

DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-68-78

УДК 535.8

Электрически контролируемые микроструктурированные жидкокristаллические твист-элементы для фазового преобразования световых полей

Елена Александровна Мельникова

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь
melnikova@bsu.by <https://orcid.org/0000-0001-5097-5832>

Аннотация

Предмет исследования. Предложены топологии микроструктурированной фотоориентации директора нематического жидкого кристалла, использование которых в электрически управляемых жидкокristаллических элементах позволяет формировать световые пучки с заданной фазовой сингулярностью. **Основные результаты.** Созданы электрически управляемые азимутально ориентированные жидкокristаллические твист-элементы, позволяющие реализовать преобразование гауссовых пучков в пучки с заданным количеством фазовых сингулярностей волнового фронта. На основе методов поляризационной микроскопии и анализа распределения интенсивности в профиле пучка, а также результатов когерентного сложения преобразованного излучения с плоской волной определен рабочий диапазон напряжений, обеспечивающий возбуждение оптических сингулярных пучков. Показано, что разработанные элементы осуществляют фазовое топологическое преобразование волнового фронта циркулярно поляризованного гауссова пучка в оптические вихри независимо от длины волны в широкой оптической области спектра и не требуют точной подстройки по управляющему напряжению. Дифракционные оптические элементы на основе микроструктурированной твист-планарной ориентации директора жидкого кристалла позволили осуществить преобразование волнового фронта линейно поляризованного излучения в оптические вихри с различными топологическими зарядами. На примере дифракционного топологического элемента, позволяющего формировать оптические вихри с топологическим зарядом 4, проведено экспериментальное исследование зависимости дифракционной эффективности элемента от амплитуды управляющего напряжения. Разработанный дифракционный элемент имеет начальную дифракционную эффективность (в отсутствие напряжения на элементе) порядка 10%. Максимальная дифракционная эффективность созданных дифракционных топологических элементов достигает 30% при амплитуде управляющего напряжения несколько вольт. Увеличение амплитуды внешнего напряжения до 20 В приводит к исчезновению дифракционной структуры. На основе анализа интерференционной картины, являющейся результатом когерентного сложения сформированного элементом фазового сингулярного пучка с плоской волной, продемонстрирована устойчивость возбуждаемых оптических вихрей к значению амплитуды управляющего напряжения. Экспериментально установлено, что возбуждаемые сингулярные пучки высокого топологического заряда остаются устойчивыми при их распространении на расстояния более 3 м. **Практическая значимость.** Разработанные топологические электрически управляемые жидкокristаллические элементы могут работать в широкой оптической области спектра и использоваться для генерации оптических вихрей ультракороткой длительности и суперконтинуума, а также найти применение в оптических мультипинцетах и технологиях защиты ценных бумаг и документов.

Ключевые слова: сингулярные световые пучки, оптические вихри, жидкие кристаллы, твист-эффект, управляемая дифракция

Благодарность: автор благодарит В.В. Могильного и А.А. Муравского за предоставленные фотоориентанты, а также И.И. Рушнову и О.С. Кабанову за помощь в подготовке образцов.

Работа выполнена в рамках задания «Разработка и исследование микро- и наноструктурированных анизотропных оптических элементов для фазово-поляризационного преобразования световых полей» ГПНИ Республики Беларусь «Фотоника и электроника для инноваций».

Ссылка для цитирования: Мельникова Е.А. Электрически контролируемые микроструктурированные жидкокристаллические твист-элементы для фазового преобразования световых полей // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 3. С. 68–78. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-68-78

Коды OCIS: 260.6042, 160.3710, 230.3720, 220.4830

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время поперечно структурированные световые лучи имеют большой научный и прикладной интерес. Такие пучки характеризуются сложной топологией распределения амплитуды, фазы и/или поляризации в их сечении [1–5].

Среди многообразия пространственно структурированных полей можно выделить оптические вихри — вид оптических пучков, которые переносят орбитальный угловой момент фотонов и характеризуются вихревым закручиванием фазы волны вокруг некоторого центра, в котором амплитуда светового поля равна нулю [3].

Физические характеристики оптических вихрей обеспечили перспективы их успешного использования при решении многообразных прикладных задач. Такие пучки нашли применение в системах оптической связи [6–9], при оптическом захвате и манипулировании микрообъектами [10, 11], для лазерной обработки материалов [12, 13], при зондировании атмосферы [14, 15] и др. В этой связи актуальным вопросом является поиск эффективных методов генерации таких пучков.

На сегодняшний день известен ряд относительно простых методов создания в свободном пространстве фазовых сингулярных световых пучков, основанных на фазовом преобразовании волнового фронта гауссовых пучков [16].

Одной из наиболее распространенных практически реализованных технологий формирования оптических вихрей является применение пространственных жидкокристаллических (ЖК) модуляторов света [17–20]. Однако данные технологии имеют недостатки, связанные с ограниченным пространственным разрешением, определяемым размером управляемого элемента (пиксела). У лучших доступных на современном рынке моделей такие элементы имеют размер 3,74 мкм (EXULUS-4K1, Thorlabs). Ограничивающим фактором таких

систем также выступает количество шагов установления фазового набег модулятора (256-1024 EXULUS-4K1, Thorlabs; SLM-200, Santec). Пространственное разрешение, дискретизация фазового набегу наряду с наличием межпиксельного расстояния приводит к ухудшению качества формируемого пучка. Кроме того, такие устройства, как правило, работают на отражение, что вызывает определенные неудобства при их использовании в конкретных оптических схемах.

Одним из основных методов создания вихревых оптических пучков является использование фазовых пластинок с переменным (спирально изменяющимся) размером оптического пути [21–23] и Q-пластины [24], которые являются анизотропными азимутально структурированными оптическими элементами, характеризующимися зарядом q (скорость изменения ориентации оптической оси по отношению к азимутальному углу). Такие азимутально анизотропные элементы функционируют как полуволновая фазовая пластинка с азимутальным распределением оптической оси и формируют оптические вихри с топологическим зарядом $l = \sigma 2q$, определяемым зарядом Q-пластинки q и спиновым угловым моментом σ циркулярно-поляризованного гауссова пучка, проходящего через топологический элемент [25]. Однако, не будучи внешне управляемыми, такие фазовые элементы ограничены по рабочей длине волны и не могут использоваться в приложениях, где необходимо управлять эффективностью преобразования фазовой топологии оптического поля. Кроме того, производство таких элементов требует высокой точности контроля толщины слоя функционального материала.

Современные технологии создания микроструктурированной фотоориентации директора жидкого кристалла открыли возможность создания ряда электрически контролируемых топологических ЖК элементов с возможно-

стью внешней подстройки на конкретную спектральную компоненту. Среди таких элементов следует выделить ЖК Q-пластинки [26, 27].

Хорошо известная на сегодняшний день технология секторной фотоориентации [27] при изготовлении Q-пластинки на основе жидкого кристалла ограничена азимутальной топологией ориентации локальной оптической оси.

Для увеличения возможности манипулирования волновым фронтом и создания световых пучков с более сложной фазовой топологией разработан метод динамической микролитографии [28]. Он позволяет расширить возможности формирования сложной фазово-поляризационной топологии сингулярных полей и имеет отличные перспективы в различных приложениях фотоники. Однако этот многоступенчатый способ с частично перекрывающейся экспозицией в процессе фотоориентации директора жидкого кристалла технически сложен.

Еще один способ, показывающий возможность электрически управляемого формирования массивов оптических вихрей, предложен в работе [29]. Он основывается на использовании решетчатых электродов, что требует адресного управления и подстройки по напряжению. Кроме того, в нем предусмотрено использование пучков с относительно большой площадью сечения, в то время как наличие сетки электродов приводит к паразитному рассеянию, что отрицательно влияет на качество сингулярного поля.

Нужно отметить, что функциональные возможности ЖК Q-пластинок ограничены необходимостью точной электрической подстройки на определенную спектральную компоненту для достижения полуволнового набега. Относительно недавно в работе [30] представлены результаты экспериментального исследования по созданию брэгговских Q-пластинок с использованием хиральных жидких кристаллов. Разработанные элементы демонстрируют эффективное спин-орбитальное взаимодействие и образуют оптические фазовые сингулярности во всей видимой области спектра. Однако, как утверждают и сами авторы, качество вихревого пучка за пределами фотонной запрещенной зоны ухудшается: получаемые пучки характеризуются низкой интенсивно-

стью и недостаточной эффективностью преобразования топологического заряда. Для исправления качества оптического вихря авторы предлагают использовать внешние воздействия (температура, электрическое и магнитное поля) или варьирование геометрии ввода. Эта проблема была решена в работе [31], где для расширения рабочего спектрального диапазона предложено распределение шага спирали по направлению винтовой оси хирального жидкого кристалла. К сожалению, в публикации не приведены данные о распределении интенсивности в сечении оптических вихрей, что не дает полной информации о качестве формируемых оптических вихрей, а также не приведены данные об исследовании устойчивости образованных сингулярных пучков.

Еще одним из альтернативных методов возбуждения вихревых пучков является использование дифракционных электрически перестраиваемых ЖК элементов, в основе создания которых лежит цифровая или аналоговая голографическая запись сингулярного поля. Фазовая топология таких элементов соответствует картине когерентного сложения плоской волны и вихревого пучка с топологическим зарядом l . Использование цифровой голографической записи при создании дифракционных ЖК топологических элементов базируется на двух технологиях: использование структурированных электродов [32–34] и фотоориентация жидкого кристалла [35–39].

Наиболее эффективным является метод фотоориентации, основанный на применении динамической маски с использованием цифрового микрозеркального устройства, которое позволяет достичь пространственного разрешения порядка 1 мкм [35, 38, 39]. Однако этот метод является технологически сложным и требует специального оборудования.

Как видно из приведенного краткого обзора, несмотря на достигнутые успехи, остается актуальным вопрос разработки и создания технологически простых и эффективных оптических элементов, формирующих сложные сингулярные фазовые поля в широком спектральном диапазоне.

В данной работе представлены экспериментальные результаты разработки и исследования двух типов топологических ЖК твист-элементов, созданных методом фотоориентации нематического жидкого кристал-

ла (НЖК) с использованием амплитудной маски

– азимутально ориентированный ЖК элемент, работающий на твист-эффекте (Q-твистер — QT), формирующий заданное число фазовых сингулярностей с возможностью работы в широком оптическом диапазоне без необходимости точной внешней электрической подстройки,

– топологический дифракционный ЖК твист-элемент, имеющий три рабочих состояния: генерация оптических вихрей с эффективностью 10% (не требует подстройки под спектральную область), генерация оптических вихрей в широком оптическом диапазоне (требует незначительной подстройки для достижения максимальной дифракционной эффективности 25–28%) и состояние, соответствующее отсутствию фазового преобразования (дифракционная эффективность 0%).

ЖИДОКРИСТАЛЛИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА, МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Созданные топологические электрически управляемые анизотропные элементы представляют собой ЖК ячейку типа «сэндвич» [40]. Электропроводящий прозрачный слой (оксид индий-олово — ITO), входящий в конструкцию ЖК элементов, обеспечивает возможность электрического управления ориентацией директора жидкого кристалла. Толщина ЖК слоя составляет $d = 20$ мкм, оптическая анизотропия $\Delta n = 0,18$. Пороговое напряжение использованного НЖК $U_t = 1,1$ В, оптический порог $U_{op} = 1,5$ В.

В качестве ориентирующих покрытий на одной из подложек элементов использован азокраситель AtA-2 (разработка ИХНМ НАНБ, лаборатория А.А. Муравского). Используемый ориентант характеризуется высокой энергией сцепления, термостабильностью, фотостабильностью, низкой чувствительностью к влажности и имеет высокую фоточувствительность в коротковолновой области видимого спектра [41]. Топология ориентации молекул азокрасителя AtA-2 задавалась при воздействии поляризованного излучения с длиной волны $\lambda = 450$ нм светодиода (плотность энергии $0,3$ Дж/см²). Для задания однородной планарной начальной ориентации директора на второй подложке использован фоточувстви-

тельный полимер М-серии с бензальдегидной группой в боковой цепи, чувствительный в ультрафиолетовой (УФ) области спектра (синтезирован на кафедре физической оптики Белорусского государственного университета, группа профессора В.В. Могильного) [42]. Поверхностная анизотропия полимера М-серии создана методом механического натирания. Ориентационная упорядоченность сегментов основных цепей фотополимера, наведенная путем механического натирания, увеличивается при облучении натертого полимерного слоя неполяризованным УФ излучением с $\lambda = 310$ нм (плотность энергии $1,8$ Дж/см²).

Выбор в качестве фотоориентанта азокрасителя AtA-2, чувствительного в видимой области спектра, обеспечивает возможность экспонирования ЖК ячейки в собранном виде, что значительно упрощает технологию их производства. Обратимость механизма ориентации азокрасителя AtA-2 [41] позволяет сформировать на подложке с азокрасителем микропериодическую структуру ортогональных планарных направлений поверхностной анизотропии посредством двойного экспонирования ЖК элемента через амплитудную маску [43].

ДИФРАКЦИОННЫЕ ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ЖИДОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Дифракционные оптические элементы созданы методом фотоориентации директора НЖК и представляют периодическое (период 60 мкм) чередование в слое нематика твист-и планарно-ориентированных ЖК доменов [43, 44]. Структурная схема дифракционного ЖК элемента приведена на рис. 1а. На одной подложке ЖК ячейки создается пространственно однородная ориентация жидкого кристалла (полимер М-серии), а на другой подложке элемента имеет место периодическое чередование областей с ортогональными ориентациями директора. Микроструктурированная твист-планарная ориентация директора НЖК задавалась посредством двойного экспонирования собранной ячейки с наведенной поверхностной анизотропией фотополимера М-серии на одной из подложек. Ячейка дважды засвечивалась поляризованным излучением светодиода (S- и P-поляризация) через амплитудную маску, профиль пропускания

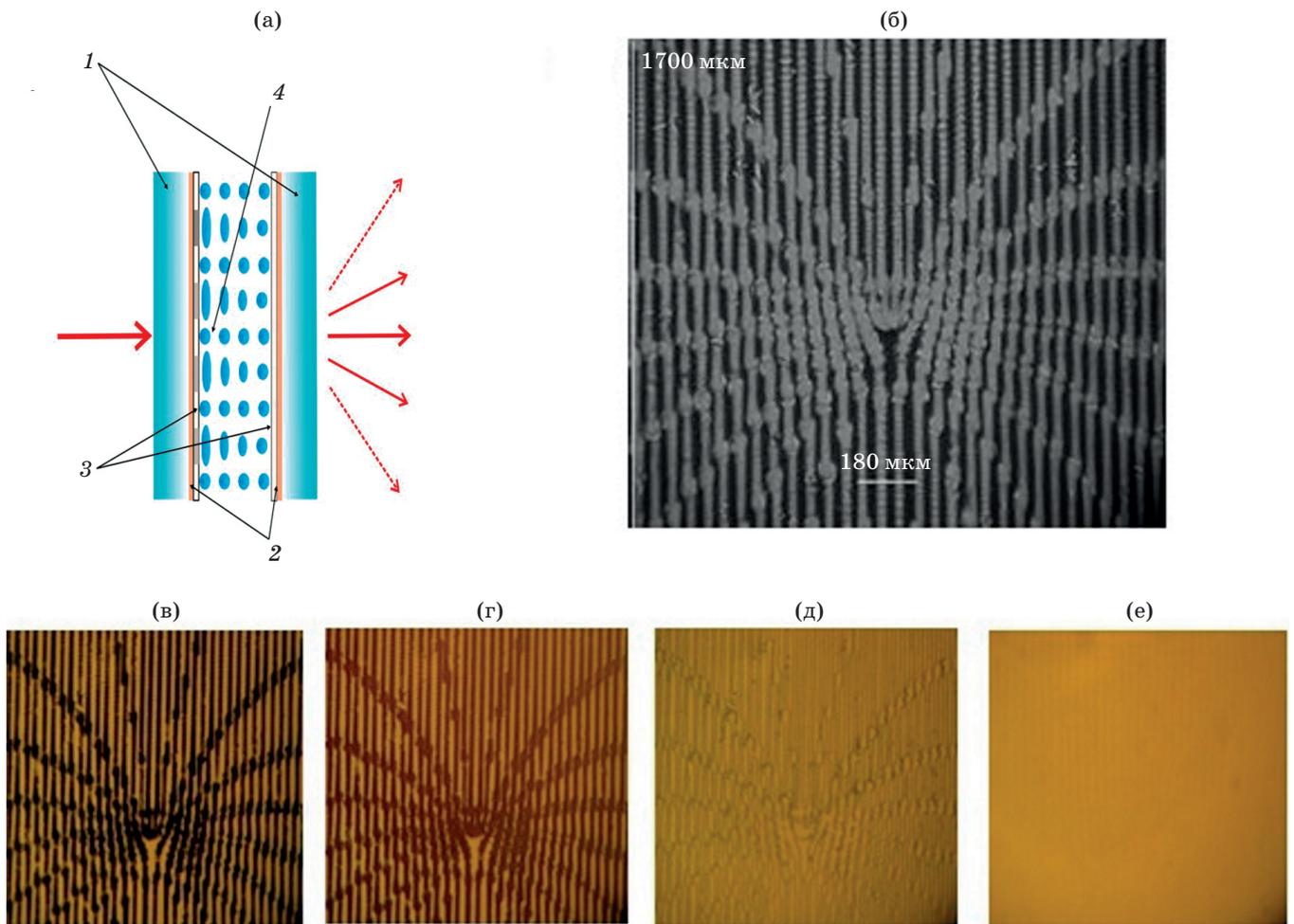


Рис. 1. Электрически управляемый дифракционный топологический ЖК элемент. (а) — структурная схема дифракционного топологического ЖК элемента (1 — стеклянные подложки, 2 — электроды, 3 — ориентирующее покрытие, 4 — жидкий кристалл), (б) — микрофотография амплитудной маски (топологический заряд $|l| = 4$), (в–е) — фотографии ЖК ячейки в скрещенных поляризаторах при значениях управляющего напряжения 0 (в), 1,7 (г), 2,5 (д), 20 (е) В.

которой соответствовал рассчитанной картине интерференции плоской волны с когерентным вихревым пучком [36]. Это приводило к условию планарной ортогональной ориентации жидкого кристалла на подложке с ориентантом AtA-2. После экспонирования ячейка заполнялась НЖК в его изотропной фазе. Микрофотография использованной амплитудной маски с топологическим зарядом $|l| = 4$ приведена на рис. 1б. Фотографии ЖК ячейки в скрещенных поляризаторах при различных значениях управляющего напряжения представлены на рис. 1 (в–е).

Как видно из представленных фотографий, использованная технология задания начальной ориентации директора позволяет

формировать дифракционную фазовую твист-планарную анизотропную ЖК структуру (рис. 1в), повторяющую топологию амплитудной маски (1б). При этом амплитуда внешнего управляющего напряжения на ЖК слое позволяет контролировать глубину модуляции его показателя преломления ($\Delta n = n_e - n_o$) (рис. 1(в–е)) и осуществлять электрическое управление дифракционной эффективностью ЖК элемента. При значении управляющего напряжения порядка 20 В ориентация директора во всем слое НЖК становится гомеотропной и дифракционная структура в ЖК слое разрушается.

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты исследования дифракции

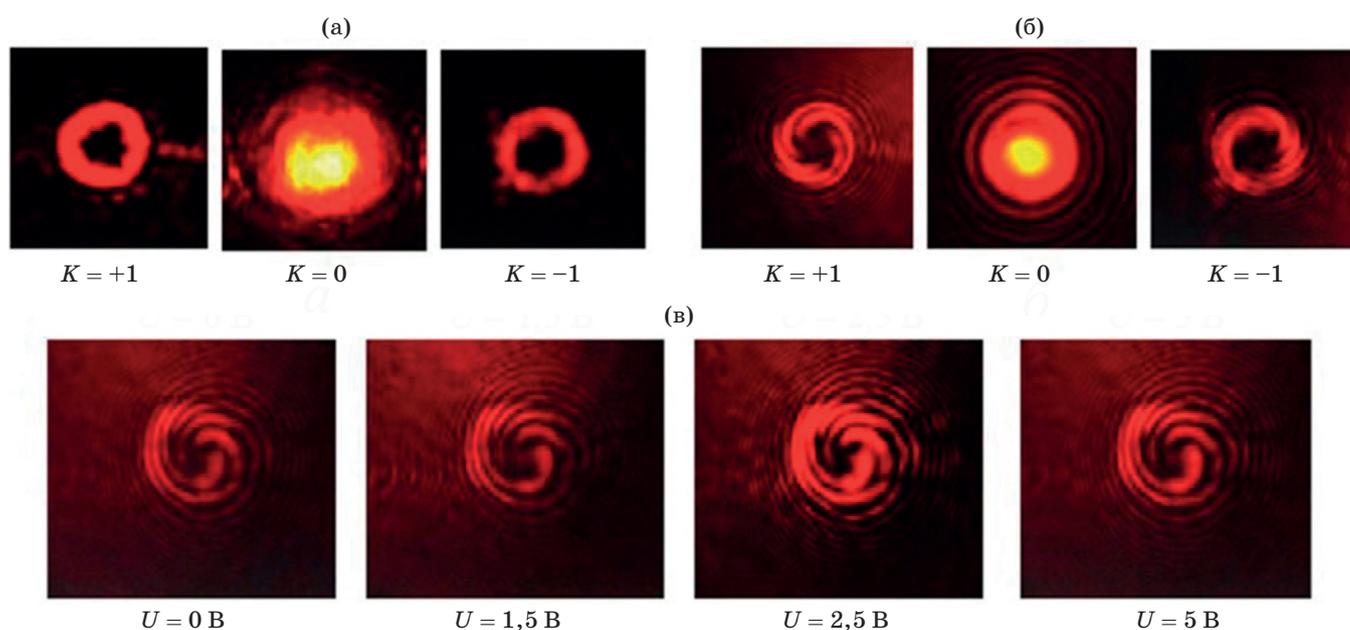


Рис. 2. Дифракция излучения на электрически управляемом топологическом ЖК элементе. (а) — дифракция излучения He-Ne лазера (линейная поляризация), (б) — результат интерференции пучков ± 1 -ых порядков дифракции с когерентной сферической волной (интерферометр Маха–Цендера), (в) — результат интерференции пучка 1-го порядка дифракции с когерентной сферической волной при различных значениях амплитуды внешнего управляющего напряжения.

излучения на электрически управляемом топологическом ЖК элементе, включающие общую картину дифракции и фазовый анализ волнового фронта излучения, распространяющегося в направлении первого максимума дифракции.

Как видно из результатов экспериментальных исследований, представленных на рис. 2б, в направлении 0-го порядка дифракции распространяется волна с плоским волновым фронтом, а в направлениях $K = \pm 1$ — оптические вихри с топологическими зарядами $l = \pm 4$.

Устойчивость возбуждаемых вихревых пучков по отношению к управляющему напряжению иллюстрируется данными эксперимента, представленными на рис. 2в. Возбуждаемые сингулярные пучки остаются устойчивыми при их распространении на расстоянии более 3 м.

Начальное значение дифракционной эффективности ЖК элемента ($U = 0\text{--}1,5 \text{ В}$) соответствует $\eta \approx 10\%$. В этом рабочем диапазоне напряжений такая твист-структура действует как две независимые амплитудные решетки [45] и ее дифракционная эффективность не зависит от спектрального диапазона. При до-

стижении оптического порога по напряжению $U_{\text{ор}}$ твист-структура раскручивается, нарушается условие Могена [46] и решетка начинает работать как фазовая дифракционная структура. Увеличение амплитуды управляющего напряжения приводит к переориентации директора по полярному углу и соответственно к изменению модуляции показателя преломления в анизотропном слое. При этом дифракционная эффективность элемента немонотонно изменяется, выходя на максимальное значение 25–28% при внешнем управляющем напряжении 2,5 В. Дальнейшее увеличение амплитуды внешнего напряжения до 20 В обеспечивает гомеотропную ориентацию директора всего объема ЖК слоя, что приводит к исчезновению дифракционной структуры ($\Delta n = 0$, $\eta = 0\%$).

Q-ТВИСТЕРЫ

При создании Q-твистера (QT-элемент) собранная ЖК ячейка с наведенной однородной поверхностной анизотропией ориентирующего покрытия (полимера М-серии) на одной подложке экспонировалась поляризованным излучением светодиода в коротковолновой

области видимого спектра с пошаговым изменением азимутального угла ориентации вектора поляризации, что обеспечивает азимутально ориентированную поверхностную анизотропию фотоориентанта AtA-2 на второй подложке. Для обеспечения такой топологии ориентации была создана экспериментальная установка, состоящая из светодиода, поляризатора и ЖК элемента, установленных на программно-управляемых механических вращателях, и амплитудной маски, которая представляет собой щель в виде сектора с угловым размером 2° . Выбранный размер щели позволяет сформировать в элементе 180 секторов. QT-элемент заправляется НЖК в изотропном состоянии. Таким образом, созданный элемент представляет собой твист-структуру с азимутально структурированным шагом спирали. Такой ЖК элемент, по аналогии с Q-пластинкой, характеризуется топологическим зарядом элемента q [26, 27]. Для контроля количества образуемых в световом поле оптических вихрей использовалась юстировка установки пошаговой засветки, обеспечивающая наличие несориентированной области жидкого кристалла в центре элемента. В этом случае общая комплексная интенсивность поля при прохождении ЖК элемента определяется суммой комплексных амплитуд двух мод Лагерра–Гаусса с азимутальными индексами $l = 0$ и $|l| = N$ — сумма TEM_{00} моды (шум из-за наличия несориентированной области в центре элемента — гауссов пучок) и моды TEM_{0N} (вихрь с топологическим зарядом $|l| = N$). Распространение оптического вихря TEM_{0N} на фоне шума в виде гауссовой моды TEM_{00} определяет его неустойчивость и приводит к распаду на N фазовых сингулярностей с единичным топологическим зарядом [47, 48].

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований созданных QT-элементов с различными топологическими зарядами. Топология распределения директора жидкого кристалла на структурированной подложке схематически представлена в верхнем ряду рис. 3. В среднем ряду приведены поляризационные фотографии элементов в скрещенных поляризаторах в отсутствии управляющего напряжения. В нижнем ряду приведены характерные картины распределения интенсивности в сечении преобразованных циркулярно-поляризованных гауссовых пучков при их прохождении через QT-элемент и их фазовый топологический анализ (интерференция с когерентной плоской волной) при амплитуде управляющего напряжения 3 В.

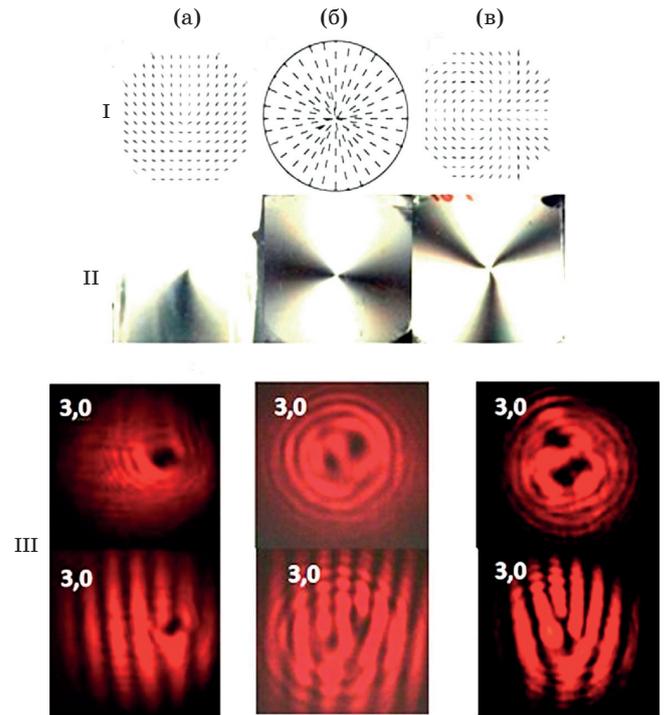
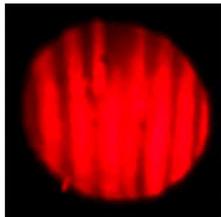
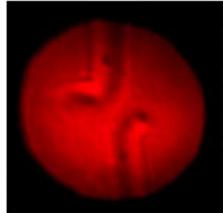
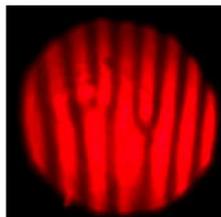
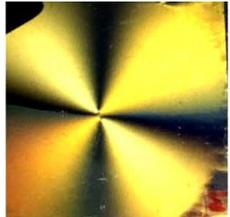
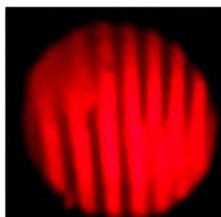
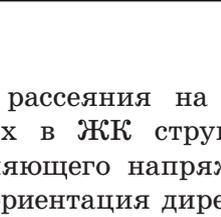


Рис. 3. Электрически управляемые QT-элементы с $q = 0,5$ (а), 1 (б), 1,5 (в). I — топология распределения директора жидкого кристалла на структурированной подложке, II — поляризационные фотографии элементов в отсутствии управляющего напряжения, III — характерные картины распределения интенсивности в сечении преобразованных циркулярно-поляризованных гауссовых пучков, прошедших через QT-элемент и их фазовый топологический анализ (интерференция с когерентной плоской волной) при амплитуде управляющего напряжения 3 В.

зованных циркулярно-поляризованных гауссовых пучков при их прохождении через QT-элемент и их фазовый топологический анализ. Как видно из рис. 3, созданные топологические ЖК элементы позволяют формировать сингулярные пучки с заданным количеством оптических вихрей $N = 2q$ с топологическим зарядом $|l| = 1$.

В работе проведены экспериментальные исследования особенностей преобразования фазовой топологии волнового фронта оптического излучения разработанными элементами. В таблице представлены результаты, полученные для QT-элемента с зарядом $q = 1$, включающие характерные фотографии ЖК элемента в скрещенных поляризаторах, распределение

Результаты эксперимента, полученные для QT-элемента с зарядом $q = 1$

Напряжение на элементе, В	Фотографии элемента в скрещенных поляризаторах (белый свет)	Распределение интенсивности в сечении пучка	Интерференция с когерентной плоской волной (интерферометр Маха–Цендера)
0–1,5			
1,5–2,5			
2,5–5,5			
Более 6,0			

интенсивности в сечении преобразованного элементом света и интерференционные картины сложения оптического вихря с когерентной плоской волной при различных амплитудах внешнего напряжения на Q-твистере. Как видно из данных эксперимента, при напряжениях на ЖК элементе в диапазоне от 0 до 1,5 В в ЖК слое проявляется твист-эффект. Образованные в слое жидкого кристалла линии дисклинации, соответствующие резкой смене знака закрутки директора, приводят к рассеянию света на неоднородностях ЖК слоя. При срыве условия Могена [40, 46] (диапазон напряжения 1,5–2,6 В) твист-структура раскручивается и в ЖК слое проявляется двулучепреломление, что приводит к посте-

пенному уменьшению рассеяния на оптических неоднородностях в ЖК структуре. При амплитуде управляющего напряжения в диапазоне 2,6–5,5 В ориентация директора в середине ЖК слоя становится гомеотропной и связь между двумя приграничными областями ЖК ячейки теряется. Такая топология ориентации директора в ЖК структуре приводит к проявлению спин-орбитального взаимодействия [25] и образованию двух сингулярностей с топологическим зарядом $|l| = 1$ в профиле формируемого светового пучка. При дальнейшем увеличении напряжения все больший объем жидкого кристалла ориентируется гомеотропно (что видно по контрасту поляризационных фотографий ЖК слоя)

и эффективность преобразования волнового фронта падает. Разработанный элемент не требует точной подстройки по напряжению и может работать во всем оптическом диапазоне в области рабочих напряжений 2,6–5,5 В.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе азимутально ориентированные электрически управляемые ЖК твист-элементы позволяют формировать сингулярные пучки с заданным количеством оптических вихрей $N = 2q$ с зарядом $|l| = 1$ и в отличие от хорошо известных Q-пластинок не требуют точной подстройки по управляющему напряжению (рабочий диапазон напряжения 2,5–5,5 В). Элемент может работать в диапазоне длин волн от 0,5 до 2 мкм. Предложенная топология ориентации жидкого кристалла также пригодна для создания азимутально ориентированных QT-элементов для возбуждения вихревых с различными топологическими зарядами. Разработанный топологический ЖК

дифракционный элемент имеет начальную дифракционную эффективность 10%, которая увеличивается до 25–28% при значении управляющего напряжения порядка 2,5 В.

Предложенные и апробированные в работе технологии создания управляемых ЖК элементов для формирования оптических вихрей продемонстрировали хорошую эффективность преобразования световых пучков, а также устойчивость фазовой топологии. Предложенные элементы могут быть изготовлены на фотоориентантах, чувствительных в УФ области спектра, что расширит их спектральный рабочий диапазон.

Предложенные в работе топологические ЖК твист-элементы отличаются компактностью, простотой изготовления, надежностью конструкции, низкой потребляемой мощностью и могут найти применение для генерации вихрей ультракороткой длительности, суперконтинуума, а также в оптических мультиплексерах и технологиях защиты ценных бумаг и документов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Restuccia S., Giovannini D., Gibson G., Padgett M.J. Comparing the information capacity of Laguerre–Gaussian and Hermite–Gaussian modal sets in a finite-aperture system // *Opt. Exp.* 2016. № 24. P. 27127–27136.
2. Zhu L., Wang J. Demonstration of obstruction-free data-carrying N-fold Bessel modes multicasting from a single Gaussian mode // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 23. P. 5463–5466.
3. Shen Y., Wang X., Xie Z., Min C.J., Fu X., Liu Q., *et al.* Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities // *Light Sci. Appl.* 2019. V. 8. № 90. P. 1–29.
4. Milione G., Lavery M.P.J., Huang H., Ren Y., Xie G., Nguyen T.A., Karimi E., Marrucci L., Nolan D.A., Alfano R.R., and Willner A.E. 4×20 Gbit/s mode division multiplexing over free space using vector modes and a q-plate mode (de)multiplexer // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 9. P. 1980–1983.
5. Zhan Q.W. Cylindrical vector beams: From mathematical concepts to applications // *Advances in Optics and Photonics*. 2009. P. 1–57. DOI:10.1364/AOP.1.000001
6. Wang J., Yang J.Y., Fazal I.M., Ahmed N., Yan Y., Huang H., *et al.* Terabit freespace data transmission employing orbital angular momentum multiplexing // *Nat. Photon.* 2012. V. 6. P. 488–496.
7. Gibson G., Courtial J., Padgett M., Vasnetsov M., *et al.* Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum // *Opt. Exp.* 2004. V. 12. № 22. P. 5448–5456.
8. Djordjevic I.B. Deep-space and near-Earth optical communications by coded orbital angular momentum (OAM) modulation // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. № 15. P. 14277–14289.
9. Wang J., Yang J.Y., Fazal I.M., Ahmed N., Yan Y., *et al.* Experimental demonstration of 100 Gbit/s DQPSK data exchange between orbital-angular-momentum modes // *Proc. Optical Fiber Commun. Conf.* March 4–8 2012, Los Angeles, CA, USA. Optical Society of America: Washington DC, USA. 2012. P. 665–667.
10. Padgett M.J., Bowman R. Tweezers with a twist // *Nat. Photon.* 2011. V. 5. P. 343–348.
11. Toyoda K., Miyamoto K., Aoki N., Morita R., and Omatsu T. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures // *Nano Lett.* 2012. V. 12. P. 3645–3649.
12. Cheng W., Liu X.-L., and Polynkin P. Simultaneously spatially and temporally focused femtosecond vortex beams for laser micromachining // *JOSA B*. 2018. V. 35. № 10. DOI:10.1364/JOSAB.35.000B16

13. Hamazaki J., Morita R., Chujo K., Kobayashi Y., Tanda S., Omatsu T. Optical-vortex laser ablation // *Opt. Exp.* 2010. V. 18. № 3. P. 2144–2151.
14. Lavery M.P., Speirits F.C., Barnett S.M., Padgett M.J. Detection of a spinning object using light's orbital angular momentum // *Science*. 2013. V. 341. P. 537–540.
15. Fang L., Padgett M.J., Wang J. Sharing a common origin between the rotational and linear Doppler effects // *Laser Photon Rev.* 2017. P. 1700183-1–1700183-8.
16. Jian Wang and Yize Liang Generation and detection of structured light: A review // *Frontiers in Physics*. 2021. V. 9. P. 688284-1–688284-16.
17. Forbes A., Dudley A., McLaren M. Creation and detection of optical modes with spatial light modulators // *Adv. Opt. Photon.* 2016. V. 8. № 2. P. 200–227.
18. Ma H., Haojun H., Wenke X., Xiaojun X. Study on the generation of a vortex laser beam by using phase-only liquid crystal spatial light modulator // *Opt. Eng.* 2013. V. 52. № 9. P. 09172-1–09172-19.
19. Szatkowski M., Masajada J., Augustyniak I., Nowacka K. Generation of composite vortex beams by independent spatial light modulator pixel addressing // *Opt. Commun.* 2020. V. 463. DOI:10.1016/j.optcom.2020.125341
20. Ostrovsky A.S., Rickenstorff-Parrao C., and Arrizón V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator // *Opt. Lett.* 2013. V. 38. P. 534–536.
21. Sueda K., Miyaji G., Miyanaga N., and Nakatsuka M. Laguerre-Gaussian beam generated with a multilevel spiral phase plate for high intensity laser pulses // *Opt. Exp.* 2004. V. 12. № 15. P. 3548–3553.
22. Oemrawsingh S.S.R., Houwelingen J.A.W., Eliel E.R., Woerdman J.P., Verstegen E.J.K., Kloosterboer J.G., and Hooft G.W. Production and characterization of spiral phase plates for optical wavelengths // *Appl. Opt.* 2004. V. 43. № 3. P. 688–694.
23. Massari M., Ruffato G., Gintoli M., Ricci F., and Romanato F. Fabrication and characterization of high-quality spiral phase plates for optical applications // *Appl. Opt.* 2015. V. 54. № 13. P. 4077–4083.
24. Nersisyan S., Tabiryan N., Steeves D.M, and Kimball B.R. Fabrication of liquid crystal polymer axial waveplates for uv-ir wavelengths // *Opt. Exp.* 2009. V. 17. № 14. P. 11926–11934.
25. Ling X., Luo H., Guan F., Zhou X., Luo H., and Zhou L. Vortex generation in the spin-orbit interaction of a light beam propagating inside a uniaxial medium: Origin and efficiency // *Opt. Exp.* V. 2020. V. 28. № 19. P. 27258–27267.
26. Marrucci L. Spin-to-orbital optical angular momentum conversion in liquid crystal “q-plates”. Classical and quantum applications // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2012. V. 561. P. 48–56.
27. Slussarenko S., Murauski An., Du Tao, Chigrinov V., Marrucci L., Santamato E. Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. № 5. P. 4085–4090.
28. Wei Ji, Lee C.-H., Chen P., Hu W., Ming Y., Zhang L., Lin T.H., Chigrinov V. & Lu Y.-Q. Meta-q-plate for complex beam shaping // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 25528-1–25528-7.
29. Liu Y.J., Sun X.W., Luo D., and Raszewski Z. Generating electrically tunable optical vortices by a liquid crystal cell with patterned electrode // *Appl. Phys. Lett.* 2008. V. 92. № 10. P. 101114-1–101114-3.
30. Rafayelyan M. and Basselet E. Bragg-Berry mirrors: Reflective broadband // *Opt. Lett.* 2016. V. 41. № 7. P. 3972–3975.
31. Kobashi J., Yoshidaand H., Ozaki M. Broadband optical vortex generation from patterned // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2017. V. 646. № 1. P. 116–124.
32. Lee D., Lee H., Migara L.K., Kwak K., Panov V.P., and Song J.-K. Widely tunable optical vortex array generator based on grid patterned liquid crystal cell // *Adv. Opt. Mater.* 2020. P. 2001604-1–2001604-10.
33. Ge S.-J., Ji W., Cui G.-X., Wei B.-Y., Hu W., and Lu Y.-Q. Fast switchable optical vortex generator based on blue phase liquid crystal fork grating // *Opt. Mater. Exp.* 2014. V. 4. № 12. P. 2535–2541.
34. Ge S.-J., Chen P., Ma L.-L., Liu Z., Zheng Z.-G., Shen D., Hu W., and Lu Y.-Q. Optical array generator based on blue phase liquid crystal Damman grating // *Opt. Mater. Exp.* 2016. V. 6. № 4. P. 1087–1092.
35. Казак А.А., Мельникова Е.А., Толстик А.Л., Могильный В.В., Станкевич А.И. Управляемые дифракционные жидко-кристаллические структуры на основе полимерного фотоориентанта // *Письма в ЖТФ*. 2008. Т. 34. Вып. 20. С. 1–7.
36. Казак А.А., Толстик А.Л., Мельникова Е.А. Управление световыми полями с помощью дифракционных жидкокристаллических элементов // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 7. С. 72–74.

37. Kazak A.A., Tolstik A.L., Melnikova E.A., Komar A.A. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2013. V. 16. № 3. P. 302–308.
38. Chen P., Wei B.-Y., Ji W., Ge S.-J., Hu W., Xu F., Chigrinov V.R., and Lu Yan-Q. Arbitrary and reconfigurable optical vortex generation: A high-efficiency technique using director-varying liquid crystal fork gratings // *Photonics Research*. 2015. V. 3. № 4. P. 133–139.
39. Ji W., Wei B.-Y., Chen P., Hu W. & Lu Y.-Q. Optical field control via liquid crystal photoalignment // *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2017. V. 644. P. 3–11.
40. Томилин М.Г., Невская Г.Е. Фотоника жидких кристаллов. Спб.: изд. Политехн. ун-та, 2011. 741 с.
41. Mikulich V.S., Murauski An.A., Muravsky Al.A., Agabekov V.E. Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films // *Appl. Spectr.* 2016. V. 83. № 1. P. 115–120.
42. Mahilny U., Trofimova A., Stankevich A., Tolstik A., Murauski A., Muravsky A. New photocrosslinking polymeric materials for liquid crystal photoalignment // *Nonlinear phenomena in complex systems*. 2013. V. 16. № 1. P. 79–85.
43. Кабанова О.С., Рушнова И.И., Мельникова Е.А., Толстик А.Л., Муравский Ал.А., Муравский Ан.А., Хайнцманн Р. Двумерная дифракционная оптическая структура на основе текстурированной фотоориентации полимеризуемого жидкого кристалла // *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019. № 3. С. 4–11.
44. Melnikova E.A., Tolstik A.L., Rushnova I.I., Kabanova O.S., Muravsky A.A. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals // *Appl. Opt.* 2016. V. 55. № 23. P. 6491–6495.
45. Węglowska R., Kozanecka-Szmigielb A., Pieceka W., Konieczkowskac J., Schab-Balcerzak E. Electro-optically tunable diffraction grating with photoaligned liquid crystals // *Opt. Commun.* 2017. V. 400. P. 144–149.
46. Mauguin C.V. Sur les cristaux liquides de Lehman // *Bull. Soc. Fr. Miner.* 1911. V. 34. P. 71–117.
47. Soskin M.S., Gorshkow V.N., Vasnetsov M.V., Malos J.T., and Heckenberg N.R. Topological charge and angular momentum of light beams carrying optical vortices // *Phys. Rev.* 1997. A5. V. 56. № 5. P. 4064–4075.
48. Ando T., Matsumoto N., Ohtake Y., Takiguchi Y., and Inoue T. Structure of optical singularities in coaxial superpositions of Laguerre-Gaussian modes // *JOSA*. 2010. A27. V. 27. № 12. P. 2602–2612.

АВТОР

Мельникова Елена Александровна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии, Белорусский государственный университет, Минск, 220030, Республика Беларусь; Scopus ID: 7003403745; <https://orcid.org/0000-0001-5097-5832>; Melnikova@bsu.by

AUTHOR

Melnikova Elena — Candidate of Physics and Mathematics Sci., Docent, Associate Professor of the Department of Laser Physics and Spectroscopy, Belarusian State University, Minsk, 220030, Republic of Belarus; Scopus ID: 7003403745; <https://orcid.org/0000-0001-5097-5832>; Melnikova@bsu.by