

МАССИВЫ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ЛИНЗ НА ОСНОВЕ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО ОРИЕНТАНТА

**В. Ю. СТАНЕВИЧ¹⁾, Д. С. ЧЕПЕЛЕВА¹⁾,
А. Д. КУРИЛОВ²⁾, В. С. БЕЗРУЧЕНКО³⁾, А. А. МУРАВСКИЙ¹⁾**

¹⁾Институт химии новых материалов НАН Беларуси,
ул. Франциска Скорины, 36, 220141, г. Минск, Беларусь

²⁾Государственный университет просвещения,
ул. Веры Волошиной, 24, 141014, г. Мытищи, Московская обл., Россия

³⁾Morroy NV, ул. Фрида Сайсстраат, 1, 9052, г. Гент, Бельгия

Разработаны новые подходы к созданию жидкокристаллических устройств, управляющих угловым распределением света. Синтезирован ориентирующий материал, с помощью которого формируется распределение директора жидкого кристалла на поверхности подложек, позволяющее при прохождении света через жидкокристаллическую ячейку получить волновой фронт, аналогичный обычной линзе. Данный материал представляет собой сополимер (BVS) бутилметакрилата (BMA), ванилилметакрилата (VMA) и стеарилметакрилата (SMA). Изготовлены жидкокристаллические ячейки с различными упаковками массива линз (квадратной и гексагональной). Показано, что для реализации наиболее эффективного рассеяния управляемой рефрактивно-рассеивающей структуры плотность линз в упаковке должна быть максимально возможной. Установлено, что оптимальной является гексагональная упаковка массива линз, поскольку в этом случае занимаемая линзами площадь на 5 % больше, чем в случае квадратной упаковки. Выполнен расчет фокусного расстояния массива жидкокристаллических линз в поляризованном свете. Выявлено, что наименьшее фокусное расстояние характерно для синего диапазона длин волн, а наибольшее – для красного. Исследована зависимость фокусного расстояния от радиуса жидкокристаллической линзы, толщины жидкокристаллического слоя, двулучепреломления жидкокристаллических материалов. Разработанный сополимер (BVS) позволяет изготовить массив линз на пластиковой подложке благодаря низкотемпературной обработке ($\leq 70^\circ\text{C}$), что обуславливает перспективы применения данного материала в области создания современных устройств и систем управления световыми пучками.

Ключевые слова: жидкий кристалл; сополимер; ориентирующие материалы; жидкокристаллические линзы; массив линз.

Образец цитирования:

Станевич ВЮ, Чепелева ДС, Курилов АД, Безрученко ВС, Муравский АА. Массивы жидкокристаллических линз на основе фоточувствительного полимерного ориентанта. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2023;3:22–30.
EDN: ACQATL

For citation:

Stanevich VYu, Chepeleva DS, Kurilov AD, Bezruchenko VS, Murauski AA. Arrays of liquid crystal lenses based on photo-sensitive polymer orientant. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2023;3:22–30. Russian.
EDN: ACQATL

Авторы:

Вероника Юрьевна Станевич – младший научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.
Доминика Сергеевна Чепелева – младший научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.
Александр Дмитриевич Курилов – кандидат физико-математических наук; заведующий учебно-научной лабораторией теоретической и прикладной нанотехнологии.
Вероника Сергеевна Безрученко – кандидат физико-математических наук; инженер-материаловед.
Анатолий Александрович Муравский – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств.

Authors:

Veranika Yu. Stanevich, junior researcher at the laboratory of materials and technologies of LC devices.
veronika.stanevich@gmail.com
Daminika S. Chepeleva, junior researcher at the laboratory of materials and technologies of LC devices.
dominika.chepeleva@mail.ru
Alexander D. Kurilov, PhD (physics and mathematics); head of the laboratory of theoretical and applied nanotechnology.
ad.kurilov@gmail.com
Veronika S. Bezruchenko, PhD (physics and mathematics); material engineer.
veronika_sudas@mail.ru
Anatoli A. Murauski, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the laboratory of materials and technologies of LC devices.
anatoli_murauski@yahoo.com

ARRAYS OF LIQUID CRYSTAL LENSES
BASED ON PHOTSENSITIVE POLYMER ORIENTANT

V. Yu. STANEVICH^a, D. S. CHEPELEVA^a,
A. D. KURILOV^b, V. S. BEZRUCHENKO^c, A. A. MURAUSKI^a

^aInstitute of Chemistry of New Materials, National Academy of Sciences of Belarus,
36 Francyska Skaryny Street, Minsk 220141, Belarus

^bState University of Education, 24 Very Voloshinoy Street, Mytishchi 141014, Moscow Region, Russia

^cMorrow NV, 1 Frieda Seisstraat Street, Ghent 9052, Belgium

Corresponding author: V. Yu. Stanevich (veronika.stanevich@gmail.com)

New approaches have been developed for creating liquid crystal devices that control the angular distribution of light. An alignment material has been synthesised, with help of which the distribution of the liquid crystal director on the surface of the substrates is formed. When light passes through the liquid crystal cell, distribution makes possible to obtain a wave front similar to a conventional lens. This material is a copolymer (BVS) of butyl methacrylate (BMA), vanillyl methacrylate (VMA) and stearyl methacrylate (SMA). Liquid crystal cells with different lens array packages (square and hexagonal) are manufactured. It is shown that in order to realise the maximum scattering of a controlled refractive-scattering structure, the lens density in the packing should be as high as possible. It has been established that the hexagonal packing of the lens array is optimal, since in this case the area occupied by the lenses is 5 % larger than in the case of square packing. The focal length of an array of liquid crystal lenses in polarised light is calculated. It has been established that the smallest focal length is typical for the blue wavelength range, and the largest for the red one. The dependence of the focal length on the radius of the liquid crystal lens, the thickness of the liquid crystal layer and the birefringence of liquid crystal materials is studied. The developed copolymer (BVS) makes it possible to manufacture an array of lenses on a plastic substrate due to low-temperature processing ($\leq 70^\circ\text{C}$), which leads to the prospects for using this material in the field of creating modern devices and systems for controlling light beams.

Keywords: liquid crystal; copolymer; aligning materials; liquid crystal lenses; lens array.

Введение

На данный момент огромный интерес представляет разработка плоскопараллельных переключаемых оптических структур. Одним из перспективных способов создания такого рода элементов является использование жидких кристаллов (ЖК) в качестве функциональных материалов [1]. Ориентация ЖК в ячейке определяется взаимодействиями твердой поверхности ориентирующего слоя и молекул ЖК. Благодаря этим взаимодействиям директор ЖК может принимать гомеотропную, наклонную или планарную ориентацию по отношению к плоскости подложки, с которой он контактирует. Ненулевые значения углов преднаклона директора ЖК позволяют создать множество переключаемых фотонных устройств, в том числе ЖК-линзы, способные эффективно изменять фокусное расстояние с помощью низких управляющих напряжений [2].

На сегодняшний день массивы адаптивных ЖК-линз могут быть использованы в дисплеях, микроскопах светового поля (например, для формирования автостереоскопического 3D-эффекта), органических микролазерах, устройствах ввода излучения в волновод, осветительных приборах и др.

В настоящей работе предложен современный подход к созданию ЖК-устройств на основе массива микролинз, обеспечивающих управление угловым распределением света. Отработана технология нанесения тонких пленок ориентирующего материала (BVS), что позволило реализовать заданное распределение ориентации директора ЖК на поверхности подложек с пространственным разрешением, составляющим единицы микрон [3; 4]. Проанализированы оптические свойства и возможности дальнейшего применения предлагаемых ЖК-структур.

Дизайн управляемой ЖК-линзы

Для создания адаптивной ЖК-линзы была выбрана структура типа «сэндвич» (рис. 1), представляющая собой нематическую гибридно-ориентированную ЖК-ячейку (HAN-ячейку). Ключевым компонентом для данной структуры является ориентирующий материал, тонкие пленки которого способны локально изменять углы преднаклона ЖК под действием оптического облучения [2].

Специальное распределение директора ЖК в ячейке, формирующее линзоподобную структуру, предполагает плавное изменение угла преднаклона директора ЖК от 90° до 0° при переходе от периферии линзы к ее центру (см. рис. 1, а), вне границ линзы ориентация ЖК остается гомеотропной. Плавное изменение ориентации директора ЖК в ячейке позволяет получить градиент показателя преломления

ЖК-среды для линейно-поляризованного света, ориентированного в направлении директора ЖК в случае рассматриваемой геометрии. При подключении к электродам ячейки низкочастотного напряжения молекулы ЖК ориентируются своими длинными осями вдоль вектора напряженности электрического поля. При достаточно большой амплитуде управляющего напряжения ориентация ЖК в ячейке становится однородной гомеотропной, что сопровождается увеличением фокусного расстояния ЖК-линзы [2].

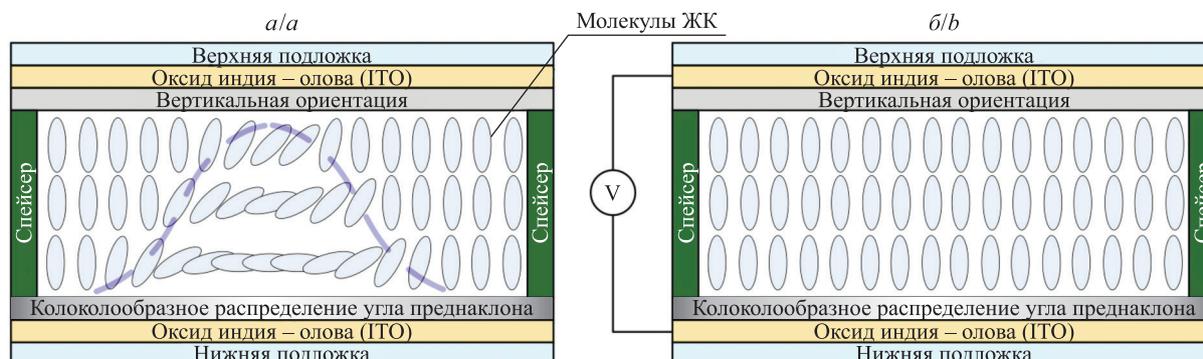


Рис. 1. Схема управляемой ЖК-линзы в плоской ячейке:
а – без приложенного напряжения; б – с приложенным напряжением.
Источник: [5]

Fig. 1. Liquid crystal (LC) lens structure: а – no voltage; б – on-state.
Source: [5]

Нижний (градиентный) ориентирующий слой должен обеспечивать заданное распределение углов преднаклона директора ЖК, зависящее от дозы УФ-облучения. Так как полярная и азимутальная энергии сцепления ориентирующих слоев с ЖК-материалом увеличиваются с ростом дозы УФ-облучения, то для создания плавного колоколообразного профиля распределения углов преднаклона директора ЖК интенсивность УФ-излучения должна быть максимальной в центре освещенного круга и спадать по направлению к периферии. Тогда при выбранном времени экспонирования будет получено соответствующее распределение экспозиционных доз. Если диапазоны изменения интенсивности УФ-излучения соответствуют участку уменьшения углов преднаклона директора ЖК, то будет получено требуемое распределение последних по площади линзы. Формирование распределения углов преднаклона директора ЖК в ячейке предполагает создание кругового поля экспонирования с радиальной симметрией освещенности. Воспроизводимость углов преднаклона директора ЖК должна достигаться путем точного контроля дозы УФ-облучения ориентирующего слоя [2].

Технология изготовления ЖК-линз

Для изготовления ЖК-линзы обычно используется ячейка типа «сэндвич» (см. рис. 1), состоящая из двух подложек, покрытых тонкими слоями градиентного полимерного материала. Ориентирующие слои подвергаются непродолжительному однородному УФ-экспонированию, сохраняющему величину угла преднаклона 90° , но предотвращающему изменение условий исходной гомеотропной ориентации под действием ЖК [6]. Далее производится однородное натирание ориентирующих слоев, после чего нижняя подложка подвергается локальному УФ-экспонированию световым полем с круговой геометрией (рис. 2) [2].

В ходе выполнения работы изготовлены массивы линз с квадратной и гексагональной упаковкой. Для упрощения анализа свойств линз выбраны следующие размеры: диаметр линз – 0,8 мм, расстояние между центрами линз – 2,5 мм. Массивы линз формировались в ЖК-ячейках типа «сэндвич». Для изготовления ячеек был отработан технологический процесс. На тщательно очищенные стеклянные подложки толщиной 0,7 мм с проводящим подслоем оксида индия – олова (ITO) жидкостным способом (методом род-коутинга) наносился ориентирующий слой из 1 % раствора фоточувствительного полимера (BVS). Затем производилась сушка подложек на термоплите при температуре 70°C в течение 5 мин для удаления следов растворителя. Далее подложки натирались механическим способом с помощью автоматизированной натирающей машины, оснащенной хлопковой щеткой с длиной ворса 2 мм. Направление натирания подложек выбиралось таким образом, чтобы получить в ЖК-ячейке антипараллельную ориентацию ЖК. Оба натертых слоя верхней и нижней подложек предварительно облучались неполяризованным излучением люминесцентной лампы с длиной волны 320 нм и интенсивностью 3 мВт/см^2 в течение 60 с. После натирания ориентирующих слоев производилось экспонирование нижней подложки: выполнялась запись массива линз светодиодом с длиной волны излучения 310 нм и максимальной интенсивностью в центре пучка света около 30 мВт/см^2 . Впоследствии обе подложки склеивались эпоксидным двухкомпонентным

клеем для формирования корпуса ячейки. Величина воздушного зазора в ячейке задавалась с помощью волоконных спейсеров диаметром 20 мкм. Подготовленная ячейка заправлялась нематическим кристаллом ЖК-1285 (НИОПИК, Россия) в условиях изотропной фазы.

Запись в ячейке массива линз с гексагональной и квадратной упаковкой производилась с помощью микроскопа (рис. 3), оснащенного передвижным столиком.

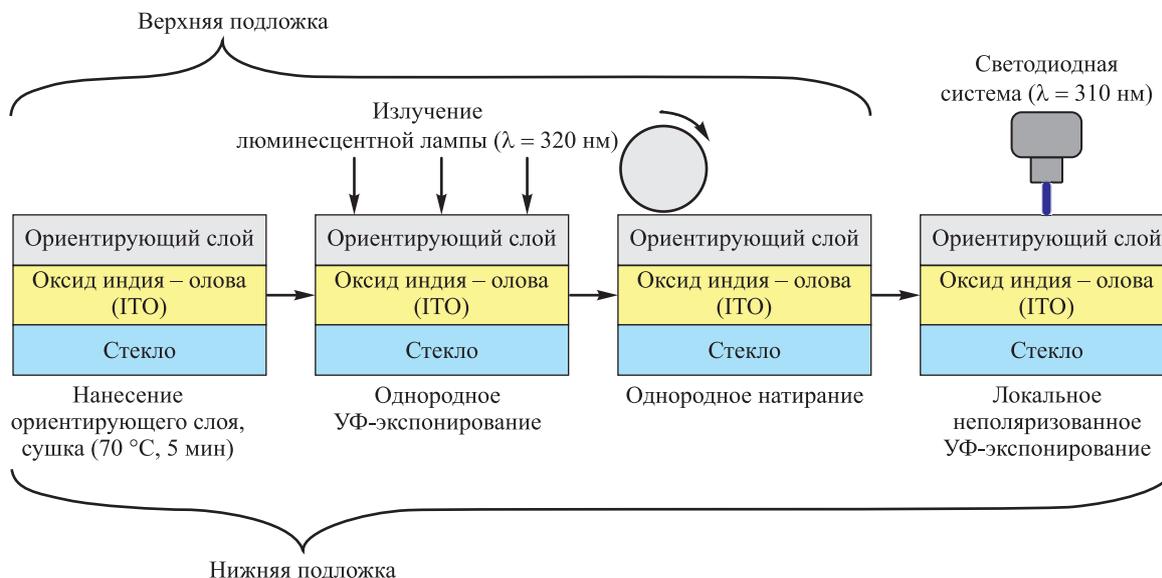


Рис. 2. Схема технологии изготовления ЖК-ячейки для формирования ЖК-линзы методом фотостимулированной ориентации с использованием светодиодной системы ($\lambda = 310 \text{ нм}$)

Fig. 2. Process flow of alignment layers fabrication for LC lens by method of photostimulated alignment using a LED system ($\lambda = 310 \text{ нм}$)

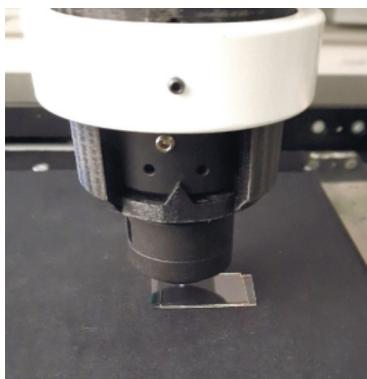


Рис. 3. Микроскоп для экспонирования массива линз разной упаковки

Fig. 3. Microscope for exposing an lens array with different packages

Управление движением столика микроскопа осуществлялось с применением специальной программы (разработка лаборатории материалов и технологий ЖК-устройств Института химии новых материалов НАН Беларуси), для которой рассчитывались координаты квадратной (рис. 4, а) и гексагональной (рис. 4, б) упаковки массива линз с шагом 2,5 мм.

Для определения оптимального времени экспонирования для записи линз была проведена тестовая засветка одной из подложек светодиодом с длиной волны излучения 310 нм при времени экспонирования в диапазоне 70–275 с. Исходя из полученных экспериментальных данных (рис. 5), при экспонировании в течение 75 с в слое нематического ЖК формируется вертикальная ориентация, при экспонировании в течение 105 с начинает формироваться планарная ориентация (образуются шивки), при экспонировании в течение 140 с происходит полный переход в планарную ориентацию, а при экспонировании в течение 275 с наблюдается обратный переход в вертикальную ориентацию предположительно в связи с процессом деструкции (разрушения полимерной матрицы).

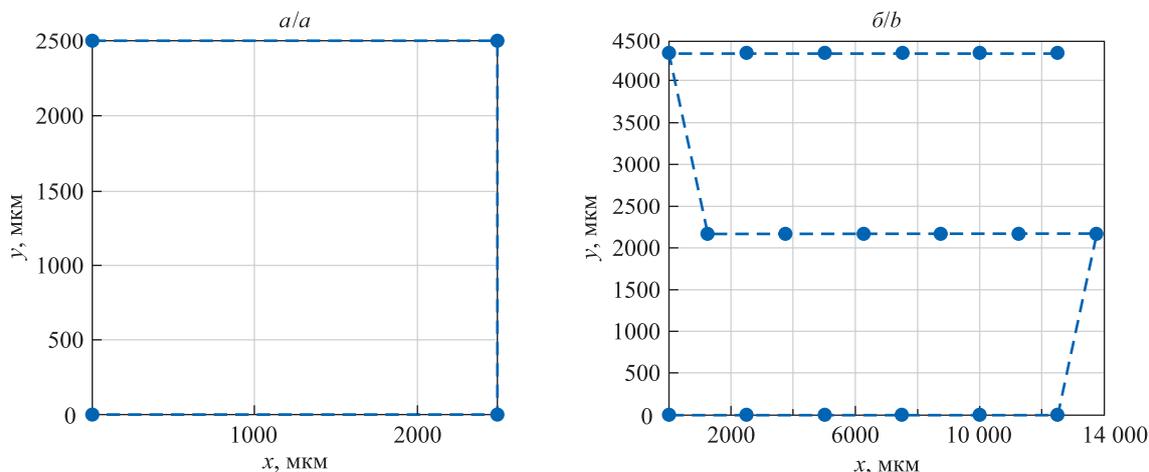


Рис. 4. Координаты экспонирования квадратной (а) и гексагональной (б) упаковки массива линз
 Fig. 4. Exposure coordinates for square (a) and hexagonal (b) packages of lens array

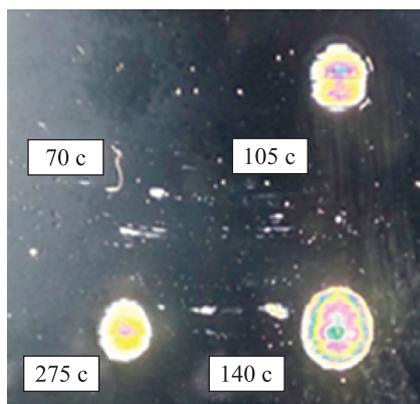


Рис. 5. Микрофотография ориентации ЖК в ячейке при разном времени экспонирования (плоскость ячейки расположена под углом 45° в скрещенных поляризаторах)
 Fig. 5. Microphotograph of the alignment of LC at different exposure times (the cell plane located at an angle of 45° in crossed polarisers)

Для изменения фокусного расстояния ЖК-линз к изготовленным ячейкам (рис. 6, а, б) прикладывалось низкочастотное электрическое напряжение ($U = 0$ В, $U = 1$ В, $U = 5$ В, $U = 10$ В). Молекулы ЖК ориентируются своими длинными осями вдоль вектора напряженности электрического поля, постепенно переходя из планарной ориентации в гомеотропное состояние с увеличением амплитуды приложенного напряжения (рис. 7 и 8). Переориентация молекул ЖК во внешнем электрическом поле сопровождается увеличением фокусного расстояния ЖК-линзы [7].

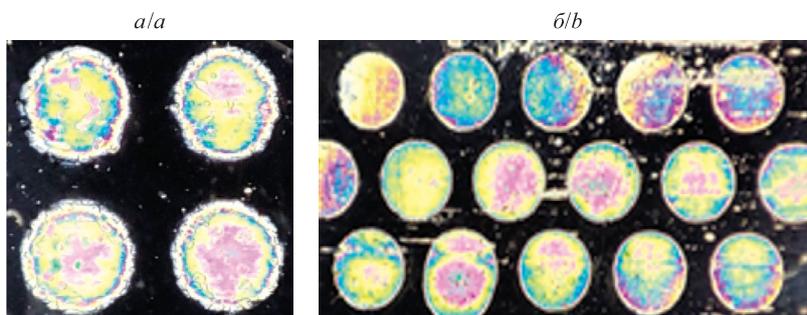


Рис. 6. Микрофотографии ориентации ЖК в ячейке с квадратной (а) и гексагональной (б) упаковкой массива линз (плоскость ячейки расположена под углом 45° в скрещенных поляризаторах)
 Fig. 6. Microphotographs of the alignment of LC in a cell with square (a) and hexagonal (b) packages of lens array (the cell plane located at an angle of 45° in crossed polarisers)

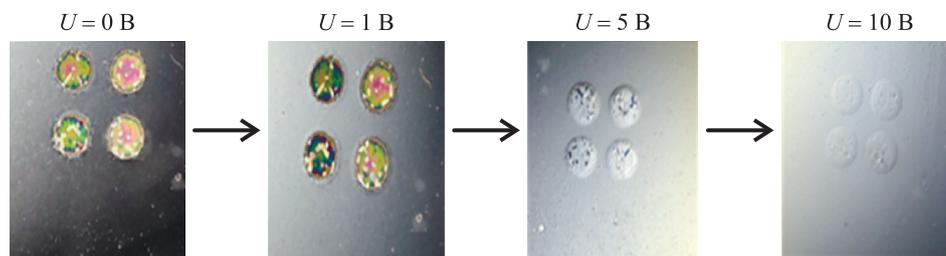


Рис. 7. Микрофотографии ориентации ЖК в ячейке с квадратной упаковкой массива линз при приложенном напряжении ($U = 0$ В, $U = 1$ В, $U = 5$ В, $U = 10$ В) (плоскость ячейки расположена под углом 45° в скрещенных поляризаторах)

Fig. 7. Microphotographs of the alignment of LC in a cell with square package of lens array at an applied voltage ($U = 0$ V, $U = 1$ V, $U = 5$ V, $U = 10$ V) (the cell plane located at an angle of 45° in crossed polarisers)

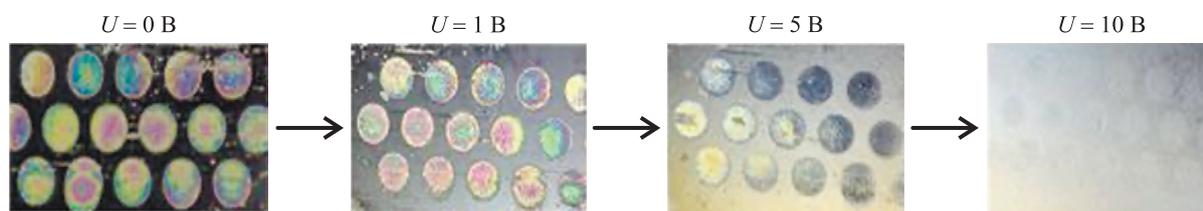


Рис. 8. Микрофотографии ориентации ЖК в ячейке с гексагональной упаковкой массива линз при приложенном напряжении ($U = 0$ В, $U = 1$ В, $U = 5$ В, $U = 10$ В) (плоскость ячейки расположена под углом 45° в скрещенных поляризаторах)

Fig. 8. Microphotographs of the alignment of LC in a cell with hexagonal package of lens array at an applied voltage ($U = 0$ V, $U = 1$ V, $U = 5$ V, $U = 10$ V) (the cell plane located at an angle of 45° in crossed polarisers)

Для полученных ячеек с квадратной (см. рис. 7) и гексагональной (см. рис. 8) упаковкой ЖК-линз был рассчитан процент занимаемой линзами площади. Так как для наиболее эффективного рассеяния проходящего через массив света необходима максимально плотная упаковка линз, то можно сделать вывод, что оптимальной является гексагональная упаковка (в этом случае занимаемая линзами площадь на 5 % больше, чем в случае квадратной упаковки) [8; 9].

Оптические характеристики массива ЖК-линз

Для расчета величины двулучепреломления применялся поляризационный микроскоп и многоканальный спектрометр. С их помощью были измерены спектры пропускания T линзы в поляризованном свете (видимый диапазон длин волн) (рис. 9) в равноотстоящих друг от друга точках линзы.

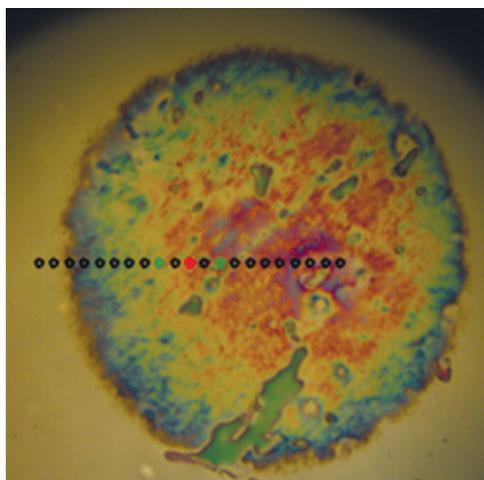


Рис. 9. Микрофотография ориентации ЖК в поляризованном свете (плоскость ячейки расположена под углом 45° в параллельных поляризаторах)

Fig. 9. Microphotograph of the alignment of LC in polarised light (the cell plane located at an angle of 45° in parallel polarisers)

Для определения величины фазовой задержки использовалась зависимость пропускания двулучепреломляющей пластинки от длины волны света:

$$T = \sin^2\left(\pi \frac{\Delta nd}{\lambda}\right).$$

Величина фазовой задержки $\Psi = \Delta nd$ для длин волн $\lambda = 450$ нм (синий диапазон), $\lambda = 550$ нм (зеленый диапазон) и $\lambda = 650$ нм (красный диапазон) рассчитывалась на основе спектров, измеренных в различных точках ЖК-линзы (см. рис. 9), путем подгонки величины показателя двулучепреломления, спектральная зависимость которого аппроксимировалась по формуле Коши

$$\Delta n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}.$$

Для используемого материала (ЖК-1285) коэффициенты формулы Коши составляли следующие величины: $A = 0,139\,665$; $B = 0,006\,867$; $C = 0,000\,551$.

Ячейка собиралась из двух подложек с разной ориентацией сополимера BVS: одна из них имела постоянную гомеотропную ориентацию, а другая – ориентацию с переменным углом подвеса. Зазор ячейки задавался спейсерами диаметром 20 мкм. Собранный таким образом ячейка позволяет уменьшить количество дефектов. Экспонирование двух подложек ячейки (наведение гомеотропной ориентации на обеих подложках) позволило бы увеличить эффективное двулучепреломление Δn в 2 раза относительно такового изготовленной нами ячейки. Однако в этом случае возникли бы сложности при сборке из-за необходимости точно совместить «области линзы».

Для расчета фокусного расстояния ЖК-линзы экспериментальный фазовый профиль (рис. 10) аппроксимировался параболическими кривыми, на основе которых оценивалось фокусное расстояние для трех длин волн по формуле

$$F = \frac{2}{a},$$

где a – старший коэффициент квадратного уравнения параболы. Фокусные расстояния в зависимости от длины волны приведены в табл. 1.

Сокращения фокусного расстояния можно добиться за счет уменьшения радиуса R ЖК-линзы, увеличения толщины d ЖК-слоя (табл. 2), а также использования ЖК-материалов с большим двулучепреломлением Δn .

Фокусное расстояние линзы также можно рассчитать по формуле

$$F = \frac{R^2 - (\Delta nd)^2}{2\Delta nd},$$

где Δnd – разность набега фаз.

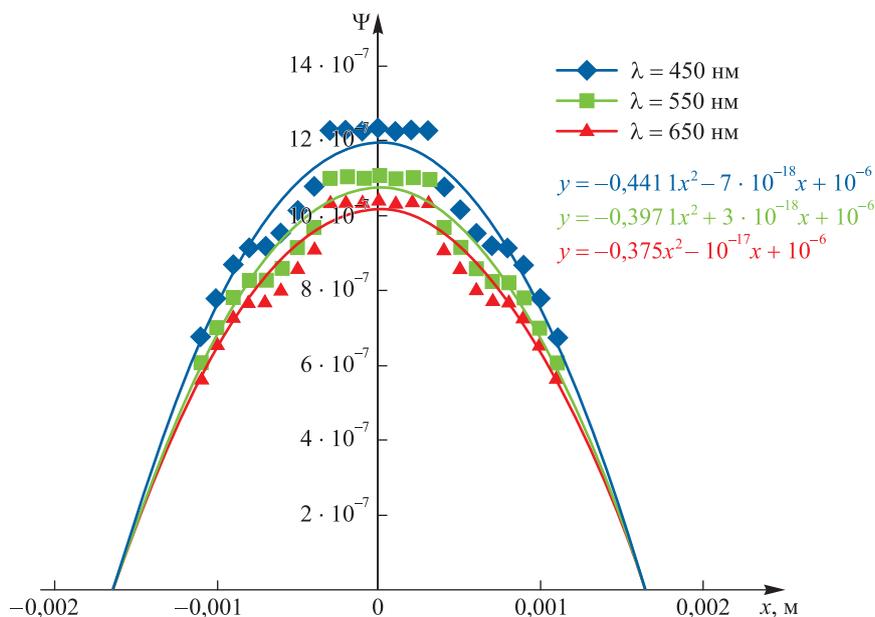


Рис. 10. Фазовый профиль ЖК-линзы
 Fig. 10. Phase profile of an LC lens

Таблица 1
Дисперсия фокусного расстояния

Table 1

Focal length dispersion

λ , нм	F , м
450	4,53
550	5,04
650	5,33

Таблица 2

Изменение фокусного расстояния при разной толщине ЖК-слоя
для линз с радиусом $R = 1,65$ мм, $R = 3,30$ мм и $R = 0,83$ мм

Table 2

Changing the focal length with different thicknesses
of the LC layer for lenses with a radius $R = 1.65$ mm, $R = 3.30$ mm and $R = 0.83$ mm

d , мкм	F , м		
	$\lambda = 450$ нм	$\lambda = 550$ нм	$\lambda = 650$ нм
$R = 1,65$ мм			
5	18,14	20,15	21,33
10	9,07	10,08	10,67
50	1,81	2,02	2,13
100	0,91	1,01	1,07
$R = 3,30$ мм			
5	72,55	80,60	85,33
10	36,27	40,30	42,67
50	7,25	8,06	8,53
100	3,63	4,03	4,27
$R = 0,83$ мм			
5	4,53	5,04	5,33
10	2,27	2,52	2,67
50	0,45	0,50	0,53
100	0,23	0,25	0,27

Исходя из приведенных в табл. 2 значений, наблюдается уменьшение фокусного расстояния F линз при увеличении толщины d ЖК-слоя для каждой из рассматриваемых длин волн ($\lambda = 450$ нм, $\lambda = 550$ нм, $\lambda = 650$ нм). Уменьшение радиуса R линзы в 2 раза приводит к уменьшению фокусного расстояния F в 4 раза, а увеличение радиуса R линзы в 2 раза приводит к увеличению фокусного расстояния F в 4 раза.

Заключение

В ходе изучения и разработки современных подходов к созданию ЖК-устройств для управления угловым распределением света были изготовлены массивы ЖК-микролинз. В качестве ориентирующего материала, формирующего заданное («линзоподобное») распределение директора ЖК, был синтезирован специальный сополимер (BVS). Полученное распределение директора в объеме ЖК-слоя может быть изменено под действием электрического поля, что позволяет управлять угловым распределением излучения и рассеяния света осветительных светодиодных систем. Отработан метод нанесения пленок сополимера BVS и создания ЖК-микролинз, а также массивов ЖК-микролинз. Для формирования ЖК-линзы производилось экспонирование УФ-излучением, имеющим параболический профиль. Изготовлены ЖК-ячейки с различными упаковками массива линз (квадратной и гексагональной). В случае гексагональной упаковки занимаемая линзами площадь на 5 % больше, чем в случае квадратной упаковки, что

соответствует теоретическому представлению о наиболее эффективном рассеянии проходящего света. Оценка фокусного расстояния ЖК-линз в поляризованном свете (видимом (синем, зеленом, красном) диапазоне длин волн) показала, что наименьшее фокусное расстояние ($F = 4,53$ м) характерно для синего диапазона длин волн, для зеленого диапазона длин волн оно составляет величину $F = 5,04$ м, а для красного диапазона возрастает до значения $F = 5,33$ м. Обнаружена зависимость радиуса ЖК-линзы от толщины ЖК-слоя и двулучепреломления ЖК-материалов. Изучены возможности формирования массивов ЖК-линз с различным фокусным расстоянием и показаны пути улучшения их параметров (уменьшения фокусного расстояния). Результаты работы способствуют совершенствованию устройств, для которых необходимо перестраивать фокусное расстояние. Синтезированный сополимер (BVS) позволяет изготавливать массив ЖК-линз на пластиковых подложках благодаря низкотемпературной обработке (≤ 70 °C), что является важным технологическим преимуществом.

Библиографические ссылки

1. Rushnova II, Melnikova EA, Kabanova OS, Tolstik AL, Muravsky AA. Fringe field-tunable LC refractive index interface for in-plane beam steering applications. *Applied Optics*. 2020;59(34):10695–10699. DOI: 10.1364/AO.409688.
2. Безрученко ВС. *Фотоиндуцированные изменения угла преднаклона жидкого кристалла на поверхности слоев бензальдегидсодержащих полимеров для формирования адаптивных линз* [диссертация]. Минск: [б. и.]; 2022. 137 с.
3. Bezruchenko VS, Muravsky AA, Murauski AA, Stankevich AI, Mahilny UV. Gradient pretilt angle alignment materials with different photosensitivity for tunable polarization-independent self-aligned liquid crystal lens. *Journal of the Society for Information Display*. 2021;29(11):825–832. DOI: 10.1002/jsid.990.
4. Dai HT, Liu YJ, Sun XW, Luo D. A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing. *Optics Express*. 2009; 17(6):4317–4323. DOI: 10.1364/OE.17.004317.
5. Bezruchenko VS, Muravsky AA, Murauski AA, Stankevich AI, Mahilny UV. Tunable liquid crystal lens based on pretilt angle gradient alignment. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2016;626:222–228. DOI: 10.1080/15421406.2015.1106890.
6. Безрученко ВС, Могильный ВВ, Станкевич АИ, Муравский АлАн, Муравский АнАл, Кухто ИН. Формирование центрально-симметричных распределений световой интенсивности для экспонирования фоточувствительных ориентирующих слоев жидкокристаллических линз. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017;3:12–19.
7. Algorri JF, Zografopoulos DC, Urruchi V, Sánchez-Pena JM. Recent advances in adaptive liquid crystal lenses. *Crystals*. 2019; 9(5):272. DOI: 10.3390/cryst9050272.
8. Тот ЛФ. *Расположения на плоскости, на сфере и в пространстве*. Макарова НМ, переводчик; Яглом ИМ, редактор. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы; 1958. 363 с.
9. Fan F, Srivastava AK, Du T, Tseng MC, Chigrinov V, Kwok HS. Low voltage tunable liquid crystal lens. *Optics Letters*. 2013; 38(20):4116–4119. DOI: 10.1364/OL.38.004116.

References

1. Rushnova II, Melnikova EA, Kabanova OS, Tolstik AL, Muravsky AA. Fringe field-tunable LC refractive index interface for in-plane beam steering applications. *Applied Optics*. 2020;59(34):10695–10699. DOI: 10.1364/AO.409688.
2. Bezruchenko VS. *Fotoinducirovannye izmeneniya ugla prednaklona zhidkogo kristalla na poverhnosti sloev benzal'degidsoderzhashih polimerov dlja formirovaniya adaptivnyh linz* [Photoinduced changes in the pretilt angle of a liquid crystal on the surface of layers of benzaldehyde-containing polymers for the formation of adaptive lenses] [dissertation]. Minsk: [s. n.]; 2022. 137 p. Russian.
3. Bezruchenko VS, Muravsky AA, Murauski AA, Stankevich AI, Mahilny UV. Gradient pretilt angle alignment materials with different photosensitivity for tunable polarization-independent self-aligned liquid crystal lens. *Journal of the Society for Information Display*. 2021;29(11):825–832. DOI: 10.1002/jsid.990.
4. Dai HT, Liu YJ, Sun XW, Luo D. A negative-positive tunable liquid-crystal microlens array by printing. *Optics Express*. 2009; 17(6):4317–4323. DOI: 10.1364/OE.17.004317.
5. Bezruchenko VS, Muravsky AA, Murauski AA, Stankevich AI, Mahilny UV. Tunable liquid crystal lens based on pretilt angle gradient alignment. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2016;626:222–228. DOI: 10.1080/15421406.2015.1106890.
6. Bezruchenko VS, Mahilny UV, Stankevich AI, Muravsky AlAn, Muravsky AnAl, Kukhta IN. The formation of the centrosymmetric distributions of light intensity for exposure of photosensitive alignment layers of LC lenses. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2017;3:12–19. Russian.
7. Algorri JF, Zografopoulos DC, Urruchi V, Sánchez-Pena JM. Recent advances in adaptive liquid crystal lenses. *Crystals*. 2019; 9(5):272. DOI: 10.3390/cryst9050272.
8. Tóth LF. *Lagerungen in der Ebene auf der Kugel und im Raum*. Berlin: Springer-Verlag; 1953. 197 S. (Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften in Einzeldarstellungen; Band 65).
Russian edition: Tóth LF. *Raspolozheniya na ploskosti, na sfere i v prostranstve*. Makarova NM, translator; Yaglom IM, editor. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury; 1958. 363 p.
9. Fan F, Srivastava AK, Du T, Tseng MC, Chigrinov V, Kwok HS. Low voltage tunable liquid crystal lens. *Optics Letters*. 2013; 38(20):4116–4119. DOI: 10.1364/OL.38.004116.