

## ФОРМИРОВАНИЕ ЦЕНТРОСИММЕТРИЧНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ СВЕТОВОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ ЭКСПОНИРОВАНИЯ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ОРИЕНТИРУЮЩИХ СЛОЕВ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИНЗ

**В. С. БЕЗРУЧЕНКО<sup>1)</sup>, В. В. МОГИЛЬНЫЙ<sup>2)</sup>, А. И. СТАНКЕВИЧ<sup>2)</sup>,  
Ал. Ан. МУРАВСКИЙ<sup>1)</sup>, Ан. Ал. МУРАВСКИЙ<sup>1)</sup>, И. Н. КУХТО<sup>1)</sup>**

<sup>1)</sup>Институт химии новых материалов НАН Беларуси, ул. Ф. Скорины, 36, 220141, г. Минск, Беларусь

<sup>2)</sup>Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Отмечено, что при УФ-облучении слоев градиентных бензальдегидных полимеров происходит плавный переход от гомеотропной к планарной ориентации жидкокристаллических молекул на их поверхности. В целях использования этого эффекта для создания жидкокристаллических линз необходимо при облучении обеспечить неоднородное локальное распределение освещенности на поверхности ориентирующего слоя с максимальной интенсивностью в центре освещенного круга и ее уменьшением к границам. Подобные распределения можно получить, освещая фоточувствительный слой через фотомаску с круглыми отверстиями. Существенно, что применение такой схемы обеспечивает также возможность создания в один прием подложек для массивов из повторяющихся линзовых структур, имеющих большое прикладное значение. Проведено численное моделирование световых распределений от плоских круговых ламбертовских источников для экспонирования фоточувствительных ориентирующих слоев жидкокристаллических линз. Выполнен экспериментальный анализ профиля распределения интенсивности излучения, создаваемого коллимированным световым пучком и фотомаской с круглыми отверстиями. Определены условия для формирования профиля распределения интенсивности излучения, близкого к параболическому. Изготовлены ориентирующие слои на основе градиентных полимеров с бензальдегидными боковыми группами и жидкокристаллическая ячейка с массивом управляемых линз.

**Ключевые слова:** жидкокристаллическая линза; градиентные ориентирующие слои; фотосшиваемые бензальдегидные полимеры.

### Образец цитирования:

Безрученко В. С., Могильный В. В., Станкевич А. И., Муравский Ал. Ан., Муравский Ан. Ал., Кухто И. Н. Формирование центросимметричных распределений световой интенсивности для экспонирования фоточувствительных ориентирующих слоев жидкокристаллических линз // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 3. С. 12–19.

### For citation:

Bezruchenko V. S., Mahilny U. V., Stankevich A. I., Muravsky Al. An., Muravsky An. Al., Kukhta I. N. The formation of the centrosymmetric distributions of light intensity for exposure of photosensitive alignment layers of LC lenses. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 3. P. 12–19 (in Russ.).

### Авторы:

**Вероника Сергеевна Безрученко** – младший научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.

**Владимир Васильевич Могильный** – доктор физико-математических наук, профессор; профессор кафедры физической оптики физического факультета.

**Александр Ильич Станкевич** – кандидат химических наук; старший научный сотрудник кафедры физической оптики физического факультета.

**Александр Анатольевич Муравский** – кандидат физико-математических наук; заведующий лабораторией материалов и технологий ЖК-устройств.

**Анатолий Александрович Муравский** – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.

**Ирина Николаевна Кухто** – научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.

### Authors:

**Veronika Bezruchenko**, junior researcher at the laboratory of materials and technologies of LC devices.

*veronika.bezruchenko@gmail.com*

**Uladzimir Mahilny**, doctor of science (physics and mathematics), full professor; professor at the department of physical optics, faculty of physics.

*mogilny@bsu.by*

**Alexander Stankevich**, PhD (chemistry); senior researcher at the department of physical optics, faculty of physics.

*stankevich\_aleks@mail.ru*

**Alexander Muravsky**, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of materials and technologies of LC devices.

*alexander.muravsky@ichnm.basnet.by*

**Anatoli Muravsky**, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of the materials and technologies of LC devices.

*anatoli\_murauski@yahoo.com*

**Iryna Kukhta**, researcher at the laboratory of the materials and technologies of LC devices.

*iryna.kukhta@tut.by*

## THE FORMATION OF THE CENTROSYMMETRIC DISTRIBUTIONS OF LIGHT INTENSITY FOR EXPOSURE OF PHOTSENSITIVE ALIGNMENT LAYERS OF LC LENSES

V. S. BEZRUCHENKO<sup>a</sup>, U. V. MAHILNY<sup>b</sup>, A. I. STANKEVICH<sup>b</sup>,  
Al. An. MURAVSKY<sup>a</sup>, An. Al. MURAVSKY<sup>a</sup>, I. N. KUKHTA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Institute of Chemistry of New Materials, National Academy of Sciences of Belarus,  
F. Skaryny Street, 36, 220141, Minsk, Belarus

<sup>b</sup>Belarusian State University, Niezaliežnasti Avenue, 4, 220030, Minsk, Belarus  
Corresponding author: V. S. Bezruchenko (veronika.bezruchenko@gmail.com)

Under UV irradiation of the gradient benzaldehyde polymer layers, a gradual transition from homeotropic to planar alignment of mesogenic molecules occurs on their surface. To use this effect to produce liquid crystal lenses, it is necessary to create an inhomogeneous local distribution of illumination on the surface of the orienting layer with a maximum intensity in the center of the illuminated circle and with its decrease to the boundaries. Similar distributions can be obtained by illuminating the photosensitive layer through a photomask with round holes. It is essential that the use of such a scheme also provides the possibility of creating in one process the substrates for arrays of repetitive lens structures which are of great value in engineering. In this paper, the light distributions from planar round Lambert sources for exposure of the photosensitive alignment layers of liquid crystal lenses are modeled by the numerical methods. An experimental analysis of the radiation intensity profile created by using the collimated light beam and photomask with round holes is performed. The conditions for the formation of a radiation intensity distribution profile close to the parabolic one are chosen. The alignment layers based on gradient polymers with benzaldehyde side groups and the liquid crystal cell with an array of switchable lenses are manufactured.

**Key words:** liquid crystal lens; gradient alignment layer; photocrosslinking benzaldehyde polymers.

### Введение

Существует ряд методов изготовления адаптивных линзовых структур в жидкокристаллических (ЖК) ячейках [1–4]. В то же время оптимизация технологического исполнения и достигаемых технических параметров ЖК-линз остается актуальной задачей. Особенно это касается способов и процессов изготовления массивов (блоков) ЖК-линз в связи с их прикладным значением для камер и микроскопов светового поля [5; 6], автостереоскопических дисплеев [7] и других приложений линзовых растров.

Некоторые способы создания ЖК-линз и их массивов основываются на формировании в ЖК-ячейке колоколообразного распределения (распределений) углов преднаклона ЖК-молекул [8; 9] (рис. 1). Вместе с ним возникают аналогичное по форме распределение показателя преломления для соответствующей поляризации и фокусирующий эффект, зависящий от приложенного напряжения.

Одна из перспективных возможностей локального изменения угла преднаклона связана с явлением фотоориентации жидких кристаллов на поверхности fotocувствительных слоев, облученных некогерентным линейно-поляризованным светом [10; 11]. Результат такого облучения – постепенное нарастание с увеличением дозы азимутальной энергии сцепления жидких кристаллов с поверхностью слоя. При достаточной величине эффекта первоначально гомеотропная ориентация жидких кристаллов может через промежуточные значения углов преднаклона перейти в планарную [12].

Недавно обнаружено явление фотостимулированной ориентации жидких кристаллов после натирания слоев бензальдегидных полимеров [13]. Неполаризованное некогерентное

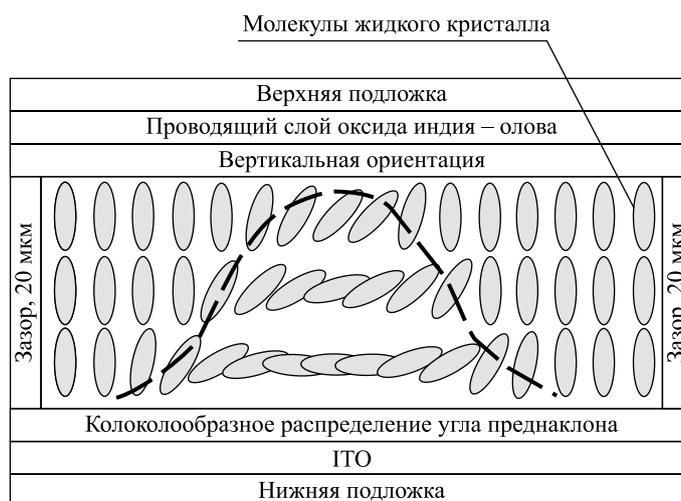


Рис. 1. Схематическая диаграмма ЖК-линзы в ЖК-ячейке.  
ITO (оксид индия – олова) – проводящий слой

Fig. 1. Schematic diagram of an LC lens in an LC cell.  
ITO (indium tin oxide) is a conductive layer

фотооблучение натертого слоя в этом случае также увеличивает азимутальную энергию сцепления жидких кристаллов с поверхностью и может вызвать уменьшение угла преднаклона (градиентные полимеры) [14].

Формирование распределения директора в ЖК-ячейке, подобного приведенному на рис. 1, с применением фотоориентации или фотостимулированной ориентации после натирания слоя предполагает создание кругового поля экспонирования с радиальной симметрией освещенности. Для ориентирующих материалов типа бензальдегидных полимеров, азимутальная энергия сцепления с которыми возрастает при облучении, интенсивность должна быть максимальной в центре освещенного круга и спадать к его границам. Тогда распределение углов преднаклона в ячейке будет соответствовать представленному на рис. 1.

Цель настоящей работы – создание оптической схемы и оценка ее оптимальных параметров для формирования полей экспонирования с колоколообразным распределением освещенности, пригодных для создания линзовых структур в ЖК-ячейке с ориентирующими слоями на основе бензальдегидных полимеров.

### Моделирование освещенности полей экспонирования

Предположим, что отверстие фотомаски, находящееся на расстоянии  $d$  от плоскости экспонирования, является ламбертовским источником (ЛИ) в виде диска радиусом  $r_0$ . Нетрудно показать, что радиально-симметричное распределение интенсивности света  $I(R)$ , формируемое таким источником, определяется выражением

$$I(R) = L \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{rd^2}{(d^2 + r^2 + R^2 - 2rR \cos(\varphi))^2} dr d\varphi, \quad (1)$$

где  $r$  и  $R$  – координаты точки источника и точки наблюдения соответственно;  $\varphi$  – азимутальный угол в полярной системе координат, связанной с источником излучения (рис. 2);  $L$  – яркость источника.

Для ЛИ радиусом  $r_0 = 0,4$  мм нормированное распределение интенсивности  $I_{\text{отн}}(R)$  будет выглядеть так, как представлено на рис. 3.

Если ввести декартову систему координат на облучаемой поверхности, выражение (1) преобразуется путем замены  $R$  на  $\sqrt{x^2 + y^2}$  следующим образом:

$$I(x, y) = L \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{rd^2}{(d^2 + r^2 + x^2 + y^2 - 2r\sqrt{x^2 + y^2} \cos(\varphi))^2} dr d\varphi. \quad (2)$$

Модельные расчеты распределения интенсивности света на плоскости экспонирования дают трехмерную картину, приведенную на рис. 4.

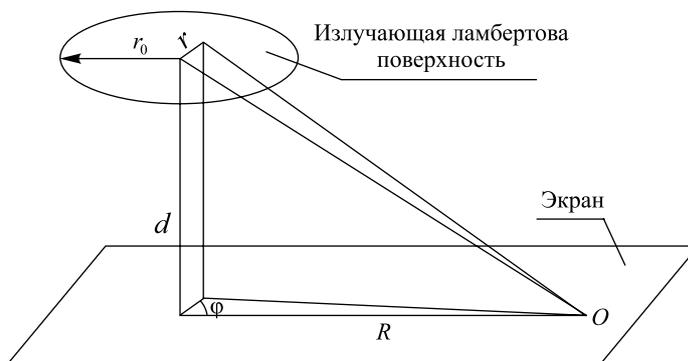


Рис. 2. Схема для определения интенсивности излучения на расстоянии  $R$  от проекции центра ЛИ ( $O$  – произвольная координата, зависящая от величины  $R$ )

Fig. 2. Scheme for the radiation intensity determination at the distance  $R$  from the projection of the Lambert source center ( $O$  is an arbitrary coordinate, depending on the value of  $R$ )

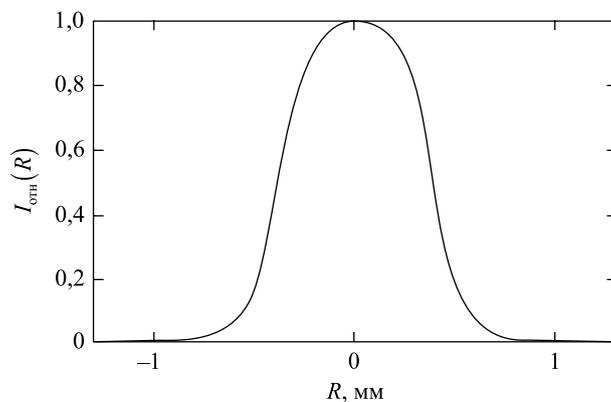


Рис. 3. Распределение интенсивности света  $I_{отн}(R)$  на экране, формируемое ЛИ в форме диска радиусом  $r_0 = 0,4$  мм на расстоянии  $d = 0,15$  мм от облучаемой поверхности

Fig. 3. The light intensity distribution  $I_{rel}(R)$  formed at the screen by the disc-shaped Lambert source with the radius  $r_0 = 0.4$  mm at the distance  $d = 0.15$  mm from the exposed surface

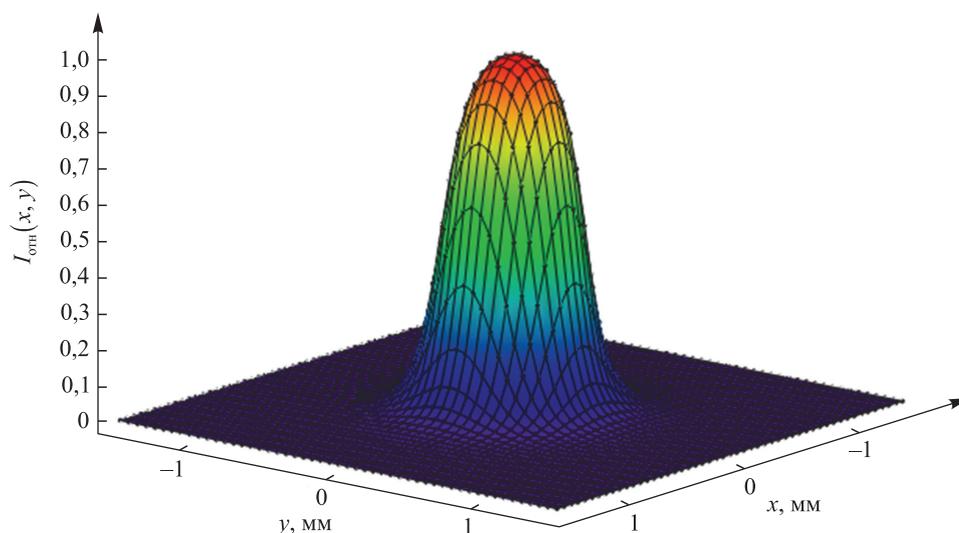


Рис. 4. Распределение интенсивности света, формируемое дисковидным ЛИ-радиусом  $r_0 = 0,4$  мм на экране при  $d = 0,15$  мм

Fig. 4. The light intensity distribution from the disc-shaped Lambert source with the radius  $r_0 = 0.4$  mm formed at the screen when  $d = 0.15$  mm

Рассмотрим осветитель из девяти ЛИ радиусом  $r_0 = 0,4$  мм, расположенных с шагом  $c = 1,1$  мм (рис. 5). С помощью формулы (2) в соответствии с рис. 5 получим выражение для освещенности в заданной точке экрана как сумму вкладов от всех ЛИ:

$$\begin{aligned}
 I_0(x, y) &= I_1(x, y) + I_2(x, y) + \dots + I_9(x, y) = \\
 &= L \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{rd^2}{\left(d^2 + r^2 + x^2 + y^2 - 2r\sqrt{x^2 + y^2} \cos(\varphi)\right)^2} dr d\varphi + \\
 &+ L \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{rd^2}{\left(d^2 + r^2 + (x+c)^2 + y^2 - 2r\sqrt{(x+c)^2 + y^2} \cos(\varphi)\right)^2} dr d\varphi + \dots \\
 &\dots + L \int_0^{2\pi} \int_0^{r_0} \frac{rd^2}{\left(d^2 + r^2 + (x-c)^2 + (y-c)^2 - 2r\sqrt{(x-c)^2 + (y-c)^2} \cos(\varphi)\right)^2} dr d\varphi.
 \end{aligned}$$

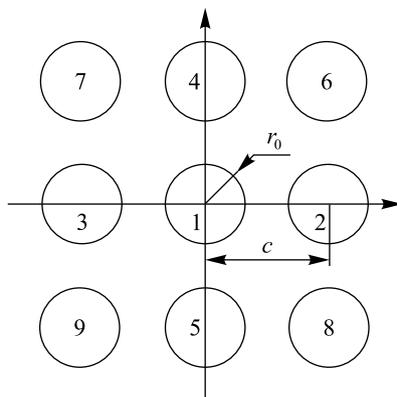


Рис. 5. Схема осветителя из 9 ЛИ

Fig. 5. The illuminator scheme including 9 Lambert sources

Расчеты распределения интенсивности света в плоскости экспонирования при использовании такого осветителя дают картину, представленную на рис. 6.

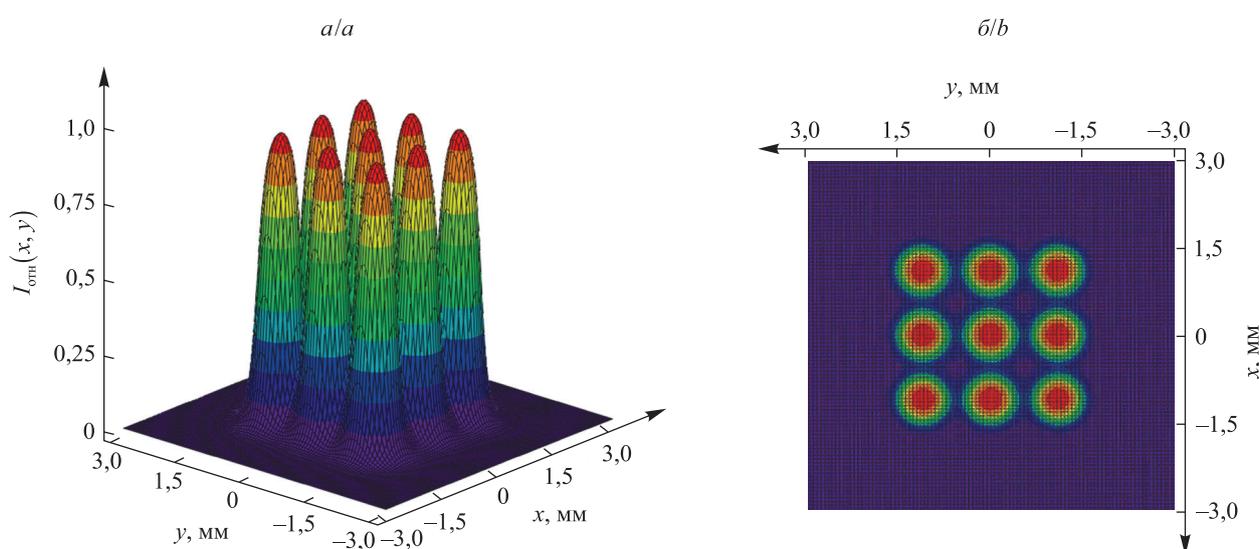


Рис. 6. Рассчитанное распределение освещенности, формируемое девятью отстоящими на 1,1 мм дисковидными ЛИ радиусом  $r_0 = 0,4$  мм при  $d = 0,15$  мм, в трехмерном (а) и двумерном (б) виде

Fig. 6. The calculated illumination distribution formed by 9 disc-shaped Lambert sources, spaced by 1.1 mm, with the radius  $r_0 = 0.4$  mm when  $d = 0.15$  mm in the three-dimensional (a) and two-dimensional (b) form

Расстояние от ЛИ до плоскости экспонирования  $d$  подбиралось таким образом, чтобы облученные области находились максимально близко друг к другу, но не перекрывались ( $d = 0,15$  мм).

Рассчитанные распределения интенсивности качественно демонстрируют принципиальную возможность применения масок с круглыми отверстиями для формирования полей экспонирования ориентирующих слоев ЖК-линз. Однако экспериментально реализовать схему, приведенную на рис. 2, без существенных светопотерь не представляется возможным, учитывая реальную геометрию распространенных источников УФ-излучения (лампы различной формы: шаровой, трубчатой, спиральной). В связи с этим были проведены эксперименты, в которых использовалось преобразование светового пучка от удаленного источника фотомаской с круглыми отверстиями.

### Экспериментальная апробация оптической схемы

Разработка фотомаски с круглыми отверстиями для формирования ЖК-линз в фоточувствительных бензальдегидных слоях является нетривиальной задачей. Для формирования плавного геометрического профиля линз на основе жидких кристаллов отверстия фотомаски должны быть идеально круглыми

с заданным диаметром; края отверстий фотомаски – без дефектов; сторона маски, обращенная к ориентирующему материалу, не должна вносить вклад (отражение, переотражение) в облучение градиентного материала. В качестве фотомасок нами были использованы черненные бронзовые пластины, в которых отверстия высверливались на станке с числовым программным управлением.

Получены световые распределения освещенности на экране при прохождении коллимированного излучения через круглые отверстия фотомаски, имеющие радиус  $r_0 = 0,15$  мм. В эксперименте использован поляризационный микроскоп, производимый в Беларуси, Микро 200Т [15], на подвижной столик которого помещалась фотомаска, расстояние  $d$  изменялось от 0,00 до 0,53 мм путем пошагового выхода из фокуса границ отверстия фотомаски. Схема установки для определения зависимостей освещенности при прохождении фотомаски с отверстием представлена на рис. 7, а.

Экспериментальные распределения освещенности на экране для фотомаски с одним отверстием при  $d$ , равном 0,00; 0,13; 0,23; 0,28; 0,33 и 0,53 мм, приведены на рис. 7, б, из которого видно, что кривые приобретают колоколообразный профиль при удалении фотомаски от экрана (фокуса) на расстояние  $d \geq 0,28$  мм. Согласно нашим расчетам в случае ЛИ (см. рис. 3) это расстояние меньше ( $\sim 0,15$  мм). Такая разница, очевидно, связана с различием световых пучков от ЛИ и источника света в микроскопе – лампы накаливания с коллиматором. Вероятно, при использовании источника света с неколлимированным пучком приемлемая величина лежит в промежутке между этими значениями.

Изображения отверстий фотомаски, регистрируемые камерой, приведены на рис. 8.

С применением вышеизложенных результатов изготовлена ЖК-ячейка с массивом ЖК-линз.

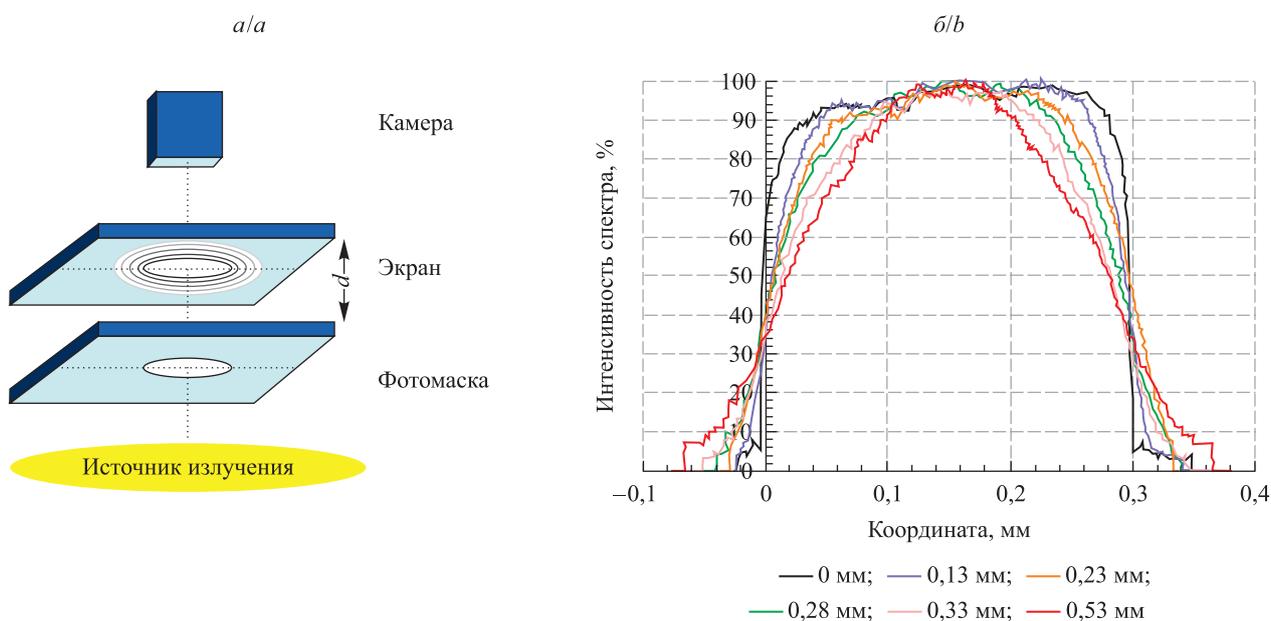


Рис. 7. Схема измерения распределения освещенности при прохождении коллимированного излучения через фотомаску с круглым отверстием радиусом  $r_0 = 0,15$  мм (а); измеренные распределения освещенности при варьировании  $d$  от 0,00 до 0,53 мм (б)

Fig. 7. The illumination-distribution measuring scheme in the case when collimated radiation passes through a photomask with a circular hole having the radius  $r_0 = 0.15$  mm (a); measured illumination distributions when  $d$  varies from 0.00 to 0.53 mm (b)

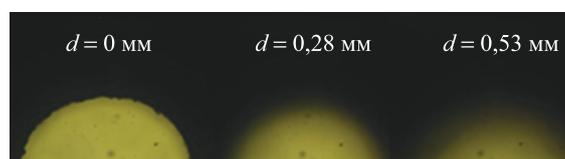


Рис. 8. Фотографии отверстия фотомаски ( $r_0 = 0,15$  мм) при удалении ее из фокуса на расстояние  $d$

Fig. 8. Microscopic images of the photomask hole ( $r_0 = 0.15$  mm), when it is removed from the focus to the distance  $d$

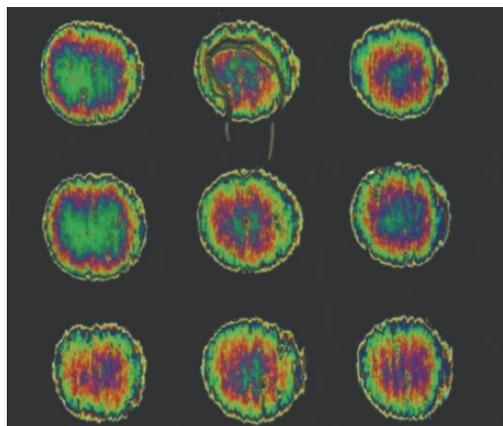


Рис. 9. Фотография ЖК-ячейки с массивом линз между скрещенными поляризаторами

Fig. 9. The LC lens array microscopic images in the LC cell under crossed polarizers

линз между скрещенными поляризаторами представлена на рис. 9 (направление натирания ориентировано под углом  $45^\circ$  относительно осей поляризаторов).

Фотография, приведенная на рис. 9, демонстрирует колоколообразное распределение двулучепреломления, а значит, и показателя преломления для соответствующей поляризации света. Полученные ЖК-линзы характеризуются круглой формой с наличием небольшого числа дефектов, расстояние между линзами достаточно большое, что говорит о возможности отнесения фотомаски над поверхностью ориентирующего слоя на большее расстояние.

### Заключение

Представленные результаты позволяют заключить, что предложенная схема экспонирования на основе фотомаски с круглыми отверстиями дает возможность создавать на поверхности градиентных бензальдегидных полимеров зоны с centrosymmetric распределением угла преднаклона, обеспечивающие формирование линзовых структур в ЖК-ячейке. В качестве источника активирующего УФ-излучения применимы люминесцентные лампы в виде колбы с матовой поверхностью (например, UVB-Glo10-E27), отнесенные на расстояние 4–5 см от фотомаски. Зазор между фотомаской и экспонируемым слоем при этом составляет около 0,2 мм.

### Библиографические ссылки

1. Algorri J., Urruchi V., Garcia-Camara B., et al. Liquid crystal microlenses for autostereoscopic displays // *Materials*. 2016. Vol. 9, № 1. P. 1–17.
2. Dai H., Liu Y., Sun X., et al. A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing // *Opt. express*. 2009. Vol. 17, № 6. P. 4317–4323.
3. Hsu C. J., Sheu C. R. Using photopolymerization to achieve tunable liquid crystal lenses with coaxial bifocals // *Opt. express*. 2012. Vol. 20, № 4. P. 4738–4746.
4. Hwang S. J., Shieh Y. M., Lin K. R. Liquid crystal microlens using nanoparticle-induced vertical alignment // *J. Nanomater.* 2015. Vol. 2015. Article number: 840182.
5. Ng R., Levoy M., Bredif M., et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera // *Comp. Sci. Tech. Report CSTR*. 2005. Vol. 2, № 11. P. 1–11.
6. Levoy M., Zhang Z., McDowell I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays // *J. Microsc.* 2009. Vol. 235, № 2. P. 144–162.
7. Flack J., Harrold J., Woodgate G. J. A prototype 3D mobile phone equipped with a next-generation autostereoscopic display // *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6490, № 1. P. 502–523.
8. Tseng M. C., Fan F., Lee C. Y., et al. Tunable lens by spatially varying liquid crystal pretilt angles // *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, № 8. P. 083109.
9. Honma M., Nose T., Yanase S., et al. Liquid-crystal variable-focus lenses with a spatially-distributed tilt angles // *Opt. express*. 2009. Vol. 17, № 13. P. 10998–11006.
10. Ho J. Y. L., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Variable liquid crystal pretilt angles generated by photoalignment of a mixed polyimide alignment layer // *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90, № 24. P. 243506.
11. Kawatsuki N. Photoalignment and photoinduced molecular reorientation of photosensitive materials // *Chem. Lett.* 2011. Vol. 40, № 6. P. 548–554.
12. Iimura Y., Akiyama H., Li X. T., et al. Photoalignment control of LC and its applications to LCD fabrication // *Proc. of SPIE*. 1998. Vol. 3297. P. 8–18.

13. Могильный В. В., Станкевич А. И., Трофимова А. В. Модуляция двулучепреломления ЖК-мономера неполяризованным УФ-облучением полимерного ориентанта // Взаимодействие излучения с твердым телом : материалы XI Междунар. конф. (Минск, 23–25 сент. 2015 г.). Минск, 2015. С. 254–255.
14. Безрученко В. С., Муравский А. А. Изучение зависимостей углов подвеса градиентных фоточувствительных полимерных материалов от дозы экспонирования // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2015. № 1. С. 31–33.
15. Муравский А. А., Муравский А. А., Агабеков В. Е. Установка для одновременного измерения азимутальной и полярной энергии сцепления жидкого кристалла в одной ячейке в автоматическом режиме // Вестн. МГОУ. Сер. физ.-мат. 2013. № 1. С. 51–55.
16. Bezruchenko V. S., Muravsky A. A., Murauski A. A., et al. Tunable Liquid Crystal Lens Based on Pretilt Angle Gradient Alignment // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2016. Vol. 626, № 1. P. 222–228.

## References

1. Algorri J., Urruchi V., Garcia-Camara B., et al. Liquid crystal microlenses for autostereoscopic displays. *Materials*. 2016. Vol. 9, No. 1. P. 1–17.
2. Dai H., Liu Y., Sun X., et al. A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing. *Opt. express*. 2009. Vol. 17, No. 6. P. 4317–4323.
3. Hsu C. J., Sheu C. R. Using photopolymerization to achieve tunable liquid crystal lenses with coaxial bifocals. *Opt. express*. 2012. Vol. 20, No. 4. P. 4738–4746.
4. Hwang S. J., Shieh Y. M., Lin K. R. Liquid crystal microlens using nanoparticle-induced vertical alignment. *J. Nanomater.* 2015. Vol. 2015. Article number: 840182. DOI: 10.1155/2015/840182.
5. Ng R., Levoy M., Bredif M., et al. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Comp. Sci. Tech. Report CSTR*. 2005. Vol. 2, No. 11. P. 1–11.
6. Levoy M., Zhang Z., McDowell I. Recording and controlling the 4D light field in a microscope using microlens arrays. *J. Microsc.* 2009. Vol. 235, No. 2. P. 144–162.
7. Flack J., Harrold J., Woodgate G. J. A prototype 3D mobile phone equipped with a next-generation autostereoscopic display. *Proc. SPIE*. 2007. Vol. 6490, No. 1. P. 502–523.
8. Tseng M. C., Fan F., Lee C. Y., et al. Tunable lens by spatially varying liquid crystal pretilt angles. *J. Appl. Phys.* 2011. Vol. 109, No. 8. P. 083109.
9. Honma M., Nose T., Yanase S., et al. Liquid-crystal variable-focus lenses with a spatially-distributed tilt angles. *Opt. express*. 2009. Vol. 17, No. 13. P. 10998–11006.
10. Ho J. Y. L., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Variable liquid crystal pretilt angles generated by photoalignment of a mixed polyimide alignment layer. *Appl. Phys. Lett.* 2007. Vol. 90, No. 24. P. 243506.
11. Kawatsuki N. Photoalignment and photoinduced molecular reorientation of photosensitive materials. *Chem. Lett.* 2011. Vol. 40, No. 6. P. 548–554.
12. Iimura Y., Akiyama H., Li X. T., et al. Photoalignment control of LC and its applications to LCD fabrication. *Proc. SPIE*. 1998. Vol. 3297. P. 8–18.
13. Mogil'nyi V. V., Stankevich A. I., Trofimova A. V. Optical radiation influence on the photoinduced birefringence in the layers of benzaldehyde polymers. *Interaction of Radiation with Solids : materials of the XI Intern. conf. (Minsk, 23–25 Sept., 2015)*. Minsk, 2015. P. 254–255 (in Russ.).
14. Bezruchenko V. S., Muravskii A. A. Investigation of tilt angle dependence of gradient photosensitive polymeric material on exposure dose. *Vesti NAN Belarusi. Ser. Fiz.-tekh. nauk.* 2015. No. 1. P. 31–33 (in Russ.).
15. Murauski A. A., Muravsky A. A., Agabekov V. E. Setup for simultaneous measurement of azimuthal and polar anchoring energy of liquid crystal within single cell in automatic regime. *Vestnik MGOU. Ser. fiz.-mat.* 2013. No. 1. P. 51–55 (in Russ.).
16. Bezruchenko V. S., Muravsky A. A., Murauski A. A., et al. Tunable Liquid Crystal Lens Based on Pretilt Angle Gradient Alignment. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 2016. Vol. 626, No. 1. P. 222–228.

Статья поступила в редакцию 05.05.2017.  
Received by editorial board 05.05.2017.