

В диссертационный совет Д002.034.01  
на базе Института аналитического  
приборостроения РАН  
198095, Санкт-Петербург,  
ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А

## **ОТЗЫВ** **официального оппонента**

о диссертационной работе **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 специальностям 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников

**Актуальность** диссертационной работы Лысака В. В. Обусловлена тем, что она посвящена разработке приборной базы для скоростных оптических систем, развитию методов теоретического описания физических процессов, протекающих в базовых элементах таких систем – лазерных излучателях, фотоприемниках, оптических усилителях, – моделированию их характеристик и установлению взаимосвязи между внутренней структурой и приборными параметрами. В работе также затронуты технологические аспекты создания базовых приборов, а кроме того предприняты попытки экспериментальной реализации оптических систем. Основной акцент в работе сделан на разработку приборных компонент систем, предназначенных для оптической передачи данных на короткие и сверхкороткие расстояния. Такие системы являются логичным развитием систем дальней и средней оптической связи и призваны заменить системы обмена данными между платами компьютера и внутри плат, основанные на обработке электронных сигналов. Ожидается, что такие системы будут обладать улучшенной функциональностью, прежде всего высокой скоростью передачи данных, помехозащищенностью, низким уровнем шумов. Следует отметить, что невозможно простое копирование подходов, ранее опробованных в системах дальней связи, поскольку компоненты систем ближней связи должны быть более компактны, более просты в изготовлении, допускать возможность интегрирования с другими компонентами, обладать низким энергопотреблением. На сегодня принципы, по которым будут строиться системы сверхкороткой оптической связи, до конца не определились. Нет ясности и в том, какие оптические приборы

будут лежать в их основе. В работе В.В. Лысака предпринята попытка определить облик таких систем, в основу которых положены вертикально-излучающие лазеры, резонансные фотодиоды и широкополосные оптические усилители. В связи с этим работа В.В. Лысака имеет высокую актуальность и представляет интерес как для фундаментальной науки, так и в развитии разработок полупроводниковых приемо-передатчиков и сверхскоростных суперкомпьютеров нового поколения.

**Диссертация состоит** из введения, пяти основных глав и заключения. В **главе 1** (введении) описаны объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи работы, приведены выносимые на защиту положения. Во **второй главе** рассмотрены основные элементы и характеристики оптических соединений, описаны их преимущества над проводными, кратко описаны особенности конструкции вертикально-излучающих лазеров, резонансных фотоприемников и полупроводниковых оптических усилителей. Дано описание основных положений модели, используемой для описания физических явлений, протекающих в оптоэлектронных приборах. Автор выделяет три основных процесса – оптическое излучение и усиление, перенос носителей заряда, генерация и распространение тепла. В главе также представлен обзор текущего состояния исследований по теме диссертации.

**Третья глава** является, на мой взгляд, основной в диссертации. В ней автор приводит результаты теоретического анализа статического и динамического поведения вертикально излучающих лазеров (ВИЛ). Научная ценность этой работы заключается в том, что была сделана попытка объединить ранее разрозненные подходы, применив их для создания модели ВИЛ с внешними контактами, которая учитывает взаимодействие распределения носителей заряда, оптического поля и температуры. Автор развивает конструкцию ВИЛ с внутриврезонаторными контактами. Такая структура позволяет избежать проблем с высоким сопротивлением, привносимым р-зеркалом, а также поглощения света в легированном зеркале, характерного для длинноволновых ВИЛ. Использование оксидной апертуры дает возможность прецизионно контролировать размер активной области, избегая при этом проблем, связанных с глубоким травлением. Следует отметить, что автором предпринята попытка максимально детально учесть температурные эффекты с учетом растекания тепла в реальной структуре. В работе показаны оптимальные значения геометрических параметров прибора (диаметр верхнего зеркала, толщина градиентно-легированного слоя, толщина контактного слоя, количество и расположение квантовых ям в активной области) с улучшенными скоростными и мощностными характеристиками. Практическая важность результатов этой главы

заключается в том, что расчеты выполнены для ВИЛ спектрального диапазона около 0.98 мкм с квантовыми ямами InGaAs, которые изготавливаются в ряде российских научно-технологических центров.

В четвертой главе проведен анализ статических и динамических характеристик резонансных фотодиодов (РФД). Следует подчеркнуть, что в работе рассматривается приемник излучения, который имеет такую же эпитаксиальную структуру, как и ВИЛ. Это дает возможность синтезировать оба прибора на одной подложке, что, по сути, решает проблему совмещения резонансной длины волны фотоприемника с длиной волны излучения передатчика и позволяет создавать интегрированные системы. В результате исследований найдено оптимальное сочетание свойств верхнего зеркала РФД, при котором была получена максимальная квантовая эффективность. Особо подчеркну, что достоинство конструкции с внутрирезонаторными контактами состоит в том, что число пар верхнего Брэгговского зеркала может быть изменено, не создавая каких-либо проблем с точки зрения формирования р-контакта. В работе показана возможность достижения полосы модуляции свыше 100 ГГц, что чрезвычайно важно для адекватной регистрации сверхкоротких оптических импульсов.

В пятой главе исследована динамика распространения сверхкоротких импульсов в оптических широкополосных усилителях, содержащих в активной области набор квантовых ям с различной энергией основного оптического перехода. Учтены внутризонные эффекты, такие как разогрев носителей и поглощение свободными носителями. Показано, что такие структуры позволяют усиливать оптические импульсы длительностью менее 100 фс. В шестой главе описаны методы изготовления элементов сверхкоротких оптических соединений, использованные автором для экспериментальной проверки части сделанных в предыдущих главах выводов. Продемонстрированы ВИЛ с пороговым током 1 мА и максимальной мощностью излучения около 4 мВт. Также продемонстрированы экспериментальные образцы РФД, которые показали темновой ток на уровне в десятки пА, что на несколько порядков ниже, чем в нерезонансных фотодиодах. Чрезвычайно важным результатом является продемонстрированная автором в этой главе возможность интеграции ВИЛ и РФД на единой плате с помощью волоконно-оптических каналов и полимерных волноводов, показана возможность безошибочной передачи со скоростью до 6 Гбит/с. Сравнение теоретических и экспериментальных данных в целом подтверждает правильность разработанных автором теоретических моделей.

**Основные результаты** диссертации были выделены мной выше при анализе содержания диссертации. **Научная новизна** работы заключается в том, что в ней развит метод численного анализа транспорта носителей заряда



в вертикально излучающих лазера с внутриврезонаторными контактами и оксидной апертурой. Разработана модель полупроводникового оптического усилителя с асимметричными квантовыми ямами, учитывающая эффекты температурной релаксации и переноса носителей заряда. Обоснован способ получения спектров усиления шириной более 150 нм в полупроводниковых усилителях с квантовыми ямами. Затронутые в диссертации вопросы представляют интерес не только с фундаментальной точки зрения, но также имеют большую **практическую значимость**, поскольку полученные в работе результаты применимы для разработок полупроводниковых приемопередатчиков и сверхскоростных суперкомпьютеров нового поколения. **Достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций не вызывает сомнений. Они непротиворечивы, научно обоснованы, подтверждены количественным сравнением с экспериментом.

По диссертации у меня возникли следующие **замечания**:

1. В работе обсуждается возможность использования полупроводникового оптического усилителя (ПОИ) не только по его основному назначению – для усиления слабых оптических сигналов, но и в качестве оптического контроллера, способного выполнять различные функции, в частности, для модуляции постоянного оптического сигнала. Поскольку оптический усилитель требует постоянного прямого смещения, общее энергопотребление системы лазер-модулятор возрастает по сравнению, например, со случаем прямой модуляции излучения полупроводникового лазера. В связи с этим в работе следовало бы обсудить, насколько обоснованным с точки зрения энергозатрат и тепловыделения будет использование ПОИ в качестве модулятора.

2. В работе обсуждается влияние диаметра активной области вертикально-излучающего лазера (ВИЛ) на его мощностные и электрические характеристики. Помимо этого, изменение диаметра влияет и на модовую структуру ВИЛ – при увеличении размера возникают дополнительные оптические моды, и спектр излучения ВИЛ перестает быть одночастотным. Это, в свою очередь, может влиять на возможности использования ВИЛ в качестве передатчика в быстродействующих системах оптической связи вследствие размытия излучаемых оптических импульсов при их распространении в волокне. В связи с этим вопросу о модовой структуре ВИЛ следовало бы уделить больше внимания.

3. В работе модуляционные характеристики вертикально-излучающих лазеров обсуждаются преимущественно в терминах частоты релаксационных колебаний. В то же время известно, что предельное быстродействие лазера при прямой модуляции достигается при переходе лазера при достаточно большом прямом смещении в режим демпфирования релаксационных

колебаний и определяется так называемым К-фактором. В связи с этим полагаю, что в диссертации следовало бы уделить внимание этому параметру и его возможной взаимосвязи с конструкцией ВИЛ.

4. Работа написана ясным языком, практически не содержит грамматических ошибок. К сожалению, встречаются досадные опечатки. Так, согласно (3.6), эффективный показатель преломления определяется интегрированием по радиальной координате, тогда как должно быть по вертикальной. На стр. 68 упоминается «эффективная длина волны», тогда как, очевидно, подразумевается эффективная длина резонатора. На стр. 78 приведена ссылка на источник [199], который отсутствует в списке литературы. Неоднократно (например, стр. 91 и 92) автор использует аббревиатуру ВАХ, тогда как по смыслу речь идет о ватт-амперной характеристике. Наконец, в Таблице 3.1 для ряда соединений указаны на порядок более высокие значения температурного коэффициента показателя преломления, что, очевидно, приводит к завышенному длинноволновому сдвигу полки отражения, показанному на рис. 3.8.

Указанные замечания не являются принципиальными, не затрагивают существа выносимых на защиту положений, и не меняют общую **высокую оценку** диссертационной работы. Некоторые из них могут рассматриваться как пожелания для дальнейших исследований.

Характеризуя диссертацию В.В. Лысака **в целом**, следует отметить высокий научно-методический уровень ее выполнения, разнообразие охваченных в работе приборов и устройств, которые вместе позволяют выстроить полноценную быстродействующую оптическую систему передачи информации. Сочетание теоретических исследований с экспериментальными является несомненным достоинством работы. Работы В.В. Лысака достаточно хорошо известны специалистам. Материалы диссертации опубликованы в 45 научных статьях (в том числе 33 публикации в изданиях из Перечня ВАК) и в материалах 57 научных конференций. Публикации отражают основные положения работы и позволяют подтвердить **личный вклад** Лысака В.В., который принимал активное участие в формулировании цели и задач теоретических исследований и обрабатывал результаты экспериментов в рамках разработанных им моделей. Цикл работ автора можно рассматривать как крупное научное достижение в области физики полупроводников и полупроводниковых приборов, имеющее большое значение для развития оптоэлектроники, квантовой электроники и телекоммуникаций.

**Автореферат** достаточно полно и объективно отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Лысака В.В. **соответствует** требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, **Лысак Владимир Валерьевич, заслуживает** присуждения искомой ученой степени по специальностям 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики и 01.04.10 – физика полупроводников.

*Лысак*

Жуков Алексей Евгеньевич

доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН  
проректор по учебной работе, зав. лабораторией Нанофотоники  
Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический  
университет Российской академии наук  
194021, Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, к. 3, лит. А  
тел. (812) 448 85 94  
e-mail: [zhukale@gmail.com](mailto:zhukale@gmail.com)

20 января 2017 г.

*Подпись Жукова А.Е. заверено  
Главной специалисткой  
по кадрам*



*А. В. Жуков*