Физика лазеров

Laser physics

УДК 535.3;535-7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИ КОНТРОЛИРУЕМОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

И. И. РУШНОВА[1)]***, Е. А. МЕЛЬНИКОВА***[1)]

[1)]*Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь*

Продемонстрирована возможность создания двухдоменного жидкокристаллического элемента с планарной и гомеотропной ориентацией директора, позволяющего осуществлять режим пространственного смещения рефрактивной границы, индуцируемый электрическим полем. Показано, что смещение рефрактивной границы раздела в жидкокристаллической ячейке с фрагментарным токопроводящим слоем при воздействии на нее внешнего поля обеспечивает управляемый линейный сдвиг траектории, отраженной в условиях полного внутреннего отражения, световой волны. Представлена возможность контролируемого углового отклонения отраженной световой волны в нематическом жидкокристаллическом элементе при использовании токопроводящего слоя в форме дуги. Предложена модифицированная технология изготовления электрически контролируемых жидкокристаллических элементов для управления направлением распространения линейно-поляризованных световых пучков. Использование фотоориентируемой композитной структуры, состоящей из подслоя нейлона-6 и фотоориентируемого азокрасителя AtA-2, обеспечивает высокий параметр качества начальной ориентации директора жидкого кристалла в ячейках с фрагментарным токопроводящим слоем.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл; полное внутреннее отражение; электрически управляемая топология ориентации директора; коммутация; смещение рефрактивной границы; управляемое угловое отклонение света.

Образец цитирования:
Рушнова И. И., Мельникова Е. А. Электрически контролируемое распространение лазерного излучения на основе жидкокристаллических элементов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 41–50.

For citation:
Rushnova I. I., Melnikova E. A. Electrically controlled propagation of laser radiation based on liquid-crystal elements. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 41–50 (in Russ.).

Авторы:
Ирина Ивановна Рушнова – аспирантка кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – Е. А. Мельникова.
Елена Александровна Мельникова – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:
Iryna I. Rushnova, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.
rushnova@bsu.by
Elena A. Melnikova, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.
melnikova@bsu.by

Благодарность. Научно-исследовательская работа выполнена в рамках государственной программы научных исследований «Конвергенция» (задание 3.03.5 «Разработка материалов и технологий создания микроструктурированных жидкокристаллических элементов для фотонных приложений») (2016–2020) и научно-исследовательского проекта «Пространственно-поляризационное управление световыми полями в электрически контролируемых нематических жидкокристаллических ячейках с рефрактивной границей», осуществленного за счет средств республиканского бюджета, предусмотренных Министерством образования Республики Беларусь на выделение грантов (2017).

ELECTRICALLY CONTROLLED PROPAGATION OF LASER RADIATION BASED ON LIQUID-CRYSTAL ELEMENTS

***I. I. RUSHNOVA*[a], *E. A. MELNIKOVA*[a]**

[a]*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*
Corresponding author: I. I. Rushnova (rushnova@bsu.by)

The possibility of creating a two domain liquid crystal element with a planar and homeotropic orientation of the director allowing realization of spatial displacement of the refractive boundary induced by an electric field is demonstrated. Displacement of the refractive interface under the action of an external field in the LC cell with a fragmentary conductive layer provides a controlled linear shift of the light wave trajectory reflected in the conditions of the total internal reflection. The possibility of a controlled angular deflection of a reflected light wave in an NLC element using a conductive layer with the form of an arc is presented. The modified technology to fabricate electrically controlled liquid crystal elements for routing of a polarized light wave is proposed. Application of a photoalignment composite structure comprising two sublayers of nylon-6 and AtA-2 photoalignment azo dye offers high alignment quality value of liquid crystal initial director orientation in cells with a fragmentary conductive layer.

Key words: nematic liquid crystal; total internal reflection; electrically controlled topology of director orientation; commutation; translation of refractive interface; controlled angular light deflection.

Acknowledgements. The research work was supported by the Belarusian State Program of Scientific Investigations «Convergence» (task 3.03.5 «Development of materials and technologies for the creation of microstructured liquid crystal elements for photonic applications») (2016–2020) and implemented within the research project «Spatial polarization operation of light fields in electrically controlled nematic LC cells with a refractive boundary», executed at the expense of the republican budget provided by the Ministry of Education of the Republic of Belarus to allocate grants (2017).

Одним из наиболее динамично развивающихся направлений современного оптического приборостроения является разработка фотонных жидкокристаллических (ЖК) элементов для управления параметрами оптического излучения. Выбор жидких кристаллов в качестве функциональной среды обусловлен главным образом высокой величиной двулучепреломления (~ 0,1–0,4) и возможностью управления ею посредством малых внешних напряжений (1–10 В) [1]. В настоящее время на основе жидких кристаллов созданы разнообразные системы отображения информации, пространственно-временные модуляторы света, дифракционные элементы, световые затворы, фильтры, оптические дефлекторы и многие другие устройства [2; 3]. Большинство ЖК-элементов работают с поляризованным излучением, однако активно исследуются ЖК-структуры, контролирующие параметры неполяризованного излучения [4]. Массово производятся пассивные ЖК-компоненты для волоконно-оптических систем связи, которые успешно конкурируют с микроэлектромеханическими, термооптическими, оптомеханическими и акустооптическими аналогами [5].

Широкая практическая область применения стимулирует процессы разработки оригинальных электрически контролируемых ЖК-устройств и систем с улучшенными параметрами и новыми возможностями по управлению оптическими характеристиками. В последнее время стала востребованной схема использования планарных ЖК-ячеек, в которой световое поле распространяется внутри ЖК-слоя вдоль подложек, в отличие от стандартной оптической схемы, где световые пучки направляются перпендикулярно подложкам. Исследуются прототипы фотонных ЖК-компонентов со сложной оптической анизотропией и полностью оптических переключателей, которые не требуют оптоэлектронного преобразования сигнала [6]. Принцип работы таких ЖК-устройств основывается на эффекте преломления и отражения световой волны, распространяющейся в плоскости ЖК-слоя, на границе раздела двух областей жидкого кристалла с различающимися ориентациями директора.

Анализ комбинаций ориентаций директора нематического жидкого кристалла (НЖК) в двухдоменной ячейке позволил определить конфигурации, оптимальные для реализации эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) линейно-поляризованных световых пучков [7]. Планарная, взаимно перпендикулярная топология ориентации ЖК-молекул, а также планарная и гомеотропная ориентации в смежных областях элемента позволили осуществить как разделение ортогонально-поляризованных световых пучков на границе двух направлений директора, так и переключение их траектории распространения. Используемая в работах [7; 8] технология изготовления ЖК-элементов продемонстрировала реализацию эффекта поляризационного разделения, но не позволила обеспечить низкий уровень перекрестных помех. Создание эффективных, надежных и недорогих оптических ЖК-элементов для управления световыми потоками сопряжено с оптимизацией имеющихся и развитием новых ЖК-технологий.

Цель настоящего исследования – разработка ЖК-элементов, выполняющих функции пространственного управления направлением движения света. На основе модифицированной технологии изготовления ЖК-элементов, отличием которой является использование композитной фотоориентируемой структуры, созданы жидкокристаллические элементы с рефрактивной границей, осуществляющие электрически контролируемое смещение и угловое отклонение линейно-поляризованной световой волны. Принцип действия устройств основан на эффекте ПВО поляризованного излучения от динамической границы раздела двух областей НЖК с различной ориентацией директора молекул жидкого кристалла.

Схема разработанных и исследуемых ЖК-элементов представляет собой стандартную ячейку типа сэндвича. Отличительной особенностью первого ЖК-элемента (рис. 1, *а*), выполняющего функцию электрически управляемого смещения излучения, является наличие на одной из подложек прямоугольного фрагментарного электропроводящего слоя из хрома с коэффициентом заполнения поверхности, равным $\frac{1}{2}$, что дает возможность создания двух областей с разной ориентацией директора **n**. Характерная черта второго ЖК-элемента (см. рис. 1, *б*), используемого для контролируемого углового отклонения света, – применение электропроводящего покрытия в форме дуги на нижней подложке. Для создания структурированного электрода, заполняющего часть поверхности подложки, использовался метод фотолитографии.

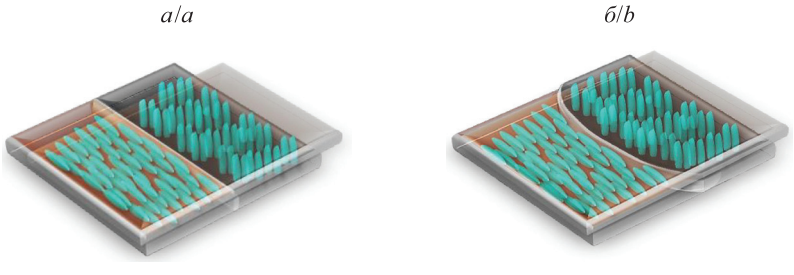


Рис. 1. Структурная схема ЖК-ячеек:
а – с прямоугольным фрагментарным электродом;
б – с дугообразным электродом

Fig. 1. Structure of a LC cells:
a – with a rectangular partial electrode;
b – with an arc-shaped electrode

Рефрактивная граница в нематическом жидкокристаллическом слое формировалась путем задания планарной и гомеотропной ориентаций директора в двухдоменном образце. Области с таким направлением молекул характеризуются разными показателями преломления для линейно-поляризованного света. Выбранная топология ориентации директора в ЖК-ячейке генерировалась под действием внешнего электрического поля. Поскольку в электрическом поле, способном преодолеть силы упругости, происходит переориентация молекул жидкого кристалла вдоль направления вектора напряженности [9], то при подаче на ячейку с фрагментарным токопроводящим слоем напряжения выше порогового в половине образца, где на нижней подложке нанесен непрозрачный электрод из хрома, молекулы жидкого кристалла начинают отклоняться в направлении вертикальной оси. В смежной половине ячейки, где на нижней пластине электропроводящий слой отсутствует, разности потенциалов не создается и ориентация директора не изменяется.

Задание начальной планарной ориентации молекул нематического жидкого кристалла осуществлялось при помощи бесконтактного метода фотоориентации [10]. В качестве ориентирующего материала

был выбран азокраситель AtA-2, синтезированный в Институте химии новых материалов НАН Беларуси, который отличается высокой азимутальной энергией сцепления ($>1 \cdot 10^{-4}$ Дж/м^2), термо- и фотостабильностью [11]. Ориентация молекул азокрасителя AtA-2 происходила под действием поляризованного излучения светодиодного источника на длине волны $\lambda = 457$ нм. Использование излучения в видимой области спектра дает возможность засвечивать собранные ЖК-ячейки со стеклянными подложками с обеих сторон, что упрощает и удешевляет технологию производства фотонных ЖК-элементов.

При изготовлении ЖК-устройств такого рода следует принимать во внимание тот факт, что формирование рисунка из электропроводящего материала сопровождается потерей однородности поверхности подложки и при травлении на границе электрода возникают острые выступы, которые препятствуют нанесению тонких (20–100 нм) пленок ориентанта. Применение стандартной технологии изготовления ЖК-ячеек определяет низкий параметр качества собранных экспериментальных образцов, что обусловливает высокий уровень потерь при распространении световых пучков [7; 8]. Для повышения качества начальной ориентации молекул жидкого кристалла была выбрана оригинальная технология, основанная на использовании композитной структуры, состоящей из нейлона-6 и фотоориентируемого азокрасителя AtA-2 [12]. Схема процесса изготовления ЖК-ячеек включала несколько этапов, представленных на рис. 2.

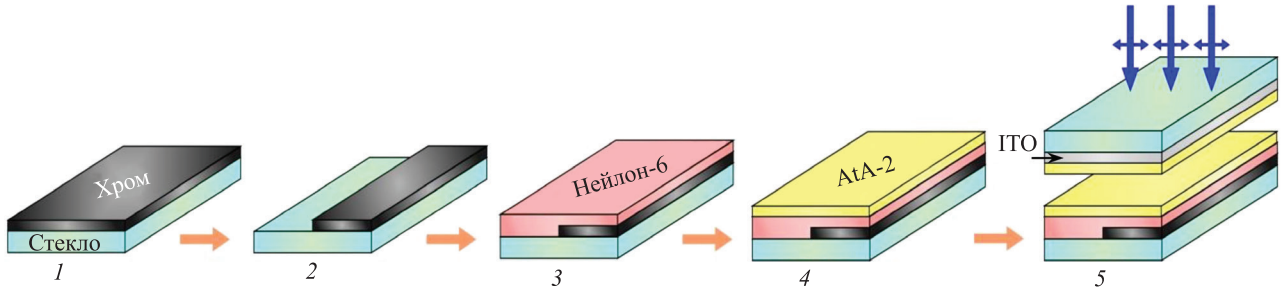


Рис. 2. Схема процесса изготовления ЖК-ячеек со структурированным электродом:
1 – нанесение хрома; *2* – фотолитография по хрому; *3* – нанесение и отжиг нейлона-6;
4 – нанесение и отжиг фотоориентанта AtA-2; *5* – сборка ячейки и фотоориентация; ITO – оксид индия и олова

Fig. 2. Process flow of fabrication of the LC cells with structured electrode:
1 – chromium deposition; *2* – photolithography over chromium; *3* – nylon-6 deposition and baking;
4 – AtA-2 film deposition and baking; *5* – cell assembling and photoalignment; ITO – indium tin oxide

Стеклянная пластина с непрозрачным электропроводящим слоем из хрома использовалась в качестве нижней подложки. Сначала выполнялось частичное травление слоя электрода методом фотолитографии. Затем на поверхность с рисунком по хрому наносился слой нейлона-6, который отжигался при температуре T, составляющей 180 °С, в течение времени t, равного 60 мин. Однородная тонкая пленка нейлона ($\approx$50 нм) сглаживала выступы, образованные на границе электрода, и способствовала планаризации поверхности образца. Тонкая пленка фотоориентируемого азокрасителя AtA-2 ($\approx$30 нм) после нанесения на подслой нейлона-6 отжигалась при температуре 140 °С в течение 5 мин. Изготовление верхней подложки включало стандартную технологию нанесения ориентирующего материала на пластину с прозрачным электропроводящим слоем из оксида индия и олова и отжиг образца. Собранная ячейка облучалась линейно-поляризованным излучением с интенсивностью светового потока I, равной 15 мВт/см^2, в течение 20 с, что обеспечило однородную планарную ориентацию ЖК-молекул. В работе использовался нематический жидкий кристалл ЖК-1289 (разработка Научно-исследовательского института органических полупродуктов и красителей, Москва) с анизотропией показателя преломления Δn, составляющей 0,156, на длине волны λ, равной 632,8 нм ($n_e = 1{,}687$, $n_o = 1{,}531$). Пороговое напряжение для переориентации директора жидких кристаллов $U_{пор}$ равно 1 В. Толщина ЖК-слоя в изготовленных элементах составила 20 мкм, что обеспечило возможность управления рефрактивной границей при напряжениях до 30 В.

Результат эксперимента иллюстрирует рис. 3, на котором представлены фотографии изготовленных ЖК-ячеек с фрагментарным электродом без подслоя нейлона-6 (см. рис. 3, *а*) и с подслоем нейлона-6 (см. рис. 3, *б*). Из экспериментальных фотографий видно, что в условиях отсутствия на поверхности подложки планаризующего слоя происходит неравномерное каплеобразное формирование пленки ориентанта, тогда как использование буферного слоя обеспечивает формирование пленки азокрасителя, которая отличается однородностью толщины и фотоориентационных свойств, оптической прозрачностью, а также демонстрирует повышенную фоточувствительность.

а/*a* *б*/*b*



Рис. 3. Фотографии ЖК-ячеек с фрагментарным электропроводящим слоем из хрома:
а – без подслоя нейлона-6; *б* – с подслоем нейлона-6

Fig. 3. Photos of the LC cells with a partial electrically conductive chromium layer:
a – without a nylon-6 sublayer; *b* – with a nylon-6 sublayer

Параметр качества начальной ориентации молекул жидкого кристалла в изготовленных образцах оценивался при помощи выражения

$$q = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}},$$

где $T_{\max}$ – коэффициент пропускания ЖК-образца в параллельных поляризаторах; $T_{\min}$ – коэффициент пропускания ЖК-образца в скрещенных поляризаторах. Измеренный таким образом параметр качества q изготовленных ЖК-ячеек без буферного подслоя и с подслоем нейлона-6 был разным ($q \le 0{,}930$ и $q = 0{,}996–0{,}998$) на длине волны λ, равной 632,8 нм. Таким образом, использование подслоя нейлона-6 в ячейках с фрагментарным токопроводящим слоем из хрома приводит к увеличению параметра качества начальной ориентации директора молекул нематического жидкого кристалла.

Схема распространения линейно-поляризованного излучения в электрически управляемых ЖК-ячейках с фрагментарным электропроводящим слоем представлена на рис. 4. В отсутствие электрического воздействия на ЖК-ячейку ($U = 0$ В) ориентация молекул в ЖК-слое однородная планарная и световые пучки движутся прямолинейно, независимо от поляризации (см. рис. 4, *а*). Когда на элемент подается внешнее электрическое поле ($U > U_{\text{пор}}$) и в ячейку вводится волна с вертикальной поляризацией, то в области падения (со стороны непрозрачного электрода) возбуждается необыкновенная волна с показателем преломления n_e, так как направление вектора поляризации **E** и направление директора **n** совпадают. В смежной области, где непрозрачный электрод отсутствует и переориентации молекул не происходит, возбуждается обыкновенная волна с показателем преломления n_o. Таким образом, вертикально поляризованная световая волна, распространяясь из области с бóльшим показателем преломления в область с меньшим показателем, при падении на границу под углом выше критического (кр), согласно формуле

$$\alpha_{\text{кр}} = \arcsin \frac{n_o}{n_e},$$

испытывает полное внутреннее отражение, как показано на рис. 4, *б*. Волна с горизонтальной поляризацией в области падения светового пучка характеризуется обыкновенным показателем преломления n_o, а в соседней области – эффективным показателем преломления, определяемым формулой

$$n_{\text{eff}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha}}.$$

Распространяясь из области с меньшим показателем преломления n_o в область с бóльшим показателем преломления n_{eff}, горизонтально поляризованная световая волна разделяется на границе раздела двух направлений директора на отраженную и преломленную волны, причем коэффициент отражения составляет не более 0,25 %.

Изображенная на рис. 5 схема экспериментальной установки использовалась для исследования особенностей распространения световых лучей в ЖК-ячейках с рефрактивной границей. Источником света служил гелий-неоновый лазер, генерирующий излучение на длине волны 632,8 нм. Применение набора светофильтров обеспечило возможность варьирования выходной интенсивности светового потока. С помощью полуволновой пластинки $\frac{\lambda}{2}$ изменялось направление колебаний вектора поляризации, причем интенсивность света не снижалась. Фокусирующий элемент – микрообъектив – использовался для обеспечения эффективности ввода лазерного излучения в ЖК-элемент. Исследуемый образец располагался на держателе, позволяющем осуществлять поворот образца на 360° и позиционирование по трем пространственным координатам с точностью до 5 мкм. На ЖК-ячейку при помощи генератора

периодического переменного напряжения с усилительным блоком подавался прямоугольный сигнал (меандр) с амплитудой напряжения до 30 В. Распространение электромагнитного излучения внутри ЖК-слоя регистрировалось по рассеянному на неоднородностях жидкого кристалла свету при помощи прибора с зарядовой связью (ПЗС) ПЗС-камеры, сопряженной с объективом.

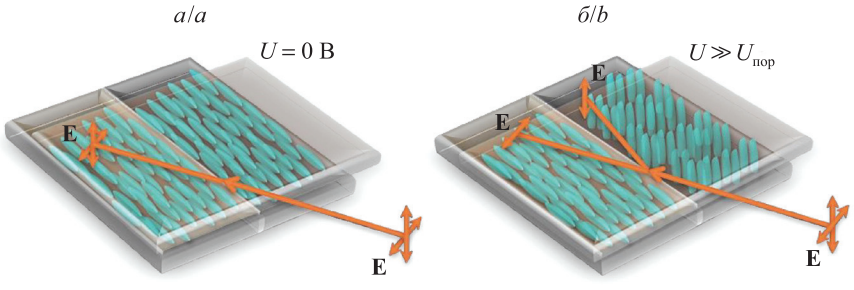


Рис. 4. Схема распространения линейно-поляризованных волн
в ЖК-ячейке с электрически индуцированной границей:
а – в отсутствие внешнего поля; *б* – при воздействии внешнего поля

Fig. 4. Schematic of the propagation of polarized waves
in the LC cell with electrically induced boundary:
a – in the absence of a field; *b* – under the influence of an external field

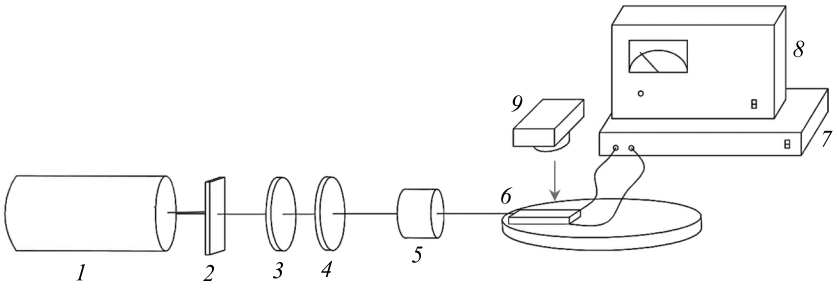


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для наблюдения распространения излучения в ЖК-ячейках:
1 – гелий-неоновый лазер; *2* – светофильтр; *3* – поляризатор; *4* – полуволновая пластинка $\frac{\lambda}{2}$;
5 – микрообъектив; *6* – ЖК-ячейка; *7* – генератор прямоугольных импульсов; *8* – усилительный блок;
9 – ПЗС-камера, сопряженная с микрообъективом

Fig. 5. Experimental setup for observation of radiation propagation in LC cells:
1 – helium-neon laser; *2* – attenuation filter; *3* – polarizer; *4* – half-wave plate $\frac{\lambda}{2}$; *5* – micro objective; *6* – LC cell;
7 – square pulses generator; *8* – amplifying unit; *9* – CCD camera with micro objective

Сфокусированное при помощи микрообъектива с 10-кратным увеличением линейно-поляризованное излучение гелий-неонового лазера с мощностью светового потока P, составляющей 300 мкВт (диаметр пучка в перетяжке $d = 16$ мкм), вводилось в торец ЖК-элементов под углом падения к рефрактивной границе α, равным 80°, который больше критического угла для ПВО. На рис. 6 проиллюстрированы картины распространения лазерного излучения в ЖК-ячейке в зависимости от поляризации падающего излучения и амплитуды напряжения. Приблизительное положение границы двух ориентаций директора отмечено на экспериментальных фотографиях белой пунктирной линией.

Полученные экспериментальные результаты демонстрируют, что в ЖК-ячейке с фрагментарным электропроводящим слоем при отсутствии электрического воздействия на элемент световые пучки распространяются прямолинейно, независимо от поляризации (см. рис. 6, *а*, *б*), так как ориентация молекул в ЖК-слое однородная планарная. При включении внешнего электрического поля в ЖК-слое индуцируется граница ортогональных направлений молекул нематического жидкого кристалла и реализуется полное внутреннее отражение волны с вертикальной поляризацией (см. рис. 6, *в*), тогда как волна с горизонтальной поляризацией проходит через границу, преломившись (см. рис. 6, *г*). Для угла падения α, равного 80°, угол преломления β составил 79,1°. Для выбранной геометрии ориентации директора согласно формулам Френеля коэффициент отражения достигает не более 0,15 %, что объясняет низкую интенсивность отраженной волны (см. рис. 6, *г*).

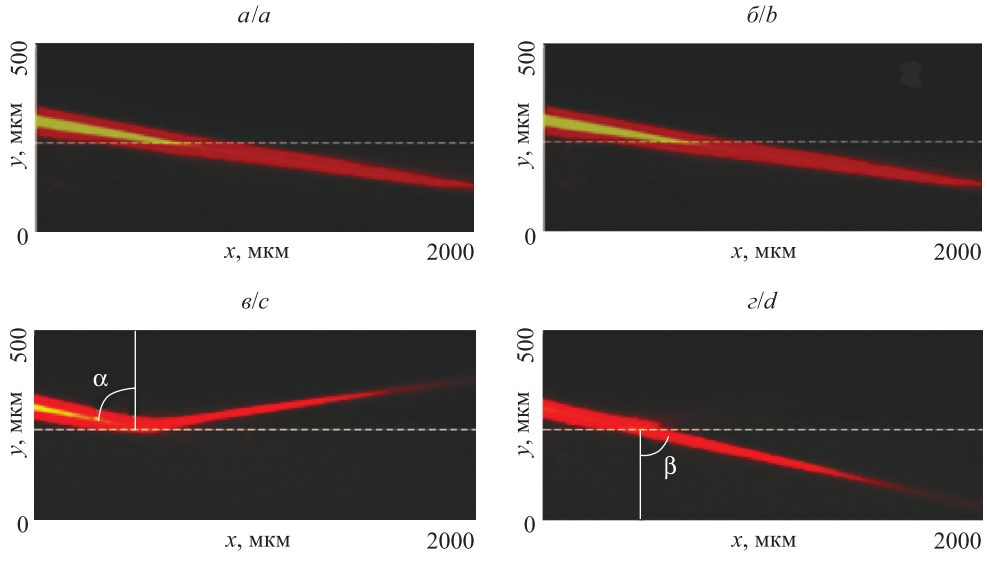


Рис. 6. Распространение линейно-поляризованных световых пучков
в электрически управляемой ЖК-ячейке с рефрактивной границей:
а – вертикально поляризованная волна, $U = 0$ В; *б* – горизонтально поляризованная волна, $U = 0$ В;
в – вертикально поляризованная волна, $U = 10\ U_{пор}$; *г* – горизонтально поляризованная волна, $U = 10\ U_{пор}$

Fig. 6. Propagation of the linearly polarized light beams
in the electrically controlled LC cell with refractive interface:
a – vertically polarized wave, $U = 0$ V; *b* – horizontally polarized wave, $U = 0$ V;
c – vertically polarized wave, $U = 10\ U_{tr}$; *d* – horizontally polarized wave, $U = 10\ U_{tr}$

Ранее было отмечено, что для формирования в двухдоменной ЖК-ячейке границы направления директора достаточно приложить напряжение, превышающее пороговое значение ($U > U_{пор}$). Увеличение амплитуды действующего на образец напряжения приводит к вертикальной ориентации директора в непрозрачной половине жидкокристаллического образца, а дальнейший рост напряжения – к выходу силовых линий напряженности электрического поля за границу токопроводящего слоя нижней подложки, что обеспечивает переориентацию молекул жидкого кристалла в смежной области, несмотря на отсутствие электрода. Исследование переориентации молекул жидкого кристалла с ростом амплитуды напряжения в окрестности электропроводящего слоя из хрома происходило в режиме фотографирования ячейки в скрещенных поляроидах, при этом вся система подсвечивалась галогеновой лампой.

На экспериментальных фотографиях смещения границы ортогональных ориентаций директора, представленных на рис. 7, белой пунктирной линией отмечен край стравленного непрозрачного электропроводящего слоя из хрома. На ЖК-ячейку подавалось напряжение с амплитудой до 30 В. Полученные фотографии демонстрируют, что с увеличением напряжения расширяется светлая зона в области без электрода и нарастает сдвиг дисклинации от края хрома. Светлая зона в окрестности электрода возникает вследствие переориентации молекул из планарного положения в гомеотропное. Сдвиг дисклинации в область ячейки без хрома демонстрирует, что с ростом амплитуды напряжения все большее количество молекул выстраиваются по полю согласно эффекту Фредерикса и происходит смещение границы гомеотропной и планарной ориентаций директора. Перемещенная дисклинация определяет положение новой границы ориентаций директора молекул жидкого кристалла.

Анализ экспериментальных фотографий, приведенных на рис. 7, показал, что с ростом амплитуды напряжения происходит линейный сдвиг границы ориентаций директора в область ячейки без электрода. График зависимости смещения границы Δy от напряжения U приведен на рис. 8, где экспериментальные данные представлены точками, а пунктирная прямая является линейной аппроксимацией экспериментальных результатов. Из графика видно, что увеличение амплитуды напряжения на 1 В приводит к смещению границы на 5–7 мкм.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 7, свидетельствуют о том, что чем выше амплитуда приложенного к ячейке напряжения, тем большее количество молекул жидкого кристалла переориентируются в гомеотропное положение в окрестности электропроводящего слоя и тем большее расстояние необходимо пройти вертикально поляризованному лучу, распространяющемуся вдоль ЖК-слоя под углом (выше критического) к границе двух ориентаций, прежде чем испытать ПВО от электрически индуцированной границы. В связи с проявлением эффекта смещения границы происходит пространственный сдвиг точки отражения вертикально поляризованного лазерного излучения в область ячейки, где электропроводящий слой был стравлен.

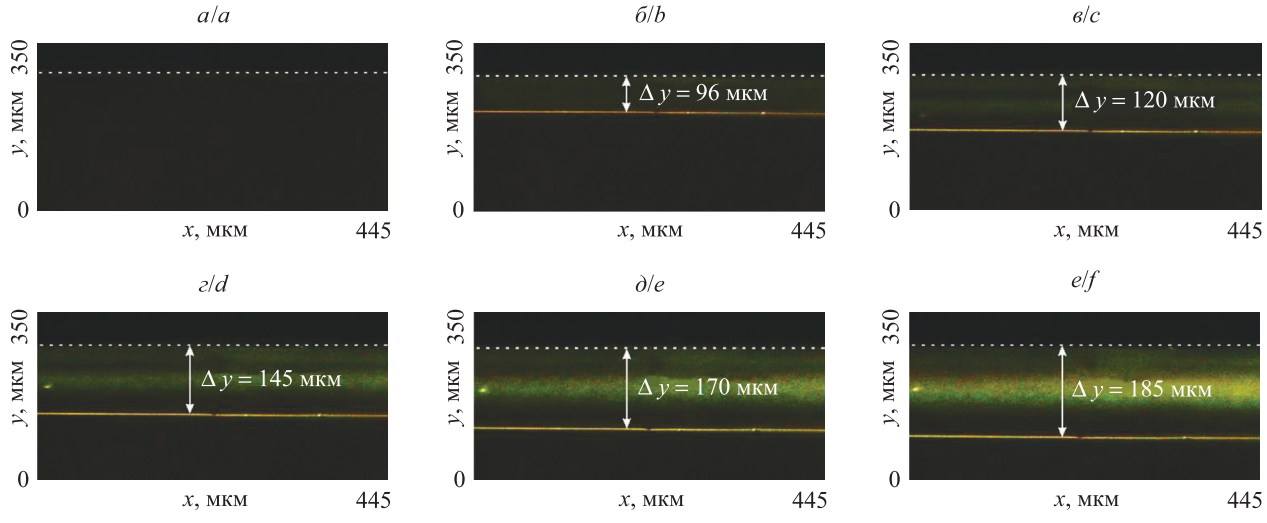


Рис. 7. Экспериментальные фотографии смещения рефрактивной границы с ростом внешнего электрического поля: $U = 0$ В (*а*); $U = 14$ В (*б*); $U = 18$ В (*в*); $U = 22$ В (*г*); $U = 26$ В (*д*); $U = 30$ В (*е*)

Fig. 7. Experimental photographs of the displacement of refractive boundary with an external electric field increase: $U = 0$ V (*a*); $U = 14$ V (*b*); $U = 18$ V (*c*); $U = 22$ V (*d*); $U = 26$ V (*e*); $U = 30$ V (*f*)

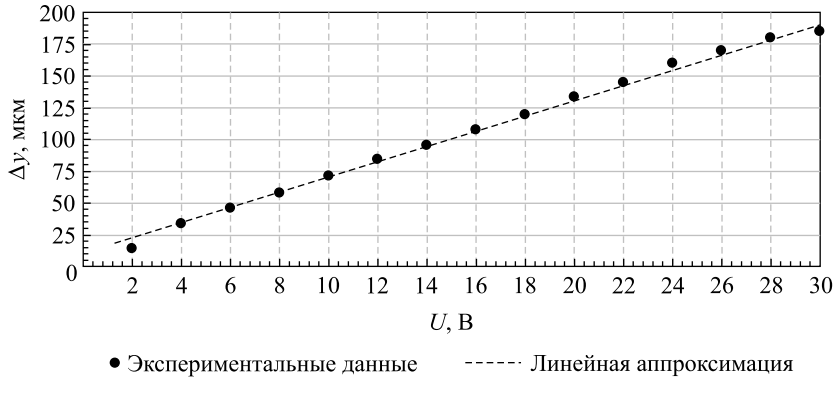


Рис. 8. График зависимости величины смещения границы двух ориентаций директора с ростом амплитуды напряжения

Fig. 8. The plot of the displacement of the boundary between two director orientations with increasing voltage amplitude

Пространственное смещение точки отражения волны определяет изменение траектории излучения, отраженного в условиях ПВО от рефрактивной границы таким образом, что наблюдается параллельный сдвиг волны в прозрачную область ячейки, как показано схематически на рис. 9, *а*. Картина распространения вертикально поляризованного излучения гелий-неонового лазера с мощностью светового потока P, составляющей 350 мкВт, при трех значениях амплитуды напряжения, полученная путем наложения экспериментальных фотографий, представлена на рис. 9, *б*. Распространение лазерного излучения в ЖК-слое регистрировалось при напряжениях U, равных 10; 20 и 30 В. Белой пунктирной линией на рис. 9, *б*, отмечен край непрозрачного электропроводящего слоя из хрома. Из экспериментальной фотографии, приведенной на рис. 9, *б*, видно, что в связи с проявлением эффекта смещения границы вертикально поляризованная волна с ростом амплитуды электрического поля проходит все большее расстояние, прежде чем выполняются условия для реализации эффекта ПВО.

Следует отметить, что при подаче на ЖК-ячейку напряжения 30 В происходит смещение точки отражения на расстояние 185 мкм в прозрачную область ячейки, в то время как толщина ЖК-слоя составляет всего 20 мкм.

Таким образом, в ЖК-ячейках с фрагментарным электропроводящим слоем в форме прямоугольника увеличение амплитуды прикладываемого поля приводит к параллельному смещению траектории луча, отраженного в условиях ПВО от границы двух ориентаций. Однако в настоящее время в производстве оптических переключателей актуальна задача выпуска дешевых и компактных устройств, способных

задавать и контролировать угловое распространение пучков. Разработка и изготовление электрически управляемого ЖК-элемента с фрагментарным электропроводящим слоем в форме дуги позволили осуществить не только контролируемое смещение отраженной волны с ростом напряжения, но и отклонение на заданный угол. Под действием внешнего электрического поля в таком ЖК-элементе происходит смещение границы ориентаций молекул жидкого кристалла в область ячейки без электрода на нижней подложке, причем граница при этом повторяет форму дуги, как показано на рис. 10, *а*. С ростом напряжения угол между касательной к границе и волновым вектором падающего светового луча будет изменяться, следовательно, угол между касательной к границе и волновым вектором отраженного луча также будет меняться.

В ходе выполнения работы был изготовлен ЖК-элемент с дугообразным токопроводящим слоем из хрома с радиусом кривизны 3 см. Вертикально поляризованное излучение гелий-неонового лазера с мощностью светового потока 300 мкВт вводилось в торец электрически контролируемого ЖК-элемента под углом падения α, равным 83°. На рис. 10, *б*, представлены экспериментальные результаты по распространению лазерного излучения в ЖК-слое в зависимости от величины приложенного напряжения. Из экспериментальной фотографии, полученной наложением трех независимых результатов, видно, что с увеличением амплитуды электрического поля луч гелий-неонового лазера смещается в часть ЖК-ячейки без хрома. При этом сумма углов падения и отражения составила 161° при амплитуде напряжения U, равной 10 В, при напряжении U, составляющем 20 В, сумма углов падения и отражения уменьшилась до 159,5°, а при напряжении 30 В она снизилась до 158°. Таким образом, вследствие дугообразной формы электрода (радиус кривизны R равен 3 см) смещение рефрактивной границы под действием

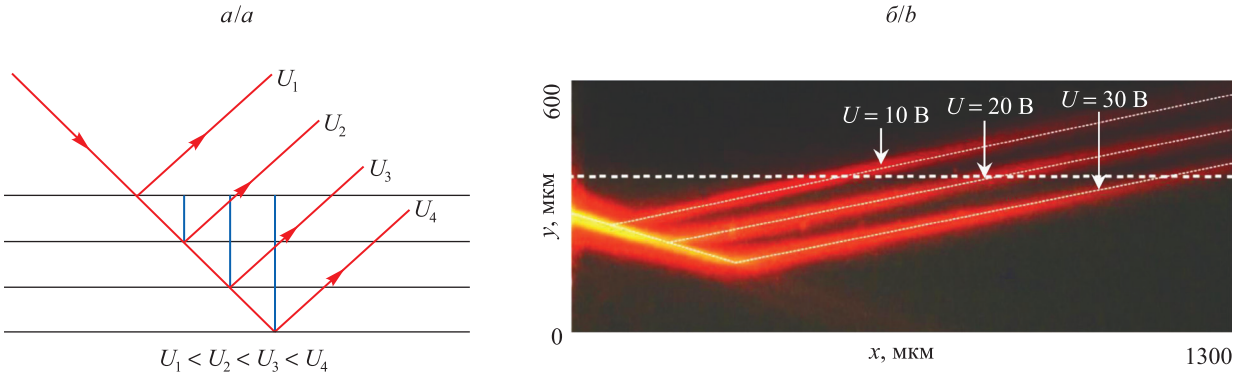


Рис. 9. Распространение вертикально поляризованного излучения в ЖК-ячейке с фрагментарным электродом в зависимости от амплитуды напряжения:
а – схематическое представление; *б* – экспериментальные результаты

Fig. 9. Propagation of the vertically polarized radiation in the LC cell with a partial electrode depending on the voltage amplitude:
a – schematic representation; *b* – experimental results

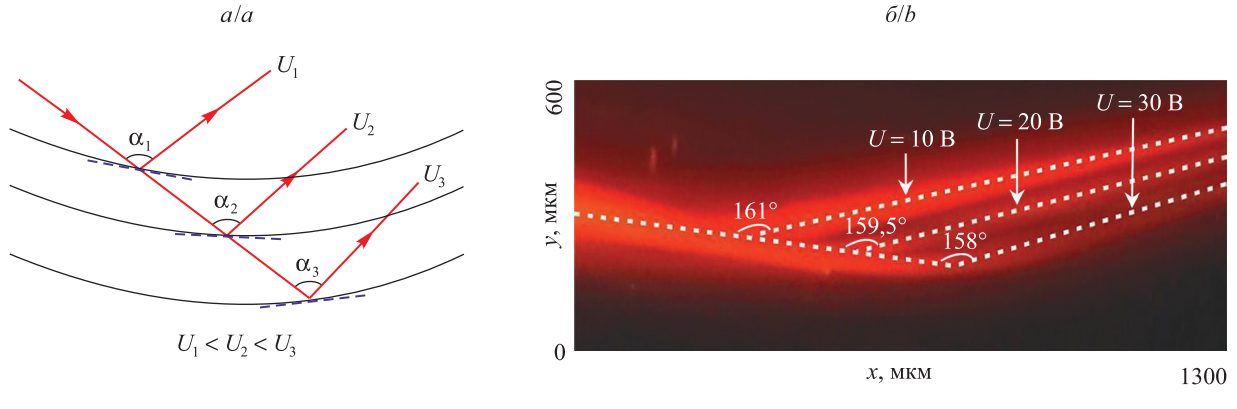


Рис. 10. Распространение вертикально поляризованной волны в ЖК-ячейке с дугообразной рефрактивной границей:
а – схематическое представление; *б* – экспериментальные результаты

Fig. 10. Propagation of the vertically polarized wave in an LC cell with an arc-shaped refractive boundary:
a – schematic representation; *b* – experimental results

электрического поля позволяет реализовать управляемое угловое отклонение отраженной световой волны порядка 0,075° на 1 В. Выбирая кривизну рефрактивной границы и используя эффект смещения границы ортогональных направлений молекул жидкого кристалла под действием внешнего электрического поля, можно осуществить пространственно-угловой контроль отраженной компоненты излучения.

Эффект смещения границы ортогональных ориентаций директора молекул жидкого кристалла с ростом амплитуды электрического поля, действующего на ЖК-образец, может лечь в основу изготовления ЖК-компонентов интегральной оптики, осуществляющих электрооптическое микросканирование электромагнитным излучением.

Таким образом, в настоящей работе продемонстрирована модифицированная технология фотоориентации жидких кристаллов в ячейках на основе композитной фотоориентируемой структуры, состоящей из нейлона-6 и азокрасителя AtA-2. Использование фрагментарного токопроводящего слоя и метода фотоориентации позволило создать электрически управляемые ЖК-элементы с границей раздела двух областей с ортогональными ориентациями директора и параметром качества ориентации q, равным 0,998. На основе предложенной технологии изготовлены электрически управляемые малогабаритные ЖК-устройства, которые осуществляют эффективное управление световыми полями, обеспечивая контролируемое смещение, а также угловое отклонение линейно-поляризованной световой волны.

Библиографические ссылки

1. *Томилин М. Г., Невская Г. Е.* Фотоника жидких кристаллов. СПб. : Издательство Политехнического университета, 2011.

2. *Chigrinov V. G.* Liquid Crystal Photonics: Engineering Tools, Techniques and Tables. New York : Nova Science Publishers, 2014.

3. *Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L.* Formation, Propagation, and Interaction of Nematicons // Nonlinear Phenom. Complex Syst. 2017. Vol. 20, № 1. P. 82–88.

4. *Beeckman J., Neyts K., Vanbrabant P.* Liquid-crystal photonic applications // Opt. Eng. 2011. Vol. 50, № 8. P. 08120201–0820217. DOI: 10.1117/1.3565046.

5. *Kwok H.-S., Naemura S., Ong H. L.* Progress in Liquid Crystal Science and Technology. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2013.

6. *Melnikova E. A., Tolstik A. L., Rushnova I. I., et al.* Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals // Appl. Opt. 2016. Vol. 55, № 23. P. 6491–6495. DOI: 10.1364/AO.55.006491.

7. *Komar A., Tolstik A., Melnikova E., et al.* Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface // Appl. Opt. 2015. Vol. 54, № 16. P. 5130–5135. DOI: 10.1364/AO.54.005130.

8. *Комар А. А., Курочкина М. А., Мельникова Е. А. и др.* Поляризационное разделение световых пучков на границе раздела двух мезофаз // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, № 15. С. 704–706. DOI: 10.1134/S1063785011080062.

9. *Blinov L. M.* Structure and Properties of Liquid Crystals. Dordrecht ; London : Springer, 2011.

10. *Chigrinov V., Kwok H.-S., Hasebe H., et al.* Liquid-crystal photoaligning by azo dyes // J. SID. 2008. Vol. 16, № 9. P. 897–904. DOI: 10.1889/1.2976648.

11. *Mikulich V. S., Murawski An. A., Muravsky Al. A., et al.* Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films // J. Appl. Spectrosc. 2016. Vol. 83, № 1. P. 115–120. DOI: 10.1007/s10812-016-0252-y.

12. *Rushnova I., Murauski An., Mikulich V., et al.* High anchoring composite photoalignment material with high photosensitivity // IDW/AD'16 : the 23th Int. Display Workshops (Fukuoka, 2–9 Dec., 2016). Fukuoka, 2016. P. 69–72.

References

1. Tomilin M. G., Nevskaya G. E. [Photonics of liquid crystals]. Saint Petersburg : Publishing house of Polytechnic University, 2011 (in Russ.).

2. Chigrinov V. G. Liquid Crystal Photonics: Engineering Tools, Techniques and Tables. New York : Nova Science Publishers, 2014.

3. Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L. Formation, Propagation, and Interaction of Nematicons. *Nonlinear Phenom. Complex Syst.* 2017. Vol. 20, No. 1. P. 82–88.

4. Beeckman J., Neyts K., Vanbrabant P. Liquid-crystal photonic applications. *Opt. Eng.* 2011. Vol. 50, No. 8. P. 08120201–0820217. DOI: 10.1117/1.3565046.

5. Kwok H.-S., Naemura S., Ong H. L. Progress in Liquid Crystal Science and Technology. Singapore : World Scientific Publishing Company, 2013.

6. Melnikova E. A., Tolstik A. L., Rushnova I. I., et al. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals. *Appl. Opt.* 2016. Vol. 55, No. 23. P. 6491–6495. DOI: 10.1364/AO.55.006491.

7. Komar A., Tolstik A., Melnikova E., et al. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, No. 16. P. 5130–5135. DOI: 10.1364/AO.54.005130.

8. Komar A. A., Kurochkina M. A., Melnikova E. A., et al. [Polarization separation of light beams at the interface of two mesophases]. *Pis'ma v zh. tekh. fiz.* [Tech. Phys. Lett.]. 2011. Vol. 37, No. 15. P. 704–706 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1063785011080062.

9. Blinov L. M. Structure and Properties of Liquid Crystals. Dordrecht ; London : Springer, 2011.

10. Chigrinov V., Kwok H.-S., Hasebe H., et al. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes. *J. SID.* 2008. Vol. 16, No. 9. P. 897–904. DOI: 10.1889/1.2976648.

11. Mikulich V. S., Murawski An. A., Muravsky Al. A., et al. Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films. *J. Appl. Spectrosc.* 2016. Vol. 83, No. 1. P. 115–120. DOI: 10.1007/s10812-016-0252-y.

12. Rushnova I., Murauski An., Mikulich V., et al. High anchoring composite photoalignment material with high photosensitivity. *IDW/AD'16* : the 23th Int. Display Workshops (Fukuoka, 2–9 Dec., 2016). Fukuoka, 2016. P. 69–72.

Статья поступила в редколлегию 28.09.2017.
Received by editorial board 28.09.2017.