

**УТВЕРЖДАЮ**

Заместитель директора по научной  
работе ФНИЦ «Кристаллография и  
фотоника» РАН

д. ф.-м. н.

А.Э. Волошин

«12» марта 2019 г.



## **ОТЗЫВ**

ведущей организации на диссертационную работу Пятнова Максима Владимировича «Локализованные моды в оптике фотонных холестерических жидкых кристаллов», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

### **Актуальность работы.**

Наряду с хорошо известным применением жидких кристаллов (ЖК) в области информационных дисплеев, в последнее время значительное внимание уделяется их недисплейным приложениям. Одно из ярких направлений исследований связано с фотонными жидкими кристаллами.

Особенностью фотонных кристаллов (ФК) является то, что компоненты тензора диэлектрической проницаемости периодически изменяются в пространстве. Это приводит к возникновению в оптическом спектре ФК запрещенных зон, называемых стоп-зонами. В идеальном ФК распространение электромагнитных волн с частотами в спектральной области стоп-зоны запрещено. При этом, на краях стоп-зоны может возникать ряд особенностей, интересных как с точки зрения фундаментальной науки, так и для практических приложений в современной фотонике.

Яркими представителями фотонных ЖК являются слоевые структуры на основе холестерических жидких кристаллов (ХЖК). В ХЖК, в силу их спиральной надмолекулярной структуры, естественным образом возникает периодическая пространственная модуляция показателя преломления вдоль оси холестерического геликоида, что позволяет относить их к одномерным ФК. Так как жидкие кристаллы являются оптически анизотропными материалами, то фотонные ЖК имеют ряд особенностей, которые выделяют их из ряда традиционных ФК на основе оптически изотропных материалов. В частности, фотонные ХЖК чувствительны к знаку круговой поляризации света.

Жидкокристаллические фотонные кристаллы привлекательны тем, что их фотонными свойствами можно управлять с помощью внешних воздействий, используя электрические и магнитные поля, изменение

температуры и т.д. Весьма важным является то, что внося в идеальную структуру фотонного кристалла определенные типы «дефектов» (это могут быть как структурные нарушения периодичности, так и искусственные включения), можно снять запрет на распространение света в области стоп-зоны, получив тем самым новые уникальные оптические свойства. Именно теоретическим исследованиям оптических свойств фотонных структур на основе ХЖК с введенными в них различными типами искусственных «дефектов» посвящена данная диссертационная работа. Это и делает эту работу актуальной.

### **Научная новизна результатов.**

Основная цель работы, сформулированная в диссертации, связана с теоретическими исследованиями распространения и локализации света в фотонных жидкокристаллических системах на основе ХЖК и различного типа включений, выполняющих роль «дефектов», снимающих запрет на распространение света с частотами внутри фотонной стоп-зоны и приводящих к новым оптическим свойствам.

В качестве новых результатов, полученных диссидентом, следует отметить следующие достижения.

Во-первых, показано, что используя в фотонной системе на основе ХЖК дополнительные анизотропные элементы, такие как четвертьволновая фазовая пластина или тонкий слой ХЖК с противоположным знаком закрутки спирали, можно осуществить локализацию света между ХЖК и металлической пленкой. То есть, предложены новые модельные фотонные ХЖК-структуры, ограниченные металлической пленкой, где могут быть возбуждены локализованные оптические моды. Впервые в таких ХЖК-структурах с твист-дефектом и металлической пленкой изучены новые гибридные оптические моды и возможности управления ими.

Во-вторых, исследованы новые системы на основе слоя ХЖК между анизотропными зеркалами, которые сохраняют состояние поляризации отраженного от них света. В таких системах предсказаны связанные оптические моды, обусловленные локализованными таммовскими состояниями.

Наконец, впервые изучены локализованные моды в ХЖК с внедренным слоем нанокомпозитного материала, играющим роль дефекта. В этой системе обнаружено спектральное расщепление границ стоп-зоны и дефектной моды при совпадении их частот с резонансной частотой нанокомпозита.

### **Теоретическая и практическая значимость результатов диссертации.**

В своей основе работа является теоретической с применением современных методов численного моделирования. Диссидентом предложены и численно промоделированы новые оптические системы на основе фотонных ХЖК, металлических пленок, анизотропных зеркал и резонансных нанокомпозитов. Изучены оптические свойства таких систем и

возможности эффективного управления ими. Последнее имеет и практическую значимость, так как позволяет прогнозировать оптические характеристики реальных фотонных устройств, основанных на предложенных фотонных ХЖК-структурах. Весьма полезными для практического использования могут быть и отмеченные в работе способы управления гибридными оптическими модами, возбуждаемыми в слое ХЖК, ограниченном металлическим зеркалом.

## **Основное содержание и замечания по диссертации.**

Диссертационная работа Пятнова М. В. состоит из введения, четырех глав, заключения и одного приложения.

Во введении обоснована актуальность направления исследований, четко сформулированы цель и задачи работы, защищаемые положения, а также научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава соответствует общепринятой традиции и посвящена обзору научных работ в области исследований фотонных кристаллов, включая фотонные холестерические ЖК. Особое внимание уделено дефектным модам и оптическим таммовским состояниям, которые лежат в основе интерпретации результатов, изложенных в последующих главах диссертационной работы.

Во второй главе изложены результаты исследований слоистой системы, которая включает слой ХЖК, четвертьволновую фазовую пластинку и металлическую (слой серебра) пленку. Для численного моделирования оптических свойств Пятнов М. В. использует общепризнанный в мире матричный метод Берремана, основанный на точной формулировке уравнений Максвелла для слоистых оптически анизотропных сред. Автором изучены не только оптические спектры системы, но и пространственное распределение квадрата амплитуды электрического поля электромагнитной волны. Последнее позволило продемонстрировать локализацию электрического поля вблизи металлической пленки и возникновение дефектной моды внутри запрещенной зоны. Дефектная мода ассоциируется с узким пиком в спектре пропускания для электромагнитной волны с частотой внутри запрещенной зоны. В работе обращается внимание на то, что изменения параметры системы (например, варьируя шаг холестерической спирали с помощью температуры или электрического поля), можно управлять спектральным положением пика пропускания. Кроме того, для данной системы установлено, что характеристики пропускания зависят от направления распространения светового пучка.

В третьей главе оптическая система, рассмотренная во второй главе, усложняется введением твиист-дефекта в структуру ХЖК. Это приводит к возникновению еще одной моды внутри запрещенной зоны, зависящей от угла твиист-дефекта. Совокупность результатов, полученных для системы типа (ХЖК)-(твиист-дефект)-(четвертьволновая пластина)-(металлическая пленка), объясняется в рамках концепции гибридных локализованных мод.

В третьей главе рассматривается еще одна новая оптическая система. Ее особенность в том, что слой ХЖК расположен между двумя слоистыми анизотропными зеркалами, сохраняющими поляризацию света. Последнее, как утверждается в диссертации, необходимо для формирования оптических таммовских состояний (OTC) на границах ХЖК-слоя. Показано, что при определенных граничных условиях возбуждаются два OTC. В работе отмечается, что из-за конечной толщины слоя ХЖК вырождение двух OTC снимается, и в спектре пропускания появляются два узких пика, спектральное расстояние между которыми увеличивается по мере уменьшения толщины слоя ХЖК. Наряду с численным моделированием, в данной главе развивается и аналитический подход для определения частот OTC.

Четвертая глава посвящена исследованию дефектных мод в оптической системе, которая наряду со слоями ХЖК содержит слой нанокомпозита и твист-дефект. Диссидентом изучено влияние фактора заполнения нанокомпозита на оптические свойства системы. В результате установлено, что при отличном от нуля факторе заполнения и совпадении резонансной частоты нанокомпозита с частотой дефектной моды возникает спектральное расщепление последней. Это расщепление возрастает по мере увеличения фактора заполнения. Кроме того, обнаружена сильная зависимость характеристик дефектных мод от ориентационного состояния директора ХЖК по обе стороны от слоя нанокомпозита.

Основные результаты, полученные в главах 2 – 4, соответствуют четырем защищаемым положениям, сформулированным в автореферате и диссертационной работе.

В Приложении приведено описание матричного метода Берремана, который использовался при проведении численного моделирования, а в Заключении достаточно полно сформулированы основные результаты работы.

В работе неоднократно подчеркивается на особенность предложенных диссидентом жидкокристаллических фотонных систем, которая связана с возможностью эффективного управления их оптическими свойствами, используя электрические поля и другие внешние воздействия, что придает работе практическую значимость.

К автореферату и диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. К сожалению, в автореферате при введении понятия оптических таммовских состояний (OTC) диссидент ограничился лишь одним предложением со ссылкой (стр.3). Далее, физическая суть понятия OTC никак не раскрывается, хотя термин широко используется при интерпретации результатов. Диссиденту следовало бы дать более полную характеристику OTC, указав условия их возникновения и ключевые свойства.

2. Формула (2) в автореферате (она же 3.2 на стр.65 диссертационной работы), которую диссидент использует для аналитического описания OTC, требует подробных пояснений как в автореферате, так и в диссертации. Дело

в том, что в зеркалах и в слое между ними на практике всегда существуют потери, и условие равенства единице произведения амплитудных коэффициентов отражения может быть выполнено лишь в случаях, если хотя бы одно из зеркал или слой являются усиливающими элементами.

3. В обзорной главе диссертации (стр. 11) таммовские состояния ассоциируются с возбуждением плазмонных состояний. Известно, что необходимым условием существования плазмонов у поверхности пленки является отрицательное значение действительной части диэлектрической проницаемости, которое может быть реализовано, например, в случае металлических пленок. Однако, описываемая в Главе 3 оптическая система со слоистыми зеркалами и ХЖК не содержит элементов с отрицательной диэлектрической проницаемостью. Таким образом, плазмонные состояния не могут возбуждаться. В связи с этим возникает вопрос о правомерности использования термина ОТС для описания мод внутри запрещенной зоны для рассматриваемой системы.

4. Пленка нанокомпозита, используемая в оптической системе, описываемой в Главе 4, содержит частицы металла и диэлектрика. Это означает, что эту среду в строгом смысле нельзя считать однородной даже в случае, если длина волны превышает характерные расстояния между частицами металла. Например, на поверхности пленки нанокомпозита могут возбуждаться и распространяться плазмоны. В этом случае оптическая задача становится по меньшей мере задачей для двумерно-неоднородных сред. Метод Берремана, используемый докторантом, является точным лишь для одномерно-неоднородных сред. Таким образом, возникает вопрос о погрешности в решении оптической задачи, связанной с использованием матричного метода Берремана в данном конкретном случае. Было бы, например, полезным решить аналогичную задачу методом конечных разностей во временном домене (FDTD), оценив тем самым погрешность, возникающую при использовании метода Берремана.

5. В работе присутствует множество случаев использования неудачной терминологии. Например, на стр. 10 «...разность фаз между лучами...». Очевидно, что лучам, которые являются лишь линиями в пространстве, не присуща такая характеристика как фаза.

6. Есть погрешности и в оформлении. Например, в подписи к рисунку 6 (стр.14 автореферата) указано «...тонкие малиновые линии...», т.е. не учтен тот факт, что кривые в автореферате выполнены в исключительно черно-белом варианте. Аналогичное замечание относится и к рис. 5 автореферата, где темно-серый уровень соответствует как низким, так и высоким значениям оптического пропускания.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не вносят принципиальных изменений в Положения и Выводы, выносимые автором на защиту.

## **Заключение**

Результаты, представленные в диссертационной работе прошли серьезную аprobацию. Пятнов М. В. является соавтором в 9 работах, которые опубликованы в высокорейтинговых международных и отечественных изданиях, таких как «Optics Letters», «Phys.Rev.», «JOSA B», «Liquid Crystals», «Оптика и спектроскопия» и др. Результаты работ были широко представлены на международных и всероссийских конференциях, посвященных жидким кристаллам, проблемам оптики и лазерной физики. Автореферат диссертации соответствует требованиям ВАК и полностью отражает полученные результаты. В нем ясно сформулированы цели и задачи работы, выносимые на защиту положения, новизна и практическая значимость результатов.

В целом диссертация Пятнова Максима Владимировича представляет собой ясную и хорошо оформленную работу. Текст диссертации сопровождается необходимыми иллюстрациями и написан ясным языком. Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему, и соответствует разделу II Положения о порядке присуждения ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертация была рассмотрена на заседании Объединённого научного семинара Института кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Протокол № 78 от 06.03.2019 г.). Работа отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Пятнов Максим Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «оптика».

Отзыв подготовил

и.о. главного научного сотрудника, и.о. заведующего лабораторией жидких кристаллов Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,  
доктор физико-математических наук,  
e-mail:serguei.palto@gmail.com  
Тел. +7(495)330-78-47

 Палто Сергей Петрович

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН).

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59. Тел.: +7(499)135-63-11  
Оф. сайт: <http://www.kif.ras.ru>, E-mail: office@crys.ras.ru

## СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по кандидатской диссертации Пятнова Максима Владимировича  
«Локализованные моды в оптике фотонных холестерических жидких кристаллов»  
по специальности 01.04.05 – «оптика».

Полное и сокращенное наименование организации	Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН)
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки России)
Почтовый адрес организации с указанием индекса	119333, г. Москва, Ленинский проспект, д. 59
Телефон с указанием кода города	+7(499)135-63-11
Адрес электронной почты	office@crys.ras.ru
Адрес официального сайта в сети «Интернет»	<a href="http://www.kif.ras.ru">http://www.kif.ras.ru</a>
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15 публикаций)	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Director distribution in field-induced undulated structures of cholesteric liquid crystals / N.M. Shtykov, S.P. Palto, B.A. Umanskii, D.O. Rybakov, I. V. Simdyankin // Liquid Crystals. – 2018. – Vol. 45. – P. 1408-1414.</li><li>2. Liquid crystal metasurfaces on micropatterned polymer substrates / I. V. Kasyanova, M.V. Gorkunov, V.V. Artemov, A.R. Geivandov, A.V. Mamonova, S.P. Palto // Optics Express. – 2018. – Vol. 26. – P. 20258-20269.</li><li>3. Study of the vertically aligned in-plane switching liquid crystal mode in microscale periodic electric fields / A.R. Geivandov, M.I. Barnik, I.V. Kasyanova, S.P. Palto // Beilstein Journal Of Nanotechnology. – 2018. – Vol. 9. – P. 11-19.</li><li>4. Плазмонное усиление фототока в гибридной структуре с субволновой алюминиевой решеткой / В.В. Лазарев, Л.М. Блинов, И.В. Симдянкин, С.Г. Юдин, В.В. Артемов, М.В. Горкунов, С.П. Палто // Письма в ЖЭТФ. – 2018. – Т. 107, №8. – С. 491-496.</li><li>5. Субмиллисекундный электрооптический отклик нематического жидкого кристалла в режиме двунаправленного переключения поля / А. Р. Гейвандов, М.И. Барник, В.С. Палто, И. В. Симдянкин, С.П. Палто // Кристаллография. – 2018. – Т. 63, № 6. – С. 928-934.</li><li>6. Особенности пропускания света и эффекта штарка в плазмонной наноструктуре с органическим полупроводником и субволновой алюминиевой решеткой / Л.М. Блинов, В.В. Лазарев, С.Г. Юдин, В.В. Артемов, М.В. Горкунов, С.П. Палто // Кристаллография. – 2018. – Т. 63, № 6. – С. 935-940.</li><li>7. Фурье-спектроскопия как метод изучения фотоэлектрических свойств органических систем / С. П. Палто, А. В. Алпатова, А. Р. Гейвандов, Л. М. Блинов, В. В. Лазарев, С. Г. Юдин // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 2. – С. 210-220.</li><li>8. Fast Surface-Plasmon-Mediated Electro-Optics of a Liquid Crystal on a Metal Grating / M.V. Gorkunov, I.V. Kasyanova, V.V. Artemov,</li></ol>

- M.I. Barnik, A.R. Geivandov, S.P. Palto // Physical Review Applied. – 2017. – Vol. 8. – P. 054051.
9. Optical control of plasmonic grating transmission by photoinduced anisotropy / S.P. Palto, Y.A. Draginda, V.V. Artemov, M.V. Gorkunov // Journal of Optics. – 2017. – Vol. 19. – P. 074001.
10. Lasing in micro-grating liquid crystal systems / N. M. Shtykov, S. P. Palto, A. R. Geivandov, B. A. Umanskii // Liquid Crystals. – 2017. – Vol. 44. – P. 1216-1222.
11. Микро- и наноструктуры для пространственно-периодической ориентации жидких кристаллов, полученные травлением сфокусированным ионным пучком / С. П. Палто, А. Р. Гейвандов, И. В. Касьянова, В. В. Артемов, М. В. Горкунов // Письма в ЖЭТФ. – 2017. – Т. 105, №3 – С. 158–163.
12. Коэффициенты пропускания света субволновыми алюминиевыми решетками с диэлектрическими слоями / Л.М. Блинов, В. В. Лазарев, С. Г. Юдин, В. В. Артемов, С. П. Палто, М. В. Горкунов // ЖЭТФ. – 2016. – Т. 150, № 5 – С. 896-902.
13. Submillisecond Inverse TN Bidirectional Field Switching Mode / S. P. Palto, M. I. Barnik, A. R. Geivandov, I. V. Kasyanova, V. S. Palto // Journal of Display Technology. – 2016. – Vol. 12. – P. 992-999.
14. Liquid crystal on subwavelength metal gratings / S. P. Palto, M. I. Barnik, V. V. Artemov, N. M. Shtykov, A. R. Geivandov, S. G. Yudin, M. V. Gorkunov. // Journal of Applied Physics. – 2015. – Vol. 117. – P. 223108
15. Spectral and polarization structure of field-induced photonic bands in cholesteric liquid crystals / S.P. Palto, M.I. Barnik, A.R. Geivandov, I.V. Kasyanova, V.S. Palto // Physical Review E. — 2015. — Vol. 92. — P. 032502.

Ученый секретарь ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН  
к.ф.-м.н.

Дадинова Л.А.

