

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора центра фотоники и квантовых материалов Автономной некоммерческой образовательной организации высшего профессионального образования “Сколковский институт науки и технологий” Гиппиуса Николая Алексеевича (адрес: 121205, г. Москва, Территория инновационного Центра “Сколково”, Большой бульвар д. 30, стр. 1, телефон: +7 (495) 280-14-81, e-mail: N.Gippius@skoltech.ru)

на диссертацию

Казанова Дмитрия Робертовича

**«ОПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И ТРУБЧАТЫХ НАНОСТРУКТУРАХ»,**

представленную в диссертационный совет № 34.01.02

при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»

Диссертационная работа Д.Р. Казанова посвящена детальному исследованию оптических эффектов в полупроводниковых наноструктурах: резонаторах на основе АЗ-нитридов, резонансных фотонных кристаллах, нанотрубчатых резонаторах. Актуальность диссертационной работы не вызывает сомнений. Фундаментальные исследования в области физики фотонных наноструктур являются основополагающими при разработке полупроводниковых устройств нового поколения. Создание эффективных нанофотонных приборов предполагает разработку нового дизайна микрорезонаторов, совместимых с чиповой технологией. Умение сверхбыстрого управления ультракороткими оптическими импульсами света является немаловажной задачей для использования в фотонных квантовых симуляторах. Исследования в области неорганических ван-дер-ваальсовых трубчатых структур представляет значительный интерес по аналогии с уже известными углеродными нанотрубками. В целом результаты, представленные в диссертации, проливают свет на новые возможности для селективного усиления или фильтрации сигнала на основе АЗ-нитридов, для замедления сверхкоротких импульсов света, а также для создания поляризационно-чувствительных детекторов на основе ван-дер-ваальсовых структур.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Работа изложена на 130 страницах, включая 51 рисунок и список литературы, который содержит 188 наименований.

Введение включает в себя общую характеристику работы. В нем дан обзор современного состояния исследований в области резонансных структур, описаны и поставлены проблемы, требующие решения путем разработки нового дизайна. Сформулирована цель диссертационной работы, обоснованы научная новизна и ее практическая значимость, перечислены основные положения, выносимые на защиту, и кратко описана структура диссертации.

В первой главе диссертации представлен обзор литературы по теоретическим основам функционирования резонаторов с оптическими модами типа Фабри-Перо и модами шепчущей галереи, введены основные понятия и параметры. Представлены подходы к моделированию резонансных фотонных кристаллов. Описаны основные экспериментальные методики исследования оптических свойств резонаторных наноструктур.

Вторая глава диссертации Д.Р. Казанова посвящена исследованию оптических свойств АЗ-нитридных микрорезонаторов для селективного усиления сигнала в ультрафиолетовом (GaN) и инфракрасном (InN) диапазонах, выращенных на профилированных сапфировых подложках с коническими выступами. Получены экспериментальные спектры излучения InN чашеобразных микрорезонаторов и теоретически показано, что такие спектры включают в себя резонансные оптические моды типа мод шепчущей галереи низкого порядка. Показано, что путем сопоставления экспериментальных спектров микро-католюминесценции, микро-фотолюминесценции и численного расчета собственных мод можно восстановить дисперсию показателя преломления собственно материала однокристального резонатора, качество которого существенно выше, чем у окружающих слоев. Описан и объяснен характер перераспределения мод внутри микрокристалла при изменении температуры. Кроме того, в этой главе был продемонстрирован эффекта Парселла в наноклонках на основе GaN с одиночной вставкой квантовой ямы InGaN, а также в кольцевом резонаторе, который был сформирован вокруг полусферического выступа.

В третьей главе теоретически описывается взаимодействие сверхкоротких импульсов света с резонансными фотонными кристаллами со сложной элементарной ячейкой на основе A_2B_6 и 2D бислоями дихалькогенидов переходных металлов. Был предложен дизайн сложной элементарной ячейки фотонного кристалла, в которой

находилось две квантовые ямы, уровни которых были отстроены по энергии от брэгговского резонанса. Такая структура позволила замедлять пикосекундные импульсы света на несколько пикосекунд с затуханием интенсивности исходного импульса света на 50% с сохранением его формы. Объяснен подход поиска оптимума между затуханием и замедлением падающего импульса света. Также в главе был предложен новый тип фотонного кристалла, где вместо квантовых ям используется монослой или бислой из дихалькогенида переходного металла. Было показано, что такая структура обладает практически линейной дисперсией «медленной» моды, что позволяет очень слабо искажать форму импульса света. В таких структурах была предсказана задержка света на несколько пикосекунд с затуханием до 20-30%.

В четвертой главе диссертации обсуждаются ван-дер-ваальсовы нанотрубчатые резонаторы на основе MoS_2 . Впервые были показаны спектры микрофотолюминесценции таких трубчатых структур, а также объяснены их особенности. В частности, было показано, что в стенке нанотрубки могут существовать моды шепчущей галереи, поляризованные вдоль ее оси. Была построена теоретическая модель, описывающая фотолюминесценцию таких трубок. Предложен метод определения толщины стенки нанотрубки при совместном анализе результатов численного расчета и экспериментальных данных. В частности, показано, что толщина стенки исследуемых нанотрубок составила 45 монослоев. Кроме того, в работе был предсказан режим, в котором оптические моды могут взаимодействовать с материальным (экситонным) резонансом с формированием экситон-поляритонов и продемонстрированы расчетные спектры фотолюминесценции в такой системы для различных величин расщепления Раби.

В заключении подведены итоги, обобщены основные результаты работы и приведен список публикаций автора.

В качестве замечаний по диссертационной работе Д.Р. Казанова можно отметить следующее:

1. Недостаточно подробно приведены некоторые выводы формул, использующиеся при расчетах и численном моделировании.
2. В главе 2 описывается численный расчет оптических мод в различных микрорезонаторах, но в тексте диссертации не указаны реальные границы расчетной области, в которых производится расчет. Автору следовало бы рассказать про это подробнее.

3. В главе 3 формулы 3.3 и 3.10 на коэффициент отражения от слоя с резонансным откликом отличаются друг от друга, тогда как описывают фактически одно и тоже. Предположительно в формуле 3.10 в числителе закралась опечатка и был потерян коэффициент $-it^{(0)}$.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, которая является оригинальным и законченным научным исследованием. Полученные результаты являются безусловно новыми и представляют научный интерес. Актуальность, практическая значимость, научная новизна, достоверность, а также личный вклад автора не вызывают сомнений. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, российских и международных конференциях, а статьи были опубликованы в ведущих реферируемых научных журналах (Scientific Reports, Nanomaterials, Applied Physics Letters и др.).

Диссертационная работа оформлена аккуратно, материал представлен логично и последовательно. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации Д.Р. Казанова, которая является законченным исследованием, имеющим важное научное и прикладное значение для физики нанофотонных структур. Таким образом, диссертационная работа Д.Р. Казанова “Оптические резонансные эффекты в полупроводниковых монокристаллических и трубчатых наноструктурах” полностью отвечает всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Казанов Дмитрий Робертович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

Доклад Казанова Д.Р. по материалам диссертации был представлен на научном семинаре группы Теоретической Нанофотоники Центра фотоники и квантовых материалов 31 июля 2020. Отзыв составлен по итогам обсуждения доклада на этом семинаре и изучения текстов диссертации и автореферата.

Официальный оппонент

Профессор, д.ф.-м.н.

Центра Фотоники и квантовых материалов

Сколковского института науки и технологий

Подпись Гиппиуса Н.А. заверена

Гиппиус Николай Алексеевич

Прошито, пронумеровано,
скреплено печатью И
(четыр) страниц