

УДК 535.738;548-14

ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ДВУХ ОРИЕНТАЦИЙ ДИРЕКТОРА ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾, И. И. РУШНОВА¹⁾

¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

Предложена топология жидкокристаллической границы показателя преломления для реализации эффекта полного внутреннего отражения, позволяющая осуществить режим оптического пространственного переключения ортогональных поляризационных мод. На основе рассмотренной топологии создан жидкокристаллический элемент с управляемой рефрактивной границей. Начальная планарная взаимно ортогональная ориентация директора нематических жидкокристаллических молекул в плоскости жидкокристаллического элемента задавалась при помощи метода фотоориентации молекул азокрасителя, который являлся ориентирующим слоем. Проведены экспериментальные исследования условий реализации эффекта полного внутреннего отражения линейно-поляризованного лазерного излучения от электрически управляемой границы при различных напряжениях. Экспериментально продемонстрирован режим пространственного разделения и переключения поляризационных мод. Исследовано пространственное смещение границы двух взаимно ортогональных ориентаций директора нематических жидкокристаллических молекул при увеличении прикладываемого внешнего электрического поля на жидкокристаллический элемент. Показано, что с ростом амплитуды прикладываемого напряжения происходит смещение как точки отражения, так и траектории вертикально поляризованной моды, отраженной от рефрактивной границы. Продемонстрирована возможность создания электрически управляемых жидкокристаллических устройств, реализующих пространственно-поляризационное разделение и переключение ортогональных мод лазерного излучения, а также электрооптическое отклонение лазерного излучения.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл; оптическое переключение; полное внутреннее отражение; рефрактивная граница; пространственно-поляризационное разделение.

Образец цитирования:

Мельникова Е. А., Рушнова И. И. Полное внутреннее отражение на границе раздела двух ориентаций директора жидкого кристалла // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2016. № 2. С. 3–7.

For citation:

Melnikova E. A., Rushnova I. I. Total internal reflection at the interface of two liquid-crystal director orientations. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 2. P. 3–7 (in Russ.).

Авторы:

Елена Александровна Мельникова – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Ирина Ивановна Рушнова – аспирантка кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – Е. А. Мельникова.

Authors:

Elena Aleksandrovna Melnikova, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

melnikova@bsu.by

Irina Ivanovna Rushnova, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

rushnova@bsu.by

TOTAL INTERNAL REFLECTION AT THE INTERFACE OF TWO LIQUID-CRYSTAL DIRECTOR ORIENTATIONS

E. A. MELNIKOVA^a, I. I. RUSHNOVA^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

The liquid-crystal interface topology of the refractive index has been suggested to realize the total internal reflection effect and to implement the spatial optical switching regime for orthogonal polarization modes. Based on this topology, a liquid-crystal element with the controlled refractive interface has been developed. The initial planar mutually orthogonal orientations of the director in nematic liquid-crystal molecules in the plane of a liquid crystal element were set by molecular photoalignment of the azo dye used as an aligning layer. The experimental studies of the conditions associated with realization of the total internal reflection effect of linearly-polarized laser radiation from the electrically controlled interface have been performed at different control voltages. The spatial separation and switching regime of polarization modes has been demonstrated experimentally. Spatial shift of the interface between two orthogonal orientations of the liquid crystal director has been examined by increasing the electric field applied to the liquid crystal element. It has been shown that, with growing amplitude of the voltage applied to a liquid crystal cell, the reflection point is shifted and the parallel trajectory shifting of the vertically-polarized mode reflected from the refractive interface takes place. As demonstrated by the conducted studies, there is a possibility to create the electrically controlled liquid crystal devices capable to realize the spatial-polarization separation and switching of orthogonal modes and also the electrooptical deflection of laser radiation.

Key words: nematic liquid-crystal; optical switching; total internal reflection; refractive interface; spatial-polarization separation.

В настоящее время наблюдается активное развитие технологий изготовления новых функциональных элементов интегральной оптики. В рамках этих исследований большое внимание уделяется разработке и созданию устройств, осуществляющих оптическое переключение, которые не требуют опто-электронного преобразования сигнала, что обеспечивает их работу непосредственно в оптической области [1, 2].

Создание относительно простых, надежных и недорогих оптических элементов для управления световыми потоками напрямую связано с поиском перспективных функциональных сред. В числе электро-оптических материалов жидкие кристаллы (ЖК) являются уникальными и наиболее перспективными для создания устройств, осуществляющих управление параметрами оптического излучения. Уникальность свойств ЖК определяется прежде всего аномально высокой величиной двулучепреломления, на несколько порядков превышающей значение оптической анизотропии других кристаллических сред, и возможностью управления ею посредством малых внешних напряжений (несколько вольт). Ранее созданные электрически управляемые дифракционные и волноводные устройства на основе нематического жидкого кристалла (НЖК) отличаются миниатюрностью, надежностью, дешевизной изготовления и обеспечивают эффективное управление характеристиками оптического излучения [3–5].

Настоящая работа посвящена созданию ЖК-устройства, выполняющего пространственно-поляризационное переключение лазерного излучения. Принцип действия данного устройства основан на эффекте полного внутреннего отражения (ПВО) линейно-поляризованного излучения от электрически контролируемой границы раздела двух областей НЖК с различной величиной показателей преломления.

Структурная схема разработанного и исследуемого электрически управляемого ЖК-элемента представляет собой стандартную ячейку типа *сэндвич* с толщиной ЖК-слоя порядка 20 мкм (см. цв. вклейку, рис. 1). В работе использовался положительный двулучепреломляющий нематический жидкий кристалл с показателем преломления для необыкновенной волны $n_e = 1,67$, обыкновенной – $n_o = 1,49$.

Начальная планарная взаимно ортогональная ориентация директора НЖК-молекул в плоскости ЖК-ячейки и в двух ее соседних областях (см. цв. вклейку, рис. 2, а) задавалась при помощи метода фото-ориентации молекул азокрасителя, который и являлся ориентирующим слоем. Данный метод ориентации ЖК очень удобен для создания недисплейных ЖК-устройств и отличается хорошей ориентацией молекул в заданном направлении [6, 7].

Показатель преломления ЖК зависит от угла между ориентацией директора ЖК-молекул и состоянием поляризации излучения, распространяемого в объеме ЖК. Молекулы НЖК имеют вытянутую структуру и схематически изображаются в виде эллипсоида, который является эллипсоидом показателя преломления. Таким образом, существуют два предельных случая – поляризация света параллельна и перпендикулярна оси молекулы, так называемые необыкновенная и обыкновенная волны соответственно. В общем случае молекулы могут быть сориентированы под любым углом относительно поляризации света. Однако для достижения максимального эффекта рассмотрим предельные случаи взаимно перпендикулярной ориентации.

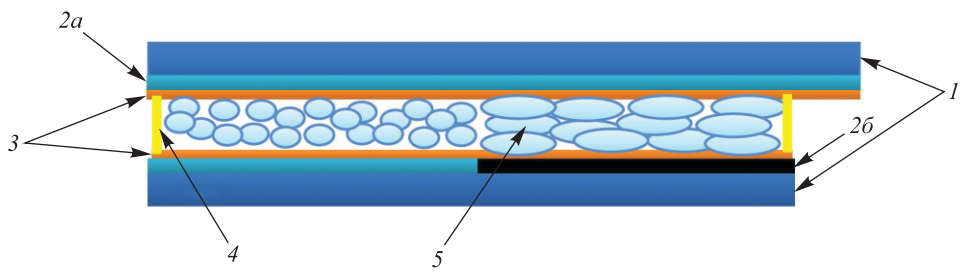


Рис. 1. Структурная схема ЖК-ячейки:

1 – стеклянные подложки; 2а – прозрачный электрод; 2б – непрозрачный электрод (хром);
3 – ориентирующий слой; 4 – спейсеры; 5 – ЖК-молекулы

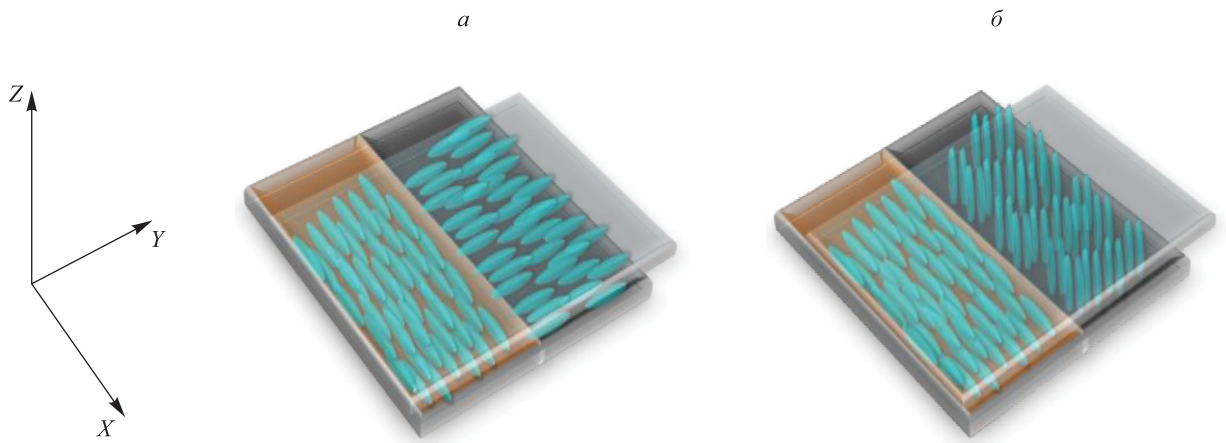


Рис. 2. Топология ориентации директора: а – начальная; б – при подаче электрического поля к ЖК-ячейке

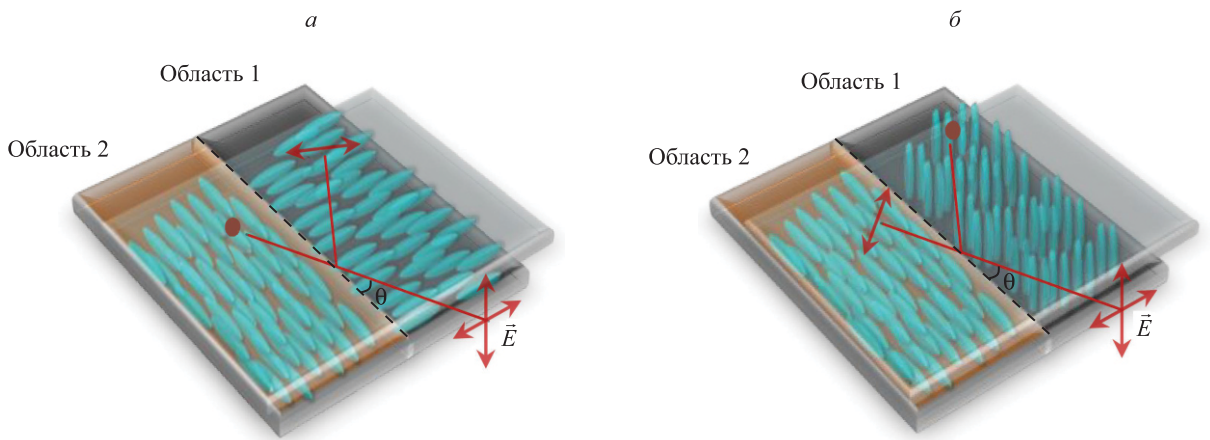


Рис. 3. Схема распространения линейно-поляризованного излучения в ЖК-ячейке с рефрактивной границей: а – при отсутствии внешнего возмущения; б – при подаче внешнего поля; \vec{E} – напряженность электрического поля

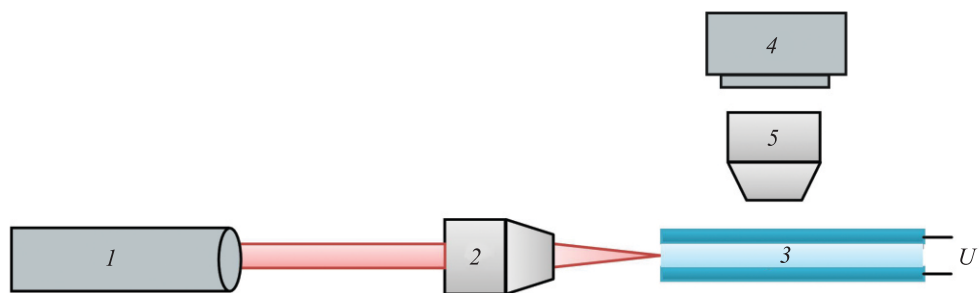


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для наблюдения распространения излучения в ЖК-ячейке: 1 – He – Ne-лазер; 2, 5 – микрообъектив; 3 – ЖК-ячейка; 4 – ПЗС-камера; U – управляющее напряжение

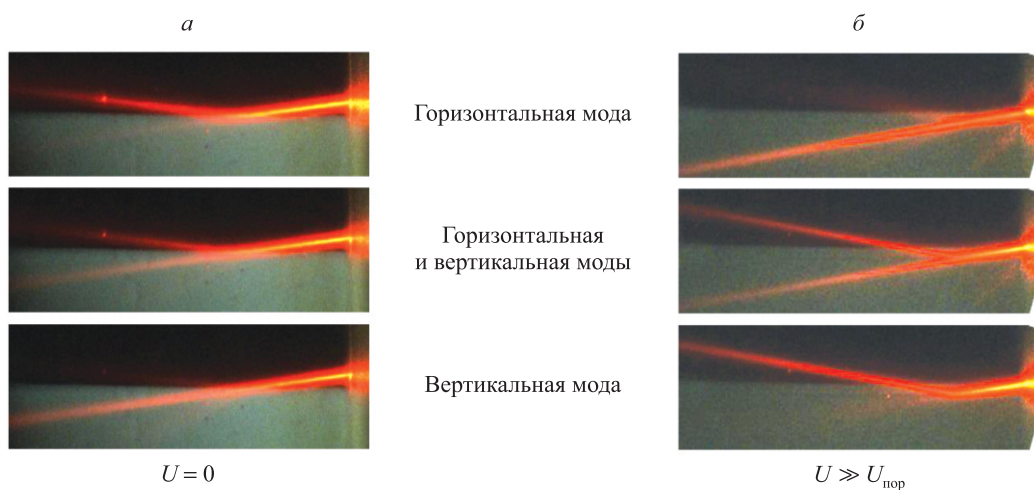


Рис. 5. Распространение линейно-поляризованного излучения в ЖК-структуре: а – без напряжения; б – с напряжением; U – управляющее напряжение

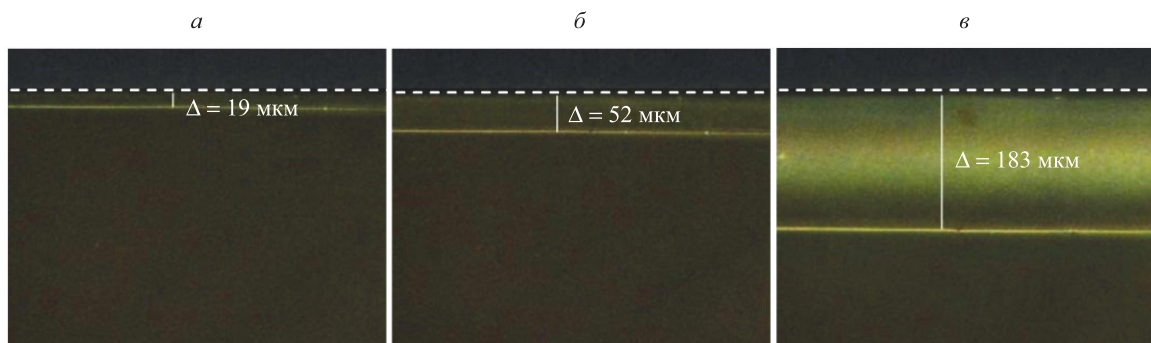


Рис. 6. Экспериментальные фотографии смещения границы с ростом внешнего электрического поля: а – напряжение (U) 2 В; б – напряжение 6 В; в – напряжение 30 В

При подаче электрического поля к слою ЖК происходит диэлектрическое взаимодействие поля с их молекулами, что приводит к переориентации директора. Если молекулы ЖК имеют положительную диэлектрическую анизотропию (как в рассматриваемом случае), то директор будет ориентироваться параллельно полю, приложенному перпендикулярно слою ЖК [8]. Особенность изготовленных ЖК-ячеек – наличие непрозрачного электропроводящего слоя из хрома на половине нижней стеклянной подложки (см. цв. вклейку, рис. 1, 2б). По всей поверхности верхней стеклянной подложки наносился прозрачный электрод (см. цв. вклейку, рис. 1, 2а) для визуального наблюдения пространственного распределения светового поля в слое ЖК. Таким образом, при подаче внешнего электрического поля к ЖК-ячейке с напряженностью, превышающей пороговую величину, в области, где нанесен непрозрачный электрод, молекулы начинают отклоняться от первоначального положения в направлении оси Z и происходит переориентация директора из планарного состояния в гомеотропное (см. цв. вклейку, рис. 2, б). В области ЖК-ячейки, где на нижней стеклянной подложке непрозрачный электрод отсутствует, ориентация директора остается планарной.

Схема распространения линейно-поляризованного излучения в слое НЖК электрически управляемой ЖК-ячейки с рефрактивной границей представлена на рис. 3 (см. цв. вклейку). Излучение вводится в ЖК-элемент со стороны торца ячейки под углом θ к границе раздела двух мезофаз.

При отсутствии внешнего возмущения в ЖК-слое существует граница раздела двух областей со взаимно ортогональными ориентациями директора в плоскости ячейки для горизонтальной поляризованной моды. Так, в области 1 ЖК-элемента (см. цв. вклейку, рис. 3, а), где направления директора ЖК-молекул и горизонтальная компонента лазерного излучения совпадают, возбуждается необыкновенная волна с показателем преломления n_{1ef} , близким к n_e :

$$n_{1ef}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \sin^2 \theta + n_o^2 \cos^2 \theta}}, \quad (1)$$

где θ – угол между директором ЖК и электрическим вектором световой волны, который в данном случае совпадает с углом между волновым вектором и фоторефрактивной границей.

В смежной области 2 ЖК-ячейки возбуждается волна, показатель преломления для которой n_{2ef} близок к n_o :

$$n_{2ef}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}. \quad (2)$$

Следовательно, горизонтальная компонента поляризации лазерного луча, проходя из области с большим показателем преломления в область его меньшего значения, претерпевает преломление и отражение на границе двух областей в отличие от вертикальной поляризованной моды, для которой граница отсутствует. Для углов падения, превышающих критическое значение, можно ожидать выполнения условия полного внутреннего отражения (ПВО), и свет перестанет проникать в среду с меньшим показателем преломления. С учетом выражений для показателей преломления (1) и (2) можно записать уравнение для критического угла распространения $\theta_{ПВО}$, обеспечивающего реализацию эффекта полного внутреннего отражения:

$$\cos \theta_{ПВО} = \frac{n_{2ef}(\theta_{ПВО})}{n_{1ef}(\theta_{ПВО})}, \quad (3)$$

решение которого имеет вид

$$\theta_{ПВО} = \arccos \sqrt{\frac{\sqrt{5n_e^4 - 4n_o^2 n_e^2} - n_e^2}{2(n_e^2 - n_o^2)}}. \quad (4)$$

При подаче напряжения к ЖК-ячейке граница раздела двух ее областей, индуцированная электрическим полем, возникает уже для вертикально поляризованной компоненты лазерного излучения, введенной со стороны гомеотропной ориентации директора жидкого кристалла. Для света с вертикальной поляризацией показатели преломления для двух областей принимают соответственно значения n_e и n_o , и эффект полного внутреннего отражения будет иметь место для углов, меньших предельного угла $\theta_{ПВО}$:

$$\theta \leq \theta_{ПВО} = \arccos \left(\frac{n_o}{n_e} \right). \quad (5)$$

Для горизонтальной поляризационной моды показатели преломления принимают значения

$$n_{\text{lef}} = n_o, \tag{6}$$

$$n_{\text{2ef}}(\theta) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}. \tag{7}$$

Поскольку $n_2(\theta) > n_1$, то для горизонтально поляризованного света не будет выполняться условие ПВО.

Схема экспериментальной установки для наблюдения распространения излучения в ЖК-ячейке 3 приведена на рис. 4 (см. цв. вклейку). Излучение He – Ne-лазера 1 вводится в ЖК-элемент 3 под углом к границе раздела двух ориентаций ЖК, обеспечивающим выполнение условия ПВО. Объектив 2 был использован для обеспечения эффективности ввода лазерного излучения в ЖК-элемент. Распространение электромагнитного излучения внутри ЖК-слоя регистрировалось по рассеянному на неоднородностях жидких кристаллов свету при помощи камеры 6 прибора с зарядовой связью (ПЗС) (Point Grey, США), которая располагалась над ЖК-ячейкой. ПЗС-камера была сопряжена с объективом 5, позволяющим зарегистрировать области размером $3,8 \times 3,0$ мм с разрешением 1280×960 пк. Обработка экспериментальных результатов осуществлялась при помощи персонального компьютера.

Картина распространения линейно-поляризованного лазерного излучения в ЖК-структуре представлена на рис. 5 (см. цв. вклейку). Из полученных экспериментальных данных видно, что при отсутствии напряжения происходит полное внутреннее отражение для горизонтальной поляризационной моды, тогда как вертикальная поляризационная мода проходит через границу, не изменяя направления (см. цв. вклейку, рис. 5, а); при напряжении, намного превышающем пороговое ($U \gg U_{\text{пор}}$), условие ПВО выполняется уже для вертикальной поляризационной моды (см. цв. вклейку, рис. 5, б). Следует отметить, что в случае одновременного возбуждения двух ортогональных поляризационных мод наблюдается пространственное разделение компонент излучения, состоянием которых можно управлять. Следовательно, на основе данного эффекта возможны пространственно-поляризационное разделение ортогональных мод лазерного излучения и их пространственное переключение с помощью внешнего электрического поля.

В настоящей работе также было исследовано пространственное смещение границы двух взаимно ортогональных ориентаций директора НЖК-молекул при увеличении прикладываемого внешнего электрического поля. Регистрация смещения границы происходила в режиме фотографирования образца в скрещенных поляроидах (см. цв. вклейку, рис. 6). Из фотографий, где белой пунктирной линией отмечена граница раздела непрозрачного электрода и области без электрода на нижней подложке, видно, что с ростом напряжения граница двух ориентаций смещается на Δ в область ЖК-элемента без электрода. Это связано с тем, что для более высоких напряжений происходит выход силовых линий поля за границу электрода.

Данные анализировались для диапазона напряжений 0–40 В. При подаче на ЖК-ячейку напряжения 40 В происходит смещение границы на расстояние порядка 200 мкм, в то время как толщина ЖК-слоя составляет 20 мкм.

В связи с проявлением этого эффекта с ростом амплитуды прикладываемого напряжения к ЖК-ячейке происходит смещение точки отражения и параллельное смещение траектории вертикально поляризованной моды, отраженной от рефрактивной границы (рис. 7). Данный эффект можно использовать для создания устройства, осуществляющего электрооптическое отклонение лазерного излучения.

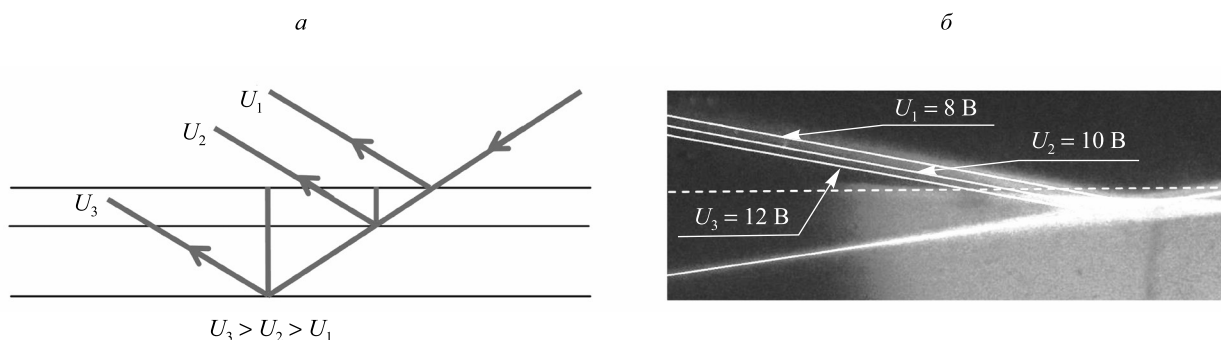


Рис. 7. Смещение точки отражения и траектории лазерного излучения с ростом амплитуды напряжения: а – схематическое представление; б – экспериментальная фотография

Таким образом, были созданы и исследованы ЖК-ячейки с ортогональной ориентацией директора НЖК-молекул в двух смежных областях. Экспериментально изучен эффект полного внутреннего отражения линейно-поляризованного лазерного излучения от электрически управляемой границы двух ориентаций директора НЖК. Проведенные исследования демонстрируют возможность пространственно-поляризационного разделения и переключения ортогональных мод лазерного излучения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (*REFERENCES*)

1. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи. СПб., 2010.
2. Papadimitriou G. I., Papazoglou C., Pomportsis A. S. Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures // *J. Lightwave Technol.* 2003. Vol. 21, № 2. P. 384–405 [Papadimitriou G. I., Papazoglou C., Pomportsis A. S. Optical Switching: Switch Fabrics, Techniques, and Architectures. *J. Lightwave Technol.* 2003. Vol. 21, No. 2. P. 384–405 (in Engl.)].
3. Kazak A. A., Tolstik A. L., Melnikova E. A., Komar A. A. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements // *Nonlinear Phenom. Complex Syst.* 2013. Vol. 16, № 3. P. 302–308 [Kazak A. A., Tolstik A. L., Melnikova E. A., Komar A. A. Operation with laser radiation by using of liquid crystal elements. *Nonlinear Phenom. Complex Syst.* 2013. Vol. 16, No. 3. P. 302–308 (in Engl.)].
4. Оленская И. И., Кabanova O. S., Мельникова Е. А. Жидкокристаллические волноводные элементы с различной топологией модуляции границы раздела рефрактивных областей // *Изв. Самар. науч. центра РАН.* 2015. Т. 17, № 2. С. 87–91 [Olenskaya I. I., Kabanova O. S., Melnikova E. A. Liquid Crystal Waveguide Elements With Different Topology of Modulation of Interface Refractive Areas. *Proc. Samara Sci. Cent. RAS.* 2015. Vol. 17, No. 2. P. 87–91 (in Russ.)].
5. Kabanova O. S., Melnikova E. A., Olenskaya I. I., Tolstik A. L. Electrically Controlled Waveguide Liquid Crystal Elements // *Tech. Phys. Lett.* 2014. Vol. 40, № 7. P. 598–600 [Kabanova O. S., Melnikova E. A., Olenskaya I. I., Tolstik A. L. Electrically Controlled Waveguide Liquid Crystal Elements. *Tech. Phys. Lett.* 2014. Vol. 40, No. 7. P. 598–600 (in Engl.)].
6. Chigrinov V. G., Kwok H.-S., Hasebe H., Takatsu H., Takada H. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes // *J. Soc. Inf. Displ.* 2008. Vol. 16, № 9. P. 897–904 [Chigrinov V. G., Kwok H.-S., Hasebe H., Takatsu H., Takada H. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes. *J. Soc. Inf. Displ.* 2008. Vol. 16, No. 9. P. 897–904 (in Engl.)].
7. Mikulich V., Murauski A., Muravsky A., Agabekov V., Bezruchenko V. Waterproof material for liquid crystals photoalignment based on azo dyes // *J. Soc. Inf. Displ.* 2014. Vol. 22, № 4. P. 199–203 [Mikulich V., Murauski A., Muravsky A., Agabekov V., Bezruchenko V. Waterproof material for liquid crystals photoalignment based on azo dyes. *J. Soc. Inf. Displ.* 2014. Vol. 22, No. 4. P. 199–203 (in Engl.)].
8. Блинов Л. М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М., 1978.

Статья поступила в редколлегию 26.02.2016.
Received by editorial board 26.02.2016.