

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

---

2007, том 43, № 5

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ,  
ЭЛЕМЕНТЫ И СИСТЕМЫ**

УДК 532.783 : 535.5

**УГЛОВАЯ СЕЛЕКТИВНОСТЬ  
ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК, СФОРМИРОВАННЫХ  
В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ\***

**Г. М. Жаркова, А. П. Петров, И. В. Самсонова,  
С. А. Стрельцов, В. М. Хачатурян**

*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск  
E-mail: Zharkova@itam.nsc.ru*

Теоретически и экспериментально исследована угловая селективность объемных фазовых пропускающих дифракционных решеток, сформированных в жидкокристаллическом композите и работающих для  $s$ - и  $p$ -поляризованного света в отсутствие внешнего электрического поля.

**Введение.** Дифракционные решетки, сформированные на основе диспергированного в полимерной матрице нематического жидкого кристалла (НЖК), могут применяться в волоконной и интегральной оптике, оптических компьютерах, сенсорных системах и системах голографической памяти [1–3]. Они представляют собой упорядоченную структуру в виде чередующихся полос, обогащенных либо капсулами НЖК, либо полимером, что приводит к периодической модуляции показателя преломления. Формируется такая структура в результате облучения исходной фотополимерной композиции светом с пространственно-периодическим распределением интенсивности [4]. Фотополимерная композиция, как правило, состоит из НЖК, мономера (предполимера), связующего компонента, фотоиницирующей системы, включающей краситель с максимальной чувствительностью в видимой области спектра, и соинициатора.

Была исследована эффективность подобных дифракционных решеток [4, 5], которая чувствительна к отклонению от условий записи (угловая и спектральная селективность).

Явление угловой селективности объемных фазовых решеток хорошо известно и широко используется в голографии [6–8]. Если при восстановлении

---

\* Работа выполнена при поддержке Программы Президиума РАН № 8 («Разработка методов получения новых химических веществ и создание новых материалов») и интеграционного проекта СО РАН № 17 («Новые технологии трехмерной голографической памяти»).

голограммы угол падения считывающего пучка света отличается от угла Брэгга (от условий записи), то это приводит к изменению дифракционной эффективности.

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное исследования угловой селективности объемных фазовых решеток, сформированных в жидкокристаллических (ЖК) композитах в отсутствие внешнего электрического поля.

**Теоретическая модель.** Известно, что если массовая доля мономера в таких материалах достаточно высокая (больше 0,2), то решетки, сформированные в ЖК-композите, можно считать объемными фазовыми решетками и их дифракционные свойства описывать в рамках теории дифракции Когельника [9].

Согласно этой теории дифракционная эффективность объемных фазовых ненаклонных решеток (non-slanted grating), работающих на пропускание, для *s*- и *p*-поляризованного света с учетом поглощения может быть определена следующим образом [10]:

$$\eta_s = \exp(-2\alpha d) \sin^2(v_s^2 + \xi^2)^{1/2} / (1 + \xi^2 / v_s^2),$$

$$\eta_p = \exp(-2\alpha d) \sin^2(v_p^2 + \xi^2)^{1/2} / (1 + \xi^2 / v_p^2),$$

где  $v_s = (\pi n_1 d) / (\lambda \cos \theta)$ ;  $v_p = (\pi n_1 d \cos(2\theta_B)) / (\lambda \cos \theta)$ ;  $d$  – толщина образца;  $\alpha$  – коэффициент поглощения, учитывающий остаточное поглощение, обусловленное наличием устойчивой формы красителя исходной фотополимерной композиции, и поглощение, связанное со структурой композита;  $n_1$  – амплитуда модуляции показателя преломления, которая определяется в соответствии с [11] и с учетом синусоидального профиля решетки:

$$n_1 = |n_A - n_B| / 2$$

(здесь  $n_A$  – показатель преломления областей, не содержащих ЖК-капсулы;  $n_B$  – показатель преломления областей с низким содержанием полимера и высоким содержанием ЖК-капсул:

$$n_B = \phi \langle n_{lc} \rangle + (1 - \phi) n_A,$$

где  $\langle n_{lc} \rangle = ((n_e^2 + 2n_o^2) / 3)^{1/2}$  – средний показатель преломления жидкого кристалла;  $n_o, n_e$  – обыкновенный и необыкновенный показатели преломления ЖК соответственно;  $\phi$  – доля, занимаемая ЖК-капсулами);

$$\xi = (\pi n d \Delta \theta \sin(2\theta_B)) / (\lambda \cos \theta)$$

(здесь  $n$  – средний показатель преломления предполимерной смеси;  $\Delta \theta = \theta - \theta_B$  – отклонение от угла Брэгга;  $\theta$  – угол падения;  $\theta_B$  – угол Брэгга).

**Экспериментальные исследования.** При формировании исследуемых решеток в качестве предполимера использовался многофункциональный акрилатный мономер, а в качестве НЖК – смесь 1282 ( $n_o = 1,52, n_e = 1,69$ ). Кроме того, исходная композиция включала N-винилпирролидон как связующий компонент и растворитель для красителя и соинициатора. Красителем был взят метиленовый голубой, обеспечивающий максимальную светочув-

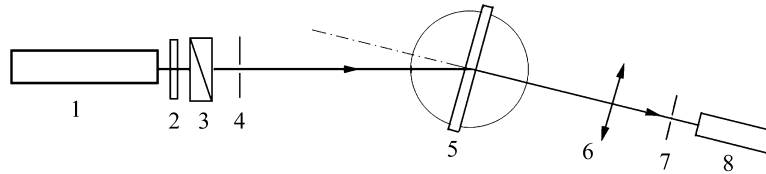


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования угловой селективности объемных пропускающих решеток: 1 – He–Ne-лазер ( $\lambda = 632,8$  нм), 2 –  $\lambda/2$ -пластинка, 3 – поляризатор, 4 – диафрагма, 5 – поворотный столик с исследуемым образцом, 6 – объектив, 7 – апертурная диафрагма, 8 – фотоприемник

ствительность в диапазоне длин волн 650–680 нм. Массовая доля НЖК составляла 0,37 (37%), а красителя – 0,003 (0,3%). Толщина образцов 10 и 58 мкм. На поверхностях образцов, между которыми формируется дифракционная решетка, нанесены слои поливинилацетата для ориентации НЖК. Источником излучения при записи решеток служил полупроводниковый лазер с длиной волны 658 нм ( $p$ -поляризованный свет). Период решеток  $\Lambda \sim 1$  мкм. Оценки показывают, что для  $n \sim 1,6$  и рассматриваемого диапазона толщин образцов параметр Клейна, определяемый как  $Q = (2\pi\lambda d)/(n\Lambda^2)$  [12], соответствует объемным решеткам.

Схема экспериментальной установки для исследования угловой селективности представлена на рис. 1.

Дифракционная эффективность определялась как отношение интенсивности дифрагировавшего света к интенсивности падающего. Образец устанавливался под углом Брэгга, при этом интенсивность дифрагировавшего излучения была максимальной. Исследование селективных свойств осуществлялось при вращении образца и измерении интенсивности дифрагировавшего пучка.

Расчетные и экспериментальные зависимости дифракционной эффективности решеток от угла падения считывающего пучка для  $s$ - и  $p$ -поляризации и разных толщин композита показаны на рис. 2 и 3. Для всех образцов угол Брэгга составлял  $14^\circ$ .

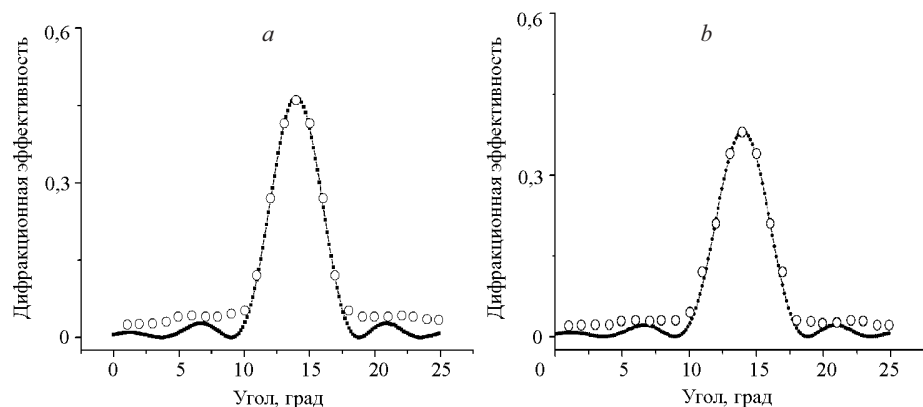


Рис. 2. Графики угловой селективности объемных фазовых решеток толщиной 10 мкм: для  $s$ - (а) и  $p$ -поляризованного света (б). Параметры расчета:  $\alpha = 0,0043$  мкм $^{-1}$ ,  $n_1 = 0,0163$ . Квадраты – расчет, кружки – эксперимент

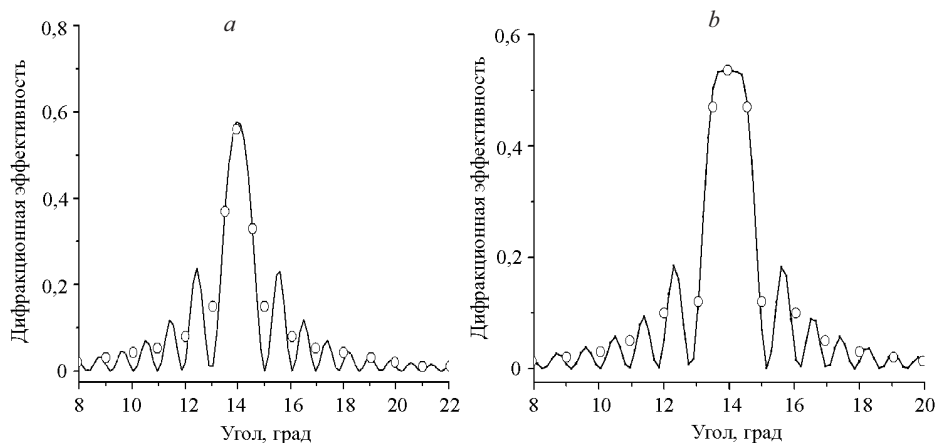


Рис. 3. Графики угловой селективности объемных фазовых решеток толщиной 58 мкм: для  $s$ - (а) и  $p$ -поляризованного света (б). Параметры расчета:  $\alpha = 0,0043 \text{ мкм}^{-1}$ ,  $n_1 = 0,0162$ . Сплошная линия – расчет, кружки – эксперимент

Видно, что теоретические зависимости хорошо согласуются с экспериментом для углов, близких к углу Брэгга, и заметно отличаются вне центрального максимума. При угле падения, равном углу Брэгга, дифракционная эффективность для  $s$ -поляризованного света оказалась больше, чем для  $p$ -поляризованного для обеих толщин. При угле Брэгга отношение  $\eta_s/\eta_p$  для толщины 10 мкм составило величину 1,2, а для  $d = 58 \text{ мкм}$   $\eta_s/\eta_p = 1,06$ . Однако известно, что возможна иная ситуация, так как для таких решеток соотношение между  $\eta_s$  и  $\eta_p$  зависит от толщины образца и амплитуды модуляции показателя преломления [11].

Экспериментально угловая селективность определялась как полуширина дифракционного максимума на его полувисоте. Для решеток толщиной 10 мкм она составляет около  $1,9^\circ$  для  $p$ -поляризации и  $1,7^\circ$  для  $s$ -поляризации, а для решеток толщиной 58 мкм – около  $0,8^\circ$  для  $p$ -поляризации и  $0,6^\circ$  для  $s$ -поляризации. Сглаженные вторичные максимумы и ненулевая интенсивность в минимумах свидетельствуют о неоднородности профиля амплитуды модуляции показателя преломления исследуемых решеток по глубине [13, 14]. Возможно, это связано с различной скоростью фотополимеризации при формировании решеток, поскольку исходная фотополимерная композиция, состоящая из нескольких ингредиентов, может быть неоднородной по глубине, а также с морфологией ЖК-композиита.

**Заключение.** Теоретически и экспериментально исследована угловая селективность объемных фазовых ненаклонных пропускающих дифракционных решеток, сформированных в жидкокристаллическом композите. Предлагаемая модель на основе теории дифракции Когельника хорошо описывает эксперимент с учетом поглощения для углов падения, близких к углу Брэгга. Контур экспериментальной зависимости дифракционной эффективности решеток от угла падения зондирующего пучка указывает на неоднородность записи таких решеток по глубине.

Исследуемые дифракционные решетки могут применяться в информационных фототехнологиях и для изготовления голографических оптических элементов с управляемой дифракционной эффективностью.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Qian S., Colegrove J., Liu P.-Y., Quan X.** Organic-based electrically switchable Bragg gratings and their applications in photonics and telecommunications // Proc. SPIE. 2001. **4279**. P. 69.
2. **Jazbinsek M., Olenik I. D., Zgonik M. et al.** Characterization of holographic polymer dispersed liquid crystal transmission gratings // Journ. Appl. Phys. 2001. **90**. P. 3831.
3. **Sutherland R. L., Tondiglia V. P., Natarajan L. V., Bunning T. J.** Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) // Annu. Rev. Mater. Sci. 2000. **30**. P. 83.
4. **Жаркова Г. М., Самсонова И. В., Стрельцов С. А. и др.** Фотополимерно-жидкокристаллический композит с пространственно-периодической структурой // Автометрия. 2004. **40**, № 1. С. 89.
5. **Zharkova G., Samsonova I., Streltsov S. et al.** Electro-optical characterization of switchable Bragg gratings based on nematic liquid crystal-photopolymer composites with spatially ordered structure // Microelectron. Eng. 2005. **81**. P. 281.
6. **Rambottom A. P., Sergeant S. A.** Holography for automotive head-up displays // Proc. SPIE. 1992. **1667**. P. 146.
7. **Mok F.** Angle-multiplexed storage of 5000 holograms in lithium niobate // Opt. Lett. 1993. **18**. P. 915.
8. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell Syst. Techn. Journ. 1969. **48**. P. 2909.
9. **Holmes M. E., Malcuit M. S.** Controlling the anisotropy of holographic polymer-dispersed liquid crystal gratings // Phys. Rev. E. 2002. **65**. P. 066603.
10. **Lucchetta D. E., Criante L., Simoni F.** Optical characterization of polymer dispersed liquid crystals for holographic recording // Journ. Appl. Phys. 2003. **93**. P. 9669.
11. **Lu Y., Du F., Wu Sh.-T.** Polarization switch using thick holographic polymer-dispersed liquid crystal grating // Journ. Appl. Phys. 2004. **95**. P. 810.
12. **Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.** Оптическая голография: Пер. с англ. М.: Мир, 1973.
13. **Якимович А. П.** Многослойные объемные голографические решетки // Оптика и спектроскопия. 1980. **49**, вып. 1. С. 158.
14. **Pen E. F., Rodionov M. Yu., Shelkovnikov V. V.** How the inhomogeneity of volume holograms in photopolymer materials affects their selective properties // Journ. Opt. Technol. 2006. **73**. P. 475.

*Поступила в редакцию 28 августа 2006 г.*