

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор – начальник

Управления научной политики

МГУ имени М.В. Ломоносова,

д. ф.-м. н., профессор А. А. Федянин



2022 года

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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»**

Разработка методов управления параметрами когерентного оптического излучения имеет долгою историю и по-прежнему остаётся одним из актуальных направлений исследований современной лазерной физики. Это обусловлено в значительной мере прогрессом в высокотехнологичных областях науки и техники, приведшего к созданию новых материалов и структур оптическими методами, к разработке новых устройств микрофотоники и оптоэлектроники и разработке новых методов оптической обработки классической и квантовой информации и т.п. Одним из возможных способов управления параметрами оптического излучения является обеспечение его сильной связи с возбуждениями в веществе, например, с элементарными возбуждениями в полупроводниковых кристаллах, экситонами. В таких структурах возникают связанные экситон-фотонные состояния (экситонные поляритоны), возможности управления которыми существенно расширяются, благодаря материальной (экситонной) компоненте.

К этой актуальной проблеме относится диссертационная работа Седова Евгения Сергеевича, посвященная управлению свойствами макроскопических состояний экситонных поляритонов (поляритонных конденсатов) в полупроводниковых микрорезонаторных гетероструктурах. Поляритонные конденсаты, выступающие источником когерентного оптического излучения, известны также как бозонные лазеры. Предметом исследований в диссертации являются пространственное распределение излучения, орбитальная степень свободы, поляризация поляритонных конденсатов. Важность этих исследований определяется не только необходимостью расширения фундаментальных знаний о физике связанных состояний «свет-вещество», но и потребностью в пополнении набора инструментария для управления

оптическим излучением, а также возможностью применения результатов для создания новых эффективных устройств и приборов на их основе.

Диссертация состоит из Введения, семи глав и Заключения. Список цитируемой литературы содержит около 300 наименований.

**Во Введении** определены цели и задачи диссертационной работы, обоснована актуальность её тематики, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены также положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и личном вкладе автора, изложено краткое содержание диссертации.

**В первой главе** приведены общие сведения об изучаемых автором в дальнейшем процессах. Представлены концепция экситонных поляритонов, сведения об особенностях формирования экситон-поляритонных конденсатов в брэгговских микрорезонаторных структурах, приведены способы их описанию. Даны представления о спин-орбитальном взаимодействии поляритонов, его механизмах и методах описания.

**Вторая глава** посвящена исследованию циркулярных поляритонных токов в цилиндрических микрорезонаторах. Продемонстрирована возможность возбуждения вихрей в кольцевых поляритонных конденсатах, а также управления ими путём обеспечения невзаимности системы. Обнаружены конденсаты с циркулярными токами, характеризующиеся дробным орбитальным угловым моментом. Для описания поляритонных токов использована оригинальная математическая модель. Результаты моделирования качественно согласуются с результатами экспериментов.

**В третьей главе** теоретически изучены особенности формирования поляритонных токов в микроцилиндрах с учётом поляризации поляритонов. В частности, принимается во внимание спин-орбитальное взаимодействие за счёт расщепления ТЕ- и ТМ-поляризованных мод микрорезонатора, а также частичная передача поляризации лазерной накачки поляритонному конденсату. Предсказано спонтанное нарушение симметрии поляритонного конденсата, возникающее в осесимметричном эффективном потенциале ловушки. Среди полученных результатов следует отметить также обнаружение нового типа токового состояния поляритонов с дробным орбитальным моментом, в котором азимутальные поляритонные токи присутствуют в обеих циркулярных поляризациях, при этом только одна из них содержит вихрь.

**Четвёртая глава** посвящена изучению поляризационной динамики поляритонов в состоянии конденсата в микрорезонаторе при наличии спин-орбитального взаимодействия. Изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного к микрорезонатору в конфигурации Фойгта, на эволюцию поляризации поляритонов. Выявлена возможность подавления и усиления осцилляций циркулярной поляризации поляритонов, распространяющихся в плоскости резонатора, внешним магнитным полем.

**В пятой главе** изучено влияние спиновой (поляризационной) степени свободы поляритонного конденсата на его распространение в плоскости микрорезонатора. Обнаружен и

изучен эффект циттербеверунга, состоящий в том, что поляритонный волновой пакет приобретает осциллирующую траекторию при наличии спин-орбитального взаимодействия. Эффект исследован для спин-орбитального взаимодействия, индуцированного ТЕ-ТМ расщеплением поляритонных мод в микрорезонаторе. Проанализированы механизмы спинового расщепления экситонных и фотонных состояний, которые могут вызвать эффект циттербеверунга поляритонов в сильном взаимодействии. Детально изучено влияние в конфигурации Фойгта внешнего магнитного поля на осцилляции поляритонов.

**В шестой главе** изучена поляризационная динамика поляритонных импульсов и фотонных пучков в гармонической ловушке в микрорезонаторе с плоскими зеркалами в условиях спин-орбитального взаимодействия. Обнаружен эффект «выпрямления» поляризации лазерного импульса: показано, что поляритонный импульс, инжектированный в структуру резонансной импульсной накачкой со случайной поляризацией, расщепляется на два импульса с ортогональными линейными поляризациями. Для фотонных волновых пакетов предсказано формирование в структуре полигональных текстур.

**В седьмой, последней главе** предложена новая поляритонная структура, представляющая собой брэгговское зеркало с расположенными периодическим образом квантовыми ямами. Получено дисперсионное уравнение для поляритонов; показано, что в такой структуре поляритоны обладают гиперболической дисперсией. При этом предсказано и подтверждено моделированием отрицательное преломление световых пучков в структуре. Показана возможность управления групповой скоростью поляритонных импульсов, а также углом преломления световых пучков в поляритонной структуре путём изменения скорости излучательной рекомбинации экситонов.

Основные результаты диссертационной работы обобщены в **Заключении**.

К наиболее важным результатам диссертационной работы, по нашему мнению, можно отнести следующие.

– Разработка теории управления орбитальной степенью свободы экситон-поляритонных конденсатов. Предложен подход к индуцированию поляритонных токов, состоящий в нарушении азимутальной симметрии эффективного локализирующего потенциала для поляритонов. Продемонстрирована возможность возбуждения поляритонных конденсатов, характеризующихся как целочисленными, так и дробными приведёнными орбитальными моментами, изучены особенности распределения их фазы и плотности. Разработана модель для описания поляритонных конденсатов с азимутальными поляритонными токами.

– Развита теория спин-орбитального взаимодействия поляритонов в кольцевых ловушках. Предсказано спонтанное нарушение симметрии токовых состояний в поляритонном конденсате при понижении симметрии системы до осевой второго порядка, состоящее в том, что поляритонное состояние, характеризующееся противоположно-направленными азимутальными токами в ортогональных циркулярных поляризациях, сменяется состоянием с сонаправленными

токами. Предсказан новый тип состояний экситон-поляритонного конденсата с полувещным числом кручения, в котором обе циркулярно-поляризованные компоненты конденсата характеризуются ненулевым средним орбитальным угловым моментом, при этом только одна поляризационная компонента содержит вихрь.

– Развита теория спин-орбитального взаимодействия поляритонов в планарных микрорезонаторах. Предсказан эффект циттербеверунга поляритонов. Предложен подход к управлению оптическим спиновым эффектом Холла и эффектом циттербеверунга поляритонов при помощи внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости микрорезонатора. Продемонстрирована возможность как усиления, так и ослабления указанных эффектов.

– Изучено совместное действие спин-орбитального взаимодействия поляритонов и их локализации во внешней ловушке на эволюцию макроскопических поляритонных состояний и их поляризации в микрорезонаторе. Разработан способ преобразования поляризации лазерно-индуцированных поляритонных импульсов со случайной поляризацией в импульсы с линейной поляризацией.

– Разработан новый тип оптической периодической структуры с контролируемой дисперсией для управления групповой скоростью лазерных импульсов и углом преломления лазерных пучков.

При общей положительной оценке диссертационной работы имеются следующие вопросы и замечания:

— Эксперименты по возбуждению и наблюдению поляритонных конденсатов, описываемые в главах 2 и 4, проводились при криогенных температурах. Следовало бы обсудить влияние температуры в проявлении обсуждаемых эффектов.

— Ряд эффектов, обсуждаемых в диссертации применительно к поляритонным конденсатам, как ожидается, можно наблюдать и в чисто фотонных системах, представляющих собой микрорезонаторы, не содержащие активных сред (одиночных квантовых ям или ансамблей квантовых ям). Это и эффект циттербеверунга, и преобразование поляризации лазерных импульсов в гармонической ловушке. Следовало бы обосновать необходимость рассмотрения эффектов в условиях сильного взаимодействия света с экситонами.

— В седьмой главе рассмотрена брэгговская структура модифицированного фотонного кристалла. В структурах такого типа в значительной мере проявляются эффекты спин-орбитального взаимодействия света при его наклонном падении, вызванные ТЕ-ТМ расщеплением. Кроме того, присутствие в системе экситонного резонанса и воздействие на него извне вносят дополнительный вклад в спин-орбитальное взаимодействие поляритонов, оказывая влияние на поляризационные характеристики проходящего через структуру излучения. Однако поляризационные эффекты в модифицированном брэгговском зеркале не обсуждаются.

— В диссертации рассматриваются высокочастотные поляритонные структуры, обеспечивающие время жизни поляритонов в десятки пикосекунд. При этом распространение

поляритонов рассматривается в баллистическом режиме, т.е. с сохранением ими энергии в пределах конденсата. Вместе с тем при распространении поляритонов на расстояния десятки и сотни микрометров в плоскости резонатора процессы релаксации энергии поляритонов могут оказывать определенное влияние.

- Некорректно сравнивать макроскопическую заселенность бозе-эйнштейновского конденсата с коммутационным соотношением (с. 47).

— Имеется ряд замечаний по терминологии.

Жаргон плоский резонатор. Автор использует кальку английского термина «микростолбиковый резонатор» («micropillar cavity»), тогда как в отечественной литературе используется просто микропиллар. Диаметр обсуждаемых в диссертации структур (25 мкм) превышает длину волны лазерного излучения во много раз, в связи с этим более подходящим названием является «микродиск». Следовало бы подобрать и использовать русский термин для эффекта «циттербеверунга».

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Седова Евгения Сергеевича.

В целом диссертация производит хорошее впечатление и является законченным научным исследованием на актуальную тему. Работа выполнена на высоком научном уровне, результаты оригинальны, обладает научной и практической значимостью. Достоверность полученных результатов обосновывается исследованиями, основанных на использовании фундаментальных теоретических положениях современной лазерной физики и смежных дисциплин, и подтверждается соответствием результатов расчётов с имеющимися экспериментальным данным.

Полученную автором совокупность новых результатов можно характеризовать как существенный вклад в изучение физики взаимодействия когерентного оптического излучения с элементарными возбуждениями в полупроводниковых кристаллах, расположенных в микрорезонаторных структурах. Результаты диссертационной работы хорошо отражены в публикациях автора в российских и зарубежных рецензируемых журналах с высоким индексом цитирования, докладывались на научных специализированных семинарах и конференциях.

Результаты диссертации могут быть использованы при разработке новых устройств оптоэлектроники и микрофотоники, включая миниатюрные источники когерентного излучения оптического диапазона с управляемыми характеристиками (частотой, пространственным распределением, поляризацией), источников излучения со спирально закрученным волновым фронтом, интерферометров. Они могут представить интерес для создания оптических логических элементов. Результаты диссертации также могут быть также использованы в образовательном процессе.

Диссертационная работа Седова Евгения Сергеевича «Когерентная макроскопическая динамика и поляризационные свойства экситонных поляритонов в брэгговских

микрорезонаторах» является законченным научным трудом. Ее результаты могут быть востребованы в МГУ имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургском государственном университете, Владимирском госуниверситете имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Московском педагогическом университете, Физическом институте им. П.Н. Лебедева, Университете ИТМО (г. Санкт Петербург), ОИЯИ (г. Дубна), Институте лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск), Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе (г. Санкт Петербург), Российском квантовом центре (Сколково), а также других научных организациях, занимающихся проблемами взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Автореферат и публикации автора полностью отражают основные выводы и теоретические положения диссертации.

На основании вышеизложенного считаем, что диссертационная работа «Когерентная макроскопическая динамика и поляризационные свойства экситонных поляритонов в брэгговских микрорезонаторах» удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Седов Евгений Сергеевич, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Зав. кафедрой  
Общей физики и волновых процессов  
Физического факультета  
ФГБОУ ВО МГУ им. М. В. Ломоносова  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Макаров  
Владимир Анатольевич

Профессор кафедры  
Общей физики и волновых процессов  
Физического факультета  
ФГБОУ ВО МГУ им. М. В. Ломоносова  
доктор физ.-мат наук

Чиркин  
Анатолий Степанович

#### **Сведения о ведущей организации**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ им. М.В. Ломоносова)

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1 стр. 2

Контактный телефон: 8 (495) 939-16-82

Интернет-сайт: <https://phys.msu.ru>

E-mail: [info@physics.msu.ru](mailto:info@physics.msu.ru)