

ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ – ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ФОТОНИКИ

Алексей Толстик,

завкафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ, доктор физико-математических наук, профессор

Елена Мельникова,

доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ, кандидат физико-математических наук, доцент

Ольга Кабанова,

научный сотрудник кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ, кандидат физико-математических наук

Ирина Рушнова,

доцент кафедры высшей математики и математической физики, научный сотрудник НИЛ нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии БГУ, кандидат физико-математических наук

Александр Муравский,

завлабораторией «Материалы и технологии ЖК-устройств» Института химии новых материалов НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук, доцент

Анатолий Муравский,

ведущий научный сотрудник лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств» Института химии новых материалов НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук

Алина Яковлева,

младший научный сотрудник лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств» Института химии новых материалов НАН Беларуси

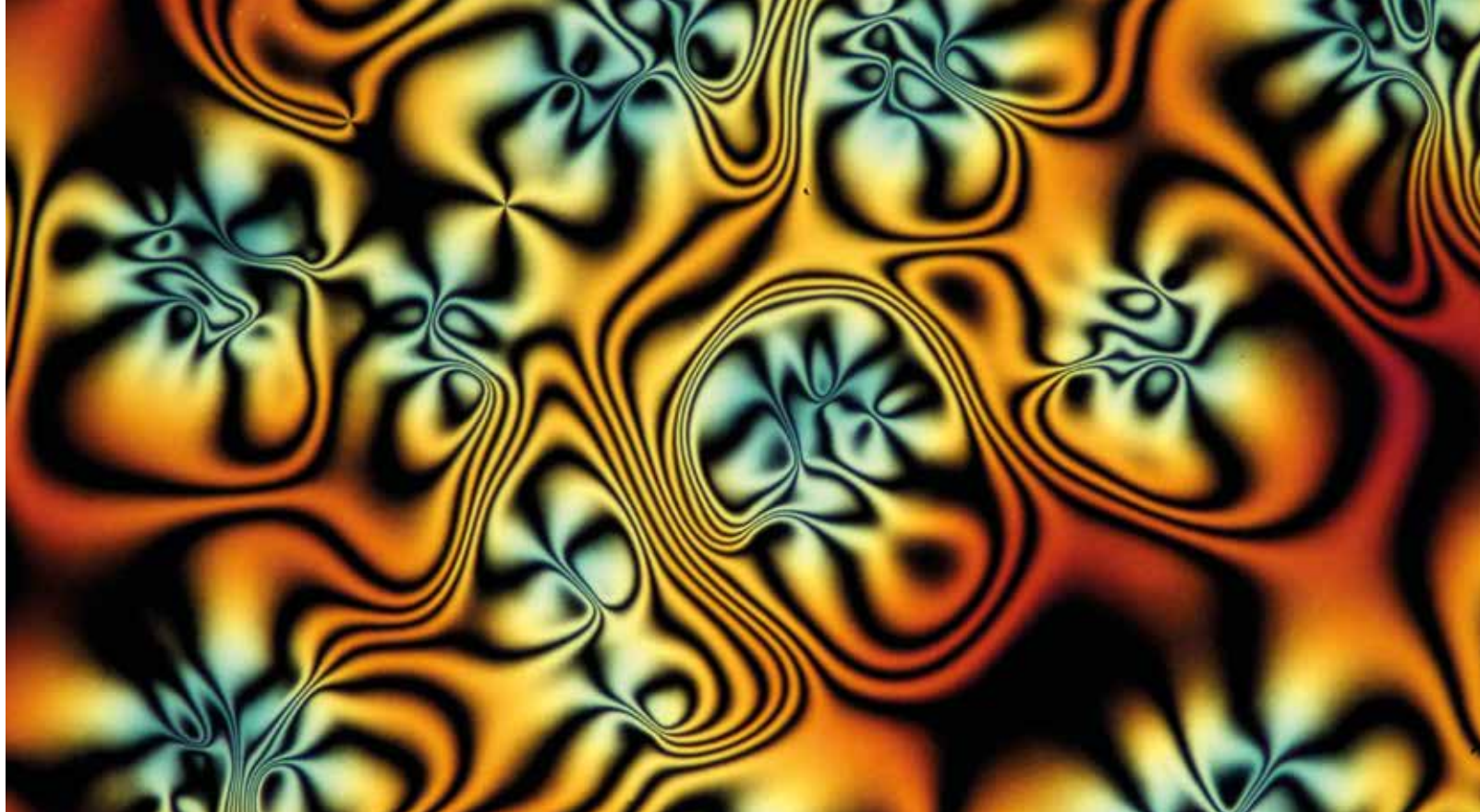
Аннотация. Жидкие кристаллы рассмотрены в качестве перспективных материалов современной фотоники. Показано, что синтезированные фоточувствительные азокрасители, работающие по новому механизму фотоориентации, характеризуются высокой энергией сцепления и позволяют создавать электрически переключаемые фотонные жидкокристаллические устройства нового поколения.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, фотоника, жидкокристаллические устройства, интегральная оптика, сингулярная оптика.

С момента открытия жидких кристаллов (ЖК) прошло более 100 лет, и за это время был пройден долгий путь от понимания загадочной природы и объяснения необычных свойств этих уникальных материалов до их широкого применения в науке и технике. Особое внимание к жидким кристаллам и устройствам на их основе проявляют исследователи во всем мире на протяжении последних 50 лет: синтезированы и изучены более 10 тыс. различных органических химических соединений, обладающих жидкокристаллическими свойствами. Их использовали в простых индикаторах, а впоследствии – в дисплейных технологиях при производстве телевизоров, проекторов, телефонов, смартфонов и других устройств, осуществляющих отображение информации и прочно вошедших в нашу повседневную жизнь.

Уникальные особенности жидких кристаллов и их преимуще-

ства по сравнению с другими мягкими органическими материалами кроются в их двойственной природе и анизотропии. С одной стороны, подобно твердым кристаллам, жидкие обладают двулучепреломлением и могут изменять поляризацию проходящего через них света, с другой – они способны течь, словно жидкость. Анизотропия жидкого кристалла связана с ориентацией молекул в пространстве. Их направление в произвольной точке определяется единичным вектором – директором. Два фактора влияют на характер его распределения: условия на ограничивающих слой жидкого кристалла поверхностях и внешнее поле. Под действием последнего изменение исходной ориентации директора (деформация), определяемое граничными условиями, при небольших напряжениях поля приводит к существенному изменению оптических свойств, таких как двулучепреломление, оптическая активность, пропускание и др.



О самих жидких кристаллах, являющимися по своей сути «кентаврами природы», написано множество книг и опубликовано тысячи научных работ. Однако значительно меньше известно об ориентационных свойствах ЖК, а именно, как придать жидкому кристаллу те самые анизотропные свойства, поэтому задачи, связанные с реализацией начального упорядоченного состояния ЖК-материалов, весьма актуальны.

В общем случае для создания однородной ориентации ЖК-молекул необходимо обработать поверхность подложек (механическим или фотохимическим способом) таким образом, чтобы они, взаимодействуя с ЖК-материалом, ориентировали его в заданном направлении. Исторически первый, а также наиболее распространенный метод ориентирования жидких кристаллов – механическое натирание щеткой полимерной пленки. В результате на ней образуются микро-

скопические углубления, что легло в основу теории ориентации ЖК профилированной поверхностью. Оптик Д. В. Берреман [1] впервые вывел формулу, описывающую энергию сцепления молекул ЖК с поверхностью. Для задания граничных условий ориентации директора ЖК в последнее время успешно применяются ориентирующие материалы (полиамиды, фоточувствительные полимеры, азокрасители, азополимеры и др.) с наведенной поверхностной анизотропией.

В рамках модели Берремана ориентация ЖК определялась его упругими свойствами и профилем поверхности. На протяжении долгих лет не возникало сомнений в справедливости данной модели. Однако попытки проверки в эксперименте корректности зависимости не увенчались успехом, поскольку полученные результаты значительно отличались от теоретических данных. Более того, изобретение и успешное внедрение в практику новых

фотоориентирующих материалов вновь озадачило последователей теории Берремана. Дело в том, что после облучения поляризованным светом слой фоточувствительного красителя сохранял неизменным профиль поверхности и приобретал способность ориентировать ЖК. Стало очевидным, что упомянутая модель не учитывает некоторые фундаментальные взаимодействия, существующие между ориентирующим материалом и ЖК. На решение этой задачи потребовалось более 40 лет интенсивных исследований, в результате которых было установлено, что именно электростатические, а если быть более точными, диполь-дипольные взаимодействия между молекулами ориентирующего материала и молекулами ЖК заставляют последние располагаться на гладкой поверхности определенным образом [2]. В формуле, описывающей энергию взаимодействия, появились параметры, относящиеся как к свойствам

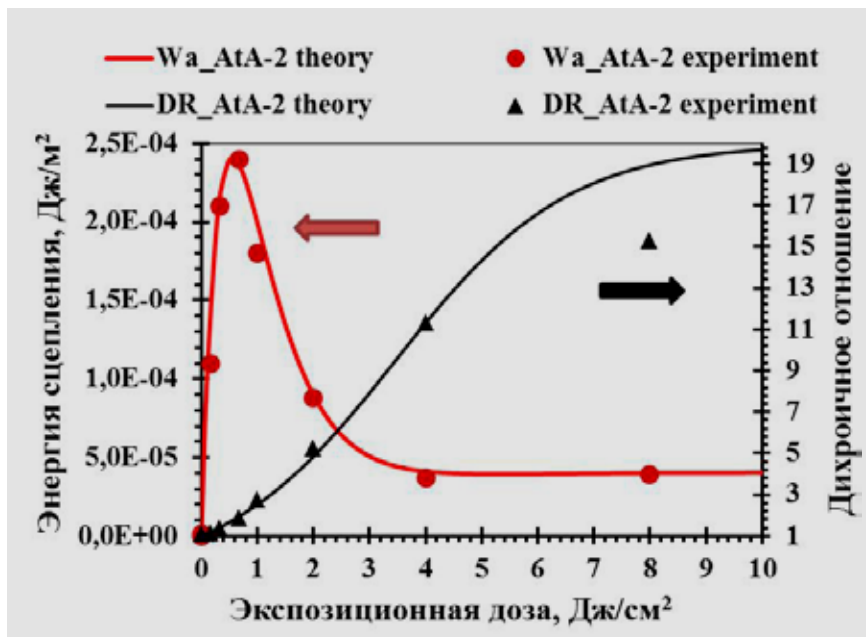


Рис. 1. Теоретические и экспериментальные зависимости энергии сцепления и дихроичного отношения пленки нового азокрасителя AtA-2 от величины экспозиционной дозы

материала (дипольные моменты), так и отражающие их упорядоченность в слое (ориентирующего материала и ЖК) – ориентационные параметры порядка. Таким образом, ориентирующие свойства определяются не только материалом ориетанта, но и составом ЖК-смеси. Впервые уточненный вид зависимости удалось получить в 2017 г. коллективу сотрудников лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств» Института химии новых материалов НАН Беларуси. На сегодняшний день она является наиболее точной [3].

Предложенная модель позволила получить корректные представления о том, что важно для разработки новых ориентирующих материалов. Группа ученых ИХНМ НАН Беларуси синтезировала и исследовала азокраситель AtA-2, характеризующийся уникальным механизмом ориентации и обладающий особыми свойствами. Суть нового механизма

заключается в учете электростатических полей, существующих в любом веществе. Если вещество состоит из анизотропных частиц, обладающих дипольными моментами, то и поле внутри него является анизотропным. Каждая молекула создает индивидуальное поле вокруг себя, при этом электростатические поля большого числа молекул складываются, компенсируя друг друга, в итоге получается усредненное поле, которое принято называть «средним полем» в веществе. Как оказалось, это поле может взаимодействовать не только с молекулами внутри вещества, но и с молекулами, находящимися за пределами, например в близлежащем слое. Таким образом, возникает понятие дырочного диполя, которое представляет среднее поле окружающих молекул, связанных между собой. Зависимость изменения энергии сцепления от времени облучения поляризованным светом приобрела более сложный вид.

Проверка формулы [3] продемонстрировала хорошее совпадение теоретических и экспериментальных результатов (рис. 1).

Синтезированные фоточувствительные материалы, работающие по новому механизму фотоориентации, характеризуются высокой энергией сцепления, не требуют больших доз облучения и обладают малой оптической анизотропией – это все, что нужно для создания нового класса фотонных устройств.

Основная цель синтеза и исследования новых ориентирующих материалов – разработка элементов и устройств на основе ЖК с расширенными уникальными функциональными характеристиками.

Научно-технический потенциал ЖК-материалов все еще не раскрыт полностью, что выражается в стремительном развитии многогранных областей приложения данных материалов. Так, из широкого спектра направлений практического использования ЖК выделяют три главные: дисплеи, недисплейные оптические устройства и регистрирующие среды. ЖК-дисплеи уже заняли свое место в системах отображения информации, практически заменив все другие устройства. Новые возможности для массового производства дают недисплейные варианты применения ЖК, что обусловлено миниатюрностью элементов и устройств, низким потреблением мощности, высокой надежностью из-за отсутствия движущихся частей, отличными оптическими параметрами в большом диапазоне длин волн, а также низкой стоимостью. При этом повышенное внимание уделяется разработке оптических ЖК-переключателей, поскольку такого рода элементы реализуют непосредственное управление светом, без

промежуточного преобразования сигнала в электронный вид.

Многие научные группы активно исследуют оптические жидкокристаллические волноводы [4–6]. Использование ЖК в области сердцевины (или оболочки) волновода позволяет осуществить модуляцию и переключение световых потоков на основе электрооптического и (или) нелинейно-оптического эффектов. Переориентация директора ЖК приводит к значительным изменениям оптических свойств ЖК-материалов благодаря большой величине двулучепреломления, что дает возможность реализовать режимы полного внутреннего отражения и волноводного распространения, переключения, модуляции световых пучков в направляющих ЖК-структурах. Волноводные свойства фотонных устройств на базе ЖК легко регулируются на этапе изготовления и впоследствии динамически настраиваются при помощи внешних электрических полей. Важно отметить, что рост коммерческой доступности ЖК-материалов наряду с наличием огромного числа смесей с улучшенными оптическими и механическими характеристиками позволяет реализовывать на практике функциональные конкурентоспособные ЖК-устройства, отвечающие заданным требованиям.

В 2014–2020 гг. на кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ на основе высокочувствительных ориентирующих материалов, созданных в Институте химии новых материалов НАН Беларуси, разработаны многочисленные методики изготовления электрически переключаемых планарных ЖК-элементов, исследованы особенности управления пространственно-поляризационными характеристиками световых пучков двухдомен-

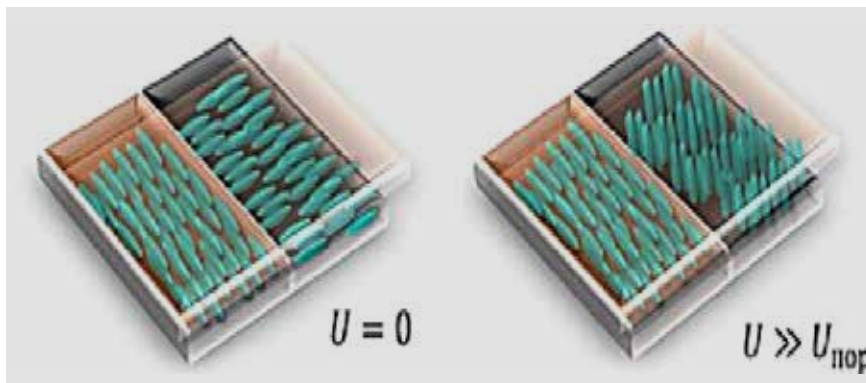


Рис. 2. Схема двухдоменного ЖК-переключателя с ортогональной ориентацией директора, функционирующего на основе эффекта полного внутреннего отражения

ными (различающимися начальной ориентацией молекул) ЖК-переключателями. Принцип функционирования таких элементов основывается на полном внутреннем отражении световой волны от границы раздела областей ЖК с ортогональной ориентацией директора. Поскольку ЖК-среда является анизотропной, то в ней в общем случае возникают две волны с ортогональными направлениями вектора поляризации, скорость распространения света в которых определяется различными показателями преломления. В области ЖК-слоя, где направление директора ЖК совпадает с электрическим вектором световой волны, возбуждается необыкновенная волна, а область характеризуется

показателем преломления n_e ; если же директор перпендикулярен, то волна будет обыкновенной, и ЖК-слой характеризуется показателем преломления n_o . Для реализации эффекта полного внутреннего отражения были изготовлены ячейки трех типов, различающиеся начальной ориентацией директора и геометрией электродов [7–9]. Наиболее перспективен двухдоменный переключатель, осуществляющий как поляризационное разделение, так и переключение лазерных пучков (рис. 2).

На рис. 3 проиллюстрирован эксперимент – работа двухдоменного ЖК-элемента, реализующего переключение направлений распространения световых пучков с ортогональными

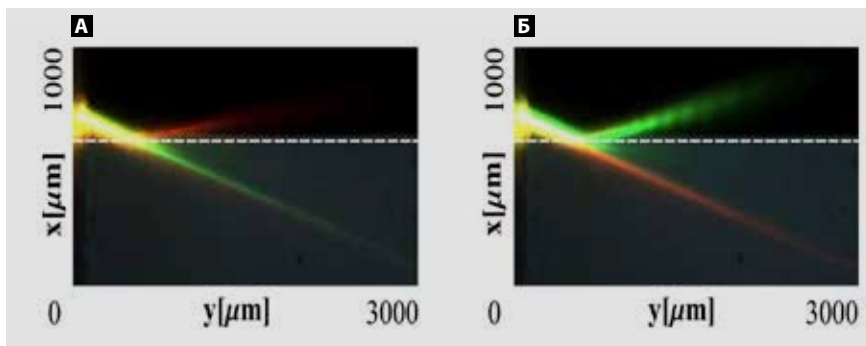


Рис. 3. Фотографии распространения излучения гелий-неонового лазера (632,8 нм) и второй гармоники лазера на иттрий-алюминиевом гранате (532 нм) в двухдоменном ЖК-переключателе: А – $U=0$ В; Б – $U > U_{пор}$

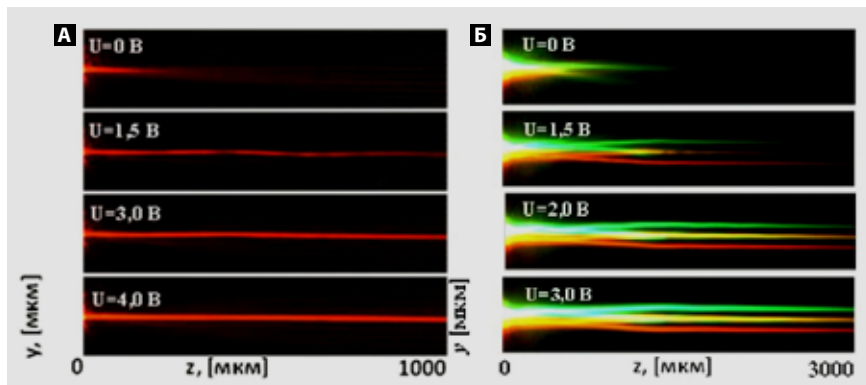


Рис. 4. Пространственное управление световыми пучками электрически переключаемой волноводной ЖК-структурой: микрофотографии электрического управления волноводным режимом (А) и реализация волноводного распространения лазерного излучения в режиме деления и суммирования оптических пучков (Б)

линейными поляризациями. При подаче электрического напряжения выше порогового ($U > U_{пор}$) красный и зеленый лучи меняются местами.

На основе эффекта полного внутреннего отражения разработаны электрически переключаемые волноводные ЖК-структуры, реализующие пространственно-поляризационное управление световыми пучками [10]. Тонкопленочные ЖК-элементы указанного типа составляют основу многих оптоэлектронных и интегрально-оптических устройств. Периодическое (волноводное) распределение показателя преломления в ЖК-слое создавалось посредством приложения к планарно-ориентированной ЖК-ячейке внешнего пространственно-модулированного электрического поля. Для создания такого поля обычно используются тек-

стированные токопроводящие слои, нанесенные согласно определенному узору на подложку ЖК-ячейки. Выбор узора токопроводящего слоя определяет вид пространственной модуляции напряженности внешнего электрического поля, приложенного к ЖК-слою.

На рис. 4 приведены фотографии эксперимента, демонстрирующие электрическое управление волноводным режимом. Видно, что включение электрического поля позволяет реализовать режим волноводного распространения света (рис. 4, А), а использование двух сигналов на разных длинах волн (зеленая и красная область спектра) в режиме оптического сумматора (рис. 4, Б) – получить на выходе световые пучки трех цветов (зеленый, желтый, красный).

Заметим, что разработанные электрически управляемые вол-

новодные ЖК-элементы характеризуются низкими управляющими напряжениями (несколько вольт) и обеспечивают пространственное управление световыми пучками, в частности, реализуют функции делителя и сумматора оптических сигналов.

На кафедре лазерной физики и спектроскопии БГУ ведутся работы по созданию пространственных микроструктурированных электрически управляемых ЖК-элементов. Они позволяют генерировать световые пучки со сложной топологией поляризации (например, радиальной или азимутальной) (рис. 5), а также формировать сингулярные световые пучки (оптические вихри), волновой фронт которых трансформируется в винтовую поверхность – гелекоид [11].

Данные световые пучки имеют большие перспективы использования как в фундаментальных исследованиях, так и в различных технических приложениях, включая оптическое манипулирование микро-, нано- и биообъектами. По своей сути такие элементы представляют собой жидкокристаллические двулучепреломляющие пластинки с неоднородно структурированным распределением локальной оптической оси в поперечной плоскости ЖК-ячейки.

Из-за неоднозначности состояния поляризации и/или фазы рассматриваемые пучки имеют характерные провалы интенсивности в своем сечении (поляризационные, или фазовые сингулярности). На рис. 6 представлены фотографии сечений световых пучков с различным количеством оптических вихрей, реализуемых на созданных элементах, и результаты их интерференционного сложения с плоской световой волной.

Заметим, что созданные малогабаритные элементы управле-

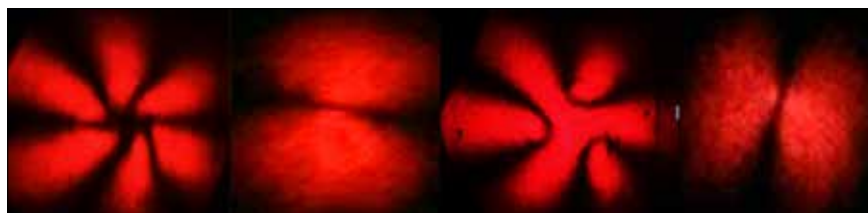


Рис. 5. Топологии поляризации света, прошедшего через микроструктурированные ЖК-элементы

ния фазой и поляризацией световых пучков дают возможность ввести новые информационные параметры – топологический заряд и поляризацию излучения. Сочетание указанных параметров позволяет на новых принципах осуществлять кодирование информации, что перспективно для использования как в волоконно-оптических системах для увеличения объема передаваемой информации, так и для защиты от подделки ценных бумаг и документов.

Таким образом, электрически управляемые пространственно-структурированные ЖК-элементы на основе нового светочувствительного ориентирующего материала – азокрасителя AtA-2 демонстрируют существенное разнообразие сферы использования ЖК в системах управления световыми пучками и формирования полей с заданной фазово-поляризационной структурой. Экспериментально реализован эффект полного внутреннего отражения линейно-поляризованного лазерного излучения на электрически управляемой рефрактивной ЖК-границе, что позволило не только осуществить поляризационное разделение и переключение световых пучков, но и разработать топологии ориентации директора, обеспечивающие контролируемый режим волноводного распространения лазерного излучения. Практический интерес представляют электрически управляемые волноводные ЖК-элементы для интегрально-оптических схем, осуществляющие передачу оптических сигналов по волноводным каналам и реализующие режимы оптического делителя и сумматора. Новое направление исследований связано с разработкой радиально симметричных элек-

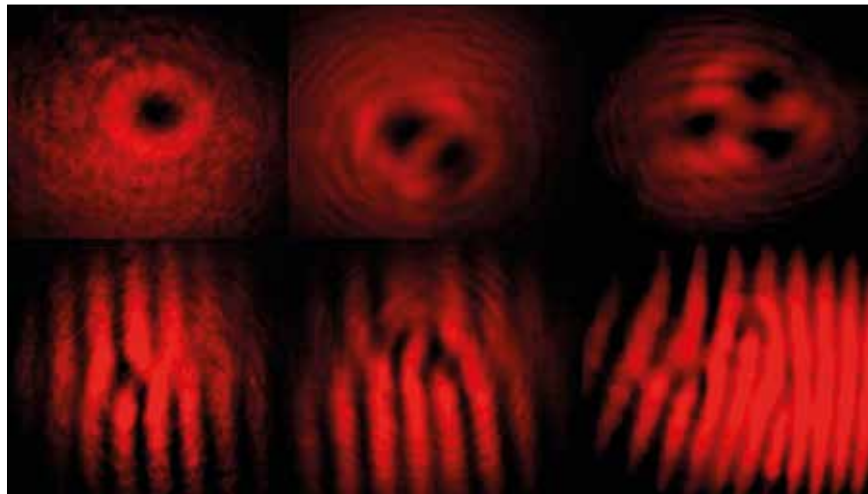


Рис. 6. Фотографии сечений световых пучков с различным количеством оптических вихрей и результаты интерференционного сложения оптических вихрей с плоской световой волной

трически управляемых ЖК-элементов, выполняющих поляризационно-фазовое преобразование световых полей. Полученные результаты перспективны для применения в области создания электрически переключаемых

интегрально-оптических и фотонных устройств управления лазерным излучением, а также ЖК-элементов, формирующих сингулярные световые пучки, и их использования для кодирования оптической информации. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Berremen D.W. Solid Surface Shape and the Alignment of an Adjacent Nematic Liquid Crystal // *Phys. Rev. Lett.* 1972. 28. P. 1683–1686.
- Murauski A. Surface and Liquid Crystal Interlayer Interactions: Characterizations and Applications. – Saarbrücken, 2009.
- Muravsky A.A., Murauski A.A., Kukhta I.N. Photoinduced hole dipoles' mechanism of liquid crystal photoalignment // *Applied Optics.* 2020. 59(17). P. 5102–5107.
- Zografopoulos D.C. [et al.]. Guided-wave liquid-crystal photonics // *Lab Chip.* 2012. 12(19). P. 3598–3610.
- Davis S.R. [et al.]. Liquid Crystal Waveguides: New Devices Enabled by > 1000 Waves of Optical Phase Control // *Proc. SPIE.* 2010. 7618: Emerging Liquid Crystal Technologies V, San Francisco. P. 76180E.
- Rutkowska K.A. [et al.]. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photopolymerization of nematic liquid crystals // *Opto-Electronics Review.* 2017. 25. P. 118–126.
- Komar A.A. [et al.]. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface // *Applied Optics.* 2015. 54. P. 5130–5135.
- Melnikova E.A. [et al.]. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals // *Applied Optics.* 2016. 55. P. 6491–6495.
- Rushnova I.I. [et al.]. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave // *Optics Communications.* 2018. 413. P. 179–183.
- Rushnova I.I. [et al.]. Integrated-optical nematic liquid crystal switches: designing and operation features // *Nonlinear Phenomena in Complex Systems.* 2018. 21. P. 206–219.
- Толстик А.Л. [и др.]. Фазово-поляризационные преобразования световых пучков динамическими голограммами и жидкокристаллическими элементами // VIII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. научн. тр. 23–25 января 2019, Москва. – 2019. С.161–162.