12 всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 25-29 октября 2010;
- 9 Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября-3 октября, 2009.
- «Rusnanotech'09, международный форум по нанотехнологиям», Москва, 6-8 октября, 2009;
- 17th Int. Symp., «Nanostructures: Physics and Technology», Minsk, Belarus, June 22-26, 2009;
- 18th Int. Symp., «Nanostructures: Physics and Technology», Saint Petersburg, Russia 21–26, June 2010;
- 19th Int. Symp., «Nanostructures: Physics and Technology», Ekaterinburg, Russia 20–25, June 2011;
- International Conference SPIE, San Jose, CA, USA, 25 January 2009;
- International Conference SPIE, San Francisco, California, USA, 25 January 2010;
- International Conference SPIE, San Francisco, California, USA, 26 January 2011.

## ***Публикации***

Основные результаты, содержащиеся в диссертации, опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 10 в научных статьях и в материалах 6 конференций.

## **Структура и объем диссертации**

### ***Содержание работы***

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** носит обзорный характер. В разделе 1.1 описаны принципы работы систем передачи данных на основе волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), дано описание принципов и алгоритмов кодирования, а также сформулированы применяемые методы и условия тестирования таких систем. В разделе 1.2 приведены сведения о существующих стандартах длин волн в ВОЛС и особенностях их применения. Также дано пояснение использованию стандартов длин волн 850 и 980 нм для сетей малого радиуса действия. Раздел 1.3 посвящен источникам излучения для ВОЛС. Показаны преимущества ПИЛВМ перед торцевыми лазерами и светоизлучающим диодами, а также

рассмотрены теоретические модели, описывающие динамические характеристики ПИЛВМ при прямой токовой модуляции. В заключающем разделе 1.4 подробно рассмотрены методы повышения быстродействия ПИЛВМ, разработанные в последнее десятилетие различными научными группами.

**Вторая глава** посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию антиволноводного ПИЛВМ.

Раздел 2.1 объясняет идею использования антиволноводной конструкции ПИЛВМ. В конструкции обычного ПИЛВМ резонатор с активной областью расположен между верхним и нижним РБО. Спонтанное излучение из активной области происходит во всех направлениях, и только незначительная его часть попадает в лазерную моду [4]. Более того, резонатор, имеющий более высокий средний коэффициент преломления, чем окружающие его брегговские зеркала, образует волновод в плоскости эпитаксиальных слоев (см. рис. 1,а). В ПИЛВМ этот эффект является нежелательным по двум причинам. Во-первых, значительная часть спонтанного излучения уходит в волноводную моду, распространяющуюся в горизонтальном направлении, тем самым уменьшая модальное усиление и увеличивая порог генерации в вертикальном направлении. Перераспределенный таким образом свет поглощается в активной области вне токовой апертуры, что может приводить к дополнительным потерям, самопульсации и нагреву. Во-вторых, в сверхвысокочастотных ПИЛВМ, которые представляют из себя колонну с диаметром порядка 10 мкм, горизонтальные волноводные моды могут преодолеть порог генерации. Такие моды, известные как моды шепчущей галереи (МШГ), обладают высокой добротностью и могут конкурировать с лазерной модой, что приведет к серьезному подавлению усиления и значительному ухудшению приборных характеристик ПИЛВМ на высоких частотах. Основная идея антиволноводного ПИЛВМ состоит в использовании резонатора, обладающего более низким показателем преломления, чем окружающие зеркала [5].

Раздел 2.2 содержит описание антиволноводной конструкции ПИЛВМ (А-ПИЛВМ (рис.1 а), а также результаты расчетов и их анализ. Нами исследовался ПИЛВМ стандартной конструкции с GaAs  $\lambda$ -резонатором, а также два варианта антиволноводной конструкции: с длинами резонатора  $\lambda/2$  и  $3\lambda/2$ . Резонатор в последних двух случаях был сформирован с помощью  $Al_{0.8}Ga_{0.2}As$  (слоя с низким показателем преломления) и тонким слоем GaAs в центре, который содержит квантовые точки (ямы).

С помощью теоретического подхода основанного на использовании функций Грина было рассчитано угловое и спектральное распределение спонтанного излучения в исследуемых ПИЛВМ. Также были получены интегральные оценки скоростей излучательной рекомбинации для планарной волноводной и вертикальной мод. Для нормировки полученных данных была использована скорость спонтанного излучения в объемном материале. Расчет углового распределения скорости спонтанного излучения в структурах показал,

что в стандартном ПИЛВМ около 36% спонтанно излучаемого света уходит в волноводную моду (что примерно равно доле лазерной моды), а в антиволноводных конструкциях излучение в волноводные моды практически отсутствует. Кроме того, подавление излучения в волноводную моду приводит к увеличению темпа спонтанного излучения в наклонные и лазерные моды. Так, в случае  $\lambda/2$ -А-ПИЛВМ доля спонтанного излучения в лазерную моду возросла на 20%. Анализ спектральной зависимости скорости спонтанного излучения (рис.1б) подтверждает данные выводы. Излучение в волноводную моду является нерезонансным эффектом и не зависит от длины волны, в то время, как излучение в вертикальную лазерную моду возможно только при  $\lambda < \lambda_0$  ( $\lambda_0$  — длина волны фундаментальной моды ПИЛВМ). Таким образом, резкий скачок зависимостей на графике в районе  $\lambda_0$  характеризует долю излучения в лазерную моду ПИЛВМ. В  $\lambda/2$ -А-ПИЛВМ она на 20% выше, чем у стандартного ПИЛВМ. В случае же  $3\lambda/2$ -А-ПИЛВМ уменьшение фактора оптического ограничения вследствие большей длины резонатора приводит к перераспределению излучения волноводных мод, в основном, к наклонным, а не лазерным модам. При этом доля излучения в лазерную моду остается на уровне стандартного ПИЛВМ. В заключение раздела приведены оценки возможности возникновения лазерной генерации на модах шепчущей галереи. Согласно расчетам такая ситуация реальна для ПИЛВМ малых размеров (радиус мезы — 10 мкм, радиус токовой апертуры — 5 мкм) и стандартных условиях работы (усиление среды более  $50 \text{ см}^{-1}$ ).

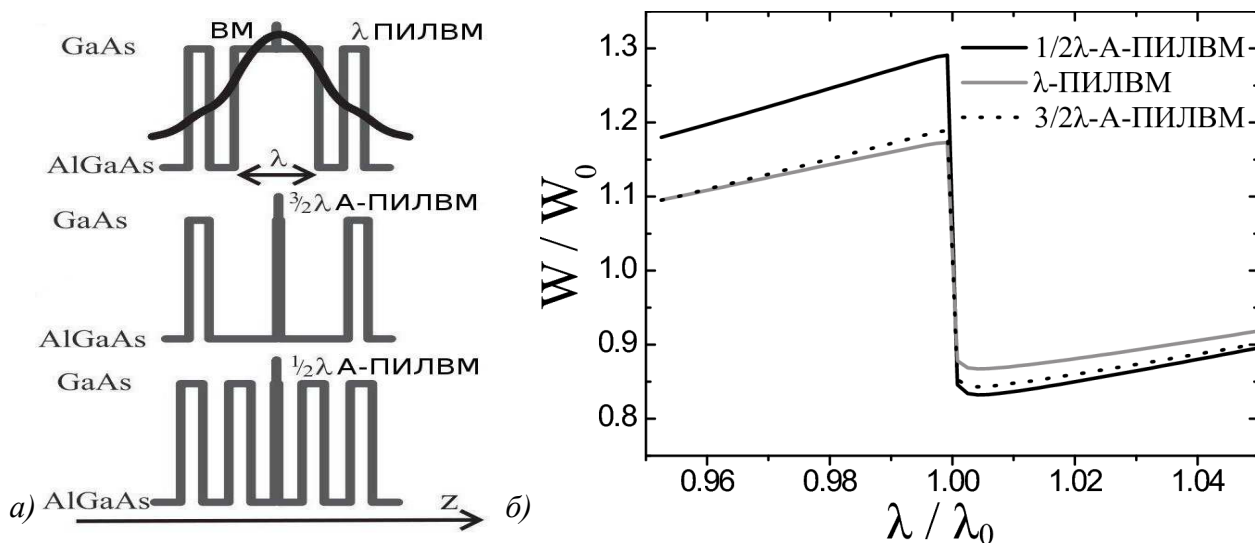
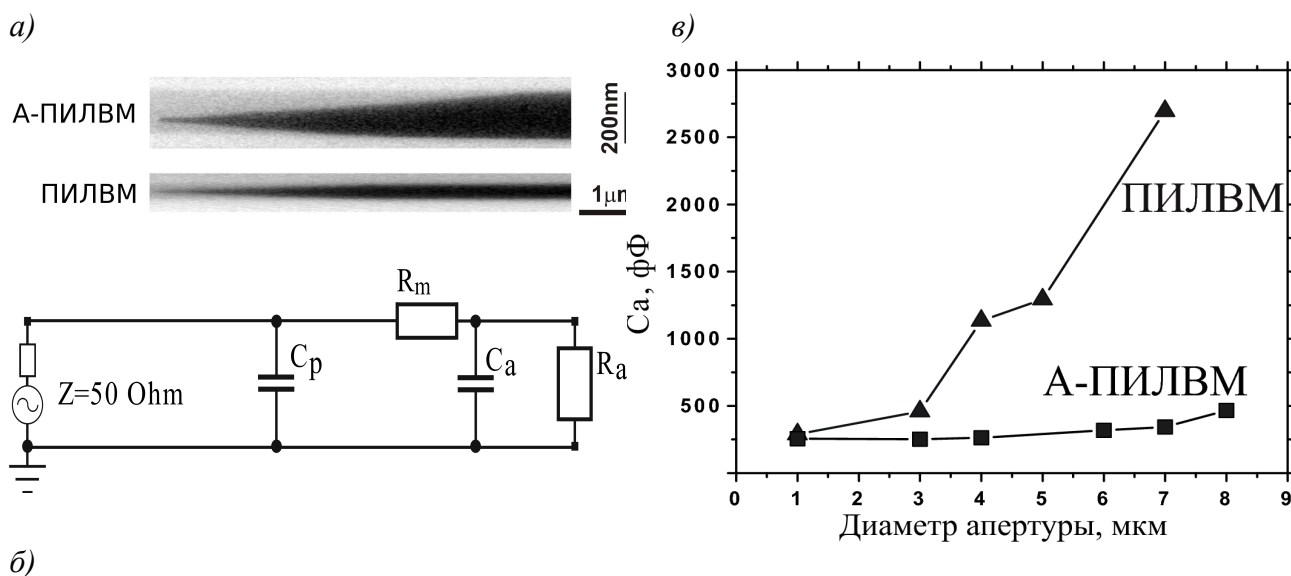


Рис. 1: а) Схематическое изображение профилей показателя преломления слоев рассматриваемых конструкций ПИЛВМ. Сверху — стандартный ПИЛВМ (также показано распределение волноводной моды), в центре —  $3\lambda/2$  — А-ПИЛВМ, снизу -  $\lambda/2$ -А-ПИЛВМ. б) Спектральная зависимость нормированной скорости спонтанного излучения для ПИЛВМ различных конструкций.  $\lambda_0$  — длина волны лазерной генерации,  $W_0$  — интегральная скорость спонтанного излучения в объемном материале.

В разделе 2.3 представлены результаты экспериментальных исследований ПИЛВМ с антиволноводной конструкцией диапазона 980 нм. Были синтезированы две лазерные структуры. В  $\lambda$ -микрорезонаторе ПИЛВМ



стандартной конструкции активная область окружена слоями  $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ , в то время как в антиволноводной конструкции (А-ПИЛВМ) использован  $3\lambda/2$ -микрорезонатор, содержащий слои  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  (рис.1а). В качестве активной области были использованы слои с субмонослойными квантовыми точками  $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$  [6], излучающие в диапазоне 960-980 нм. Также использовались легированные РБО и конусообразная оксидная токовая апертура.



б)

Рис. 2: а) микрофотография профиля оксидной апертуры после окисления, серый цвет - соответствует слою  $\text{AlGaAs}$ , черный - оксиду  $\text{AlGaO}$ ; б) эквивалентная схема для моделирования высокочастотных свойств конструкции ПИЛВМ; в) значения емкости  $C_a$ , как функция размера токовой апертуры.

Характеристики ПИЛВМ стандартной и антиволноводной конструкций с диаметром токовой апертуры 3 мкм в непрерывном режиме похожи: пороговые токи в обоих случаях менее 0.3 мА, но при этом А-ПИЛВМ демонстрирует 10% выигрыш в дифференциальной эффективности и максимальной выходной мощности. Увеличение дифференциальной эффективности А-ПИЛВМ объясняется 25% увеличением пропускания РБО из-за изменения контраста на интерфейсе микрорезонатор-РБО. Микрофотографии сканирующего электронного микроскопа с профилем оксидной апертуры выявили 4-х кратное увеличение толщины оксида у А-ПИЛВМ (рис.2а). Это связано с эффектом бокового (вертикального) окисления слоев  $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$  микрорезонатора антиволноводной конструкции от уже окисленных слоев апертуры. Для исследования высокочастотных электрических свойств приборов был проведен малосигнальный анализ электрического отражения. Моделирование полученных кривых электрического отражения с помощью модели [7] выявило значительное уменьшение паразитной емкости оксидного слоя апертуры в А-ПИЛВМ как следствие увеличения толщины оксида. На рис.2 в приведена зависимость полученных значений емкости  $C_a$  от размера апертуры.  $C_a$  — ключевой элемент эквивалентной схемы, определяющей частоту отсечки паразитной RC цепочки, образованной элементами конструкции прибора, и

представляющей собой паразитный фильтр низких частот (ФНЧ, рис.2 б). В ПИЛВМ  $C_a$  быстро растет с размером апертуры, что может быть объяснено только вкладом оксидной составляющей емкости. Расчеты частоты отсечки ФНЧ для приборов с 3 мкм апертурой, показали, что полоса пропускания при использовании антиволноводной конструкции микрорезонатора возросла почти в два раза (с 6 до 11 ГГц).

В **третьей главе** приведены результаты исследований ПИЛВМ диапазона 850 нм с активной областью на основе нановнедрений, сформированных методом осаждения InAs с эффективной толщиной меньше критической (т.е. соответствующей формированию квантовых точек по механизму роста Странски-Крастанова).

Раздел 3.1 посвящен структурным и оптическим исследованиям свойств активной области на основе InAs внедрений. Было синтезировано три структуры, в которых нановключения формировались путем осаждением InAs номинальной толщиной 0.5, 0.9 и 1.5 монослоя в квантовую яму GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As. Результаты исследований структур методом рентгеновской дифракции и моделирование полученной кривой качания позволило определить толщины слоев. Отклонение от номинальных ростовых значений составило менее 10%. Исследования слоев методом электронной микроскопии высокого разрешения показали, что во всех выращенных структурах наблюдается латеральная модуляция состава по In в слое InAs/GaAs, что приводит к образованию островков размером 2-3 нм с повышенным содержанием In. При этом концентрация In в областях между островками составляет менее 20%. Исследований синтезированных образцов методом спектроскопии фотолюминесценции (ФЛ) проводились при комнатной температуре и возбуждении NdYAG-лазером (длина волны 532 нм) с плотностью 5 кВт/см<sup>2</sup>. Пик ФЛ сдвигается в длинноволновую сторону (от 820 нм до 860 нм) с увеличением номинальной толщины слоя InAs. Кроме того, согласно сопоставлению расчета положения квантово-размерных уровней для квантовой ямы GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As с измеренными значениями, добавление InAs в такую квантовую яму приводит к длинноволновому сдвигу излучения на 20-40 мэВ. С учетом обнаруженной существенной латеральной модуляции состава по In это означает, что внедрения InAs в GaAs/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As квантовую яму являются центрами локализации носителей заряда даже в условиях комнатной температуры и концентрации носителей, характерной для лазерной генерации. В этом случае захват носителей заряда на такие центры носит коррелированный (экситонный) характер, что приводит к экситонному механизму рекомбинации, и, соответственно, к увеличению дифференциального усиления до 2 раз по сравнению со случаем некоррелированного захвата [8].

В разделе 3.2 представлены результаты исследований статических характеристик ПИЛВМ с активной областью на основе нановнедрений InAs. Для реализации длины волны излучения около 850 нм в качестве активной области был выбран вариант осаждения InAs с номинальной толщиной 0.5

монослоя. Также в ПИЛВМ были использованы легированные  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  зеркала и оксидная апертура в совокупности с квазиантиволноводной конструкцией микрорезонатора, в которой минимизирован фактор оптического ограничения для паразитных волноводных мод.

Исследования приборных характеристик ПИЛВМ были проведены для приборов с токовыми апертурами диаметром 3 и 5 мкм. Приборы с диаметром токовой апертуры 3 мкм демонстрирует одномодовую (подавление боковых мод более 30 дБ) лазерную генерацию вблизи 835 нм при комнатной температуре с пороговым током 0.35 мА и максимальной выходной мощностью до 0.8 мВт. Исследования статических характеристик также позволили выявить повышенное электрическое сопротивление РБО, что может быть связано с накоплением Ве (легирующей примеси) на интерфейсах слоев из-за быстрой диффузии в процессе роста.

В разделе 3.3 приведены описание и результаты исследований высокочастотных свойств приборов методом малосигнального частотного анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и отражения электрического сигнала (параметры  $S_{21}$  и  $S_{11}$ ). Моделирование АЧХ, записанных при различных рабочих токах, с помощью модели [9] позволило получить значения ключевых параметров, ограничивающих быстродействие прибора. На рис.3а представлен график зависимости частоты релаксационных колебаний (резонансной частоты) от корня рабочего тока над порогом, а также зависимость частоты отсечки ФНЧ. Одномодовый прибор имеет большой наклон линейного участка зависимости резонансной частоты от корня рабочего тока над порогом (D-фактор), что связано с меньшим объемом оптической моды в микрорезонаторе и позволяет достигать высоких резонансных частот (17 ГГц) при сравнительно малых рабочих токах. Однако, низкие значения частоты отсечки ФНЧ, связанные с обнаруженным ранее повышенным электрическим сопротивлением РБО, не позволяют полностью реализовать потенциал приборов. В то же время зависимость коэффициента затухания (дэмпфирования, *damping factor*) одномодового прибора от квадрата резонансной частоты (рис.3 б) позволяет оценить К-фактор, характеризующий высокочастотный потенциал активной области. Низкие значения К-фактора (0.33-0.38 нс) позволяют сделать вывод о том, что в случае оптимизации конструкции прибора и повышения частоты отсечки паразитного ФНЧ, будет достигнута полоса модуляции до 27 ГГц и скорость передачи данных не менее 42 Гб/с. В заключение раздела приведены результаты исследований передачи данных с помощью многомодового чипа при скорости 20 Гб/с. Продемонстрирована передача данных с уровнем ошибок менее  $10^{-12}$  и открытая глаз-диаграмма с отношением сигнала к шуму более 5.

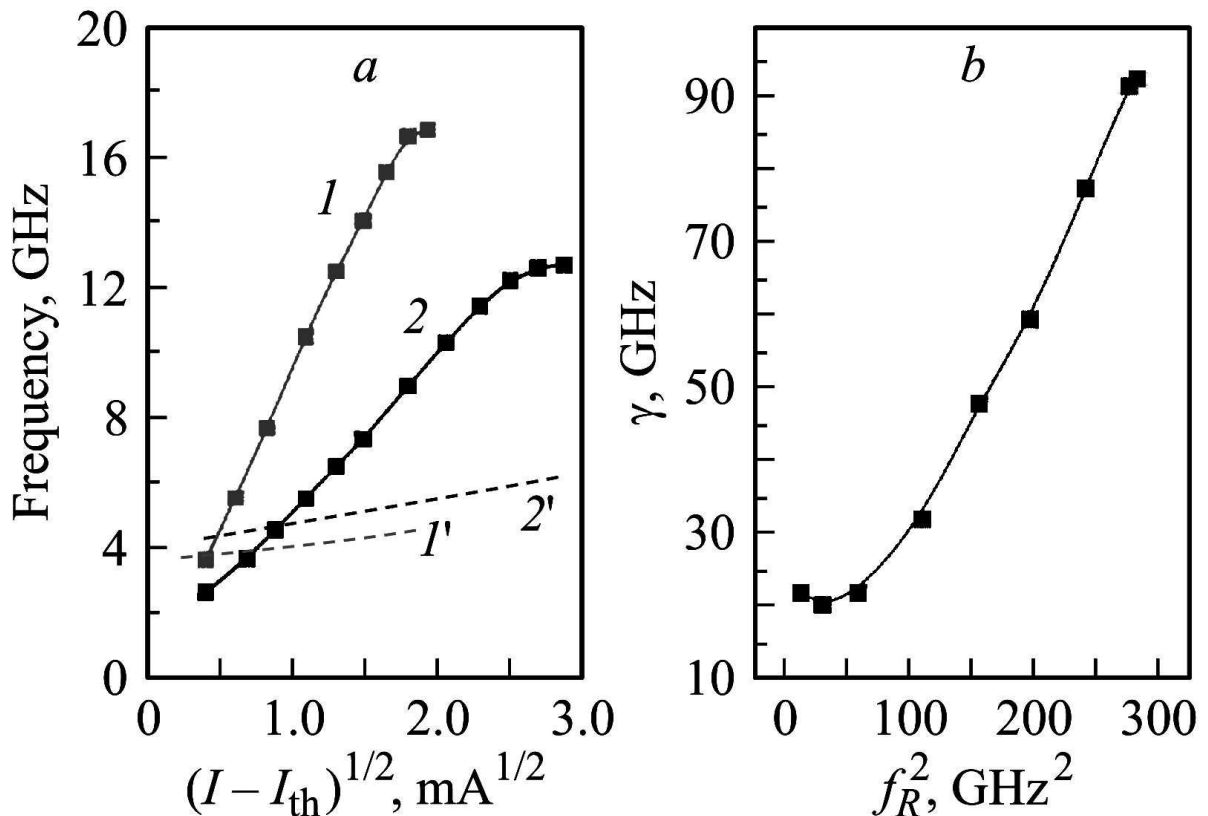


Рис. 3: а) Зависимость резонансной частоты  $f_r$  (сплошная линия) и частоты отсечки (пунктирная линия) от корня рабочего тока над порогом для: 1 - одномодового (диаметр токовой апертуры  $d=3\text{ мкм}$ ) и 2 - многомодового ( $d=5\text{ мкм}$ ) приборов; б) Зависимость коэффициента затухания от квадрата резонансной частоты для многомодового прибора.

В **четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований ПИЛВМ диапазона 850 нм с монолитным электро-оптическим модулятором (ЭОМ).

В разделе 4.1 дано обоснование разработки таких приборов, описан принцип их работы и представлена предложенная ранее [10] схема реализации прибора. Модуляция излучения основана на электро-оптическом эффекте, а именно на свойстве материала изменять показатель преломления под действием электрического поля. В полупроводниковых квантово-размерных структурах электрическое поле, приложенное перпендикулярно слоям барьера вызывает его наклон, а, следовательно, и длинноволновое смещение квантово-размерных уровней. Этот феномен, известный как квантово-размерный эффект Штарка, заключается в том, что комплексный показатель преломления (поглощения и преломления) полупроводниковой квантово-размерной среды меняется в зависимости от приложенного электрического поля, причем величина электро-оптического эффекта в квантово-размерных структурах может быть значительно выше, чем в объемных. Достоинство такого подхода состоит в возможности технологически простой вертикальной интеграции модулятора с ПИЛВМ, а использование не прямой модуляции излучения снимает

ограничения в быстродействии, характерные для прямой токовой модуляции.

В разделе 4.2 приведено описание и результаты исследований статических характеристик приборов. ПИЛВМ с модулятором (ЭОМ-ПИЛВМ) состоит из двух основных частей, составляющих единый монолитный прибор: вертикально-излучающий лазер и модуляторная ЭОМ секция, являющаяся частью верхнего РБО (рис. 4а). Вертикально-излучающий лазер (ВИЛ секция), представляет собой стандартную конструкцию ПИЛВМ, включающую несколько квантовых ям (КЯ) в качестве активной области и оксидную токовую апертуру. ЭОМ секция была выращена поверх этой структуры и включала также часть РБО, легированного Zn, нелегированную часть зеркала с ЭОМ средой и верхнюю часть зеркала с защитным слоем GaAs, легированную Si. Положение энергетических уровней КЯ в ЭОМ секции сдвинуто в коротковолновую сторону относительно КЯ в ВИЛ секции, чтобы избежать поглощения излучения. Изменение напряжения на ЭОМ секции посредством электро-оптического эффекта приводит к модуляции отражения верхнего РБО (рис.4б). Для тестирования приборов на пластине были приготовлены чипы лазеров в высокочастотной геометрии ЭОМ секции (типа «земля-сигнал-земля») с размерами от 25 до 36 и от 45 до 56 мкм для ЭОМ и ВИЛ секций соответственно.

В непрерывном режиме были исследованы ватт-вольт-амперные характеристики, а также зависимости фототока ЭОМ секции при различных напряжениях на данной секции при комнатной и повышенной (85 °С) температурах. В случае, когда напряжение к ЭОМ секции не прикладывалось, прибор 25 мкм показал максимальную мощность 8 мВт на длине волны 845 нм в непрерывном режиме комнатной температуре. При этом, прикладывая напряжение к ЭОМ секции в пределах 2 В можно добиться ослабления выходной мощности прибора более чем на 3 дБ. Значения фототока ЭОМ секции при этом возрастают. Сопоставление зависимости фототока ЭОМ секции и ватт-амперной характеристики прибора показало, что более 30% ослабления выходной мощности не связано с поглощением излучения в ЭОМ секции, и может быть объяснено только изменением отражения РБО вследствие электро-оптического эффекта. Исследования работы ЭОМ-ПИЛВМ при повышенных температурах показали, что как при комнатной так и повышенной температуре ЭОМ секция позволяет модулировать излучение более чем на 2 дБ при фиксированных рабочих условиях. Эти данные подтверждают высокую температурную стабильность эффективности модуляции выходной мощности ЭОМ-ПИЛВМ.

В разделе 4.3 представлены результаты исследований высокочастотной передачи данных с помощью ЭОМ-ПИЛВМ, которые были проведены в формате NRZ (без возвращения к нулю) с помощью псевдослучайной последовательности битов (PRBS) длиной  $(2^7 - 1)$  и амплитуде модуляции ЭОМ секции 1 В, средняя выходная мощность прибора составила 1 мВт. Для таких приборов была продемонстрирована открытая глаз-диаграмма вплоть до

скоростей передачи 10 Гб/с (рис.4в). Эти результаты доказывают возможность высокоскоростной модуляции выходной оптической мощности вертикально-излучающих лазеров с помощью электро-оптической модуляции отражения, а также потенциал концепции ЭОМ-ПИЛВМ для применения в бюджетных сверхвысокоскоростных микролазерах и светоизлучающих диодах, используемых в современных телекоммуникационных приложениях. Также ожидается значительное увеличение быстродействия ЭОМ-ПИЛВМ при относительно простой оптимизации конструкции: согласование импеданса модуляторной секции и снижение ее паразитной емкости.

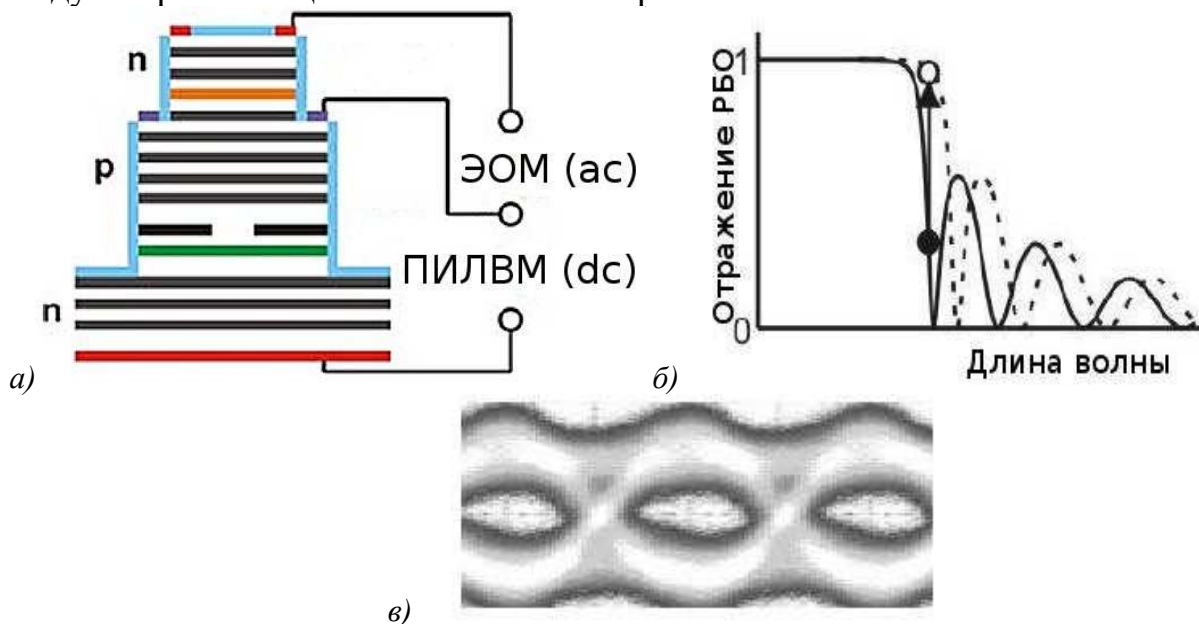


Рис. 4 : а) Схема ЭОМ-ПИЛВМ: на ЭОМ секцию подается переменный сигнал; лазерная секция (ПИЛВМ) работает при постоянном смещении; б) принцип работы ЭОМ-ПИЛВМ с модулируемым отражением РБО: при приложении напряжения стопзона РБО (сплошная линия) сдвигается в длинноволновую сторону (пунктир), в) Открытая глаз-диаграмма для ЭОМ-ПИЛВМ с размером мезы 25 мкм , полученная при 25° С и 10 Гб/с. Амплитуда модуляции 1 В, средняя оптическая мощность 1 мВт.

В заключении приведены результаты работы, которые сводятся к следующему:

1. Теоретически исследован новый тип ПИЛВМ антиволноводной конструкции в котором вертикальный микрорезонатор имеет показатель преломления меньше, чем эффективный показатель преломления распределенных брегговских отражателей. Проведено сравнение пространственной и спектральной зависимости скорости спонтанного излучения для ПИЛВМ стандартной и антиволноводной конструкций.
2. Показано, что в ПИЛВМ стандартной конструкции с GaAs микрорезонатором существенная часть спонтанного излучения (около 36%) уходит в волноводную моду, распространяющуюся в горизонтальном направлении, что уменьшает модальное усиление в вертикальном направлении и увеличивает порог генерации.
3. Теоретически показано, что антиволноводная конструкция

микрорезонатора ПИЛВМ на основе слоев с низким коэффициентом преломления ( $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ) позволяет подавить излучение в планарный волновод и перераспределить спонтанное излучение в вертикальные и наклонные моды. В антиволноводной конструкции ПИЛВМ с  $\lambda/2$  микрорезонатором доля спонтанного излучения в лазерную моду на 20% выше, чем у стандартного ПИЛВМ.

4. Проведено экспериментальное сравнение ПИЛВМ стандартной ( $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{As}$ ) и антиволноводной ( $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ ) конструкции резонатора диапазона 980 нм с оксидной токовой апертурой и активной областью на основе субмонослойных квантовых точек. Прибор с антиволноводной конструкцией продемонстрировал более высокую дифференциальную эффективность, а также значительное увеличение (с 6 до 11 ГГц) частоты отсечки паразитного фильтра низких частот, обусловленного элементами конструкции прибора. Показано, что эти факты связаны с меньшим временем жизни фотона в резонаторе антиволноводной конструкции, а также уменьшением паразитной емкости оксидного слоя апертуры вследствие 4-х кратного увеличения его толщины.
5. Исследованы структурные и оптические свойства наногетероструктур, сформированных в GaAs/AlGaAs квантовой яме путем осаждения InAs с эффективной толщиной меньше критической (1.6 монослоя), и предназначенных для использования в качестве активной области ПИЛВМ диапазона 850 нм. Обнаружена сильная латеральная модуляция состава In в таких структурах с образованием In-обогащенных островков с характерным размером  $\sim 2\text{-}3$  нм. Показано, что в зависимости от количества осажденного InAs (от 0.5 МС до 1.5 МС) длина волны излучения меняется в диапазоне (от 825 до 860 нм).
6. Обнаружено, что использование InAs нановнедрений в квантовой яме GaAs/AlGaAs приводит к дополнительному длинноволновому сдвигу излучения на 20-40 мЭВ, что свидетельствует о достаточно сильном локальном изменении зонной структуры и формировании центров локализации, приводящих к коррелированному захвату носителей заряда и повышению дифференциального усиления среды.
7. Исследования высокочастотных лазерных свойств ПИЛВМ на основе наногетероструктур с InAs нановнедрениями позволили определить К-фактор, который составил 0.33-0.38 нс, и продемонстрировать принципиальную возможность достижения резонансных частот более 17 ГГц, что соответствует предельной теоретической ширине полосы модуляции прибора 27 ГГц и скорости передачи данных более 40 Гб/с. Вследствие низкой частоты отсечки паразитного фильтра низких частот цифровая оптическая передача данных по NRZ-формату с коэффициентом ошибок  $\text{BER} < 10^{-12}$  была продемонстрирована на скоростях до 20 Гб/с.
8. Реализованы и экспериментально исследованы ПИЛВМ с монокристаллическим электро-оптическим модулятором. Показано, что электро-оптически

чувствительная среда на основе квантово-размерных структур, интегрированная в верхний РБО и модулирующая под действием прикладываемого напряжения пропускание зеркала, позволяет получить коэффициент контрастности модуляции излучения более 2 дБ в диапазоне температур от 25 до 85 °С при фиксированных условиях работы лазера.

9. Впервые продемонстрирована возможность передачи данных с помощью ПИЛВМ с монолитным электро-оптическим модулятором на скоростях более 10Гб/с.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

1. S.A. Blokhin, A.V. Sakharov, A.M. Nadtochy, M.M. Kulagina, Yu.M. Zadiranov, N.Yu. Gordeev, M.V. Maximov, V.M. Ustinov, N.N. Ledentsov, E. Stock, T. Warming, D. Bimberg, "The impact of thermal effects on emission characteristics of asymmetrical AlGaO-waveguide microdisks based on quantum dots", Appl. Phys. Lett., **91**, 121108, pp.121108-1-121108-3, 2007;
2. А.М. Надточий, С.А. Блохин, А.В. Сахаров, М.М. Кулагина, Ю.М. Задиранов, Н.Ю. Гордеев, М.В. Максимов, В.М. Устинов, Н.Н. Леденцов, Е. Шток, Т. Варминг, Д. Бимберг, "Влияние уровня возбуждения на оптические свойства микродиска GaAs-AlGaO с активной областью на основе квантовых точек InAs", ФТП, **42**, (10), 1252-1257, 2008;
3. A.M. Mintairov, Y. Chu, Y. He, S. Blokhin, A. Nadtochy, M. Maximov, V. Tokranov, S. Oktyabrsky and J.L. Merz, "High-spatial-resolution near-field photoluminescence and imaging of whispering-gallery modes in semiconductor mikrodisks with embedded quantum dots", Phys. Rev. B, **77**, 195322-1-195322-7, 2008;
4. N.N. Ledentsov, J.A. Lott, V.A. Schukin, H. Quast, F. Hopfer, G. Fiol, A. Mutig, P. Moser, T. Germann, A. Strittmatter, L.A. Karachinsky, S.A. Blokhin, I.I. Novikov, A.M. Nadtochi, N.D. Zakharov, P. Werner and D. Bimberg "Quantum dot insertions in VCSELs from 840 to 1300 nm: growth, characterization and device performance", proc of SPIE, vol. **7224** 72240P-1, 2009;
5. A.Mutig, S.A. Blokhin, A.M. Nadtochiy, G. Fiol, J.A. Lott, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov and D. Bimberg, "Frequency response of large aperture oxide-confined 850 nm vertical cavity surface emitting lasers", Appl. Phys. Lett. **95**, 131101, 2009;
6. N.N. Ledentsov, J.A. Lott, V.A. Shchukin, D. Bimberg, A. Mutig, T.D. Germann, J.-R. Kropp, L.Ya. Karachinsky, S.A. Blokhin, A.M. Nadtochiy, «Optical components for very short reach applications at 40 G/s and beyond», Proc. of SPIE, vol. **7597**, 75971F-1, 2010;
7. A.Mutig, S.A. Blokhin, A.M. Nadtochiy, G. Fiol, J.A. Lott, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov and D. Bimberg, «High-speed 850 nm oxide-confined



- VCSELs for DATACOM applications», Proc. of SPIE, vol. **7615** 76150N-1, 2010;
8. А.М.Надточий, С.А.Блохин, А.Мутиг, Дж.Лотт, Н.Н.Леденцов, Л.Я.Карачинский, М.В.Максимов, В.М.Устинов, Д.Бимберг, “Быстродействие вертикально излучающих AlGaAs лазеров с активной средой на основе субмонослойных внедрений InAs”, ФТП, **45**, 688 (2011);
  9. T.D. Germann, A. Strittmatter, A. Mutig, A.M. Nadtochiy, J.A. Lott, S.A. Blokhin, L. Ya. Karachinsky, V.A. Shchukin, N.N. Ledentsov, U.W. Pohl and D. Bimberg, "Monolithic electro-optically modulated vertical cavity surface emitting laser with 10 Gb/s open-eye operation", Phys. Status Solidi C, **7** (10), 2552-2554, 2010;
  10. Н.В. Крыжановская, С.А. Блохин, М.В. Максимов, А.М. Надточий, А.Е. Жуков, К.В. Федорова, Н.Н. Леденцов, В.М. Устинов, Н.Д. Ильинская, Д. Бимберг, “Влияние параметров AlGaAs/(AlGa)<sub>x</sub>O<sub>y</sub> пьедестала на характеристики микродискового лазера с активной областью на основе InAs/InGaAs-квантовых точек”, ФТП **45**(7), сс. 992, 2011;
  11. S.A. Blokhin, J.A. Lott, G. Fiol, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, A. Mutig, A.M. Nadtochiy, L. Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, V.A. Schukin and D. Bimberg "High-speed (~40 Gbit/s) oxide-confined 850 nm VCSELs", Proc. 17th Int. Symp. "Nanostructures and Technology", 2009;
  12. А.М. Надточий, С.А. Блохин, Л.Я. Карачинский, И.И. Новиков, М.В. Максимов, Н.Н. Леденцов, “Вертикально излучающий лазер на основе субмонослойных наноразмерных вclusions InAs/AlGaAs диапазона 850 нм для высокоскоростной (20 Гб/с) передачи данных”, Конференция (школа-семинар) по физике и астрономии для молодых ученых Санкт-Петербурга и северо-запада, Санкт-Петербург, 29-30 октября, 2009;
  13. С.А. Блохин, А.М. Надточий, М.В. Максимов, И.И. Новиков, А. Мутиг, Г. Фиол, Д. Бимберг, Д.А. Лотт, В.А. Щукин, Н.Н. Леденцов, “Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 850 нм со скоростью передачи данных до 40 Гб/с для новых поколений линий оптической связи”, «Rusnanotech'09, международный форум по нанотехнологиям», Москва, 6-8 октября, 2009;
  14. D. Bimberg, S.A. Blokhin, A. Mutig, A.M. Nadtochiy, G. Fiol, P. Mosser, D. Arsenijevic, F. Hopfer, V.A. Shchukin, J.A. Lott and N.N. Ledentsov, «Nano-VCSELs for the terabus», 17th Int. Symp., «Nanostructures: Physics and Technology», Minsk, Belarus, June 22-26, 2009;
  15. S.A. Blokhin, J.A. Lott, G. Fiol, N.N. Ledentsov, M.V. Maximov, A. Mutig, A.M. Nadtochiy, L.Ya. Karachinsky, I.I. Novikov, V.A. Shchukin, and D. Bimberg, «High-speed (~40 Gbit/s) oxide-confined 850 nm VCSELs», 17th Int. Symp., «Nanostructures: Physics and Technology», Minsk, Belarus, June 22-26, 2009;
  16. Л.Я. Карачинский, С.А. Блохин, Д.А. Лотт, М.В. Максимов, А. Мутиг,

А.М. Надточий, И.И. Новиков, В.А. Щукин, Д. Бимберг, Н.Н. Леденцов, «Вертикально-излучающие лазеры спектрального диапазона 850 нм/с со скоростью передачи данных 39 Гбит/с», «Полупроводники-09» 9<sup>я</sup> Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября-3 октября, 2009.

### **Цитированная литература:**

- [1] Haruhisa Soda, Ken-ichi Iga, Chiyuki Kitahara, Yasuharu Suematsu GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers // Japanese Journal of Applied Physics, **18**, 2329-2330, 1979
- [2] Wilmsen, C.W., Temkin, H., Coldren, L.A. Vertical-cavity surface-emitting lasers: design, fabrication, characterization, and applications // Cambridge University Press, 1999
- [3] 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 // Applied Physics Letters, **91**, 121106, 2007
- [4] Benisty, H, Stanley, R, Mayer, M Method of source terms for dipole emission modification in modes of arbitrary planar structures // JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA A-OPTICS IMAGE SCIENCE AND VISION, **15**, 1192-1201, 1998
- [5] Nikolai N. Ledentsov, Vitaly A. Shchukin Novel concepts for injection lasers // Optical Engineering, **41**, 3193-3203, 2002
- [6] Blokhin, Sergey A., Maleev, Nikolai A., Kuzmenkov, Alex, er G., Sakharov, Alexey V., Kulagina, Marina M., Shernyakov, Yuri M., Novikov, Innokenty I., Maximov, Mikhail V., Ustinov, Victor M., Kovsh, Alexey R., Mikhrin, Sergey S., Ledentsov, Nikolai N., Lin, Gray, Chi, Jim Y. Vertical-cavity surface-emitting lasers based on submonolayer InGaAs quantum dots // IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, **42**, 851-858, 2006
- [7] Chang, Yu-Chia, Coldren, Larry A. Efficient, High-Data-Rate, Tapered Oxide-Aperture Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers // IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, **15**, 704-715, 2009
- [8] Grundmann, M., Bimberg, D. Theory of Quantum Dot Laser Gain and Threshold: Correlated versus Uncorrelated Electron and Hole Capture // physica status solidi (a), **164**, 297--300, 1997
- [9] J.E. Bowers High speed semiconductor laser design and performance // Solid-State Electronics, **30**, 1 - 11, 1987
- [10] V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, J. A. Lott, H. Quast, F. Hopfer, L. Ya. Karachinsky, M. Kuntz, P. Moser, A. Mutig, A. Strittmatter, V. P. Kalosha, D. Bimberg Ultra high-speed electro-optically modulated VCSELs: modeling and experimental results // Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XVI, **6889**, 68890H, 2008