

61. Формирование сингулярных световых пучков с заданной топологией поляризации на основе микроструктурированных ЖК элементов

Е. А. Мельникова, М. В. Бобкова, В. В. Пекаревич, А. Л. Толстик
Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

Разработаны и экспериментально исследованы электрически управляемые анизотропные жидкокристаллические (ЖК) элементы со сложной начальной топологией распределения оптической оси на основе планарной и твист-структуры ЖК. Разработанные элементы преобразуют линейно-поляризованный световой пучок в пучок с азимутальной или радиальной поляризацией и формируют оптический вихрь с топологическим зарядом $l = \pm 1$.

Ключевые слова: Оптика, Жидкий кристалл, Азимутальная и радиальная поляризация, Сингулярный световой пучок.

Цитирование: Мельникова, Е. А. Формирование сингулярных световых пучков с заданной топологией поляризации на основе микроструктурированных ЖК элементов / Е. А. Мельникова, М. В. Бобкова, В. В. Пекаревич, А. Л. Толстик // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 247–252.

Введение

В настоящее время анизотропные жидкокристаллические (ЖК) среды получили широкое практическое применение и используются как эффективные функциональные материалы в оптических системах отображения информации, а также в многочисленных устройствах для управления световыми пучками и преобразования их физических параметров. Повышенный интерес к данным веществам связан с технологичностью их производства, низкими управляющими напряжениями, малой стоимостью и массогабаритными характеристиками.

Весьма актуальным на данный момент являются задачи создания и преобразования световых полей с заданной поляризационной и фазовой структурой. Наибольший интерес представляют световые пучки с радиальной и азимутальной поляризацией. Такие световые поля находят применение при лазерной обработке материалов, например, при лазерной резке, когда имеет место существенная зависимость эффективности воздействия лазерного излучения на материалы от поляризационной структуры светового поля [1, 2]. В свою очередь широкое применение получили сингулярные световые пучки, или оптические вихри, которые образуются в случае появления на волновом фронте световой волны особых точек, винтовых дислокаций. Данные точки характеризуются неопределенностью фазы и нулевым значением амплитуды световых колебаний, причем волновой фронт такой волны имеет винтообразную структуру [3, 4]. Вихревые пучки находят применение в оптических пинцетах [5], захвате атомов [6], создании волноводных структур и оптической обработке информации [7].

Целью настоящей работы является создание двух электрически управляемых жидкокристаллических элементов (планарный ЖК элемент и твист — ЖК элемент), которые преобразуют линейную поляризацию гаусового светового пучка в радиальную или азимутальную поляризацию и формируют сингулярные световые пучки.

1. Структура и создание ЖК элементов

Известно, что направление оптической оси в планарно ориентированном слое нематического жидкого кристалла определяется направлением директора молекул ЖК и может изменяться путем воздействия внешнего электрического поля [8].

Разработанный и созданный оптический планарный ЖК элемент, представляет собой электрически управляемую двулучепреломляющую ЖК пластинку с неоднородным структурированным распределением локальной оптической оси в поперечной плоскости жидкокристаллической ячейки. Топология распределения директора ЖК в плоскости ячейки представлена на рис. 1а. Такой элемент при значениях набега фазы между обыкновенным и необыкновенным лучами равным $\Delta\Phi = \pi(2n + 1)$ функционирует как полуволновая пластинка, которая поворачивает входную поляризацию светового поля на угол, равный двойному углу между локальной ориентацией оптической оси и вектором напряженности входного излучения, таким образом, формируя радиальную (азимутальную) поляризацию светового пучка (рис. 1б). Значение фазового набега контролируется внешним напряжением.

Пространственное распределение директора ЖК формируются фотоориентирующим слоем при его экспонировании излучением с длиной волны 440 нм и

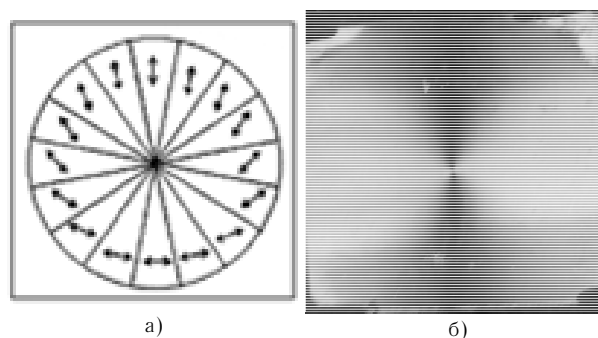


Рис. 1. Пространственное распределение директора ЖК (а) и изображение прошедшего через ЖК ячейку излучения в скрещенных поляризаторах (б)

интенсивностью 15 мВт/см^2 с заданным пространственным распределением поляризации. В качестве фотоориентанта в работе использовалась тонкая пленка азокрасителя AtA-2 (толщина 20–30 нм), разработанного в Институте химии новых материалов НАН Республики Беларусь. Данный азокраситель имеет высокую энергию сцепления с ЖК-молекулами, обладает термо- и фотостабильностью [9]. Для образования заданной анизотропной структуры элемента была создана установка, которая состоит из синего светодиода, двух управляемых вращателей (с поляризатором и образцом) и щели в виде сектора в два градуса. ЖК-ячейка разбивается на 180 секторов, каждый сектор экспонировался излучением светодиода с заданным направлением плоскости поляризации с длиной волны 440 нм и интенсивностью 15 мВт/см^2 в течение 20 секунд. Полное время экспонирования ЖК-ячейки составляет 1 час 20 минут.

Созданный элемент может формировать как азимутальную, так и радиальную поляризацию в зависимости от взаимной геометрии поляризации входного излучения и ориентации ЖК-элемента. Так, например, при фиксированной входной линейной поляризации светового пучка изменение ориентации ЖК-ячейки на 90° позволяет перейти от радиальной поляризации лазерного излучения на выходе ЖК-элемента к азимутальной (рис. 2).

Разработанный и созданный в работе твист-жидкокристаллический элемент представляет собой двулучепреломляющую жидкокристаллическую пластинку с топологией распределения ЖК-молекул, приведенной на рис. 3. На одной из подложек ЖК-ячейки создается однородная планарная ориентация ЖК-молекул, в то время как на другой подложке задается радиальное распределение молекул, где в каждом секторе ЖК-директор направлен по радиусу. Поскольку ориентация ЖК-директора на подложках не совпадает, в объеме жидкого кристалла формируется набор «твист»-структур, закрученных на разный угол φ . В каждом секторе данный угол соответствует углу между направлениями директора на подложке с однородной ориентацией и на подложке с радиальной ориентацией. Благодаря формирующейся «твист»-структуре директора в каждом секторе ЖК-элемента происходит поворот плоскости поляризации входного линейно поляризованного излучения на заданный угол φ и на выходе элемента образуется радиальная либо азимутальная поляризация светового поля и соответственно может использоваться для всех длин волн видимого диапазона спектра.

Для создания такой «твист»-структуры ЖК-ячейка собиралась из подложек с разным ориентирующим покрытием. Для задания однородной планарной ориентации директора ЖК на одной из подложек использовался методика механического натирания тонкой полимерной пленки, которая была использована в качестве ориентирующего покрытия. Радиальная ориентация формировалась при экспонировании азокрасителя AtA-2 по вышеописанной методике.

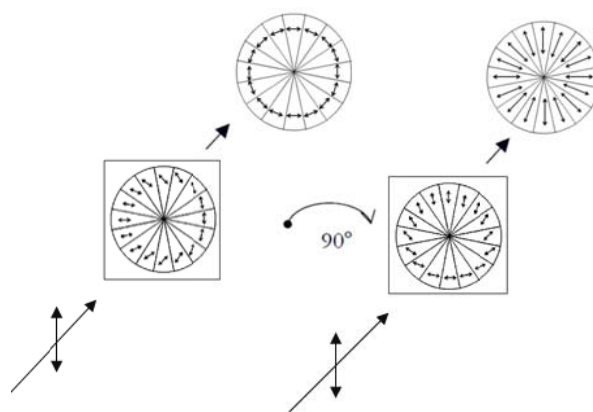


Рис. 2. Изменение радиальной поляризации на азимутальную путем поворота ЖК-ячейки на 90°

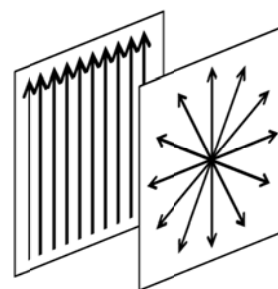


Рис. 3. Схематическое распределение ЖК-молекул на каждой из подложек, где стрелками указано локальное направление директора

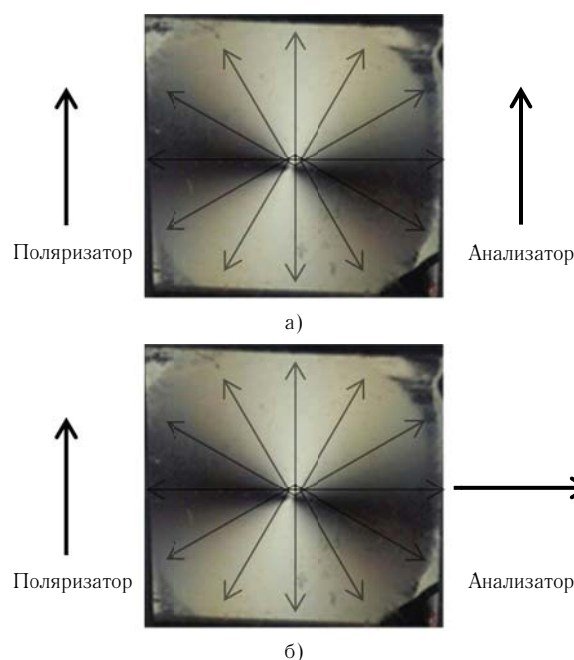


Рис. 3. Изображение твист-элемента в параллельных (а) и скрещенных (б) поляризаторах (стрелками показаны оси поляризатора и анализатора)

Изображение созданного твист-элемента в скрещенных и параллельных поляризаторах без напряжения представлены на рис. 3. Плавное уменьшение интенсивности от наиболее яркой области, отвечающей совпадению поляризации светового пучка на выходе

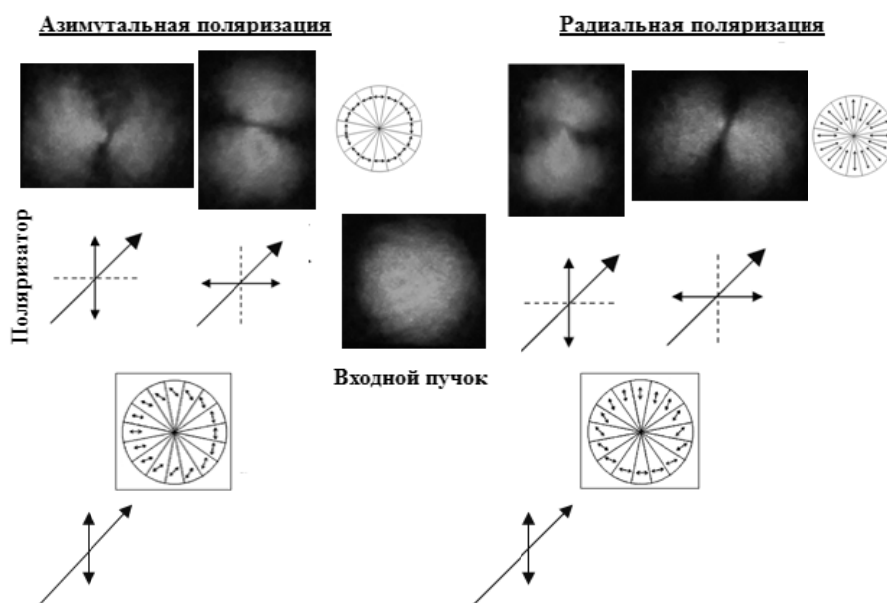


Рис. 4. Схема получения азимутальной или радиальной поляризации линейно поляризованного светового поля на выходе планарного ЖК элемент

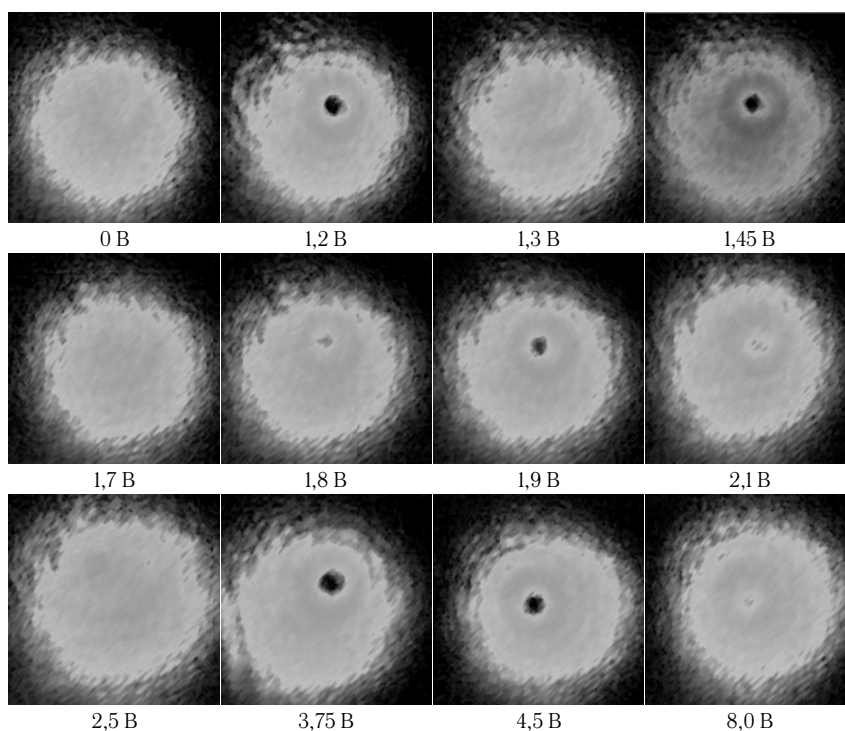


Рис. 5. Поперечное сечение линейно поляризованного гауссова светового пучка на выходе ЖК элемента с *S*-деформацией ЖК молекул при различных значениях приложенного напряжения

ЖК ячейки с осью анализатора, до темной области, отвечающей ортогональной поляризации светового пучка и оси анализатора.

2. Оптические свойства ЖК элементов

В работе проведен анализ состояния поляризационной структуры выходного светового прошедшего через разработанные ЖК элементы. На исследуемый ЖК элемент направлялось линейно-поляризованное излучение He–Ne лазера длиной волны 632,8 нм и диаметром пучка 5 мм. Пространственное распределе-

ние интенсивности на выходе планарного ЖК элемента при двух ее ориентациях представлено на рис. 4, причем значение набег фазы составляет $\Delta\Phi = 7\pi$. В центральной части рисунка приведена фотография сечения входного гауссова светового пучка. Как видно из рисунка, при изменении ориентации ЖК ячейки возможен переход от азимутальной поляризации светового поля к радиальной.

Для исследования картины распределения интенсивности в поперечном сечении полученных пучков в зависимости от приложенного на ячейку внешнего напряжения на жидкокристаллический элемент

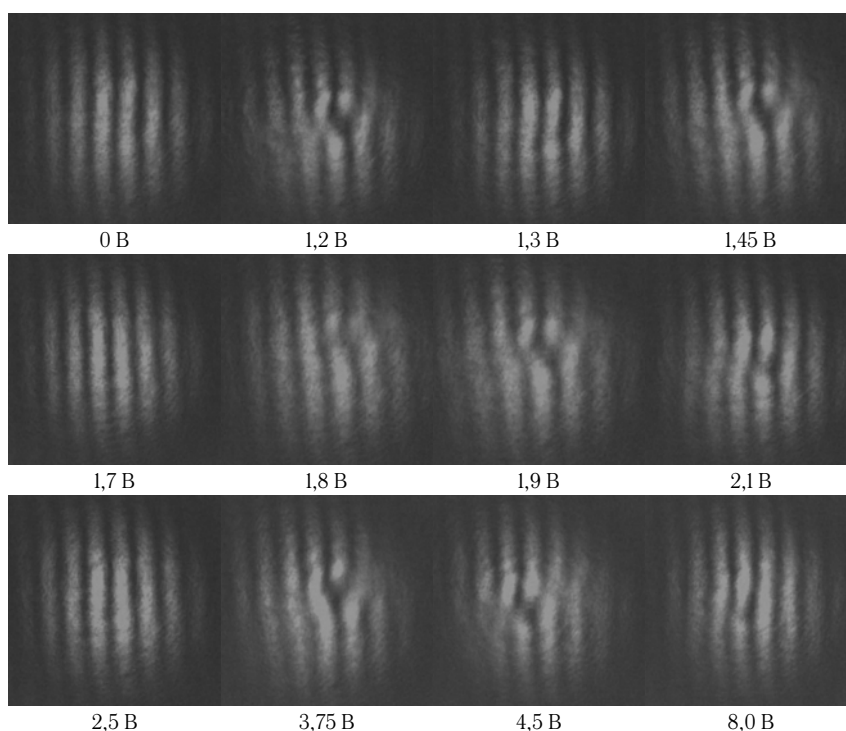


Рис. 6. Результаты исследования сингулярности линейно поляризованного светового пучка на выходе ЖК элемента с *S*-деформацией ЖК молекул

направлялось линейно поляризованное излучение гелий-неонового лазера с длиной волны 632,8 нм и диаметром пучка 2 мм, что соответствовало азимутальной поляризации светового поля на выходе ЖК-элемента. На ЖК ячейку подавалось внешнее напряжение, величина которого изменялось от 0 до 8 В, что отвечало значениям напряженности электрического поля до 4 кВ/см при толщине слоя жидкого кристалла 17 мкм.

Экспериментальные результаты преобразования пространственной структуры линейно поляризованного светового пучка планарным ЖК элементом приведены на рис. 5. Как видно из результатов эксперимента, линейно поляризованный гауссовый пучок, пройдя через ЖК элемент, может иметь различную картину распределения интенсивности в сечении пучка в зависимости от приложенного напряжения. При определенных значениях напряжения в центре сечения пучка появляется провал интенсивности, который становится наиболее четким при значениях напряжения, которые соответствуют выполнению условия для фазового набегу между обыкновенным и необыкновенным лучами $\Delta\Phi = \pi(2n + 1)$. В случае, когда приведенное выше условие не выполняется, пластинка осуществляет частичное преобразование светового поля [10], и пучок имеет гауссово распределение интенсивности или близкое к нему. Полученные результаты согласуются с экспериментальными исследованиями зависимости величины двулучепреломления от приложенного на ЖК ячейку с планарной ориентацией молекул напряжения.

Наличие провалов интенсивности свидетельствует об образовании азимутальной (радиальной) по-

ляризации светового поля и говорит о возможности образования винтовой дислокации на волновом фронте светового пучка. Формирование сингулярных световых полей есть чисто фазовый эффект. Исходя из этого, наилучшим способом идентификации таких световых пучков является способ, основанный на получении интерферограмм плоской волны и оптического вихря. В этом случае в картине распределения интерференционных полос наблюдается характерная вилка, количество разветвлений и ориентация которой зависит от топологического заряда сингулярного пучка.

На рис. 6 представлены экспериментальные данные получения картины интерференции исследуемых световых пучков и опорной плоской волны для разных значений приложенного напряжения на ЖК ячейке. Как видно из результатов экспериментального исследования, при значениях напряжения, которые соответствуют формированию азимутальной (или радиальной) поляризации светового поля, интерференционные полосы имеют «вилку» — подобную структуру, а расщепление интерференционной линии на большее число линий происходит в месте образования винтовой дислокации. Топологический заряд формирующегося оптического вихря как для азимутальной поляризации светового пучка, так и для радиальной составляет $l = +1$.

Профиль сечения пучка в зависимости от приложенного внешнего напряжения к ЖК элементу с *T*-деформацией ЖК молекул представлен на рис. 7. Линейно поляризованный световой пучок на выходе ЖК элемента имеет разную картину распределения интенсивности. При напряжениях на ЖК элементе от 1,1 до 2,4 В в профиле сечения пучка наблюдаются черные

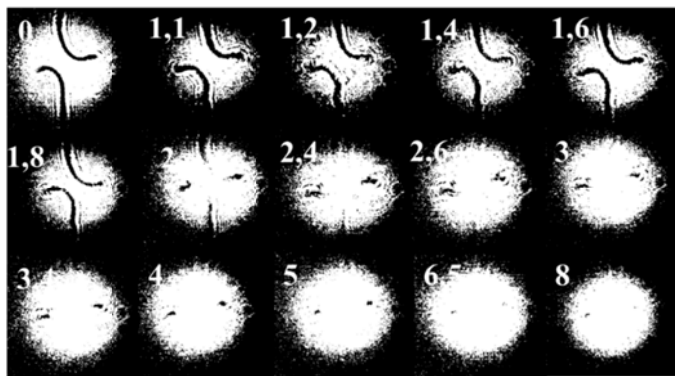


Рис. 8. Поперечное сечение линейно поляризованного гауссова светового пучка на выходе ЖК элемента с T -деформацией ЖК молекул при различных значениях приложенного напряжения

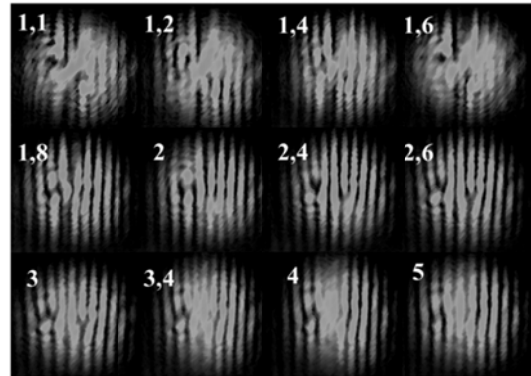


Рис. 9. Результаты исследования сингулярности циркулярно поляризованного светового пучка на выходе ЖК элемента с T -деформацией ЖК молекул. Цифрами обозначено значение напряжений в вольтах.

полосы — рассеяние света на дисклинациях. Причиной наличия дисклинаций в «твист» структуре является резкое изменение направления закрутки молекул ЖК при значениях угла ориентации директора $\varphi = \pi$ и $\varphi = \pi/2$. В местах, где встречается разное направление закрутки ЖК молекул, и возникают дисклинации, которые в профиле сечения пучка, прошедшего через такой ЖК элемент образуют провалы интенсивности в виде темных полос. При напряжении в 2,4 вольта дисклинация пропадает — большинство молекул в объеме ЖК переориентируется и «твист» структура ЖК раскручивается, а в сечении пучков наблюдаются два провала интенсивности, что может свидетельствовать о возникновении оптических вихрей в данных точках.

В случае интерференции линейно поляризованной плоской световой волны и световой волны на выходе ЖК элемента при значениях напряжения, соответствующие появлению двух провалов интенсивности в сечении пучка, в распределении интерференционных полос не наблюдалось характерных для сингулярных полей вилок.

Наряду с линейно поляризованным светом для твист ЖК элемента было проведено экспериментальное исследование преобразования циркулярно поляризованного светового пучка. В профиле сечения пучка в зависимости от напряжения наблюдается та же картина распределения интенсивности, что и для линейно поляризованного светового поля. В случае интерферограмм при напряжениях, которые соответствуют появлению провалов интенсивности, наблюдается расщепление интерференционной линии на большее число линий, которое происходит в месте образования винтовой дислокации, а топологический заряд формирующегося оптического вихря для левой и правой круговой поляризации соответственно равен $l = \pm 1$ (рис. 9).

Заключение

Таким образом, разработанные и созданные в работе ЖК элементы со сложной начальной топологией ориентации ЖК молекул позволяет осуществлять электрически контролируемое преобразование поляризационной и фазовой структуры лазерного излучения.

Список источников

- [1] Niziev, V. G. Influence of beam polarization on laser cutting efficiency / V. G. Niziev, A. V. Nesterov // J. Phys. — 1999. — Vol. 32. — P. 1455–1461.
- [2] Nesterov, A. V. Laser beams with axially symmetric polarization / A. V. Nesterov, V. G. Niziev // J. Phys. — 2000. — Vol. 33. — P. 1817–1822.
- [3] Короленко, П. В. Оптические вихри / П. В. Короленко // Соревский образовательный журнал. — 1998. — № 6. — С. 94–99.
- [4] Абрамочкин, Е. Г. Вращающиеся световые поля и сингулярная оптика / Е. Г. Абрамочкин, В. Г. Волостников // Вестник СамГУ. — 2002. — С. 71–114.
- [5] Абрамян, В. К. Применение аксиально-симметричной фазовой и круговой дифракционной волновой пластин в оптических пинцетах / Известия НАН Армении, Физика. — 2015. — Том 50. — № 3. — С. 321–330.
- [6] Franke-Arnold, S. Optical ferris wheel for ultracold atoms / J. Leach, M. J. Padgett, V. E. Lembessis, D. Ellinas, A. J. Wright, J. M. Girkin, P. Ohberg, and A. S. Arnold // Opt. Express. — 2007. — Vol. 15. — № 14. — P. 8619–8625.
- [7] Molina-Terriza, G. Twisted photons / G. Molina-Terriza, J. P. Torres, L. Torner // Nat. Phys. — Vol. 3. — № 5. — P. 305–310.
- [8] Блинов, Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. / Л. М. Блинов. — М.: Наука, 1928. — 384 с.
- [9] Mikulich, V. S. Influence of Methyl Substituents on Azo-Dye Photoalignment in Thin Films / V. S. Mikulich, An. A. Murauski, Al. A. Muravsky, V. E. Agabekov // J. Appl. Spectr. — 2016. — Vol. 83. — № 1. — P. 115–120.
- [10] Slussarenko, S. Tunable liquid crystal q-plates with arbitrary topological charge / S. Slussarenko, A. Murauski, T. Du, V. Chigrinov, L. Marrucci, E. Santamato // Optics express. — 2011. — Vol. 19. — № 5. — P. 4085–4090.

Forming of singular light beams with a given topology of polarization on the basis of microstructured lc elements

E. A. Melnikova, M. V. Bobkova, V. V. Pekarevich, A. L. Tolstik
Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

Electrically controlled anisotropic liquid crystal (LC) elements with a complex initial topology of the optical axis distribution based on the planar and twist structure of the liquid crystal are developed and experimentally investigated. The developed LCD elements convert a linearly polarized light beam into a beam with azimuthal or radial polarization and form an optical vortex with topological charge $l = \pm 1$.

Keywords: Optics, Liquid crystal, Azimuthal and radial polarization, Singular light beam.