



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФНИЦ

«Кристаллография и фотоника» РАН

к.ф.-м.н.

О.А. Алексеева

«22» апреля 2022 г.

ОТЗЫВ

Ведущей организации на диссертационную работу
Кесаева Владимира Валерьевича «Фазовая модуляция частично
поляризованного света в средах с индуцируемым двулучепреломлением»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. —
Оптика.

Работа В.В. Кесаева посвящена исследованию фазовых модуляторов световых волн на основе сегнетоэлектрических жидких кристаллов (ЖК). Общеизвестно, что ЖК находят широкое применение в дисплейных и информационных технологиях. Ключевое свойство ЖК устройств – это способность модулировать световой поток под действием слабых электрических полей. Однако, если в современных дисплейных технологиях используется амплитудная модуляция светового потока, то, например, в будущих голографических системах потребуется эффективная модуляция фазы световых волн. Фазовые модуляторы важны и для не дисплейных технологий, являясь основной частью управляемых оптических элементов (таких, например, как линзы и дифракционные решетки), устройств формирования и коррекции волнового фронта. Поэтому создание и исследование фазовых модуляторов на основе ЖК, несомненно, является актуальным направлением.

Устройства, осуществляющие управление фазой, в общем случае называются фазовыми пространственно-временными модуляторами света и могут в своей основе использовать различные физические методы для получения фазовой задержки. Один из перспективных методов основан на управлении коэффициентами преломления сред с помощью внешнего электрического поля, и для этой цели можно использовать анизотропные кристаллы, и в особенности ЖК. Последние особенно перспективны, благодаря широкому диапазону изменения эффективных показателей преломления при низком управляющем электрическом напряжении.

Требование чисто фазовой модуляции при высоком быстродействии накладывает ограничения на выбор пригодных электрооптических эффектов и самих ЖК материалов. В настоящее время среди ЖК модуляторов света самым высоким быстродействием обладают устройства на основе сегнетоэлектрических ЖК, и именно они и были использованы в данной работе.

В диссертационной работе В. В. Кесаева рассматривается случай модуляции неполяризованного и частично поляризованного света, проходящего через слой

хирального сегнетоэлектрического ЖК. Этот тип ЖК характеризуется геликоидальной надмолекулярной структурой с шагом геликоида, который может быть намного меньше длины волны света видимого спектрального диапазона. В таком случае ЖК можно характеризовать эффективным тензором диэлектрической проницаемости и, соответственно, эффективными показателями преломления. Под действием внешнего электрического поля субволновая геликоидальная структура деформируется, обуславливая изменения эффективных показателей преломления в слое ЖК и, соответственно, изменение фазы световой волны, прошедшей через этот слой.

Сегнетоэлектрические ЖК характеризуются высокими частотами модуляции, достигающими до десятка килогерц. При этом индуцируемое двулучепреломление соизмеримо с исходным двулучепреломлением при выключенном электрическом поле. Данные особенности сами по себе представляют значительный интерес для использования в быстрых фазовых модуляторах света. Другой важной особенностью исследуемого в работе электрооптического эффекта является то, что оптическая ось лежит в плоскости слоя ЖК, и, например, ее поворот под действием электрического поля приводит к изменению состояния поляризации света. Такое изменение, согласно теореме Панчаратнама, вызывает дополнительный фазовый сдвиг, который в современной оптике интерпретируется в терминах геометрической фазы. Последнее обстоятельство поставило перед диссертантом серию задач, связанных с необходимостью изучения влияния состояния и степени поляризации света на свойства фазового модулятора. В частности, в диссертационной работе была поставлена задача получения поляризационно-нечувствительной, чисто фазовой модуляции света.

Основное содержание диссертации В. В. Кесаева состоит в следующем:

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы автором приводится литературный обзор, отражающий современное состояние исследований в области электрооптики сегнетоэлектрических ЖК с субволновым шагом геликоида и фазовой модуляции света, рассматривается концепция геометрической фазы.

Во второй главе экспериментально и теоретически рассмотрен случай модуляции частично поляризованного света электрооптическими ячейками на основе планарно ориентированных сегнетоэлектрических ЖК с субволновым шагом геликоида.

В главе рассмотрен общий подход к фазовой модуляции частично поляризованного света средами с индуцируемым двулучепреломлением и поворотом оптической оси. Получены основные выражения, характеризующие пропускание в оптической системе с двулучевым интерферометром Маха-Цендера, который использовался в эксперименте. Полученные выражения для выходной интенсивности света интерпретированы в терминах фазы Панчаратнама. В главе приводятся результаты экспериментов как с полностью неполяризованным, так и с частично поляризованным светом различной степени поляризации. Установлено, что в случае неполяризованного

света интенсивность на выходе интерферометра инвариантна относительно азимута оптической оси и, в то же время, зависит от фазовой задержки, равной произведению геометрической толщины на волновой вектор световой волны и полусумму собственных показателей преломления. В случае же модуляции частично поляризованного света возникает дополнительный фазовый сдвиг, относимый к геометрической фазе. Установлено, что этот фазовый сдвиг возникает вследствие изменения состояния поляризации, а его величина зависит как от степени поляризации, так и от угла между входным и выходным векторами Стокса.

Для исследования зависимости от степени поляризации был выполнен эксперимент, в котором на вход интерферометра подавался частично поляризованный свет с непрерывно изменяющимся азимутом и эллиптичностью поляризации. Результаты наблюдаемого сдвига интерференционных полос, зависящего от компонент вектора Стокса входной волны и степени ее поляризации, были интерпретированы на основе общего подхода, основанного на функции Панчаратнама.

В третьей главе диссертации приводятся оригинальные методы реализации поляризационно-нечувствительной модуляции света. В данной главе описывается предложенный метод чисто фазовой модуляции света, основанный на известном методе компенсации относительной разности хода с помощью зеркала Фарадея. В работе обращается внимание на возникающую при этом изотропную фазовую задержку света, пропорциональную эффективной (средней) фазовой задержке. Последняя, как и в случае неполяризованного света, пропорциональна полусумме собственных показателей преломления и инвариантна относительно поворота оптической оси. Кроме того, показана нечувствительность к степени поляризации модулируемого света.

В описанном эксперименте на основе интерферометра Майкельсона использовались ячейки с планарно ориентированным сегнетоэлектрическим ЖК с субволновым шагом спирали. Ячейка устанавливалась в одно из плеч интерферометра, где обычные зеркала были заменены зеркалами Фарадея. После подачи на ячейку управляющего напряжения выходная картина интерференционных полос, визуализированная на экране, сдвигалась пропорционально квадрату электрического поля, причём без потери контраста. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими предсказаниями, выполненными на основе независимых исследований других авторов. Плечо интерферометра с ячейкой является чисто фазовым модулятором света, не чувствительным ни к состоянию поляризации, ни к степени поляризации света, а получаемый фазовый сдвиг обусловлен изменением эффективного среднего показателя преломления. Для зеленого света ($\lambda=532$ нм) продемонстрирована скоростная (4 кГц) чисто фазовая модуляция глубиной 2π .

В третьей главе описан и еще один предложенный автором метод поляризационно-нечувствительной модуляции интенсивности света с помощью относительной фазовой задержки, возникающей в средах с индуцированным двулучепреломлением. Теоретически и экспериментально показано, что метод не чувствителен ни к состоянию поляризации, ни к степени поляризации. Метод основан на использовании интерферометра Саньяка, в котором одно из зеркал выполнено в виде электрооптической среды, отражающей свет. В эксперименте использовалась ячейка с

планарно ориентированным сегнетоэлектрическим ЖК, а изменение интенсивности на выходе интерферометра обуславливалось исключительно возникающей разностью фаз.

В качестве практического применения полученных результатов в главе предложен оригинальный метод разделения главных напряжений в поляризационно-оптическом методе исследования напряженно-деформированного состояния твердых тел. Автором приводится алгоритм и сравнение с существующими методами.

В четвертой главе описан пространственно-временной модулятор света, реализованный с участием автора. Модулятор выполнен в виде 12-секторной спиральной фазовой пластинки, формирующей оптические вихри с топологическим зарядом от $l = 1$ до $l = 4$ и частотой до 3 кГц. В отличие от традиционного подхода, в котором для спиральных пластинок применяется изотропная фазовая задержка, в реализованном модуляторе в качестве электрооптической среды использовался планарно ориентированный сегнетоэлектрический ЖК с субволновым шагом геликоида. Перестройка фазовой задержки на каждом сегменте модулятора осуществлялась электрическим полем; при этом контролировались изменения одного из собственных показателей преломления, в то время как второй вносил паразитные шумы в формируемое поле. Полученные теоретические расчеты оказались в хорошем согласии с экспериментальными результатами. Продемонстрировано успешное формирование оптических вихрей с топологическим зарядом до $l = 4$ при модуляции эллиптичности и азимута выходной волны. Показано, что отличие интенсивности от случая, когда модуляции состояния поляризации не происходит, не превышает 13%.

Основные научные результаты диссертационной работы В. В. Кесаева состоят в следующем.

1. В случае модуляции неполяризованного света электрооптической ячейкой на основе планарно ориентированного сегнетоэлектрического ЖК с субволновым шагом геликоида, поле на выходе оказывается инвариантным относительно поворота оптической оси кристалла, а полученный фазовый сдвиг обусловлен изменением эффективного среднего показателя преломления и может быть интерпретирован в терминах фазы Панчаратнама. Экспериментально получен фазовый сдвиг глубиной π для используемой длины света $\lambda = 632,8$ нм.
2. В случае модуляции частично поляризованного света, дополнительно возникает набег геометрической фазы в общую фазовую задержку. Данная фазовая задержка зависит от степени поляризации света и от состояния входного и выходного векторов Стокса. Для использованной электрооптической ячейки и частично поляризованного света со степенью поляризации от 0% до 100% экспериментально получены фазовые сдвиги от нуля до $\pi/6$.
3. Установлена зависимость между геометрической фазой и степенью поляризации света, возникающей в случае интерференции двух световых лучей (случай интерферометрической фазы). Получаемый при этом фазовый сдвиг является функцией степени поляризации.
4. Предложен метод поляризационно-нечувствительной чисто фазовой модуляции света. В эксперименте в качестве электрооптической среды использованы ячейки на

основе планарно ориентированных сегнетоэлектрических ЖК. Продемонстрирована скоростная (4 кГц) фазовая модуляция света глубиной 2π . Показано, что возникающая фазовая задержка обусловлена изменением эффективного среднего показателя преломления.

5. Изготовлен пространственно-временной фазовый модулятор света в виде 12-секторной спиральной фазовой пластинки, формирующей оптические поля с ненулевым орбитальным моментом. В качестве электрооптической среды использован планарно ориентированный сегнетоэлектрический ЖК с субволновым шагом геликоида. Показано, что в условиях параксиального распространения лучей при модуляции как эллипса поляризации (до ± 0.35), так и азимута поляризации (до $\pm 0,65$ рад) отличие в распределении интенсивностей от случая отсутствия модуляции не превышает 13%.

Практическая значимость выполненной диссертационной работы заключается в предложенном методе поляризационно-нечувствительной чисто фазовой модуляции света, который позволяет расширить номенклатуру прозрачных сред, пригодных для фазовой модуляции света, снимая при этом ограничения на ориентацию собственных поляризационных осей среды относительно состояния поляризации и направления волнового вектора модулируемой волны. Кроме того, с практической точки зрения может представлять интерес и предложенный в диссертации способ управления геометрической фазой с использованием степени поляризации света в качестве управляющего параметра.

Отметим следующие недостатки диссертации:

1. Результаты данной работы интерпретированы в рамках модели, в которой под действием электрического поля не только изменяется пространственная ориентация тензора диэлектрической проницаемости, но и значительным изменениям подвергаются главные значения этого тензора. При этом последнее свойство рассматривается как присущее ЖК материалам, а индуцированное полем двулучепреломление обосновывается в рамках общей нелинейной теории (Раздел 1.2). Однако хорошо известно, что в ЖК материалах главные значения тензора диэлектрической проницаемости не претерпевают заметных изменений при значениях электрических полей вплоть до сотен вольт на микрон (что намного больше значений, использованных в работе). В этой связи, с самого начала в диссертации следовало бы подчеркнуть эффективный (усредненный по пространству) характер используемых диэлектрических параметров. Было бы также полезно более детально обосновать используемую модель индуцированного в электрическом поле двулучепреломления.

2. Работу пронизывает тот факт, что исследуемый сегнетоэлектрический ЖК материал имеет геликоидальную надмолекулярную структуру. Однако, геликоидальной структуре присущ ряд оптических свойств, которые нельзя описать лишь в рамках изменений параметров эффективного диэлектрического эллипсоида, включая его ориентацию. Кроме того, хорошо известно, что в электрических полях, перпендикулярных оси геликоида, пространственный период (шаг) геликоида может увеличиваться вплоть до его полной раскрутки. Таким образом, даже если изначальный шаг геликоида и

существенно меньше длины волны, в электрическом поле ЖК структура может перестать быть субволновой с соответствующим радикальным изменением оптических свойств. Автору следовало бы проанализировать подобные ситуации и их влияние на электрооптику фазового модулятора.

3. В обзорной части работы недостаточное внимание уделено фазовым модуляторам на основе нематических ЖК. Кроме того, ошибочно утверждается, что «На момент написания диссертации традиционным для достижения чисто фазовой модуляции способом является использование 100% линейно поляризованного света и S-эффекта...» (стр.6). Например, два планарно ориентированных слоя нематических ЖК с взаимно перпендикулярными направлениями ориентации являются великолепным примером устройства для фазовой модуляции неполяризованного света. Короткие (субмиллисекундные) времена фазовой модуляции можно получить, используя, например, двухчастотные нематические ЖК. Еще один пример того, как можно получить не только фазовую модуляцию неполяризованного света, но и субмиллисекундные времена управления фазовой задержкой - это слои холестерических ЖК со спиральной структурой вдоль оси, ориентированной перпендикулярно к слою. В электрических полях, перпендикулярных оси спирали, спиральная структура такого ЖК деформируется, что приводит к сильному изменению эффективного показателя преломления для света, распространяющегося вдоль нормали к слою. Времена переключения в данном случае также находятся в субмиллисекундном диапазоне, а шаг спирали может соответствовать УФ спектральному диапазону, что автоматически обеспечит фазовую модуляцию неполяризованного света в видимом спектральном диапазоне. Упомянутые работы на нематических ЖК выполнены в Институте кристаллографии РАН, и очень жаль, что автор не знаком с этими публикациями.

4. В работе автор широко использует понятие "геометрической" фазы, невольно акцентируя и приписывая этому понятию некий особый статус. В действительности этот особый статус в работе выглядит преувеличенным. В контексте следствий теоремы Панчаратнама было бы, например, полезным рассмотреть в диссертации фазовый сдвиг на простом примере интерференции двух пучков с линейной и круговой поляризацией, изменяя при этом состояние линейной поляризации на ортогональное, т.е. перемещая точку на сфере Пуанкаре на противоположную точку экватора. Это позволило бы снять контекстную "магичность" геометрической фазы, которая присутствует в интерпретации результатов, и придать ей ясную физическую интерпретацию.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. В целом, она представляет собой цельное и завершённое научное исследование, имеющее важное научное и практическое значение, связанное с найденными фундаментальными закономерностями распространения световой волны через анизотропные среды. Предложенный в диссертации метод поляризационно-нечувствительной чисто фазовой модуляции света снимает требования к поляризации

входного излучения и ориентации собственных осей среды и тем самым позволяет значительно расширить номенклатуру пригодных для модуляции электрооптических сред.


Научные результаты диссертационной работы В. В. Кесаева прошли серьезную апробацию на российских и международных конференциях, ряд результатов использован в отчетах по проектам Российский научного фонда. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ, из которых 7 в высокорейтинговых периодических журналах, индексируемых международной базой Web of Science, и две работы изданы в сборниках трудов конференций.

Автореферат диссертации В. В. Кесаева оформлен в соответствии с требованиями ВАК, содержит ясно изложенные основные результаты работы и необходимые иллюстрации, а также дает достаточно полное представление о содержании диссертации.


Диссертация представляет собой завершённую научно-квалификационную исследовательскую работу, выполненную на актуальную тему. Диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842. Автор диссертации В. В. Кесаев заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — Оптика.

Доклад В. В. Кесаева по материалам диссертации был заслушан на заседании Объединенного научного семинара Института кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Протокол № 112 от 13 апреля 2022 г.). Отзыв Водущей организации, подготовленный доктором физико-математических наук С. П. Палто и кандидатом физико-математических наук М. В. Горкуновым, одобрен на заседании семинара.

Главный научный сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, доктор физико-математических наук,


Палто Сергей Петрович;
тел. +7 (495) 330 7847; e-mail: serguei.palto@gmail.com

Ведущий научный сотрудник Института кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, кандидат физико-математических наук,


Горкунов Максим Валерьевич
тел. +7 (499) 135 6240; e-mail: gorkunov@crys.ras.ru

Адрес: 119333, г. Москва, Ленинский пр., 59, Федеральное государственное учреждение «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» (ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН); тел.: +7(499)135-63-11; официальный сайт: <http://www.kif.ras.ru>; e-mail: office@crys.ras.ru

Список основных научных публикаций за последние 5 лет в рецензируемых изданиях ведущей организации Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук» по теме диссертации Кесаева В.В. «Фазовая модуляция частично поляризованного света в средах с индуцируемым двулучепреломлением»

1. S.P. Palto. The Field-induced Stop-Bands and Lasing Modes in CLC Layers with Deformed Lying Helix. // *Crystals*, 2019, v.8, no.9, art. no.469; <https://doi.org/10.3390/cryst9090469>
2. N.M. Shtykov, S.P. Palto, A.R. Geivandov, B.A. Umanskii, I.V. Simdyankin, D.O. Rybakov, V.V. Artemov, M.V. Gorkunov. Lasing in liquid crystal systems with a deformed lying helix // *Optics Letters*, 2020. V. 45, no.15, P. 4328-4331; DOI: 10.1364/OL.394430.
3. S.P. Palto, N.M. Shtykov, I.V. Kasyanova, B.A. Umanskii, A.R. Geivandov, D.O. Rybakov, I.V. Symdyankin, V.V. Artemov, M.V. Gorkunov. Deformed lying helix transition and lasing effect in cholesteric LC layers at spatially periodic boundary conditions. // *Liquid Crystals*, 2019, v. 47, no.3, pp. 384-397; DOI: 10.1080/02678292.2019.1655169.
4. M.V. Gorkunov, I.V. Kasyanova, V.V. Artemov, A.V. Mamonova, S.P. Palto. Precise local control of liquid crystal pretilt on polymer layers by focused ion beam nanopatterning. // *Beilstein J. Nanotechnol.*, 2019. V. 10. P. 1691-1697; DOI:10.3762/bjnano.10.164.
5. I.V. Kasyanova, M.V. Gorkunov, V.V. Artemov, A.R. Geivandov, A.V. Mamonova, S.P. Palto. Liquid crystal metasurfaces on micropatterned polymer substrates. // *Optics Express*, 2018. V. 26. no. 16, P. 20258-20269; <https://doi.org/10.1364/OE.26.020258>
6. N.M. Shtykov, S.P. Palto, B.A. Umanskii, D.O. Rybakov, I.V. Simdyankin. Director distribution in field-induced undulated structures of cholesteric liquid crystals. // *Liquid Crystals*, 2018, no.9, P. 1408-1414; DOI: 10.1080/02678292.2018.1441460
7. D.A. Bykov, E.A. Bezus, L.L. Doskolovich. Bound states in the continuum and strong phase resonances in integrated Gires-Tournois interferometer. // *Nanophotonics*, 2020, V. 9, no. 1, P. 83-92; <https://doi.org/10.1515/nanoph-2019-0316>
8. E.A. Bezus, D.A. Bykov, L.L. Doskolovich. Integrated Gires-Tournois interferometers based on evanescently coupled ridge resonators. // *Optics Letters*, 2020, V. 18, no. 18, P. 5065-5068; <https://doi.org/10.1364/OL.402569>