

*Физика*

УДК 532.783; 538.6

А. Л. АСЛАНЯН

### ДИФФУЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ЗАПИСИ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК В ТОЛСТЫХ СЛОЯХ ПОЛИМЕРНО-ДИСПЕРГИРОВАННЫХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Исследована динамика записи голографических решеток в толстых слоях полимерно-диспергированных жидких кристаллов. В отличие от существующих ранее теорий, в настоящей работе учтена диффузия молекул не только мономера, но и полимера в процессе полимеризации. Как показывает наш анализ, из-за диффузионных процессов молекул полимера профиль записанной дифракционной решетки значительно расплывается.

**Введение.** Голографические полимерно-диспергированные жидкие кристаллы (Г-ПДЖК) являются предметом интенсивных исследований благодаря их разнообразным возможным применениям в качестве запоминающих устройств [1–4]. Эти среды обладают механическими свойствами полимеров и управляемой анизотропностью жидких кристаллов за счет переориентации молекул. Кроме того, в отличие от фотографических пленок, фоторезисторов, желатинов и т.д., Г-ПДЖК позволяют наблюдать за записью голограммы в реальном времени [5]. Было предложено много теоретических двумерных моделей для анализа записи дифракционных решеток в тонких слоях, где не учитывалось поглощение света [6–8]. Однако присутствие молекул красителя в растворе приводит к поглощению света и уменьшению его интенсивности вдоль направления распространения. При достаточно толстых слоях ПДЖК такое поглощение существенно и пренебрегать им при теоретическом анализе нельзя [9]. В результате имеющиеся двумерные модели становятся непригодными для толстых голографических решеток. В [9] была предложена трехмерная модель для описания динамики записи голографических решеток в толстых фотополимерных слоях, однако в ней не учитывалась диффузия молекул полимера. В [8] нами показана роль диффузии молекул полимера и обсуждены режимы, при которых она существенна. Например, в ряде случаев (в зависимости от типа полимера) полимеризованные молекулы успевают диффундировать в темные области интерференционной картины, тем самым ухудшая качество записанной дифракционной решетки.

В настоящей работе нами проанализирована динамика записи голографических решеток в толстых слоях с учетом указанного процесса диффузии.

**Теоретическая часть.** Рассмотрим процесс записи дифракционной решетки в трехкомпонентной смеси мономер–краситель–жидкий кристалл. Выберем систему координат следующим образом: пусть ось  $z$  направлена вдоль толщины слоя, а оси  $x$  и  $y$  лежат в поперечной плоскости, причем  $x$  направлена вдоль линии пересечения плоскостей падения света и ПДЖК пленки. При записи стандартных голограмм кювета освещается двумя плоскими волнами, образующими интерференционную картину, в результате распределение света в образце является периодическим. С учетом поглощения распределение интенсивности света вдоль направления  $z$  имеет следующий вид:

$$I(x, z, t) = I_0 [1 + V \cos(K_g x)] e^{-\alpha(t)z}, \quad (1)$$

где  $I_0$  – средняя интенсивность света,  $V$  – глубина модуляции,  $K_g = 2\pi/\Lambda$  – волновое число дифракционной решетки,  $\Lambda$  – период модуляции,  $\alpha(t)$  – зависящий от времени коэффициент поглощения, начальное значение которого известно, если известна физическая толщина и пропускание образца. При формировании дифракционной решетки существенны следующие процессы.

1. В более освещенных местах мономер полимеризуется и его концентрация уменьшается. Из менее освещенных областей мономер диффундирует в более освещенные области, благодаря чему создается пространственная модуляция плотности конечного полимера, а значит, и коэффициента преломления.

2. Немаловажно, что идет также обратный процесс – полимеризованные молекулы диффундируют из освещенных областей в менее освещенные. Очевидно, что такой обратный процесс приводит к ухудшению качества записанной дифракционной решетки.

3. Коэффициент поглощения, обусловленный просветлением молекул красителя в результате их участия в цепной реакции, в зависимости от длительности освещения уменьшается по экспоненциальному закону [9]:

$$\alpha(t) = \alpha_0 e^{-K_\alpha I_0 t}. \quad (2)$$

Здесь  $K_\alpha$  – коэффициент, описывающий скорость расхода красителя.

Запишем диффузионные уравнения, в которых включены слагаемые, учитывающие указанные процессы. Диффузией молекул мономера и полимера вдоль оси  $z$  можно пренебречь, что позволяет диффузионные уравнения записать в следующем виде:

$$\frac{\partial U(x, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_U \frac{\partial U(x, z, t)}{\partial x} \right) - \frac{\partial N(x, z, t)}{\partial t}, \quad (3)$$

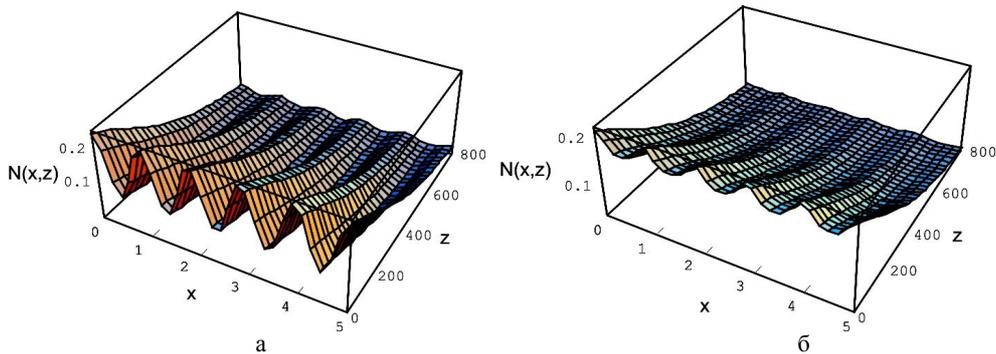
$$\frac{\partial N(x, z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_N \frac{\partial N(x, z, t)}{\partial x} \right) + k_R(t) I(x, z, t) U(x, z, t). \quad (4)$$

Здесь  $U(x, z, t)$ ,  $N(x, z, t)$  – концентрации молекул мономера и полимера соответственно,  $D_U$  и  $D_N$  – коэффициенты диффузии мономера и полимера соответственно,  $k_R(t)$  – коэффициент полимеризации, который со временем уменьшается по закону

$$k_R(t) = k_R \exp(-\varphi I_0 t), \quad (5)$$

где  $\varphi$  – скорость убывания коэффициента полимеризации. Первые члены в правых частях уравнений (3) и (4) описывают диффузионные процессы мономера и полимера соответственно, а последний член в (4) – процесс полимеризации. Молекулы ЖК не влияют на протекание процесса полимеризации и поэтому не включены в диффузионные уравнения, а их концентрацию ( $L$ ) можно найти из условия нормировки  $U + N + L = 1$ . Полагая, что косинусоидально модулированный свет приводит к подобной модуляции концентраций мономера и полимера, можно  $U(x,t)$  и  $N(x,t)$  разложить в ряд Фурье и подставить в уравнение (3) для концентрации мономера. Оценки 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. Окончательно получим систему из шести связанных дифференциальных уравнений, которая позволяет проанализировать основные особенности динамики процесса записи дифракционной решетки.

**Результаты и их обсуждение.** Полученная система уравнений нами решена численными методами. В качестве примера на рисунке показан профиль записанной толстой дифракционной решетки при поглощении света без учета диффузии молекул полимера (а) и с ее учетом (б).



Пространственное распределение концентрации полимера: а) без учета диффузионных процессов молекул полимера, б) с учетом. Использованные параметры:  $V=0,5$ ;  $D_U=0,02 \text{ мкм}^2/\text{с}$ ;  $D_N=0,005 \text{ мкм}^2/\text{с}$ ;  $\alpha_U=0,2$ ;  $\alpha_N=2$ ;  $K_g=0,016 \text{ см}^3/\text{мДж}$ ;  $k_R=6,28 \text{ мкм}^{-1}$ ;  $I_0=5 \text{ мВт}/\text{см}^2$ ;  $\varphi=0,006 \text{ см}^2/\text{мВт} \cdot \text{с}$ ;  $\alpha_0=0,006$ ;  $K_\alpha=0,005 \text{ см}^2/\text{Вт} \cdot \text{с}$

Из рисунка видно, что в толстых слоях из-за поглощения света дифракционная решетка образуется не по всей физической толщине образца. Это означает, что для данного значения коэффициента поглощения света существует оптимальная толщина слоя, в котором может быть записана информация. Как видно из полученных результатов, учет диффузии молекул полимера приводит к ухудшению контраста дифракционной решетки и к уменьшению эффективной оптической толщины. Например, в рассмотренном выше случае оптимальная толщина дифракционной решетки составляет  $\sim 500 \text{ мкм}$  (а), а при учете диффузии молекул полимера она уменьшается до  $\sim 400 \text{ мкм}$  (б).

Резюмируя, можно сказать, что запись голографических решеток с большой дифракционной эффективностью в толстых слоях связана с опре-

деленными трудностями. Как показывает наш анализ, диффузионные процессы молекул полимера значительно ухудшают качество записанной дифракционной решетки. Поэтому для получения качественных толстых голограмм в полимерных материалах необходимо выбрать такие компоненты, в которых вышеуказанные процессы слабые.

*Кафедра оптики*

*Поступила 31.10.2007*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Pilot P., Boiko Y., Galstian T.V. – SPIE, 1999, v. 3635, p. 143.
2. Nagtegaal P., Galstian T.V. – Synthetic Metals, 2002, v. 127, p. 85–87.
3. Gallego S., Neipp C., Ortuno M., Belendez A., Pascual I. – J. of Mod. Opt., 2004, v. 51, № 4, p. 491–503.
4. Sutherland R., Tondiglia V. and Natarajan L. – Appl. Phys. Lett., 1994, v. 64, № 9, p. 1074–1076.
5. Zhao G. and Mouroulis P. – J. of Mod. Opt., 1994, v. 41, № 10, p. 1929–1939.
6. Aubrecht I., Miler M., Koudela I. – J. Mod. Opt., 1998, v. 45, № 7, p. 1465–1477.
7. Sheridan J.T., Neill T.O., Kelly J.V. – J. Opt. Soc. Am. B, 2004, v. 21, № 8, p. 1443–1451.
8. Акопян Р., Асланян А., Галстян А. – Изв. НАН РА, 2004, т. 39, № 5, с. 327–330.
9. Gallego S., Ortuño M., Neipp C., Márquez A., Beléndez A., Pascual I., Kelly J.V., Sheridan J.T. – Optics Express, 2005, v. 13, № 9, p. 3543–3557.

#### Ա. Լ. ԱՍԼԱՆՅԱՆ

### ՊՈԼԻՄԵՐՆԵՐՈՒՄ ԴԻՍՊԵՐՍՎԱԾ ՀԵՂՈՒԿ ԲՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ ՀԱՍՏ ՇԵՐՏԵՐՈՒՄ ԴԻՖՐԱԿՑԻՈՆ ՑԱՆՑԵՐԻ ԳՐԱՌՄԱՆ ԴԻՖՈՒԶԻՈՆ ՄՈԴԵԼԸ

#### Ամփոփում

Ուսումնասիրված է պոլիմերներում դիսպերսված հեղուկ բյուրեղների հաստ շերտերում հոլոգրաֆիկ ցանցերի գրառման դինամիկան: Ի տարբերություն նախկինում գոյություն ունեցող տեսությունների՝ սույն աշխատանքում հաշվի են առնված ինչպես մոնոմերի, այնպես էլ պոլիմերի մոլեկուլների դիֆուզիոն պրոցեսները պոլիմերացման ընթացքում: Ինչպես ցույց է տալիս մեր վերլուծությունը, պոլիմերի մոլեկուլների դիֆուզիոն պրոցեսների հաշվառումը զգալիորեն աղավաղում է գրառված դիֆրակցիոն ցանցի պրոֆիլը:

#### A. L. ASLANYAN

### THE DIFFUSION MODEL FOR THICK DIFFRACTION GRATINGS RECORDED IN POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTALS

#### Summary

Recording dynamics of holographic gratings in polymer dispersed liquid crystals for thick layers has been investigated in this work. In contrast to existing theoretical models, besides the diffusion of monomer molecules, it has been taken into account the diffusion of polymer molecules. Our analysis shows that the profile of recorded diffraction grating becomes fuzzy when considering the diffusion processes of polymer molecules.