

УДК 532.783

Г. М. Жаркова¹, С. А. Стрельцов²

СЕЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА УПРАВЛЯЕМЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ В ПОЛИМЕРНО-ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОМ КОМПОЗИТЕ

¹Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, ул. Институтская, д. 4/1, 630090 Новосибирск, Россия. E-mail: zharkova@itam.nsc.ru

²Новосибирский государственный технический университет, пр-т К. Маркса, д. 20, 630073 Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследований селективных свойств управляемых голограмм, зарегистрированных в полимерно-жидкокристаллическом композите, управляемых механическим растяжением или сжатием голограммы. На основе теории дифракции Когельника выполнен анализ влияния механического растяжения и сжатия фазовой отражательной голографической решетки по толщине на ее спектральные характеристики. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования. Показано, что при механическом сжатии голограммы, длина волны, соответствующая максимуму в спектре отражения, смещается в коротковолновую область спектра, а при ее растяжении – в длинноволновую область. Длины волн, соответствующие максимуму в спектре отражения для теоретических и экспериментальных зависимостей, соответствующих одинаковой величине сжатия или растяжения, близки. Представлен пример приборного устройства с использованием этих управляемых голограмм.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, полимерно-дисперсные жидкие кристаллы, фазовые голографические отражательные решетки.

DOI: 10.18083/LCAppl.2021.3.53

G. M. Zharkova¹, S. A. Streltsov²

SELECTIVE PROPERTIES OF CONTROLLED REFLECTIVE HOLOGRAMS RECORDED IN A POLYMER-LIQUID CRYSTAL COMPOSITE

¹Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, 4/1 Institutskaya St., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: zharkova@itam.nsc.ru

²Novosibirsk State Technical University, 20 Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia

The selective properties of reflective holograms recorded in a polymer-liquid crystal composite, controlled by mechanical stretching or compression of the hologram have been studied. Based on the theory of diffraction by Kogelnik, an analysis of the effect of mechanical tension and compression of a phase reflective holographic grating across its thickness on the spectral characteristics of the grating is made. A comparative analysis of experimental data and simulation results is carried out. It is shown that when the hologram is mechanically compressed, the wavelength corresponding to the maximum in the reflection spectrum is shifted to the short-wavelength region of the spectrum, and when it is stretched – to the long-wavelength region. The wavelengths of the maximum in the reflection spectrum for the theoretical and experimental dependences corresponding to the same magnitude of compression or tension are proximate. An example of instrumental device using these guided holograms is presented.

Key words: liquid crystals, polymer-dispersed liquid crystals, phase holographic reflective gratings.

Введение

Современные исследования взаимодействия видимого света с веществом предъявляют высокие требования к параметрам излучения: узкую спектральную линию, возможность вариации излучения по амплитуде и частоте, управление поляризацией излучения и т. д. Известные методы достижения цели, основанные на использовании лазерных зеркал, обладают определенной статичностью [1–2]. Поэтому становится актуальной задача разработки методов воздействия на излучение с целью решения этих проблем.

Для их решения предлагается использовать управляемые отражательные голографические дифракционные решетки, записанные в полимерно-жидкокристаллических композитах (ЖК-композитах). Данные голограммы открывают широкие возможности в создании новых видов фильтров, в частности с управляемой полосой пропускания и отражения по амплитуде, фазе, частоте, длине волны и модуляции излучения как прошедшего, так и отраженного излучения.

Полимерно-жидкокристаллические композиты представляют собой полимерную матрицу, в объеме которой диспергированы капсулы нематического жидкого кристалла (НЖК). Такие материалы обладают уникальными фотохимическими и электрооптическими свойствами и могут применяться для записи одиночных и наложенных объемных голографических дифракционных решеток, свойствами которых можно управлять тепловыми и электрическими полями [3–4]. Голографические дифракционные решетки, сформированные в ЖК-композитах, могут применяться в качестве управляемых элементов фотоники в волоконной и интегральной оптике, оптических компьютерах, сенсорных системах и системах голографической памяти [5–11].

Изменение расстояния между слоями отражательной голограммы, сформированной в ЖК-композите по схеме Ю. Н. Денисюка за счет механического воздействия, способно менять параметры отраженного излучения.

Поэтому целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование селективных свойств объемных фазовых отражательных решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах при механическом воздействии на них.

Материалы и методика эксперимента

Для формирования фазовых, отражательных, голографических решеток использовалась предполимерная композиция, представляющая собой смесь акрилатного мономера, НЖК, связующего компонента и фотоиницирующей системы, включающей краситель с максимальной чувствительностью в видимой области спектра и соинициатор.

В качестве мономера использовался дипентаэритритолпента/гексаакрилат 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 соинициатора. Красителем служил метиленовый голубой или розовый бенгал, обеспечивая максимальную светочувствительность в нужном диапазоне длин волн. Концентрация НЖК составляла 37 мас. %, концентрация красителя – 0,3 мас. %. Исходная композиция обрабатывалась ультразвуком до получения однородного раствора. Затем полученная смесь капиллярным способом вносилась между двух стекол с токопроводящими покрытиями и экспонировалась светом с длиной волны, соответствующей длине волны поглощения красителя, содержащегося в композиции. Толщина образцов составляла 50 мкм. Источником излучения при записи решеток служил полупроводниковый лазер KLM-650/80 с длиной волны 656 нм. Период решеток составлял $\Lambda \sim 0,2$ мкм. Оценки показывают, что для $n \sim 1,54$ и рассматриваемой толщины композита параметр Клейна, определяемый как $Q = (2\pi\lambda d)/(n\Lambda^2) \gg 1$, что соответствует объемным фазовым решеткам. Спектральные характеристики записанных отражательных голограмм регистрировались с помощью скоростного спектрометра «Колибри-2» и спектрофотометра *Perkin Elmer Lambda 950*. Схема записи отражательных решеток представлена на рис. 1.

При голографической записи по схеме Ю. Н. Денисюка излучение лазера для записи голограммы 1 проходит через стеклянные подложки голограммы с нанесенными на них прозрачными электродами 2, область голограммы, в которой находится предполимерная композиция 3, отражается зеркальным покрытием 6, нанесенным на плоскую стеклянную пластину 7. Отраженное излучение 5 в области 3 интерферирует с падающим излучением, в итоге

здесь образуется стационарное интерференционное поле, которое регистрируется в виде пространственно-периодической структуры, формируемой в результате процесса пространственно-неоднородной фотополимеризации предполимерной композиции и направленной диффузии мономера и НЖК из состава композита. В результате возникают чередующиеся слои диэлектрика с большими (богатыми капсулами нематического жидкого кристалла) 4 и меньшими (богатыми полимером) коэффициентами преломления. Плоскости пространственной структуры 4 параллельны плоскости зеркального покрытия 6.

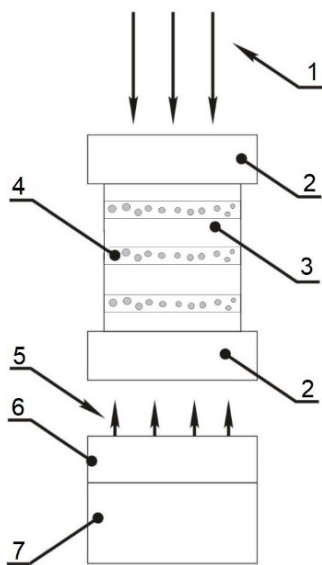


Рис. 1. Схема записи отражательных голографических решеток: 1 – излучение лазера; 2 – стеклянные подложки с нанесенными на них прозрачными электродами; 3 – область голограммы, в которой находится предполимерная композиция; 4 – слои с капсулами НЖК; 5 – отраженное излучение; 6 – зеркальное покрытие; 7 – плоская стеклянная пластина

Fig. 1. Scheme of recording the reflective holographic gratings: 1 – laser radiation; 2 – glass substrates with applied transparent electrodes; 3 – the hologram area, in which the prepolymer composition is located; 4 – layers with NLC capsules; 5 – reflected radiation; 6 – mirror coating; 7 – flat glass plate

Такая конструкция голограммы позволяла осуществлять решение всех вышеперечисленных задач за счет механического сжатия или растяжения голограммы по ее толщине. Изменение расстояния между слоями диэлектрика является основой селективных свойств голограммы Ю.Н. Денисюка, зарегистрированной в полимерно-жидко-кристаллическом композите.

Теоретическое исследование селективных свойств объемных фазовых отражательных решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах при механическом воздействии на них, осуществлялось в рамках теории дифракции Когельника [12–13].

Сжатие или растяжение голограммы по толщине осуществлялось с помощью пьезоэлемента, длина которого изменялась при подаче напряжения от генератора. При экспериментальных исследованиях полагали, что дифракционная эффективность отражательных решеток η равна коэффициенту отражения R .

Экспериментальные исследования

На рисунке 2 представлены рассчитанные, а на рис. 3 – экспериментальные спектральные зависимости коэффициента отражения решеток, записанных двумя контр направленными пучками лазера при изменении толщины голограммы в результате ее механического растяжения и сжатия. При расчете принималось, что амплитуда модуляции показателя преломления равна 0,012, а средний показатель преломления пред-полимерной композиции – 1,54.

Из экспериментальных зависимостей видно, что спектры отражения уширяются и сглаживаются, что говорит об искажении пространственной структуры решетки по объему голограммы. Кроме того, наблюдается разница между теоретическими и экспериментальными коэффициентами отражения для длины волны, соответствующей максимуму в спектре отражения λ_{\max} . Это может быть связано с потерями света на рассеяние от границ НЖК капсул и остаточным поглощением, обусловленным наличием устойчивой формы красителя исходной пред-полимерной композиции.

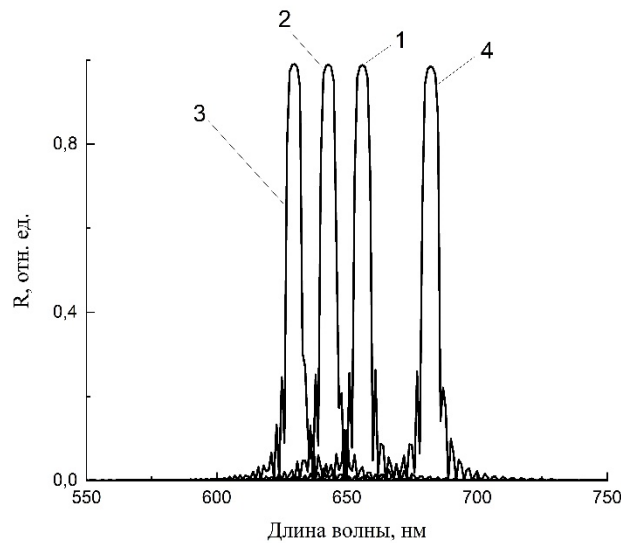


Рис. 2. Теоретические спектральные зависимости коэффициента отражения голографических решеток: 1 – толщина голограммы 50 мкм; 2 – механическое сжатие голограммы на 1 мкм; 3 – сжатие на 2 мкм; 4 – механическое растяжение голограммы на 2 мкм

Fig. 2. Theoretical spectral dependences of the reflection coefficient of holographic gratings: 1 – thickness of the hologram is 50 microns; 2 – mechanical compression of the hologram by 1 micron; 3 – compression by 2 microns; 4 – mechanical stretching of the hologram by 2 microns

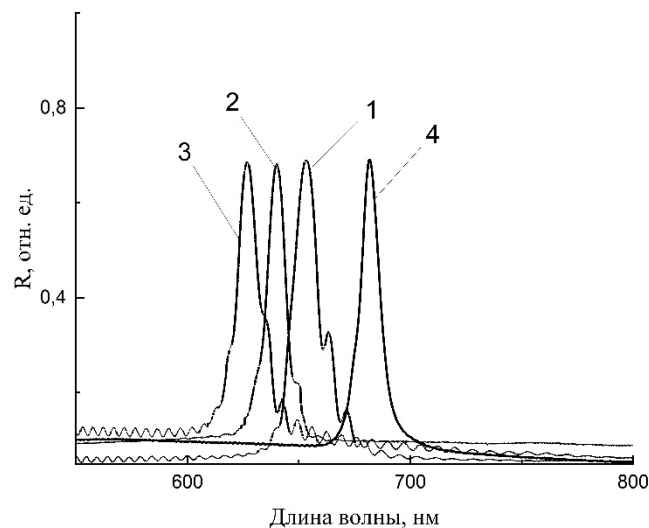


Рис. 3. Экспериментальные спектральные зависимости коэффициента отражения голографических решеток: 1 – толщина голограммы 50 мкм; 2 – механическое сжатие голограммы на 1 мкм; 3 – сжатие на 2 мкм; 4 – механическое растяжение голограммы на 2 мкм

Fig. 3. Experimental spectral dependences of the reflection coefficient of holographic gratings: 1 – thickness of the hologram is 50 microns; 2 – mechanical compression of the hologram by 1 micron; 3 – compression by 2 microns; 4 – mechanical stretching of the hologram by 2 microns

И теоретические и экспериментальные зависимости показывают, что при механическом сжатии голограммы, длина волны λ_{\max} смещается в область меньших длин волн, а при ее растяжении – смещается в область больших длин волн. Длины волн, соответствующие максимуму в спектре отражения (λ_{\max}) для теоретических и экспериментальных зависимостей, соответствующих одинаковой

величине сжатия или растяжения близки. Эти факты позволяют использовать механическое сжатие и растяжение голограммы для спектральной селекции, падающего на голограмму излучения.

На рисунке 4 представлена схема предлагаемого устройства спектральной фильтрации – селективного зеркала [14].

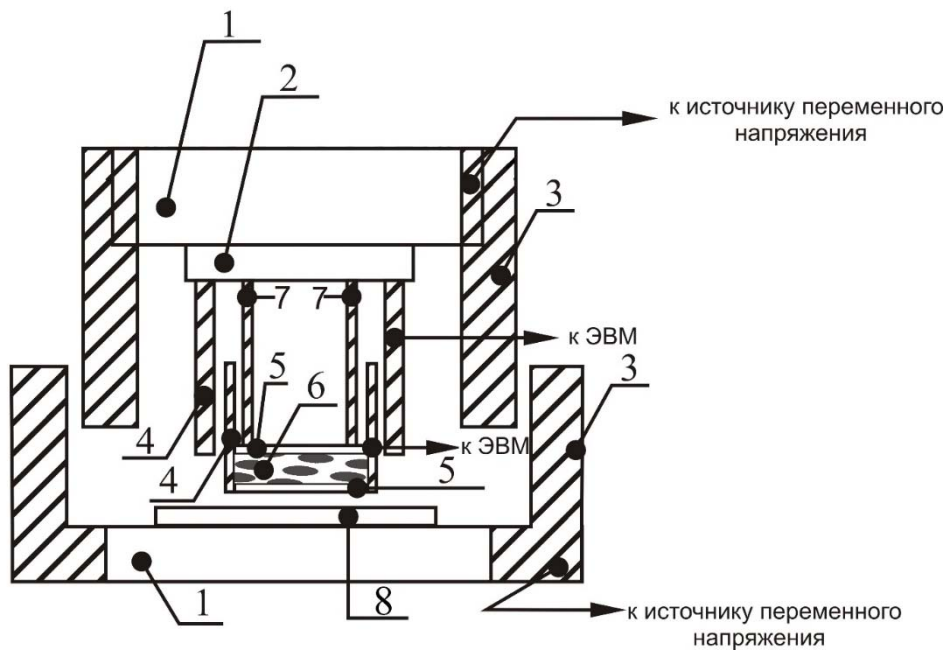


Рис. 4. Селективное зеркало: 1 – стеклянные подложки; 2 – прозрачные электроды; 3 – основной пьезоэлемент; 4 – дополнительный пьезоэлемент; 5 – стеклянные подложки голограммы, с нанесенными на них прозрачными электродами; 6 – голограмма; 7 – упор; 8 – зеркальное покрытие

Fig. 4. Selective mirror: 1 – glass substrates; 2 – transparent electrodes; 3 – main piezoelectric element; 4 – additional piezoelectric element; 5 – glass hologram substrates with applied transparent electrodes; 6 – hologram; 7 – emphasis; 8 – mirror coating

Предлагаемое устройство работает следующим образом. Излучение, попадающее на селективное зеркало, проходит прозрачную стеклянную подложку 1, прозрачные электроды 2, стеклянные подложки голограммы, закрепленной на дополнительном пьезоэлементе 4, с нанесенными на них прозрачными электродами 5, саму голограмму 6, отражается от зеркального покрытия 8 нижней подложки. Пространственно-периодическая структура голограммы обеспечивает фильтрацию спектра падающего излучения, в результате достигается узкая полоса пропускания и обеспечивается высокая разрешающая способность. Динамическая фильтрация

осуществляется посредством механического сжатия или растяжения толщины голограммы дополнительным пьезоэлементом 4. Одна поверхность голограммы посредством упора 7 зафиксирована относительно стеклянной подложки 1 с прозрачными электродами 2 для обеспечения механического сжатия или растяжения толщины голограммы. Пьезоэлементы 3 подключены к источнику переменного напряжения, дополнительный пьезоэлемент 4 управляется компьютером. Апертура селективного зеркала определяется диаметром элементов 1 и 5. Частота модуляции излучения определяется частотой колебания пьезоэлементов.

За счет изменения расстояния между интерференционными слоями голограммы при механическом сжатии или растяжении толщины голограммы дополнительным пьезоэлементом реализуется высокий коэффициент отражения излучения. Пространственно-периодическая структура голограммы аналогична слоистой структуре диэлектрических покрытий поверхности лазерных зеркал, чем обеспечивается фильтрация спектра падающего излучения по амплитуде, фазе и частоте и достигается узкая полоса отраженного излучения.

Заключение

На основе теории дифракции Когельника выполнен анализ влияния механического растяжения и сжатия фазовой отражательной голографической решетки по толщине на ее спектральные характеристики. В ЖК-композитах на основе полимера и НЖК сформированы фазовые, прямые отражательные голографические решетки. Рассмотрены особенности спектральных характеристик таких решеток, связанные с их механическим растяжением и сжатием по толщине. Проведен сравнительный анализ экспериментальных данных и результатов моделирования.

Показано, что при механическом сжатии голограммы, длина волны, соответствующая максимуму в спектре отражения, смещается в коротковолновую область спектра, а при ее растяжении – в длинноволновую область. Длины волн, соответствующие максимуму в спектре отражения для теоретических и экспериментальных зависимостей, соответствующих одинаковой величине сжатия или растяжения, близки. Это позволяет использовать механическое сжатие и растяжение голограммы для спектральной селекции падающего на голограмму излучения. Предложен пример приборного устройства – селективного зеркала с использованием этих управляемых голограмм.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 121030500158-0. Исследования выполнены на оборудовании ЦКП НГТУ «Структура, механические и физические свойства материалов».

Список литературы / References

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 461 с. [Born M., Wolf E. Fundamentals of optics. M.: Nauka, 1973. 461 p. (in Russ.).]
2. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1976. 392 с. [Zaidel A.N., Ostrovskaya G.V., Ostrovsky Yu.I. Technique and practice of spectroscopy. Moscow: Nauka, 1976. 392 p. (in Russ.).]
3. Жаркова Г. М., Подъячева 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].
4. Жаркова Г. М., Стрельцов С. А. Влияние наночастиц оксида иттрия на дифракционную эффективность голографических полимерно-жидкокристаллических решеток // *Изв. ВУЗ: Физика*. 2018. Т. 61, № 7. С. 83–88. [Zharkova G.M., Streltsov S.A. Effect of yttrium oxide nanoparticles on the diffraction efficiency of holographic polymer liquid crystal gratings. *Russian Physics Journal*, 2018, **61** (7), 1274–1280].
5. Осипова В. В., Курилов А. Д., Галяметдинов Ю. Г., Муравский А. А., Кумар С., Чаусов Д. Н. Оптические свойства композитов нематического жидкого кристалла с полупроводниковыми квантовыми точками // *Жидк. крист. и их практич. использ.* 2020. Т. 20, № 4. С. 84–92. [Osipova V.V., Kurilov A.D., Galyametdinov Y.G., Muravsky A.A., Kumar S., Chausov D.N. Optical properties of nematic liquid crystal composites with semiconducting quantum dots. *Liq. Cryst. and their Appl.*, 2020, **20** (4), 84–92. (in Russ.). DOI: 10.18083/LCAppl.2020.4.84].
6. Lucchetta D.E., Criante L., Simoni F. Optical characterization of polymer dispersed liquid crystals for holographic recording. *J. Appl. Ph.*, 2003, **93**, 9669–9674.
7. Zola R.S., Bisoyi H.K., Wang H., Urbas A.M., Bunning T.J., Li Q. Dynamic control of light direction enabled by stimuli-responsive liquid crystal gratings. *Adv. Mater.*, 2019, **31**, 1806172.
8. Crawford G.P. Electrically switchable Bragg gratings. *Optics and Photonics News*, 2003, **14** (4), 54–59.
9. Hsiao V.K.S., Lin T.-C., He G.S., Cartwright A.N., Prasad P.N., Natarajan L.V., Tondiglia V.P., Bunning T.J. Optical microfabrication of highly reflective volume Bragg gratings. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86** (13), 131113-1–131113-3. DOI: 10.1063/1.1880435.
10. Wu S.-T., Fuh A.Y.-G. Lasing in photonic crystals based on dye-doped holographic polymer-dispersed liquid crystal reflection gratings. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44** (2), 977–980.
11. Criante L., Castagna R., Vita F., Lucchetta D.E., Gobbi L., Simoni F. Holographic patterning of composite polymeric materials for photonic applications.

Mol. Cryst. Liq. Cryst., 2008, **486** (1), 1063–1072.

DOI: 10.1080/15421400801916462.

12. Kogelnic H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell. Syst. Techn. Journ.*, 1969, **48** (9), 2909–2944.
13. Стрельцов С. А. Спектральные характеристики отражательных голограмм, сформированных в жидкокристаллических композитах // *Изв. ВУЗ: Физика*. 2015. Т. 58, № 5. С. 71–76. [Streltsov S.A. Spectral properties of the reflection holograms formed in liquid crystal composites. *Russ. Phys. Journal*, 2015, **58** (5), 663–669].
14. Патент № 2701186 Российская Федерация, МПК G02F1/00. Селективное зеркало / Борыняк Л. А.,

Стрельцов С. А.; заявитель и патентообладатель НГТУ. № 2018100317; заявл. 09.01.2018; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 27. [Patent № 2701186 Russian Federation, IPC G02F1 / 00. Selective mirror / Borunyak L.A., Streltsov S.A.; applicant and patentee of NSTU. № 2018100317; declared 01.09.2018; publ. 09.25.2019, Bul. № 27].

Поступила 28.05.2021 г.

Received 28.05.2021

Принята 24.06.2021 г.

Accepted 24.06.2021