

ФОРМИРОВАНИЕ ПЕРЕКЛЮЧАЕМЫХ
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В СЛОЕ ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА
МЕТОДОМ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ГОЛОГРАФИИЕ. П. ПАНТЕЛЕЕВА¹⁾, О. С. КАБАНОВА¹⁾, Е. А. МЕЛЬНИКОВА¹⁾¹⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Представлены результаты экспериментов по реализации и оптимизации условий голографической и поляризационно-голографической записи поверхностной анизотропии в тонких пленках светочувствительного азокрасителя AtA-2 в целях формирования электрически управляемых дифракционных структур в слое нематического жидкого кристалла. Установлена оптимальная длительность экспозиции пленок азокрасителя AtA-2 интерференционной картиной двух когерентных световых пучков, обеспечивающая максимальное значение дифракционной эффективности для порядков дифракции $m = -1$ и $m = +1$. Продемонстрирована возможность создания переключаемых дифракционных решеток с пространственным периодом 1–7 мкм, а также решеток с вилочной дислокацией, формирующих сингулярные световые пучки (оптические вихри) с заданной величиной топологического заряда. Приведены экспериментальные зависимости дифракционной эффективности порядков дифракции $m = -1$ и $m = +1$ от величины управляющего напряжения. С использованием метода оптической интерферометрии исследовано пространственное распределение светового поля формируемых сингулярных световых пучков, а также проанализирована их стабильность в диапазоне рабочих напряжений на ячейке 0–10 В. Результаты исследования представляют интерес с точки зрения создания устройств и систем управления пространственной, фазовой и поляризационной структурой лазерного излучения.

Ключевые слова: оптические вихри; поляризационная голография; дифракция; фазовые пластинки; азокраситель; жидкие кристаллы; фотоориентация.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке государственной программы научных исследований «Конвергенция-2025».

Образец цитирования:

Пантелеева ЕП, Кабанова ОС, Мельникова ЕА. Формирование переключаемых дифракционных решеток в слое жидкого кристалла методом поляризационной голографии. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2023;2:39–50.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-2-39-50>

For citation:

Pantsialejeva YeP, Kabanova OS, Melnikova EA. Formation of switchable liquid crystal diffraction gratings by polarisation holography. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2023;2:39–50. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-2-39-50>

Авторы:

Екатерина Петровна Пантелеева – магистрант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – Е. А. Мельникова.

Ольга Сергеевна Кабанова – кандидат физико-математических наук; доцент кафедры высшей математики и математической физики физического факультета.

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

Authors:

Yekatsiaryna P. Pantsialejeva, master's degree student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.
pantsialejevakate@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-9364-7724>

Olga S. Kabanova, PhD (physics and mathematics); associate professor at the department of higher mathematics and mathematical physics, faculty of physics.

kabanovaos@bsu.by

<https://orcid.org/0000-0001-5100-9708>

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

melnikova@bsu.by

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

FORMATION OF SWITCHABLE LIQUID CRYSTAL DIFFRACTION GRATINGS BY POLARISATION HOLOGRAPHY

Ye. P. PANTSIALEYEVA^a, O. S. KABANOVA^a, E. A. MELNIKOVA^a

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

Corresponding author: Ye. P. Pantsialeveva (pantsialevevakate@gmail.com)

Experimental results on realisation and optimisation of conditions for holographic and polarisation-holographic recording of surface anisotropy in thin films of light-sensitive azo dye AtA-2 in order to form electrically switchable diffraction structures in a layer of nematic liquid crystal are presented. The optimum duration of exposure of films of azo dye AtA-2 by an interference pattern of two coherent light beams that provides a maximum value of diffraction efficiency for diffraction orders $m = -1$ and $m = +1$ has been found. A possibility of creating switchable diffraction gratings with a spatial period of 1–7 μm and gratings with fork dislocation forming singular light beams (optical vortices) with a specified value of a topological charge is demonstrated. Experimental dependences of diffraction efficiency of diffraction orders $m = -1$ and $m = +1$ on the value of applied voltage are presented. The spatial distribution of light field of generated singular light beams has been investigated by optical interferometry technique, and their stability in the range of applied voltages on the cell of 0–10 V has been analysed. The results of the study are of interest in point of view of fabricating devices and systems for controlling the spatial, phase and polarisation structure of laser radiation.

Keywords: optical vortices; polarisation holography; diffraction; phase plates; azo dye; liquid crystals; photoalignment.

Acknowledgements. The work was financially supported by the state program of scientific research «Convergence-2025».

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке переключаемых дифракционных элементов, реализующих управление пространственными, фазовыми и поляризационными характеристиками света. В частности, оптические структуры на основе бинарной или непрерывно изменяющейся в пространстве азимутальной ориентации молекул жидкого кристалла (ЖК) успешно применяются в качестве дифракционных решеток, осуществляющих преобразование амплитудного и фазового профиля световых пучков [1–3]. Высокая оптическая анизотропия ЖК-среды в совокупности со способностью ЖК-молекул изменять ориентацию во внешнем электрическом поле открыла новые перспективы в области производства дифракционных решеток с управляемыми оптическими свойствами [4–6]. Характеризуясь высокой эффективностью в широком диапазоне длин волн, дифракционные ЖК-структуры обладают рядом преимуществ, среди которых – простота технологии изготовления, компактные размеры, доступная цена, поляризационно управляемое распределение энергии, а также низкие рабочие напряжения [7; 8].

На практике широко применяют два способа создания управляемой пространственно модулированной ориентации директора ЖК:

- использование системы периодически расположенных электродов в ячейке с однородно ориентированным ЖК-слоем [7];
- использование текстурированных подложек для ориентации ЖК-слоя в ячейке с однородными электродами [9].

Второй способ предполагает применение технологии микронатирания, фотолитографии или текстурированной фотоориентации поверхностно-ориентирующих пленок.

Бесконтактный метод фотоориентации [10] обеспечивает возможность точного управления распределением директора ЖК на двумерной поверхности, что позволяет изготавливать локально-неоднородные дифракционные оптические структуры. Среди светочувствительных материалов, применяемых для фотоориентации ЖК, лидирующие позиции занимают азокрасители и азополимеры. Использование в качестве ориентирующей среды светочувствительных азокрасителей, характеризующихся уникальными фотохимическими свойствами и обеспечивающих эффективную оптическую запись с пространственным разрешением ~ 1 мкм, способствовало развитию современной технологической платформы для создания оптических микро- и наноструктур [11; 12]. Для формирования поверхностно-ориентирующих структур в пленке азокрасителей могут применяться различные методы облучения, среди которых выделяются экспонирование через амплитудную фотомаску, лазерное сканирование, а также голографическая запись.

ЖК-структуры на основе фотоориентируемых азокрасителей широко используются для формирования оптических вихрей, которые находят новые применения в различных областях фотоники, таких как оптическое манипулирование микрочастицами, визуализация биообъектов с высоким пространственным разрешением, лазерная обработка материалов, кодирование и передача информации по оптоволоконным линиям связи, детектирование в астрофизике и др. [6]. Повышенный интерес к оптическим вихрям обусловлен их необычными свойствами – существованием винтовых дислокаций (фазовых сингулярностей) волнового фронта в особых точках. В данных точках амплитуда световых колебаний обращается в нуль, а фаза является неопределенной.

Цель настоящей работы – оптимизация условий поляризационной и поляризационно-голографической записи поверхностной анизотропии в пленках светочувствительного азокрасителя AtA-2 и изготовление на этой основе переключаемых дифракционных ЖК-структур с винтовой дислокацией для формирования сингулярных световых пучков (оптических вихрей) с заданной величиной топологического заряда.

Материалы и методы исследования

В ходе выполнения работы были изготовлены экспериментальные образцы – три ЖК-ячейки типа «сэндвич» (далее – ячейка № 1, ячейка № 2 и ячейка № 3) для отработки методики создания дифракционных микроструктур. Корпус ячейки № 1 составляли стеклянные подложки, не содержащие электродов. Внутренние поверхности стеклянных подложек ячейки № 2 и ячейки № 3 были покрыты однородным прозрачным токопроводящим слоем оксида индия – олова.

Для формирования периодических поверхностно-ориентирующих микроструктур на подложках ячеек использовался метод текстурированной фотоориентации пленок азокрасителя AtA-2 [13]. На тщательно очищенные поверхности стеклянных подложек методом род-коутинга наносились тонкие пленки (толщина ~30 нм) светочувствительного азокрасителя AtA-2 [14], разработанного и синтезированного в Институте химии новых материалов НАН Беларуси. Важно отметить, что ориентирующие свойства пленок азокрасителя AtA-2 формируются при облучении их линейно-поляризованным светом, причем направление наведенной ориентации молекул красителя перпендикулярно направлению поляризации активирующего излучения и впоследствии может быть легко изменено путем дополнительного облучения фотоориентанта активирующим излучением с отличным направлением поляризации. Далее подготовленные подложки склеивались эпоксидным клеем. Величина воздушного зазора в данных ячейках задавалась с помощью калиброванных микросфер и составляла 7 мкм. При последующем экспонировании подготовленных ячеек интерференционной картиной, являющейся результатом когерентного сложения двух лазерных пучков, на поверхностях пленок азокрасителя создавались условия для микроструктурированной периодической ориентации директора ЖК. После заполнения облученных ячеек нематическим ЖК созданные оптические элементы приобретали свойства анизотропных дифракционных структур. В работе использовался положительный нематический кристалл типа ЖК-1289 ($n_e = 1,67$, $n_o = 1,49$) (АО «НИОПИК», Россия).

Метод голографической записи отлично подходит для формирования поверхностной анизотропии в пленках светочувствительного азокрасителя AtA-2, имеющего полосу поглощения 450–520 нм, поскольку для данного диапазона длин волн легко подобрать когерентный лазерный источник излучения. Для облучения пленок азокрасителя интерференционной картиной двух световых пучков применялись методы голографической записи и поляризационной (векторной) голографии. На рис. 1 приведена соответствующая схема экспериментальной установки. В качестве источника когерентного излучения использовался аргоновый лазер 1 с длиной волны 488 нм и вертикальной поляризацией. Линейно-поляризованное излучение с помощью светоделительного кубика 2 амплитудно разделялось на два световых пучка, которые зеркалами 3 и 4 сводились в плоскости ячейки 8 и интерферировали на поверхности азополимерной пленки. Суммарная мощность интерферирующих световых пучков в процессе записи составляла 12 мВт при площади интерференционной картины $S = 0,04 \text{ см}^2$. Для управления состоянием поляризации интерферирующих световых пучков использовались фазовые пластинки 5 и 6 – полуволновая

новая $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ для метода голографической записи (ячейка № 1 и ячейка № 2) и четвертьволновая $\left(\frac{\lambda}{4}\right)$ для

метода поляризационной голографии (ячейка № 3) соответственно. В ячейке № 3 для записи дифракционного ЖК-элемента, формирующего сингулярные световые пучки (оптические вихри) с заданной величиной топологического заряда $|l| = 1$, в одно из плеч интерферометра устанавливалась спиральная фазовая пластинка 7. Мониторинг формирования решетки в процессе записи реализовывался с использованием считывающего гелий-неонового лазера 9 с длиной волны 632,8 нм, мощностью 0,5 мВт и вертикальной поляризацией, излучение которого направлялось в область интерференционной картины, а интенсивность дифрагированного света регистрировалась с помощью фотоприемника 10.

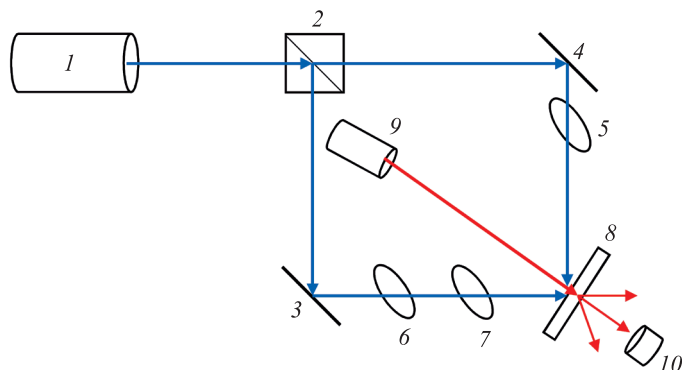


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для голографической записи дифракционных решеток в тонких азополимерных пленках:
1 – аргонный лазер (длина волны 488 нм); 2 – светоделительный кубик;
3, 4 – зеркала; 5, 6 – полуволновая (для голографической записи) и четвертьволновая (для поляризационной голографической записи) фазовые пластинки;
7 – фазовая пластинка для записи оптического вихря; 8 – ячейка;
9 – гелий-неоновый лазер (длина волны 632,8 нм); 10 – фотоприемник

Fig. 1. The scheme of the experimental setup for holographic recording of diffraction gratings in thin azo polymer films:
1 – argon laser (wavelength 488 nm); 2 – beam splitter cube; 3, 4 – mirrors;
5, 6 – half wave phase plate (for holographic recording) and quarter wave phase plate (for polarisation holographic recording); 7 – phase plate for optical vortex recording;
8 – cell; 9 – helium-neon laser (wavelength 632.8 nm); 10 – photoreceiver

Оптимизация условий голографической и поляризационно-голографической записи поверхностной анизотропии в пленках азокрасителя AtA-2

В целях оптимизации параметров голографической записи дифракционных структур была проведена серия экспериментов с разным временем экспонирования t пленок азокрасителя интерференционной картиной двух записывающих световых пучков. С использованием плотно прилегающей амплитудной фотомаски на поверхности ячейки № 1 были выделены шесть областей круглой формы, в пределах которых реализовывалась запись дифракционных структур с разным временем экспонирования.

С помощью полуволновых фазовых пластинок была реализована геометрия голографической записи дифракционной решетки с периодом $\Lambda = 6,5$ мкм с использованием когерентных вертикально поляризованных световых пучков (рис. 2). Время экспонирования t подготовленных областей азополимерных пленок интерференционной картиной с суммарной оптической мощностью 12 мВт варьировалось в диапазоне 5–120 с.

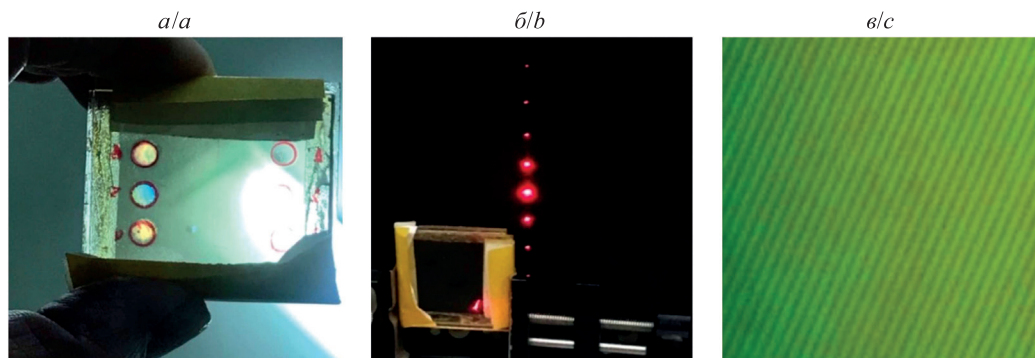


Рис. 2. Экспериментальные фотографии:
а – дифракционный ЖК-элемент (ячейка № 1);
б – общая картина дифракции излучения гелий-неонового лазера;
в – анизотропная дифракционная ЖК-структура с периодом $\Lambda = 6,5$ мкм

Fig. 2. Experimental photos:
а – the diffraction liquid crystal (LC) element (cell No. 1);
б – the general diffraction pattern of a helium-neon laser radiation;
с – the anisotropic diffraction LC structure with a period of $\Lambda = 6.5$ μm

После завершения процесса голографической записи ячейка заправлялась нематическим ЖК-материалом в условиях изотропной фазы. Для изучения дифракционных свойств изготовленных ЖК-структур использовалась экспериментальная установка, включающая гелий-неоновый лазер, генерирующий узконаправленный луч света с длиной волны 632,8 нм и вертикальной поляризацией, ирисовую диафрагму, генератор переменных сигналов прямоугольной формы (с частотой 1 кГц) и фотодетектор, регистрирующий интенсивность излучения, дифрагированного в m -й порядок. Значения дифракционной эффективности η_m (в %), характеризующей распределение энергии прошедшего света по порядкам дифракции m , рассчитывались по формуле

$$\eta_m = \frac{I_m}{I_0} \cdot 100,$$

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

В табл. 1 приведены экспериментальные результаты измерений дифракционной эффективности порядков дифракции $m = 0$, $m = 1$ и $m = 2$ для изготовленных ЖК-решеток, отличающихся временем экспонирования пленок азокрасителя. В соответствии с данными эксперимента можно заключить, что для достижения максимального значения дифракционной эффективности $\eta_1 = 6,3$ % в порядке дифракции $m = 1$ время экспонирования пленок азокрасителя должно составлять 60 с. Методом поляризационной микроскопии установлено, что период сформированных ЖК-решеток равен 6,5 мкм. Это полностью соответствует геометрии используемой схемы голографической записи дифракционных структур.

Таблица 1

**Дифракционные эффективности
порядков дифракции $m = 0$, $m = 1$ и $m = 2$
при разном времени экспонирования, %**

Table 1

**Diffraction efficiencies
of diffraction orders $m = 0$, $m = 1$ and $m = 2$
for different exposure times, %**

Время экспонирования, с	Порядок дифракции		
	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$
5	89,5	4,4	0,8
10	93,7	2,6	0,5
20	95,7	1,6	0,5
30	90,3	4,3	0,5
60	85,3	6,3	1,0
120	92,9	2,9	0,6

Одним из способов повышения дифракционной эффективности ЖК-элемента является увеличение толщины ЖК-слоя, однако с точки зрения эффективного формирования анизотропной структуры толщина мезогенного слоя накладывает ограничения на величину минимального периода ЖК-решетки.

Электрическое управление дифракционной эффективностью ЖК-решетки

Для реализации функции электрического управления дифракционной эффективностью ЖК-решетки использовалась ячейка № 2. Методом голографической записи вертикально поляризованными световыми пучками в ней была сформирована дифракционная ЖК-решетка (рис. 3) с пространственным периодом $\Lambda = 1$ мкм. Уменьшение периода дифракционной структуры по сравнению с периодом дифракционной структуры, сформированной в ячейке № 1 ($\Lambda = 6,5$ мкм), обусловлено проведением экспериментальной оценки пространственного разрешения регистрирующей среды – азокрасителя AtA-2. Условия когерентного сложения пучков обеспечивались с помощью полуволновых фазовых пластинок.

Далее проводилось экспериментальное изучение зависимости дифракционной эффективности ЖК-решетки от амплитуды управляющего напряжения на ячейке № 2 для различных состояний поляризации считывающего излучения, а именно линейной (вертикальной и горизонтальной) и круговой (правой и левой) поляризации. На рис. 4 и 5 приведены зависимости дифракционной эффективности излучения, дифрагированного в порядки $m = -1$ и $m = 0$, от величины напряжения на ячейке (дифракционные эффективности порядков дифракции $m = -1$ и $m = +1$ совпадают (табл. 2)).

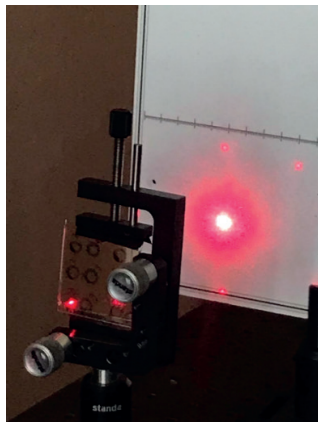


Рис. 3. Экспериментальная фотография
общей картины дифракции излучения гелий-неонового лазера на ячейке № 2

Fig. 3. Experimental photograph
of the general diffraction pattern of a helium-neon laser radiation on the cell No. 2

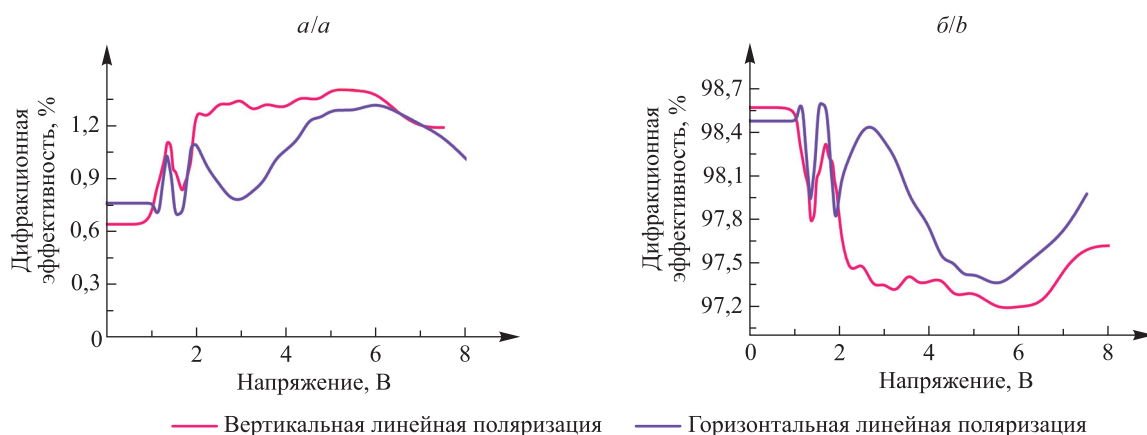


Рис. 4. Зависимости дифракционной эффективности от управляющего напряжения
при линейной (вертикальной и горизонтальной) поляризации считывающего излучения:
а – для порядка дифракции $m = -1$; б – для порядка дифракции $m = 0$

Fig. 4. Dependences of the diffraction efficiency on the control voltage
for linear (vertical and horizontal) polarisation of reading radiation:
а – for diffraction order $m = -1$; б – for diffraction order $m = 0$

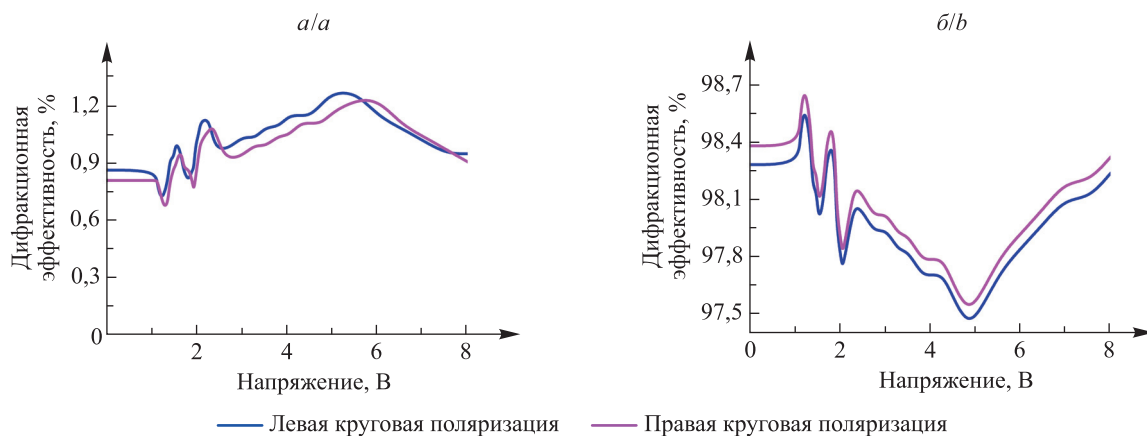


Рис. 5. Зависимости дифракционной эффективности от управляющего напряжения
при круговой (левой и правой) поляризации считывающего излучения:
а – для порядка дифракции $m = -1$; б – для порядка дифракции $m = 0$

Fig. 5. Dependences of the diffraction efficiency on the control voltage
for circular (left and right) polarisation of reading radiation:
а – for diffraction order $m = -1$; б – for diffraction order $m = 0$

Снижение максимального значения дифракционной эффективности в порядках дифракции $m = -1$ и $m = +1$ для ячейки № 2 по сравнению с таковым для ячейки № 1 ($\eta_1 = 6,3\%$) связано с уменьшением периода голографической записи, который в случае ячейки № 2 был в 5 раз меньше толщины ЖК-слоя, что не позволило создать качественную модуляцию оптической анизотропии в объеме нематического ЖК.

Таблица 2

**Дифракционные эффективности
порядков дифракции $m = -1$, $m = 0$ и $m = +1$
при разной поляризации считывающего излучения, %**

Table 2

**Diffraction efficiencies
of diffraction orders $m = -1$, $m = 0$ and $m = +1$
for different polarisation of reading radiation, %**

Поляризация	Порядок дифракции		
	$m = -1$	$m = 0$	$m = +1$
Вертикальная линейная	1,4	97,1	1,4
Горизонтальная линейная	1,3	97,3	1,3
Левая круговая	1,2	97,5	1,2
Правая круговая	1,2	97,5	1,2

Формирование оптического вихря с помощью электрически управляемого дифракционного ЖК-элемента

Для изготовления электрически переключаемого дифракционного ЖК-элемента, формирующего оптические вихри, применялся метод поляризационной голографии [3; 5; 15], основанный на наведении поверхностной анизотропии в фоточувствительном слое азокрасителя AtA-2 при когерентном сложении сингулярного пучка с плоской волной. В используемой оптической схеме на пути каждого из интерферирующих световых пучков помещались четвертьволновые фазовые пластинки (см. рис. 1), что позволило сформировать ортогональные циркулярные пучки с левой и правой поляризацией. С помощью спиральной фазовой пластинки VPP-m633 (*RPC Photonics*, США) опорный гауссов пучок был преобразован в сингулярную световую волну (оптический вихрь) с топологическим зарядом $|l| = 1$. Схождение световых пучков на экспериментальном образце – ячейке № 3 – обеспечило формирование дифракционной структуры с периодом $\Lambda = 2,5$ мкм.

Далее был проведен анализ светового поля в области перекрытия сигнального и опорного пучков (рис. 6). Отсутствие картины интерференции (см. рис. 6, а) и ее появление при использовании линейного анализатора перед камерой (см. рис. 6, б) свидетельствуют о реализации записи периодически модулированного поляризационного состояния суммарного светового поля.

При отсутствии управляющего напряжения на ячейке № 3 период сформированной поляризационно-голографическим методом дифракционной ЖК-структуры составил величину $\Lambda = 2,5$ мкм.

Для управления дифракционной эффективностью изготовленной ЖК-структуры к электродам ячейки № 3 прикладывалось управляющее напряжение в диапазоне 0–10 В. На рис. 7 приведены соответствующие зависимости дифракционной эффективности порядков дифракции $m = -1$, $m = 0$ и $m = +1$ при круговой поляризации считывающего излучения. Максимальное значение дифракционной эффективности в порядках дифракции $m = -1$ и $m = +1$ достигается при величине управляющего напряжения на ячейке $\sim 2,5$ – $3,0$ В, что обусловлено частичной переориентацией директора ЖК во внешнем электрическом поле (переход Фредерикса [16]). Дальнейшее увеличение управляющего напряжения (в 5–6 раз по сравнению с пороговым напряжением перехода Фредерикса $U_t = 1,1$ В) приводит к переориентации ЖК-молекул из планарного положения (вдоль поверхности подложек) в гомеотропное (перпендикулярно поверхности подложек), что сопровождается исчезновением дифракционных свойств ЖК-слоя. Согласно полученным экспериментальным данным асимметричные значения максимальной дифракционной эффективности для ортогональных циркулярных поляризаций (табл. 3) свидетельствуют о формировании поляризационной решетки в слое азокрасителя в процессе поляризационно-голографической записи [17].

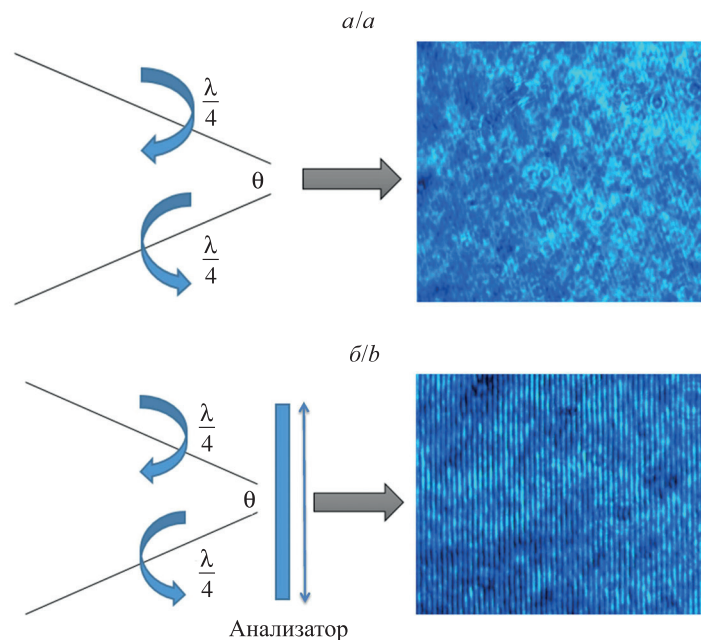


Рис. 6. Схемы сложения ортогональных поляризованных лазерных пучков и соответствующие микрофотографии результирующего светового поля: а – без использования анализатора; б – с использованием анализатора

Fig. 6. Schemes of addition of orthogonal polarised laser beams and the corresponding microphotographs of the resulting light field: а – without an analyser; б – with the analyser

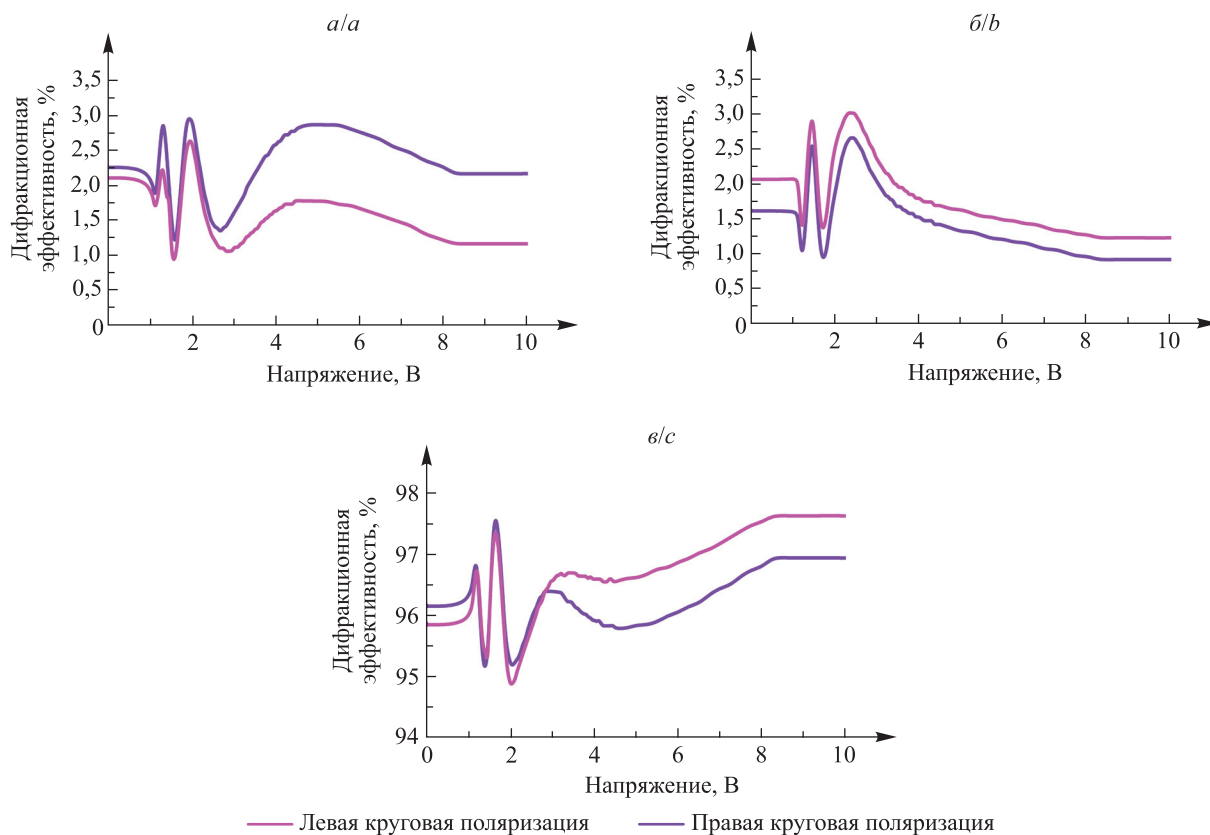


Рис. 7. Зависимости дифракционной эффективности от управляющего напряжения при круговой (левой и правой) поляризации считывающего излучения: а – для порядка дифракции $m = -1$; б – для порядка дифракции $m = +1$; в – для порядка дифракции $m = 0$

Fig. 7. Dependences of the diffraction efficiency on the control voltage for circular (left and right) polarisation of reading radiation: а – for diffraction order $m = -1$; б – for diffraction order $m = +1$; в – for diffraction order $m = 0$

Таблица 3

Максимальные значения
дифракционных эффективностей
для порядков дифракции $m = -1$ и $m = +1$ ячейки № 3, %

Table 3

The maximum values of diffraction efficiencies
for diffraction orders $m = -1$ and $m = +1$ of the cell No. 3, %

Поляризация	Порядок дифракции	
	$m = -1$	$m = +1$
Левая круговая	2,6	3,0
Правая круговая	2,9	2,6

Анализ фазовой структуры оптического вихря, формируемого дифракционным ЖК-элементом (ячейка № 3), проводился методом когерентного сложения сингулярного светового пучка с плоской когерентной волной с помощью интерферометра Маха – Цендера (рис. 8). Особенностью получаемой интерференционной картины (сингулярного пучка с плоской волной) является образование характерной вилки, количество разветвлений которой позволяет определить абсолютную величину топологического заряда $|l|$.

Восстановление поляризационной голограммы проводилось с помощью гелий-неонового лазера. На рис. 9 представлена микрофотография зарегистрированной интерференционной картины плоской когерентной волны и оптического вихря с топологическим зарядом $|l| = 1$ (порядок дифракции $m = 1$).

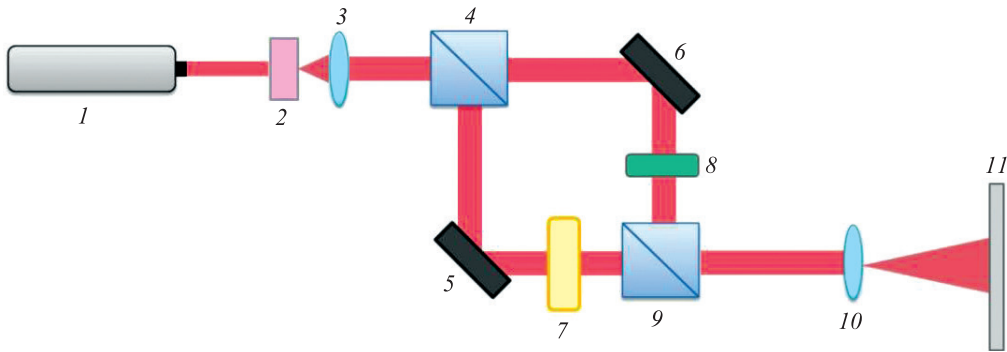


Рис. 8. Принципиальная схема интерферометра Маха – Цендера:
1 – гелий-неоновый лазер (длина волны 632,8 нм); 2 – пространственный фильтр; 3, 10 – линзы;
4, 9 – светоделительные кубики; 5, 6 – зеркала; 7 – топологический дифракционный элемент;
8 – четвертьволновая фазовая пластинка; 11 – экран

Fig. 8. The schematic diagram of the Mach – Zehnder interferometer:
1 – helium-neon laser (wavelength 632.8 nm); 2 – spatial filter; 3, 10 – lenses;
4, 9 – beam splitter cubes; 5, 6 – mirrors; 7 – topological diffractive element;
8 – quarter wave phase plate; 11 – screen

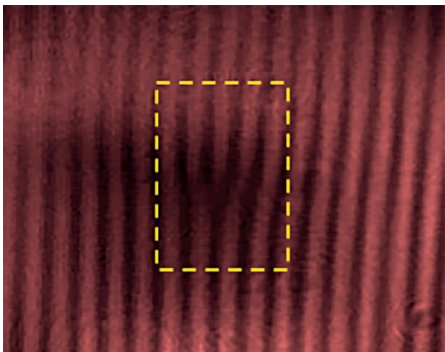


Рис. 9. Микрофотография картины интерференции
плоской волны и оптического вихря с топологическим зарядом $|l| = 1$.
Пунктиром выделена область вилочной дислокации

Fig. 9. The microphotograph of the interference pattern
of a plane wave and an optical vortex with a topological charge $|l| = 1$.
The forked dislocation region is highlighted with a dotted line

На рис. 10 приведены профили распределения интенсивности световых пучков в направлении порядка дифракции $m = +1$ при разных значениях управляющего напряжения на ячейке № 3. Характерное пространственное распределение интенсивности светового поля с провалом в центральной области подтверждает вихревую природу дифрагированных световых пучков.

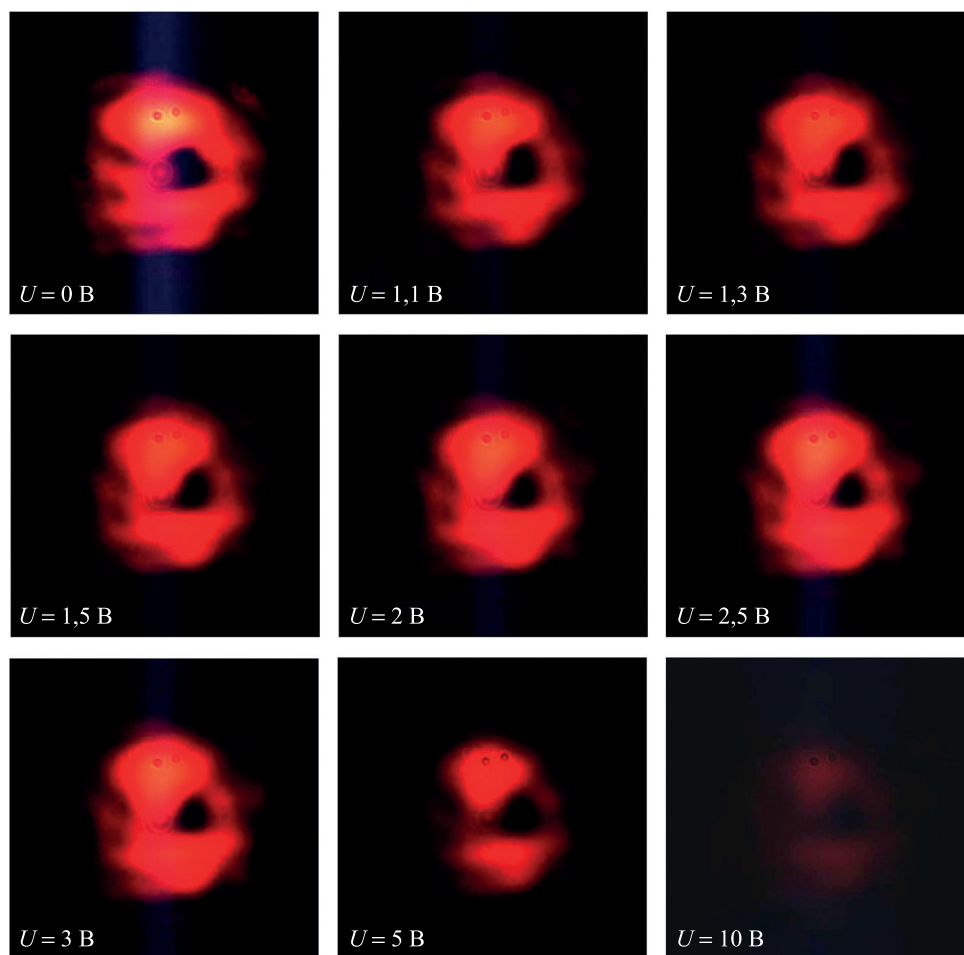


Рис. 10. Микрофотографии профилей распределения интенсивности восстановленного в порядок дифракции $m = +1$ оптического вихря при изменении внешнего управляющего напряжения (U)

Fig. 10. Microphotographs of the intensity distribution profiles of the reconstructed in diffraction order $m = +1$ optical vortex when the external control voltage (U) changes

Согласно полученным экспериментальным данным формируемые оптические вихри являются стабильными и сохраняют свою пространственную структуру при изменении управляющего напряжения на ячейке в диапазоне 0–10 В. Уменьшение интенсивности дифрагированных сингулярных пучков с ростом управляющего напряжения обусловлено переориентацией ЖК-молекул, приводящей к изменению фазовой задержки в ЖК-слое и, соответственно, к снижению дифракционной эффективности ЖК-структуры.

Таким образом, разработанный электрически переключаемый дифракционный ЖК-элемент на основе фоточувствительного ориентирующего слоя азокрасителя AtA-2 позволяет формировать устойчивые сингулярные световые пучки (оптические вихри) с заданной величиной топологического заряда, что представляет практический интерес с точки зрения разработки и создания систем оптического захвата микрочастиц, высокоразрешающей микроскопии, вортекс-коронарографии и др.

Заключение

Метод поляризационной голографической записи в тонких пленках азокрасителя AtA-2 позволяет формировать переключаемые дифракционные ЖК-структуры, в том числе характеризующиеся вилочной дислокацией. Для повышения эффективности голографической записи дифракционных решеток выполнен экспериментальный анализ оптимальных условий экспонирования светочувствительных пленок азокрасителя AtA-2 интерференционной картиной когерентных световых пучков. Установлено, что при

использовании световых пучков мощностью 3–5 мВт максимальное значение дифракционной эффективности в порядке дифракции $m = 1$ достигается при времени экспонирования 60 с. Это соответствует величине экспозиционной дозы $\sim 0,72$ Дж.

Высокое пространственное разрешение фоточувствительной среды – азокрасителя AtA-2 – позволило сформировать дифракционную решетку с периодом $\Lambda = 1$ мкм. Показано, что уменьшение периода записывающей интерференционной картины с 6,5 до 1 мкм в ЖК-слое толщиной 7 мкм сопровождается уменьшением модуляции оптической анизотропии и, как следствие, снижением дифракционной эффективности ЖК-решетки. Применение в процессе поляризационно-голографической записи спиральной фазовой пластинки позволяет формировать дифракционные ЖК-структуры с вилочной дислокацией для генерации сингулярных световых пучков. Экспериментально установлено, что структура пространственного распределения интенсивности в поперечном сечении вихревого поля дифрагированных световых пучков сохраняется стабильной при подаче управляющего напряжения на ячейку.

Область применения полученных результатов включает разработку и создание систем управления фазово-поляризационной структурой световых пучков, оптический захват и манипулирование микро-частицами, визуализацию биообъектов с высоким пространственным разрешением, лазерную обработку материалов, кодирование и передачу информации по оптоволоконным линиям связи.

Библиографические ссылки

1. Zuo Kai, Shi Yue, Luo Dan. A review of two-dimensional liquid crystal polarization gratings. *Crystals*. 2021;11(9):1015. DOI: 10.3390/cryst11091015.
2. Huang Bing-Yau, Lin Tsung-Hsien, Jhuang Tian-Yi, Kuo Chie-Tong. Electrically tunable Fresnel lens in twisted-nematic liquid crystals fabricated by a Sagnac interferometer. *Polymers*. 2019;11(9):1448. DOI: 10.3390/polym11091448.
3. Kawai K, Sasaki T, Noda K, Sakamoto M, Kawatsuki N, Ono H. Holographic binary grating liquid crystal cells fabricated by one-step exposure of photocrosslinkable polymer liquid crystalline alignment substrates to a polarization interference ultraviolet beam. *Applied Optics*. 2015;54(19):6010–6018. DOI: 10.1364/AO.54.006010.
4. Nieborek M, Rutkowska K, Woliński TR, Bartosiewicz B, Jankiewicz B, Szmigiel D, et al. Tunable polarization gratings based on nematic liquid crystal mixtures photoaligned with azo polymer-coated substrates. *Crystals*. 2020;10(9):768. DOI: 10.3390/cryst10090768.
5. Rutkowska KA, Kozanecka-Szmigiel A. Design of tunable holographic liquid crystalline diffraction gratings. *Sensors*. 2020;20(23):6789. DOI: 10.3390/s20236789.
6. Lee D, Lee H, Migara LK, Kwak K, Panov VP, Song J-K. Widely tunable optical vortex array generator based on grid patterned liquid crystal cell. *Advanced Optical Materials*. 2021;9(2):2001604. DOI: 10.1002/adom.202001604.
7. Huang Shuan-Yu, Huang Bing-Yau, Kang Chi-Chung, Kuo Chie-Tong. Diffraction and polarization properties of electrically-tunable nematic liquid crystal grating. *Polymers*. 2020;12(9):1929. DOI: 10.3390/polym12091929.
8. Казак АА, Казак ЛА, Мельникова ЕА, Толстик АЛ. Дифракционные жидкокристаллические элементы для формирования вихревых световых полей. *Вестник Белорусского государственного университета. Серия I, Физика. Математика. Информатика*. 2011;1:3–6.
9. Chen Peng, Lu Yan-Qing, Hu Wei. Beam shaping via photopatterned liquid crystals. *Liquid Crystals*. 2016;43(13–15):2051–2061. DOI: 10.1080/02678292.2016.1191685.
10. Chigrinov VG, Kozhenkov VM, Kwok H-S. *Photoalignment of liquid crystalline materials: physics and applications*. Chichester: John Wiley & Sons; 2008. XV, 231 p. DOI: 10.1002/9780470751800.
11. Chigrinov V, Kudreyko A, Guo Q. Patterned photoalignment in thin films: physics and applications. *Crystals*. 2021;11(2):84. DOI: 10.3390/cryst11020084.
12. Chigrinov V, Sun J, Wang X. Photoaligning and photopatterning: new LC technology. *Crystals*. 2020;10(4):323. DOI: 10.3390/cryst10040323.
13. Кабанова ОС, Рушнова ИИ, Мельникова ЕА, Толстик АЛ, Муравский АА, Муравский АН и др. Двумерная дифракционная оптическая структура на основе текстурированной фотоориентации полимеризуемого жидкого кристалла. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2019;3:4–11. DOI: 10.33581/2520-2243-2019-3-4-11.
14. Mikulich VS, Murawski AnA, Muravsky AIA, Agabekov VE. 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.
15. Crawford GP, Eakin JN, Radcliffe MD, Callan-Jones A, Pelcovits RA. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques. *Journal of Applied Physics*. 2005;98(12):123102. DOI: 10.1063/1.2146075.
16. Блинов ЛМ. *Электро- и магнитооптика жидких кристаллов*. Москва: Наука; 1978. 384 с.
17. Палто СП, Блинов ЛМ, Барник МИ, Лазарев ВВ, Уманский БА, Штыков НМ. Фотоника жидкокристаллических структур. Обзор. *Кристаллография*. 2011;56(4):667–697.

References

1. Zuo Kai, Shi Yue, Luo Dan. A review of two-dimensional liquid crystal polarization gratings. *Crystals*. 2021;11(9):1015. DOI: 10.3390/cryst11091015.
2. Huang Bing-Yau, Lin Tsung-Hsien, Jhuang Tian-Yi, Kuo Chie-Tong. Electrically tunable Fresnel lens in twisted-nematic liquid crystals fabricated by a Sagnac interferometer. *Polymers*. 2019;11(9):1448. DOI: 10.3390/polym11091448.
3. Kawai K, Sasaki T, Noda K, Sakamoto M, Kawatsuki N, Ono H. Holographic binary grating liquid crystal cells fabricated by one-step exposure of photocrosslinkable polymer liquid crystalline alignment substrates to a polarization interference ultraviolet beam. *Applied Optics*. 2015;54(19):6010–6018. DOI: 10.1364/AO.54.006010.

4. Nieborek M, Rutkowska K, Woliński TR, Bartosewicz B, Jankiewicz B, Szmigiel D, et al. Tunable polarization gratings based on nematic liquid crystal mixtures photoaligned with azo polymer-coated substrates. *Crystals*. 2020;10(9):768. DOI: 10.3390/cryst10090768.
5. Rutkowska KA, Kozanecka-Szmigiel A. Design of tunable holographic liquid crystalline diffraction gratings. *Sensors*. 2020;20(23):6789. DOI: 10.3390/s20236789.
6. Lee D, Lee H, Migara LK, Kwak K, Panov VP, Song J-K. Widely tunable optical vortex array generator based on grid patterned liquid crystal cell. *Advanced Optical Materials*. 2021;9(2):2001604. DOI: 10.1002/adom.202001604.
7. Huang Shuan-Yu, Huang Bing-Yau, Kang Chi-Chung, Kuo Chie-Tong. Diffraction and polarization properties of electrically-tunable nematic liquid crystal grating. *Polymers*. 2020;12(9):1929. DOI: 10.3390/polym12091929.
8. Kazak AA, Kazak LA, Melnikova EA, Tolstic AL. [Diffraction liquid crystal elements for the formation of vortex light fields]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. 2011;1:3–6. Russian.
9. Chen Peng, Lu Yan-Qing, Hu Wei. Beam shaping via photopatterned liquid crystals. *Liquid Crystals*. 2016;43(13–15):2051–2061. DOI: 10.1080/02678292.2016.1191685.
10. Chigrinov VG, Kozenkov VM, Kwok H-S. *Photoalignment of liquid crystalline materials: physics and applications*. Chichester: John Wiley & Sons; 2008. XV, 231 p. DOI: 10.1002/9780470751800.
11. Chigrinov V, Kudreyko A, Guo Q. Patterned photoalignment in thin films: physics and applications. *Crystals*. 2021;11(2):84. DOI: 10.3390/cryst11020084.
12. Chigrinov V, Sun J, Wang X. Photoaligning and photopatterning: new LC technology. *Crystals*. 2020;10(4):323. DOI: 10.3390/cryst10040323.
13. Kabanova OS, Rushnova II, Melnikova EA, Tolstic AL, Muravsky AIA, Murauski AnA, et al. 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. DOI: 10.33581/2520-2243-2019-3-4-11.
14. Mikulich VS, Murawski AnA, Muravsky AIA, Agabekov VE. 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.
15. Crawford GP, Eakin JN, Radcliffe MD, Callan-Jones A, Pelcovits RA. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques. *Journal of Applied Physics*. 2005;98(12):123102. DOI: 10.1063/1.2146075.
16. Blinov LM. *Elektro- i magnitooptika zhidkikh kristallov* [Electro- and magnetooptics of liquid crystals]. Moscow: Nauka; 1978. 384 p. Russian.
17. Palto SP, Blinov LM, Barnik MI, Lazarev VV, Umanskii BA, Shtykov NM. [Photonics of liquid-crystal structures. A review]. *Kristallografiya*. 2011;56(4):667–697. Russian.

Получена 04.05.2023 / исправлена 09.05.2023 / принята 13.05.2023.
Received 04.05.2023 / revised 09.05.2023 / accepted 13.05.2023.