

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Лысака Владимира Валерьевича  
«РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ СВЕРХКОРОТКИХ ОПТИЧЕСКИХ  
СОЕДИНЕНИЙ С УЧЕТОМ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И  
ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ В МИКРОРЕЗОНАТОРАХ И  
НАНОСТРУКТУРАХ» ,**

**представленной на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук  
по специальности 01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной  
физики», 01.04.10 – Физика полупроводников**

Рецензируемая диссертация посвящена исследованию процессов переноса носителей заряда, генерации фотонов в многослойных квантово-размерных полупроводниковых структурах и распространения оптического сигнала через оптические каналы малой длины. В диссертации изучаются новые принципы построения эффективных источников оптического излучения для сверхкоротких оптических соединений (СКОС). Полученные в работе результаты могут найти применение в разработках полупроводниковых приемо-передатчиков и сверхскоростных суперкомпьютеров нового поколения. Тема диссертации **актуальна** и представляет интерес не только для исследования физических процессов в микрорезонаторах и полупроводниковых наноструктурах, но и для разработки новых сверхбыстродействующих оптических устройств на их основе.

**Научная новизна** диссертации заключается в усовершенствовании методов анализа транспортных эффектов распределения носителей заряда в сложной структуре вертикально излучающих лазеров с внутривибрационными контактами (ВИЛВК) и изменении характера и длительности процессов накопления и распределения носителей в области квантовой ямы. 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. Впервые сформулирована и обоснована численная динамическая модель квантово -

размерного полупроводникового оптического усилителя с асимметричными квантовыми ямами в виде неоднородной системы дифференциальных уравнений с учетом эффекта температурной релаксации и переноса носителей в каждом слое. 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.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации, обеспечивается применением строгих квантово-механических методов, зонной теории полупроводников и методов полуклассической теории лазеров, а также использованием 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.

**Научная и практическая значимость результатов**, полученных в диссертации, заключается в том, что в ней разработаны новые модели, которые более точно описывают наблюдаемые стационарные и динамические характеристики оптоэлектронных приборов. Предложены методы оптимизации геометрических параметров элементов СКОС с улучшенными динамическими характеристиками. 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. Получены практические рекомендации по выбору конструкций полупроводниковых лазеров с вертикальным резонатором с внутренними контактами и даны рекомендации для увеличения квантовой эффективности резонансного фотодиода.

По теме диссертации **опубликовано** 45 статей (в т.ч. 33 статьи в научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией), результаты работы были представлены на 57 российских и международных конференциях.

Публикации полностью отражают все основные положения диссертационной работы и позволяют подтвердить **личный вклад** Лысака Владимира Валерьевича, как основной при выполнении данной работы. Все основные результаты диссертации получены лично автором. В работах, опубликованных с соавторами, автору принадлежит постановка задач, разработка физических и математических моделей и методов решения. Разработка алгоритмов и проведение численных расчетов, а также обсуждение результатов выполнено совместно с соавторами работ.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка цитируемой литературы, приложения и примечания. Диссертация изложена на 282 страницах, включая 99 рисунков, 11 таблиц и список литературы – 191 наименований.

**Во введении** диссертации обоснована актуальность темы исследований и сформулированы цели диссертационной работы.

**В главе 2** диссертации анализируются основные характеристики элементов высокоскоростных сверхкоротких оптических соединений, проведен обзор современного состояния и перспективных направлений в разработке оптических систем передачи данных.

**Глава 3** диссертации посвящена исследованию вертикально излучающих лазеров с внутрирезонаторными контактами. В ней приведена математическая постановка задачи моделирования вертикально излучающего лазера с внутрирезонаторными контактами (ВИЛВК). С использованием данной модели получены результаты анализа температурных, оптических и электронных свойств лазеров, а также влияние геометрических параметров на мощностные и модуляционные характеристики. Анализ, проведенный в главе, показал, что максимальную ширину модуляции можно получить при использовании

соотношения диаметра выходного распределенного Брэгговского отражателя (РБО) и оксидного окна в области 1.3-1.5 при фиксированном размере оксидного окна.

В главе представлены исследования влияния характеристик градиентного слоя на параметры вертикально излучающего лазера. Показано, что максимальная частота эффективной модуляции достигается при выборе толщины градиентного слоя (ТГС) между контактными слоем и оксидным окном в диапазоне 40-60 Å.

**Глава 4** диссертации посвящена анализу характеристик резонансных фотодиодов (РФД). В главе приведены математические модели, описывающие работу резонансного фотодиода. Отмечается, что основным преимуществом РФД является то, что они могут быть изготовлены на одной подложке с ВИЛВК простым удалением части верхнего распределенного брэгговского отражателя (РБО), что позволяет изготавливать оба устройства в одном технологическом процессе, что увеличивает спектральную согласованность приборов и уменьшает стоимость интегрирования. В главе 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.

**Глава 5** диссертации посвящена исследованию полупроводниковых оптических усилителей на основе многослойных асимметричных квантово-размерных структур. В ней приводятся результаты вычислительного эксперимента с использованием построенной модели лазерной системы с полупроводниковым насыщающимся поглотителем на основе асимметричной многослойной квантово-размерной структуры (АМКРС).

**Глава 6** диссертации посвящена разработке методов изготовления и измерения основных характеристик элементов сверхкоротких оптических соединений. В ней 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 потери, 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 главах 3 и 4.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы работы.

В качестве **недостатков** работы отметим следующие:

1. В ряде случаев в диссертации можно встретить нечеткие и расплывчатые формулировки выводов. В качестве примера один из выводов по Главе 5: «Разработана новая интегральная модель усиления в сложных КРС, с помощью которой проведены исследования нескольких сложных КРС». С моей точки зрения, вторая часть фразы является лишней, с какой целью нужно разрабатывать «модель усиления в сложных КРС», как не для исследования «сложных КРС»? Не совсем удачно сформулированы и общие выводы диссертации (Раздел 7, стр. 238). Выводы сформулированы на 7 страницах и содержат 29 пунктов. В представленном виде эти выводы скорее напоминают краткое

содержание работы (ее небольшой реферат), так как они содержат ряд фраз, скорее относящихся к постановке задачи исследования, а не к выводам по проделанной работе. К числу таких полностью относятся два первых пункта общих выводов.

2. Диссертация содержит определенное количество грамматических ошибок, опечаток, встречаются пропуски слов и цифр, встречаются также сокращения вида: «вольт–амперная х-ка», «динамическая х-ка», что не принято использовать при оформлении рукописей.

Высказанные замечания, конечно же, не снижают высокий уровень рассматриваемой диссертации.

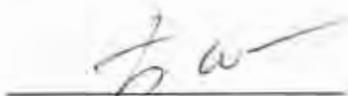
Диссертационная работа «Разработка элементов сверхкоротких оптических соединений с учетом динамических процессов и транспорта носителей в микрорезонаторах и наноструктурах» является завершенной научно – квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне. В ней проведено глубокое исследование оптических характеристик вертикально–излучающих лазеров, усилителей света, резонансных фотодиодов, что является значительным вкладом в развитие физики работы данных оптоэлектронных устройств нового поколения и будет способствовать их практической реализации. Прделанная работа по своей тематике отвечает паспорту специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 - физика полупроводников.

Представленные на защиту результаты характеризуются существенной новизной и практической значимостью. Автореферат полно отражает содержание диссертации, раскрывая ее результаты и научные положения, выносимые на защиту, которые, в свою очередь, соответствуют необходимым критериям научной новизны и практической значимости.

Диссертация полностью отвечает всем требованиям ВАК РФ, изложенным в п. 9. Положения ВАК РФ «О присуждении ученых степеней», (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №

842), а ее автор, Лысак Владимир Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико–математических наук по специальности 01.04.01 - приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 - физика полупроводников.

Ведущий научный сотрудник  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Институт физики полупроводников  
им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,  
д.ф.-м.н. , 01.04.10 – физика полупроводников  
Тел. (383) 330-69-45 e-mail: haisler@isp.nsc.ru  
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13



В.А. Гайслер

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН  
В. А. Гайслера удостоверяю

Ученый Секретарь ИФП СО РАН  
к.ф.-м.н.



С.А. Аржанникова