

УДК 535.421:773.93

А.О. Семкин, С.Н. Шарангович, Е.В. Васильев,
И.А. Викулина, К.О. Гусаченко, Д.И. Дудник

Экспериментальное исследование голографических дифракционных ФПМ-ЖК-структур

Представлены результаты исследования зависимости дифракционной эффективности голографических дифракционных структур в фотополимерно-жидкокристаллических материалах от азимута поляризации считывающего излучения и от температуры их формирования. В исследованных образцах концентрация жидких кристаллов составляла 25 и 30% мас. Показана анизотропия оптических свойств записанных структур и возможность управления их дифракционной эффективностью путем нагрева образца. Формирование дифракционных структур выполнялось с помощью He-Ne лазера с длиной волны излучения 633 нм.

Ключевые слова: фотополимерно-жидкокристаллические материалы, ФПМ-ЖК, дифракционная эффективность, дифракционная решетка, фотополимер, жидкий кристалл, дифракция.

doi: 10.21293/1818-0442-2017-20-1-29-32

В настоящее время оптические элементы на основе систем дифракционных решеток и волноводных каналов, выполненных на одной подложке, находят самое широкое применение. В связи с этим поиск новых материалов, перспективных с точки зрения формирования в них подобных структур и управления их оптическими свойствами, представляется весьма актуальным. Всё более широкое применение находят фотополимеризующиеся материалы (ФПМ). Современные ФПМ прозрачны и при этом обладают высокой светочувствительностью: процесс фотополимеризации эффективно протекает при воздействии видимого излучения с интенсивностью в единицы Вт/м².

Большой интерес, проявляемый в настоящее время к голографическим дифракционным структурам (ГДС), записанным в композиционных фотополимерно-жидкокристаллических материалах (ФПМ-ЖК), обусловлен в том числе простотой и невысокой стоимостью создания динамически управляемых, селективных по углу, длине волны и поляризации падающего излучения дифракционных элементов [1–8] и волноводных каналов [9–11] на их основе

Наиболее распространенным методом формирования дифракционных структур в ФПМ-ЖК является голографический способ [1–8, 12–15].

В [12–15] было показано, что дифракционные и селективные характеристики ГДС зависят от состава ФПМ-ЖК-композиции и условий записи. Кроме этого, данными характеристиками можно управлять путем воздействия внешнего электрического поля.

Также в [15] исследовано влияние температуры на процессы формирования дифракционных структур в ФПМ-ЖК. Показано, что нагрев образца ФПМ-ЖК до температуры перехода жидких кристаллов (ЖК) в жидкую фазу может способствовать увеличению дифракционной эффективности записанной структуры. Данный эффект обусловлен более высокой подвижностью молекул ЖК в жидкой фазе и соответственно более полным разделением фаз во время записи.

Целью данной работы является исследование зависимости дифракционной эффективности голографической дифракционной структуры (ГДС) в ФПМ-ЖК от азимута поляризации считывающего излучения и исследование влияния температурного воздействия на характеристики ГДС.

Экспериментальные образцы изготавливались в Новосибирском институте органической химии им. Н.Н. Ворожцова [1]. Компонентный состав предполимерной композиции приведен в таблице.

Состав предполимерной композиции

Наименование вещества	Назначение
4-Пентил-4'-бифенилкарбонитрил (5СВ)	Жидкий кристалл (ЖК)
Акрилоилморфолин	Мономер
1,4-бис(акрилоил)пиперазин	Сшивающий мономер
Метиленовый голубой	Краситель-сенсбилизатор
6-этокси-2-меркаптобензотиазол	Со-инициатор
1-(4-гидроксифенил)-1Н-тетразол-тиол	Со-инициатор
Поливинилацетат	Полимерная матрица

Указанные компоненты смешивались в органических растворителях до получения гомогенного раствора, затем полученная композиция методом полива наносилась на стеклянную подложку, высушивалась до полного испарения растворителя и накрывалась второй стеклянной подложкой. Толщина исследуемых образцов – $(0,07-0,1) \times 10^{-3}$ м. Концентрация молекул жидкого кристалла составляла 25 и 30% мас.

Компоненты подбирались таким образом, чтобы показатель преломления фотополимеризующейся составляющей композиции на длине волны используемого лазера ($n_p \approx 1,54$) был близок к обычному показателю преломления жидкого кристалла при комнатной температуре ($n_{lc}^o \approx 1,532$). Необыкновенный показатель преломления ЖК – $n_{lc}^e \approx 1,72$.

Формирование ГДС производилось двумя пучками гелий-неонового лазера (длина волны $0,633 \times 10^{-9}$ м, круговая поляризация, мощность излучения лазера – не более 10^{-3} Вт, диаметр поперечного сечения пучков $\sim 2 \times 10^{-3}$ м). Установкой поляризатора на выходе лазера поляризация записывающего поля преобразовывалась в линейную. Векторы поляризации параллельны друг другу и перпендикулярны плоскости падения. Пространственный период формируемых ГДС (определенный из геометрии записи) составлял $1,2 \times 10^{-3}$ м.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки.

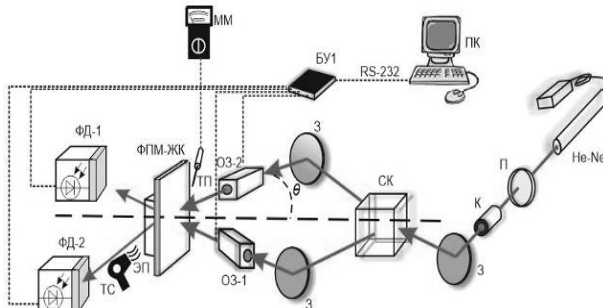


Рис. 1. Схема экспериментальной установки формирования ГДС: He-Ne – лазер; П – поляризатор; К – коллиматор; З – зеркало; СК – светоделительный кубик; ОЗ-1,2 – оптические затворы; ФПМ-ЖК – экспериментальный образец; ФД-1,2 – фотодиоды; БУ-1 – блок управления; ПК – персональный компьютер; ЭП – элемент Пельтье; ТП – термопара; ММ – мультиметр; ТС – термовоздушная станция

Для считывания ГДС перекрывался один из оптических затворов установки (ОЗ-1, см. рис. 1). При этом на выходе ГДС наблюдалась картина дифракции Брэгга с двумя яркими максимумами излучения. Для определения зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) от направления вектора поляризации считывающего излучения (менялось путем вращения поляризатора П, см. рис. 1) измерялся фототок фотодиодов (ФД, см. рис. 1). ДЭ ГДС определяется выражением:

$$\eta(\alpha) = \frac{I_d(\alpha)}{I_d(\alpha) + I_t(\alpha)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $\eta(\alpha)$ – дифракционная эффективность; α – угол поворота поляризатора (П, см. рис. 1), соответствует изменению азимута поляризации считывающего излучения; $I_d(\alpha)$ – интенсивность дифрагировавшего пучка; $I_t(\alpha)$ – интенсивность прошедшего пучка.

Угол поворота поляризатора изменялся от 0 до 360° с шагом в 5° , данное действие повторялось до 4 раз. В каждом образце было сформировано несколько дифракционных структур.

Результаты экспериментов по исследованию зависимости ДЭ от угла поворота поляризатора при комнатной температуре ($22\text{--}24^\circ\text{C}$) приведены на рис. 2–5.

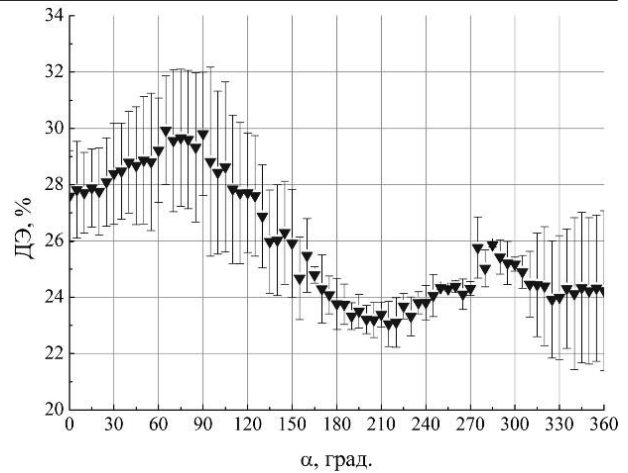


Рис. 2. Зависимость дифракционной эффективности от угла поворота поляризатора для образца с 25% ЖК, структура №1

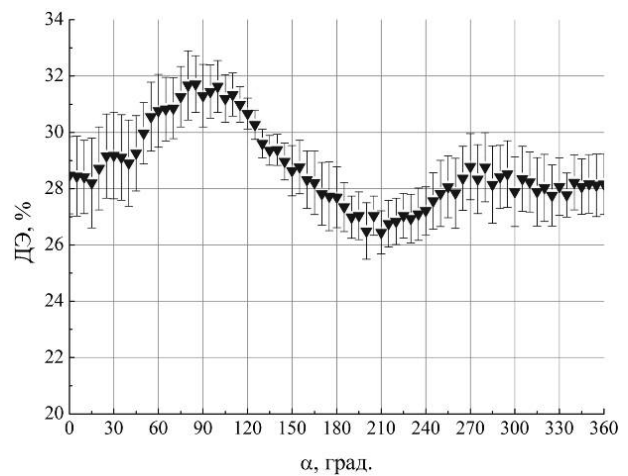


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности от угла поворота поляризатора для образца с 25% ЖК, структура №2

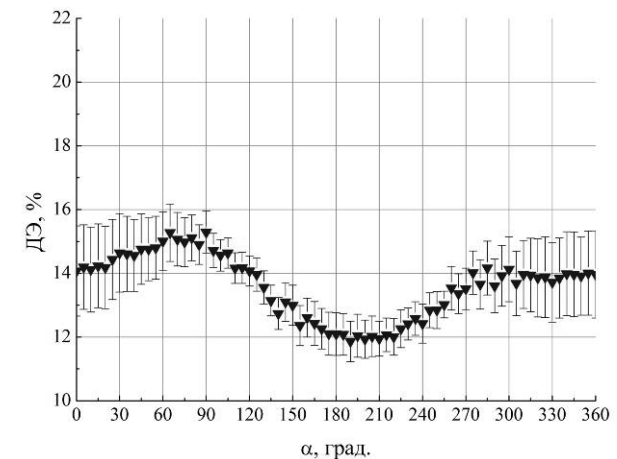


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности от угла поворота поляризатора для образца с 25% ЖК, структура №3

Различие значений дифракционной эффективности различных ГДС в образце можно объяснить неоднородностью нанесенной композиции. Наличие локальных минимумов и максимумов зависимости (характерное для всех экспериментов на каждой

структуре), вероятно, обусловлено формированием в образце каплей ЖК аналогично [12], а также отклонением ориентации молекул ЖК в каплях от преимущественного направления.

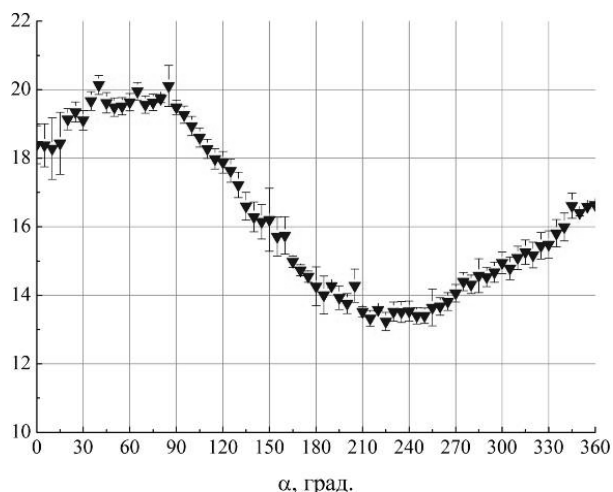


Рис. 5. Зависимость дифракционной эффективности от угла поворота поляризатора для образца с 30% ЖК, структура №1

Далее были проведены исследования температурной зависимости ДЭ.

С помощью элемента Пельтье (ЭП, см. рис. 1) происходило нагревание большой области образца, температура контролировалась при помощи термпары (ТП), подключенной к мультиметру (ММ).

Термовоздушная станция (ТС) использовалась для локального нагревания образца в точке, где формировалась дифракционная структура.

Была исследована дифракционная эффективность ГДС при воздействии температуры на образец с концентрацией молекул ЖК 30% мас.

В первом эксперименте образец до начала записи был нагрет до 70 °С. Затем без снижения температуры в нем была сформирована ГДС. При проведении считывания структуры дифракционная эффективность была близка к нулю (порядка 1–0,5%).

Во втором эксперименте температура была снижена до 50–40 °С. Дифракционная эффективность так же была близка к нулю (порядка 1–0,5%).

Далее запись структуры производилась при комнатной температуре (22–24 °С). После завершения формирования ГДС образец нагревался до 40 °С. При нагревании фототок, соответствующий дифрагированному пучку, начал уменьшаться, дифракционная эффективность уменьшилась относительно показаний без нагрева до 2–4%.

Дифракционная эффективность ГДС, записанной в фотополимерной композиции, не содержащей жидких кристаллов, при нагреве оставалась такой же, как и без нагрева, и составляла 20–30%.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, увеличение массовой доли ЖК в образце с 25 до 30% уменьшает дифракционную эффективность ГДС. Данный эффект наблюдался ранее в [1].

Во-вторых, эффективность записанной дифракционной структуры зависит от поляризации считывающего излучения, что говорит об анизотропии оптических свойств материала. Из зависимостей на рис. 2–5 видно, что в образце с массовой долей ЖК 25% имеется два максимума ДЭ в области 90 и 270°, а также два минимума в области 0 и 180°. В образце с 30% долей ЖК наблюдается максимум ДЭ только в области 90° и минимум в области 250–270°. Различия в азимутах поляризации, соответствующих минимумам и максимумам дифракционной эффективности (см. рис. 2–5), вероятно, обусловлено различием ориентации каплей ЖК и соответственно оптической оси материала в двух исследуемых образцах. Результаты соответствуют полученным ранее другими авторами для других композиций [16, 17].

В-третьих, было показано, что разработанная фотополимерная композиция, содержащая ЖК, меняет свои свойства при повышении температуры во время процесса записи, что приводит к снижению дифракционной эффективности, в отличие от результатов [15]. С другой стороны, в фотополимерной композиции, не содержащей ЖК, структура формируется и при нагреве образца. То есть температурную чувствительность композиции обуславливает именно наличие жидкого кристалла. При этом при нагреве образца после завершения процесса записи его ДЭ снижается. Аналогичные результаты были получены в [18] для поляризационных дифракционных структур.

Таким образом, описанная фотополимеризующая композиция позволяет голографически формировать дифракционные структуры. При этом, наличие в ней молекул термотропного нематического жидкого кристалла обуславливает анизотропию ее оптических свойств, а также их температурную зависимость.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки Российской Федерации в рамках Госзадания на 2017 г. (проект № 3.1110.2017/4.6), а также при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-32-50082).

Литература

1. Семкин А.О. Экспериментальное исследование формирования и считывания неоднородных голографических ФПМ-ЖК структур / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович, Е.В. Васильев, В.В. Шелковников // Ученые записки физического факультета Московского университета. – 2015. – № 4. – С. 154304-1–154304-3.
2. Семкин А.О. Голографическое формирование поляризационных фотонных структур в капсулированных полимером жидких кристаллах / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович, Д.И. Малышева и др. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 11/3. – С. 35–39.
3. Семкин А.О. Дифракция света на фотонных ФПМ-ЖК структурах при воздействии плавно пространственно неоднородного электрического поля / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович, К.В. Волченко и др. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 11/3. – С. 88–91.
4. Семкин, А.О. Дифракция световых пучков на голографических поляризационных фотонных ФПМ-ЖК

структурах при воздействии пространственно неоднородного электрического поля / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, №8/3. – С. 239–244

5. Семкин А.О. Голографическое формирование неоднородных дифракционных структур в ФПМ-ЖК с учетом фотополимеризационно-диффузионного и поляризационного механизмов записи / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович // Электронные средства и системы управления: матер. докладов X Междунар. науч.-практ. конф. 12–14 ноября 2014 г. – Томск, 2014. – Ч. 1. – С. 180–189.

6. Ноздреватых Б.Ф. Дифракционные характеристики пропускающих неоднородных фотонных структур в фотополимеризующихся жидкокристаллических композиционных материалах / Б.Ф. Ноздреватых, С.В. Устюжанин, С.Н. Шарангович // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 109–117.

7. Семкин А.О. Взаимодействие световых пучков с голографическими фотонными ФПМ-ЖК структурами при неоднородном управляющем электрическом поле / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович // Изв. высш. учеб. завед. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 9/2. – С. 21–24.

8. Семкин А.О. Дифракционные характеристики фотонных ФПМ-ЖК-структур при сложной дискретной пространственной неоднородности управляющего поля / А.О. Семкин, С.Н. Шарангович // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 1 (31). – С. 136–142.

9. Mensov S.N. Waveguiding elements optical formation at light beams interaction in transparent photopolymerizable compositions / S.N. Mensov, Yu.V. Polushtaytsev // CAOL–2005, 12–17 September 2005, Yalta, Crimea, Ukraine. – PP. 137–139.

10. Менсов С.Н. Оптическое формирование стабильных волноведущих структур из фотополимеризующейся композиции с неполимеризующимся компонентом / С.Н. Менсов, Ю.В. Полуштайцев // Квантовая электроника. – 2012. – №6. – С. 545–550.

11. Hybrid Photonic Integration on a Polymer Platform / Z. Zhang, D. Felipe, V. Katopodis et al. // Photonics. – 2015. – №2. – PP. 1005–1026.

12. Liquid crystal photopolymer composite with a periodic structure / G.M. Zharkova, I.V. Samsonova, S.A. Streltsov et al. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2004. – Vol. 40, № 1. – PP. 76–81.

13. Sutherland R.L. Polarization and switching properties of holographic polymer dispersed liquid-crystal grating. I. Theoretical model // JOSA B. – 2002. – Vol. 19, № 12. – PP. 2995–3003.

14. Mass transfer processes induced by inhomogeneous photo-polymerization in a multicomponent medium / R. Caputo, A.V. Sukhov, N.V. Tabirian et al. // Chemical Physics. – 2001. – № 217. – PP. 323–335.

15. Abbate G. Dynamical electro-optical characterization of polycrystalline gratings / G. Abbate, A. Marino, F. Vita // Acta physica polonica A. – 2003. – Vol. 103, № 2–3. – PP. 177–186.

16. Жаркова Г.М. Поляризационная зависимость дифракционной эффективности голографически сформированных полимерно-жидкокристаллических объемных решеток / Г.М. Жаркова, И.В. Самсонова, В.М. Хачатурян // Жидкие кристаллы и их практическое использование. – 2008. – №2(24). – С. 46–53.

17. Sutherland R.L. Polarization and switching properties of holographic polymer dispersed liquid-crystal grating. II. Experimental investigation // JOSA B. – 2002. – Vol. 19, № 12. – PP. 3004–3012.

18. Влияние температуры на свойства поляризационных голографических решеток, сформированных в жидкокристаллических композитах / Г.М. Жаркова, А.П. Петров, С.А. Стрельцов, В.М. Хачатурян // Автометрия. – 2012. – Т. 48, №4. – С. 55–59.

Семкин Артем Олегович

Ассистент каф. сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники (СВЧКР) ТУСУРа
Тел.: +7-923-427-59-95
Эл. почта: a.o.semkin@gmail.com

Шарангович Сергей Николаевич

Канд. физ.-мат. наук, зав. каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7 (382-2) 41-36-43
Эл. почта: shr@tusur.ru

Васильев Евгений Владимирович

Канд. хим. наук, с.н.с.
лаб. органических светочувствительных материалов
Новосибирского института органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН
Тел.: +7 (383-3) 30-96-42, доп. 4-08
Эл. почта: johnmail@ngs.ru

Викулина Ирина Андреевна

Студентка каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7-952-161-82-24
Эл. почта: irinavickulina@yandex.ru

Гусаченко Ксения Олеговна

Студентка каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7-913-888-41-13
Эл. почта: ksusha-27.96@mail.ru

Дудник Дмитрий Игоревич

Студент каф. СВЧКР ТУСУРа
Тел.: +7-923-412-00-96
Эл. почта: drinza10@gmail.com

Semkin A.O., Sharangovich S.N., Vasilyev E.V.,
Vikulina I.A., Gusachenko K.O., Dudnik D.I.

Experimental investigations of holographic diffraction PDLC structures

In this work we investigated the diffraction efficiency of holographic structures formed in polymer-dispersed liquid crystals and its dependence on temperature and polarity of the reading light. Liquid crystal's concentration in investigated samples was 25 and 30% wt. We have shown the anisotropy of optical properties and the ability to control the diffraction efficiency by heating the sample. Diffraction structures was formed by He-Ne laser with wavelength 633 nm.

Keywords: PDLC, diffraction efficiency, diffraction grating, polarity, photopolymer, liquid crystal, diffraction.