

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Седова Евгения Сергеевича «Когерентная макроскопическая динамика и поляризационные свойства экситонных поляритонов в брэгговских микрорезонаторах», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика»

Диссертационная работа Седова Е. С. посвящена изучению оптических, транспортных и поляризационных свойств экситонных поляритонов в низкоразмерных структурах оптических микрорезонаторов и управлению ими. Поляритонные моды возникают в структуре в условиях сильной связи когерентных оптических мод с экситонами во встроенных квантовых ямах. Интерес к поляритонной физике обусловлен существенными научными успехами последнего времени в обнаружении фундаментальных квантовых явлений, таких как образование поляритонного конденсата — макроскопического когерентного состояния поляритонов, источника когерентного излучения, проявление поляритонами сверхтекучих свойств, нетривиальная поляризационная динамика и т. д. Предложения использовать поляритонные системы для создания оптоэлектронных, в частности, вычислительных и логических устройств, а также источников лазерного излучения, высказывались неоднократно, начиная с момента лабораторного подтверждения конденсации поляритонов. Однако разработка эффективных и удобных в реализации схем по-прежнему остаётся не до конца решённой задачей. В числе причин этого можно назвать то обстоятельство, что исследованные ранее поляритонные системы являлись существенно неравновесными и сильно диссипативными. В современных высокочастотных структурах, благодаря новым методам их создания, эти недостатки значительно снижены, и поляритоника приобретает большое прикладное значение. Это свидетельствует о высшей степени **актуальности** исследований поляритонных систем, описанных в диссертации.

Обоснованность и **достоверность** полученных в рамках диссертационного исследования результатов, научных положений и выводов подтверждается корректным использованием вычислительных методик и аналитических подходов, адекватных поставленным задачам, а также согласованием теоретических результатов с результатами экспериментальных исследований. Достоверность результатов подтверждается их апробацией на большом числе российских и международных научных конференций и семинаров, а также публикациями в ведущих научных журналах с высокими индексами цитирования и патентом на полезную модель.

Фактически представленное диссертационное исследование содержит развитие трёх смежных научных направлений современной поляритоники. Результаты, полученные в рамках каждого из направлений, являются **оригинальными** и **обладают научной новизной**.

Первое направление посвящено управлению незатухающими поляритонными токами в поляритонных конденсатах. В его рамках решена задача об оптическом управлении поляритонными конденсатами в ловушке кольцевой геометрии путём манипулирования эффективным локализирующим потенциалом. Разработан подход к возбуждению поляритонных конденсатов с произвольной величиной орбитального углового момента, разработана модель для описания токовых состояний поляритонных конденсатов. Изучен вклад поляризации источника оптической накачки в возбуждение незатухающих азимутальных поляритонных токов. Предсказано спонтанное нарушение симметрии в поляритонном конденсате, локализованном в кольцевой ловушке, в результате обоюдного влияния орбитальной и спиновой степеней свободы. Предсказан новый тип состояний поляритонного конденсата с полужелым числом кручения.

Второе направление посвящено изучению эффектов спин-орбитального взаимодействия поляритонов. В диссертационной работе предсказан эффект циттербевергунга поляритонов, состоящий в осцилляциях траектории центра масс поляритонного волнового пакета при его распространении в присутствии расщепления поляризационных

поляритонных мод. Разработан подход к управлению осцилляциями траектории в условиях циттербеверунга и осцилляциями поляризации поляритонов в условиях оптического спинового эффекта Холла при помощи внешнего магнитного поля, приложенного в геометрии Фойгта. Разработан подход к преобразованию поляритонных импульсов случайной поляризации (в том числе неполяризованных) в импульсы с линейной поляризацией.

В рамках третьего направления разработана новая поляритонная структура резонансного брэгговского зеркала с контролируемой гиперболической дисперсией для управления направлением распространения световых пучков, а также групповой скоростью световых импульсов.

Полученные в диссертационном исследовании результаты имеют **высокую научную значимость**. В фундаментальном аспекте результаты представляют весомый вклад в развитие исследований взаимодействия квантованного когерентного оптического излучения с веществом в полупроводниковых микро- и наноструктурах, в частности, в изучение оптических и транспортных свойств низкоразмерных систем в присутствии эффектов размерного квантования.

В практическом аспекте диссертационные исследования ориентированы на решение актуальных задач фотоники и оптоэлектроники (в том числе спиновой). В частности, результаты **могут быть использованы** при разработке источников лазерного излучения с управляемыми свойствами, устройств обработки оптических сигналов, передачи и кодирования оптической информации, управления поляризационными свойствами оптического излучения.

Диссертационная работа имеет традиционную **структуру**. Она включает введение, семь глав, заключение, список публикаций автора и список цитируемой литературы. Во введении содержится общая характеристика работы, в том числе обоснование её актуальности, новизны и практической значимости результатов, приведены цель диссертационной работы, научные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы

апробация работы и личный вклад автора, приведено краткое содержание диссертационной работы.

Первая глава является обзорной и содержит методологическую базу диссертационного исследования. Вторая и третья главы посвящены вопросу оптического управления незатухающими циркулярными потоками поляритонов в конденсатном состоянии, в том числе с учётом поляризации лазерного излучения накачки. Четвёртая и пятая главы посвящены изучению эффектов спин-орбитального взаимодействия поляритонов в планарном оптическом микрорезонаторе, а именно: оптического спинового эффекта Холла и эффекта циттербевергунга поляритонов. Значительная доля рассмотрения посвящена управлению указанными эффектами при помощи внешнего магнитного поля. В шестой главе изучена эволюция лазерных импульсов и лазерных пучков в гармоническом потенциале, сформированном в планарном микрорезонаторе, в условиях расщепления поляризационных мод. Седьмая глава посвящена изучению новой поляритонной структуры резонансного брэгговского зеркала с гиперболической дисперсией.

В заключении просуммированы выводы по диссертационной работе.

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне на актуальную тему в области взаимодействия лазерного излучения с веществом. Полученные результаты отличаются высокой практической значимостью и перспективами дальнейшего использования как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях. Следует отметить несомненное достоинство диссертационной работы, состоящее в сочетании разносторонности, комплексности исследований и логичности, последовательности, замкнутости изложения.

Содержание диссертации полностью отражено в автореферате и публикациях соискателя.

К работе имеются следующие **замечания и вопросы**.

1. Избыточная доля (около четверти) содержательного текста диссертационной работы отведена первой главе, в которой приводится подробное рассмотрение подходов к описанию экситон-поляритонных

конденсатов и сопряжённых с ними эффектов. Очевидно, целью подачи материала главы в такой форме стояло создание более целостной картины изучаемой проблемы. Однако всё же обсуждение ряда вопросов могло быть существенно сокращено либо вовсе опущено без ущерба целостности содержания. В числе таких вопросов, например, механизмы спиновой релаксации носителей заряда в квантовой яме, подходы к локализации фотонов и поляритонов в микрорезонаторах путём управления потерями, путём прикладывания внешнего давления к образцу, а также путём нанесения металлического слоя на брэгговское зеркало.

2. На рис. 4.9(а–в, д–ж), иллюстрирующих наблюдаемое в эксперименте пространственное распределение степени циркулярной поляризации поляритонов в плоскости микрорезонатора, присутствуют широкие горизонтальные полосы от левого края примерно до центра каждого изображения. Какова причина появления этих полос на изображениях?

3. В шестой главе рассмотрены две конструктивно очень схожие друг с другом структуры микрорезонаторов с гармоническим потенциалом, отличающиеся тем, что в одной структуре, содержащей в микрорезонаторном слое квантовые ямы, обеспечивается сильная экситон-фотонная связь, и собственные моды такой структуры являются не фотонными, а поляритонными. Однако обе структуры рассматриваются в линейном режиме (при слабой интенсивности оптической накачки) и в приближении параболической дисперсии. Таким образом, ключевые особенности поляритонной системы (непараболичность дисперсии и нелинейность) оказываются не у дел. В чём же состоит причина рассмотрения в параграфе 6.1 именно поляритонной системы, безусловно, более сложной, если предсказываемые эффекты, как ожидается, могут проявляться и в чисто фотонной системе?

4. В седьмой главе, описывающей структуру резонансного брэгговского зеркала с перестраиваемыми оптическими свойствами, в качестве управляющего параметра рассматривается скорость излучательной рекомбинации экситонов в квантовых ямах, и указывается на возможность изменения её величины при помощи внешнего воздействия.

Однако в главе не обсуждается характер этого воздействия и механизмы управления величиной скорости рекомбинации.

Необходимо отметить, что указанные замечания и вопросы не снижают значимости диссертационного исследования.

По совокупности сказанного считаю, что диссертационная работа «Когерентная макроскопическая динамика и поляризационные свойства экситонных поляритонов в брэгговских микрорезонаторах» соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (ред. от 11.09.2021), предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор Седов Евгений Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Официальный оппонент

Заведующий отделом спектроскопии конденсированных сред,
главный научный сотрудник ИСАН,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН


Наумов Андрей Витальевич

1 сентября 2022 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 г. Москва, г. Троицк, ул. Физическая, 5

Тел.: +7(495) 851-02-36

E-mail: naumov@isan.troitsk.ru

Подпись А. В. Наумова заверяю

Учёный секретарь ИСАН

к. ф.-м. н.



Кильдиярова Римма Рифовна