

Трёхэлектродная жидкокристаллическая ячейка с линзоподобными свойствами

Ю. П. Вирченко¹ , А. А. Довганюк² , Д. Д. Мачукаев² , С. И. Кучеев² 

¹ Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова,
Белгород, 308012, Россия

² Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
Белгород, 308015, Россия

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Аннотация. В работе описывается трёхэлектродная жидкокристаллическая ячейка с плавающим изолированным от жидкокристаллического слоя электродом. Экспериментально показано, что в постоянных электрических полях переориентация нематического жидкого кристалла начинается в окрестности анода, при этом граница между исходной и переориентированной областями жидкого кристалла остается не размытой в широком диапазоне напряжений. Область переориентированного жидкого кристалла проявляет линзоподобные свойства с цилиндрической симметрией, причём местоположение этой области линейно зависит от величины напряжения. Максимальное отклонение фрагментов лазерного луча, которые являются результатом проявления линзовых свойств и интерференции, может варьироваться в диапазоне не менее пары десятков градусов от первоначального направления, демонстрируя линейную зависимость от приложенного напряжения. Обсуждается влияние зарядовых процессов и предыстории ячейки на характер поведения области переориентации жидкого кристалла.

Ключевые слова: жидкокристаллическая линза, сканирование лучом, подвижность зарядов

Для цитирования: Вирченко Ю. П., Довганюк А. А., Мачукаев Д. Д., Кучеев С. И. 2023. Трёхэлектродная жидкокристаллическая ячейка с линзоподобными свойствами. Прикладная математика & Физика, 55(2): 157–165.

DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-2-157-165

Original Research

Three-Electrode Liquid Crystal Cell With Lens-Like Properties

Yuri Virchenko¹ , Alexandr Dovganuk² , Deni Machukaev² 

Sergey Kucheev 

¹Belgorod State Shukhov's Technological University,
Belgorod, 308012, Russia

²Belgorod National Research University,
Belgorod, 308015, Russia

E-mail: kucheev@bsu.edu.ru

Abstract. The paper describes a three-electrode liquid crystal cell with a floating electrode isolated from the liquid crystal layer. It has been experimentally shown that in constant electric fields, the reorientation of a nematic liquid crystal begins in the vicinity of the anode, while the boundary between the initial and reoriented regions of the liquid crystal remains unblurred in a wide voltage range. The region of the reoriented liquid crystal exhibits lens-like properties with cylindrical symmetry, and the location of this region depends linearly on the magnitude of the voltage. The maximum deviation of the laser beam fragments, which are the result of lens properties and interference, can vary in the range of at least a couple of tens of degrees from the original direction, demonstrating a linear dependence on the applied voltage. The influence of charge processes and cell prehistory on the behavior of the liquid crystal reorientation region is discussed.

Keywords: Liquid Crystal Lens, Beam Steering, Charge Mobility

For citation: Virchenko Yuri, Dovganuk Alexandr, Machukaev Deni, Kucheev Sergey. 2023. Three-electrode liquid crystal cell with lens-like properties. Applied Mathematics & Physics, 55(2): 157–165. DOI 10.52575/2687-0959-2023-55-2-157-165

1. Введение. Управление параметрами фронта световой волны (направление, амплитуда, фаза, поляризация) на сегодняшний день остается актуальной задачей. Это связано с необходимостью решать прикладные задачи, связанные с микрооптикой, лазерным сканированием, оптической коммуникацией, офтальмологией и т. д. Задачи, связанные с изменением направления волнового фронта лазерного

излучения, решаются как с помощью механических приборов (подвижные зеркала, в том числе микроскопы, призмы, линзы и т. п.), так и без механических элементов при помощи электрооптических материалов. К последним относятся жидкие кристаллы (ЖК), в которых анизотропные оптические свойства обусловлены коллективным поведением ориентированных молекул [9]. Чувствительность директора к широкому спектру факторов, например, электрическое и/или магнитное поле, световая волна [13], химико-биологические реагенты [2, 1, 6], а также влияние стенок, позволяет формировать в ЖК среде в заданное время в заданном месте необходимый профиль распределения коэффициента преломления. Для управления лазерным лучом наибольшие успехи достигнуты при формировании линзо- и/или призм-подобного распределения коэффициента преломления в ЖК. К настоящему времени предложено большое разнообразие двухэлектродных конструкций ЖК ячеек [4, 8, 15, 21, 23, 24] и используемых ЖК материалов, включая холестерики [11], стабилизированные полимерами нематики [14], голубые фазы [20]. Для достижения заданного распределения коэффициента преломления используются в основном два подхода, а именно, в первом подходе указанное распределение показателя преломления ЖК среды достигается за счёт использования аналогового распределения электрического поля за счёт «резистивных» решений [16, 3, 12, 17], тогда как второй подход можно условно назвать «цифровым» [7], когда достаточно большой набор микроэлектродов задают требуемое распределение электрического поля за счет фиксированной комбинации уровней напряжений на электродах. «Цифровой» подход доминирует для получения призм-подобного распределения для сканирования лазерного луча [10]. Очевидно, что отмеченные методы (особенно последний) заведомо страдают отсутствием дополнительной возможности параллельной обработки информации поскольку профиль потенциалов фактически формируется на внешних приборах или заранее предопределён, поэтому для перспективных сенсорных адаптирующихся оптических систем предпочтительны решения с ограниченной детерминированностью в управлении жидким кристаллом. Должна оставаться возможность влияния на ЖК среду других управляющих факторов. В предлагаемой работе продемонстрировано, что в трёхэлектродной ячейке при действии постоянным напряжением достигается линзоподобное свойство переориентированной области ЖК, причём помимо напряжения, управляющими могут выступать параметры, связанные с подвижной зарядовой подсистемой в ЖК.

2. Эксперимент. Исследования проводились с использованием жидкокристаллической структуры, схематично представленной на рис. 1.

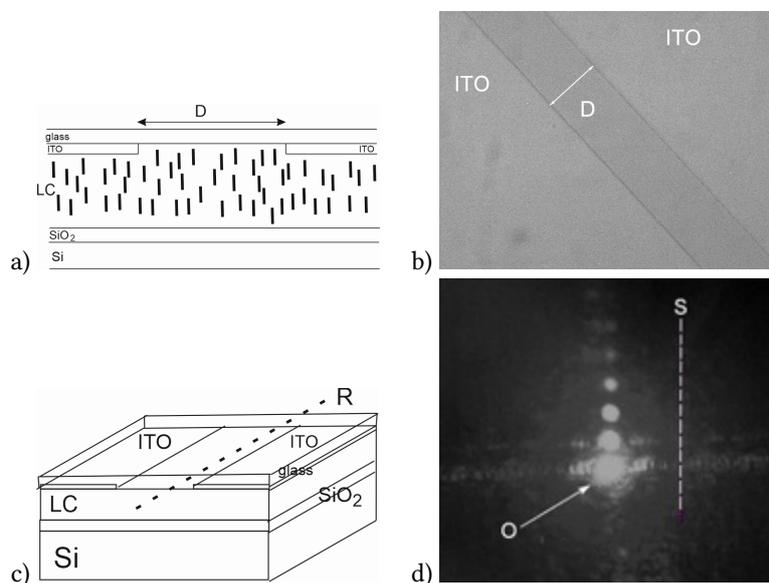


Рис. 1. Условия эксперимента. а) Экспериментальная ячейка (сечение). Si – плавающий электрод. SiO₂ – плёнка, изолирующая жидкий кристалл от электрода Si. LC – жидкий кристалл. D – зазор между электродами ITO, б) Изображение фрагмента ЖК ячейки с гомеотропно ориентированным нематическим жидким кристаллом 5CB в поляризованном свете, в) Элементы ЖК ячейки. R – направление вдоль границы электрода ITO, д) Изображение на экране «объекта» (светлые пятна от главного (O) и переотраженных лучей вдоль направления (S))

Fig. 1. Experiment conditions. a) Experimental cell (section). Si – a floating electrode. SiO₂ – a film that isolates the liquid crystal from the Si electrode. LC – liquid crystal. D – the gap between the ITO electrodes, b) Image of a fragment of an LC cell with a homeotropically oriented 5CB nematic liquid crystal in polarized light, c) LC cell elements. R – the direction along the ITO electrode boundary, d) Image on the screen of the "object" (light spots from the main (O) and re-reflected rays along the direction (S)).

Рассмотрим, что происходит с жидким кристаллом в ячейке при подключении постоянного напряжения к электродам ITO. При квазистационарном увеличении напряжения переориентация ЖК начинается

в окрестности анода, как под электродом ИТО, так и между электродами в зазоре D. При пороговых напряжениях размеры области переориентации ЖК под электродом ИТО превышают таковую в зазоре D, рис. 2а.

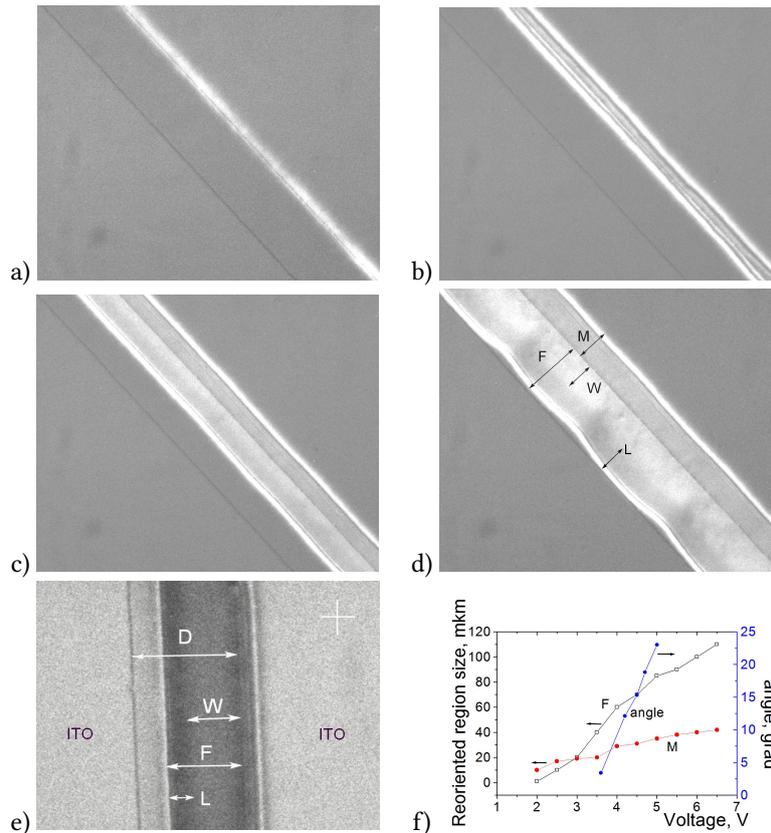


Рис. 2. Переориентация гомеотропно ориентированного жидкого кристалла 5CB в постоянном электрическом поле электродов ИТО. Напряжение (V, В): а) 2; б) 2.5; в) 3; д) 3.5. е) скрещенные поляризаторы параллельны (перпендикулярны) R. f) зависимость размеров переориентированных областей (F, M) и угла (angle) отклонения луча от напряжения

Fig. 2. Reorientation of a homeotropically oriented 5CB liquid crystal in a constant electric field of ITO electrodes. Voltage, V: a) 2; б) 2.5; в) 3; д) 3.5. e) Crossed polarizers are parallel (perpendicular) to R. f) — Dependence of the sizes of the reoriented regions (F, M) and the angle (angle) of beam deflection on voltage

Несимметричный характер переориентации ЖК относительно анода и катода, т.е. отсутствие переориентации в окрестности катода, говорит о неоднородном электрическом поле в зазоре D. Такая неоднородность электрического поля, по всей видимости, связана с совокупным влиянием механизмов электрической поляризации ЖК за счёт подвижных ионов и формированием положительных ионов на аноде, причём последний процесс можно рассматривать как процесс инжекции положительного заряда [5]. При дальнейшем увеличении напряжения область переориентированного ЖК продолжает расширяться, как в направлении к катоду, так и под ИТО электродом. На рис. 2f представлены зависимости размеров полос переориентированных областей F в зазоре D и области M под электродом ИТО от приложенного напряжения соответственно. Для обеих областей переориентированного ЖК наблюдается линейная зависимость от напряжения. Также видно, что в данном диапазоне напряжений размеры области M под ИТО электродом меньше, чем область F. Расширение области M при дальнейшем увеличении напряжения практически останавливается, что можно связать с тем, что электрическое поле под ИТО электродом вертикально и стабилизирует гомеотропную ориентацию ЖК, а имеющаяся деформация ЖК обусловлена только упругими силами, величина которых спадает по мере увеличения расстояния от фактической границы электрода ИТО.

Характерной особенностью переориентации ЖК в данной трёхэлектродной ячейке является то, что граница между исходной гомеотропной и переориентированной (F) областями всегда остаётся резкой и сохраняется таковой в любом месте зазора D, рис. 2. Этот факт объясняется стабилизирующей ролью плавающего электрода (Si) на гомеотропную ориентацию молекул ЖК из-за наличия на нём некоторого потенциала, который появляется вследствие перераспределения, приложенного к электродам ИТО напряжения.

В переориентированной области F (рис. 2) визуально можно выделить две полосы W и L, отличающиеся друг от друга интенсивностью отраженного света и своим строением. Более светлая полоса W

однородна и прилегает непосредственно к краю электрода (анода), рис. 2d, e. Более светлый фон этой полосы указывает на достижение директором в этой области более совершенной планарной ориентации. Полоса L представляет собой область, визуально состоящую из близко расположенных друг к другу узких интерференционно окрашенных полосок, хорошо различимых при низких напряжениях. Интерференционный спектр появляется из-за набега фазы между обыкновенным и необыкновенным лучами при начальном отклонении оптической оси в ЖК от вертикали. С увеличением напряжения ширина каждой полоски уменьшается, но количество их увеличивается, что в итоге приводит к их уплотнению при одновременном увеличении общей ширины полосы L.

Разбиение области переориентации F на указанные выше две полосы W и L с резкими и прямыми границами сохраняется в любом месте зазора D при её движении в сторону катода. Отметим, что с увеличением напряжения может появляться некоторая волнообразная неустойчивость полосы L (рис. 2d), что в большинстве случаев в постоянных полях указывает на электрогидродинамические процессы.

Стабилизирующая роль плавающего электрода (Si) заметным образом проявляется при изменении полярности приложенного к электродам напряжения. На рис. 3 приведены изображения фрагмента ЖК ячейки при переключении полярности.

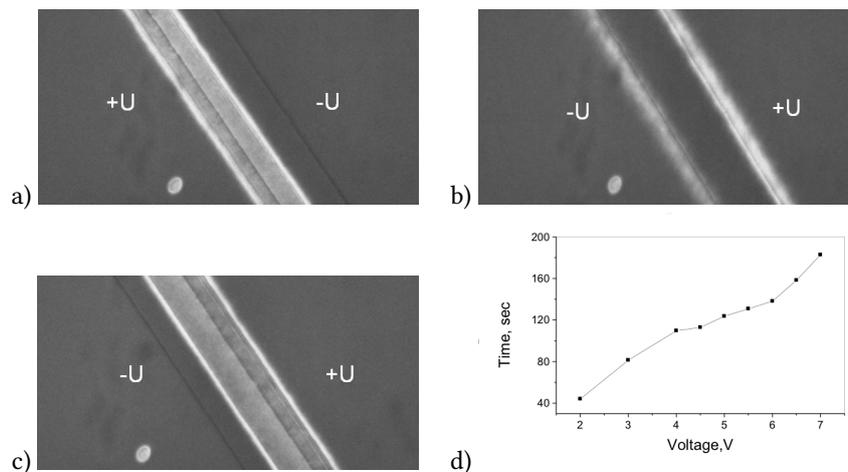


Рис. 3. Изменение полярности напряжения, приложенного к ITO электродам. а) Фрагмент ЖК ячейки перед переключением полярности напряжения. Время от момента переключения полярности напряжения, сек : а) 0, б) 100, с) 300. д) Зависимость времени установления стационарной картинке переориентации в первых циклах изменения полярности напряжения

Fig. 3. Changing the polarity of the voltage applied to the ITO electrodes. a) Fragment of an LC cell before switching the voltage polarity. Time period from the moment of voltage polarity switching, sec: a) 0, b) 100, c) 300. d) Dependence of the time of establishing a stationary reorientation picture in the first cycles of changing the voltage polarity

На приведенных иллюстрациях видно, что есть момент времени (рис. 3b), когда области переориентированного ЖК в окрестностях анода и катода практически одинаковы (симметричны), при этом ширина полос переориентированного ЖК под ITO электродами больше ширины переориентации ЖК в зазоре D.

Характерной особенностью перехода от одного стационарного распределения директора при одной полярности напряжения к другому распределению при другой полярности, является то, что этот процесс может занимать сотни секунд, рис. 3d. Принимая во внимание вышеупомянутое предположение, что несимметричность переориентации ЖК относительно анода и катода обусловлена неоднородностью электрического поля вследствие формирования объемного заряда, такое время согласуется с временем переноса носителей заряда. Для типичной ионной подвижности $10^{-8} \div 10^{-11}$ м²/Вс [22, 19] и величины напряжения ~ 5 В для зазора D оценка времени переноса заряда даёт $\sim 1 \div 100$ сек. С учетом предполагаемой поляризации [18] это время только увеличится, что в общем случае наблюдается в экспериментах. На время установления ориентации ЖК влияет предыстория ячейки, а именно, длительность и величина ранее прикладываемого к ячейке напряжения. С увеличением значений этих двух параметров процессы переключения ориентации при изменении полярности напряжения занимают все больший промежуток времени. Можем допустить, что в механизм переключения ориентации при изменении полярности напряжения вовлечены процессы ионной самоочистки и переноса ориентанта (лецитина). Последний по мере увеличения общей длительности манипуляций с приложенным к ячейке напряжением, выносится из области зазора D в прилегающие области ячейки. Это, в свою очередь, увеличивает время формирования гомеотропной ориентации в соответствующем месте ячейки. О диффузии ориентанта с характерными временами порядка суток в ЖК ячейке в условиях отсутствия электрического поля сообщалось в [7]. Можно предположить, что в условиях описываемого эксперимента, т.е. с приложенным напряжением, подобный процесс переноса ориентанта может протекать более активно.

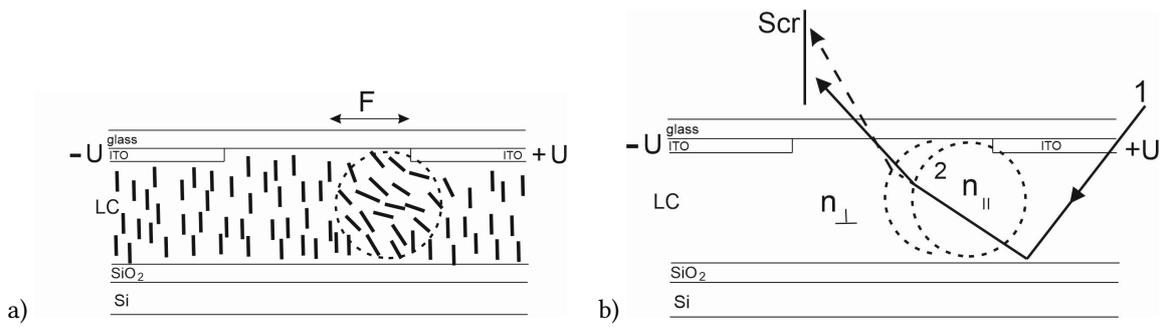


Рис. 4. ЖК ячейка с линзоподобным распределением директора. а) Схематическое распределение директора в окрестности анода. F – переориентированная область ЖК. б) Преломление фрагмента (1) луча в области (2) переориентированного ЖК с линзоподобными свойствами. Движение вверх преломлённого фрагмента луча по экрану Scr при перемещении «выпуклости» «линзы» влево с увеличением напряжения

Fig. 4. LC cell with lens-like director distribution. a) Schematic distribution of the director in the vicinity of the anode. F – The reoriented area of the LC. b) Refraction of a fragment (1) of a beam in the region (2) of a reoriented LC with lens-like properties. Upward movement of the refracted fragment of the beam along the screen Scr while moving the “bulge” of the “lens” to the left with increasing voltage

Рассмотрим качественно область переориентированного ЖК в окрестности анода, рис. 4аb. В сечении эта область приближенно имеет форму «двояковыпуклой линзы». Одна «выпуклость» направлена в сторону катода, вторая – под ITO электрод (анод). Такая форма обусловлена влиянием электрического поля электродов ITO и совокупным влиянием стенок и плавающего электрода. Последние стремятся сохранить исходную гомеотропную ориентацию молекул, тогда как электрическое поле электродов, с учетом процессов, приводящих к его неоднородности, переориентирует молекулы, причем переориентация осуществляется легче в середине слоя ЖК. Благодаря этому формируются вышеуказанные два «выступа» в профиле распределения переориентированного директора. С увеличением напряжения «выпуклости» возрастают и продвигаются в сторону катода и под анод, рис. 4аb, причём в последнее направление незначительно.

Проанализируем изображения, которые получаются на экране при прохождении лазерного луча («объекта») через область переориентированного ЖК. Первоначально, поворотом газоразрядной трубки, установим направление S под углом ~ 45 град. по отношению к направлению R. В этом случае «объект» располагается по отношению к ЖК таким образом, что в область переориентации F в основном попадает только главный луч(O).

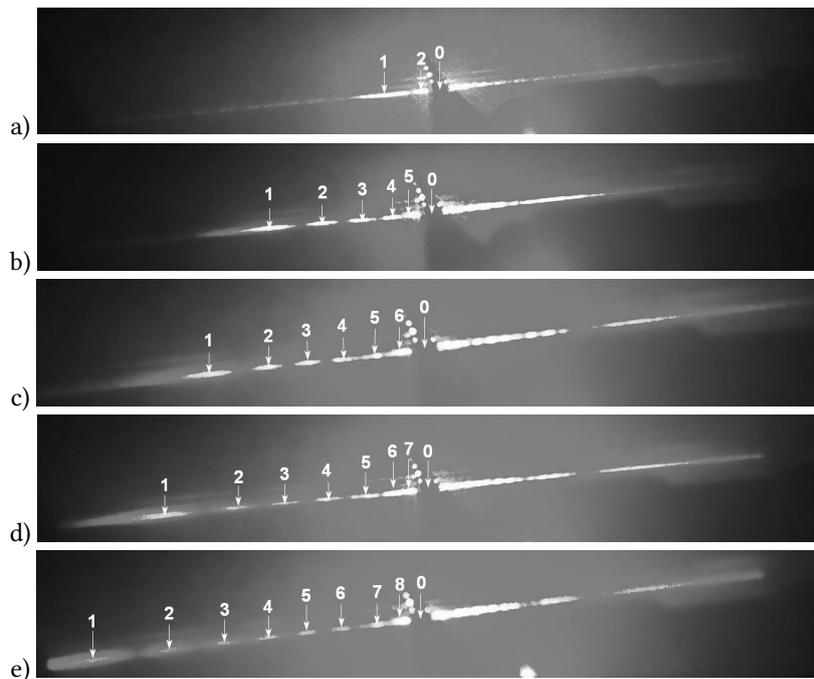


Рис. 5. Изображение «объекта» на экране после его оптического преобразования в полосе F переориентированного ЖК. Угол между S и R ~ 45 град. Напряжение, В: а) – 3,6; б) – 4,2; в) – 4,5; д) – 4,7; е) – 5. Главное пятно (0) затенено
Fig. 5. Image of the "object" on the screen after its optical transformation in the F band of the reoriented LC. Angle between S and R ~ 45 deg. Voltage, V: а) – 3.6; б) – 4.2; в) – 4.5; д) – 4.7; е) – 5. The main spot (0) is shaded

На рис. 5 представлены изображения «объекта» на экране при нескольких значениях напряжения. Эти изображения получены, когда лазерный луч направлен на ячейку со стороны анода, через ИТО электрод, как схематически отображено на рис. 4b. Изображение представляет собой ряд размытых максимумов (далее пятен), лежащих на прямой, при этом картина их месторасположения относительно главного пятна 0 несимметрична. Картинка зеркально меняется относительно «0», если лазерный луч будет направлен на ЖК ячейку с другой стороны на область F, а именно, со стороны зазора D (этот случай не рассматривается). Проанализируем расположение пятен в изображениях на экране, которые лежат только по одну сторону (налево) от главного пятна «0», рис. 5. Это направление на экране соответствует направлению «вверх» на «scg» на рис. 4b. Как видно из приведенных иллюстраций, по мере увеличения напряжения появляются новые пятна, которые непрерывно перемещаются в сторону от центрального пятна «0». Такой характер поведения пятен можно объяснить следующим образом. С одной стороны, проявляются линзовые свойства области переориентации F. В результате этого луч расширяется, причём оптическая сила «линзы» растёт с увеличением напряжения. С другой стороны, имеет место интерференция, которая является причиной гашения интенсивности света между пятнами. Необходимо отметить, что появление отдельных различимых пятен и их движение совпадает с «уплотнением» полосы L в области переориентации F, рис. 2. Другими словами линзоподобными свойствами с интерференционным гашением обладает область L, в которой в каждой полоске имеет место набег фазы на 2π при непрерывном отклонении директора от вертикали.

Рассмотрим особенности изменения угла отклонения лучей (пятен) от первоначального направления на примере первого луча, который сформировался первым и который дает на экране пятно с номером 1, рис. 5. Отклонения всех других лучей будут на меньшие углы. На рис. 2f представлена зависимость угла отклонения этого луча от первоначального направления от приложенного напряжения. Хорошо видно, что отклонение этого луча значительно, и составляет не менее пары десятков градусов в указанном диапазоне напряжений, при этом наблюдается линейная зависимость от приложенного напряжения. Этот факт указывает на потенциальную возможность решать задачи, связанные со сканированием лазерного излучения.

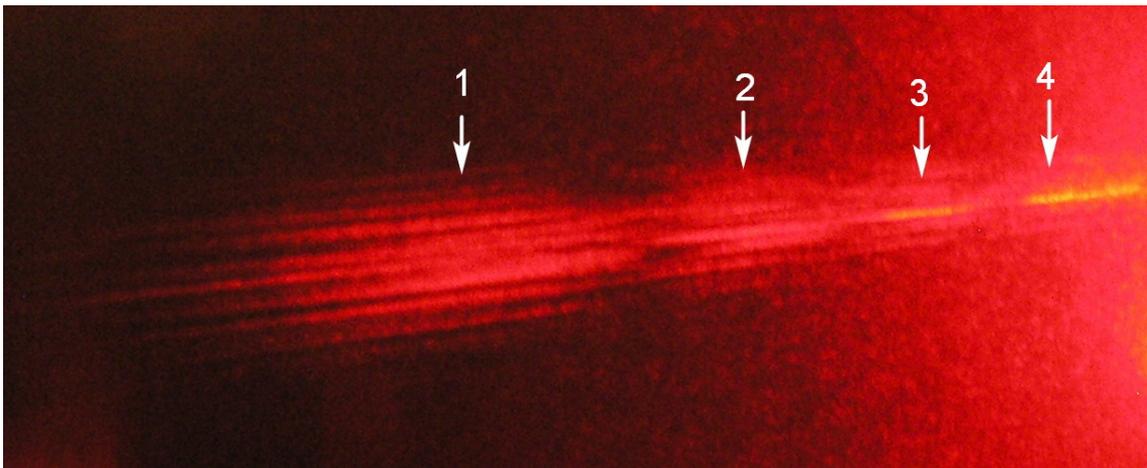


Рис. 6. Изображение «объекта», когда S и R параллельны. Напряжение 5В

Fig. 6. The image of the "object" when S and R are parallel. Voltage is 5V

Линзоподобные свойства переориентированной области ЖК с цилиндрической симметрией вдоль электрода ИТО можно увидеть, если установить газо-разрядную трубку, чтобы S было параллельно R. В этом случае все лучи «объекта» (рис. 1d) будут попадать в область переориентации ЖК. На приведенной иллюстрации, рис. 6, изображение «объекта» условно выглядит как ряд «стопок» (отмечены номерами 1, 2, 3, 4), каждая из которых состоит из некоторого количества горизонтальных полосок. Каждая «стопка» ведет себя аналогично поведению отдельно взятого пятна, о чём было дано описание выше к рис. 5, т.е. появляется при некотором напряжении и непрерывно перемещается по экрану от центрального пятна при увеличении напряжения. Совершенно очевидно, что в конкретной «стопке» определенная горизонтальная полоска соответствует конкретному переотраженному лучу «объекта» (рис. 1).

3. Заключение. Таким образом, экспериментально показано, что в трёхэлектродной ЖК ячейке, в которой один из электродов изолирован от ЖК слоя, является плавающим и стабилизирующим исходную гомеотропную ориентацию ЖК, переориентация молекул ЖК происходит в окрестности анода. Предполагается, что несимметричность переориентации относительно анода и катода обусловлена зарядовыми процессами, приводящими к неоднородному распределению электрического поля. Граница между областями переориентированного и исходного ЖК остается не размытой в широком диапазоне приложенного напряжения и демонстрирует линейную зависимость местоположения при перемещении

в сторону катода. Область переориентированного ЖК проявляет свойства линзы с цилиндрической симметрией с осью вдоль анода. Максимальные отклонения фрагментов лазерного луча после оптического преобразования в переориентированном ЖК насчитывают пару десятков градусов для рабочего диапазона напряжений и линейную зависимость.

Список литературы

1. Бердниченко А. В., Кучеев С. И. 2020. Доменная переориентация нематика в поле р-п перехода в сенсоре пара органических реагентов. Прикладная математика & Физика, 52(3): 214–223.
2. Валетова Е. А., Колесников Д. А., Кучеев С. И. 2017. Адсорбция и переориентация нематика на наноразмерной углеродной плёнке, индуцированная парами органических растворителей. Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика, 50(1): 64–72.
3. Вдовин Г. В., Гуральник И. Р., Котова С. П., Локтев М. Ю., Наумов А. Ф. 1999. Жидкокристаллические линзы с перестраиваемым фокусным расстоянием. Квантовая электроника, 26(3): 256–260.
4. Грязнова М. В., Данилов В. В., Кузнецов Ю. А., Рыльков В. В., Шахвердов П. А., Хребтов А. И. 2001. Жидкокристаллические микролинзы в системе оптического ограничения. Письма в ЖТФ, 27(2):24–29.
5. Жакин А. И. 2006. Приэлектродные и переходные процессы в жидких диэлектриках. Успехи физических наук, 176(3): 289–310.
6. Каманин А. А., Каманина Н. В. 2006. Структурирование жидкокристаллической мезофазы, вызванное введением эритроцитов. Письма в ЖТФ, 32(14):25–32.
7. Кучеев С. И. 2016. Переключение ориентации нематика, обусловленное диффузией фосфолипида в МДП структуре. Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика, 45(27(248)): 115–120.
8. Algorri J. F., Morawiak P., Bennis N., et al. 2020. Positive-negative tunable liquid crystal lenses based on a microstructured transmission line. Scientific reports, 10(1): 10153–10162.
9. Blinov L. M., Chigrinov V. G. 1993. Electrooptic Effects in Liquid Crystal Materials. New York. Springer, 464.
10. de Blas M. G., Geday M. A., Oton J. M., Arregui X. Q. 2021. Two-dimensional digital beam steering based on liquid crystal phase gratings. Applied Sciences, 11(8): 3632–3644.
11. Chang K., Varanytsia A., Chien L. 2017. Electrically tunable liquid crystal lens with suppressed axial chromatic aberration. Applied physics letters, 111(3): 033504–033509.
12. Chang Y., Jen T., Ting C., Huang Y. 2014. High-resistance liquid-crystal lens array for rotatable 2D/3D autostereoscopic display. Optics express, 22(3): 2714–2724.
13. Gunter P., Huignard J. 2007. Photorefractive Materials and Their Applications. New York. Springer, 626.
14. Fan Y., Ren H., Wu S. 2003. Switchable Fresnel lens using polymer-stabilized liquid crystals. Optics Express, 11(23): 3080–3086.
15. Feng W., Liu Z., Liu H., Ye M. 2023. Design of tunable liquid crystal lenses with a parabolic phase profile. Crystals, 13(1): 8–17.
16. Huang B., Huang S., Chuang C., Kuo C. 2020. Electrically-tunable blue phase liquid crystal microlens array based on a photoconductive film. Polymers, 12(1): 65–72.
17. Kaur S., Kim Y., Milton H., Mistry D., Syed I. M., Bailey J., Novoselov K. S., Jones J. C., Morgan P. B., Clamp J., Gleeson H. F. 2016. Graphene electrodes for adaptive liquid crystal contact lenses. Optics express, 24(8): 8782–8787.
18. Kovalchuk A. V. 2001. Relaxation processes and charge transport across liquid crystal–electrode interface. Journal of Physics: Condensed Matter, 13(46): 10333–10345.
19. Kucheev S. I. 2008. Transient current in nematic cells containing a silicon substrate. Journal of Physics: Condensed Matter, 20(27): 275222–275226.
20. Lin S., Huang L., Lin C., Kuo C. 2014. Polarization-independent and fast tunable microlens array based on blue phase liquid crystals. Optics express, 22(1): 925–930.
21. Munavar H. M., Doreswamy B. H., Shobha N. C., Vijayakumar V. N., Fakruddin K. 2019. Orientational order parameter of liquid crystalline nanocomposites by Newton’s rings and image analysis methods. Наносистемы: физика, химия, математика, 10(3): 243–254.
22. Naito H., Yoshida K., Okuda M., Sugimura A. 1994. Transient current study of ultraviolet-light-soaked states in n-pentyl-p-n-cyanobiphenyl. Japanese Journal of Applied Physics, 33(10): 5890–5891.
23. Ren H., Fox D. W., Wu B., Wu S. 2007. Liquid crystal lens with large focal length tunability and low operating voltage. Optics Express, 15(18): 11328–11335.
24. Subota S. L., Reshetnyak V. Yu., Ren H., Wu S. 2010. Tunable-focus liquid crystal lens with non-planar electrodes. Molecular Crystals and Liquid Crystals, 526(1): 93–100.

References

1. Berdnichenko A. V., Kucheev C. I. 2020. Domennaya pereorientatsiya nematika v pole p-n perekhoda v sensore para organicheskikh reagentov [Domain reorientation of nematic in p-n junction field in sensor of organic reagents vapor]. *Applied Mathematics & Physics*, 52(3): 214–223.
2. Valetova E. A., Kolesnikov D. A., Kucheev S. I. 2017. Adsorbtsiya i pereorientatsiya nematika na nanorazmernoy uglerodnoy plyonke, indutsirovannaya parami organicheskikh rastvoriteley [Adsorption and reorientation of a nematic on a nanoscale carbon film induced by vapors of organic solvents]. *Belgorod State University Scientific bulletin. Series: Mathematics. Physics*, 50(1): 64–72.
3. Vdovin G. V., Guralnik I. R., Kotova S. P., Loktev M. U., Naumov A.F. 1999. Zhidkokristallicheskie linzy s perestraivaemym fokusnim rasstoyaniem [Liquid crystal lenses with adjustable focal length]. *Quantum Electronics*, 26(3): 256–260.
4. Gryaznova M. V., Danilov V. V., Kuznetsov U. A., Rylkov V. V., Shahverdov P. A., Hrebtov A. I. 2001. Zhidkokristallicheskie mikrolinzy v sisteme opticheskogo ogranicheniya [Liquid crystal microlenses in an optical confinement system]. *Technical Physics Letters*, 27(2): 24–29.
5. Zhakin A. I. 2006. Prielektrodnnye i perekhodnye protsessy v zhidkikh dielektrikah [Near-electrode and transient processes in liquid dielectrics]. *Advances in Physical Sciences*, 176(3): 289–310.
6. Kamanin A. A., Kamanina N. V. 2006. Strukturirovanie zhidkokristallicheskoj mezofazy, vyzvannoe vvvedeniem eritrotsitov [Structuring of the liquid crystal mesophase caused by the introduction of erythrocytes]. *Technical Physics Letters*, 32(14): 25–32.
7. Kucheev S. I. 2016. Pereklucheniye orientatsiyi obuslovlennoe diffuziyey fosfolipida v MDP strukture [Nematic orientation switching due to phospholipid diffusion in the MIS structure]. *Belgorod State University Scientific bulletin. Series: Mathematics. Physics*, 45(27(248)):115–120.
8. Algorri J. F., Morawiak P., Bennis N., et al. 2020. Positive-negative tunable liquid crystal lenses based on a microstructured transmission line. *Scientific reports*, 10(1): 10153–10162.
9. Blinov L. M., Chigrinov V. G. 1993. *Electrooptic effects in liquid crystal materials*. New York. Springer, 464.
10. de Blas M. G., Geday M. A., Oton J. M., Arregui X. Q. 2021. Two-dimensional digital beam steering based on liquid crystal phase gratings. *Applied Sciences*, 11(8): 3632–3644.
11. Chang K., Varanytsia A., Chien L. 2017. Electrically tunable liquid crystal lens with suppressed axial chromatic aberration. *Applied physics letters*, 111(3): 033504–033509.
12. Chang Y., Jen T., Ting C., Huang Y. 2014. High-resistance liquid-crystal lens array for rotatable 2D/3D autostereoscopic display. *Optics express*, 22(3): 2714–2724.
13. Gunter P., Huignard J. 2007. *Photorefractive materials and their applications*. New York. Springer, 626.
14. Fan Y., Ren H., Wu S. 2003. Switchable Fresnel lens using polymer-stabilized liquid crystals. *Optics Express*, 11(23): 3080–3086.
15. Feng W., Liu Z., Liu H., Ye M. 2023. Design of tunable liquid crystal lenses with a parabolic phase profile. *Crystals*, 13(1): 8–17.
16. Huang B., Huang S., Chuang C., Kuo C. 2020. Electrically-tunable blue phase liquid crystal microlens array based on a photoconductive film. *Polymers*, 12(1): 65–72.
17. Kaur S., Kim Y., Milton H., Mistry D., Syed I.M., Bailey J., Novoselov K.S., Jones J.C., Morgan P.B., Clamp J., Gleeson H.F. 2016. Graphene electrodes for adaptive liquid crystal contact lenses. *Optics express*, 24(8): 8782–8787.
18. Kovalchuk A. V. 2001. Relaxation processes and charge transport across liquid crystal–electrode interface. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 13(46): 10333–10345.
19. Kucheev S.I. 2008. Transient current in nematic cells containing a silicon substrate. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 20(27): 275222–275226.
20. Lin S., Huang L., Lin C., Kuo C. 2014. Polarization-independent and fast tunable microlens array based on blue phase liquid crystals. *Optics express*, 22(1): 925–930.
21. Munavar H. M., Doreswamy B. H., Shobha N. C., Vijayakumar V. N., Fakruddin K. 2019. Orientational order parameter of liquid crystalline nanocomposites by Newton's rings and image analysis methods. *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 10(3): 243–254.
22. Naito H., Yoshida K., Okuda M., Sugimura A. 1994. Transient current study of ultraviolet-light-soaked states in n-pentyl-p-n-cyanobiphenyl. *Japanese Journal of Applied Physics*, 33(10): 5890–5891.
23. Ren H., Fox D. W., Wu B., Wu S. 2007. Liquid crystal lens with large focal length tunability and low operating voltage. *Optics Express*, 15(18): 11328–11335.
24. Subota S. L., Reshetnyak V.Yu., Ren H., Wu S. 2010. Tunable-focus liquid crystal lens with non-planar electrodes. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 526(1): 93–100.

Конфликт интересов: о потенциальном конфликте интересов не сообщалось.

Conflict of interest: no potential conflict of interest related to this article was reported.

Поступила в редакцию 03.03.2023
Поступила после рецензирования 15.04.2023
Принята к публикации 19.04.2023

Received 03.03.2023
Revised 15.04.2023
Accepted 19.04.2023

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вирченко Юрий Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
ул. Костюкова, 46, Белгород, 308012, Россия

Довганюк Александр Александрович – магистрант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

Мачукаев Дени Даудович – магистрант, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

Кучеев Сергей Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, 85, Белгород, 308015, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Yuri Virchenko – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Belgorod State Technological Shukhov's University, Belgorod, Russia

Alexandr Dovganuk – Undergraduate, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Deni Machukaev – Undergraduate, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia

Sergey Kucheev – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Belgorod National Research University, Belgorod, Russia