

УДК 537.87

ЗАВИСИМОСТЬ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГОЛОГРАММ В ФОТОПОЛИМЕРИЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ ОТ СРЕДНЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАПИСЫВАЮЩЕГО ЛАЗЕРА

Р.С. АКОПЯН, А.Л. АСЛАНЯН, А.В. ГАЛСТЯН

Ереванский государственный университет

(Поступила в редакцию 3 февраля 2004 г.)

Решены уравнения полимеризации с учетом диффузии мономера и полимера в рамках нелокальной модели. Теоретически рассмотрена зависимость конечной дифракционной эффективности голографической решетки в фотополимерной пленке при наличии жидкого кристалла от средней интенсивности пишущего лазера. Учет диффузии полимера приводит к качественным изменениям в динамике образования голограмм в фотополимере при малых интенсивностях.

Голографические полимерно-диспергированные жидкие кристаллы (Г-ПДЖК) являются предметом интенсивных исследований благодаря их разнообразным возможным применениям в качестве запоминающих устройств [1-6]. Эти среды обладают механическими свойствами полимеров и контролируемой анизотропностью жидких кристаллов за счет переориентации молекул жидкого кристалла. Кроме того, в отличие от фотографических пленок, фоторезисторов, желатинов и т.п. Г-ПДЖК позволяют наблюдать за записью голограммы в реальном времени. Однако имеется множество необъясненных явлений, происходящих в процессе записи голограмм. В рамках существующей нелокальной диффузионной полимеризационной модели, при малых интенсивностях записывающего лазера, получается большая дифракционная эффективность [7], что не согласуется с предварительными экспериментальными результатами. Существует немало работ, посвященных динамике полимеризации. К примеру, в работах [8,9] рассмотрено локальное диффузионное уравнение, однако пренебрегается диффузией полимера.

В настоящей работе рассматривается трехкомпонентная система: полимер + мономер + жидкий кристалл. Кювета с таким раствором освещается интерференционной картиной двух плоских когерентных волн. В более освещенных местах мономер полимеризуется, и в этих областях концентрация мономера уменьшается. Из менее освещенных областей мономер диффундирует в более освещенные области. Таким образом создаются диффузионные потоки и пространственная модуляция плотности конечного полимера, а

значит, и коэффициента преломления. Нами предлагается модель, в которой учет диффузии полимера приводит к падению дифракционной эффективности при малых интенсивностях. Сущность модели состоит в том, что при малых интенсивностях света полимеризация идет достаточно долго и полимер из освещенных участков успевает диффундировать в мало освещенные участки, тем самым модуляция концентраций убывает.

Диффузионное уравнение нелокальной полимеризации рассматривалось ранее [7]. Однако в указанной работе не учитывается диффузия полимера. Хотя коэффициент диффузии полимера намного меньше и по мере полимеризации убывает быстрее, чем коэффициент диффузии мономера, но при малых интенсивностях записи полимеризация идет долго и даже при малом коэффициенте диффузии полимер успевает диффундировать в темные области и усреднить свою концентрацию. Очевидно, что при этом пренебречь диффузией полимера нельзя. При учете диффузии полимера уравнения для концентрации мономера и полимера можно получить следующим образом. Пусть $U(x,t)$ – концентрация мономера, $N(x,t)$ – концентрация полимера, а $L(x,t)$ – концентрация жидкого кристалла. Если предположить, что рост концентрации полимера $N(x,t)$ прямо пропорционален концентрации мономера, то с учетом диффузии полимера уравнение концентрации полимера примет следующий вид:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_p(x,t) \frac{\partial N(x,t)}{\partial x} \right] + \int_{-\infty}^{+\infty} R(x,x') F(x') U(x',t) dx', \quad (1)$$

где $F(x)$ является коэффициентом пропорциональности, называемым “локальным порядком полимеризации”, $R(x-x') = \exp(-(x-x')^2/2\sigma)/\sqrt{2\pi\sigma}$ есть гауссовская функция, описывающая нелокальность полимеризации, σ – ширина гауссовского распределения. Пространственно-временное изменение концентрации мономера дается стандартным уравнением диффузии, но с дополнительным членом в его правой стороне, представляющим уменьшение концентрации мономера из-за полимеризации:

$$\frac{\partial U(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_m(x,t) \frac{\partial U(x,t)}{\partial x} \right] - \frac{\partial N(x,t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Здесь D_p и D_m – коэффициенты диффузии полимера и мономера. Так как ЖК не влияет на протекание процесса полимеризации, то его распределение можно найти из условия нормировки $U + N + L = 1$. При записи стандартных голограмм кювета освещается интерференционной картиной двух плоских волн, при этом распределение света является периодическим и описывается выражением $I(x) = I_0(1 + V \cos(Kx))$, где ось x направлена вдоль линии пересечения плоскости падения пучков и ПДЖК пленки, I_0 – средняя интенсивность света, V – глубина модуляции, $K = 2\pi/\Lambda$, Λ – период модуляции.

Подставив уравнение (1) в (2), получим дифференциальное уравнение в частных производных для концентрации мономера. Полагая, что косинусоидально-модулированный свет приводит к подобной или кратной модуляции концентрации мономера и полимера, можно $U(x,t)$ и $N(x,t)$ разложить в ряд Фурье и подставить в уравнение для концентрации мономера [7,10]. Расчеты показывают, что Фурье-гармоники выше второго порядка приводят к малым поправкам, следовательно, в Фурье-разложении $U(x,t)$ и $N(x,t)$ можно оставить первые три члена. Сделав подстановку в уравнения для $U(x,t)$ и $N(x,t)$, получим шесть связанных дифференциальных уравнений, которые можно решить численными методами. Очевидно, что конечная концентрация мономера равна нулю. Получив среднюю концентрацию полимера N_0 и модуляцию концентрации N_1 , при помощи формулы Лорентц-Лоренца и условия нормировки можно найти распределение коэффициента преломления конечной решетки [10] и дифракционную эффективность [11-13]. На рис.1 приведены зависимости дифракционной эффективности от средней интенсивности записывающего лазера I_0 . Пунктирная кривая показывает зависимость дифракционной эффективности от I_0 без учета диффузии полимера, а сплошная кривая показывает ту же зависимость с учетом диффузии. Как видно, без учета диффузии полимера при малых интенсивностях эффективность растет, что противоречит физическим представлениям, а при учете диффузии при малых интенсивностях полимер успевает диффундировать в малоосвещенные области и усреднить свою концентрацию, и эффективность начинает убывать. Существует оптимальная интенсивность записи голограмм порядка 20 мВт/см². Качественные эксперименты показывают существование оптимальной интенсивности записи голограмм того же порядка.

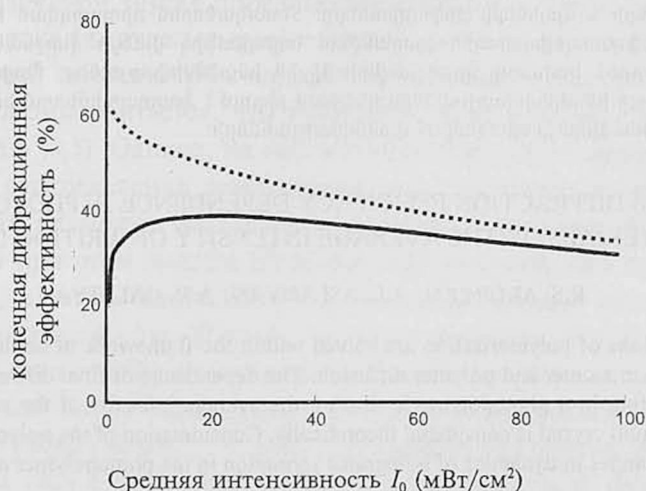


Рис.1. Зависимость дифракционной эффективности от интенсивности пишущего лазера с учетом (сплошная кривая) и без учета (точки) диффузии полимера.

Таким образом, мы решили диффузионное уравнение полимеризации, учитывая диффузию полимера. Рассмотренная нами модель корректно описывает зависимость дифракционной эффективности от интенсивности пишущего лазера. Показано, что при малых интенсивностях получается малая дифракционная эффективность и существует оптимальная интенсивность записи голограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. P. Pilot, Y. Boiko, T. V. Galstian. SPIE, **3635**, 143 (1999).
2. P. Nagtegale, T. V. Galstian. Synthetic Metals, **127**, 85 (2002).
3. Р. Капуто, А. В. Сухов, Ч. Уметон, и др. ЖЭТФ, **118**, 1374 (2000).
4. Ю. Н. Денисюк, Н. М. Ганжерми, Д. Ф. Черных. Письма в ЖТФ, **26**, 25 (2000).
5. Н. М. Ганжерми, Ю. Н. Денисюк, С. П. Конол. Письма в ЖТФ, **26**, 22 (2000).
6. R. L. Sutherland, V. P. Tondiglia, L. V. Natarajan, et al. Opt. Lett., **20**, 1325 (1995).
7. J. T. Sheridan, J. R. Lawrence. J. Opt. Soc. Am., **17**, 1108 (2000).
8. G. Zhao and P. Mouroulis. J. Mod. Opt., **41**, 1939 (1994).
9. I. Aubrecht, M. Miler, I. Koudela. J. Mod. Opt., **45**, 1477 (1998).
10. I. Aubrecht, M. Miler, I. Koudela. J. Mod. Opt., **45**, 1465 (1998).
11. H. Kogelnik. Bell Syst. Tech. J., **48**, 2909 (1969).
12. T. V. Galstian, R. S. Akopyan, A. V. Galstyan, et al. Opt. Comm. (in press).
13. G. Montemezzani and M. Zgonik. Phys. Rev. E, **55**, 1035 (1997).

ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ՄԵՐՎՈՂ ՆՅՈՒԹԵՐՈՒՄ ՀՈԼՈԳՐԱՄՆԵՐԻ
ԴԻՖՐԱԿՑԻՈՆ ԱՐԴՅՈՒՆԱՎԵՏՈՒԹՅԱՆ ԿԱԽՈՒՄԸ
ԳՐՈՂ ԼԱՁԵՐԻ ՄԻՋԻՆ ԻՆՏԵՆՍԻՎՈՒԹՅՈՒՆԻՑ

Ռ.Ս. ՀԱԿՈՔՅԱՆ, Ա.Լ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ, Ա.Վ. ԳԱԼՍՏՅԱՆ

Լուծված են պոլիմերիզացիայի հավասարումները ոչ լոկալ մոդելում, որտեղ հաշվի է առնված մոնոմերի և պոլիմերի դիֆուզիաները: Տեսականորեն դիտարկված է հեղուկ բյուրեղի առկայությամբ ֆոտոպոլիմերային թաղանթում հոլոգրաֆիկ ցանցի վերջնական դիֆրակցիոն արդյունավետության կախումը գրող լազերի միջին ինտենսիվությունից: Պոլիմերի դիֆուզիայի հաշվառումը փոքր ինտենսիվությունների դեպքում բերում է ֆոտոպոլիմերում հոլոգրաֆիկ ցանցի առաջացման դինամիկայի որակական փոփոխությունների:

HOLOGRAM DIFFRACTION EFFICIENCY DEPENDENCE IN PHOTOPOLYMERIC MATERIALS ON THE AVERAGE INTENSITY OF WRITING LASER

R.S. AKOPYAN, A.L. ASLANYAN, A.V. GALSTYAN

The equations of polymerization are solved within the framework of nonlocal model, taking into account the monomer and polymer diffusion. The dependence of final diffraction efficiency of holographic grating in a photopolymeric film on the average intensity of the writing laser in the presence of a liquid crystal is considered theoretically. Consideration of the polymer diffusion leads to qualitative changes in dynamics of holograms formation in the photopolymer at low intensities.