

ПОЛЯРИЗАЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ВОЛНОВОДНЫЕ КАНАЛЫ В НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ

Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾, О. С. КАБАНОВА¹⁾

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

Предложен метод создания нематических жидкокристаллических структур с пространственно модулированной оптической анизотропией, позволяющих реализовать волноводное распространение линейно-поляризованного лазерного излучения. Созданы управляемые планарные жидкокристаллические элементы с периодическим электродом на подложке. Принцип формирования управляемых поляризационно-чувствительных волноводов основан на реализации эффекта полного внутреннего отражения излучения от электрически контролируемой границы раздела двух областей нематических жидких кристаллов с различными топологиями ориентации директора. Экспериментально реализован режим волноводного распространения линейно-поляризованного света в созданных жидкокристаллических структурах и на основе полученных результатов определены рабочие характеристики исследуемых нематических жидкокристаллических ячеек. Условия формирования модуляции показателя преломления и включения режима волноводного распространения света анализировались теоретически и были протестированы экспериментально. Выполнен анализ пространственного распределения директора жидких кристаллов по толщине и плоскости волноводной структуры ячейки при различных значениях управляющего электрического поля и проведено сопоставление аналитических оценок с экспериментальными результатами.

Ключевые слова: нематический жидкий кристалл; волноводное распространение света; полное внутреннее отражение; рефрактивная граница; пространственно-поляризационное управление; переход Фредерикса.

POLARIZATION-SENSITIVE WAVEGUIDE CHANNELS IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS

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

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

The method to create nematic liquid crystals structures with spatially modulated optical anisotropy which make it possible to realize waveguide propagation of the linearly polarized laser radiation is offered. New controllable planar liquid crystals elements with a periodic electrode within a glass substrate have been created. The principle of forming the controlled polarization-sensitive waveguide channels is based on realization of the radiation total internal reflection effect from the electrically controlled interface between two regions with different topologies of the nematic liquid crystals director orientation. The waveguide propagation mode of linearly polarized light has been realized; the performance of the tested nematic liquid crystals cells has been specified on the basis of the results obtained. The conditions for the formation of the refractive index modulation and for the activation of the waveguide light propagation mode have been analyzed and experimentally tested. Analysis of the liquid crystals director spatial distribution in the bulk and in the plane of the waveguide structure at different voltages has been performed; the analytical estimates and experimental results have been compared.

Key words: nematic liquid crystal; waveguide light propagation; total internal reflection; refractive interface; spatial-polarization control; Fredericks transition.

Образец цитирования:

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.

For citation:

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.).

Авторы:

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

Ольга Сергеевна Кабанова – аспирантка кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – Е. А. Мельникова.

Authors:

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

melnikova@bsu.by

Olga Kabanova, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

kabanovaos@mail.ru

Жидкокристаллические (ЖК) фотонные устройства со сложной оптической анизотропией, основанные на новых фотоориентирующих и фотоструктурированных материалах, используются в волоконно-оптических линиях связи, устройствах обработки и передачи информации и, как следствие, становятся все более и более востребованными. Конкретные пространственно структурированные ЖК-компоненты, такие как ЖК-коаксиальные переменные оптические аттенюаторы, контроллеры поляризации и фазовые пластины, уже представлены на рынке. Недавно американские компании анонсировали ЖК-волноводы как новую электронно-оптическую технологию для разного рода приложений – интерферометры, пространственно-поляризационные переключатели, перестраиваемые фильтры и лазеры и др. [1, 2]. Управляемые волноводные и дифракционные ЖК-устройства являются портативными, надежными и осуществляют пространственно-поляризационное преобразование световых полей во всем видимом спектральном диапазоне [3–6].

Принцип формирования управляемых ЖК-волноводов основан на реализации эффекта полного внутреннего отражения (ПВО) от электрически контролируемой границы раздела двух областей нематического жидкого кристалла (НЖК) с различными топологиями ориентации директора [7]. Периодически ориентированные доменные ЖК-структуры были созданы путем приложения внешнего поля к планарной ЖК-ячейке, содержащей структурированный электрод на подложке.

На рис. 1, *а* (см. цв. вклейку), представлена принципиальная схема разработанных ЖК-ячеек, а также проиллюстрирован принцип действия структур при выключенном внешнем поле и в условиях присутствия напряжения (см. цв. вклейку, рис. 1, *б*). Корпус ЖК-ячейки составляют две стеклянные пластины (1). На нижней пластине методом лазерной литографии был сформирован электрод (2) в виде периодической структуры, представляющей собой чередующиеся полосы хрома шириной 10 мкм при ширине промежутка 10 мкм. Для последующей визуализации пространственного распределения светового поля внутри ЖК-ячейки на верхнюю пластину наносился прозрачный электропроводящий слой из окисла индия (ITO).

На внутреннюю поверхность пластин методом центрифугирования наносился слой ориентирующего полимера (3) толщиной ~400 нм, который затем отжигался в печи при температуре 100 °С в течение 5 мин для удаления растворителя. Полученный полимерный слой натирался тканевой щеткой для задания начальной планарной ориентации директора ЖК-молекул, после чего подложка засвечивалась неполяризованным УФ-излучением, чтобы обеспечить фотосшивание слоя. Подготовленные подложки впоследствии склеивались, при этом толщина ЖК-слоя в ячейке составляла 20 мкм. Принцип формирования управляемых волноводных каналов в изготовленном ЖК-элементе основан на реализации эффекта полного внутреннего отражения излучения на границе раздела планарной и гомеотропной мезофаз, как показано на рис. 2 (см. цв. вклейку). В условиях отсутствия напряжения ориентация ЖК-молекул в элементе является однородной планарной и для геометрии, представленной на рис. 2, *а* (см. цв. вклейку), возбуждается обыкновенная волна ($n_o = 1,49$). При подаче на ЖК-ячейку напряжения, превышающего пороговое значение, в местах расположения электродов происходит переориентация молекул ЖК (см. цв. вклейку, рис. 2, *б*). Ориентация директора в указанных областях ЖК-элемента становится гомеотропной, и для волны, поляризованной вдоль оси OX , возбуждается необыкновенная волна ($n_e = 1,67$), так как электрический вектор световой волны совпадает по направлению с оптической осью ЖК. В тех местах, где электрод отсутствует и директор ЖК-сохраняет первоначальную планарную ориентацию, показатель преломления определяется рефрактивным индексом для обыкновенной волны ($n_o = 1,49$).

Схема экспериментальной установки для наблюдения условий возбуждения волноводного режима распространения приведена на рис. 3 (см. цв. вклейку). Линейно-поляризованное вдоль оси OX излучение He – Ne-лазера (1) вводится в торец планарной ЖК-ячейки (3). Объектив (2) используется для обеспечения эффективности ввода лазерного излучения в ЖК-элемент. Распространение электромагнитного излучения внутри ЖК-слоя регистрировалось по рассеянному на неоднородностях ЖК-среды свету при помощи объектива (4) камеры (5) прибора с зарядовой связью (ПЗС), позиционированной над плоскостью ЖК-ячейки. Размер области регистрации составляет $3,8 \times 3,0$ мм с разрешением 1280×960 пк. Обработка экспериментальных данных осуществлялась при помощи персонального компьютера.

Картина распространения линейно-поляризованного лазерного излучения в планарной нематической ЖК-ячейке, содержащей структурированный электрод, представлена на рис. 4 (см. цв. вклейку), из которого следует, что в условиях отсутствия электрического поля на элементе свет, введенный в элемент, претерпевает дифракционную расходимость при распространении в планарно ориентированном слое ЖК.

При подаче порогового напряжения на ячейку ($U = 1$ В) в результате перехода Фредерикса [4] происходит переориентация директора в области структурированного электрода. В смежных с электродом

областях ориентация молекул остается планарной из-за отсутствия проводящего слоя. Таким образом, с ростом напряжения наблюдается формирование пространственной модуляции показателя преломления и происходит включение режима волноводного распространения света за счет эффекта ПВО от электрически контролируемой рефрактивной границы раздела двух ЖК-областей с ортогональными ориентациями директора. При напряжении $U = 1,2$ В наблюдается слабая волноводность, поле направляемой моды слабо сконцентрировано и практически распределено по всей ячейке. Имеют место большие потери на локализацию, в результате мощность направляемой моды быстро убывает. При трехкратном и более превышении порога перехода Фредерикса ($U > 3$ В) формируется устойчивый волноводный канал.

Чтобы проанализировать экспериментальные результаты, свяжем числовую апертуру наведенных волноводных каналов с показателями преломления использованного ЖК-материала обыкновенной и необыкновенной волн для предложенной в работе топологии директора ЖК.

В целях оптимизации условий ввода лазерного излучения в ЖК-элемент необходимо, чтобы угол его расходимости ϕ совпал с числовой апертурой наведенного волновода, как показано на рис. 5 (см. цв. вклейку).

$$\frac{n_1}{n_2} = \sin \alpha_{\text{кр}}.$$

При подаче на ЖК-ячейку напряжения в местах расположения электродов происходит переориентация молекул ЖК. Для света, поляризованного вдоль – перпендикулярно плоскости ячейки, показатели преломления в смежных областях 1 и 2 различны. Их значения будут определяться геометрией ориентации директора ЖК и электрического вектора световой волны. В области 2 возбуждается обыкновенная волна (показатель преломления $n_o = 1,49$).

Показатель преломления в области 1 будет зависеть от угла между электрическим вектором линейно-поляризованного лазерного излучения и директором ЖК θ [8]:

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

Значение эффективного показателя преломления n_{1ef} лежит в пределах $n_o \dots n_e$. Таким образом, критический угол ПВО от границы периодически чередующихся доменных областей с ортогональной ориентацией директора будет определяться следующим образом:

$$\alpha_{\text{кр}} = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_{\text{1ef}}} \right). \quad (2)$$

На основании формулы (2) оценим значения показателя преломления n_{1ef} , при котором угол расходимости лазерного излучения в ЖК-элементе ϕ совпадет с числовой апертурой электрически наведенного ЖК-волновода: $n_{\text{1ef}} = 1,49024$. По формуле (1) найдем угол переориентации директора ЖК, обеспечивающий это значение эффективного показателя преломления, который составляет $\theta = 5^\circ$. Теперь определим значение внешнего напряжения, обеспечивающее выполнение условия ПВО. Переориентация директора под действием электрического поля начинает происходить в центре ЖК-ячейки, где молекулы ЖК испытывают наименьшее влияние граничных условий на подложках. Используя приближенную формулу [8], можно рассчитать распределение угла поворота директора по толщине ЖК-ячейки x :

$$\theta(x) = 2 \arctg \left(e^{\pi(E/E_t)(x/L)} \right) - \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

где θ – угол поворота ориентации директора относительно начальной планарной ориентации под действием напряженности E внешнего поля; E_t – порог перехода Фредерикса; L – толщина ЖК-слоя.

Как видно из графика расчетов, приведенного на рис. 6 (см. цв. вклейку), превышение над порогом в 3 раза приводит к переориентации слоя ЖК, за исключением незначительной области ЖК вблизи подложек (0,25 мкм) до угла $\theta = 5^\circ$, который обеспечивает волноводный режим распространения линейно-поляризованного излучения, что полностью согласуется с результатами экспериментального исследования, представленными на рис. 4 (см. цв. вклейку).

Таким образом, в настоящей работе предложен метод создания жидкокристаллических структур с управляемой топологией анизотропии и реализован режим волноводного распространения линейно-поляризованного света в таких структурах. Теоретически и экспериментально исследованы условия

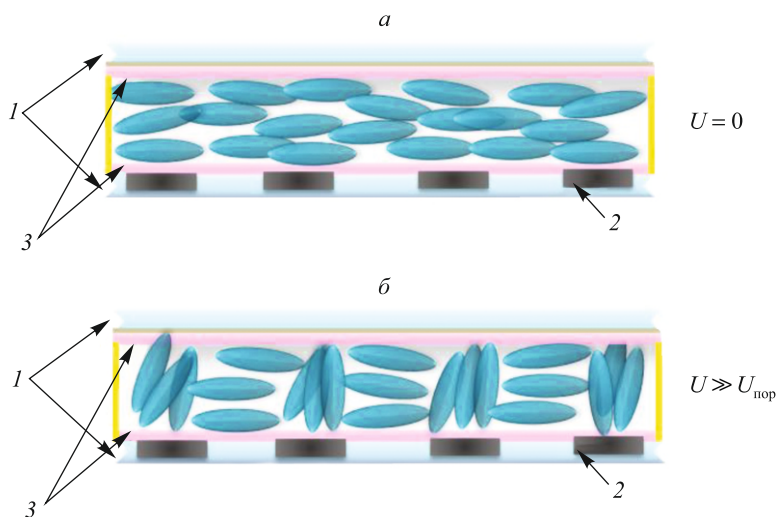


Рис. 1. Принципиальная схема ЖК-ячейки с текстурированным электродом:
 1 – стеклянные пластины; 2 – текстурированный электрод в виде периодических полос хрома;
 3 – слой фотополимера, задающий планарную ориентацию директора молекул НЖК; U – управляющее напряжение

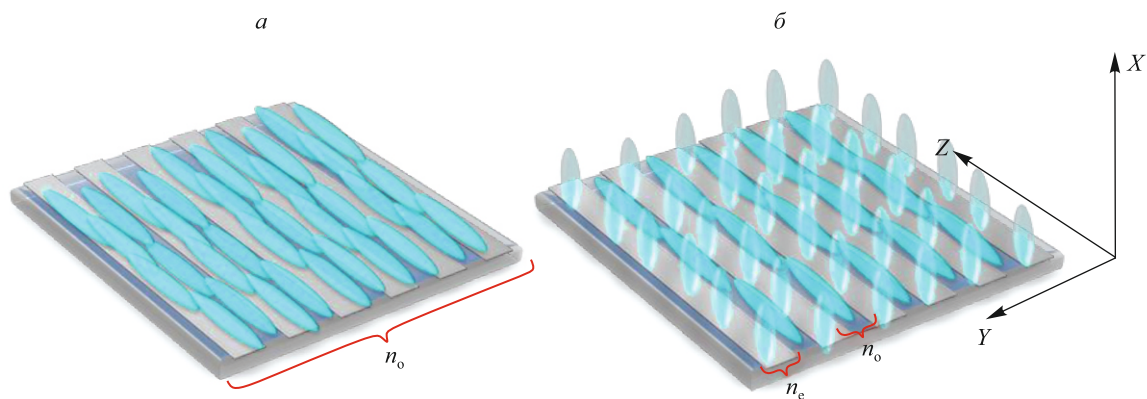


Рис. 2. Принцип формирования электрически управляемых ЖК-волноводов:
 а – напряжение отсутствует; б – напряжение приложено к ячейке

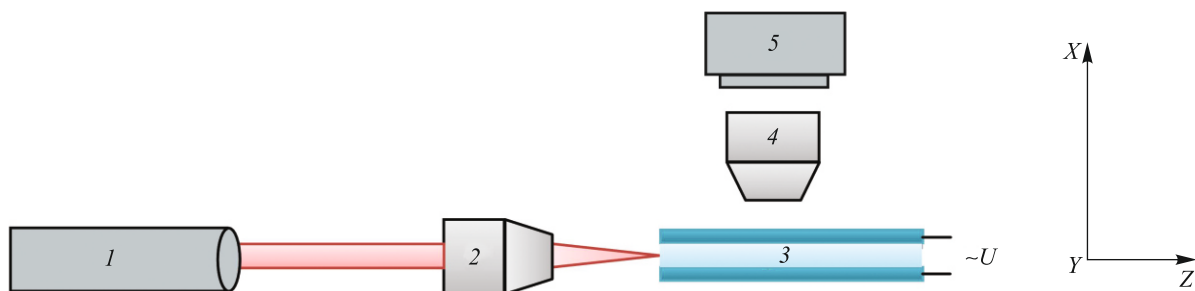


Рис. 3. Схема экспериментальной установки для наблюдения распространения излучения в ЖК-ячейке:
 1 – He – Ne-лазер; 2, 4 – микрообъектив; 3 – ЖК-ячейка; 5 – ПЗС-камера; U – управляющее напряжение

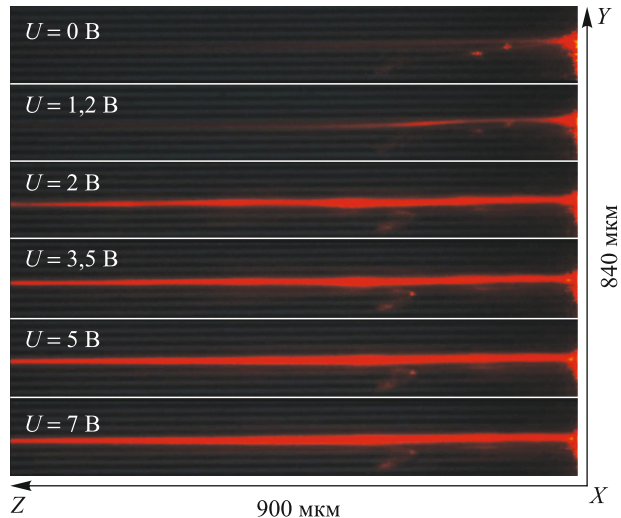


Рис. 4. Распространение линейно-поляризованного лазерного излучения вдоль оси OX в планарной ЖК-ячейке, содержащей структурированный электрод

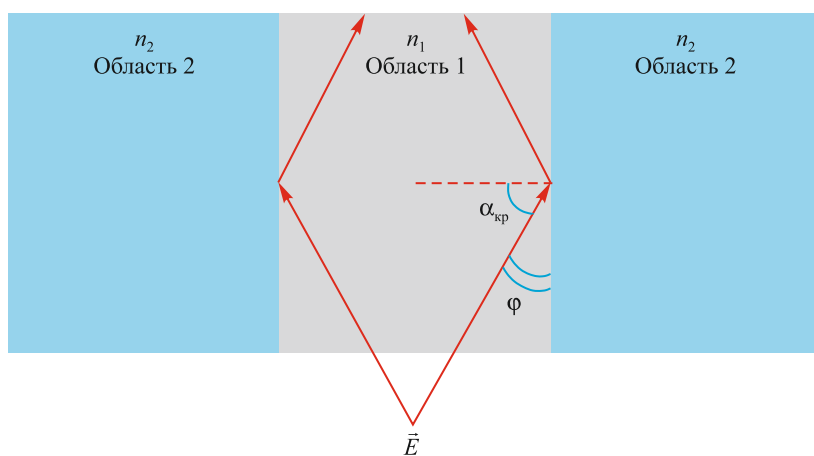


Рис. 5. Эффект ПВО в волноводном ЖК-элементе

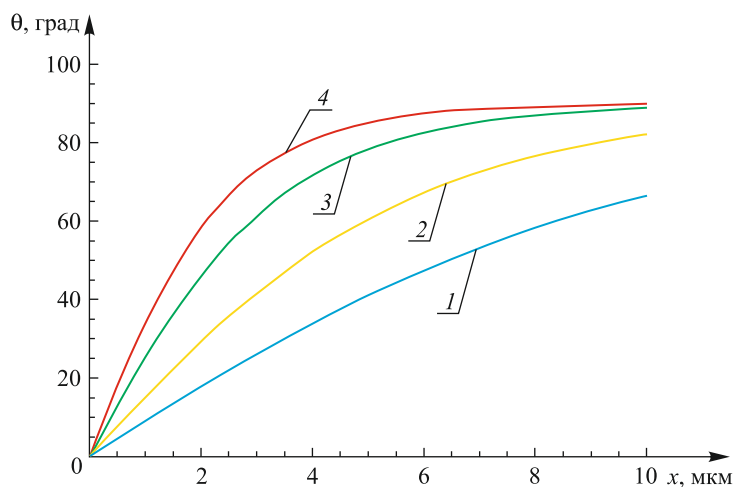


Рис. 6. График распределения директора $\theta(x)$ от величины приложенного напряжения по толщине ЖК-слоя:
1 – $U = 1,2$ В; 2 – $U = 2,5$ В; 3 – $U = 3$ В; 4 – $U = 5$ В

возбуждения режима волноводного распространения излучения в зависимости от величины управляющего напряжения на ЖК-элементе. Проведенные исследования демонстрируют возможность создания портативных ЖК-устройств с поляризационно-чувствительными волноводными каналами для пространственного управления световыми полями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Chigrinov V. G. Photoaligning and photopatterning – a new challenge in liquid crystal photonics // *Cryst.* 2013. Vol. 3, issue 1. P. 149–162 [Chigrinov V. G. Photoaligning and photopatterning – a new challenge in liquid crystal photonics. *Cryst.* 2013. Vol. 3, issue 1. P. 149–162 (in Engl.)].
2. Chigrinov V. G. Liquid crystal applications in photonics // *Front. Optoelectron. China.* 2010. Vol. 3, issue 1. P. 103–107 [Chigrinov V. G. Liquid crystal applications in photonics. *Front. Optoelectron. China.* 2010. Vol. 3, issue 1. P. 103–107 (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. Yang D.-K., Wu S.-T. Fundamentals of liquid crystal devices : 2nd ed. London, 2015.
5. Komar A. A., Tolstik A. L., Melnikova E. A., Muravsky A. A. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface // *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, № 16. P. 5130–5135 [Komar A. A., Tolstik A. L., Melnikova E. A., Muravsky A. A. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface. *Appl. Opt.* 2015. Vol. 54, No. 16. P. 5130–5135 (in Engl.)].
6. 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.)].
7. Komar A. A., Kurochkina M. A., Melnikova E. A., Stankevich A. I., Tolstik A. L. Polarization separation of light beams at the interface of two mesophases // *Tech. Phys. Lett.* 2011. Vol. 37, issue 8. P. 704–706 [Komar A. A., Kurochkina M. A., Melnikova E. A., Stankevich A. I., Tolstik A. L. Polarization separation of light beams at the interface of two mesophases. *Tech. Phys. Lett.* 2011. Vol. 37, issue 8. P. 704–706 (in Engl.)].
8. Melnikova E. A. Theoretical modeling of orientation effects in liquid crystal layers // *Proc. SPIE: 10th Int. Conf. Nonlinear Opt. of Liq. and Photorefractive Cryst.* (Alushta, 3–8 Oct. 2004). Alushta, 2005. Vol. 6023. P. 0D-1–0D-5 [Melnikova E. A. Theoretical modeling of orientation effects in liquid crystal layers. *Proc. SPIE: 10th Int. Conf. Nonlinear Opt. of Liq. and Photorefractive Cryst.* (Alushta, 3–8 Oct. 2004). Alushta, 2005. Vol. 6023. P. 0D-1–0D-5 (in Engl.)].

Статья поступила в редколлегию 22.01.2016.
Received by editorial board 22.01.2016.