

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук, Пасечника Сергея Вениаминовича о диссертационной работе Кесаева Владимира Валерьевича «Фазовая модуляция частично поляризованного света в средах с индуцируемым двулучепреломлением», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 — Оптика

Диссертация В.В. Кесаева посвящена фазовой модуляции света жидкокристаллическими сегнетоэлектриками с эффектом деформированной электрическим полем спирали (анг. *deformed helix ferroelectric (DHF-effect)*) при планарных граничных условиях (ЖКСЭДС). Этот эффект был открыт в 1989 году отечественными исследователями [L. A. Beresnev, V. G. Chigrinov, D. I. Dergachev et al.//Liquid Crystals, 1989, Vol.5, no.4. pp.1171–1177] и с тех пор является объектом интенсивных материаловедческих и электрооптических исследований.

Эффекту принадлежат два электрооптических «достижения»: во-первых, на сегодняшний день разработаны жидкокристаллические сегнетоэлектрические смеси с рекордным электрооптическим коэффициентом (порядка $K \sim 130 \text{ нм} / \text{В}^2$); во-вторых, ЖКСЭДС характеризуется высокой скоростью модуляции, достигающей нескольких кГц, что на два порядка превышает это значение для широко распространённых нематических жидких кристаллов. Однако, вместе с изменением показателей преломления, для ЖКСЭДС присущ поворот оптической оси в плоскости волнового фронта, и, как следствие, они модулируют состояние поляризации световой волны. Таким образом, с одной стороны, ЖКСЭДС являются перспективным электрооптическим материалом, а с другой стороны, вследствие модуляции состояния поляризации ЖКСЭДС не могут осуществлять чисто фазовую модуляцию света.

Актуальность темы диссертации обусловлена активно развивающимися технологиями формирования и управления оптическими полями с помощью фазовых пространственно-временных модуляторов света (ПВМС). Решение проблемы чисто фазовой модуляции в ЖКСЭДС позволит разработать новое поколение быстрых, высокоразрешающих ПВМС.

В диссертационной работе Кесаева В. В. экспериментально и теоретически исследуется фазовая модуляция неполяризованного и частично поляризованного света в ЖКСЭДС на установках типа двухлучевых интерферометров Маха-Цендера, Саньяка и Майкельсона. Распространение неполяризованного света через ЖКСЭДС очевидно не сопровождается изменением состояния поляризации, поскольку входной и выходной векторы Стокса будут

равными. Однако, как выяснилось, благодаря изменению собственных показателей преломления среды, световая волна испытывает фазовую задержку, пропорциональную изменению среднего показателя преломления, равному полусумме собственных показателей преломления среды. Кроме того, в случае частичной линейной поляризации света, волна испытывает дополнительную фазовую задержку, которая интерпретирована с позиции геометрической фазы (ГФ) Панчаратнама-Бери. Для этого случая отдельно исследован вопрос использования степени поляризации света в качестве управляющего параметра для ГФ.

Диссертация Кесаева В.В. состоит из введения, четырех глав и трех приложений. Полный объем составляет 144 страницы, 43 рисунка и три таблицы. Список литературы содержит 152 наименования.

Во введении приводятся аргументы в пользу актуальности выбранной темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, а также методы их решения.

В первой главе диссертации приводится литературный обзор, уточняется современное состояние науки и технологии в области фазовой модуляции света, предъявляются требования к фазовым модуляторам света. В этой же главе приводятся сведения об электрооптике ЖКСЭДС, фазовой модуляции света, поляризации и геометрической фазе.

Во второй главе рассматривается случай распространения неполяризованного и частично поляризованного света через ЖКСЭДС. Описываются эксперименты, выполненные на интерферометрической установке по типу Маха-Цендлера, приводится теоретическая интерпретация экспериментальных результатов. При распространении неполяризованного света через среду, в которой происходит изменение показателей преломления, свет испытывает фазовую задержку, пропорциональную изменению среднего показателя преломления. Состояние поляризации при этом не изменяется, а свет оказывается инвариантным к повороту оптической оси. В ячейке с ЖКСЭДС с зазором 50 мкм экспериментально получено значение фазового сдвига, равное π .

Случай частично поляризованного света отличается более общим подходом к фазовому набегу, возникающему при распространении волны в средах с пространственной трансформацией индикатрисы и поворотом оптической оси. В рамках этого подхода получены основные выражения для фаз, которые явно включают в себя вектор Стокса и степень поляризации света. Выражение, описывающее интенсивность света на выходе из интерферометра, по структуре и физическому смыслу входящих в него членов совпадает с выражением, полученным Панчаратнамом, что позволило интерпретировать результаты в терминах геометрических фаз.

Установлено, что в случае модуляции частично поляризованного света общая фазовая задержка является суммой обычной динамической фазы и геометрической фазы, причем величина последней зависит от степени поляризации света. Выполненные в диссертации эксперименты по влиянию степени поляризации на геометрическую фазу подтвердили данный теоретический вывод.

Третья глава диссертации раскрывает достижение поставленной *во введении* цели, а именно получение поляризационно-нечувствительной фазовой модуляции света в ЖКСЭДС. В главе описан оригинальный метод фазовой модуляции, основанный на использовании комбинации модулятора на основе ЖКСЭДС и зеркала Фарадея. Свет произвольной поляризации, распространяясь последовательно через ЖКСЭДС, зеркало Фарадея и снова через ЖКСЭДС, компенсирует возникающую разность хода, однако при этом приобретает фазовую задержку, пропорциональную изменению среднего показателя преломления среды, аналогично случаю модуляции частично поляризованного света. Метод оказывается инвариантен относительно поворота оптической оси среды. Эксперимент выполнен на установке по типу интерферометра Майкельсона, при этом плечо интерферометра с установленной ячейкой, заполненной ЖКСЭДС, представляет собой готовый чисто фазовый модулятор света. Экспериментально продемонстрирована фазовая модуляция с частотой до 4 кГц и глубиной до 2π .

В главе также предложен оригинальный метод поляризационно-нечувствительной модуляции относительной фазовой задержки света. Метод основывается на использовании кольцевого интерферометра Саньяка, где интенсивность света на выходе оказывается пропорциональной изменению относительной разности собственных показателей преломления среды. Метод также оказывается поляризационно-нечувствительным и инвариантным относительно поворота оптической оси.

В *четвертой главе* описан экспериментально реализованный фазовый пространственно-временной модулятор света (ПВМС) на основе планарно-ориентированного ЖКСЭДС с субволновым шагом спирали. Модулятор выполнен в виде 12-сегментной спиральной фазовой пластинки (СФП), формирующей оптические вихри с топологическим зарядом до $l=4$ и частотой до 3 кГц. Показано, что несмотря на изменение состояния поляризации модулируемого света, когда на вход СФП подается свет с нулевыми эллиптичностью и азимутом, а на выходе данные параметры изменяются соответственно в пределах $\pm 0,35$, $\sim 40^\circ$, отклонение в распределении интенсивности вихря отличается не более чем на 13% от случая распространения света через идеальную СФП.

Полученные в диссертационной работе результаты представляют значительный научный и практический интерес. Так, предложенный метод чисто фазовой модуляции позволяет существенно расширить перечень пригодных для фазовой модуляции сред, поскольку снимает ограничения на ориентацию среды и состояние поляризации модулируемого света. Кроме того, представляет интерес наблюдаемое влияние геометрической фазы на распространении света через ЖКСЭДС, а также продемонстрированная возможность использования (в качестве управляющего параметра) степени поляризации света.

Диссертационная работа В.В. Кесаева представляет собой решение новой научной задачи всестороннего исследования набега фазы света, возникающего при распространении частично поляризованного света в анизотропной среде, изменяющей свою индикатрису под действием внешнего управляющего поля. Работа носит законченный, целенаправленный характер, а её результаты не вызывают сомнения с точки зрения их научной новизны, значимости и обоснованности положений, выдвигаемых на защиту. Основные результаты диссертационной работы В. В. Кесаева являются оригинальными и достоверными и хорошо согласуются с результатами, полученными независимыми авторами.

Основные результаты диссертации опубликованы в 9-ти печатных изданиях, из которых 7 изданы в научных журналах, индексируемых базой данных «Web of science», и 2 изданы в сборниках трудов конференции. Результаты докладывались на различных семинарах и конференциях.

Отмечаю следующие недостатки диссертации:

1. В диссертации недостаточно подробно изложены традиционные методы фазовой модуляции света нематическими жидкими кристаллами.
2. Имеет место определенный диссонанс между тщательным изложением методики оптических измерений и довольно поверхностным описанием используемых в эксперименте ЖК ячеек. В частности, не указан способ контроля величины зазора ячеек и не приведены погрешности определения данного параметра. Вместо этого указаны приближенные значения зазора (например, на стр.41, 2-ой абзац).
3. Имеются повторяющиеся формулы, так формула (2.9) по смыслу совпадает с выражением (2.19), а формула (2.11) совпадает с формулой (2.24). Вместо дублирования достаточно было сделать соответствующую ссылку.
4. В тексте диссертации встречаются жаргонные выражения и термины. Например, на стр. 41, 2-ой абзац используется термин «толщина капилляра ячейки», на странице 50, 2-ой абзац говорится об «ячейке толщиной ≈ 53 мкм» имея в виду зазор капилляра или толщину ЖК

сложения, на стр. 89, 2-абзац используется словосочетание «метод фотоупругости» вместо «поляризационно-оптический метод исследования напряжений».

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.6 – «Оптика». Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание. Список цитируемой литературы полностью соответствует содержанию работы.

Таким образом, представленная В.В. Кесаевым диссертация «Фазовая модуляция частично поляризованного света в средах с индуцируемым двулучепреломлением» удовлетворяет требованиям, установленным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а автор работы Касаев В.В. заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6 «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Проблемной лабораторией молекулярной акустики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА)

Пасечник Сергей Вениаминович

12 мая 2022 г.

Почтовый адрес: 119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78

Телефон: +7 499 215-65-65 доб.4036

E-mail: pasechnik@mirea.ru



Подпись руки *Пасечника С.В.*
УДОСТОВЕРЯЮ:
Начальник
Управления кадров
М.М. Буханова
16.05.2022

Список основных научных публикаций за последние 5 лет в рецензируемых изданиях официального оппонента профессора, доктора физико-математических наук Пасечника Сергея Вениаминовича по теме диссертации Кесаева В. В. «Фазовая модуляция частично поляризованного света в средах с индуцируемым двулучепреломлением».

1. Dubtsov A. V., Pasechnik S. V., Shmeliova D. V., Umanskii B. A., Kralj S., Dual-frequency electrically driven nematic microstructures confined to biaxial porous polymer membranes (2021) *Applied Physics Letters*, v.119 (22), 221903.
2. Shmeliova D. V., Pasechnik S. V., Kharlamov S. S., Zakharov A. V., Pozhidaev E. P., Barbashov, V. A., Tkachenko T. P., Capillary flows of nematic liquid crystal (2020) *Crystals*, 10 (11), 1029.
3. Dubtsov A. V., Harkai S., Shmeliova D. V., Pasechnik S. V., Repnik R., Chigrinov V. G., Kralj S. Electrically switchable polymer membranes with photo-aligned nematic structures for photonic applications (2020) *Optical Materials*, 109, 110296.
4. Shmeliova D. V., Saidgaziev A. S., Kharlamov S. S., Visotsky A. S., Safonov M. A., Konovalova, A. A., Pasechnik, S. V. Liquid Crystal Optofluidic Device Based on Electrokinetic phenomena In Porous Polymer Films (2020) *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie (Liq. Cryst. and their Appl.)*, 20 (3), pp. 72-79.
5. Kiselev A. D., Pasechnik S.V., Shmeliova D. V., Chopik A. P., Semcrenko D. A., Dubtsov, A. V. Waveguide Propagation of Light in Polymer Porous Films Filled with Nematic Liquid Crystals (2019) *Advances in Condensed Matter Physics*, 2019, 1539865.
6. Dubtsov A. V., Pasechnik S. V., Shmeliova D. V., Semerenko D. A., Iglič A., Kralj S., Influence of polar dopant on internal configuration of azoxybenzene nematic-in-water droplets (2018) *Liquid Crystals*, 45 (3), pp. 388-400.
7. Shmeliova D. V., Pozhidaev E. P., Kharlamov, S. S., Pasechnik, S. V., Barbashov, V. A., Chigrinov, V.G., Capillary flow and shear viscosity of ferroelectric liquid crystal (2018) *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie (Liq. Cryst. and their Appl.)*, 18 (4), pp. 88-94.
8. Pasechnik S. V., Shmeliova D. V., Kharlamov S. S., Semina O. A., Saidgaziev A. S., Chigrinov V. G., Electrorheology of liquid crystals (2018) *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie (Liq. Cryst. and their Appl.)*, 18 (3), pp. 89-93.
9. Pasechnik S. V., Shmeliova D. Y., Maksimochkin G. I., Dubtsov A. V., Filippov V. K. Acoustical and dynamic light scattering investigations of polymer porous films filled with a liquid crystal (2017) *Zhidkie Kristally i Ikh Prakticheskoe Ispol'zovanie (Liq. Cryst. and their Appl.)*, 17 (4), pp. 67-72.