

УДК 532.783;535.42

ДВУМЕРНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ ТЕКСТУРИРОВАННОЙ ФОТООРИЕНТАЦИИ ПОЛИМЕРИЗУЕМОГО ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА

О. С. КАБАНОВА¹⁾, И. И. РУШНОВА¹⁾, Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾,
А. Л. ТОЛСТИК¹⁾, Ал. А. МУРАВСКИЙ²⁾, Ан. А. МУРАВСКИЙ²⁾, Р. ХАЙНЦМАНН³⁾

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

²⁾Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,

ул. Ф. Скорины, 36, 220141, г. Минск, Беларусь

³⁾Институт фотонных технологий им. Лейбница,
ул. Альберта Эйнштейна, 9, 07745, г. Йена, Германия

Исследованы дифракционные характеристики многослойной оптической структуры, представляющей собой двумерную фазовую решетку, сформированную в тонкопленочных слоях нематического полимеризуемого жидкого кристалла (ПЖК). Для создания периодически упорядоченных жидкокристаллических (ЖК) доменов с размерами 5–10 мкм, формирующих пропускающую анизотропную ЖК-решетку, использовалась технология послойной текстурированной фотоориентации водорастворимого азокрасителя AbA-2522. Жидкостное нанесение пленок фотоориентируемого азокрасителя AbA-2522 из водного раствора на поверхность фотоотвержденного ПЖК-слоя реализовано без использования буферного слоя, что является важным технологическим преимуществом. Экспериментально изучены возможности пространственно-поляризационного управления световыми пучками с помощью разработанных одно- и двумерных пропускающих дифракционных ЖК-структур. Результаты исследования перспективны с точки зрения создания ЖК-устройств для решения актуальных задач поляризационной фотоники.

Ключевые слова: дифракционная структура; текстурированная фотоориентация; полимеризуемый жидкий кристалл; оптическая анизотропия; ориентирующие пленки.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция-2020» (задание 3.03.5 «Разработка материалов и технологий создания микроструктурированных жидкокристаллических элементов для фотонных приложений»), а также Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № Ф18КИ-025 «Новые высокочувствительные фотоориентирующие материалы и жидкокристаллические пространственные фазовые модуляторы на их основе, формируемые методом оптической адресации»).

Образец цитирования:

Кабанова ОС, Рушнова ИИ, Мельникова ЕА, Толстик АЛ, Муравский АлА, Муравский АнА, Хайнцманн Р. Двумерная дифракционная оптическая структура на основе текстурированной фотоориентации полимеризуемого жидкого кристалла. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;3:4–11.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-4-11>

For citation:

Kabanova OS, Rushnova II, Melnikova EA, Tolstik AL, Muravsky AlA, Murauski AnA, Heintzmann R. Two-dimensional diffractive optical structure based on patterned photoalignment of polymerizable liquid crystal. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2019;3:4–11. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-3-4-11>

TWO-DIMENTIONAL DIFFRACTIVE OPTICAL STRUCTURE BASED ON PATTERNED PHOTOALIGNMENT OF POLYMERIZABLE LIQUID CRYSTAL

O. S. KABANOVA^a, I. I. RUSHNOVA^a, E. A. MELNIKOVA^a,
A. L. TOLSTIK^a, Al. A. MURAVSKY^b, An. A. MURAUSKI^b, R. HEINTZMANN^c

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

^bInstitute of Chemistry of New Materials, National Academy of Sciences of Belarus,
36 F. Skaryny Street, Minsk 220141, Belarus

^cLeibniz Institute of Photonic Technology,
9 Albert-Einstein-Straße, Jena 07745, Germany

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

This paper is devoted to the investigation of the diffraction characteristics of a multilayer optical structure, represented by a two-dimensional phase lattice formed in thin-film layers of nematic polymerizable liquid crystal (PLC). In order to generate periodically ordered liquid-crystal (LC) domains with dimensions of 5–10 μm , which form an anisotropic LC grating, the layer-by-layer patterned photoalignment technology of the water-soluble azo dye AbA-2522 was used. The possibilities of spatial-polarization control of light beams by means of developed one- and two-dimensional diffractive LC structures have been studied experimentally. Our results are promising from the point of view of development and creation of LC-devices for solving current problems of polarization photonics.

Keywords: diffractive structure; patterned photoalignment; polymerizable liquid crystal; optical anisotropy; alignment films.

Acknowledgements. This research has been financially supported by the State Program of Scientific Research of the Republic of Belarus «Convergence 2020» (assignment 3.03.5 «Development of materials and technologies for the creation of microstructured liquid crystal elements for photonic applications») and also by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (contract No. F18KI-025 «New highly sensitive photoalignment materials and liquid crystal spatial phase modulators based on them, formed by the optical addressing method»).

Введение

Успешное применение активно развивающихся технологий фотоориентации жидкокристаллических (ЖК) материалов на протяжении последнего десятилетия отмечено рядом выдающихся инновационных и научных достижений в различных областях фотоники [1]. В частности, микро- и нанотехнологии фотоориентации стимулируют колоссальный прогресс в сфере производства перестраиваемых фотонных ЖК-устройств [2–6], таких как оптические переключатели, текстурированные ретардеры, перестраиваемые аттенюаторы, фотонно-кристаллические волокна, фильтры, дифракционные решетки, вихревые фазовые пластинки, лазеры и др. В этой связи большой интерес исследовательских групп во всем мире привлекают технологии текстурированной фотоориентации в целях разработки многодоменных (локально-неоднородных) ЖК-структур, выполняющих различные оптические функции [7–12].

Фотоориентируемые материалы (фотоориентанты), используемые для задания граничных условий ориентации директора жидкого кристалла на поверхности, служат ключевым компонентом для реализации технологии текстурированной фотоориентации. Современные технологические разработки в данной области сосредоточены на синтезировании новых фотоориентантов (фотополимеров, азокрасителей и др.), позволяющих реализовать локальное управление ориентацией директора жидкого кристалла с высоким пространственным разрешением (порядка единиц микрон). На сегодняшний день перспективными оптическими материалами являются фотоориентируемые азокрасители, наносимые из водных растворов. Формирование многодоменной ориентации директора жидкого кристалла в данном случае реализуется посредством последовательных операций облучения тонкой пленки азокрасителя линейно-поляризованным излучением видимой области. Фотоориентируемые азокрасители обеспечивают высокую азимутальную энергию сцепления с ЖК-материалами (порядка 10^{-4} Дж/м²) при относительно малых значениях экспозиционной дозы (порядка 2,0 Дж/см²), что делает их привлекательными материалами для создания многослойных ЖК-структур с расширенными функциональными характеристиками.

Цель работы – экспериментальное исследование оптических свойств двумерной дифракционной ЖК-структуры, созданной на основе технологии послойной текстурированной фотоориентации водорастворимого азокрасителя.

Материалы и методы

Предлагаемая двумерная дифракционная оптическая структура представляет собой многослойную композицию, функциональную основу которой составляют два тонкопленочных слоя нематического полимеризуемого жидкого кристалла (ПЖК) с многодоменным распределением директора (рис. 1). Формирование дифракционных оптических структур, представляющих собой анизотропные фазовые ЖК-решетки, осуществлялось с помощью технологии текстурированной фотоориентации ПЖК. В качестве фотоориентируемого материала использовался водорастворимый азокраситель AbA-2522 [13; 14], разработанный и синтезированный в лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств» Института химии новых материалов НАН Беларуси.

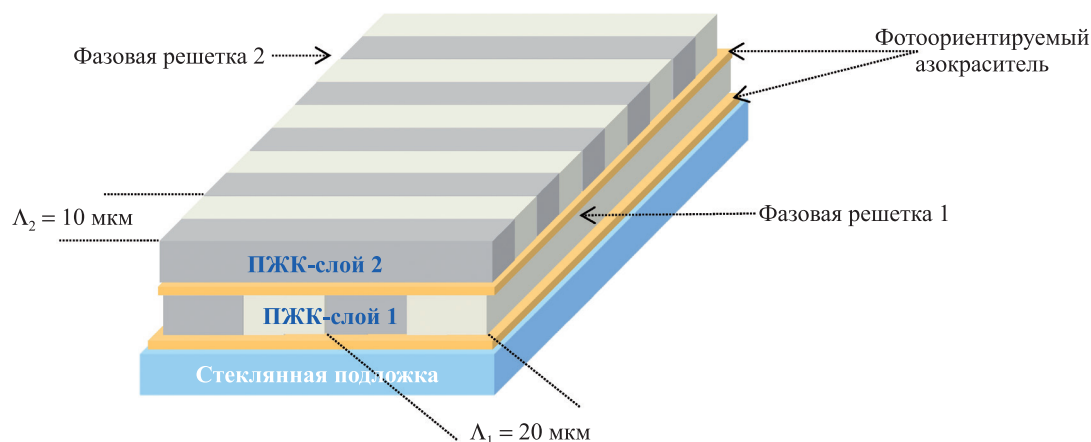


Рис. 1. Схема многослойной дифракционной оптической структуры на основе фазовых решеток в тонкопленочных слоях полимеризуемого жидкого кристалла

Fig. 1. Scheme of multilayer diffractive optical structure based on phase gratings formed within thin-film polymerizable liquid crystal layers

Ориентирующие свойства азокрасителя AbA-2522 формируются под действием облучения линейно-поляризованным светом с длиной волны 450 нм, причем направление наведенной ориентации перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения. Важно заметить, что наведенное направление ориентации в пленке азокрасителя может быть легко изменено впоследствии путем дополнительного облучения фотоориентанта активирующим излучением с отличным направлением поляризации. Данное обстоятельство позволяет реализовать на практике высокофункциональные ЖК-структуры с локально-неоднородным распределением директора. Другими важными преимуществами фотоориентируемого азокрасителя AbA-2522 являются высокая фоточувствительность (экспозиционная доза менее 2,0 Дж/см²), большая азимутальная энергия сцепления W_A (порядка 10⁻⁴ Дж/м²), фото- и термостабильность ориентирующих свойств. Кроме того, водорастворимые азокрасители – экологически чистые и безопасные материалы.

На рис. 2 приведены основные этапы процесса изготовления многослойной дифракционной ЖК-структуры с помощью технологии текстурированной фотоориентации азокрасителя. Жидкостное нанесение функциональной тонкой пленки (толщиной 20–50 нм) водорастворимого азокрасителя AbA-2522 на поверхность тщательно очищенной стеклянной подложки осуществлялось методом род-коутинга (Mayer-Rod coating). В целях формирования однородной планарной ориентации пленка азокрасителя облучалась линейно-поляризованным излучением светодиодной матрицы ($\lambda = 450$ нм, доза облучения $D_1 = 1,8$ Дж/см²). Далее производилось повторное облучение пленки азокрасителя активирующим излучением ($\lambda = 450$ нм, $D_2 = 9,0$ Дж/см²), характеризующимся перпендикулярным первоначальному направлению линейной поляризации, с использованием металлизированной амплитудной фотомаски (период структуры $\Lambda_1 = 20$ мкм), что позволило изменить направление ориентации молекул азокрасителя в немаскированных областях пленки на угол 90°. Двухстадийный процесс облучения с применением амплитудной фотомаски обеспечил формирование периодических ориентирующих структур на поверхности пленки азокрасителя.

Следующим этапом являлось нанесение на анизотропную пленку азокрасителя тонкого слоя ПЖК-материала RM257 (Merck, США). Фиксация полученной многодоменной ориентации в ПЖК-слое реализовывалась путем экспонирования последнего излучением ультрафиолетового (УФ) светодиода с длиной волны 365 нм.

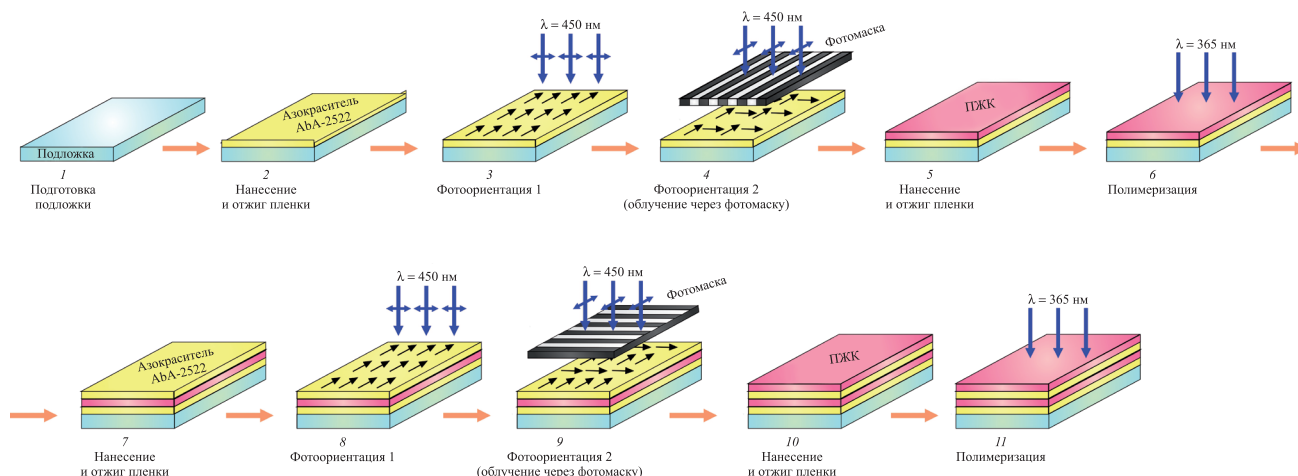


Рис. 2. Основные этапы (1–11) процесса изготовления многослойной дифракционной ЖК-структуры

Fig. 2. Key steps (1–11) of the manufacturing process of multilayered diffractive liquid crystal structure

Для используемого в работе ПЖК величина Δnd (Δn – оптическая анизотропия, d – толщина слоя) составляла 0,14 мкм. Таким образом, последовательное выполнение этапов 1–6 (см. рис. 2) позволило изготовить одномерную фазовую ЖК-решетку с периодом 20 мкм. Повторное выполнение этапов 2–6 обеспечило изготовление многослойной двумерной дифракционной ЖК-структуры с взаимно ортогональными направлениями штрихов. Следует отметить, что вторая пленка водорастворимого азокрасителя AbA-2522 наносилась на поверхность УФ-отвержденного ПЖК без буферного слоя (этап 7), поскольку выбранный материал характеризуется отсутствием необходимости использования агрессивных растворителей, что является важным технологическим преимуществом. Двухстадийное облучение второй пленки азокрасителя (этап 9) также реализовывалось с помощью амплитудной фотомаски ($\Lambda_2 = 10$ мкм), повернутой на угол 90° относительно ее положения на этапе 4.

Представленная технология позволяет в общем случае изготавливать многослойные дифракционные оптические структуры с различными профилями и (или) периодами фазовых решеток. На рис. 3 приведены микрофотографии пропускающей двумерной фазовой ЖК-решетки ($\Lambda_1 = 20$ мкм, $\Lambda_2 = 10$ мкм) в поляризованном свете, полученные с помощью поляризационного микроскопа. Изготовленный образец характеризуется бездефектной многодоменной ориентацией ПЖК, формирующей анизотропную фазовую решетку с прямоугольным профилем штриха.

Экспериментальное исследование дифракционных свойств разработанных фазовых ЖК-решеток осуществлялось с помощью установки, схема которой представлена на рис. 4. Линейно-поляризованное излучение гелий-неонового лазера с длиной волны 633 нм направлялось перпендикулярно плоскости ЖК-решетки. Для поворота плоскости поляризации входного излучения применялась полуволновая пластинка. Интенсивность дифрагированного излучения регистрировалась в xu -плоскости с помощью высокочувствительного фотодетектора, перемещаемого при помощи микроподвижек вдоль направления пространственных осей x и y . Для исследования состояния поляризации дифрагированных световых пучков использовался анализатор.

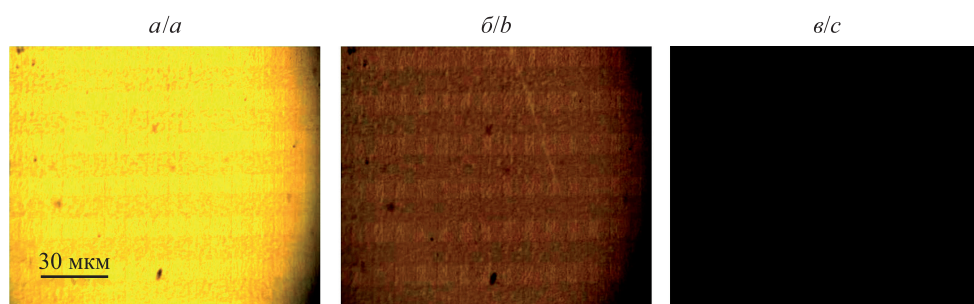


Рис. 3. Поляризационные микрофотографии двумерной дифракционной ЖК-решетки при различных углах между плоскостями пропускания поляризатора и анализатора:

$a - 0^\circ$; $b - 45^\circ$; $в - 90^\circ$

Fig. 3. Polarization microphotographs of a two-dimensional diffractive LC grating at different angles between the transmission planes of the polarizer and the analyzer:

$a - 0^\circ$; $b - 45^\circ$; $c - 90^\circ$

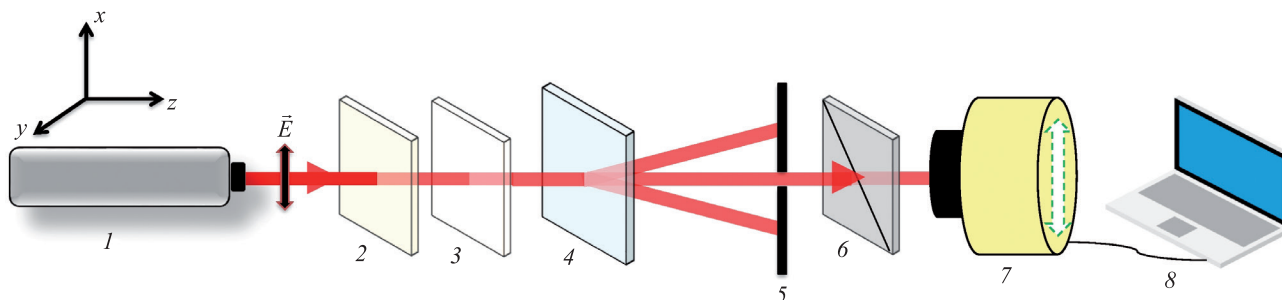


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования дифракционных свойств анизотропных пропускающих ЖК-решеток: 1 – гелий-неоновый лазер; 2 – светофильтр; 3 – полуволновая пластинка; 4 – фазовая ЖК-решетка; 5 – ирисовая диафрагма; 6 – анализатор; 7 – фотодетектор; 8 – персональный компьютер

Fig. 4. Scheme of experimental setup for investigation of diffraction properties of anisotropic LC gratings: 1 – He-Ne laser; 2 – filter; 3 – half-wave plate; 4 – LC phase grating; 5 – iris diaphragm; 6 – analyzer; 7 – photodetector; 8 – computer

Результаты и их обсуждение

На основе технологии текстурированной фотоориентации водорастворимого азокрасителя изготовлены одномерная (последовательное выполнение этапов 1–6 (см. рис. 2)) и двумерная (последовательное выполнение этапов 1–11 (см. рис. 2)) ЖК-решетки. На дифракционных картинах данных решеток (рис. 5) наблюдаются максимумы нулевого, 1-го порядка дифракции высокой интенсивности, максимумы 3-го и 5-го порядков дифракции относительно меньшей интенсивности, тогда как максимумы 2-го и 4-го порядков практически не визуализируются.



Рис. 5. Дифракционная картина одномерной (a) и двумерной (b) анизотропных фазовых ЖК-решеток

Fig. 5. Diffraction pattern of a one-dimensional (a) and two-dimensional (b) anisotropic LC phase gratings

Отсутствие дифракционных максимумов четного порядка является особенностью решеток прямоугольного профиля. Полученные экспериментальные значения дифракционной эффективности η исследуемых решеток характеризуют распределение энергии прошедшего света по порядкам дифракции:

$$\eta = \frac{I_m}{I_0} \cdot 100 \%,$$

где I_m – интенсивность света в m -м порядке дифракции; I_0 – интенсивность светового пучка, падающего на решетку.

Периодическая ЖК-структура (см. рис. 5, a) функционирует как одномерная фазовая дифракционная решетка с прямоугольным профилем штриха и эффективностью дифракции в 1-й порядок $\eta_1 \sim 3\text{--}7\%$. Характерной особенностью дифракционной картины двумерной ЖК-решетки (см. рис. 5, b) является наличие дифракционных максимумов нечетных порядков по двум координатам x, y в плоскости наблюдения (значение дифракционной эффективности в 1-м порядке: $\eta_1 \sim 3\text{--}7\%$).

Результаты экспериментального исследования состояния поляризации дифрагированных световых пучков приведены на рис. 6. Линейно-поляризованное излучение гелий-неонового лазера направлялось перпендикулярно плоскости ЖК-решетки. Рассмотрены три варианта состояния поляризации падающего

светового пучка: $\vec{E} \parallel O_x$, $\vec{E} \parallel O_y$, угол между $\vec{E}$ и O_y составляет 45° . Как и ожидалось, прошедший световой пучок (нулевой порядок дифракции) для всех рассмотренных случаев был поляризован в том же направлении, что и падающий пучок гелий-неонового лазера. Сохранялась поляризация и для дифрагированных пучков в случаях, когда падающий пучок был поляризован вдоль осей x и y . Ситуация менялась, когда вектор $\vec{E}$ составлял угол 45° с осью O_y . В этом случае поляризация дифрагированного пучка поворачивалась на 90° как для 1-го, так и 3-го порядка дифракции. Такое поведение состояния поляризации объясняется особенностью дифракции на поляризационных решетках, для которых дифракция в четные и нечетные порядки характеризуется ортогональными состояниями поляризации [15; 16].

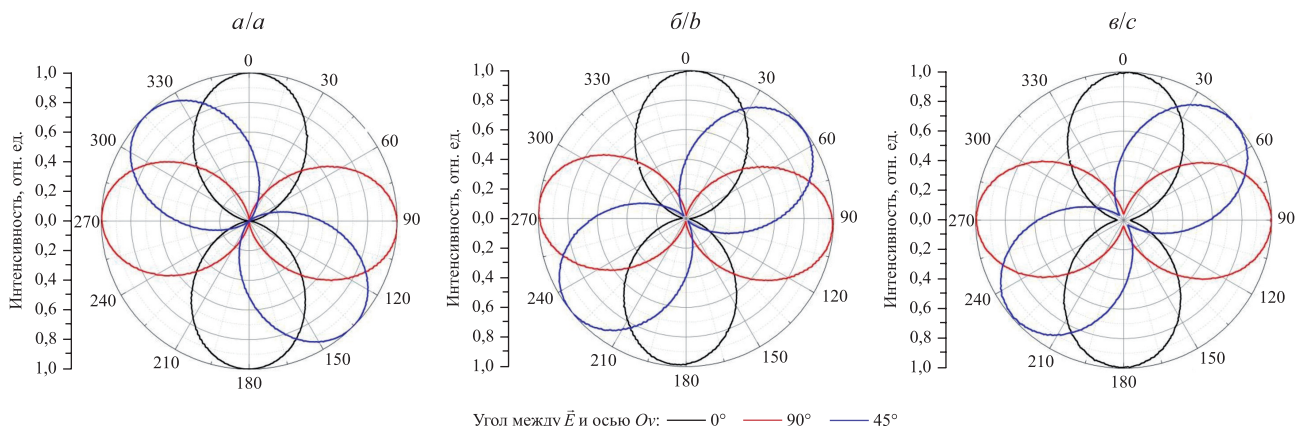


Рис. 6. Состояние поляризации дифрагированного света для фазовой ЖК-решетки.

Порядок дифракции: а – нулевой; б – 1-й; в – 3-й

Fig. 6. Polarization state of diffracted light for a LC phase grating.

Diffraction order: а – zero; б – 1st; в – 3rd

Заключение

Рассмотрена эффективная методика создания двумерных дифракционных ЖК-структур, основанная на технологии послойной текстурированной фотоориентации водорастворимого азокрасителя AbA-2522, характеризующегося обратимостью межмолекулярных связей в процессе фотоориентации. Изготовлены одно- и двумерные анизотропные фазовые ЖК-решетки для пространственно-поляризационного управления лазерным излучением. Результаты исследования дифракционных картин изготовленных анизотропных ЖК-решеток указывают на их соответствие решеткам с прямоугольным профилем штриха. Экспериментально измерены поляризационные диаграммы дифрагированного света для исследуемых ЖК-решеток. Областью практического применения полученных результатов является разработка и создание оптических устройств и систем для пространственно-поляризационного управления оптическим излучением.

Библиографические ссылки

1. Chigrinov VG, Kozenkov VM, Kwok H-S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons; 2008. 248 p. DOI: 10.1002/9780470751800.
2. Chigrinov VG. Photoaligning and photopatterning – a new challenge in liquid crystal photonics. *Crystals*. 2013;3(4):149–162. DOI: 10.3390/cryst3010149.
3. Komar A, Tolstik A, Melnikova E, Muravsky A. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface. *Applied Optics*. 2015;54(16):5130–5135. DOI: 10.1364/AO.54.005130.
4. Melnikova E, Tolstik A, Rushnova I, Kabanova O, Muravsky A. 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.
5. Rushnova I, Melnikova E, Tolstik A, Muravsky A. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave. *Optics Communications*. 2018;413:179–183. DOI: 10.1016/J.OPTCOM.2017.12.029.
6. 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.
7. Rutkowska KA, Chychłowski M, Kwaśny M, Ostromecka I, Piłka J, Laudyn UA. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photo-polymerization of nematic liquid crystals. *Opto-Electronics Review*. 2017;25(2):118–126. DOI: 10.1016/J.OPELRE.2017.05.004.
8. Chigrinov VG, Kwok H-S, Hasebe H, Takatsu H, Takada H. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes. *Journal of the Society for Information Display*. 2008;16(9):897–904. DOI: 10.1889/1.2976648.

9. Trofimova A, Mahilny U. Anisotropic gratings based on patterned photoalignment of reactive mesogen. *Journal of the Optical Society of America B*. 2014;31(5):948–952. DOI: 10.1364/JOSAB.31.000948.
10. Hu W, Srivastava A, Xu F, Sun J-T, Lin X-W, Cui H-Q, et al. Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment. *Optics Express*. 2012;20(5):5384–5391. DOI: 10.1364/OE.20.005384.
11. Оленская ИИ, Кабанова ОС, 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.
12. Zhao CX, Fan F, Du T, Chigrinov VG, Kwok HS. Multilayer photo-aligned thin-film structure for polarizing photonics. *Optics Letters*. 2015;40(13):2993–2996. DOI: 10.1364/OL.40.002993.
13. Mikulich V, Murawski A, Muravsky A, Agabekov V. Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2016;83(1):115–120. DOI: 10.1007/s10812-016-0252-y.
14. Mikulich V, Murauski A, Muravsky A, Agabekov V, Bezruchenko V. Waterproof material for liquid crystals photoalignment based on azo dyes. *Journal of the Society for Information Display*. 2014;22(1):199–203. DOI: 10.1002/jsid.238.
15. Ормачева О, Толстик АЛ. Поляризационное многоволновое взаимодействие в растворах лазерных красителей. *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2005;69(8):1144–1146.
16. Gorbach DV, Nazarov SA, Romanov OG, Tolstik AL. Polarization transformation of singular light beams upon four- and six-wave mixing. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2015;18(2):149–156.

References

1. Chigrinov VG, Kozenkov VM, Kwok H-S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications*. Chichester: John Wiley & Sons; 2008. 248 p. DOI: 10.1002/9780470751800.
2. Chigrinov VG. Photoaligning and photopatterning – a new challenge in liquid crystal photonics. *Crystals*. 2013;3(4):149–162. DOI: 10.3390/cryst3010149.
3. Komar A, Tolstik A, Melnikova E, Muravsky A. Optical switch based on the electrically controlled liquid crystal interface. *Applied Optics*. 2015;54(16):5130–5135. DOI: 10.1364/AO.54.005130.
4. Melnikova E, Tolstik A, Rushnova I, Kabanova O, Muravsky A. 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.
5. Rushnova I, Melnikova E, Tolstik A, Muravsky A. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave. *Optics Communications*. 2018;413:179–183. DOI: 10.1016/J.OPTCOM.2017.12.029.
6. 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.
7. Rutkowska KA, Chychłowski M, Kwaśny M, Ostromecka I, Piłka J, Laudyn UA. Light propagation in periodic photonic structures formed by photo-orientation and photo-polymerization of nematic liquid crystals. *Opto-Electronics Review*. 2017;25(2):118–126. DOI: 10.1016/J.OPELRE.2017.05.004.
8. Chigrinov VG, Kwok H-S, Hasebe H, Takatsu H, Takada H. Liquid-crystal photoaligning by azo dyes. *Journal of the Society for Information Display*. 2008;16(9):897–904. DOI: 10.1889/1.2976648.
9. Trofimova A, Mahilny U. Anisotropic gratings based on patterned photoalignment of reactive mesogen. *Journal of the Optical Society of America B*. 2014;31(5):948–952. DOI: 10.1364/JOSAB.31.000948.
10. Hu W, Srivastava A, Xu F, Sun J-T, Lin X-W, Cui H-Q, et al. Liquid crystal gratings based on alternate TN and PA photoalignment. *Optics Express*. 2012;20(5):5384–5391. DOI: 10.1364/OE.20.005384.
11. Olenskaya II, Kabanova OS, Melnikova EA. [Liquid crystal waveguide elements with different topology of modulation of interface refractive areas]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2015;17(2):87–91. Russian.
12. Zhao CX, Fan F, Du T, Chigrinov VG, Kwok HS. Multilayer photo-aligned thin-film structure for polarizing photonics. *Optics Letters*. 2015;40(13):2993–2996. DOI: 10.1364/OL.40.002993.
13. Mikulich V, Murawski A, Muravsky A, Agabekov V. Influence of methyl substituents on azo-dye photoalignment in thin films. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2016;83(1):115–120. DOI: 10.1007/s10812-016-0252-y.
14. Mikulich V, Murauski A, Muravsky A, Agabekov V, Bezruchenko V. Waterproof material for liquid crystals photoalignment based on azo dyes. *Journal of the Society for Information Display*. 2014;22(1):199–203. DOI: 10.1002/jsid.238.
15. Ormachea O, Tolstik AL. [Polarization multiwave mixing in solutions of laser dyes]. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*. 2005;69(8):1144–1146. Russian.
16. Gorbach DV, Nazarov SA, Romanov OG, Tolstik AL. Polarization transformation of singular light beams upon four- and six-wave mixing. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2015;18(2):149–156.

Статья поступила в редколлегию 28.08.2019.
Received by editorial board 28.08.2019.

Авторы:

Ольга Сергеевна Кабанова — кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:

Olga S. Kabanova, PhD (physics and mathematics); researcher at the laboratory of nonlinear optics and spectroscopy, department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.
kabanovaos@bsu.by
<http://orcid.org/0000-0001-5100-9708>

Ирина Ивановна Рушнова – кандидат физико-математических наук; научный сотрудник лаборатории нелинейной оптики и спектроскопии кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

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

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

Александр Анатольевич Муравский – кандидат физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией «Материалы и технологии ЖК-устройств».

Анатолий Александрович Муравский – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории «Материалы и технологии ЖК-устройств».

Райнер Хайнцманн – доктор физических наук, профессор; руководитель отдела микроскопии.

Iryna I. Rushnova, PhD (physics and mathematics); researcher at the laboratory of nonlinear optics and spectroscopy, department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

rushnova@bsu.by

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

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

melnikova@bsu.by

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

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

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

Alexander A. Muravsky, PhD (physics and mathematics), docent; head of the laboratory «Materials and technologies of LC devices».

alexander.muravsky@ichnm.basnet.by

<http://orcid.org/0000-0003-0652-7391>

Anatoli A. Murauski, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory «Materials and technologies of LC devices».

anatoli_murauski@ichnm.basnet.by

<http://orcid.org/0000-0002-9755-7790>

Rainer Heintzmann, doctor of science (physics), full professor; head of the microscopy research unit.

rainer.heintzmann@leibniz-ipht.de

<http://orcid.org/0000-0002-4950-1936>