

УДК 532.783:535.5

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

**ДИФРАКЦИЯ СВЕТА НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ
РЕШЕТКАХ, ЗАПИСАННЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ
КОМПОЗИТАХ**

**DIFFRACTION OF LIGHT ON POLARIZATION HOLOGRAPHIC GRATINGS
FORMED ON LIQUID CRYSTAL COMPOSITES**

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

Экспериментально исследована дифракционная эффективность поляризационных голографических решёток, записанных с помощью двух плоских волн с ортогональными линейными поляризациями. Получены зависимости дифракционной эффективности от температуры и азимутального угла поляризации пробного пучка. Показана возможность управления дифракционной эффективностью решетки путем изменения поляризации пробного пучка и нагревания.

Ключевые слова: *поляризационная голография, жидкокристаллические композиты, жидкие кристаллы.*

The diffraction effectiveness of polarization holographic gratings, recorded by two plane light waves with orthogonal linear polarization, was experimentally studied. The dependences of diffraction effectiveness on a temperature and azimuthal angle of probe beam polarization were obtained. The capability of diffraction efficiency control by the variation of probe beam polarization and heating was shown.

Key words: *polarization holography, liquid crystal composites, liquid crystals.*

Введение

Поляризационные голографические решётки применяются при создании различных функциональных оптических устройств, таких как модуляторы света, затворы, поляризационные мультиплексоры и демультимплексоры [1 – 7].

Такие решётки записывают в поляризационно-чувствительных материалах: фоторефрактивных кристаллах [8], системах «гость – хозяин» [9 – 11], азополимерах [12 – 13]. Сравнительно недавно появились сообщения о записи поляризационных решёток в жидкокристаллических композитах на основе низкомолекулярных жидких кристаллов, не содержащих азокрасители [7, 14]. Интерес к голографическим поляризационным решеткам связан с относительно простой одноэтапной технологией оптической записи, долговременным хранением поляризационного состояния, а также возможностью управления свойствами решётки электрическим и тепловым полями. Поляризационная селективность, т. е. зависимость дифракционной эффективности и поляризации дифра-

гировавшего света от поляризации падающего на решётку пробного пучка, определяется поляризацией формирующих поляризационную решётку пучков, составом предполимерной композиции, условиями записи. В отличие от работ [7, 14] мы записывали поляризационные решётки в оригинальной композиции на базе акрилатного мономера с помощью сравнительно маломощного полупроводникового лазера. Т. к. на анизотропные свойства нематического жидкого кристалла (НЖК), входящего в состав предполимерной композиции, влияет температура, то вызывают интерес особенности термооптического переключения таких поляризационных голографических решёток, которые до настоящего времени не изучены.

Целью работы было исследование поляризационной селективности решёток, записанных на оригинальной композиции на базе акрилатного мономера с помощью полупроводникового лазера и изучение особенностей термооптического переключения таких поляризационных голографических решёток.

Методика экспериментальных исследований и материалы

Поляризационные решётки записывались световой картиной суперпозиции двух плоских волн равной интенсивности с взаимно ортогональными линейными поляризациями (рис. 1). Волны в одном случае были поляризованы вертикально и горизонтально (s и p), а в другом – под углом $\pm 45^\circ$ (E_{+45} и E_{-45}) к плоскости падения. При наложении волн с взаимно ортогональными поляризациями в плоскости образца (XZ) изменяется лишь состояние поляризации, а модуляция интенсивности отсутствует. Фотография поляризационной голографической решетки (вид в МИН-8), получена методом поляризационной микроскопии, поляризаторы скрещены.

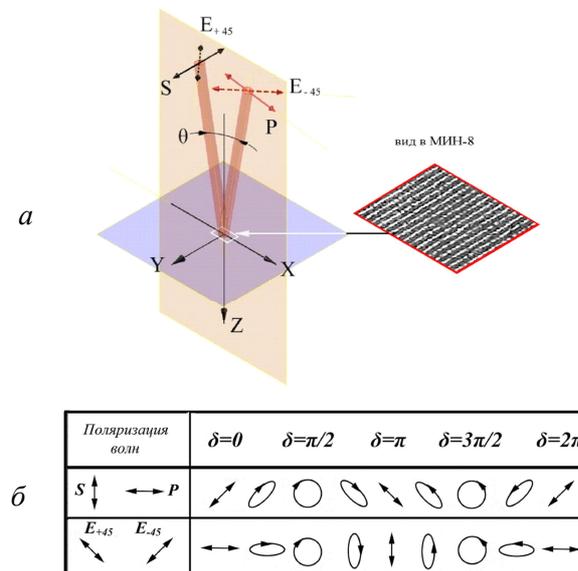


Рис. 1. Сведение двух ортогонально поляризованных лазерных пучков в плоскости образца (а) и соответствующая пространственная модуляция поляризации по оси X (б)

На рис. 2 представлена схема записи поляризационных голографических решеток. Источником излучения служил полупроводниковый лазер с $\lambda = 658$ нм, мощностью 80 мВт. Плотность мощности излучения в плоскости образца составляла 42 мВт/см². Угол схождения интерферирующих световых пучков составлял $\Theta = 2^\circ$. Период полученных решёток был равен 19 мкм, что соответствует пространственной частоте 53 мм⁻¹.

Исходная предполимерная композиция представляла собой смесь акрилатного мономера, НЖК, связующего компонента и фотоинициирующей системы, включающей краситель с максимальной чувствительностью в видимой области спектра и соинициатор. Использовались мономер пентаэритритол тетраакрилат ($n_p = 1,487$), а в качестве НЖК – смесь VL087 ($n_o = 1,527$, $n_e = 1,797$, $\Delta\epsilon > 0$, $T_{NI} = 100$ °C). N-винилпирролидон был как связующий компонент и растворитель для красителя и соинициатора. Красителем служил метиленовый голубой, обеспечивая максимальную светочувствительность в диапазоне длин волн 650 – 680 нм. Концентрация НЖК в предполимерной композиции была равна 25 – 55 мас. %; концентрация красителя – 0,3 мас. %.

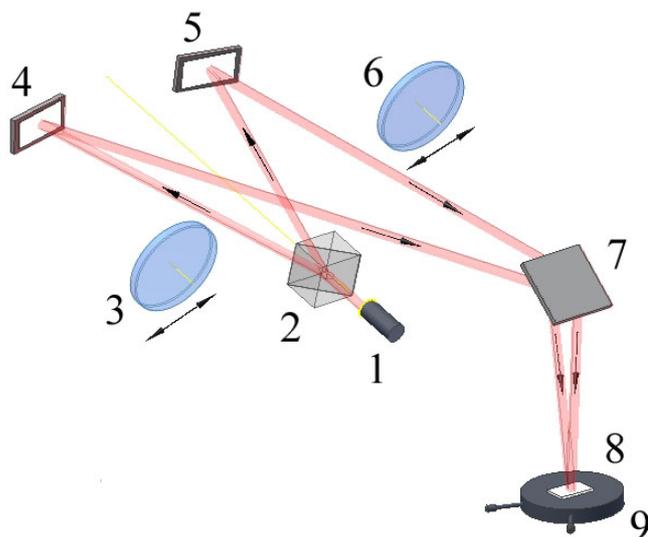


Рис. 2. Схема установки для записи поляризационных голографических решеток.

1 – лазерный диод ML101GR ($\lambda = 658$ нм); 2 – призма Волластона;
3, 6 – пластинки $\lambda/2$; 4, 5, 7 – зеркала; 8 – образец; 9 – столик-термостат

Композиция готовилась в виде гомогенного раствора, который методом полива наносился на одну из стеклянных поверхностей, а затем накрывался второй. Толщина образцов составляла 10 – 50 мкм.

Дифракционная эффективность поляризационных голографических решеток для света дифрагировавшего в ± 1 порядок определялась как $\eta_{\pm 1} = I_{\pm 1} / I_0$, где $I_{\pm 1}$ – интенсивность света, дифрагировавшего в первый порядок, I_0 – интенсивность света, падающего на решётку. Схема экспериментальной установки, собранной на базе гониометра ГС-5 для исследования поляризационной селективности поляризационных решёток, представлена на рис. 3. Пробный пучок был линейно поляризован, направление его поляризации составляло угол α с направлением волнового вектора решётки \mathbf{k} .

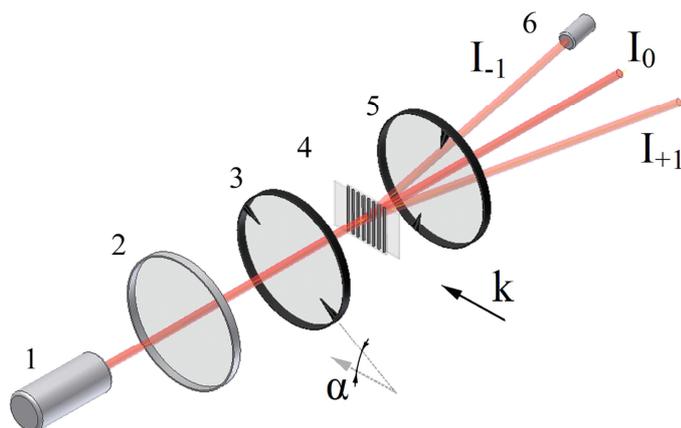


Рис. 3. Схема установки для исследования поляризационной селективности поляризационных решёток:

1 – полупроводниковый лазер ($\lambda=658$ нм); 2 – $\lambda/4$ пластинка; 3 – поляризатор; 4 – исследуемый образец; 5 – анализатор; 6 – фотоприёмник

При исследовании термооптического переключения исследуемый образец помещался в термостатируемую ячейку.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В обоих случаях, и при записи поляризационной решётки s и p-поляризованными пучками, и при записи пучками, поляризованными под углами $\pm 45^\circ$, интенсивности пучков, дифрагировавших в первый порядок I_{+1} и I_{-1} , были одинаковы. На рис. 4 представлена зависимость дифракционной эффективности поляризационной голографической решётки от азимутального угла поляризации пробного пучка α .

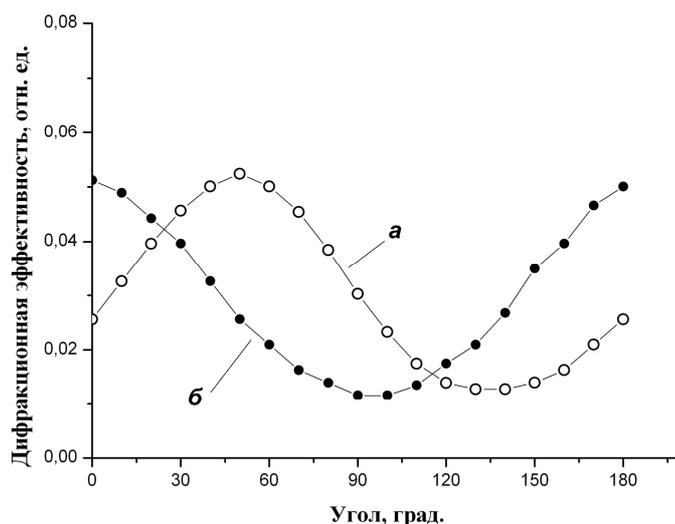


Рис. 4. Зависимость дифракционной эффективности поляризационной голографической решётки от азимутального угла поляризации пробного пучка:

a – решётка записана s- и p-поляризованными пучками; б – решётка записана пучками, поляризованными под углом $\pm 45^\circ$ к плоскости падения

Видно, что записанные решётки обладают поляризационной селективностью, дифракционная эффективность сильно зависит от направления поляризации пробного пучка, падающего на поляризационную решётку. При падении *s*- или *p*-поляризованного пробного пучка на решётку, сформированную также *s*- и *p*-поляризованными пучками, не дифрагировавший пучок (0-й порядок) имел ту же поляризацию, что и падающий, а пучки дифрагировавшие в первый порядок имели ортогональную поляризацию, т. е. если падал пучок с *s*-поляризацией, то пучки дифрагировавшие в первый порядок имели *p*-поляризацию и наоборот. Если на образец падал свет, поляризованный под углами $\pm 45^\circ$, то не дифрагировавший пучок (0-й порядок), а также пучки дифрагировавшие в первый порядок, имели одинаковую поляризацию, совпадающую с поляризацией падающего на образец света.

Для решёток, сформированных пучками, поляризованными под углами $\pm 45^\circ$, при падении пробного пучка, поляризованного под углом $+45^\circ$ или -45° , пучки дифрагировавшие в первый порядок имели ортогональную поляризацию, т. е. -45° и $+45^\circ$ соответственно. Не дифрагировавший пучок (0-й порядок) имел ту же поляризацию, что и падающий. Если на такую решётку падал *s*- или *p*-поляризованный пробный пучок, то не дифрагировавший пучок (0-й порядок), а также пучки, дифрагировавшие в первый порядок, имели одинаковую поляризацию, совпадающую с поляризацией падающего на образец света.

Описанные выше свойства сформированных поляризационных решёток позволяют управлять дифрагировавшим излучением. На рис. 5 представлены фотографии дифракционных картин, полученных при дифракции *s*-поляризованного пробного пучка на решётке, записанной *s*- и *p*-поляризованными пучками. При скрещенных поляризаторе и анализаторе (рис. 3) можно погасить не дифрагировавший пучок (0-й порядок), а когда они параллельны – пучки, дифрагировавшие в первый порядок.

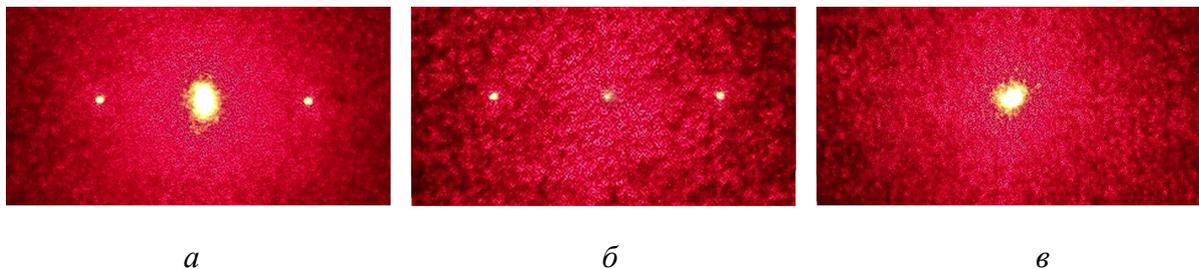


Рис. 5. Фотографии дифракционных картин:
a – без анализатора; *б* – поляризатор и анализатор скрещены; *в* – поляризатор и анализатор параллельны

Управлять дифрагировавшим излучением можно также используя температуру, т. к. физические свойства НЖК чувствительны к этому параметру. Для поляризационных решёток наблюдается термооптическое переключение в состояние, когда решётка «стирается». На рис. 6 представлена зависимость дифракционной эффективности поляризационных решёток от температуры.

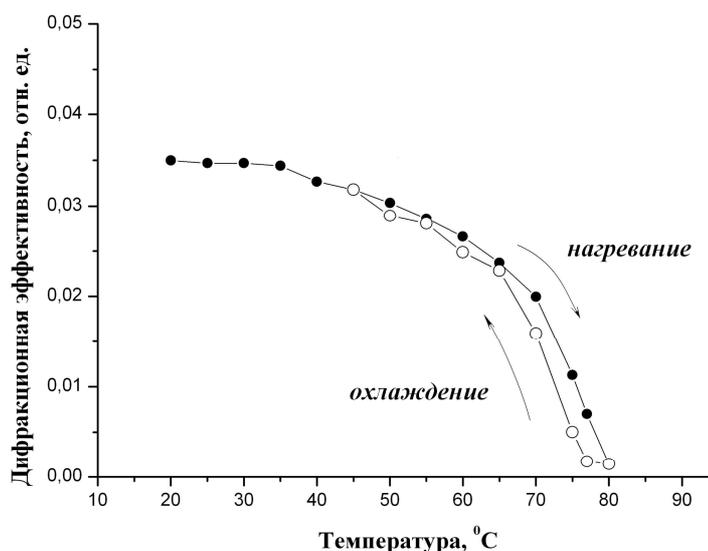


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности поляризационных решёток от температуры. Толщина образца 20 мкм

Из рисунка видно, что с ростом температуры дифракционная эффективность снижается и при ~ 80 °C дифракционные свойства решётки исчезают, т. е. нематический жидкий кристалл переходит в изотропную жидкость. Температура перехода НЖК – изотропная жидкость для исследуемых образцов заметно меньше, чем для чистого НЖК, используемого в исходной композиции, что может быть обусловлено загрязнением НЖК, веществами, входящими в предполимерную композицию, прежде всего полимером. При охлаждении решётки, как видно из рисунка, её дифракционные свойства восстанавливаются с небольшим гистерезисом.

Заключение

Таким образом, в результате одноэтапного процесса записи, с использованием метода поляризационной голографии, в ЖК-композитах сформированы высокоструктурированные поляризационные голографические решётки. Дифракционная эффективность таких решёток зависит от азимутального угла поляризации пробного пучка. Экспериментально установлено, что наибольшая дифракционная эффективность соответствует углу $\alpha=45^\circ$ для решёток, сформированных s- и р-поляризованными пучками и углу 0° – в случае пучков, поляризованных под углами $\pm 45^\circ$. Продемонстрирована возможность «гашения» дифрагировавших пучков. При нагревании решётки до температуры ~ 80 °C её дифракционные свойства исчезают. Экспериментально установлено уменьшение температуры перехода НЖК – изотропная жидкость для исследуемых образцов по сравнению с чистым НЖК, что может быть обусловлено загрязнением НЖК веществами, входящими в предполимерную композицию, прежде всего полимером. При охлаждении решётки её дифракционные свойства восстанавливаются с небольшим гистерезисом.



Список литературы

1. *Habraken S., Michaux O., Renotte Y., Lion Y.* // Opt. Lett. 1995. Vol. 20. P. 2348 – 2350.
2. *Yu W., Konishi T., Hamamoto T., Toyota H. et al.* // Appl. Opt. 2002. Vol. 41. № 1. P. 96 – 100.
3. *Ono H., Takahashi F., Emoto A., Kawatsuki N.* // J. of Appl. Phys. 2005. Vol. 97. P. 053508.
4. *Cipparrone G., Mazzulla A., Palto S. P., Yudin S. G., Blinov L. M.* // Appl. Phys. Lett. 2000. Vol. 77. №14. P. 2106 – 2108.
5. *Wu Y. L., Natansohn A., Rochon P.* // Macromolecules. 2001. Vol. 34. P. 7822.
6. *Bunning T. J., Natarajan L. V., Tondiglia V. P., Sutherland R. L.* // Annu. Rev. Mater. Sci. 2000. Vol. 30. P. 80.
7. *Cipparrone G., Mazzulla A., Russo G.* // Appl. Phys. Lett. 2001. Vol. 78. № 9. P. 1186 – 1188.
8. *Sturman B. I., Goul'kov M. Yu., Odoulov S. G.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1996. Vol. 13. P. 577 – 583.
9. *Khoo I. C.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1991. Vol. 207. P. 317 – 329.
10. *Slussarenko S., Francescangeli O., Simoni F.* // Appl. Phys. Lett. 1997. Vol. 71. P. 3613 – 3615.
11. *Nikolova L., Todorov T.* // Opt. Acta. 1984. Vol. 31. P. 579 – 588.
12. *Naydenova I., Nikolova L., Todorov T. et al.* // J. Opt. Soc. Am. B. 1998. Vol. 15. P. 1257 – 1265.
13. *Lagugne Labarthe F., Rochon P.* // Appl. Phys. Lett. 1999. Vol. 75. P. 1377 – 1379.
14. *Mazzulla A., Pagliusi P., Provenzano C. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. № 13. P. 2505 – 2507.

Поступила в редакцию 15.12.2010 г.

~~~~~  
**G.M.Zharkova, A.P.Petrov, S.A.Streltsov, V.M.Khachatryan**  
***Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Novosibirsk***

**1. Жаркова Галина Михайловна**

**Сл.т. 8-383 330-38-96, д.т. 8-383-330-57-09,**

**[Zharkova@itam.nsc.ru](mailto:Zharkova@itam.nsc.ru)**

**2. Петров Александр Павлович**

**Сл.т. 8-383 330-38-96, д.т. 8-383-330-60-90,**

**[Petrov@itam.nsc.ru](mailto:Petrov@itam.nsc.ru)**

**3. Стрельцов Сергей Анатольевич**

**Сл.т. 8-383 330-38-96, [str64@ngs.ru](mailto:str64@ngs.ru)**

**4. Хачатурян Валентина Михайлов-  
на**

**Сл.т. 8-383 330-38-96, д.т. 8-383-333-37-20,**

**[Khachat@itam.nsc.ru](mailto:Khachat@itam.nsc.ru)**