

**Отзыв официального оппонента о диссертационной работе
Гаврилова Сергея Сергеевича**

«Новые коллективные состояния поляритонов»,

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.8. — физика конденсированного состояния

Актуальность темы диссертации. Исследование связи электромагнитного излучения и вещества относится к одной из классических задач физики конденсированного состояния. В последние десятилетия благодаря прогрессу в полупроводниковой технологии появились структуры – квантовые микрорезонаторы, в которых фотон, плененный между двумя брегговскими зеркалами, взаимодействует с экситоном в квантовой яме, помещенной между зеркалами. В таких системах удается реализовать режим сильной связи света с веществом, при этом формируются новые собственные моды системы – экситонные поляритоны. Эти квазичастицы обладают рядом замечательных свойств, включая малую эффективную массу, унаследованную от фотона в резонаторе, и сильную нелинейность, обусловленную экситонной составляющей. На сегодняшний день в микрорезонаторах активно исследуются как теоретически, так и экспериментально линейные и нелинейные эффекты, например, оптический спиновый эффект Холла, коллективные состояния квазичастиц, включая аналоги конденсатов Бозе-Эйнштейна, параметрическое рассеяние поляритонов, солитоны, вихри и т.п.

Экситон-поляритоны в микрорезонаторах могут возбуждаться внешним электромагнитным полем как нерезонансно, так и резонансно. В последнем случае система ведет себя как ангармонический осциллятор с вынуждающей силой. Как известно, в такой системе могут возникать неустойчивости, бистабильная динамика и ряд других интересных эффектов. В микрорезонаторах проявление таких эффектов оказывается весьма ярким, и экситонные поляритоны представляют собой уникальную систему для моделирования и анализа нелинейной динамики.

В своей диссертационной работе С.С. Гаврилов развил теорию нелинейной динамики экситонных поляритонов при наличии резонансного возбуждения. В работах, вошедших в диссертацию, предложена последовательная теория нелинейного отклика и формирования коллективных состояний экситонных поляритонов, учитывающая пространственные и спиновые степени свободы. **Это определяет высокую актуальность темы диссертации С.С. Гаврилова.**

Анализ содержания диссертации, новизна и достоверность полученных результатов. Целью работы было теоретическое исследование неравновесных фазовых переходов и возникающих в их результате новых коллективных состояний в двумерных и одномерных поляритонных системах под действием резонансного электромагнитного излучения.

Диссертация состоит из краткого *введения*, где описаны цели и задачи научного исследования, обоснована их актуальность, а также приведены основные результаты работы и положения, выносимые на защиту, *пяти глав*, содержащих новые и оригинальные научные результаты, *заклучения*, где сжато подведены итоги работы, *списка публикаций соискателя и библиографии*.

Глава 1 диссертационной работы посвящена простейшей постановке вопроса о нелинейном отклике экситонных поляритонов. Здесь автор рассматривает эффект параметрического рассеяния экситон-поляритонов в минимальной модели, где пренебрегается спиновыми степенями свободы. Обсуждается возможность генерации макроскопически когерентных поляритонных состояний в условиях их резонансного возбуждения. В рамках модели среднего поля (которая, фактически, используется дальше с необходимыми модификациями и обобщениями) обсуждается эффект поляритонной бистабильности в случае, когда энергия возбуждения сдвинута в синюю спектральную область по отношению к энергии поляритонов. Далее проводится теоретический анализ

дисперсии надконденсатных возбуждений и анализируется устойчивость пространственно-однородного состояния поляритонов. Автор показывает, что такое состояние системы оказывается неустойчивым. Изучаются сценарии потери устойчивости. Также автор приводит и обсуждает экспериментальные данные, подтверждающие теорию. В качестве обобщения полученных результатов изучается так называемое петлевое параметрическое рассеяние, возникающее в структурах в виде многоугольника, которое может привести к автоколебательным процессам в конденсате.

Минимальная модель, рассмотренная в первой главе, не учитывает спиновые степени свободы поляритонов, которые оказываются исключительно важными в нелинейном отклике, так как поляритон-поляритонное взаимодействие явным образом зависит от ориентации их спинов. Исследованию такой ситуации посвящена *вторая глава* диссертации. Там, в частности, показано, что при постоянной накачке с эллиптической поляризацией могут существовать уже не две, а несколько ветвей отклика. Построена теория спонтанного нарушения спиновой симметрии экситон-поляритонного конденсата в условиях линейно поляризованного возбуждения в случае, если микрорезонатор обладает анизотропией. Рассматриваются наблюдаемые проявления этого эффекта, включая результаты экспериментов с импульсным возбуждением. Также развита теория влияния зеemanовского расщепления поляритонных состояний внешним магнитным полем на спонтанное нарушение спиновой симметрии поляритонов. Автор предсказывает возникновение спиновых текстур и спиновых солитонов в микрорезонаторах и обсуждает их возможные экспериментальные проявления.

Эффекты потери устойчивости экситонных поляритонов, предсказанные автором, ставят на повестку дня вопрос о том, какое состояние будет сформировано в результате распада однородного распределения квазичастиц. Возможные ответы на этот вопрос содержатся в *главе 3*, где развивается теория «вторичного упорядочения» поляритонной системы. Несмотря на то, что общий анализ требует численного моделирования, автор выявил несколько основных процессов. В частности, во втором порядке по межчастичному взаимодействию и первом порядке по анизотропному расщеплению поляритонных мод возникает новый вклад в поляритон-поляритонное взаимодействие, приводя к параметрическому рассеянию высокого порядка. Такие процессы могут приводить к полной потере устойчивости одномодовых решений, причем поведение системы существенным образом зависит от того, какова геометрия микрорезонатора. Например, в нульмерных системах автор предсказывает автоколебания и динамический хаос, а в двумерной системе возникают нитевидные пространственные структуры (филаменты). Автор предсказывает химерные состояния поляритонов, где сосуществуют упорядоченная и хаотическая подсистемы.

В *главе 4* диссертации обсуждаются нелинейные возбужденные состояния поляритонных конденсатов другого рода – темные солитоны и квантованные вихри. Такие решения уравнения Гросса-Питаевского допустимы и в системе без накачки, однако в научной литературе долгое время обсуждался вопрос об условиях их возбуждения и наблюдения. Автор показывает, что вихри могут возникать спонтанно в результате нарушения спиновой и пространственной симметрии. Более того, если микрорезонатор обладает достаточно большой анизотропией, то начальное однородное состояние системы разбивается на домены с противоположными фазами, а доменные стенки являются своего рода местом возникновения солитонов и вихрей. Приведен детальный анализ их свойств.

Наконец, пятая глава диссертационной работы нацелена на теоретические исследования акустооптических, или, как сейчас принято говорить, оптомеханических явлений в квантовых микрорезонаторах. Колебания кристаллической решетки приводят к осцилляциям энергии экситонов и экситон-поляритонов, что модулирует оптический отклик резонатора и, в свою очередь, приводит к широкому кругу нелинейных явлений, в частности, к мультистабильности. Развита автором теория нашла экспериментальное подтверждение.

Сказанное выше **подтверждает новизну результатов**, полученных в диссертационной работе.

Достоверность основных полученных результатов и выводов несомненна. В своей работе автор сочетает численное моделирование и аналитические подходы. Ряд теоретических предсказаний подтвержден данными экспериментов. Высокая достоверность результатов дополнительно подтверждается их внутренней непротиворечивостью, а также широкой апробацией результатов диссертации на научных семинарах и конференциях.

Научная и практическая значимость Полученные в диссертационной работе С.С. Гаврилова новые теоретические результаты существенно расширяют имеющиеся представления об экситонных поляритонах. Автором развиты методы анализа сценариев нелинейного поведения коллективов бозе-частиц в условиях их резонансного возбуждения, а также предсказаны основные механизмы потери устойчивости в микрорезонаторах. Поскольку квантовые микрорезонаторы активно изучаются с точки зрения создания источников когерентного и неклассического излучения, полученные теоретические результаты могут составить основу для разработки оптических переключателей источников излучения, параметры которого модулированы в пространстве и времени. Можно заключить, что **работа обладает значительной научной и практической значимостью.**

Диссертационная работа С.С. Гаврилова написана прекрасным научным языком. Однако, как и любой значительный труд, диссертация не свободна от недостатков, при ее чтении возникают **замечания**, из которых можно выделить наиболее существенные:

1. В уравнении (1.10) и далее во всех моделях, рассмотренных в диссертации, автор не учитывает флуктуации поля накачки и связанные с этим флуктуации волновой функции поляритонов. Пренебрежение шумами требует дополнительного обоснования, поскольку, как известно, наличие шумов может значительно менять области устойчивости вынужденных колебаний ангармонического осциллятора [M.I. Dykman, M.A. Krivoglaz, Theory of fluctuational transitions between stable states of a nonlinear oscillator, JETP **50**, 30 (1979); N.S. Maslova, Relaxation of a resonantly driven nonlinear oscillator, JETP **64**, 537 (1985); A.P. Dmitriev and M.I. D'yakonov, Activated and tunneling transitions between the two forced-oscillation regimes of an anharmonic oscillator, JETP **63**, 838 (1986)].
2. Неясно, как результаты разделов 2 – 4 диссертации изменятся с учетом зависимости константы связи спиновых компонент поляритонной волновой функции g от волнового вектора поляритонов k ? Известно, что продольно-поперечное расщепление в микрорезонаторах может быть существенным и значительно превышать анизотропное расщепление радиационного дублета.
3. При обсуждении конверсии поляризации в микрорезонаторах в нелинейном режиме (разд. 2.3 диссертации) не упоминаются теоретические и экспериментальные работы по оптическому эффекту Холла. В частности, неясно, в чем отличие результатов автора от результатов работ E. Kammann et al., Nonlinear optical spin Hall effect and long-range spin transport in polariton lasers, Phys. Rev. Lett. **109**, 036404 (2012) и M. M. Glazov and L. E. Golub, Spin and transport effects in quantum microcavities with polarization splitting, Phys. Rev. B **82**, 085315 (2010).
4. Обсуждаемая в разд. 4.4 аналогия между сценарием формирования вихревых диполей и переходом Березинского-Костерлица-Таулесса, на мой взгляд, требует дополнительного обоснования. В частности, необходим анализ коррелятора полей: спадает ли он экспоненциально или по степенному закону. Впрочем, такое рассмотрение было бы адекватным для бесконечной системы, в то время как автор рассматривает систему конечного размера. В связи с этим неясно, можно ли вообще говорить о переходе Березинского-Костерлица-Таулесса в рамках исследуемой модели?

Эти замечания в значительной мере носят формальный характер, они лишь подчеркивают большой объем теоретических работ, составивших основу диссертации, и не снижают общей весьма высокой оценки диссертационной работы С. С. Гаврилова.

Диссертация Сергея Сергеевича Гаврилова является завершенной научной работой, выполненной на высоком уровне. В работе теоретически развито новое направление – физика мультстабильности и хаоса в экситон-поляритонных системах. Материалы диссертации опубликованы в авторитетных физических журналах, включая Письма в ЖЭТФ, УФН, Physical Review B, Physical Review Letters, они многократно докладывались автором на тематических конференциях и семинарах и прошли всю необходимую апробацию. Многие теоретические предсказания уже подтверждены экспериментально. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

По актуальности тематики, обоснованности выводов, новизне положений и достоверности полученных результатов диссертационная работа С.С. Гаврилова «Новые коллективные состояния поляритонов» полностью отвечает критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук в соответствии с п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021), а ее автор, Гаврилов Сергей Сергеевич, безусловно заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8. – физика конденсированного состояния.

Ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
доктор физико-математических наук (специальность 01.04.10 - физика полупроводников),
член-корреспондент РАН
Глазов Михаил Михайлович
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.
Тел.: + 7 911 913 04 36
E-mail: glazov@coherent.ioffe.ru

Согласен на передачу персональных данных.

Глазов Михаил Михайлович

Подпись М.М. Глазова удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ РАН,
кандидат физико-математических наук,
Патров М.И.

«20» октябрь 2021 года

