

На правах рукописи

Лысак Владимир Валерьевич

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ
СВЕРХКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ
СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ И ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ В
МИКРОРЕЗОНАТОРАХ И НАНОСТРУКТУРАХ

01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики

01.04. 10 - физика полупроводников

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт Петербург, 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Официальные оппоненты:

член-корр. РАН, доктор физико-математических наук,
профессор, проректор
Национальный исследовательский академический
университет РАН

Жуков
Алексей
Евгениевич

доктор технических наук,
генеральный директор
ЗАО Полупроводниковые приборы

Тер-
Мартirosян
Александр
Леонович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник,
Лаборатория молекулярно-лучевой эпитаксии
полупроводниковых соединений A_3B_5
Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В.
Ржанова

Гайслер
Владимир
Анатолиевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Защита состоится «17» февраля 2017 г. в 14 час 00 мин
на заседании диссертационного совета Д002.034.01 на базе Института
аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
ИАП РАН по тому же адресу и на сайте www.iairas.ru и www.iai.rssi.ru.
Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

А.Л. Буляница

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Волоконно оптические линии связи доминируют над проводными в высокоскоростных системах длиной больше 100 метров вследствие более широкой полосы модуляции оптического канала. Уже сегодня скорость передачи 10 Гбит/с стал промышленным стандартом. Однако для более коротких расстояний (локальные и периферийные соединения) проводные соединения все еще являются основной технологией из-за ее простоты и дешевизны исполнения.

Проводные соединения достигнут своего максимума ширины полосы модуляции в 15 ГГц уже к концу 2017 года. Переход от проводных соединений к оптическим должен быть гибким и зависеть не только от специфических требований к реальным системам, но также и от того, как быстро будет снижаться стоимость элементов вследствие улучшения технологии сборки, увеличиваться количество конечных потребителей, а также более высокой степени интеграции систем и развития стандартов. В этом случае наиболее вероятным видится переход в виде гибридных оптоэлектронных систем, в которых основные вычислительные функции выполняют электронные элементы, а их соединение обеспечивают оптические системы.

Для увеличения полосы пропускания будущих поколений систем приема-передачи может быть использован информационный оптический соединительный модуль, включающий в себя передающий и приемный блоки и волоконно-оптический (для расстояний от десятка сантиметров до 1 метра) или интегрально-оптический канал (для более коротких расстояний), который в случае малых расстояний между приемником и передатчиком получили название сверхкороткого оптического соединения (СКОС).

Сверхкороткие оптические соединения представляют сегодня одну из наименее развитых областей оптоэлектроники. Поэтому необходимы новые методы и инструменты для моделирования, основанные на хорошем понимании физических процессов и точных знаниях об исходных параметрах, для создания широкого класса систем оптической связи и используемых в них полупроводниковых квантоворазмерных приборов.

Важнейшими элементами оптоэлектроники являются полупроводниковые лазеры. В физике лазеров уже сформировалась новая область полупроводниковых лазерных гетероструктур с квантовым ограничением с чрезвычайно широкой полосой модуляции, обеспечившая технологический прорыв во многих направлениях фотоники и оптоэлектроники.

Существующие приборы в настоящее время не удовлетворяют требованиям СКОС ввиду таких как недостатков, как сложность интегрирования элементов на малой площади платы, пока еще высокое энергопотребление и существенное влияние температуры на изменение длины волны и величины порогового тока и др.

Это определяет наличие проблемы создания активных и пассивных элементов СКОС с требуемым быстродействием, шириной спектра, энергопотреблением и адекватного теоретического описания физических процессов и наблюдаемых мощностных, модуляционных и спектральных характеристик данных систем.

Прежде всего, стоит проблема адекватного теоретического описания физических процессов переноса носителей заряда в полупроводниковой структуре при разных режимах работы лазера и их взаимодействия между собой и с полем излучения. Это позволит с большей степенью точности объяснить причины ограничения ширины полосы модуляции и дать практические рекомендации по совершенствованию технологии и конструкций

гетеролазеров. Кроме того, целесообразно обеспечить совместимость методов анализа для разных типов конструкций гетеролазеров и создать универсальные и удовлетворительные средства их моделирования.

Таким образом, важная научная проблема заключается в разработке новых и развитии существующих методов анализа для адекватного теоретического описания процессов генерации, усиления и передачи оптического излучения в высокоскоростных сверхкоротких оптических соединениях, получении новых данных, характеризующих работу этих систем и определении путей улучшения их характеристик.

В такой совокупности перечисленные задачи ранее не ставились, а в отдельной постановке практически ни одна из них не имеет законченного решения.

Качественный анализ физических аспектов, опыт предшествующих отечественных и зарубежных исследований и практических разработок показывает, что перспективным для решения указанной совокупности задач, а также развития теории и технологии активных и пассивных элементов современной оптоэлектроники, является применение методов комплексного моделирования статических и динамических процессов в сложных приборных микро- и наноструктурах с учетом влияния неравномерного распределения носителей.

Решение проблемы в целом требует обширного теоретического и экспериментального исследования процессов переноса носителей заряда, генерации фотонов в многослойных КР полупроводниковых структурах и распространения оптического сигнала через оптические каналы малой длины и формирования новых принципов построения эффективных источников оптического излучения для СКОС. Результаты этих исследований

могут найти применение в развитии разработок полупроводниковых приемо-передатчиков и сверхскоростных суперкомпьютеров нового поколения.

Цель диссертационной работы состоит в том, чтобы адекватно описать статические и динамические процессы, наблюдаемые экспериментально при анализе высокоскоростных элементов сверхкоротких оптических соединений. Для достижения поставленной цели, в ходе работы решались **следующие задачи**:

1. Определение основных причин, связанных с ограничением предельных частотных возможностей элементов СКОС (длина соединения от нескольких метров до нескольких миллиметров) со скоростью передачи выше 10 Гбит/с по одному каналу.
2. Развитие теоретического метода анализа неравномерного распределения носителей заряда в структуре полупроводникового вертикально излучающего лазера с внутривибраторными контактами резонансного фотодиода.
3. Разработка модели для описания полупроводниковых лазеров со сложной конфигурацией с учетом геометрических особенностей и температурных факторов на скоростные свойства прибора и с их помощью сформулировать решения, направленные на улучшение динамических свойств элементов СКОС.
4. Теоретическое исследование сверхбыстрых процессов в полупроводниковом оптическом усилителе на основе асимметричных квантовых ям при прохождении импульса фемтосекундной длительности и провести детальный анализ влияния переноса носителей и эффектов горячих носителей на динамические свойства данных структур.
5. Анализ потерь и передающих характеристик волоконно-оптического и интегрально-оптического канала для соединений различной длины.

6. Исследование возможности включения в СКОО полупроводникового оптического усилителя оригинальной конструкции в качестве элемента управления сверхкоротких оптических импульсов фемтосекундной длительности для обработки сверхмассивных баз данных в суперкомпьютерах нового поколения.

На защиту выносятся следующие основные положения:

1. Управление эффектом скопления тока и сопротивления высокоскоростных полупроводниковых вертикально излучающих лазеров с внутрирезонаторными контактами позволяет получить приборы с улучшенными модуляционными характеристиками.
2. Сопряжение рабочей длины волны резонансного фотодиода с вертикально излучающим лазером и перестройка частоты вследствие неравномерности роста структуры по площади подложки и за счет управления фазой коэффициента отражения позволяет снизить чувствительность приемника с 4 дБ до 0.3 дБ.
3. Адекватный учет эффектов переноса и нагрева носителей в каждой квантовой яме в динамической модели полупроводникового оптического усилителя с квантоворазмерными активными слоями различного состава в виде неоднородной системы дифференциальных уравнений, позволил правильно трактовать частотно зависимый отклик усилителя в режиме воздействия ультракороткого сигнала фемтосекундной длительности.
4. Учет насыщения эффективности захвата в зависимости от концентрации носителей позволил более корректно описать изменение спектра усилителя в широком диапазоне изменения

тока накачки в диапазоне от 10 до 200 мА с погрешностью менее 3 %.

5. Учет эффекта туннелирования между квантовыми ямами различного состава позволил описать экспериментальные времена медленного восстановления динамической характеристики усилителя с погрешностью менее 5%.

Научная новизна

1. Усовершенствован метод анализа транспортных эффектов распределения носителей заряда в сложной структуре вертикально излучающих лазеров с внутрирезонаторными контактами (ВИЛВК) и изменении характера и длительности процессов накопления и распределения носителей в области квантовой ямы.
2. Впервые, на основе малосигнального анализа ВИЛВК, выполнены оценки влияния температуры, уровня мощности накачки и глубины модуляции на выходные характеристики. Доказана возможность достижения полосы модуляции лазера при аналоговом малосигнальном режиме модуляции до 10 ГГц.
3. Впервые сформулирована и обоснована численная динамическая модель квантово - размерного полупроводникового оптического усилителя с асимметричными квантовыми ямами в виде неоднородной системы дифференциальных уравнений с учетом эффектампературной релаксации и переноса носителей в каждом слое.
4. Впервые теоретически обоснована частотная зависимость насыщения оптического усиления при прохождении сверхкороткого оптического сигнала через активную область, что позволило сформулировать новый принцип переключателя частоты в системах связи будущего поколения.
5. Предложен новый метод описания усиления в

полупроводниковом оптическом усилителе с учетом туннелирования электронов через тонкие барьеры и зависимости эффективности захвата от концентрации носителей в квантовой яме, что позволило обосновать способ получения спектра усиления с шириной 160 нм и улучшенной равномерности.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, обеспечивается глубиной анализа проблем, применением строгих квантово-механических методов и зонной теории полупроводников и методов полуклассической теории лазеров, а также адекватных граничных условий и соответствующих методов решения; экспериментальной проверкой основных теоретических результатов, полученных для различных типов исследуемых элементов, тестированием программных продуктов и сравнением с экспериментальными и теоретическими результатами других авторов, в том числе в рамках совместных работ с международными партнерами.

Научная и практическая значимость результатов.

1. Предложены новые модели, которые более точно описывают наблюдаемые стационарные и динамические характеристики оптоэлектронных приборов. Предложены методы оптимизации геометрических параметров элементов СКОС с улучшенными динамическими характеристиками.
2. Разработаны программы расчета основных характеристик полупроводниковых лазеров, оптических усилителей и фотодиодов с квантово-размерной активной структурой. Предложены новые эффективные алгоритмы для анализа распределения носителей и оптического излучения в структурах со сложной геометрией.

3. Получены практические рекомендации по выбору конструкций полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором с внутренними контактами и даны рекомендации для увеличения квантовой эффективности резонансного фотодиода.
4. Определена и объяснена частотная зависимость времени восстановления усиления при прохождении через оптический усилитель проходящего типа оптического сигнала длительностью 100 фс.
5. Основываясь на новых представлениях об особенностях динамического поведения высокоскоростных СКОС разработаны новые методы описания и алгоритмы анализа полупроводниковых приборов с квантово-размерной активной областью разной конфигурации, которые могут быть использованы для решения широкого круга проблем оптоэлектроники и лазерной физики.

Результаты работы использованы при подготовке учебных планов и программ новой специальности "Лазеры и оптоэлектронная техника" в Харьковском национальном университете радиоэлектроники (ХНУРЭ) и Санкт Петербургском научно техническом центре (НТЦ) микроэлектроники РАН, при чтении новых курсов лекций "Основы волоконной и интегральной оптики", "Полупроводниковые лазеры", "Квантово-размерные структуры", "Волоконно-оптические системы", "Современные направления в квантовой электронике".

Реализация и внедрение. Диссертация выполнена на кафедре физических основ электронной техники ХНУРЭ и Санкт Петербургском НТЦ микроэлектроники РАН, соответствует научному направлению кафедры и по своей тематике отвечает

паспорту специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 - физика полупроводников. Полученные в работе результаты были использованы в ходе выполнения хоздоговорных НИР, а также инициативных НИР, проводимых на кафедре физических основ электронной техники ХНУРЭ и НТЦ Микроэлектроники РАН. Кроме того, некоторые результаты по моделированию полупроводниковых систем и сравнения с экспериментальными данными получены в рамках международного сотрудничества с королевским технологическим институтом (Швеция), университетом Ямагата (Япония), научно-исследовательского института города Гвангджу (Южная Корея), национального университета г. Джонджу (Южная Корея).

Апробация работы. Результаты работы докладывались на ряде международных, всероссийских и отраслевых конференций и семинаров, в том числе: IEEE/LEOS Международный семинар по моделированию лазеров и волоконно-оптических сетей, (Украина, 2001-2008, 2011), Микрорезонаторные источники излучения (Германия, 2001), Международная конференция передающих оптических сетей ICTON (Польша 2001, 2002, 2004, Великобритания 2006, Италия 2007), 6th Int. Conf. CADSM 2001 (Украина, 2001), Int. Conf. IQEC/LAT (Россия, 2002), IV международная конференция по квантовой электронике (Минск, 2002), Математические методы в электромагнитной теории (ММЕТ) (Украина, 2002), Международная конференция по лазерам и электрооптике (CLEO/Europe, Германия 2003, CLEO®/PacificRim Южная Корея, 2007), «Optics - 2003» (Россия, 2003), IEEE/LEOS международная конференция по численному моделированию полупроводниковых оптоэлектронных приборов (Япония, 2003, Сингапур 2007, Великобритания 2008, Южная Корея, 2009), 7^й международный симпозиум современных

фотонных технологий (Япония, 2004), Конференция по фотонике (Южная Корея, 2004, 2007), 10th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2005) (Южная Корея, 2005), Int. Workshop on Optoelectronic Physics and Technology (Украина, 2007), Int. Conference State of art trends of scientific research of artificial and natural nanoobjects (STRANN 2016) (Россия, 2016), 17th Int. Conference “Laser Optics 2016” (Россия, 2016).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность проблемы теоретических исследований. Приводится цель данной работы.

В главе 2. Основные характеристики элементов высокоскоростных сверхкоротких оптических соединений проведен обзор современного состояния и перспективных направлений систем передачи данных следующего поколения.

В главе 3. Вертикально излучающие лазеры с внутрирезонаторными контактами приведена математическая постановка задачи моделирования вертикально излучающего лазера с внутрирезонаторными контактами (ВИЛВК) (Рис. 1а). С использованием данной модели получены результаты анализа температурных, оптических и электронных свойств оптического устройства, а также влияние геометрических параметров на мощностные и модуляционные характеристики.

Статические и модуляционные характеристики во многом зависят от правильно выбранных геометрических параметров ВИЛВК, что определяется конкурентным поведением различных физических аспектов, таких как паразитная емкость прибора и эффект сжимания тока. Следовательно, необходимо оценить, какие параметры можно оптимизировать, чтобы получить максимальную частоту эффективной модуляции прибора.

Анализ, проведенный в разделе, показал, что максимальную ширину модуляции можно получить при получении соотношения диаметра выходного распределенного Брэгговского отражателя (РБО) и оксидного окна в области 1.3-1.5 при фиксированном размере оксидного окна. При уменьшении диаметра зеркала увеличивается эффект скопления тока, что приводит к более неравномерному распределению носителей в радиальной плоскости активной области и, соответственно, уменьшению квантовой эффективности лазера. При увеличении диаметра РБО увеличивается горизонтальный путь тока между контактом и активной областью лазера, что, в свою очередь, логарифмически увеличивает сопротивление на данном участке. Это приводит к увеличению общего сопротивления прибора, температурного сопротивления, и, в конечном счете, к увеличению температуры в активной области.

Вольт амперная х-ка показывает, что при увеличении параметра толщины градиентного слоя (ТГС) уменьшается сопротивление прибора. Это связано с уменьшением разрыва зонной диаграммы на месте соприкосновения контактного слоя и слоя оксидного окна из-за разницы положения уровня зоны проводимости для материалов GaAs и $\text{Al}_{0.98}\text{Ga}_{0.02}\text{As}$.

С другой стороны, это приводит к более неравномерному распределению носителей в активной области (Рис. 1б) из-за большего влияния эффекта скопления тока. При малых токах (до 7 мА), дифференциальная эффективность ВИЛВК уменьшается с увеличением ТГС. Такое поведение можно объяснить увеличением влияния эффекта обтекания и пространственного выжигания дырок в активной области. Максимальное значение оптической мощности сначала увеличивается с уменьшением ТГС, однако для приборов с малым значением ТГС (40 Å и 20 Å) происходит уменьшение этого

показателя из-за увеличения сопротивления прибора и, соответственно температуры в активной области.

По результатам моделирования показано, что максимальная частота эффективной модуляции достигается при выборе ТКС между контактными слоем и оксидным окном в диапазоне 40-60 Å.

Поскольку р- и n-контактные слои являются частью резонатора, их толщина должна изменяться согласно закону: $d=(2k+1)\lambda/4n$, где d – толщина контактного слоя, $k=0, 1, 2, \dots$, λ – длина волны, n – коэффициент преломления слоя.

Результаты моделирования показывают, что увеличение толщины контактных слоев (ТКС) приводит к уменьшению сопротивления прибора (Рис. 1в). С одной стороны, это позволяет уменьшить рабочую температуру, что увеличивает дифференциальную эффективность и максимальную мощность оптического излучения. С другой стороны, это же приводит к увеличению эффективного объема резонатора, что снижает максимальную частоту эффективной модуляции.

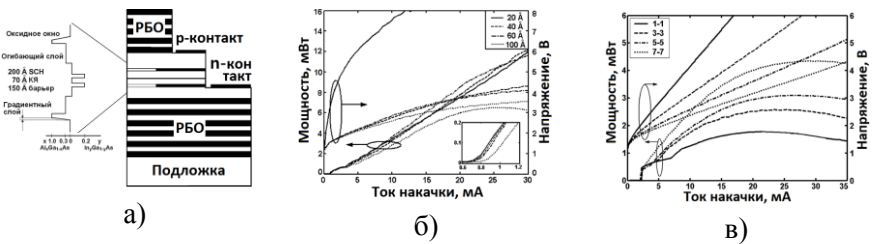


Рис. 1а) Структура ВИЛВК; б) ватт – амперная и вольт – амперная характеристики прибора с различным значением параметра толщины б) градиентного; в) контактного слоев

Следующим методом, который помог бы увеличить скоростные свойства лазера является повышение паразитной

частоты отсечки прибора. Основной проблемой для лазеров с оксидным окном, является близкое его положение к активной области. Это приводит к накоплению носителей во внешней части и, следовательно, к увеличению ёмкости на краях оксидного окна.

Для эффективного подавления этого эффекта необходимо использовать противоположно направленные контакты, которые создают движение тока в структуре по диагонали. Это приводит к существенному уменьшению концентрации носителей в перекрестных областях и, следовательно, к уменьшению паразитной ёмкости прибора. Кроме того, диагональное распределение тока в структуре приводит к более равномерному распределению носителей в активной области, что подавляет эффект скопления тока, и, следовательно, увеличивает величину оптического усиления лазера. Экспериментальные результаты, приведенные в разделе б, показывают существенное увеличение ширины полосы модуляции при использовании подобной техники расположения контактов.

В главе 4. Резонансный фотодиод приведена математическая постановка задачи моделирования резонансного фотодиода (РФД). Фотодетектор, как прибор, конвертирующий принимаемую оптическую энергию в оптический сигнал, является основным элементом систем оптической передачи данных и измерительных систем. Р-і-n фотодиоды долгое время применялись в современных приборах и системах из-за их высокой чувствительности, быстрого отклика, низкого уровня шума и себестоимости производства.

Если полоса рабочих частот не ограничена барьерной емкостью и паразитным сопротивлением, имеет месьпрякая зависимость чувствительности и обратная зависимость быстродействия прибора от толщины поглощающего слоя.

Это не позволяет получать приборы с высокой чувствительностью (характерно для прибора с толстым поглощающим слоем) и быстрым откликом (тонкий слой) одновременно. Чтобы увеличить чувствительность прибора, тонкий поглощающий слой необходимо поместить в резонатор Фабри-Перо (Рис. 2а). РБО многократно отражают входящий оптический сигнал внутри резонатора, тем самым повышают чувствительность при сохранении его скоростных качеств (Рис.2б). В это же время, введение резонатора приводит к сужению спектральной характеристики прибора, что накладывает определенные дополнительные требования к спектральной совместимости источника и приемника излучения. Основным преимуществом РФД является то, что они могут быть изготовлены на одной подложке с ВИЛВК простым удалением части верхнего РБО. Это позволяет изготавливать оба устройства одним технологическим процессом, что увеличивает спектральную согласованность приборов и уменьшает стоимость интегрирования.

В работе рассмотрена модель спектральной зависимости квантовой эффективности (КЭ) РФД от геометрических параметров прибора и свойств материала. Анализ показал, что при увеличении количества слоев верхнего зеркала КЭ вначале возрастает за счет более эффективного поглощения фотонов в активном слое, но после 10 пар слоев начинает снижаться из-за увеличивающегося показателя отражения зеркала. При этом ширины полосы на половине максимума снижается при увеличении количества слоев. Для применения в системе СКОС, КЭ РФД должна быть больше 50 % и ширина спектра КЭ больше 2 нм. Для выполнения таких требований достаточно всего 12 периодов слоев верхнего РБЗ (Рис. 2в). Более узкая спектральная характеристика фотодиода повышает требование к более точной спектральной юстировке с лазером.

Подобное совмещение особенно важно в случае большой разницы температур между приемо-передающими элементами. Одним из способов изменения длины волн в максимуме КЭ является изменение толщины последнего слоя входного РБО РФД.

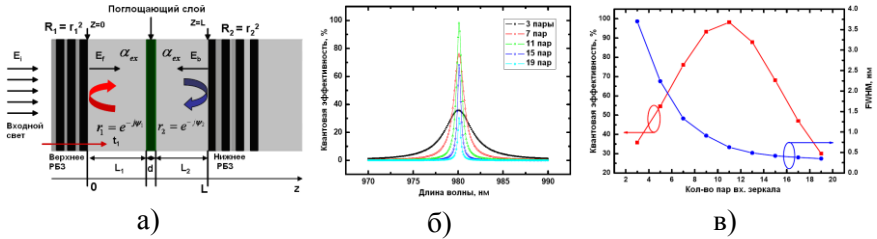


Рис.2 а) Аналитическая модель РФД; б) Зависимость спектра КЭ InGaAs/GaAs резонансного фотодетектора от количества пар входного зеркала; в) Изменение показателя КЭ на резонансной длине волны (красная линия) и ширины спектра (синяя линия) от количества пар входного РБО

При оптимальной точке травления резонансная длина волны РФД составляет 980 нм. В случае, когда последний слой верхнего РБО недовотравлен/перетравлен, наблюдается, соответственно, увеличение, уменьшение резонансной длины волны. Технологически, такая точная процедура может быть осуществлена с использованием лазерного интерферометра.

Анализ показал смещение резонансной длины волны в диапазоне $\pm(2-4)$ нм при изменении толщины слоя в пределах половины периода для РФД на основе 3-х и 6-и квантовых ям (КЯ) в качестве поглощающего слоя. Однако, в случае интегрирования лазера и диода на одной подложке, лазер с 6 КЯ показывает худшие характеристики. Т.о., перестройка длины волны, благодаря изменению толщины последнего слоя верхнего РБО, является

более приемлемым вариантом простому увеличению числа КЯ в приборе.

В главе 5. Полупроводниковые оптические усилители на основе многослойный асимметричных квантово-размерных структур приводятся результаты вычислительного эксперимента на основе построенной модели лазерной системы с полупроводниковым насыщающимся поглотителем на основе асимметричной многослойной квантово-размерной структуры (АМКРС).

Проблема моделирования АМКРС состоит в том, что в моделях используется большое количество параметров, значение которых нельзя получить экспериментально. Для этой цели необходимо владеть методами, позволяющими находить значения физических параметров из экспериментальных характеристик или более сложных моделей, описывающих подробно тот или иной физических процесс в отдельности. Самым применяемым методом исследования динамического поведения ПОУ является метод скоростных уравнений, позволяющий получать довольно точные результаты для большого числа практических задач.

Структура полупроводникового оптического усилителя (ПОУ) включает два ограничительных слоя (ОС) и 3 пары InGaAsP КЯ толщиной 5 нм с длинами волн оптических переходов 1.67 мкм, 1.53 мкм и 1.45 мкм, соответственно. Скорость спонтанной рекомбинации описывается как сумма рекомбинаций Шокли-Рида-Холла, бимолекулярной и Оже рекомбинации в ОС и КЯ областях, соответственно (Рис. 3).

Скорость переноса между КЯ определяется двумя параллельными процессами: туннелированием через барьер и временем переноса носителей над барьером. Поскольку времена переноса носителей в АМКРС различны, перенос между КЯ в

прямом направлении отличается от переноса в обратном.

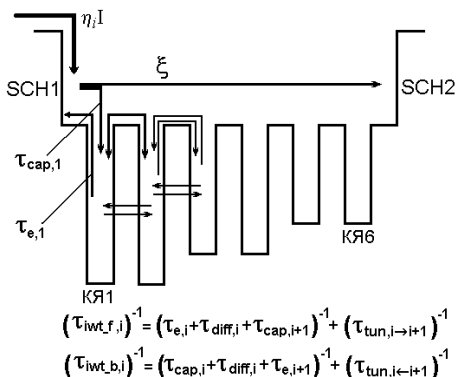


Рис. 3 Схематическое представление АМКРС структуры с 6 КЯ с указанием основных процессов переноса носителей

При воздействии на устройство импульсов фемтосекундной длительности, необходимо учитывать более быстрые внутризонные переходы, такие как нагрев носителей в каждой КЯ, для более глубокого понимания эффектов насыщения усиления.

Оптический импульс, как функция от времени и координаты вдоль активной области, описывается системой связанных уравнений в частных производных. Чтобы избежать более сложного вычислительного процесса и учесть влияние насыщения носителей и изменения температуры вдоль активной области, общая длина ПОУ разделена на сегменты и прохождение импульса рассчитывается отдельно в каждой части. При этом, выходной сигнал одного сегмента используется в качестве входного сигнала для последующего.

Для исследования оптических свойств предложенной АКРС была разработана детальная модель усиления (поглощения), позволяющая анализировать любую слоистую КРС с учетом

напряжения, конечности глубины КЯ, а также влияния процесса туннелирования носителей через тонкие барьеры. Поскольку материал прибора представляет собой сложную четверную структуру, то все параметры в модели зависят от его состава. Чтобы вычислить их величины, исходя из заданной информации о длине волны перехода для каждой КЯ, выбор параметров и состава материала основан на параметрах бинарных и тройных соединений.

Для более тонкого анализа времен переноса, неравномерного распределения носителей в АМКРС и его влияние на профиль потенциала, была решена самосогласованная система уравнений Шредингера, Пуассона и уравнений диффузии-дрейфа, которая показала влияния на время захвата не только температуры, но и концентрации носителей, которая ранее в подобных моделях не учитывалась. Для прямого туннелирования наименьшее время туннелирования приходится на последний барьер, тогда как для обратного – на первый из-за того, что отражение структуры для этих барьеров в каждом случае минимально. Для простых структур с одним или двумя барьерами, резонансная энергия в локальном минимуме обычно равна для прямого и обратного процессов туннелирования, однако для более сложных структур с асимметричными КЯ они различны, особенно для более низких энергий электрона, что связано с несимметричностью рассчитанного комплексного коэффициента отражения.

Далее проведен анализ спектральных характеристик ПОУ на основе симметричных МКРС из 2 и 6 КЯ и проведено сравнение с АМКРС, который показал, что максимальная полуширина спектра усиления асимметричного 6-КЯ ПОУ составляет 137 нм при токе инжекции 210 мА. Сравнения ПОУ на основе симметричных и асимметричных структур показывает, что последние имеют

большую полосу усиления и могут быть использованы для обработки сигналов меньшей длительности.

Чтобы выяснить каким образом условия прохождения пробных импульсов (ППИ) изменяются импульсами накачки, мы воспроизвели экспериментальные условия в численном эксперименте. Чтобы выяснить, как изменяется усиление на разных длинах волн после прохождения импульса накачки, мы заложили в модель один импульс накачки и три пробных импульса и повторяли процедуру импульса накачки для различных длин волн. Рис. 4 отображает результаты вычислений ППИ для трех импульсов накачки на длинах волн 1.63 мкм (рис. 4(а)), 1.52 мкм (рис. 4(б)), и 1.45 мкм (рис. 4(в)). Пробные длины волн были 1.63 мкм, 1.52 мкм, и 1.45 мкм, для каждой длины волны импульса накачки. Вычисленные кривые ППИ соответствуют экспоненциальным функциям с различными временными константами.

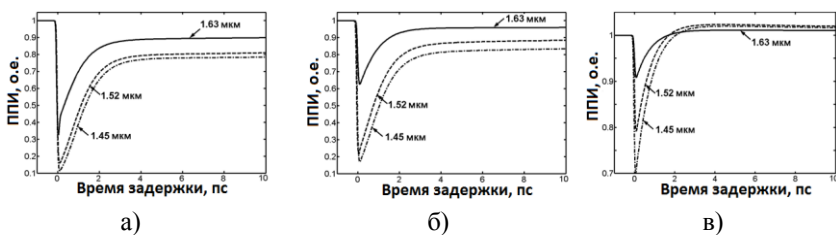


Рис.4 . Кривая ППИ для различных сигналов накачки
а) $\lambda_{\text{pump}}=1.63$ мкм; б) $\lambda_{\text{pump}}=1.52$ мкм; в) $\lambda_{\text{pump}}=1.45$ мкм, и
пробных сигналов $\lambda_{\text{probe}}=1.63$ мкм, $\lambda_{\text{probe}}=1.52$ мкм, $\lambda_{\text{probe}}=1.45$ мкм.

Для одной и той же длины волны накачки изменение ППИ больше для коротковолновых КЯ из-за большего изменения

температуры носителей, вызванного поглощением на свободных носителях и большего влияния температуры носителей на оптическое усиление. Восстановление усиления медленнее для более коротковолновых пробных импульсов из-за того, что задействуются носители, расположенные на низколежащих энергетических уровнях.

Эта тенденция одинакова для всех длин волн накачки и находится в хорошем соответствии с экспериментальными данными.

В главе 6. Методы изготовления и измерения основных характеристик элементов сверхкоротких оптических соединений приводятся результаты приборной апробации ВИЛВК и РФД, а также методов интеграции этих элементов на одной подложке. Применение внутрирезонаторных контактов в системе ВИЛ, с одной стороны, уменьшает внутренние, обусловленные поглощением на свободных носителях. С другой стороны, появляется негативный эффект скопления тока, увеличивающий неоднородность электромагнитного поля в активной области за счет неравномерного распределения носителей. Для решения этой проблемы был предложен особый способ размещения контактов таким образом, чтобы обеспечить диагональное течение тока по структуре ВИЛ. В разделе представлены экспериментальные характеристики оптимизированных ВИЛВК и РФД с шириной модуляции в 10 ГГц при токе накачки в 10 мА, что подтверждает адекватность теоретических расчетов, представленных в Разделе 3 и 4.

Измерены мощностные и динамические χ -ки ВИЛВК для различных значений диаметра оксидного окна (14 мкм и 6 мкм), которые показали, что дифференциальная квантовая эффективность (55% и 48%) наклон ватт-амперной χ -ки (0.7 Вт/А и

0.58 Вт/А), максимальная выходная мощность (9 Вт и 7 Вт) и пороговый ток (2 и 1 мА) выше для лазера с большим диаметром окна. В то время как пороговое напряжение (1.8 В и 2.4 В), сопротивление прибора при токе накачки в 6 мА (120 Ом и 189 Ом), смещение пика спектральной χ -ки (0.15 нм/мА и 0.35 нм/мА) и ширина полосы модуляции (3. ГГц и 6.5 ГГц при токе накачки 6 мА) ниже. Что говорит о том, что при выборе более медленных, но мощных лазеров необходимо использовать приборы с большим диаметром оксидного окна, тогда как для более быстрых, но маломощных систем можно использовать структуры с малым объемом активной области.

Также рассмотрена возможность объединения элементов в СКОС с помощью волоконно-оптических каналов, искривленных на 90° и полимерных волноводов с усеченными под углом 45° зеркальными концами. В первом случае, для юстировки и закрепления элементов используются направляющие штифты и, по необходимости, вся система закрепляется клеем, и устанавливаются элементы охлаждения. Анализ оптических потерь показывает уровень -2.5 дБ и включает в себя -1 дБ на соединения приемник/передатчик и соединительный блок (СБ), -1 дБ на соединения волокна с СБ и -0.5 дБ на потери в волоконном канале и за счет неровностей поверхности оптических элементов. Во втором случае, интегрированный волновод может быть нанесен на подложку с последующим вытравливанием волноводных каналов различной конфигурации. Для ввода/вывода оптического пучка может быть использован эффект полного отражения на границах изменения коэффициента преломления, что существенно снижает стоимость изготовления СКОС. СКОС с 5 см волоконно-оптическим каналом и СБ искривленным на 90° показал хорошую работоспособность на скоростях 5-6 Гбит/с на один канал при уровне ошибок 10^{-12} - 10^{-15} , а

также допустимым уровнем потерь в -2.5 дБ и потреблении мощности 87 мВт/канал. При построении более сложных разветвленных оптических линий на подложке, можно использовать полимерные волноводы с зеркалом на основе полного внутреннего отражения, для которых определено оптимальное значение поперечного сечения в 60×100 мкм и область допустимого смещения элементов СКОС в диапазоне ± 30 мкм.

В разделе также приведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными измерениями спектральной характеристики АМКРС ПОУ, которое показало, что при малых токах накачки результаты модели с постоянной эффективностью захвата не совпадают с экспериментальными данными на всей области длин волн, при больших токах наблюдается рост усиления в длинноволновой области при уменьшении усиления на более коротких волнах. При учете насыщения эффективности захвата модель более точно описывает поведение ПОУ во всем спектральном диапазоне (Рис. 5а). На рис. 5(б) показаны экспериментальные и вычисленные кривые ППИ и спектр усиления при токе накачки в 180 мА. Спектр усиления при токе накачки в 180 мА представлен во вставке рис. 6б. Длины волн для импульса накачки и пробных импульсов показаны стрелками. Расчётные времена восстановления усиления могут быть получены при помощи подгонки экспоненциальных функций с соответствующими временами восстановления.

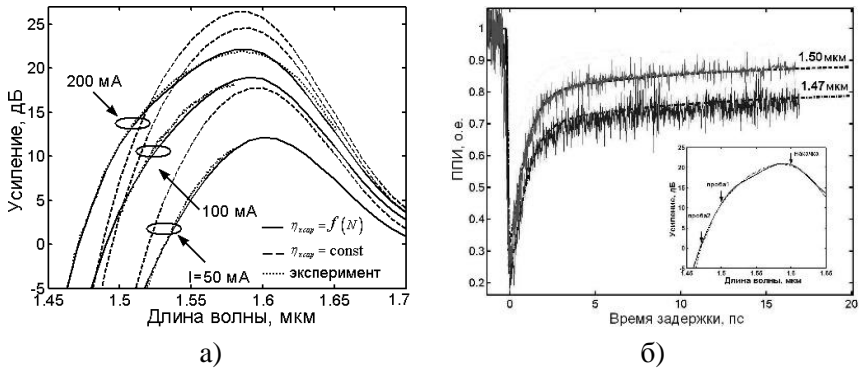


Рис. 5 а) сравнение различных теоретических моделей расчета усиления с экспериментальными данными; б) экспериментальные кривые ППИ и результаты вычислений.

Совпадение теоретических и экспериментальных данных подтверждает правильное описание вышеприведенной моделью динамических процессов, происходящих в АМКРС ПОУ и полученных с ее помощью оценок.

В заключении диссертации приведены следующие результаты, полученные в работе:

В ходе работы нами было показано, что в качестве источника/приемника излучения лучше всего подходят полупроводниковые структуры с вертикальным излучением из-за их малых размеров и низкого энергопотребления. Однако эффекты нагромождения тока и сопротивления прибора еще достаточно сильно влияют на их динамические свойства. Эффективное подавление этого феномена приведет к более равномерному распределению носителей в активной области (основная часть носителей расположена над оксидным кольцом), что приведет к увеличению усиления и улучшению модуляционных свойств

прибора. Основные выводы могут быть сформулированы следующим образом.

1. Расчет ватт-амперных характеристик приборов с различным значением диаметра выходного распределенного Брэгговского зеркала показал увеличение наклона характеристики с увеличением диаметра, что связано с более эффективным подавлением эффекта обтекания тока. С другой стороны, увеличение диаметра приводит к увеличению сопротивления прибора, что уменьшает максимальную оптическую мощность лазера. Результаты расчетов показывают оптимальное соотношение диаметра верхнего зеркала и диаметра оксидного окна на уровне 1.4-1.6, при которых ширина полосы модуляции максимальна.
2. Расчет статических характеристик с различным значением толщины градиентного слоя показал увеличение наклона ватт-амперной характеристики и уменьшение порогового тока с уменьшением толщины градиентного слоя. В то же время это приводит к увеличению сопротивления прибора. Найдено оптимальное значение толщины градиентного слоя в области 40-60 Å, при которой наблюдается максимальная выходная мощность и ширина полосы модуляции.
3. Расчет характеристик приборов с различным значением толщины контактного слоя показал увеличение наклона ВАХ и уменьшение сопротивления прибора при увеличении толщины контактного слоя. Анализ модуляционных характеристик показал максимальное значение ширины полосы модуляции для лазера со значением толщины контактного слоя $5\lambda/4n$, при этом фактор эффективности преобразования модуляции составил $5.92 \text{ ГГц}/(\text{мА})^{0.5}$.

4. Расчет характеристик приборов с разделенными квантовыми ямами показал существенное увеличение квантовой эффективности прибора при расположении слоёв в максимуме резонаторной волны. При этом максимальный наклон ВАХ наблюдался в приборе с 2x4 квантовых ям. Кроме того, для этой же структуры получен максимальный фактор эффективности преобразования тока в модуляционную полосу, который составил $7.61 \text{ ГГц}/(\text{мА})^{0.5}$, что в будущем позволит получать модуляционную полосу в 20 ГГц.

Проведен анализ статических и динамических характеристик приемника излучения в виде резонансного фотодиода, который имеет такую же структуру, как и вертикально излучающий лазер, следовательно, они могут быть выращены на одной подложке, что значительно упрощает требования совместимости приемника и передатчика и позволяет создавать интегрированные системы. Моделирование приемника позволило определить оптимальное сочетание свойств входного отражателя, при котором была получена максимальная квантовая эффективность, а также применить новые методы спектрального совмещения длин волн лазера и детектора.

1. Анализ спектральной зависимости квантовой эффективности и ширины полосы спектра резонансного фотодиода показал, что оптимальное значение этих параметров можно получить при выборе 11 пар входного зеркала резонатора;
2. Проведённый анализ спектральной юстировки передатчика и приемника в системах с разными температурными режимами показал возможность перестройки частоты приемника за счет изменения толщины последнего слоя зеркала в промежутке шага периода в области 1-10 нм.

3. Сравнительный анализ модуляционных характеристик стандартного и резонансного фотодиодов показал увеличение более чем в 5 раз максимального значения произведения квантовой эффективности и полосы модуляции при включении резонатора в структуру детектора.
4. Рассмотрены методы изготовления резонансного фотодиода с входным зеркалом, состоящим из 5 пар слоёв GaAs/AlGaAs и InGaAs активной области настроенной на длину волны 980 нм и представлены схемы измерения основных характеристик фотодиода.
5. Измеренный темновой ток прибора диаметром 80 мкм 30.3 пА при рабочем напряжении -3.3 В, что намного меньше значений коммерческих р-і-n ФД из-за более тонкого поглощающего слоя. Кроме того, показано, что темновой ток прямо пропорционально зависит от объема активной области.
6. Измеренная ёмкость детектора зависит также от диаметра поглощающего слоя и колеблется в областях значений 4.5 -12 пФ, что выше, чем у коммерческих фотодиодов из-за более короткой длины переноса носителей в структуре.

Впервые с точки зрения комплексного анализа и, в конечном счете, проектирования усилителя квантовыми ямами различного состава рассмотрена проблема создания единой модели, которая бы адекватно отражала реальные характеристики этих приборов. Сформулирована комплексная модель лазерной системы обработки сверхкоротких импульсов, учитывающая сверхбыстрые транспортные процессы, сверхбыструю динамику температуры носителей в каждой квантовой яме и динамику распространения ультракоротких импульсов в активном волноводе, включая внутризонные эффекты, такие как разогрев носителей и поглощение свободными носителями, при различных параметрах

материалов и различных длинах волн входной мощности.

1. Показано, что полупроводниковые усилители с квантовыми ямами различного состава обладают наибольшей полосой усиления, позволяя усиливать импульсы длительностью менее 20 фс. Исследование характеристик насыщения показали, что симметричные усилители на основе 2 квантовых ям обладают наибольшей мощностью насыщения за счет меньшего дифференциального усиления.
2. Найдено, что изменение концентрации носителей в каждой КЯ сильно зависит от длины волны падающего оптического импульса и транспортные эффекты играют важную роль в восстановлении усиления после сверхбыстрого оптического возмущения. Показано, что для сигналов с большими длинами волн мощность насыщения больше за счет компенсации носителей, рекомбинирующих в длинноволновых ямах, носителями из коротковолновых ям.
3. Исследование динамики температуры носителей показало, что пик увеличения температуры носителей имеет большую величину для больших длин волн. Однако, в случае одинаковых импульсов накачки, пик увеличения температуры носителей больше для коротковолновых ям за счет более интенсивных процессов поглощения на свободных носителях.
4. Показано, что изменение усиления для сигналов пробы и накачки с одинаковыми длинами волн определяется конкуренцией процессов динамического изменения температуры носителей и ее влияния на оптическое усиление. В случае разных длин волн накачки и пробы насыщение достигает большей величины на коротких волнах (0.15 и 0.3

соответственно). В том же диапазоне имеет место более медленное восстановление усиления (30 пс и 41 пс, соответственно).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации отражено в 33 научных публикациях

1. Ivanov P. S. , Lysak V. V., Sukhoivanov I. A. Advanced model for simulation of surface emitting quantum well lasers // Int. J. Numerical Modelling : Electronic Networks, Devices and Fields. 2001. Vol.14, N. 4. P. 379.
2. Ivanov P.S. , Sukhoivanov I.A., Lysak V.V. Extended model of VCSEL with nonuniform laser structures// Physica Status Solidy (a).2001. V. 188, N. 3. P. 961.
3. Ivanov P.S.,Unold H., Lysak V. V.,Sukhoivanov I. A.Photonic crystals in optical communication systems// Radioelectronics and Informatics. 2002. N. 2 P. 34.
4. MashoshinaO.V., Lysak V. V.,Sukhoivanov I. A.The threshold current reduction in InGaAsSb structure with strain layers // Journal of Physical Studies. 2003. V. 7.N.3 P. 288.
5. Lysak V. V., Sukhoivanov I. A., MashoshinaO.V. Study of the Auger recombination process in I types strained quantum well structure InGaAsSb/GaSb// Optoelectronics and Semiconductor Techniques. 2003. V.38. P.256.
6. Lysak V. V., SukhoivanovI. A. Carrier capture efficiency and amplification properties of asymmetrical multiple quantum well optical amplifiers// Journal of Optoelectronics and Advanced materials. 2006. V. 8. N. 2. P. 855.
7. MashoshinaO. V.,Sukhoivanov I. A., Jullie A.,LysakV. V.Outcome of refinement of the thermal sensitivity $\text{Ga}_{0.65}\text{In}_{0.35}\text{As}_{0.15}\text{Sb}_{0.85}/\text{GaSb}$ MQW laser //Physica Status Solidy (c). 2005. V.2. N. 4. P. 1404.
8. ShulikaA.V., Safonov I. M., Sukhoivanov I. A., LysakV. V.

Quantum capture area in layered quantum well structures//
Microelectronics Journal. 2005. V. 36. P. 350.

9. Lysak V. V., Kawaguchi H., Sukhoivanov I. A. Gain Spectra and Saturation Power of Asymmetrical Multiple Quantum Well Semiconductor Optical Amplifiers // IEE Proc. Optoelectronics. 2005. V. 152, N. 2. P. 131.
10. Lysak V. V., Kawaguchi H., Sukhoivanov I. A., Katayama T., Shulika A. V. Ultrafast gain dynamics in asymmetrical multiple quantum well SOAs // IEEE J. Quantum Electron. 2005. V. 41, N. 6. P. 797.
11. Lysak V. V., Chang K.S., Lee Y. T. Current crowding in graded contact layers of intracavity contacted oxide confined vertical cavity surface emitting lasers // Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87, N. 23 P. 231118.
12. Lysak V. V., Chang K.S., Lee Y. T. Top mirror optimization of high speed of intracavity contacted oxide confined vertical cavity surface emitting lasers // Journal of Optoelectronics and Advanced materials. 2006. V. 8, N. 1. P. 355 358.
13. Lysak V. V., Shulika A. V., Safonov I.M., Sukhoivanov I. A. Carrier tunneling in complex asymmetrical multiple quantum well semiconductor optical amplifiers // IEEE Photon. Techn. Lett. 2006. V. 18, N. 12 P. 1362.
14. Lysak V. V., Lee Y. T. Geometrical optimization of high speed intra cavity contacted oxide confined VCSELs // Journal of Optoelectronics and Advanced materials. 2006. V. 8, N. 4 P. 1601.
15. Yakushev S. O., Sukhoivanov I. A., Shulika O. V., Lysak V. V., Petrov S. I. Modeling and simulation of interaction of the ultrashort laser pulse with chirped mirror for structure design improvement // J. of Optoelectronics and Advanced materials. 2007. V. 9, N. 8. P. 2384.

16. Lysak V. V., Chang K.S., Song Y. M., Lee Y. T. Step by step parameter extraction method for high speed vertical cavity laser's rate equation model // Journal of Optoelectronics and Advanced materials. 2007. V. 9. N. 9. P. 2813.
17. Dyomin A. A., Lysak V. V., Petrov S. I., Lee Y. T. Temperature behaviour of top mirror reflection spectrum in intra cavity contacted oxide confined vertical cavity surface emitting lasers // Optics and Lasers in Engineering. 2008. V.46. N. 3. P. 211.
18. Safonov I. M., Sukhoivanov I. A., Shulika O. V., Lysak V. V. Piecewise Constant Approximation of the Potential Profile of Multiple Quantum Well Intrinsic Heterostructures // Superlattices and Microstructures. 2008. V. 43. N. 2. P.120.
19. Jeong B. K., Song Y. M., Lysak V.V., Lee Y. T. Large Area InGaAs/GaAs Resonant Cavity Enhanced Photodetector for Sensor Application // Journal of Optoelectronics and Advanced materials. 2008. V. 10. N. 10. P. 2547.
20. Gryshchenko S. V., Dyomin A. A., Lysak V. V., Sukhoivanov I. A. Influence of anomalous dispersion mirror properties on the quantum efficiency of InGaAs/GaAs resonant cavity photodetector // Optoelectronics review. 2010. V. 19, N. 3 P. 296.
21. Klymenko M.V., Lysak V.V., Sukhoivanov I.A., Shulika A.V. Optical and transport properties of $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}/\text{In}_{0.49}(\text{Ga}_{0.6}\text{Al}_{0.4})_{0.51}\text{P}$ single quantum well structure with digital alloy barriers // Superlattices and Microstructures. 2009. V. 46. P.603.
22. Lysak V.V., Safonov I.M., Song Y.M., Sukhoivanov I.A., Lee Y. T. High speed intracavity contacted vertical cavity surface emitting lasers with separated quantum wells // Optical and Quantum Electronics. 2009. V. 40, N. 14. P. 1219.
23. Tan C. L., Lysak V. V., Alameh K., Lee Y. T. Absorption

- Enhancement of 980 nm MSM Photodetector with a Plasmonic Grating Structure // Optics and Communications. 2010. V. 283. N. 9. P. 1763.
24. Lysak V. V., Park C. Y., Park K. W., Lee Y. T. High efficient 635 nm resonant cavity light emitting diodes with modified electron stopped layers // Optoelectronics and Advanced materials - Rapid Communications. 2010. V. 4. N. 6. P. 778.
 25. Gryshchenko S. V., Demin A. A., Sukhoivanov I. A. Lysak V. V. Influence of anomalous dispersion mirror properties on quantum efficiency of InGaAs/GaAs resonant cavity photodetector // Optoelectronics Review. V. 19. N. 3. P. 296.
 26. Kang J. H., Ryu J. H., Kim H. K., Kim H. Y., Han N., Lee M.S., Park Y. J., Uthirakumar P., Lysak V. V., Hong C.-H. Enhancement of light output power in GaN-based light-emitting diodes using indium tin oxide films with nanoporous structures // Thin Solid Films. Vol. 520. 2011. P. 437.
 27. Park Y. J., Kang J. H., Kim H. Y., Lysak V. V., Chandramohan S., Ryu J. H., Kim H. K., Han N., Jeong H., Jeong M. S., Hong C.-H. Enhanced light emission in blue light-emitting diodes by multiple Mie scattering from embedded silica nanosphere stacking layers // Optics Express. 2011. V. 19. N. 23. P. 23429.
 28. Kang J. H., Kim H. G., Chandramohan S., Kim H. K., Kim H. Y., Ryu J. H., Park Y. J., Beak Y. S., Lee J. S., Park J. S., Lysak V. V., Hong C.-H. Improving the optical performance of InGaN light-emitting diodes by altering light reflection and refraction with triangular air prism arrays // Optics Letters. 2012. V. 37. N. 1. P. 88.
 29. Lysak V.V., Kang J. H., Hong C.-H. Conical air prism arrays as an embedded reflector for high efficient InGaN/GaN light emitting diodes // Applied Physics Letters. 2013. V. 102. P. 061114.
 30. Kim H. K., Ryu J. H., Kim H. Y., Kang J. H., Han N., Park Y. J.,

- Ryu B. D., Ko K. B., Baek Y. S., Lysak V. V., Hong C. H., Kim H. G. The enhancement of the deflection effect in InGaN/GaN light-emitting diodes with an ellipsoidal air tunnel // Solid state electronics. 2012. V.69. P.14.
31. Mustary M. H., Ryu B. D., Han M., Yang J. H., Lysak V. V. Hong C.-H. Light enhancement of surface nano-textured GaN based light emitting diodes using self-assembled Ni nano-masks // Optik. 2016. V. 127. P. 1622.
32. Бобров М. А., Малеев Н. А., Блохин С. А., Кузьменков А.Г., Блохин А. А., Васильев А. П., Гусева Ю. А., Кулагина М. М., Задиранов Ю. М., Трошков С. И., Лисак В. В., Устинов В. М. Поляризационные характеристики вертикально-излучающих лазеров спектрального диапазона 850 нм с внутривибраторными контактами и ромбовидной оксидной токовой апертурой // Физика и техника полупроводников. 2016. №. 50. Т. 10. С. 1408.
33. Блохин С. А., Бобров М. А., Кузьменков А. Г., Блохин А. А., Васильев А. П., Гусева Ю. А., Кулагина М. М., Карповский И. О., Задиранов Ю. М., Трошков С. И., Прасолов Н. Д., Брунков П. Н., Левицкий В. С., Лисак В. В., Малеев Н. А., Устинов В. М. Исследования диэлектрических распределенных брэгговских отражателей для вертикально-излучающих лазеров ближнего ИК-диапазона // Письма в журнал технической физики. 2016. №. 42. Т. 20. С. 57.

Лысак Владимир Валерьевич

РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХКОРОТКИХ
ОПТИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ
ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ТРАНСПОРТА
НОСИТЕЛЕЙ В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ И
НАНОСТРУКТУРАХ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук