

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Казанова Дмитрия Робертовича «Оптические резонансные эффекты в полупроводниковых монокристаллических и трубчатых наноструктурах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — «физика полупроводников».

Диссертация Казанова Дмитрия Робертовича посвящена анализу экспериментальных данных и расчету оптических свойств полупроводниковых резонансных структур, таких как монокристаллические резонаторы на основе АЗ-нитридов, резонансные фотонные кристаллы и нанотрубки на основе ван-дер-ваальсовых соединений.

Актуальность, научная новизна и практическая значимость этих исследований не вызывает сомнений, поскольку прогресс в области приборов оптоэлектроники в значительной степени зависит от полноты знаний в области фундаментальных свойств микрорезонаторных структур разной геометрии, выполненных на основе различных материальных систем, а также успешности их реализации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 130 страниц текста, включая 51 рисунок. Список цитируемой литературы содержит 188 наименований. Каждая из глав начинается с короткого введения и завершается заключением с перечислением наиболее важных результатов.

Актуальность вошедших в диссертацию исследований, их новизна и практическая значимость обоснованы во Введении. Сформулированы цели диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы, кратко описана структура диссертации и содержание ее глав.

В первой главе диссертации рассмотрены основные принципы действия микрорезонаторов и их параметры, а также описаны возможные способы их исследования.

В главах 2-4 диссертации Д.Р. Казанова получены следующие:

1. Продемонстрирована возможность формирования совершенных чашеобразных микрорезонаторов на основе АЗ-нитридных соединений (InN, GaN), специфические оптические моды в которых способны селективно усиливать излучение.
2. Показаны преимущества использования резонансных фотонных кристаллов со сложной элементарной ячейкой для замедления сверхкоротких импульсов света. К примеру, обнаружено, что пикосекундный импульс света может замедляться на несколько пикосекунд с сохранением своей формы и небольшим затуханием.
3. Предложен дизайн резонансного фотонного кристалла на основе 2D бислоев и описано его применение для замедления света. Продемонстрировано, что дисперсия света в такой структуре имеет практически линейную медленную ветвь, что позволяет получать минимальные искажения формы прошедшего импульса света.
4. Впервые исследованы люминесцентные свойства нанотрубчатых резонаторов на основе ван-дер-ваальсовых монослоев MoS₂. Теоретически показано, что острые пики фотолюминесценции в спектрах излучения связаны с модами шепчущей галереи, поляризованными вдоль оси нанотрубки.

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 печатных работах в высокорейтинговых научных журналах и неоднократно обсуждались на различных семинарах и конференциях. К достоинствам диссертации следует отнести то, что она посвящена исследованию наноструктур совершенно нового типа. Такие структуры ранее не изучались, и информация о их свойствах полностью отсутствует. Это делает их

изучение очень сложным, и в то же время важным. Даже информация об основных свойствах материала этих структур до сих пор была, и все еще остается, противоречивой. Еще одна трудность связана со сложной геометрией этих структур. Такие сложности приводят к неизбежным погрешностям работ «первопроходцев», но и делают эти работы особо ценными.

Следует отметить и ряд недостатков работы.

Замечания по существу работы

(Глава 2)

Стр. 41-46. на рисунке 2.5 и 2.8 среднее расстояние между модами составляет всего 0.03 эВ.

Моды резонатора определяются корнями функций Бесселя $J_m(b_m)=0$. Здесь: $b_m = \pi dn/\lambda_m$. Диаметр структуры $d=1.2$ мкм, средний показатель преломления $n=2.55$, средняя длина волны света в вакууме $\lambda=1.675$ мкм. Пусть среднее расстояние между корнями функций Бесселя для малых m : $\Delta b_m = 1$. Расстояние между модами можно оценить по формуле $\Delta\lambda = \Delta b_m \lambda^2 / 2\pi dn$. Таким образом, расстояние между модами $\Delta E = 0.3$ эВ, что превосходит весь исследуемый интервал энергий. Почему такое расхождение?

Стр.42. «Рис. 2.5: Узкие линии в спектрах, связанные с МШГ в кристаллах InN»

На рисунке диаметр резонатора изменился в два раза, а расстояние между модами осталось практически прежним. Расстояние между модами также должно измениться в два раза. В чем тут дело?

Стр.43. «При изменении температуры от 5 К до 300 К с помощью микро-КЛ можно заметить интересный эффект переключения оптических мод с изменением пространственного распределения интенсивности поля», «...основной эффект переключения мод возможен только за счет изменения показателя преломления структуры»

Показатель преломления при изменении температуры от 77 до 300 К, по данным автора (рис.2.8), изменяется всего на 2.0%. Такое изменение показателя преломления эквивалентно изменению длины волны света на 2.0% и вряд может привести к изменению модового состава. В чем тут дело?

Стр.44. Рис.2.7а На первом и втором рисунке моды явно совпадают, а их энергии указаны разные. Как так получилось?

(Глава 3)

В этой главе расчет параметров проводился в приближении двумерного локального отклика. В результате полученные данные некорректно сравнивать с данными, полученными в приближении нелокального отклика, применяемого для квантовых ям.

Стр.73. «Тогда отражение от структуры, состоящей из 2D слоя или КЯ, подложки и покрывающих слоев, **в общем виде** записывается как»

$$R = \left| r_{bg} + \frac{\Gamma_0}{\omega - \omega_0 + i(\Gamma + \Gamma_0)} \right|^2$$

Эта формула содержит три ошибки. Однако, по-моему, в дальнейшем расчете не используется. Зачем она вообще?

(Глава 4)

Стр.84. «Ключевое отличие спектров ФЛ нанотрубки от пластинки заключается в появлении большого числа пиков, которые связаны с формированием МШГ»

Это волноводные моды, точно такие же, как и в пластинке. В чем же ключевое отличие?

Стр.95. «В микрорезонаторах типа Фабри-Перо с одним монослоем MoS₂ расщепление Раби составляло ~ 20 мэВ».

Расщепление Раби зависит от добротности резонатора. Какова добротность в данном случае?

Стр.100. «В монослоях MoS₂ $1/2\Gamma_0 = 0.23$ псек.» ... «Это приводит к величине $\omega_{LT} = 114$ мэВ.»

Такая величина получена для свободного монослоя MoS₂, когда имеет место диэлектрическое усиление взаимодействия. В структурах, когда слои MoS₂ окружены средой с большой диэлектрической проницаемостью, эта величина должна быть гораздо меньше.

Замечания по стилю изложения

Стр.13 «Для его определения требуется решать уравнения Максвелла в отсутствии токов и зарядов с учетом правильных граничных условий которые напрямую зависят от геометрии исследуемой структуры» **Что такое правильные ГУ? Почему они зависят от геометрии структуры?**

Стр.14 «В таком случае индукция и электрическое поле связаны как $\mathbf{D} = (1 + 4\pi\chi)\mathbf{E}$. Таким образом, для описания электромагнитного поля в микрорезонаторе его представляют набором кусочно-непрерывных областей (в случае сложной геометрии или неоднородностей), разделенных бесконечно тонкими границами». **Где тут логика?**

Стр.43. «Уравнения Максвелла решались с подходящими граничными условиями...» **Без комментариев.**

Параграф 2.2.4. **Не указаны никакие параметры расчета.**

Стр.54. «Энергия оптического перехода в планарных слоях InGaN КЯ сдвинута в красную область за счет того, что кинетика роста позволяет вырастить более широким КЯ». **Без комментариев.**

Стр.56. «Видно, что в нано-колонне при выбранной энергии распространяется мода, похожая на моду Фабри-Перо» **Моды Фабри-Перо, это стоячие волны. Куда они распространяется?**

Стр.57. Рис.2.20. Нет никакой информации о размерах структуры, показателях преломления, длинах волн.

Стр.83-85 параграф 4.2.1. **Нигде не указаны параметры нанотрубок (размеры, показатели преломления света, толщины стенок.)**

Стр.90. «Компоненты электрического поля от лазерного луча, которые лежат в плоскости стенки нанотрубки генерируют экситоны с реальным пространственным распределением (4.5)» **Что такое плоскость стенки трубки? Что будет если использовать нереальное пространственное распределение экситонов?**

И, такое почти в каждой фразе.

Замечания к основным положениям

1. Монокристаллические оптические микрорезонаторы на основе АЗ-нитридов с модами шепчущих галерей применимы для селективного усиления излучения в инфракрасном (InN, добротность 200) и в ультрафиолетовом (GaN, добротность 900) диапазонах, причем частоты оптических мод в спектрах излучения и характер их пространственного распределения определяются дисперсией комплексного показателя преломления материала микрорезонатора и ее изменением с температурой.

В чем тут новизна?

3. Многослойные нанотрубки, синтезированные из дихалькогенидов переходных металлов, являются оптическими микрорезонаторами, поддерживающими моды

шепчущих галерей, электромагнитная энергия которых локализована по преимуществу внутри стенок нанотрубок, а вектор электрического поля направлен вдоль оси трубки.
Внутри стенок трубки - волноводные моды. Причем тут шепчущая галерея?

4. «Частоты мод шепчущей галереи и возможность усиления фотолюминесценции в области экситонных резонансов определяются диаметром MoS₂ нанотрубки и числом монослоев в ее стенке, тогда как взаимодействие между экситоном и оптическими модами, вплоть до прогнозируемого формирования экситон-поляритонов, в основном контролируется дисперсией оптических мод».

Почему формирование поляритонов контролируется дисперсией стоячих волн, особенно когда у них нет дисперсии?

Принимая во внимание многочисленные замечания, считаю, что саму диссертацию лучше было бы переписать.

Результаты диссертационной работы многократно обсуждались на Международных и Российских конференциях, неоднократно докладывались и на семинарах ФТИ, в частности, на «Низкоразмерном семинаре» и всегда вызывали большой интерес. Соискатель проявил себя как очень хороший докладчик, хорошо ориентирующийся в представленных материалах. Поэтому, несмотря на отмеченные недостатки, считаю возможным присудить Казанову Д.Р. степени кандидата физ.-мат. наук.

Заключение. Диссертационная работа Казанова Дмитрия Робертовича является оригинальным исследованием оптических свойств полупроводниковых наноструктур нового типа, углубление знаний о которых важно для физики полупроводников. Автореферат и научные публикации полностью отражают содержание диссертации. Считаю, что автору диссертационной работы «Оптические резонансные эффекты в полупроводниковых монокристаллических и трубчатых наноструктурах» Казанову Дмитрию Робертовичу, может быть присуждена ученая степень кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент,
ГНС лаборатории спектроскопии
твёрдого тела ФГБУН ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
доктор физико-математических наук
194021 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26
Тел.: 8 (812) 292-71-74

Кочерешко В.П.

Подпись В.П. Кочерешко заверяю
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
кандидат физико-математических наук

Патров М.И.