

УДК 532.783 : 535.5

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СВОЙСТВА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЁТОК, СФОРМИРОВАННЫХ В ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИТАХ*

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

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

Представлена зависимость дифракционной эффективности поляризационных голографических решёток от температуры их формирования. Определён температурный диапазон, соответствующий максимальной дифракционной эффективности таких решёток. Показана возможность термооптического переключения записанных решёток.

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

Введение. Разработка новых функциональных материалов на основе жидких кристаллов, заключённых в полимерную матрицу, обусловлена возможностью управления их оптическими свойствами. Заметный интерес вызывают высокоструктурированные полимерно-жидкокристаллические композиты, сформированные методами голографии. Такие активные среды используются в оптических системах передачи данных в качестве поляризационных мультиплексоров и демультимплексоров, модуляторов и разветвителей поляризованного излучения [1, 2]. Перспективным способом получения этих элементов является поляризационная голография с применением жидкокристаллических композитов (ЖК-композитов). Это относительно простой одноэтапный метод оптической записи дифракционных решёток, обеспечивающий долговременное хранение поляризационного состояния, высокую поляризационную селективность и возможность управления ею тепловым и электрическим полями [3, 4]. Однако дифракционная эффективность таких решёток заметно ниже теоретического предела [5]. Одним из факторов, определяющих дифракционную эффективность, является температура формирования решётки, поскольку процесс фазового разделения при формировании поляризационной решётки чувствителен к температуре, интенсивности света, наличию примесей, растворимости и молекулярной массе исходных материалов. Изменение этих параметров приводит к различной морфологии матрицы, которая определяет оптические свойства конечного элемента.

Цель предлагаемой работы — экспериментальное исследование термооптических свойств поляризационных голографических решёток и влияния температуры формирования таких решёток на их дифракционную эффективность.

Формирование решёток. Исходная предполимерная композиция представляла собой смесь акрилатного мономера, нематического жидкого кристалла (НЖК), связующего компонента и фотоиницирующей системы, включающей краситель с максимальной чувствительностью в видимой области спектра и соинициатор [6]. Поляризационные голографические решётки формировались в тонком слое ЖК-композита в результате разделения

*Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного интеграционного проекта Президиума Сибирского отделения РАН № 36.

фаз НЖК—полимер при фотополимеризации, вызванной световым полем, которое возникает при наложении в плоскости образца двух плоских когерентных волн, поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях. В этом случае модуляция интенсивности света отсутствует, а изменение разности фаз между интерферирующими волнами приводит только к изменению поляризационного состояния результирующего светового поля. В итоге в ЖК-композите после экспонирования формируется решётка с периодически повторяющимися ориентациями молекул НЖК в полимерных капсулах.

Источником излучения при записи поляризационных голографических решёток служил полупроводниковый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 658$ нм и мощностью 80 мВт. В качестве мономера использовался многофункциональный акрилатный мономер, а в качестве НЖК — кристалл VL038 (фирма "Merk", Германия) с параметрами $n_o = 1,527$; $n_e = 1,799$; $\Delta\varepsilon = 16,7$; $\varepsilon_{\perp} = 5,3$; $\varepsilon_{\parallel} = 21,7$; $K_{11} = 13,7 \cdot 10^{-12}$ Н; $K_{33} = 27,7 \cdot 10^{-12}$ Н; $T_{NI} = 100$ °С. Связующим компонентом и растворителем для красителя и соинициатора был выбран N-винилпирролидон. Красителем служил метиленовый голубой, обеспечивающий максимальную светочувствительность в диапазоне длин волн 650–680 нм. Массовая доля НЖК составляла 0,37, а красителя 0,003. Пространственная частота решётки равна 34 мм^{-1} .

Схема записи поляризационных голографических решёток представлена в [6]. Дифракционная эффективность таких решёток определялась отношением интенсивности излучения, дифрагировавшего в первый порядок, к интенсивности излучения, падающего на решётку.

Экспериментальные исследования. Процесс фазового разделения при формировании поляризационной решётки чувствителен к температуре, с ростом которой уменьшается вязкость НЖК и мономера, лучше и быстрее происходит разделение фаз НЖК—полимер, возрастает скорость полимеризации. Кроме того, температура влияет на процесс ориентации НЖК в капсулах.

Зависимость дифракционной эффективности поляризационных голографических решёток от температуры формирования для диапазона от комнатной до температуры перехода НЖК в изотропную жидкость представлена на рис. 1. Видно, что максимальная дифракционная эффективность для выбранной композиции достигается при температурах формирования 35–45 °С. Очевидно, это тот диапазон температур, при котором гармонично протекают процессы полимеризации, разделения фаз НЖК—полимер и ориентации НЖК под действием результирующего поля. При дальнейшем росте температуры эти процессы

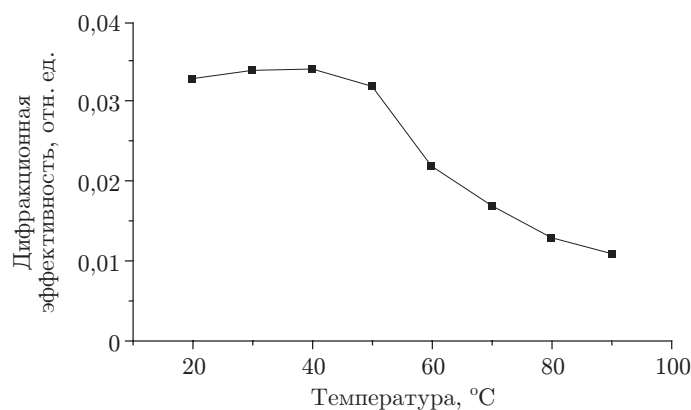


Рис. 1. Зависимость дифракционной эффективности поляризационных решёток от температуры формирования (толщина образца 20 мкм, пространственная частота решётки 34 мм^{-1})

начинают конкурировать между собой, и при температурах выше 50 °С дифракционная эффективность заметно снижается.

Изменяя температуру, можно управлять оптическими свойствами записанных поляризационных голографических решёток, так как в исходной композиции используется термотропный НЖК, а его физические свойства чувствительны к данному параметру. В связи с этим у поляризационных решёток может наблюдаться термооптическое переключение в состояние, когда решётка «стирается». Происходит это потому, что двупреломление Δn с увеличением температуры постепенно уменьшается и при температуре перехода НЖК в изотропное состояние показатели преломления резко падают до значения показателя преломления изотропной фазы, что приводит к исчезновению модуляции показателя преломления НЖК [7]. Зависимость Δn от температуры можно определить следующим образом [8]:

$$\Delta n(T) = \Delta n_0 S = \Delta n_0 \left(1 - \frac{T}{T_{\text{NI}}}\right)^\beta,$$

где T_{NI} — температура перехода нематик—изотропная жидкость; β — материальная константа; $S = (1 - T/T_{\text{NI}})^\beta$ — параметр порядка; Δn_0 — двупреломление в кристаллическом состоянии при $T \rightarrow 0$ К. Значение Δn_0 определялось в соответствии с [8, 9] и для НЖК VL038 принималось равным 0,39 [10].

Рассчитанная зависимость Δn от температуры представлена на рис. 2. Видно, что с ростом температуры Δn постепенно уменьшается и при приближении к температуре перехода нематик—изотропная жидкость (T_{NI}) двупреломление резко падает до нуля.

Экспериментальная зависимость дифракционной эффективности записанных поляризационных решёток от температуры приведена на рис. 3. Из рисунка видно, что с ростом температуры дифракционная эффективность снижается и при ~ 80 °С 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 его веществами, входящими в предполимерную композицию, прежде всего полимером. Этот переход является обратимым, и при охлаждении решётки, как видно из рисунка, её дифракционные свойства восстанавливаются с небольшим гистерезисом, который может быть обусловлен эффектом памяти после воздействия высоких температур.

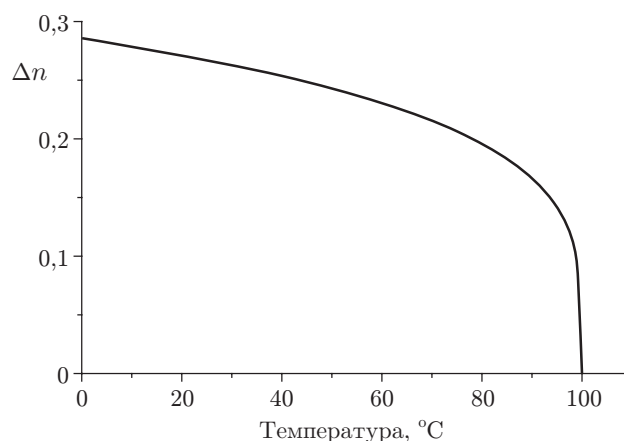


Рис. 2. Зависимость Δn от температуры для НЖК VL038 при $\beta = 0,235$; $\Delta n_0 = 0,39$

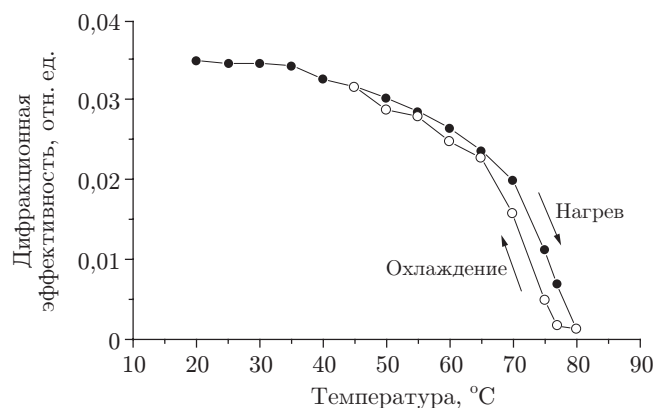


Рис. 3. Зависимость дифракционной эффективности поляризационных решёток от температуры (толщина образца 20 мкм, пространственная частота решётки 34 мм^{-1})

Заключение. В результате одноэтапного процесса записи с использованием метода поляризационной голографии в ЖК-композитах сформированы высокоструктурированные поляризационные голографические решётки, надмолекулярной структурой которых можно управлять. Дифракционная эффективность таких решёток зависит от температуры их формирования. Экспериментально установлено, что решётки с наибольшей дифракционной эффективностью формируются при температурах 30–45 °С, при массовой доле НЖК в предполимерной композиции 0,37.

Для поляризационных голографических решёток характерно термооптическое переключение оптических свойств. При нагревании решётки до температуры $\sim 80 \text{ °С}$ 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 его веществами, входящими в предполимерную композицию, прежде всего полимером. При охлаждении решётки её дифракционные свойства восстанавливаются с небольшим гистерезисом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yu W., Konishi T., Hamamoto T. et al. Polarization-multiplexed diffractive optical elements fabricated by subwavelength structures // Appl. Opt. 2002. **41**, N 1. P. 96–100.
2. Cincotti G. Polarization gratings: design and applications // IEEE Journ. Quant. Electron. 2003. **39**, N 12. P. 1645–1652.
3. Crawford G. P., Eakin J. N., Radcliffe M. D. et al. Liquid-crystal diffraction gratings using polarization holography alignment techniques // Journ. Appl. Phys. 2005. **98**, N 12. P. 123102–123110.
4. Fuh A. Y.-G., Lee C.-R., Cheng C.-T. Fast optical recording of polarization holographic grating based on an azo-dye-doped polymer-ball-type polymer-dispersed liquid crystal film // Jpn. Journ. Appl. Phys. 2003. **42**. P. 4406–4410.
5. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
6. Жаркова Г. М., Петров А. П., Стрельцов С. А., Хачатурян В. М. Влияние режима формирования и состава полимерно-жидкокристаллического композита на дифракционную эффективность голографических поляризационных решёток // Оптический журнал. 2011. **78**, № 7. С. 56–60.

7. **Жаркова Г. М., Сонин А. С.** Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994. 214 с.
8. **Haller I.** Thermodynamic and static properties of liquid crystals // Prog. Solid State Chem. 1975. **10**, Pt. 2. P. 103–118.
9. **Wu S. T.** Birefringence dispersion of liquid crystals // Phys. Rev. A. 1986. **33**, N 2. P. 1270–1274.
10. **Wu S. T., Wu C. S., Warengam M., Ismaili M.** Refractive index dispersions of liquid crystals // Opt. Eng. 1993. **32**, N 8. P. 1775–1780.

Поступила в редакцию 16 февраля 2012 г.
