

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Тимофеева Ивана
Владимировича

«Локализованные моды в оптике
резонансных, нелинейных и анизотропных фотонных кристаллов»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Диссертационная работа И.В. Тимофеева посвящена в основном теоретическому исследованию локализованных оптических мод в пространственно-неоднородных средах, содержащих материалы с резонансными, нелинейными либо анизотропными свойствами. Предмет диссертации актуален как с точки зрения фундаментальных исследований, так и с точки зрения современных многочисленных эффективных приложений, так называемых, фотонных кристаллов.

В последние десятилетия наблюдается интенсивное развитие оптики неоднородных сред, обусловленное как интересной физикой соответствующих оптических явлений, так и эффективными приложениями выявленных здесь оптических эффектов. В оптику названных сред вошли такие понятия как фотонный кристалл, фотонная запрещенная зона, локализованные моды (в частности, дефектная и краевая моды), оптическое таммовское состояние.

Здесь уместно прокомментировать термин «фотоника» и «фотонный кристалл», вошедшие в употребление в конце прошлого века. Под этими терминами имеются в виду область оптики, которая относится к периодическим средам с периодом, лежащим в области длин волн оптического диапазона, и сами эти среды. Фотоника выявила много важных явлений, относящихся к оптическому диапазону длин волн и интересных как в физическом, так и прикладном отношении. Но справедливости ради надо вспомнить, что все или почти все явления, изучаемые фотоникой, были известны в дифракции рентгеновских лучей, изучавшей объекты с гораздо меньшим масштабом периодичности и бурно развивавшейся с начала двадцатого века, еще задолго до возникновения термина «фотоника». Тем не менее, введение термина «фотоника» представляется вполне

11.09.2017 г.

№356-03/6215-194

оправданным, поскольку все эффекты фотоники находятся в пределах возможностей экспериментального наблюдения современной оптики, в то время как соответствующие эффекты в рентгеновском диапазоне длин волн в большинстве случаев находятся за пределами возможностей экспериментального наблюдения методами современной рентгеновской оптики.

Специальный интерес в оптике фотонных кристаллов представляют нелинейные и резонансные явления, изученные в диссертации.

Сказанное выше определяет фундаментальную и прикладную актуальность темы диссертации.

В работе И.В. Тимофеева при помощи численных и аналитических методов автору удалось успешно решить ряд задач фотоники и расширить представления о локализованных модах в фотонных структурах с учетом дисперсии, нелинейности и анизотропии диэлектрических свойств. На основе этих представлений предсказаны новые, экспериментально наблюдаемые эффекты.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, изложена на 254 страницах.

В первой главе исследованы одно- и двумерные резонансные фотонные кристаллы, содержащие пары металлов, либо металл-диэлектрический нанокompозит, резонансный отклик которого обусловлен локализованным поверхностным плазмон-поляритоном.

Резонансными фотонными кристаллами в диссертации называются фотонные кристаллы, частота локализованной моды которых близка к резонансной частоте материала, включенного в состав этого фотонного кристалла.

Описаны дисперсионные зависимости и спектральные свойства таких систем при различных углах падения света на структуру для различных параметрах структуры и материалов. Продемонстрировано, что близость частоты дефектной моды и резонанса в материале приводит к расщеплению частоты дефектной моды и спектральному раздвоению соответствующего пика в спектре пропускания. Близость частоты границы фотонной запрещенной зоны и резонанса в материале приводит, в свою очередь, к расщеплению границы зоны. При этом возникает дополнительная спектральная полоса пропускания. На частотах этой полосы локализация пространственного распределения

интенсивности электромагнитного поля аналогична известной локализации интенсивности для краевых мод.

Вторая глава посвящена изучению локализованных оптических мод, аналогичных таммовским состояниям в электронных структурах. Показано, что на границе фотонного кристалла и металл-диэлектрического нанокompозита могут возникать поверхностные волны. Эти волны не ограничены большими значениями касательного волнового вектора, характерными для полного внутреннего отражения, и возникают даже при нормально падении на структуру возбуждающего излучения. В приближении гомогенизации металл-диэлектрический нанокompозит описывается эффективной диэлектрической проницаемостью. При отрицательных значениях проницаемости нанокompозит становится хорошим отражателем. В этом случае световое поле запирается между двумя зеркалами как в оптическом резонаторе, с той лишь разницей, что зазор между зеркалами пропадает, и поле локализуется внутри зеркал. По аналогии с электронными состояниями на поверхности среды с периодическим потенциалом, данные состояния определяются как оптические таммовские состояния. Показано, что особенности спектрального проявления и локализации этих состояний существенно зависят от параметров фотонного кристалла и от такого параметра нанокompозита, как концентрация наночастиц в диэлектрической матрице.

Третья глава посвящена изучению прохождения света в одномерном фотонном кристалле с учетом керровской нелинейности. Рассмотрена структура в виде многослойной среды с чередующимися показателями преломления для гармонической модуляции показателя преломления. Сглаживание спектральных полос на краях фотонной запрещенной зоны делает скачек пропускания на границе зоны более резким. Это приводит к тому, что для двух противоположных направлений распространения интенсивного лазерного излучения пропускание дает сильный контраст. Перепад объясняется тем, что для прямого направления распространения света сильное локализованное поле сдвигает показатель преломления нелинейного материала и частотное положение края запрещенной зоны фотонного кристалла. А при обратном распространении свет ослабляется и не просветляет среду, локализация не наступает. Необратимость пропускания, высокий контраст и низкое отражение в прямом направлении позволяют рассматривать структуру как оптический диод, аналог

электронного диода. Для расчета автором использован оригинальный метод матрицы переноса, позволяющий строить бистабильные спектры пропускания.

В четвертой главе рассмотрен одномерный фотонный кристалла с дефектным слоем, заполненным нематическим жидким кристаллом, образующим твист-структуру (структуру, в которой директор на толщине нематического слоя изменяет ориентацию на 90 градусов). Такая структура обладает сложным поляризационно зависящим спектром пропускания и открывает заманчивые перспективы практических приложений в связи с возможностями путем приложения внешних полей изменять структуру дефектного слоя и тем самым управлять характеристиками спектра пропускания. Закрученная ориентация директора позволяет при помощи электрического поля управлять не только спектром пропускания, но и величиной связи обыкновенных и необыкновенных волн внутри слоя нематика. Изменение связи волн объясняет спектральный эффект квазипересечения (расталкивания) спектральных пиков в запрещенной зоне фотонного кристалла. Соответствующие частотам этих пиков локализованные моды имеют сложную структуру. Выделяется два типа собственных мод, с суммарным электрическим полем преимущественно вдоль директора и поперек директора жидкого кристалла. Предложен ряд оптоэлектронных спектральных устройств. Для расчета поля директора нематика в приложенном электрическом поле использован оригинальный метод минимизации свободной энергии. Теоретические расчеты, проведенные для параметров выполненного в Институте Физики им. Л.В.Киренского эксперимента продемонстрировали хорошее согласие с экспериментальными результатами.

В пятой главе изучается спектральный сдвиг пиков пропускания, обусловленный закручиванием нематического жидкого кристалла внутри резонатора Фабри-Перо. Показано, что значение эффективного показателя преломления (набега фазы поляризованной волны) оказывается вне интервала между обыкновенным и необыкновенным показателями преломления. Это отклонение удастся объяснить в терминах неадиабатической геометрической фазы Ааронова-Анандана. Для количественного описания отклонения применен метод катящегося конуса, предложенный Могеном более века назад. Величина спектрального сдвига согласуется с экспериментальными данными, выполненного в Институте Физики им. Л.В.Киренского эксперимента.

В заключительной шестой главе решается вопрос существования стоячих поверхностных волн на границе холестерического жидкого фотонного кристалла. Известно, что в случае изотропной подложки, даже металлической, такой фотонный кристалл допускает только бегущие поверхностные волны с ненулевым касательным волновым вектором. Стоячая волна требует согласования поляризаций на границе сред, одна из которых обладает хиральной симметрией, а другая не обладает. Показано, что если вместо изотропной металлической подложки использовать сильно анизотропное зеркало, сохраняющее знак круговой поляризации света при отражении, то поверхностная волна возникает даже при нормально падающем возбуждающем пучке света. При этом накладывается ограничение на угол между оптическими осями сред на границе. Поле локализованной моды экспоненциально спадает по мере удаления от границы, дифрагируя в холестерике на длинах волн, соответствующих фотонной запрещенной зоне и близких к холестерическому шагу. При помощи теории связанных мод найдено приближенное аналитическое решение задачи для конечной толщины слоя холестерика.

В заключении диссертационной работы приводятся основные выводы и результаты.

Переходя к оценке диссертации в целом, следует констатировать, что она является объемным исследованием, содержащим важные новые оригинальные результаты и выполненном в современном научном стиле с широким применением компьютерных вычислений.

Основными результатами диссертации являются:

1. Исследование спектрального расщепление края фотонной запрещенной зоны и частоты дефектной моды одно- и двумерного фотонного кристалла при наличии в его составе резонансных оптических материалов, таких как пары металлов и металл-диэлектрический нанокомпозит.
2. Исследование оптического аналога таммовского состояния, возникающего на границе фотонного кристалла и нанокомпозита.
3. Предложен оптический диод на основе пространственной вариации диэлектрических параметров фотонного кристалла с керровской нелинейностью.

4. Для нематического твист-слоя, помещенного в резонатор, образованный фотонным кристаллом, впервые исследовано квазипересечение спектральных линий пропускания и их спектральный сдвиг, обусловленный геометрической фазой.

5. Впервые исследована локализованная на поверхности холестерического жидкого фотонного кристалла оптическая мода с нулевым касательным волновым вектором на границе.

Достоверность основных результатов диссертации не вызывает сомнений, так как подтверждается как строгостью использованных теоретических методов, так и сопоставлением многих результатов с экспериментальными данными. Результаты согласуются с общими физическими принципами. Основные результаты диссертации опубликованы в авторитетных отечественных и зарубежных журналах и доложены на ряде международных и всероссийских конференциях.

Новизна работы обусловлена тем, что большая часть оптических эффектов, исследованных в диссертации, впервые предложена в работах автора диссертации.

Следует также привести ряд конкретных частных замечаний по диссертации.

1. В диссертации практически отсутствует традиционная для докторских работ обзорная глава.

2. Автор недостаточно использует известные аналитические решения для упрощенных моделей локализованных мод с целью выявления физики изучаемых эффектов, ограничиваясь в основном численными методами решения задач.

3. Автор злоупотребляет введением новых терминов не всегда адекватных физике дела или несвойственных русскому языку. Например, оптический изолятор, продольная и поперечная поляризация мод, аподизованный и т. д.

4. В некоторых ссылках на работы, вошедшие в диссертацию, указаны не все авторы.

5. Следует сказать, что по поводу оформления диссертации и ее языка в целом претензий нет за исключением претензии по поводу вольностей в использовании терминологии. Число опечаток и описок, которые, к сожалению, есть в тексте диссертации, не превышает разумного предела, чтобы заслуживать их конкретное упоминание в отзыве.

Сделанные замечанию не затрагивают сущности проделанной в диссертации работы. Работа представляется цельным, законченным научным трудом. Полученные в диссертации результаты можно квалифицировать как новое крупное научное достижение в области локализованных мод в оптике фотонных кристаллов, перспективное для их новых эффективных приложений.

Автореферат точно соответствует основному содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа *«Локализованные моды в оптике резонансных, нелинейных и анизотропных фотонных кристаллов»*, полностью отвечает требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и соответствует «Положению ВАК о порядке присуждения ученых степеней», утвержденному постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор, Тимофеев Иван Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Старший научный сотрудник ИТФ им. Ландау РАН,
доктор физико-математических наук, профессор

Подпись **Белякова В.А.** удостоверяю

Ученый секретарь ИТФ им. Ландау РАН, к.х.н.

Официальный оппонент

старший научный сотрудник Института теоретической физики им. Ландау РАН,
Московская обл., Ногинский р-н, г.Черноголовка, пр.акад.Семенова, д. 1а

д.ф.-м.н., проф. Владимир Алексеевич Беляков,

тел. 8-499-137-32-44, E-Mail: bel@landau.ac.ru



Беляков В.А.

Беляков С.А.

Список избранных публикаций оппонента за 2011-2016 годы по теме диссертации
Тимофеева Ивана Владимировича «Локализованные моды в оптике резонансных,
нелинейных и анизотропных фотонных кристаллов»

1. Belyakov V.A. Localized modes in optics of photonic liquid crystals with local anisotropy of absorption // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2016. Vol. 149, № 5. P. 1077–1087.
2. Belyakov V.A. Localized Modes in Optics of Chiral Liquid Crystals // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2015. Vol. 612, № 1. P. 81–97.
3. Belyakov V.A., Semenov S. V. OPTICAL DEFECT MODES AT AN ACTIVE DEFECT LAYER IN PHOTONIC LIQUID CRYSTALS // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 2014. Vol. 145, № 5. P. 906–922.
4. Беляков В.А. Оптика фотонных кристаллов. М: МФТИ, 2013. 75 р.
5. Belyakov V.A. Localized optical modes in optics of cholesteric liquid crystals // New Developments in Liquid Crystals and Applications / ed. Choudhury P.K. Nova Science Pub Inc, 2013. P. 199–227.

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник ИТФ РАН

Подпись В.А. Белякова удостоверяю
Ученый секретарь ИТФ РАН

Почтовый адрес:

142432, МО., г. Черноголовка, просп. Академика Семенова, д. 1-А

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау Российской академии наук

Электронная почта: bel@landau.ac.ru



В.А. Беляков

Крашаков С.А.