

## 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»

### **Актуальность темы диссертационной работы**

Работа направлена на изучение макроскопических состояний экситонных поляритонов, представляющих собой сильно коррелированные состояния света в веществе, образованные в результате сильной связи между фотонами и экситонами в полупроводниковых кристаллах. Макроскопические состояния экситонных поляритонов образуют бозе-эйнштейновские конденсаты, выступающие источником когерентного монохроматического света, аналогичного излучению традиционных полупроводниковых лазеров. Исследование сфокусировано на решении проблемы разработки подходов к управлению макроскопическим поведением поляритонов в полупроводниковых гетероструктурах: планарных микрорезонаторах, цилиндрических микропиларах, резонансных брэгговских зеркалах. Это включает в себя изучение методов обеспечения заданного пространственного распределения плотности и фазы поляритонных конденсатов, управления поляризацией и распространением поляритонных импульсов и стационарных волновых пакетов. Результаты исследования ложатся в основу платформы для управления свойствами когерентного излучения в твёрдом теле на микро- и наномасштабах — направления, набирающего актуальность с развитием современной фотоники и оптоэлектроники. Это свидетельствует и об актуальности выбранной темы диссертационного исследования.

### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов диссертации не вызывает сомнений. В основе такого утверждения лежит детальное описание в диссертации подходов, используемых соискателем при получении результатов: освещение промежуточных шагов при построении

математических моделей, обоснование используемых приближений, описание методов обработки экспериментальных данных и др. Подобному выводу в значительной мере способствует подробная первая глава с обилием научных ссылок, описывающая методологическую основу диссертационного исследования. Весомым также является тот факт, что значительная часть диссертационного исследования содержит сопоставления теоретических и экспериментальных результатов, находящихся в очень хорошем согласии друг с другом.

### **Новизна исследований**

В диссертации охвачено несколько взаимосвязанных направлений исследования экситон-поляритонных состояний в полупроводниковых гетероструктурах: это управление орбитальной степенью свободы поляритонных конденсатов, обоюдное влияние спиновой (поляризационной) и орбитальной степеней свободы поляритонов и управление распространением света в брэгговских структурах в условиях сильного взаимодействия света с веществом. Полученные результаты по всем направлениям являются новыми и оригинальными.

В ходе исследований предложен подход к возбуждению незатухающих азимутальных токов поляритонов в кольцевой ловушке и полностью оптическому управлению ими при помощи пучка нерезонансной оптической накачки. Предложена оригинальная математическая модель для описания поляритонных токов, учитывающая неконсервативные процессы и нелинейные эффекты в конденсате, а также нарушение азимутальной симметрии системы. Предсказана возможность возбуждения конденсатов с азимутальными поляритонными токами, характеризующихся дробным орбитальным угловым моментом, описаны их свойства. Продемонстрирована возможность использования поляризации нерезонансной оптической накачки в качестве инструмента управления поляритонными токами. Предсказано спонтанное нарушение симметрии в поляритонном конденсате в кольцевой ловушке с осевой симметрией в условиях спин-орбитального взаимодействия. Предсказан новый тип токовых состояний в спинорном поляритонном конденсате: для него характерно полуцелое число

кручения, при этом только одна из его циркулярно-поляризованных компонент содержит вихрь.

Подробно изучено влияние внешнего магнитного поля на поляризационные свойства поляритонных состояний. При этом рассмотрена не традиционная для поляритонных структур геометрия Фарадея, а геометрия Фойгта, индуцирующая расщепление линейно-поляризованных компонент. Продемонстрирована возможность управления пространственными осцилляциями поляризации поляритонов в плоскости микрорезонатора при помощи магнитного поля: показана возможность подавления осцилляций поляризации, вызванных эффектами спин-орбитального расщепления. Изучено влияние поляризации поляритонов на их пространственную эволюцию: такое исследование становится особо актуальным с появлением новых высокочастотных резонаторов, обеспечивающих большое расщепление поляритонных мод и распространение поляритонов на значительные расстояния (вплоть до единиц миллиметров). Предсказан и изучен эффект циттербеверунга поляритонов, который состоит в осцилляциях их траектории под влиянием спина (поляризации) при поляризационном расщеплении. Изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного в геометрии Фойгта, на циттербеверунг поляритонов. Продемонстрирована возможность управления амплитудой и периодом осцилляций траектории в широких пределах.

Изучены особенности эволюции поляризации поляритонов в гармонической ловушке при спин-орбитальном взаимодействии. Предсказан эффект «выпрямления» поляризации поляритонных импульсов, заключающийся в преобразовании в линейную случайной поляризации импульса, навязанной поляризацией резонансного лазерного возбуждения.

Предложена оригинальная структура резонансного брэгговского зеркала, обеспечивающая за счёт экситонного резонанса формирование экситон-поляритонных мод с управляемой гиперболической дисперсией. Теоретически продемонстрирована возможность управления групповой скоростью поляритонных импульсов, а также углом преломления световых пучков.

**Значимость полученных результатов для науки и практики, рекомендации по использованию результатов диссертации**

Полученные в диссертации результаты имеют большую значимость для лазерной физики, когерентной оптики и физики твёрдого тела, существенно дополняя качественные представления о физике взаимодействия когерентного оптического излучения с веществом. Являясь фундаментальными, результаты, тем не менее, обладают большой прикладной значимостью, расширяя спектр инструментов управления свойствами излучения и открывая перспективы для создания новых источников когерентного оптического излучения. С практической точки зрения важен вопрос об управлении характеристиками излучения, такими как пространственное распределение его интенсивности, фазы, а также поляризации. Именно этому вопросу преимущественно посвящены описанные в диссертации исследования.

Поляритонные источники излучения с контролируемыми характеристиками могут выступить эффективным инструментом изучения фундаментальных свойств оптических структур. В частности, большую роль они могут сыграть при изучении свойств оптически неактивных (тёмных) экситонов в полупроводниковых квантовых ямах: особенностей их возбуждения, динамики, взаимодействия. Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых оптоэлектронных устройств для работы с классической и квантовой информацией. В частности, использование орбитальной и поляризационной степеней свободы поляритонных конденсатов позволит повысить плотность кодируемой и передаваемой информации. Полученные соискателем результаты по исследованию спин-орбитального взаимодействия света открывают новые возможности по управлению поляризационными и орбитальными свойствами когерентного излучения. Разработанная в диссертации структура резонансного брэгговского зеркала может лечь в основу оптических переключателей, разделителей световых сигналов (сплиттеров), оптических линий задержки и устройств оптической памяти.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация построена по классической схеме и состоит из введения, семи глав, первая из которых является обзорной, заключения, списка публикаций соискателя и списка цитируемой литературы. Объём диссертации составляет 242 страницы, 73 рисунка. Список литературы включает 308 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы её цель и задачи, описана новизна работы и приведены защищаемые положения. Дана информация об апробации результатов работы, описан личный вклад автора. В краткой форме описано содержание диссертации.

В первой главе приведена методологическая база диссертационного исследования. В рамках описания взаимодействия когерентного излучения с веществом введено понятие экситонных поляритонов, экситон-поляритонного конденсата, дано представление о спин-орбитальном взаимодействии света, описан ряд поляритонных структур, приведены подходы к управлению поляритонами в структурах.

Вторая и третья главы содержат результаты исследований по оптическому возбуждению незатухающих поляритонных токов и управлению ими в полупроводниковых цилиндрических микропилларах. Изучены конденсаты, характеризующиеся целочисленными и дробными орбитальными угловыми моментами, как вихревой, так и не вихревой природы. Изучена роль комплексного эффективного локализирующего потенциала и поляризации оптической накачки в формировании поляритонных токов.

В четвёртой главе изучена поляризационная динамика макроскопических состояний поляритонов в планарном микрорезонаторе в условиях спин-орбитального взаимодействия. Изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного в геометрии Фойгта, на эволюцию поляризации поляритонов.

Пятая глава посвящена изучению и описанию фундаментального эффекта циттербеверунга поляритонов в микрорезонаторе при спин-орбитальном взаимодействии. Выявлены условия его возникновения, изучено влияние внешнего магнитного поля в геометрии Фойгта на особенности проявления циттербеверунга поляритонов.

В шестой главе изучена эволюция поляритонов и фотонов в гармонической ловушке в условиях спин-орбитального взаимодействия. Рассмотрены как импульсный режим возбуждения (для поляритонов), так и непрерывная оптическая накачка (для фотонов). Выявлены и изучены эффекты преобразования случайной поляризации поляритонных импульсов в линейную, а также формирования текстур интенсивности фотонного поля полигональной формы.

В главе 7 предложена и описана оригинальная поляритонная структура резонансного брэгговского зеркала с гиперболической дисперсией. Изучена возможность управления в ней распространением лазерных импульсов и пространственно-ограниченных световых пучков.

В заключении представлены основные научные результаты и выводы.

Содержание диссертации полно и точно отражено в автореферате и опубликованных работах.

Диссертационная работа лишена серьёзных недостатков, однако к ней имеются следующие замечания и вопросы:

1. В диссертационной работе уделено большое внимание вкладу тёмных экситонов в особенности эволюции поляризации поляритонов, а также подробно описан подход к возбуждению резервуара тёмных экситонов, значительным образом участвующего в формировании эффективного потенциала для поляритонов. Однако, в задаче управления азимутальными поляритонными токами посредством изменения эффективного потенциала роль тёмных экситонов не исследована.

2. В главе 3 диссертации обсуждается частичная передача поляризации нерезонансного возбуждающего излучения поляритонному конденсату, но не пояснен механизм этой передачи.

3. На рис. 3.7(a) представлена зависимость токового состояния поляритонного конденсата от управляющих параметров системы — смещения пятна накачки и степени её циркулярной поляризации. При этом демонстрируется, что для ортогональных циркулярных поляризаций накачки реализуются состояния конденсата с противоположно-направленными токами. Возникает вопрос о том, как происходит переключение конденсата между состояниями с токами в одном и другом направлении, если плавно изменять степень поляризации накачки, зафиксировав величину смещения ее пятна? Возможен ли гистерезис?

4. В четвёртой главе обсуждается нелинейная поляризационная динамика поляритонов в микрорезонаторе. Однако, при этом не учитывается взаимодействие поляритонов с противоположно-направленными спинами. В третьей главе этот эффект учтен.

5. В седьмой главе не обсуждается влияние поляризации на взаимодействие излучения с резонансным брэгговским зеркалом.

### Заключение

Диссертационная работа Седова Евгения Сергеевича «Когерентная макроскопическая динамика и поляризационные свойства экситонных поляритонов в брэгговских микрорезонаторах» представляет собой завершённое и цельное научное исследование, результаты которого имеют фундаментальное значение и перспективы прикладного использования. Диссертация содержит конкретные научные результаты, которыми отдельные научные коллективы могут руководствоваться при планировании собственных исследований. Представленные в диссертации результаты получены в рамках решения научной проблемы, имеющей важное экономическое значение, и их внедрение внесет значительный вклад в развитие технологического сектора страны, что соответствует 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. Автор диссертации Седов Евгений Сергеевич заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».


Официальный оппонент

Главный научный сотрудник - заведующий лабораторией интегральной оптики на гетероструктурах

ФТИ им. А. Ф. Иоффе,

доктор физико-математических наук,

профессор РАН

05.09.2022 

Соколовский Григорий Семенович

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Адрес: 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 26

Тел.: +7(812) 292-79-14

E-mail: gs@mail.ioffe.ru

Подпись Соколовского Г.С. удостоверяю

зав. отделом кадров ФТИ им. А. Ф. Иоффе





