

ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЕТОК, ЗАПИСАННЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ

Галина Михайловна Жаркова^{1*}, Сергей Анатольевич Стрельцов²

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

И Н Ф О Р М А Ц И Я

История статьи:

Поступила 25.10.2022

Одобрена 22.12.2022

Принята 27.12.2022

Ключевые слова:

жидкие кристаллы,
полимерно-дисперсные
жидкие кристаллы,
поляризационные
голографические решетки

А Н Н О Т А Ц И Я

Представлены результаты исследования фильтрационных свойств поляризационных голографических решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах. Решетки синтезированы в результате суперпозиции когерентных волн со взаимно ортогональными поляризациями, как линейными, так и циркулярными. Выполнен анализ состояния поляризации излучения, дифрагировавшего и недифрагировавшего на поляризационных решетках, при падении на них пробных пучков с различной поляризацией. Продемонстрирована возможность полного подавления дифрагировавшего или недифрагировавшего излучения при падении линейно поляризованного пробного пучка на решетку, записанной линейно поляризованными пучками. Предложен пример устройства фильтрации излучения с использованием этих голографических решеток.

DOI:

10.18083/LCAppl.2023.1.50

Для цитирования:

Жаркова Г. М., Стрельцов С. А. Фильтрационные свойства поляризационных голографических решеток, записанных в жидкокристаллических композитах // Жидк. крист. и их практич. использ. 2023. Т. 23, № 1. С. 50–57.

*Адрес для переписки: zharkova@itam.nsc.ru

© Жаркова Г. М., Стрельцов С. А., 2023

Physics

Original Article

**FILTRATION PROPERTIES OF POLARIZATION HOLOGRAPHIC GRATINGS
RECORDED IN LIQUID CRYSTAL COMPOSITES**

Galina M. Zharkova¹, Sergey A. Streletsov²

¹*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk, Russia*

²*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

ARTICLE INFO:

ABSTRACT

Article history:

Received 25 October 2022

Approved 22 December 2022

Accepted 27 December 2022

Key words:

liquid crystals,

polymer-dispersed

liquid crystals,

polarization holographic

gratings

The filtration properties of polarization holographic gratings formed in liquid crystal composites have been studied. The gratings were synthesized as a result of superposition of coherent waves with mutually orthogonal polarizations, both linear and circular. The analysis of the polarization state of diffracted and non-diffracted radiation at polarization gratings was made, when the probe beams of different polarizations were incident on gratings. The possibility of complete suppression of diffracted or non-diffracted radiation was demonstrated, when a linearly polarized probe beam was incident on a grating. The grating was recorded by linearly polarized beams. An example of radiation filtering device using these holographic gratings is proposed.

DOI:

10.18083/LCappl.2023.1.50

For citation:

Zharkova G. M., Streletsov S. A. Filtration properties of polarization holographic gratings recorded in liquid crystal composites. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2023, **23** (1), 50–57 (in Russ.).

*Corresponding author: zharkova@itam.nsc.ru

© Zharkova G. M., Streletsov S. A., 2023

Введение

Высокоструктурированные жидкокристаллические композиты (ЖК-композиты) – новый класс оптически активных сред для устройств отображения информации, управления свойствами и направлением распространения излучения в устройствах фотоники [1]. В последнее время заметное внимание уделяется исследованию и перспективам практического использования поляризационных голографических решеток, сформированных в ЖК-композитах [2–8]. Такие решетки благодаря уникальным оптическим свойствам перспективны для создания модуляторов излучения, затворов, фильтров, оптических переключателей, разветвителей поляризованного излучения для устройств фотоники [9–11]. Они привлекательны тем, что сравнительно недороги, компактны, позволяют использовать относительно простую, одностадийную технологию оптической записи, долговременно хранить поляризационное состояние, что обеспечивает высокую поляризационную селективность записанных поляризационных решеток. Кроме того, ими можно управлять электрическим полем.

Поляризационные голографические решетки записывают в ЖК-композитах при суперпозиции в плоскости образца двух плоских когерентных волн со взаимно ортогональными поляризациями. Это приводит к возникновению после фотополимеризации пространственной структуры с повторяющейся ориентацией молекул нематического жидкого кристалла (НЖК) в полимерных капсулах [12–13].

Сформированная таким образом структура молекул НЖК обеспечивает зависимость состояния поляризации дифрагировавшего на поляризационной голографической решетке излучения от состояния поляризации падающего, а также различие в поляризационных состояниях дифрагировавшего и недифрагировавшего излучения, что позволяет осуществлять фильтрацию оптического излучения и управлять его поляризацией.

Целью работы явилось экспериментальное исследование фильтрационных свойств поляризационных голографических решеток, записанных в

ЖК-композитах, и демонстрация возможности управлять поляризацией оптического излучения.

Материалы и методика эксперимента

Для формирования поляризационных голограммических решеток использовалась предполимерная композиция, представляющая собой смесь акрилатного мономера, НЖК, связующего компонента и фотоинициирующей системы, включающей краситель с максимальной чувствительностью в видимой области спектра и сопинициатор. В качестве мономера использовался дипентазиритропентилакрилат DPPHA ($n_p = 1,49$), в качестве НЖК – смесь E7 ($n_o = 1,521$, $n_e = 1,746$, $\Delta n = 0,225$), кроме того, исходная композиция включала N-винилпирролидон как связующий компонент и растворитель для красителя и сопинициатора. Красителем служил метиленовый голубой, обеспечивающий максимальную светочувствительность в нужном диапазоне длин волн. Концентрация НЖК составляла 37 мас. %, концентрация красителя – 0,3 мас. %. Исходная композиция обрабатывались ультразвуком до получения гомогенного раствора. Затем полученная смесь капиллярным способом вносила между двух стекол с токопроводящими покрытиями из окиси индия In_2O_3 и окиси олова SnO_2 и экспонировалась светом с длиной волны, соответствующей длине волны поглощения красителя, содержащегося в композиции. Толщина образцов составляла 20 мкм. Источником излучения при записи решеток служил полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 658$ нм, мощностью 80 мВт.

Поляризационные решетки записывались в результате суперпозиции двух плоских линейно поляризованных волн равной интенсивности с ортогональными линейными поляризациями, а также двух лево- и право-циркулярно поляризованных волн. Период решеток определялся как $\Lambda = \frac{\lambda}{2\sin(\theta/2)}$ (θ – угол схождения интерферирующих волн) и составлял $\Lambda \sim 30$ мкм. Схема установки для записи решеток представлена на рис. 1.

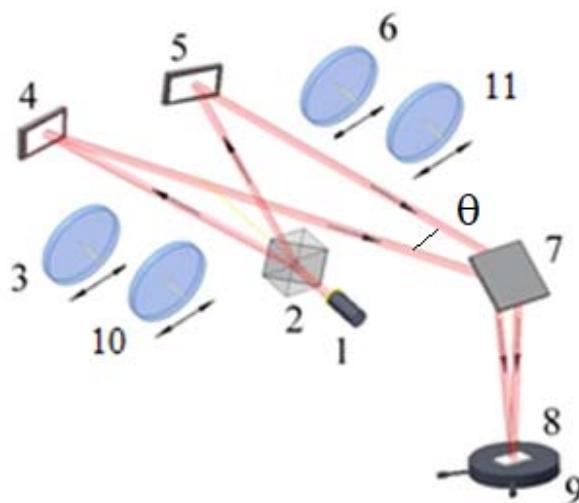


Рис. 1. Схема установки для записи поляризационных голограммических решеток:
 1 – полупроводниковый лазер ($\lambda = 658$ нм); 2 – призма Волластона; 3, 6 – пластиинки $\lambda/2$;
 4, 5, 7 – зеркала; 8 – образец; 9 – предметный столик; 10, 11 – пластиинки $\lambda/4$

Fig. 1. Scheme of installation for recording polarization holographic gratings:
 1 – semiconductor laser ($\lambda = 658$ nm); 2 – Wollaston prism; 3, 6 – plates $\lambda/2$;
 4, 5, 7 – mirrors; 8 – sample; 9 – object table; 10, 11 – plates $\lambda/4$

В результате суперпозиции двух ортогонально поляризованных волн равной интенсивности возникала модуляция поляризационного состояния формируемого светового поля. В предполимерной композиции проходил процесс полимеризации мономера с фазовым разделением НЖК-

полимер. Формировалась поляризационная голограммическая решетка с периодической ориентацией молекул НЖК в капсулах, что влекло за собой модуляцию показателя преломления для линейной или циркулярной поляризации падающего пробного пучка (рис. 2).

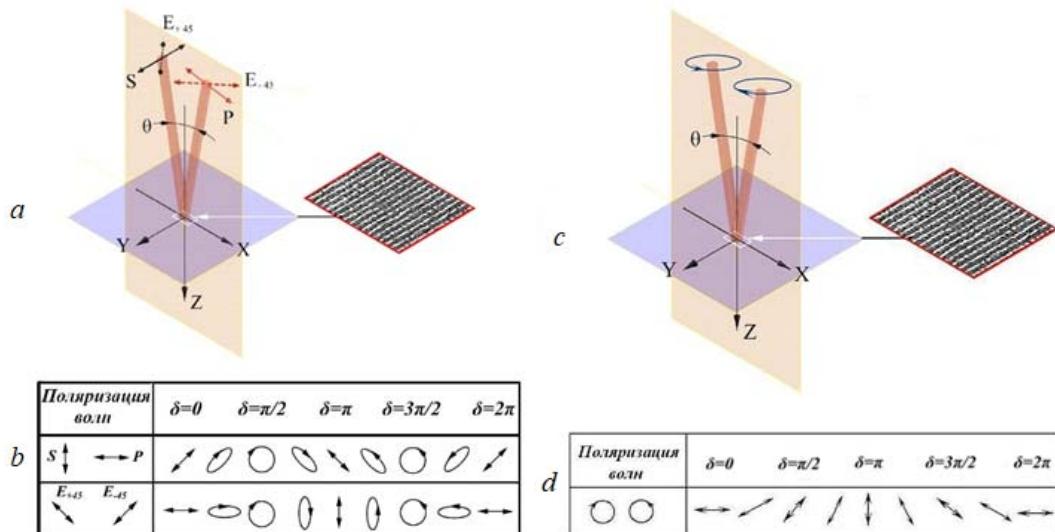


Рис. 2. Геометрия записи поляризационных голограммических решеток (а, с) и соответствующая пространственная модуляция поляризации по оси x (б, д). Фотография поляризационной голограммической решетки, получена методом поляризационной микроскопии, поляризаторы скрещены

Fig. 2. The recording geometry of polarization holographic gratings (a, c) and the corresponding spatial modulation of polarization along the x axis (b, d). Photograph of a polarization holographic grating, obtained by polarizing microscopy, polarizers are crossed

Экспериментальные исследования

Особая структура НЖК, возникающая при записи поляризационных голограммических решеток, приводит к зависимости дифракционной эффективности таких решеток от поляризации падающего излучения, а также к различию в состояниях поляризации дифрагировавшего и недифрагировавшего излучения. Анализ поля дифрагировавшей волны E [14–15] показывает, что при падении линейно поляризованного пробного пучка на решетку, сформированную лево- и право-циркулярно поляризованными волнами, волны, дифрагировавшие в -1 и $+1$ порядок, имеют равную интенсивность

$I_{+1} = I_{-1} = I_0(\sin^2 \Delta\varphi)/2 = I_0(\sin^2(\pi \cdot d \cdot \Delta n / \lambda))/2$ и ортогональную циркулярную поляризацию. При падении на такую решетку циркулярно поляризованного пробного пучка наблюдается только одна дифрагировавшая волна, -1 порядка для лево-циркулярно поляризованного пробного пучка и $+1$ порядка для право-циркулярно поляризованного пучка с дифракционной эффективностью $\eta_{\pm 1} = I_{\pm 1} / I_0 = (\sin^2 \Delta\varphi) = (\sin^2(\pi \cdot d \cdot \Delta n / \lambda))$. Поляри-

зация дифрагировавшей волны в этом случае ортогональна поляризации падающего на решетку пробного пучка. Для решеток, сформированных в результате суперпозиции волн с взаимно ортогональными линейными поляризациями, при падении пробного пучка всегда существуют волны, дифрагировавшие в -1 и $+1$ порядок. Они имеют равную интенсивность и одинаковую поляризацию, ортогональную поляризации пробного пучка.

Не дифрагировавшая на поляризационных решетках волна всегда имела ту же поляризацию, что и падающий на решетку пробный пучок. Такие особенности голограммических поляризационных решеток открывают возможности для управления дифрагировавшим на них излучением.

На рисунке 3 представлены фотографии дифракционных картин, полученных при дифракции линейно (s -поляризация) и циркулярно поляризованных пробных пучков на решетке, записанной линейно поляризованными пучками (s - и p -поляризации). Используя поляризатор и анализатор, можно погасить недифрагировавшую волну или волны, дифрагировавшие в ± 1 порядок.

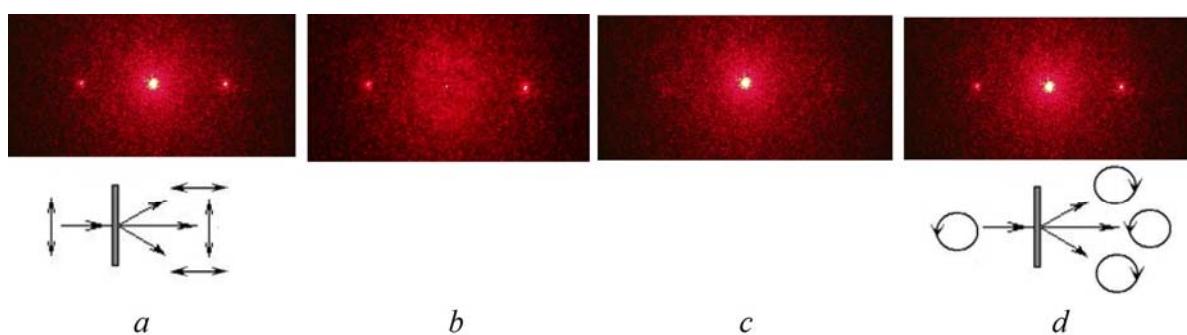


Рис. 3. Фотографии дифракционных картин: *a* – без анализатора, *b* – поляризатор и анализатор скрещены, *c* – поляризатор и анализатор параллельны, *d* – циркулярно поляризованный пробный пучок

Fig. 3. Photos of diffraction patterns: *a* – without analyzer, *b* – polarizer and analyzer are crossed, *c* – polarizer and analyzer are parallel, *d* – circularly polarized probe beam

На рисунке 4 представлены фотографии дифракционных картин, полученных при дифракции линейно и циркулярно поляризованных пробных пучков на решетке, записанной лево- и право-

циркулярно поляризованными волнами. Изменяя состояние поляризации пробного пучка, можно управлять дифрагировавшим излучением.

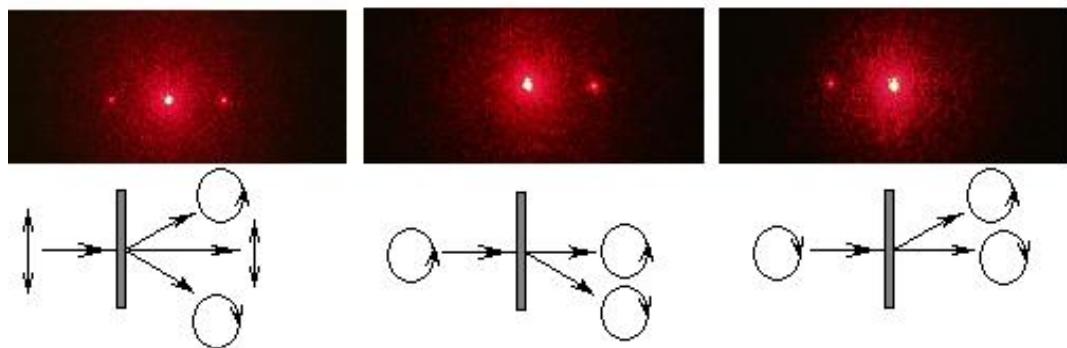


Рис. 4. Фотографии дифракционных картин на решетке, записанной лево- и право-циркулярно поляризованными волнами

Fig. 4. Photographs of diffraction patterns on a grating recorded by left- and right-circularly polarized waves

Зависимость селективных свойств высокоструктурированных поляризационных голограммических решеток с особой структурой НЖК от состояния поляризации падающего излучения позволяет осуществлять фильтрацию излучения,

управлять направлением его распространения и состоянием поляризации. На рисунке 5 представлена схема предлагаемого устройства фильтрации излучения – адаптивного поляризационного фильтра.

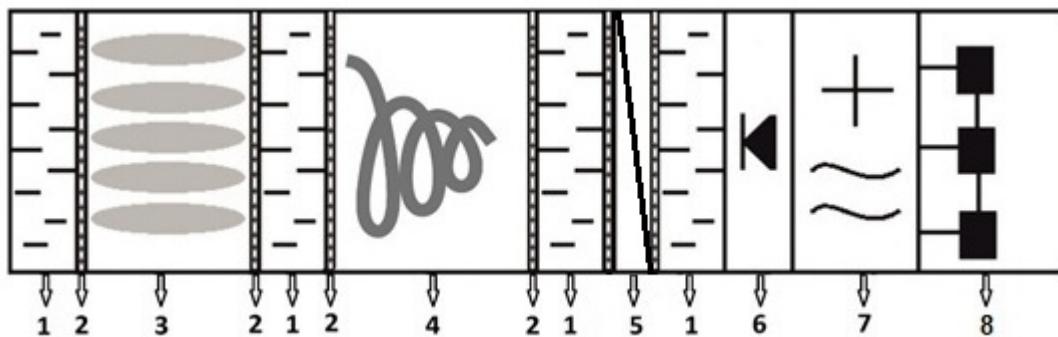


Рис. 5. Адаптивный поляризационный фильтр: 1 – стеклянные подложки, 2 – прозрачные электроды, 3 – поляризационная голограммическая дифракционная решетка, 4 – вращатель плоскости поляризации, 5 – поляризатор, 6 – регистратор интенсивности проходящего света, 7 – источник постоянного и переменного напряжения, 8 – система управления с ЭВМ

Fig. 5. Adaptive polarization filter: 1 – glass substrates, 2 – transparent electrodes, 3 – polarization holographic diffraction grating, 4 – rotator of polarization plane, 5 – polarizer, 6 – transmitted light intensity recorder, 7 – source of direct and alternating voltage, 8 – computer control system

Адаптивный поляризационный фильтр собирается согласно схеме оптического соединения, представленного на рис. 5. В основе всех элементов, содержащих жидкые кристаллы, включенных в оптическое соединение, лежит единый конструктивный принцип – все элементы, содержащие жидкые кристаллы, располагаются между двумя параллельными друг к другу стеклянными пласти-

нами 1 с нанесенными на них прозрачными электродами 2. Поляризационная голограммическая решетка 3 регистрировалась предварительно в области суперпозиции двух когерентных волн равной интенсивности со взаимно ортогональными поляризациями ($\lambda = 658$ нм). Угол схождения интерферирующих волн составлял $1\text{--}2^0$.

Вращатель плоскости поляризации 4 состоит из двух подложек с электродами для подключения управляющего электрического поля и жидких кристаллов между ними. Молекулы кристалла от одной подложки до другой повернуты на 90° , если между пластинами отсутствует напряжение. Когда подается управляющее электрическое поле, то молекулы строго ориентируются вдоль поля. Промежуточное значение потенциала позволяет вращать плоскость поляризации при прохождении света через устройство.

Устройство работает следующим образом. Линейно поляризованный свет, попадающий на вход адаптивного поляризационного светофильтра, проходит через первые элементы 1–3 оптического соединения – дифракционную решетку, записанную, например, в результате суперпозиции волн с взаимно ортогональными линейными поляризациями, далее – через нейтральный вращатель 4 к поляризатору 5. Управляя вращателем 4, можно практически полностью подавить недифрагировавшую волну или волны, дифрагировавшие в ± 1 порядок, исключив рассеяние поляризационных составляющих проходящего света за счет их одинакового подавления. При падении циркулярно поляризованного света на вход фильтра для его фильтрации необходимо в состав фильтра ввести четвертьволновые пластинки. Фильтр может работать в статическом режиме при ручном управлении и динамическом в автоматическом режиме.

Заключение

Таким образом, в результате одноэтапного процесса записи, с использованием метода поляризационной голограммии в ЖК-композитах сформированы высокоструктурированные поляризационные голограммические решетки. Особая структура НЖК, возникающая при записи поляризационных голограммических решеток, приводит к зависимости их дифракционных свойств от поляризации падающего излучения, а также к различию в состояниях поляризации дифрагировавшего и недифрагировавшего излучения. Такие особенности голограммических поляризационных решеток открывают возможности для управления их оптическими свойствами.

Экспериментально исследованы состояния поляризации дифрагировавшего и недифрагировавшего на поляризационных решетках излучения

при падении на них пробных пучков с различной поляризацией. Продемонстрирована возможность полного подавления дифрагировавшего и недифрагировавшего излучения при падении линейно поляризованного пробного пучка на решетку, записанной линейно поляризованными пучками (*s*- и *p*-поляризации). Предложена схема устройства фильтрации излучения – адаптивного поляризационного фильтра.

Благодарность: работа выполнена по теме государственного задания (№ гос. рег. 121030500158-0).

Acknowledgments: the work was carried out on the topic of the state task (state registration number 121030500158-0).

Список источников / References

1. Жаркова Г. М., Подьячева О. Ю., Стрельцов С. А. Оптические методы формирования высокоструктурированных полимерно-жидкокристаллических композитов // Жидк. крист. и их практич. использ. 2015. Т. 15, № 3. С. 91–102. [Zharkova G.M., Podyacheva O.Yu., Streltsov S.A. Optical methods of forming highly structured polymer-liquid crystal composites. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2015, **15** (3), 91–102. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2015.3.91].
2. Crawford G.P., Eakin J.N., Radcliffe M.D., Callan-Jones A., Pelcovits R.A. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques. *Appl. Phys.*, 2005, **98**, 123102.
3. Zhan T., Lee Y.H., Tan G., Xiong J., Yin K., Gou F., Zou J., Zhang N., Zhao D., Yang J., Liu S., Wu S.-T. Pancharatnam-Berry optical elements for head-up and near-eye displays. *Opt. Soc. Am. B*, 2019, **36**, D52–D65.
4. He Z., Gou F., Chen R., Yin K. Zhan T., Wu S.T. Liquid crystal beam steering devices: principles, recent advances and future developments. *Crystals*, 2019, **9**, 292.
5. Sakhn O., Gritsai Y., Sahm H., Stumpe J. Fabrication and performance of efficient thin circular polarization gratings with Bragg properties using bulk photo-alignment of a liquid crystalline polymer. *Appl. Phys. B*, 2018, **124**, 52.
6. Xiong J., Wu S.T. Rigorous coupled-wave analysis of liquid crystal polarization gratings. *Opt. Express*, 2020, **28**, 35960–35971.
7. Xiang X., Kim J., Komanduri R., Escuti M.J. Nanoscale liquid crystal polymer Bragg polarization gratings. *Opt. Express*, 2017, **25**, 19298–19308.
8. Weng Y., Xu D., Zhang Y., Li X., Wu S.T. Polarization volume grating with high efficiency and large diffraction angle. *Opt. Express*, 2016, **24**, 17746–17759.

9. Matharu A.S., Jeeva S., Ramanujam P.S. Liquid crystals for holographic optical data storage. *Chem. Soc. Rev.*, 2007, **36**, 1868–1880.
10. Ono H., Takahashi F., Emoto A. Polarization holograms in azo dye-doped polymer dissolved liquid crystal composites. *Appl. Phys.*, 2005, **97**, 053508.
DOI: 10.1063/1.1858063.
11. Lin Tiegang, Xie Jin, Zhou Yingjie, Zhou Yagin, Yuan Yide, Fan Fan, Wen Shuangchun. Recent advances in photoalignment liquid crystal polarization gratings and their applications. *Crystals*, 2021, **11** (8), 900 (22 p.)
DOI: 10.3390/cryst11080900.
12. Mazzulla A., Pagliusi P., Provenzano C., Russo G., Carbone G., Cipparrone G. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**, 2505–2508.
13. Fuh A., Lee C.-R., Cheng C.-T. Polarizer-free, electrically switchable and optically rewritable displays based on dye-doped polymer-dispersed liquid crystals. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2003, **42**, 4406–4410.
14. Nikolova L., Todorov T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording. *Optica Acta*, 1984, **31**, 579–588.
15. Nikolova L., Stoyanova K., Todorov T. Polarization wavefront conjugation by means of transient holograms in rigid dye solutions. *Opt. Commun.*, 1987, **64**, 74–80.

Вклад авторов:

Авторы сделали эквивалентный вклад в эту статью.

Contribution of the authors:

The authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Жаркова Г. М. – orcid: 0000-0002-0173-2962

Стрельцов С. А. – orcid: 0000-0003-3563-927X

Поступила 25.10.2022, одобрена 22.12.2022, принята 27.12.2022

Received 25.10.2022, approved 22.12.2022, accepted 27.12.2022