

ОРИЕНТАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕМ СВЕТА В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДАХ

С. С. СЛЮСАРЕНКО¹⁾, Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾, О. С. КАБАНОВА¹⁾,
И. И. РУШНОВА¹⁾, А. Л. ТОЛСТИК¹⁾

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

Аннотация. Рассмотрены методы контролируемого возбуждения волноводного распространения света в планарных нематических жидкокристаллических элементах. Продемонстрированы два метода реализации управляемого волноводного режима в нематическом слое жидкого кристалла: 1) электрически контролируемый поляризационно зависимый волноводный режим распространения света в жидкокристаллических элементах с начальной твист-планарной ориентацией директора; 2) индуцированная светом переориентация директора жидкого кристалла, легированного красителем метиловым красным.

Ключевые слова: жидкие кристаллы; волноводы; управление светом.

Образец цитирования:

Слюсаренко СС, Мельникова ЕА, Кабанова ОС, Рушнова ИИ, Толстик АЛ. Ориентационное управление распространением света в жидкокристаллических волноводах. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2025;2:41–48.
EDN: DTSEXE

For citation:

Slussarenko SS, Melnikova EA, Kabanova OS, Rushnova II, Tolstik AL. Orientation control of light propagation in liquid crystal waveguides. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2025;2:41–48. Russian.
EDN: DTSEXE

Авторы:

Сергей Сергеевич Слюсаренко – кандидат физико-математических наук, доцент; доцент кафедры ядерной физики физического факультета.

Елена Александровна Мельникова – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Ольга Сергеевна Кабанова – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий кафедрой высшей математики и математической физики физического факультета.

Ирина Ивановна Рушнова – кандидат физико-математических наук, доцент; старший научный сотрудник кафедры высшей математики и математической физики физического факультета.

Алексей Леонидович Толстик – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий кафедрой лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:

Sergei S. Slussarenko, PhD (physics and mathematics), docent; associate professor at the department of nuclear physics, faculty of physics.

slussarenko@yahoo.com

<https://orcid.org/0000-0002-0583-4632>

Elena A. Melnikova, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

melnikova@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-5097-5832>

Olga S. Kabanova, PhD (physics and mathematics), docent; head of the department of higher mathematics and mathematical physics, faculty of physics.

kabanovaos@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-5100-9708>

Irina I. Rushnova, PhD (physics and mathematics), docent; senior researcher at the department of higher mathematics and mathematical physics, faculty of physics.

rushnovabsu@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1049-1953>

Alexei L. Tolstik, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

tolstik@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0003-4953-4890>

ORIENTATION CONTROL OF LIGHT PROPAGATION IN LIQUID CRYSTAL WAVEGUIDES

S. S. SLUSSARENKO^a, E. A. MELNIKOVA^a, O. S. KABANOVA^a,
I. I. RUSHNOVA^a, A. L. TOLSTIK^a

^aBelarusian State University, 4 Niezaliezhnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

Corresponding author: S. S. Slussarenko (slussarenko@yahoo.com)

Abstract. Methods to control the light beams in planar nematic liquid crystal elements have been considered. The two methods for realisation of the controlled wave-guide mode in a nematic layer of the liquid crystal have been demonstrated. The first method enables one to control the wave-guide light propagation mode in liquid crystal elements with the initial twist-planar orientation of the director. Such orientation makes it possible to realise the polarisation-sensitive mode of the radiation wave-guide propagation in the visible spectral range. The excitation and electric control conditions for the wave-guide mode in the case of polarised laser radiation have been analysed theoretically and tested experimentally. By the second method the wave-guide mode is due to the light-induced director reorientation in the liquid crystal doped with the methyl red dye. The method is based on processes of the anisotropic dye adsorption on one of the bounding surfaces in a liquid crystal cell and on the molecular orientation of the dye under the effect of polarised radiation. The dye molecules act as an orientant for the molecules of the liquid crystal, making it possible to form the local twist-structures whose refractive index for the specific light polarisation is different from that for the nonilluminated region.

Keywords: liquid crystals; waveguides; light control.

Введение

Широкое использование оптических методов передачи информации требует разработки компактных оптоэлектронных переключателей для оптических сигналов [1–3]. Нематические жидкие кристаллы (НЖК) с высокой величиной анизотропии показателя преломления ($\Delta n \sim 0,10\text{--}0,25$) и возможностью ее изменения под действием внешних электрических и световых полей позволили применить их в качестве функциональной электрооптической среды в управляемых переключателях света.

В последнее время отмечается интерес ведущих научных групп к исследованию распространения света в планарной геометрии в жидкокристаллическом слое с рефрактивной границей доменных областей, различающихся направлением ориентации директора НЖК. Новый подход, который предлагает управление светом в плоскости жидкокристаллического слоя, считается значительным достижением в технологии устройств управления лазерными пучками. По сравнению с объемными пропускающими жидкокристаллическими управляющими устройствами основным преимуществом этого подхода является значительное увеличение длины взаимодействия между жидкокристаллической средой и световыми пучками. В случае распространения пучка в плоскости элемента длина взаимодействия не ограничивается толщиной жидкокристаллического слоя и свет не проходит через электроды. Использование планарной геометрии распространения светового пучка в НЖК позволило разработать и успешно продемонстрировать жидкокристаллические устройства на основе полного внутреннего отражения (ПВО) для управления лазерным пучком в плоскости жидкокристаллического элемента. Принцип действия таких устройств основан на ПВО световых лучей на рефрактивной границе в жидкокристаллическом слое, которая разделяет домены с различной ориентацией директора. На границе двух таких ориентационных доменов можно реализовать отражение и преломление лазерного излучения [4–7].

В упомянутых работах экспериментальная реализация эффекта ПВО на рефрактивной границе смежных доменных областей НЖК осуществлялась в условиях электрического перехода Фредерикса, который проявлялся в области узкого (около 100 мкм) электрода либо в области электрода сложной формы.

В настоящей статье предложен и апробирован принципиально новый метод создания в слое НЖК условия формирования волноводного распространения линейно поляризованного света, не требующий нанесения на одну из поверхностей элемента электрода заданной конфигурации, что намного упрощает технологию изготовления волноводного элемента.

Для реализации управляемого волноводного режима распространения электромагнитного излучения в объеме НЖК различными способами формировались периодически ориентированные микрообласти. В первом случае необходимая топология ориентации жидких кристаллов в электрически управляемых элементах осуществлялась на основе метода текстурированной фотоориентации. Данный метод заключается в том, что наведенная в ориентирующем светочувствительном слое элемента НЖК поверхностная анизотропия позволяет создать в объеме жидкокристаллического слоя начальную микропериодическую

твист-планарную ориентацию директора, обеспечивающую условие формирования волноводных каналов для линейно поляризованного электромагнитного излучения.

Разработанные электрически управляемые волноводные анизотропные элементы представляют собой жидкокристаллическую ячейку типа «сэндвич» [8]. Толщина слоя НЖК составляла $d = 20$ мкм. Использовался НЖК ВИН-9 с анизотропией показателя преломления $\Delta n = 0,18$, $n_e = 1,67$, $n_o = 1,49$ на длине волны $\lambda = 632,8$ нм.

На рис. 1 показана твист-планарная ориентация директора жидкокристаллического слоя и преломляющие свойства структуры НЖК для распространения линейно поляризованной ($\vec{E} \parallel y$) электромагнитной волны, волновой вектор которой ($\vec{k}$) направлен по оси z .

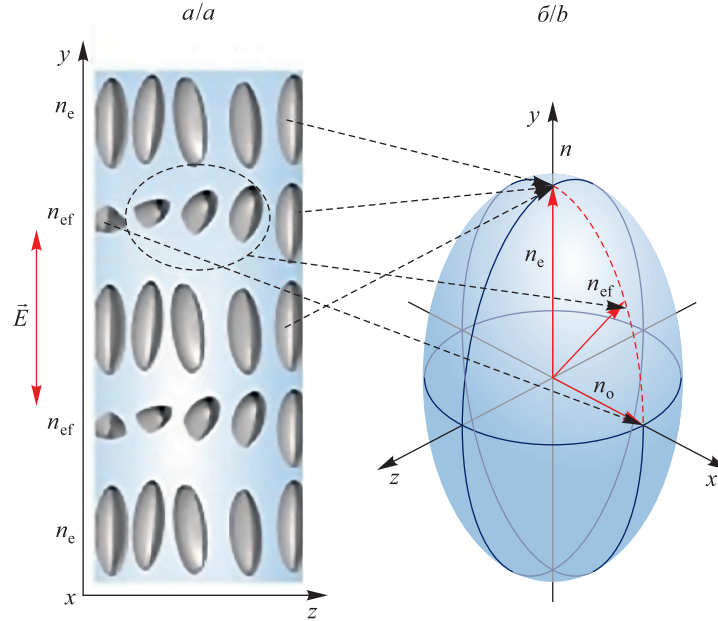


Рис. 1. Ориентация директора жидкого кристалла в волноводной структуре и ее оптические свойства: a – чередование планарных и твист-ориентаций директора; b – оптическая индикатриса НЖК

Fig. 1. Orientation of the liquid crystal director in the waveguide structure and its optical properties: a – alternation of planar and twist structures of the director orientation; b – optical indicatrix of the nematic liquid crystal

Как видно из рис. 1, для линейно поляризованного света эффективный показатель преломления $n_{\text{ef}}(x)$ в твист-областях жидкокристаллического слоя определяется азимутальным углом закрутки директора $\Psi(x)$ по толщине жидкокристаллического слоя, а для рассматриваемой геометрии ($\vec{E} \parallel y$, $\vec{k} \parallel z$) этот показатель совпадает с углом между векторами $\vec{E}$ и $\vec{n}$ и согласно выражению [9] рассчитывается как

$$n_{\text{ef}}(x) = \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \psi(x) + n_e^2 \sin^2 \psi(x)}},$$

где $\psi(x) = \frac{\pi x}{2d}$ – распределение азимутального угла ориентации директора жидкого кристалла по толщине жидкокристаллического слоя d .

На рис. 2 представлен график зависимости эффективного показателя преломления $n_{\text{ef}}(x)$ для твист-области по толщине жидкокристаллического слоя ($d = 20$ мкм). Из рис. 2 видно, что твист-домен имеет градиент показателя преломления по координате x .

Таким образом, в области твист-доменов для волны с s -поляризацией значение показателя преломления по толщине жидкокристаллического слоя $n_{\text{ef}}(x)$ составляет от $n_e = 1,67$ до $n_o = 1,49$, что определяет возможность реализации волноводного НЖК-канала при использовании твист-домена в качестве оболочки, а также при использовании планарно ориентированного жидкокристаллического домена в качестве сердцевины жидкокристаллического волноводного канала ($n_{\text{серцевина}} = n_e = 1,67$).

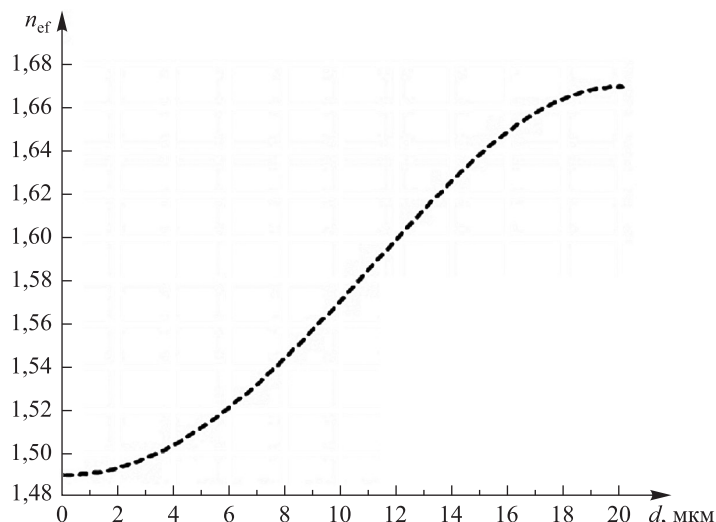


Рис. 2. График зависимости эффективного показателя преломления твист-области от толщины жидкокристаллического слоя

Fig. 2. Graph of the dependence of the effective refractive index of the twist region on the thickness of the liquid crystal layer

Выражение для оценки числовой апертуры жидкокристаллического волноводного канала NA имеет вид

$$NA(x) = \frac{1}{n_{\text{воздух}}} \sqrt{n_e^2 - \frac{n_e^2 n_o^2}{n_o^2 \cos^2 \psi(x) + n_e^2 \sin^2 \psi(x)}}.$$

Приведенная зависимость указывает на изменение оптических параметров сформированной волноводной структуры по толщине НЖК-слоя. Для оценки эффективности ввода излучения в данную структуру мы ограничились рассмотрением сформированного волноводного канала как волновода со средним показателем преломления оболочки ($n_{\text{оболочка}} = \langle n_{\text{ef}}(x) \rangle$). Средний эффективный показатель преломления по толщине НЖК-слоя x составляет величину $\langle n_{\text{ef}}(x) \rangle = 1,58$. Оценка проводилась по формуле [9]

$$\langle n_{\text{ef}}(x) \rangle = \frac{1}{d} \int_0^d \frac{n_e n_o}{\sqrt{n_o^2 \cos^2 \psi(x) + n_e^2 \sin^2 \psi(x)}} dx. \quad (1)$$

При данной оценке показателя преломления оболочки волноводного канала числовая апертура жидкокристаллического волновода принимает значение $NA = 0,54$. Для условий эксперимента (длина волны $0,63$ мкм, радиус перетяжки вводимого в волновод излучения $r_0 = 5$ мкм, толщина волноводного слоя 10 мкм) эффективность ввода излучения в волокно без учета френелевского отражения, оцененная как квадрат отношения величины числовой апертуры жидкокристаллического волновода и половины угла конуса фокусировки излучения, составляет величину, близкую к 100% .

На рис. 3 представлена методика подготовки подложек при создании волноводного элемента НЖК. Подготовка ориентирующих покрытий 2, нанесенных на стеклянные подложки 3 с электропроводящим слоем ИТО 4, осуществлялась путем экспонирования фотополимерных слоев серии Б линейно поляризованным ультрафиолетовым излучением на длине волны $\lambda = 254$ нм [10].

Поляризатор I обеспечивал необходимое направление плоскости поляризации активирующего излучения, плотность оптической мощности которого после прохождения поляризатора составляла величину $I = 4$ мВт/см². Время экспозиции фотополимерных слоев составляло $t = 25$ с, что обеспечивало достаточную дозу облучения ($D = 100$ мДж · см⁻²) для достижения величины энергии сцепления жидкого кристалла с ориентирующим полимерным слоем $E_{\phi} = 1,4 \cdot 10^{-5}$ Дж · м⁻².

Создание эффективной рефрактивной границы твист-планарной ориентации директора жидкого кристалла позволяет реализовать волноводный режим распространения линейно поляризованного света. Средний эффективный показатель преломления в твист-домене для p -поляризационной моды составляет $1,58$, что дает возможность использовать его как сердцевину волноводного канала с планарным доменом в качестве оболочки с показателем преломления $1,49$ на длине волны генерации гелий-неонового лазера.

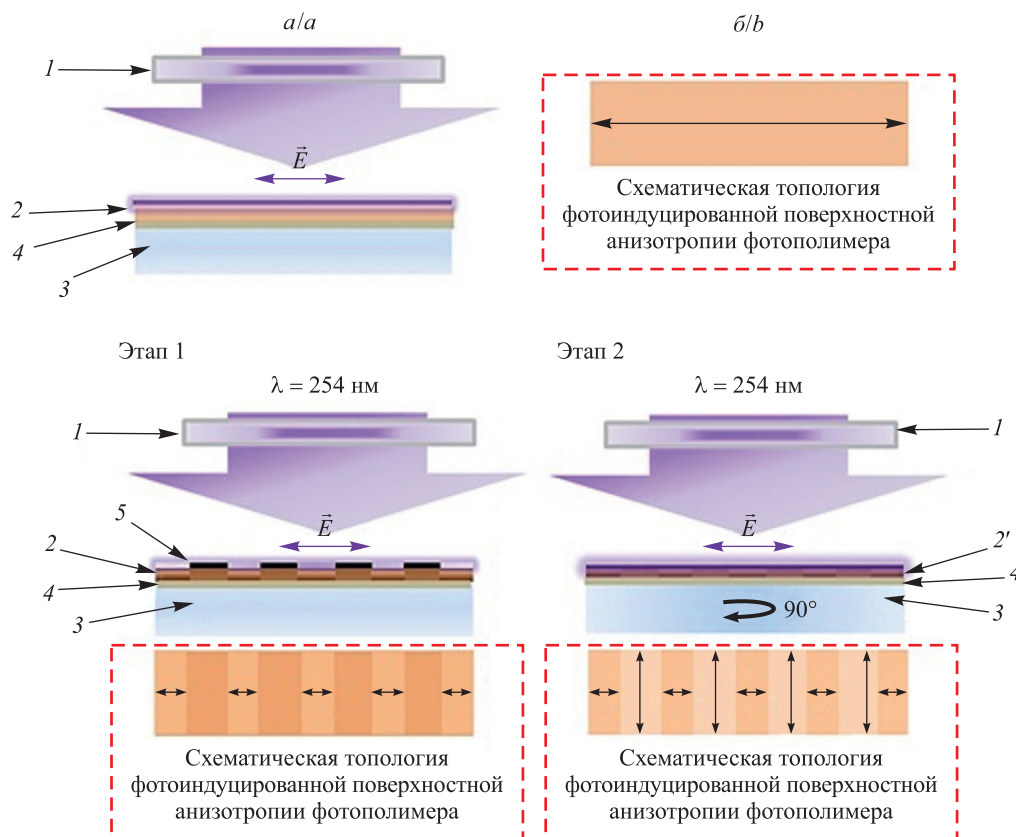


Рис. 3. Методика подготовки подложек волноводного элемента НЖК: *a* – подготовка подложки 1 для формирования однородной поверхностной анизотропии фотополимерного слоя, *б* – подготовка подложки 2 для формирования микроструктурированной двухдоменной поверхностной анизотропии фотополимерного слоя; 1 – поляризатор, 2, 2' – фотополимерный слой, 3 – стеклянная подложка, 4 – прозрачный электрод (ИТО), 5 – амплитудный кварцевый транспарант ($\Lambda = 20$ мкм)

Fig. 3. Method for preparing cladding of a nematic liquid crystal waveguide element: *a* – preparation of cladding 1 for the formation of uniform surface anisotropy of the photopolymer layer, *b* – preparation of cladding 2 for the formation of microstructured two-domain surface anisotropy of the photopolymer layer; 1 – polariser, 2, 2' – photopolymer layer, 3 – glass substrate, 4 – transparent electrode (ITO), 5 – amplitude quartz transparency ($\Lambda = 20$ μm)

На рис. 4 представлены результаты экспериментального исследования по реализации электрически управляемого волноводного распространения излучения в описанной волноводной структуре. Излучение гелий-неонового лазера с расходимостью пучка 1,2 мрад вводилось планарно в торец жидкокристаллического волноводного элемента толщиной $d = 20$ мкм. Для согласования диаметра пучка с размерами жидкокристаллического волновода использовался объектив с увеличением $\times 20$. Диаметр перетяжки световых пучков на входе в жидкокристаллическую ячейку составлял $2r_0 \approx 8-10$ мкм. Картина распространения лазерного излучения в жидком кристалле регистрировалась по рассеянному в жидкокристаллическом слое световому сигналу ПЗС-матрицей с пространственным разрешением 1280×960 пк.

Как видно из рис. 4, электрическое поле позволяет управлять характером распространения лазерного излучения в жидкокристаллическом слое и переключать режим волноводного распространения светового сигнала в режим оптического ослабления, при котором исчезает волноводный канал и пучок испытывает дифракционное расплывание. Подобная ситуация имеет место при напряжениях, превышающих 3 В. При таких значениях напряжения происходит заметная переориентация директора жидкого кристалла.

Отметим, что реализацию микроструктурированных областей ориентации директора можно создать не только задавая начальные условия ориентации на подложках, но и используя микроструктурированный электрод на одной из подложек элемента, как было показано в работах [11–14].

Еще одним методом создания волноводного канала в жидкокристаллическом слое является изменение начальной ориентации директора посредством экспозиции линейно поляризованным излучением композита НЖК – азокраситель в уже собранной жидкокристаллической ячейке с планарно ориентированным директором жидкого кристалла [15]. Этот метод использовали для возбуждения волноводного режима распространения света в жидкокристаллической ячейке. Изготовленный волноводный жидкокристаллический элемент на одной из подложек имеет слабую энергию сцепления (поверхность изотропна для директора

жидкого кристалла). При освещении поляризованным светом со стороны этой подложки происходит ряд процессов, связанных с адсорбцией красителя на поверхности [16] и приводящих к изменению ориентации директора на исходно изотропной поверхности. По мере трансляции по толщине жидкокристаллического слоя угол переориентации директора относительно начальной ориентации уменьшается и становится равным нулю на подложке с большой энергией сцепления. Таким образом, в активированных областях создается твист-ориентация жидкого кристалла.

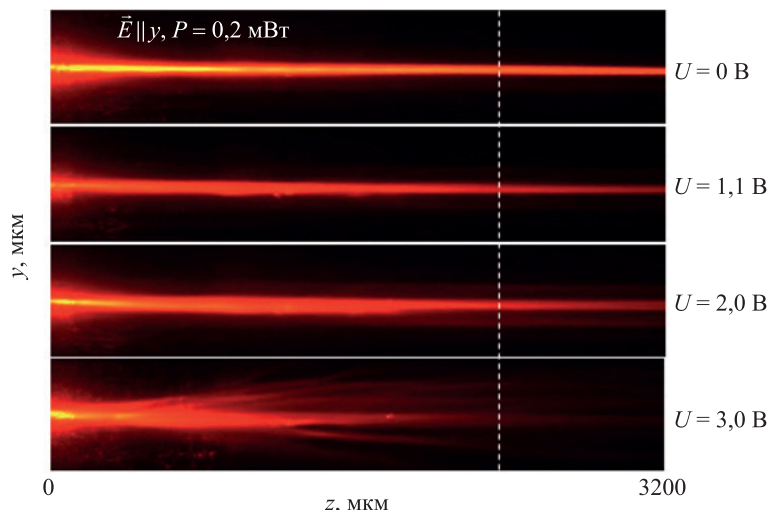


Рис. 4. Распространение света в электрически управляемом микроструктурированном жидкокристаллическом элементе при различной величине управляющего напряжения на волноводном элементе НЖК

Fig. 4. Light propagation in an electrically controlled microstructured liquid crystal element with different values of control voltage on the nematic liquid crystal waveguide element

Эксперимент проводился с ячейками, заполненными нематиком 5СВ (от $n_e = 1,71$ до $n_o = 1,53$), легированным красителем метиловым красным (0,5 %). Одна из ограничивающих подложек была сделана с малой энергией сцепления (на покрытое ИТО стекло наносился поли(винил)циннамат без дополнительного изменения поверхностной энергии сцепления). Вторая пластина была подготовлена для стандартной планарной ориентации (нанесение полиимида центрифугированием – отверждение – натирание) на покрытом ИТО стекле. Толщина ячейки составляла около 25 мкм. Создание переориентированной области достигалось экспозицией с помощью Ag^+ -лазера (514,5 нм, 5 мВт), сфокусированного цилиндрической линзой ($f = 3$ см). Поляризация лазерного луча была параллельна длинной оси фокусного пятна, ориентированного под 45° относительно направления начальной планарной ориентации директора. Таким образом, в области активации ориентация директора имела твист-характер с величиной закрутки директора $\frac{\pi}{4}$. Время экспозиции составляло около 5 мин. На рис. 5 представлена фотография в скрещенных поляризаторах сформированной переориентированной области жидкокристаллического слоя.

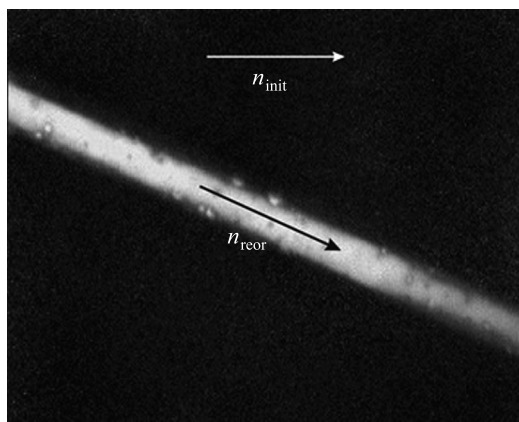


Рис. 5. Фотография в скрещенных поляризаторах сформированной переориентированной области жидкокристаллического слоя

Fig. 5. Photograph of the formed reoriented region of the liquid crystal layer in crossed polarisers

Волноводные моды возбуждались аналогично вышеописанному способу при фокусировке излучения гелий-неонового лазера с помощью линзы ($f = 5$ см) в торец жидкокристаллического элемента (рис. 6). Диаметр перетяжки сфокусированного на торце элемента лазерного излучения с расходимостью пучка 1 мрад составлял 20 мкм. Вектор поляризации вводимого в элемент излучения ориентирован перпендикулярно направлению директора планарно ориентированного жидкокристаллического слоя, заданному при изготовлении элемента. Показатель преломления света при такой геометрии в области жидкокристаллического слоя соответствует показателю преломления для обыкновенной волны, который для использованного НЖК имеет величину $n_o = 1,53$. В области жидкого кристалла, где присутствует изменение ориентации жидкого кристалла по глубине (твист-структура), показатель преломления определяется средним эффективным показателем, величина которого согласно формуле (1) составляет $\langle n_{\text{ef}}(x) \rangle = 1,57$. Таким образом, для данной геометрии ориентации директора область твист-ориентации служит сердцевиной, а внешняя часть жидкокристаллического слоя – оболочкой оптического волновода.

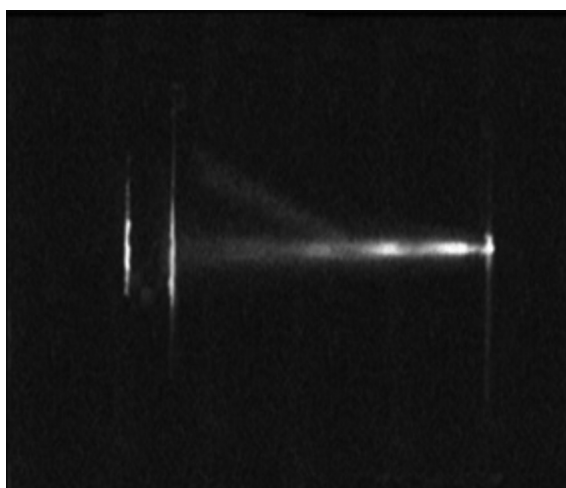


Рис. 6. Изменение распространения света в планарном волноводе в случае наличия зоны с твист-структурой

Fig. 6. Change in light propagation in a planar waveguide in the presence of a zone with a changed orientation (twist structure)

В точке входа излучения в волновод диаметр пучка составил 100 мкм. На рис. 6 видно, что при такой геометрии распространения часть пучка, попадающая в условия ПВО, захватывается оптически наведенным волноводным каналом. При этом первоначально прямолинейное распространение светового пучка в плоском жидкокристаллическом слое меняется при воздействии излучения аргонового лазера, переориентирующего директор жидкого кристалла в освещенной области и создающего волноводную структуру.

Заключение

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность управления волноводным режимом распространения света в жидкокристаллическом слое. Предложены два метода возбуждения волноводных режимов распространения световых пучков. Один метод основан на формировании оптических волноводов за счет пространственно модулированной ориентации директора жидкого кристалла с возможностью электрического управления. Второй метод использует фотостимулированную переориентацию директора жидкого кристалла, активированного красителем метиловым красным, позволяя оптически переключать волноводный режим распространения светового пучка. Предложенные методы могут быть использованы при разработке интегральных фотонных схем для связи между различными функциональными компонентами в качестве реконфигурируемых волноводных каналов.

Библиографические ссылки

1. Papadimitriou GI, Papazoglou C, Pomportsis AS. Optical switching: switch fabrics, techniques, and architectures. *Journal of Lightwave Technology*. 2003;21(2):384–405. DOI: 10.1109/JLT.2003.808766.
2. Kwok H-S, Naemura S, Ong HL, editors. *Progress in liquid crystal science and technology: in honor of Shunsuke Kobayashi's 80th birthday*. Singapore: World Scientific; 2013. XII, 704 p. (Ong HL, editor. Series on liquid crystals; volume 4). DOI: 10.1142/8571.
3. Chigrinov VG. *Liquid crystal photonics: engineering tools, techniques and tables*. New York: Nova Science Publishers; 2014. 204 p.

4. Peccianti M, Dyadyusha A, Kaczmarek M, Assanto G. Tunable refraction and reflection of self-confined light beams. *Nature Physics*. 2006;2(11):737–742. DOI: 10.1038/nphys427.
5. Piccardi A, Alberucci A, Assanto G. Nematicons and their electro-optic control: light localization and signal readdressing via re-orientation in liquid crystals. *International Journal of Molecular Sciences*. 2013;14(10):19932–19950. DOI: 10.3390/ijms141019932.
6. Maksimochkin AG, Pasechnik SV, Tsvetkov VA, Yakovlev DA, Maksimochkin GI, Chigrinov VG. Electrically controlled switching of light beams in the plane of liquid crystal layer. *Optics Communications*. 2007;270(2):273–279. DOI: 10.1016/j.optcom.2006.09.014.
7. Melnikova EA, Tolstik AL, Rushnova II, Kabanova OS, Muravsky AA. Electrically controlled spatial-polarization switch based on patterned photoalignment of nematic liquid crystals. *Applied Optics*. 2016;55(23):6491–6495. DOI: 10.1364/AO.55.006491.
8. Томилини МГ, Невская ГЕ. *Фотоника жидких кристаллов*. Санкт-Петербург: Издательство Политехнического университета; 2011. 741 с.
9. Блинов ЛМ. *Электро- и магнитооптика жидких кристаллов*. Москва: Наука; 1978. 384 с.
10. Mahilny UV, Stankevich AI, Trofimova AV, Muravsky AA, Murauski AA. Photosensitive polymers for liquid crystal alignment. *Physics Procedia*. 2015;73:121–125. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.131.
11. Кabanova OC, Мельникова ЕА, Оленская ИИ, Толстик АЛ. Электрически управляемые волноводные жидкокристаллические элементы. *Письма в Журнал технической физики*. 2014;40(14):30–35. EDN: SNWFSX.
12. Оленская ИИ, Кabanova OC, Мельникова ЕА. Жидкокристаллические волноводные элементы с различной топологией модуляции границы раздела рефрактивных областей. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015;17(2):87–91. EDN: UHLMIB.
13. Rushnova II, Kabanova OS, Melnikova EA, Tolstik AL. Integrated-optical nematic liquid crystal switches: designing and operation features. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2018;21(3):206–219. EDN: YOEHFR.
14. Rushnova II, Melnikova EA, Kabanova OS, Tolstik AL, Muravsky AA. Fringe field-tunable LC refractive index interface for in-plane beam steering applications. *Applied Optics*. 2020;59(34):10695–10699. DOI: 10.1364/AO.409688.
15. Simoni F, Francescangeli O, Reznikov Y, Slussarenko S. Dye-doped liquid crystals as high-resolution recording media. *Optics Letters*. 1997;22(8):549–551. DOI: 10.1364/OL.22.000549.
16. Slussarenko S, Melnikova E, Tolstik A. Dynamics of light-induced reorientation in planar cell filled with the azo-dye doped nematic liquid crystal. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2024;27(4):335–340. DOI: 10.5281/zenodo.14508724.

Получена 04.03.2025 / исправлена 07.03.2025 / принята 25.03.2025.

Received 04.03.2025 / revised 07.03.2025 / accepted 25.03.2025.