

О Т З Ы В

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 Е.С.Седова работа посвящена комплексным исследованиям гибридных состояний экситон-поляритонов, представляющих собой связанные состояния электромагнитного поля и элементарных возбуждений (экситонов) в полупроводниковых гетероструктурах. В частности, речь идёт о поляритонах, образующихся в полупроводниковых квантовых ямах, помещённых в микрорезонатор Фабри-Перо с многослойными диэлектрическими (брэгговскими) зеркалами. Внутри такой системы поляритоны образуют квазидвумерный слабо взаимодействующий бозе-газ, который при определенных экспериментальных условиях способен переходить в состояние бозе-эйнштейновского конденсата. Конденсатное состояние поляритонов в микрорезонаторе выступает источником когерентного направленного монохроматического излучения. В литературе для него применяется такое понятие как «поляритонный (бозонный) лазер». В отличие от традиционных лазеров, поляритонный лазер не требует инверсии населенности и не имеет порога накачки. Его можно использовать как источник когерентного света слабой интенсивности. Наличие экситонной компоненты делает его характеристики перестраиваемыми. В настоящее время исследования бозонных лазеров получили широкое распространение в связи с потенциально широкой областью их применения, в частности, для передачи и обработки информации, а также в связи с востребованностью в экспериментальных исследованиях в физике полупроводников.

Исследования, направленные на изучение свойств макроскопических экситон-поляритонных состояний и разработка методов управления ими являются актуальными и необходимыми для расширения возможностей управления характеристиками излучения. Это являлось целью диссертационной работы, в которой проводились изучение и разработка подходов к управлению эволюцией макроскопических экситон-поляритонных состояний в полупроводниковых гетероструктурах.

Диссертация состоит из **Введения**, семи **Гла**в, **Заключения**, списка работ автора по материалам диссертации, и списка литературы из 308 наименований. Материал диссертации изложен на 242 страницах и сопровождается 73 рисунками.

Во **Введении** приведена общая характеристика работы, включающая описание её актуальности, научной новизны, значимости результатов, приведены выносимые на защиту научные положения. Также в реферативной форме дано содержание диссертации.

Глава 1 содержит обзор литературы с описанием методологических основ диссертационного исследования. Изложены концепция экситонных поляритонов в брэгговских микрорезонаторах, особенности и подходы к их возбуждению оптическим воздействием и описанию макроскопических поляритонных состояний, обоснована идея псевдоспина (поляризации) поляритонов, описаны подходы к управлению поляритонными конденсатами.

Глава 2 посвящена проблеме возбуждения незатухающих циркулярных токов поляритонов в микрорезонаторах цилиндрической формы. Предложен оригинальный подход, позволяющий управлять направлением и величиной потока поляритонов в состоянии бозонного лазера. Для возбуждения некогерентного резервуара экситонов предложено использовать узкий пучок нерезонансной оптической накачки, сфокусированный вблизи центра цилиндрического резонатора. Некогерентный резервуар за счёт стимулированного рассеяния накачивает поляритонный конденсат, а также за счёт эффектов взаимодействия модулирует пространственное распределение его плотности. Манипулирование положением и формой пятна накачки в пределах плоскости цилиндрического резонатора позволяет добиться требуемых характеристик потока поляритонов. Поляритонный конденсат с циркулярными токами выступает источником когерентного монохроматического излучения, обладающего спиральным волновым фронтом и характеризующегося орбитальным угловым моментом, отличным от нуля. Продемонстрирована возможность возбуждения поляритонных конденсатов с дробными орбитальными угловыми моментами. Этот результат важен для определения возможности генерации излучения управляемым образом без применения дополнительных оптических элементов, таких как фазовые пластины и пространственные модуляторы света. Полученные теоретические результаты подкреплены серией экспериментов и хорошо согласуются с ними.

Глава 3 содержит развитие исследований, описанных в Главе 2. Рассматривается аналогичная структура микрорезонатора цилиндрической формы, при этом учитывается поляризация оптической накачки и поляритонов. Изучено совместное влияние двух эффектов на формирование поляритонных токов: расщепление фотонных (и как следствие, поляритонных) ТЕ- и ТМ-поляризованных мод поля в многослойной структуре резонатора и взаимодействие поляритонов внутри конденсата, а также с резервуаром. Предсказано спонтанное нарушение симметрии системы в зависимости от положения пятна накачки в плоскости микрорезонатора. Показано, что в случае, когда пятно оптической накачки находится вблизи центра микрорезонатора, в условиях ТЕ-ТМ расщепления в ортогональных циркулярных поляризациях в поляритонном конденсате возникают встречные поляритонные токи. При удалении пятна от центра микрорезонатора возрастает роль эффектов взаимодействия. Это приводит к тому, что токи в ортогональных поляризациях приобретают одно направление, которое выбирается спонтанным образом в случае линейно поляризованной накачки. Продемонстрирована возможность использования поляризации накачки как управляющего параметра для потоков поляритонов в состоянии бозонного лазера.

В **Главе 4** рассмотрен другой тип полупроводниковой структуры, представляющий собой высокодобротный плоский микрорезонатор. Внимание сфокусировано на эффектах спин-орбитального взаимодействия связанного света (поляритонов) в структуре. Дано теоретическое описание эксперимента по наблюдению оптического спинового эффекта Холла, который проявляется формированием регулярных поляризационных паттернов в изображении плоскости резонатора. Показана роль ТЕ-ТМ расщепления, а также поляритон-поляритонного взаимодействия в проявлении этого эффекта. Далее было изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости резонатора (геометрия Фойгта), на особенности эволюции поляризации поляритонов. Продемонстрирована возможность управления пространственным распределением степени циркулярной поляризации поляритонов в плоскости резонатора при помощи магнитного поля. В частности,

показано изменение пространственного периода осцилляций поляризации поляритонов в одномерной геометрии и деформация поляризационных паттернов в двумерной геометрии поляритонного лазера.

Глава 5 посвящена изучению самовоздействия поляритонного конденсата вследствие его поляризации. Изучено влияние поляризации поляритонного конденсата на распределение его плотности в плоскости микрорезонатора. Предсказан фундаментальный эффект циттербеверунга — «дрожания» траектории поляритонов при распространении под влиянием их поляризации в условиях ТЕ-ТМ расщепления. Выполнен анализ характеристик циттербеверунга, получено выражение для траектории поляритонов. Изучена возможность управления циттербеверунгом при помощи приложенного в плоскости микрорезонатора внешнего магнитного поля. Последнее эффективно влияет на поляритоны посредством воздействия на их экситонную компоненту. Продемонстрирована возможность контроля величины амплитуды и периода «дрожания» траектории, а также возможность наблюдения эффекта при любых волновых векторах поляритонов.

В **Главе 6** изучены особенности распространения излучения в плоскости микрорезонатора, содержащего гармоническую ловушку, в условиях спин-орбитального взаимодействия, индуцированного ТЕ-ТМ расщеплением. Рассмотрена экситон-поляритонная система (микрорезонатор с квантовыми ямами) в условиях импульсной накачки, а также чисто фотонная система (микрорезонатор без встроенных квантовых ям) в условиях непрерывной резонансной оптической накачки. Показано, что лазерный импульс любой поляризации в процессе распространения в такой системе приобретает линейную поляризацию. Как «выпрямитель» поляризации система работает и при непрерывной лазерной накачке. Однако основной эффект в этом режиме состоит в том, что фотонный волновой пакет в обладающей вращательной симметрией гармонической ловушке приобретает полигональную форму.

В **Главе 7** предложена оригинальная поляритонная структура, представляющая собой модифицированное брэгговское зеркало. Модификация состоит в том, что в слои одного типа встроены квантовые ямы, так что собственные моды такой структуры являются не фотонными, а поляритонными. Параметры слоёв подобраны таким образом, что вдоль оси роста структуры поляритоны обладают гиперболической дисперсией. Благодаря экситонной компоненте дисперсия является управляемой при помощи внешнего воздействия электрическим полем. Путём моделирования продемонстрирован ожидаемый для структуры с гиперболической дисперсией эффект отрицательного преломления света, а также возможность управления направлением распространения оптических пучков и групповой скоростью лазерных импульсов, распространяющихся в структуре.

Все научные положения и выводы, сделанные как по диссертации в целом, так и по каждой содержательной главе, являются обоснованными и достоверными. Это обосновано тем, что при выполнении исследований использовались аналитические и численные подходы, успешно зарекомендовавшие себя при выполнении более ранних исследований в данной и смежных областях. Так, в основе численного описания эволюции поляритонного конденсата лежит обобщённое уравнение Гросса-Питаевского для его макроскопической волновой функции, учитывающее неконсервативные процессы потерь поляритонов и внешней оптической накачки. Для описания поляризационных эффектов поляритонов применяются два альтернативных подхода: рассмотрение эволюции двухкомпонентного спинора, характеризующего

поляритонный лазер в базисе ортогональных поляризаций, и так называемый псевдоспиновый формализм, состоящий в рассмотрении эволюции псевдоспина (эквивалентного вектору Стокса) поляритонов, прецессирующего в эффективном поле, индуцированном поляризационными эффектами. Применение для решения отдельных задач одновременно нескольких подходов позволяет на основе качественного и количественного сопоставления результатов делать вывод об их достоверности. В дополнение к этому, в Главах 2 и 4 описаны результаты экспериментальных исследований, которые находятся в хорошем согласии с теоретическими результатами, полученными автором диссертации, что также является важным аргументом в пользу достоверности и обоснованности выводов диссертации.

Все результаты диссертации Е.С.Седова являются новыми и оригинальными, имеют высокую фундаментальную значимость, а в перспективе могут найти практическое применение. Предложен оригинальный подход для оптического возбуждения циркулярных поляритонных токов и поляритонных конденсатов с дробными орбитальными угловыми моментами, разработана оригинальная модель для описания циркулярных поляритонных токов. Изучен вклад поляризации лазера накачки в формирование токов поляритонов, предсказано спонтанное нарушение симметрии токовых состояний в поляритонном конденсате в условиях конкуренции спин-орбитального и поляритон-поляритонного взаимодействия. Результаты исследования циркулярных токов поляритонов потенциально могут быть использованы для небинарного кодирования информации при использовании орбитальной степени свободы, а также для генерации «закрученного» света. Предсказан фундаментальный эффект циттербевергунга поляритонов, предложен подход к управлению его характеристиками. Показано, что он может вызывать отклонение траектории поляритонов от линейной на расстояние в несколько микрон. Такое отклонение может быть критичным на масштабах исследуемых образцов. В случаях, когда эффект нежелателен, он должен приниматься в учёт при планировании эксперимента, либо должны приниматься дополнительные меры по его компенсации. Изучено влияние внешнего магнитного поля, приложенного в плоскости микрорезонатора, на особенности поляризации поляритонов, продемонстрирована возможность управления частотой осцилляций степени поляризации, в том числе подавления осцилляций. Предложена концепция фотонного устройства на основе микрорезонатора с гармонической ловушкой, преобразующего поляризацию оптических импульсов в линейную независимо от их начальной поляризации. Предложен и описан новый тип поляритонной структуры с управляемой гиперболической дисперсией, характерной для метаматериалов, показана возможность управления в ней распространением световых пучков и импульсов. На структуру получен патент на полезную модель.

Диссертация написана грамотным научным языком, содержит лишь небольшое количество опечаток. Изложение представленного материала связное и последовательное. Содержание диссертации в полной мере отражено в автореферате и опубликованных работах.

По материалам диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. В диссертации исследуются полупроводниковые гетероструктуры и микрорезонаторы, в которых поляритоны находятся в состоянии бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК). В разделе 1.1.4 на стр.43 написано, что **поляритоны могут конденсироваться при гораздо более высоких**

температурах, чем для атомарных БЭК в ультрахолодных газах (сотни нанокельвин). Далее во всей диссертации влияние температуры никак не обсуждается, и априори считается, что БЭК поляритонов имеется всегда. Для тех расчетов, с которыми проводилось сравнение с экспериментом в Главах 2 и 4, указаны значения температуры полупроводниковых образцов 3,5 К (стр.96), 15 К (стр.132) и 10 К (стр.137). На мой взгляд, автору следовало бы обсудить характерные критические температуры образования БЭК поляритонов в этих образцах и то, как они соотносятся с использованными экспериментальными температурами. Также следовало бы обсудить, как увеличение температуры может влиять на наблюдаемые результаты, поскольку можно ожидать, что все предсказанные эффекты должны исчезать при температурах выше критической.

2. В плане возможного практического применения, во Введении на стр.6 написано, что **"Экситонные поляритоны претендуют составить конкуренцию фотонам и традиционным носителям заряда в устройствах фотоники и оптоэлектроники. При этом речь идёт как о классических приборах, таких как источники когерентного оптического излучения [1], оптические логические элементы [2], так и о сугубо квантовых, в том числе, квантовых вычислительных устройствах и источниках света с неклассической статистикой."** Однако в самой диссертации эти идеи никак не развиваются. В результатах диссертации я не увидел каких-либо значимых когерентных эффектов, которые напрямую могли бы составить основу указанных применений. Например, для квантовых вычислений необходимо соответствие свойств кубитов и квантового регистра критериям ДиВинченцо, однако совершенно непонятно, как поляритоны могут быть использованы в качестве одиночных кубитов с индивидуальной адресацией, достаточно большим временем когерентности и возможностью выполнения квантовых операций с высокой точностью. Также не очень понятно, может ли "поляритонный лазер" иметь достаточно хорошие характеристики в плане ширины линии, пространственного распределения и мощности по сравнению с обычными полупроводниковыми лазерами, которые уже являются весьма компактными устройствами фотоники, не требующими громоздкого гелиевого криостата или сильного магнитного поля. На мой взгляд, результаты диссертации представляют в первую очередь фундаментальный интерес для построения теории взаимодействия лазерного излучения с веществом в специфической постановке, предложенной и рассмотренной автором.
3. В Главе 3 рассмотрено влияние поляризации нерезонансной оптической накачки на формирование азимутальных токов поляритонов в состоянии бозонного лазера. Указано, что поляризация накачки передаётся экситонному резервуару и частично сохраняется поляритонами в ходе их релаксации в состояние конденсата. Такое сохранение поляризации является контринтуитивным, поскольку рассеяние поляритонов, лежащее в основе заселения основного состояния, ведёт к утрате поляритонами поляризации. Однако, в диссертационной работе механизм, в соответствии с которым возможно такое сохранение поляризации, не обсуждается.
4. В ряде мест диссертации при задании численных параметров математических моделей не дается обоснование выбора именно этих параметров. Например, на стр.196 задаются параметры гетероструктуры, изображенной на Рис.7.1, но не обсуждается, почему выбраны именно такие толщины квантовых ям. Поэтому здесь возникает вопрос, что изменилось бы при выборе других толщин?

5. На Рис.1.1б (стр.31), по-видимому, перепутаны обозначения красной и голубой кривой. На Рис.3.6 (стр.127) не совсем понятно, что изображено и почему отсутствуют какие-либо оси или масштаб. Также непонятно, почему теоретические кривые на Рис.4.3а не были наложены на экспериментальные кривые из Рис.4.2б для прямого сравнения.

Указанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Оценивая диссертационную работу Е.С.Седова в целом, следует отметить актуальность поставленных задач, большой объем проведенных теоретических исследований, получение как численных, так и аналитических результатов при решении довольно сложных задач, и проведение прямого сравнения ряда теоретических расчетов с экспериментами. Высокий научный уровень полученных результатов и квалификация Е.С.Седова подтверждаются публикацией 19 научных статей по теме диссертационной работы в изданиях из списка ВАК, индексируемых в Scopus и Web of Science, а также патентом на полезную модель.

Таким образом, представленная диссертационная работа Е.С.Седова является завершённым и цельным научным исследованием, результаты которого имеют общенаучное значение для лазерной физики и смежных областей, включая фотонику и физику твёрдого тела. Получены результаты как фундаментального, так и прикладного характера, проведено сравнение с экспериментами. Считаю, что диссертационная работа отвечает требованиям, установленным ВАК для докторских диссертаций, а её автор Седов Евгений Сергеевич заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.19 «Лазерная физика».

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией нелинейных
резонансных процессов и лазерной диагностики
ИФП СО РАН, доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН



Рябцев Игорь Ильич

15.08.2022

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики
полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук
Адрес: 630090 Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева 13
Тел.: +7(383) 333-24-08
E-mail: ryabtsev@isp.nsc.ru

Подпись Рябцева И.И. заверяю
Заместитель директора
ИФП СО РАН, к. ф.-м. н.



Каламейцев Александр Владимирович