

УДК 532.783;535.326;535.3

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СВЕТА В СИСТЕМЕ СВЯЗАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

О. С. КАБАНОВА¹⁾, Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾

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

Отмечено, что оптические жидкокристаллические системы с пространственной модуляцией показателя преломления являются перспективной технологической платформой для создания современных фотонных устройств с расширенными функциональными характеристиками. Представлен способ создания дискретной волноводной жидкокристаллической структуры с электрически управляемой глубиной модуляции показателя преломления для осуществления пространственного управления световыми полями. Перестройка оптических параметров разработанной волноводной системы осуществлялась на основе электрооптического и нелинейно-оптического отклика жидкокристаллической среды. Экспериментально установлено, что для светового пучка низкой мощности, поляризованного как необыкновенная волна, реализуются направляющие (волноводные) свойства при его распространении в рассматриваемой системе электрически индуцированных жидкокристаллических волноводов. Показано, что для светового пучка высокой мощности имеет место режим дискретной дифракции в пределах системы связанных оптических жидкокристаллических волноводов, позволяющий осуществить перераспределение световой энергии между заданным числом волноводных каналов.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл; волноводное распространение; оптическая анизотропия; модуляция показателя преломления.

LIGHT PROPAGATION IN A SYSTEM OF COUPLED OPTICAL LIQUID-CRYSTAL WAVEGUIDES

O. S. KABANOVA^a, E. A. MELNIKOVA^a

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

Corresponding author: O. S. Kabanova (kabanovaos@bsu.by)

Optical liquid crystal (LC) systems with spatial modulation of the refractive index are highly promising as a technological platform for the creation of modern photonic devices of the enhanced functionality. This paper presents a method to create a discrete LC waveguide structure with the electrically controlled depth of the refractive index modulation enabling the spatial control of light fields. Tuning of the optical parameters for the developed waveguide system has been realized on the basis of the electrooptical and nonlinear-optical response of the nematic LC medium. It has been established

Образец цитирования:

Кабанова О. С., Мельникова Е. А. Распространение света в системе связанных оптических жидкокристаллических волноводов // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2018. № 1. С. 18–24.

For citation:

Kabanova O. S., Melnikova E. A. Light propagation in a system of coupled optical liquid-crystal waveguides. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2018. No. 1. P. 18–24 (in Russ.).

Авторы:

Ольга Сергеевна Кабанова – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории нелинейной оптики и спектроскопии физического факультета.

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

Authors:

Olga S. Kabanova, junior researcher at the research laboratory of nonlinear optics and spectroscopy, faculty of physics.

kabanovaos@bsu.by

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

melnikova@bsu.by

experimentally that in the case of a low-intensity light beam, polarized as an extraordinary wave, one can implement its guided propagation in the described system of electrically induced LC waveguides. It has been shown that the discrete diffraction mode realized for a high-intensity light beam in the system of coupled optical LC waveguides allows for redistribution of the luminous energy between the specified waveguide channels.

Key words: nematic liquid crystal; waveguide propagation; optical anisotropy; refractive index modulation.

Введение

В последнее десятилетие активно исследуются особенности проявления линейных и нелинейных эффектов в дискретных оптических системах, представляющих собой фотонные структуры с пространственной модуляцией показателя преломления [1–7]. Проектирование дискретных систем на базе функциональных материалов, обладающих специальными оптическими свойствами, позволяет существенно улучшить эксплуатационные характеристики изготавливаемых фотонных устройств. В частности, для создания дискретных систем с настраиваемыми оптическими параметрами успешно используются нематические жидкие кристаллы (НЖК).

Аномально высокая величина оптической анизотропии НЖК, управляемая действием низких электрических напряжений (несколько единиц вольт) [8; 9], позволяет реализовать на практике дискретные жидкокристаллические (ЖК) структуры с перестраиваемой глубиной модуляции показателя преломления. Также НЖК доказали свою важность для нелинейной оптики: изучение взаимодействия НЖК со светом привело к обнаружению гигантской оптической нелинейности, превышающей на 8–9 порядков керровскую нелинейность обычных жидкостей [10]. Под действием поляризованного света при сравнительно низких уровнях интенсивности лазерного излучения (~ 1 кВт/см²) осуществлялось оптическое управление направлением директора НЖК (светоиндуцированный переход Фредерикса) [11–13], что привело к созданию нового класса фотонных устройств.

Выраженный электрооптический отклик НЖК позволяет преобразовать планарный НЖК-слой в одномерный массив волноводов. Так, в условиях присутствия внешнего, пространственно модулированного электрического поля в пределах НЖК-слоя формируется дискретная структура с управляемой глубиной контраста показателя преломления. Для излучения, поляризованного как необыкновенная волна, реализуются направляющие (волноводные) свойства при его распространении в рассматриваемой системе электрически индуцированных НЖК-волноводов [14].

Цель настоящей работы – создание дискретной системы связанных оптических НЖК-волноводов с электрически контролируемой глубиной модуляции показателя преломления для пространственного управления световыми полями.

Материалы и методы исследований

Для создания пространственной модуляции показателя преломления в пределах НЖК-слоя использовалась планарная ячейка типа сэндвича, содержащая на нижней подложке непрозрачный электропроводящий слой хрома гребнеобразной формы. Переключение НЖК-ячейки из планарного волновода в одномерную систему идентичных, слабо связанных оптических волноводов осуществлялось при помощи внешнего низкочастотного электрического напряжения U .

Принцип формирования системы электрически индуцируемых оптических волноводов (период структуры $\Lambda = 40$ мкм) в НЖК-ячейке с начальной планарной ориентацией директора проиллюстрирован на рис. 1.

В качестве сердцевины планарного волновода использовался слой НЖК-материала с положительной диэлектрической анизотропией ($\epsilon_{\parallel} > \epsilon_{\perp}$), находящийся между двумя плоскопараллельными стеклянными пластинами (подложками). Толщина НЖК-слоя определялась величиной зазора между подложками и равнялась 100 мкм. Показатели преломления НЖК-материала, использованного в работе, для лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 532$ нм составляли: $n_e = 1,70$ – для необыкновенной световой волны и $n_o = 1,52$ – для обыкновенной световой волны. Начальная планарная ориентация директора НЖК (рис. 1) вдоль оси z (т. е. вдоль направления распространения световой волны) на поверхностях верхней и нижней подложек реализована при помощи технологии фотостимулированного натирания фотополимерного ориентирующего слоя [15].

Для наблюдения за распространением световых пучков в НЖК-слое в плоскости yz в качестве верхней подложки использовалось стекло, равномерно покрытое прозрачным электропроводящим слоем оксида индия и олова толщиной 50 нм. Нанесение текстурированного электропроводящего слоя хрома в форме гребня на нижнюю подложку ЖК-ячейки осуществлялось методом лазерной литографии. Отношение ширины электропроводящих полос хрома к величине зазора между ними составляло 1. Геометрия выбранной текстуры электропроводящего слоя позволяет сформировать пространственно

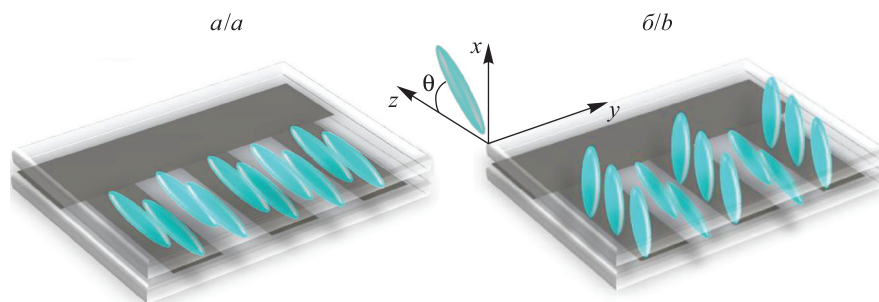


Рис. 1. Принцип формирования системы электрически индуцированных волноводов в НЖК-ячейке:
 $U = 0$ (а); $U > U_{\text{пор}}$ (б); $U_{\text{пор}}$ – пороговое напряжение перехода Фредерикса; θ – угол преднаклона директора НЖК

Fig. 1. The principle of the formation of a system of electrically induced waveguides in NLC-cell:
 $U = 0$ (a); $U > U_{\text{th}}$ (b); U_{th} – threshold voltage of the Fredericks transition;
 θ – pretilt angle of NLC director

модулированное напряжение по толщине НЖК-слоя (т. е. в направлении оси y). Под действием внешнего напряжения происходит переориентация директора ЖК-молекул в плоскости xz , что приводит к формированию модуляции показателя преломления в НЖК-слое вдоль направлений x и y . Так, при подключении внешнего электрического поля к ячейке в результате перехода Фредерикса в пределах НЖК-слоя формируется волноводное распределение показателя преломления для линейно-поляризованной световой волны ($\mathbf{E} \parallel x$), как показано на рис. 1. Электрически индуцированная система оптических волноводов состоит из идентичных параллельных каналов, слабо связанных между собой вдоль направления оси y . Коэффициент связи НЖК-волноводов зависит от величины управляющего напряжения. Перестройка оптических параметров представленной системы связанных волноводов осуществляется на основе электрооптического отклика и (или) нелинейно-оптического отклика НЖК-среды.

Формирование в НЖК-слое периодической решетки показателя преломления, представляющей собой волноводную систему, было проверено экспериментально с помощью поляризационного микроскопа, изучающего объекты в проходящем свете. На рис. 2 представлены поляризационные микрофотографии (поляризаторы скрещены) НЖК-ячейки с электрически индуцированной системой оптических волноводов. В соответствии с рис. 2, а, при отсутствии внешнего напряжения наблюдается однородная планарная ориентация директора в объеме НЖК-слоя, что обуславливает минимальное светопропускание ячейки. При приложении напряжения к электродам ячейки происходит формирование периодической решетки показателя преломления в НЖК-слое, как показано на рис. 2, б.

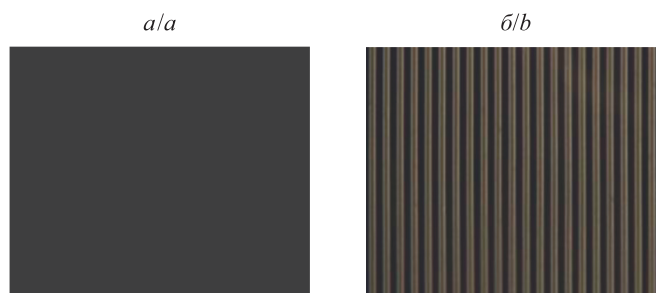


Рис. 2. Микрофотографии НЖК-решетки (вид сверху) в поляризованном свете (поляризаторы скрещены): $U = 0$ (а); $U > 0$ (б)

Fig. 2. Microphotographs of an NLC-lattice (top view) in polarized light (crossed polarizers): $U = 0$ (a); $U > 0$ (b)

Эксперименты были выполнены с помощью Nd : YAG-лазера с удвоенной частотой, работающего на длине волны $\lambda = 532$ нм. Для анализа пространственного распределения светового поля в дискретной НЖК-структуре использовался стандартный метод фиксации картины рассеяния лазерного излучения на неоднородностях ориентации директора жидкого кристалла [12]. Регистрация картины рассеяния светового пучка в плоскости yz осуществлялась с использованием высокоразрешающей светочувствительной камеры, сопряженной с микрообъективом. С помощью многофункционального измерительного комплекса «УНИПРО» (Россия) к электродам НЖК-ячейки подавалось переменное напряжение амплитудой 0–10 В с частотой следования импульсов $\nu = 1$ кГц.

Для экспериментального изучения распространения света в разработанной системе связанных оптических волноводов линейно-поляризованное лазерное излучение ($\mathbf{E} \parallel x$) с длиной волны $\lambda = 532$ нм мощностью $P = 0,5$ мВт фокусировалось при помощи микрообъектива в пятно диаметром $\omega_1 = 8$ мкм и направлялось в торец НЖК-ячейки – в область текстурированного электрода.

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментальные фотографии рассеяния светового пучка малой мощности в НЖК-ячейке при разных значениях управляющего напряжения представлены на рис. 3, а. Соответствующие зависимости профиля распределения интенсивности рассеянного света при длине распространения $z = 1,0$ мм от величины напряжения показаны на рис. 3, б.

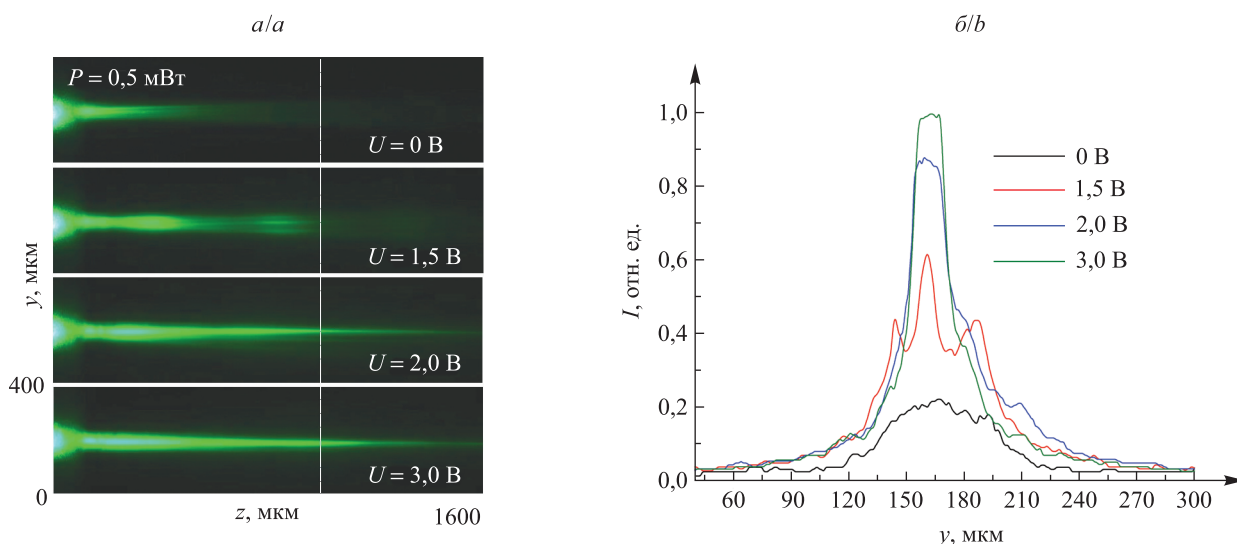


Рис. 3. Распространение лазерного излучения малой мощности ($\lambda = 532$ нм, $\mathbf{E} \parallel x$, $P = 0,5$ мВт) в системе электрически индуцируемых НЖК-волноводов при разных управляющих напряжениях (а); зависимость нормированных профилей распределения интенсивности $I(y)$ светового пучка в плоскости yz после длины распространения $z = 1,0$ мм в системе НЖК-волноводов при разных напряжениях (б)

Fig. 3. Propagation of the low-power laser beam ($\lambda = 532$ nm, $\mathbf{E} \parallel x$, $P = 0.5$ mW) launched into electric field induced array of NLC-waveguides at different electric voltages (a); normalized light intensity profiles $I(y)$ in yz -plane at beam propagation distance $z = 1.0$ mm as a function of electric voltage (b)

В условиях отсутствия внешнего напряжения на ячейке ($U = 0$ В) наблюдаются возбуждение и выраженный дифракционное расхождение обыкновенной волны в планарном НЖК-слое. При увеличении напряжения ($U > U_{\text{пор}}$) в пределах НЖК-слоя происходит формирование пространственной модуляции показателя преломления, обусловленное реализацией электрического перехода Фредерикса. Анизотропные НЖК-молекулы стремятся сориентироваться своими длинными осями параллельно линиям напряженности электрического поля, что приводит к изменению угла ориентации директора θ по отношению к оси z . Так, для линейно-поляризованной световой волны ($\mathbf{E} \parallel x$) с ростом напряжения наблюдается увеличение эффективного показателя преломления в области сердцевинки НЖК-волновода [8].

$$n_{\text{эфф}} = \frac{n_o \cdot n_e}{\sqrt{n_o^2 \sin^2 \theta + n_e^2 \cos^2 \theta}}.$$

При напряжении на ячейке $U = 1,5$ В, что незначительно превышает пороговую величину, наблюдается слабая волноводность в слое нематика: поле направляемой моды слабо сконцентрировано и практически распределено в объеме ячейки. Большие оптические потери обуславливают быстрое убывание мощности светового пучка, как показано на рис. 3, а. При напряжении $U = 2,0$ В в пределах НЖК-слоя реализуются направляющие свойства для линейно-поляризованной световой волны ($\mathbf{E} \parallel x$), что приводит к локализации светового пучка в пределах единичного канала системы НЖК-волноводов. Наилучшая локализация оптической мощности в пределах НЖК-волновода имеет место при напряжении $U = 3,0$ В, что связано с увеличением глубины модуляции (контраста) показателя преломления в дискретной НЖК-системе по мере роста управляющего напряжения.

Для экспериментального изучения нелинейного распространения света в системе связанных оптических НЖК-волноводов линейно-поляризованное лазерное излучение высокой мощности ($\lambda = 532$ нм, $\mathbf{E} \parallel x$, $P = 5$ мВт) фокусировалось при помощи микрообъектива в пятно диаметром $\omega_2 = 40$ мкм и направлялось в торец НЖК-ячейки в область текстурированного электрода. Для снижения порога нелинейного ориентационного эффекта использовался метод подачи на ЖК-ячейку напряжения вблизи порога перехода Фредерикса ($U_{\text{пор}} = 1,1$ В). На рис. 4, а, представлены экспериментальные картины рассеяния светового пучка в системе связанных НЖК-волноводов при разных управляющих напряжениях, а соответствующие зависимости профилей распределения интенсивностей при длине распространения $z = 2,0$ мм показаны на рис. 4, б.

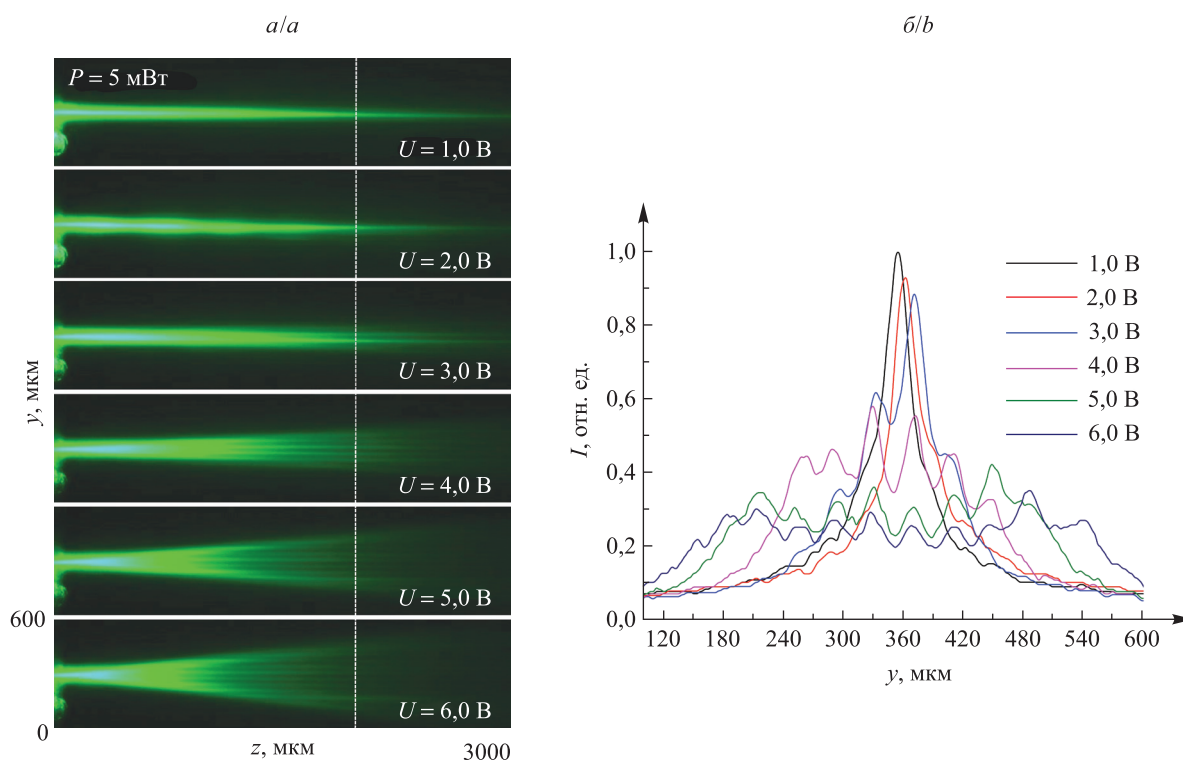


Рис. 4. Распространение лазерного излучения высокой мощности ($\lambda = 532$ нм, $\mathbf{E} \parallel x$, $P = 5$ мВт) в системе электрически индуцируемых НЖК-волноводов при разных управляющих напряжениях (а); зависимость профилей распределения интенсивности $I(y)$ светового пучка в плоскости yz после длины распространения $z = 2,0$ мм в системе НЖК-волноводов при разных напряжениях (б)

Fig. 4. Propagation of the high-power laser beam ($\lambda = 532$ нм, $\mathbf{E} \parallel x$, $P = 5$ мВт) launched into electric field induced array of NLC-waveguides (а); normalized light intensity profiles $I(y)$ in yz -plane at beam propagation distance $z = 2.0$ mm as a function of electric voltage (б)

При напряжении $U = 1,0$ В в области текстурированного электрода создается угол преднаклона директора молекул нематического жидкого кристалла в плоскости xz , что приводит к снижению порогового значения интенсивности светового пучка, обеспечивающего светоиндуцированный переход Фредерикса [16]. Поскольку максимальное значение оптической мощности достигается в центре сечения пучка, то в пределах данной области световое поле самоканализируется благодаря нелинейному ориентационному эффекту и приобретает вид оптического пространственного солитона (нематикона) с энергией, сосредоточенной в пределах одного ЖК-канала. При напряжении на ячейке $U = 2,0$ В преобладающую роль в процессе переориентации директора молекул нематического жидкого кристалла играет внешнее электрическое поле, обуславливающее увеличение эффективного показателя преломления в области сердцевинки НЖК-волновода. В случае дальнейшего увеличения напряжения на ячейке ($U \gg 2,0$ В) происходит насыщение процесса переориентации молекул нематического жидкого кристалла в области текстурированного электрода, что приводит к сглаживанию модуляции показателя преломления в пределах дискретной системы. Действительно, при избыточно больших напряжениях показатель преломления увеличивается не только в области сердцевинки, но и в области оболочки НЖК-волноводов, что связано с нелокальным откликом НЖК-среды, а также выходом силовых линий

электрического поля за пределы электродов. Электрически индуцированное изменение коэффициента связи НЖК-волноводов [1], отвечающего за процесс перекачки (перераспределения) световой энергии между смежными каналами, сопровождается проявлением дискретной дифракции светового пучка в системе связанных НЖК-волноводов. В соответствии с рис. 4 в результате дискретной дифракции происходит перераспределение энергии светового излучения между смежными НЖК-волноводами. Так, при напряжении $U = 6,0$ В световая энергия из области одного НЖК-волновода перераспределяется между 10 смежными каналами дискретной системы. В результате с помощью внешнего напряжения можно осуществить перераспределение энергии светового поля между заданным числом волноводных каналов в пределах дискретной НЖК-системы.

Заключение

Таким образом, в работе предложен способ формирования волноводной НЖК-структуры с электрически управляемой глубиной модуляции показателя преломления для пространственного управления световыми полями. Экспериментально изучены особенности распространения линейно-поляризованных световых пучков в системе связанных оптических НЖК-волноводов при разных значениях внешнего напряжения. Показано, что в зависимости от мощности светового пучка и величины управляющего напряжения реализуется режим волноводного распространения света, а также режим дискретной дифракции светового пучка в системе связанных оптических НЖК-волноводов.

Библиографические ссылки

1. Brzdakiewicz K. A., Karpierz M. A., Fratalocchi A., et al. Nematic liquid crystal waveguide arrays // *Opto-Electron. Rev.* 2005. Vol. 13, № 2. P. 107–112.
2. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete light propagation and self-trapping in liquid crystals // *Opt. Express.* 2005. Vol. 13, issue 6. P. 1808–1815. DOI: 10.1364/OPEX.13.001808.
3. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete light propagation and self-localization in voltage-controlled arrays of channel waveguides in undoped nematic liquid crystals // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 453. P. 191–202. DOI: 10.1080/15421400600654033.
4. Rutkowska K. A., Chychłowski M., Kwasny M., et al. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photo-polymerization of nematic liquid crystals // *Opto-Electron. Rev.* 2017. Vol. 25, № 2. P. 118–126.
5. Assanto G., Fratalocchi A., Peccianti M. Spatial solitons in nematic liquid crystals: from bulk to discrete // *Opt. Express.* 2007. Vol. 15, № 8. P. 5248–5259. DOI: 10.1364/OE.15.005248.
6. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete propagation and spatial solitons in nematic liquid crystals // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29, № 13. P. 1530–1532. DOI: 10.1364/OL.29.001530.
7. Zografopoulos D. C., Asquini R., Kriezis E. E., et al. Guided-wave liquid crystal photonics // *Lab. Chip.* 2012. Vol. 12, № 19. P. 3598–3610. DOI: 10.1039/C2LC40514H.
8. Khoo I.-C. *Liquid crystals*. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/0470084030.
9. Tong X. C. *Electro-optic waveguides* // *Adv. Mater. for Integr. Opt. Waveguides*. Cham : Springer, 2014. Vol. 46. P. 335–376. DOI: 10.1007/978-3-319-01550-7-8.
10. Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L. Formation, propagation, and interaction of nematicons // *NPCS.* 2017. Vol. 20, № 1. P. 82–88.
11. Kivshar Yr. S., Agrawal G. P. *Optical solitons: from fibers to photonic crystals*. San Diego : Academic Press, 2003.
12. Beeckman J., Neyts K., Hutsebaut X., et al. Simulations and experiments on self-focusing conditions in nematic liquid-crystal planar cells // *Opt. Express.* 2004. Vol. 12, № 6. P. 1011–1018. DOI: 10.1364/OPEX.12.001011.
13. Alberucci A., Assanto G. Modeling Nematicon Propagation // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2013. Vol. 572, № 1. P. 2–12. DOI: 10.1080/15421406.2012.763018.
14. Мельникова Е. А., Кабанова О. С. Поляризационно-чувствительные волноводные каналы в нематическом жидком кристалле // *Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика.* 2016. № 2. С. 48–51.
15. Mahilny U. V., Stankevich A. I., Trofimova A. V., et al. Photosensitive polymers for liquid crystal alignment // *Phys. Procedia.* 2015. Vol. 73. P. 121–125. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.131.
16. Peccianti M., Assanto G. Nematicons // *Phys. Rep.* 2012. Vol. 516, № 4/5. P. 147–208. DOI: 10.1016/j.physrep.2012.02.004.

References

1. Brzdakiewicz K. A., Karpierz M. A., Fratalocchi A., et al. Nematic liquid crystal waveguide arrays. *Opto-Electron. Rev.* 2005. Vol. 13, No. 2. P. 107–112.
2. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete light propagation and self-trapping in liquid crystals. *Opt. Express.* 2005. Vol. 13, issue 6. P. 1808–1815. DOI: 10.1364/OPEX.13.001808.
3. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete light propagation and self-localization in voltage-controlled arrays of channel waveguides in undoped nematic liquid crystals. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2006. Vol. 453. P. 191–202. DOI: 10.1080/15421400600654033.
4. Rutkowska K. A., Chychłowski M., Kwasny M., et al. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photo-polymerization of nematic liquid crystals. *Opto-Electron. Rev.* 2017. Vol. 25, No. 2. P. 118–126.

5. Assanto G., Fratalocchi A., Peccianti M. Spatial solitons in nematic liquid crystals: from bulk to discrete. *Opt. Express*. 2007. Vol. 15, No. 8. P. 5248–5259. DOI: 10.1364/OE.15.005248.
6. Fratalocchi A., Assanto G., Brzdakiewicz K. A., et al. Discrete propagation and spatial solitons in nematic liquid crystals. *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29, No. 13. P. 1530–1532. DOI: 10.1364/OL.29.001530.
7. Zografopoulos D. C., Asquini R., Kriezis E. E., et al. Guided-wave liquid crystal photonics. *Lab. Chip*. 2012. Vol. 12, No. 19. P. 3598–3610. DOI: 10.1039/C2LC40514H.
8. Khoo I.-C. *Liquid crystals*. 2nd ed. Hoboken : John Wiley & Sons, 2007. DOI: 10.1002/0470084030.
9. Tong X. C. Electro-optic waveguides. *Adv. Mater. for Integr. Opt. Waveguides*. Cham : Springer, 2014. Vol. 46. P. 335–376. DOI: 10.1007/978-3-319-01550-7-8.
10. Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L. Formation, propagation, and interaction of nematicons. *NPCS*. 2017. Vol. 20, No. 1. P. 82–88.
11. Kivshar Yr. S., Agrawal G. P. *Optical solitons: from fibers to photonic crystals*. San Diego : Academic Press, 2003.
12. Beeckman J., Neyts K., Hutsebaut X., et al. Simulations and experiments on self-focusing conditions in nematic liquid-crystal planar cells. *Opt. Express*. 2004. Vol. 12, No. 6. P. 1011–1018. DOI: 10.1364/OPEX.12.001011.
13. Alberucci A., Assanto G. Modeling Nematicon Propagation. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2013. Vol. 572, No. 1. P. 2–12. DOI: 10.1080/15421406.2012.763018.
14. Melnikova E. A., Kabanova O. S. Polarization-sensitive waveguide channels in nematic liquid crystals. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 2. P. 48–51 (in Russ.).
15. Mahilny U. V., Stankevich A. I., Trofimova A. V., et al. Photosensitive polymers for liquid crystal alignment. *Phys. Procedia*. 2015. Vol. 73. P. 121–125. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.131.
16. Peccianti M., Assanto G. Nematicons. *Phys. Rep.* 2012. Vol. 516, No. 4/5. P. 147–208. DOI: 10.1016/j.physrep.2012.02.004.

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