

## Временная эволюция дифракционных характеристик голограмм в фотополимерах

В.В.СЫСУЕВ, Е.А.ДОВОЛЬНОВ, С.Н.ШАРАНГОВИЧ

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,  
634050, Томск пр. Ленина, 40, тел. 8(3822) 41-36-43, e-mail shr@svch.rk.tusur.ru

В настоящее время в мире активно ведутся работы по изучению фотополимеров. Для этого были созданы математические модели, основанные на уравнениях Лоренса-Лоренца и нелинейных соотношениях теории фотополимеризации, описывающие процессы записи и считывания голограмм и позволяющие оценить частотную селективность голограмм, записанных плоскими волнами и гауссовыми пучками света [1,2].

Эти модели содержат ряд параметров, таких, как время полимеризации, время диффузии мономера, максимальное приращение показателя преломления и другие, численное значение которых неизвестно. По имеющимся результатам экспериментов, полученным в других лабораториях, определить эти параметры оказалось невозможно из-за недостатка данных.

В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований кинетики записи высокоэффективных голограмм в фотополимерных материалах и их сопоставление с ранее развитой теоретической моделью. Пространственно-временное распределение амплитуды записываемой решетки показателя преломления:

$$n_1(\tau) = n_{1p}(\tau) + n_{1i}(\tau), \quad (1)$$

где первое слагаемое  $n_{1p}$  дает прямой вклад в амплитуду решетки реакции полимеризации, тогда как второе  $n_{1i}$  - обусловлено вытеснением мономером инертной компоненты и пропорционально  $\delta n_i$

$$n_{1p}(\tau) = \delta n_p \left\{ f(\tau) + \int_0^{\tau_y} b \exp \left[ -s \left\{ 1 - (1 + 2\tau'/\pi)^{-2} \right\} \right] f(\tau') d\tau' \right\}, \quad (2)$$

$$n_{1i}(\tau) = \delta n_i \int_0^{\tau_y} b \exp \left[ -s \left\{ 1 - (1 + 2\tau'/\pi)^{-2} \right\} \right] f(\tau') d\tau', \quad (3)$$

$$f(\tau) = \frac{8}{3\pi} \frac{1}{(1 + 2\tau/\pi)^{14/5}} \int_0^{\tau} \frac{d\tau'}{(1 + 2\tau'/\pi)^{1/5}} \exp \left[ - \int_{\tau'}^{\tau} b d\tau'' \right]. \quad (4)$$

Отметим, что при малых  $\tau \ll 1$  величина  $\delta n_p$  будет

$$n_{1p} = \frac{8}{3\pi} \delta n_p \tau + \frac{4}{\pi^2} \left[ \frac{\pi}{3} b \delta n_i - \frac{58}{15} \delta n_p \right] \tau^2, \quad (5)$$

тогда как  $n_{1i}$  является квадратичной функцией по  $\tau$ . В области  $\tau \gg 1$  временные зависимости  $n_{1p}$  и  $n_{1i}$  совпадают. Амплитуда решетки в стационарном режиме ( $\tau \rightarrow \infty$ ) будет

Исследования проводились на автоматизированном стенде, сопряженном с ЭВМ и позволяющем записывать голограммы под различными углами, а также исследовать изменение их дифракционных характеристик в процессе записи. Экспериментальная установка состояла из следующих частей: одномодового Ge-Ne лазера типа ЛНГ-207 мощностью 1 мВт, двух затворов, интерферометра, поворотного стола, узла крепления образца с образцом фотополимера. Запись проводилась двумя пучками лазера, под различными углами (10, 20, 30, 40 градусов). Измерения для каждого угла записи проводились в шести образцах фотополимера, предоставленных ИОХ СО АН РФ (г. Новосибирск). После исследований образцы с записью были убраны на хранение.

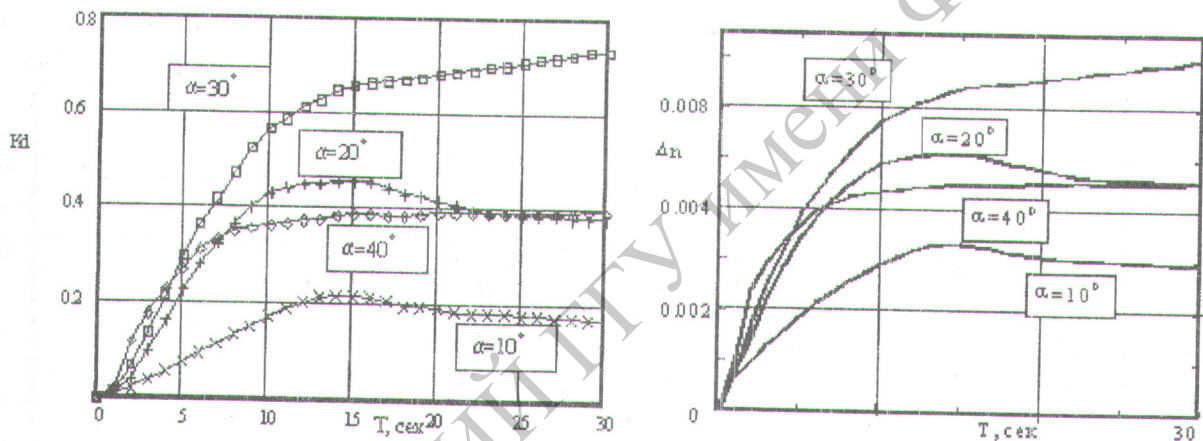


Рис. 1. Динамика коэффициента дифракции  $K_d$  (экспериментальные данные) и амплитуды решетки показателя преломления  $\Delta n$  при разных углах записи.

Графики динамики получены из графиков динамики коэффициента эффективности дифракции  $K_d$  путем пересчета по формуле Когельника. Систематическая погрешность состояла из ошибки 16-разрядного АЦП плюс ошибка шкалы измерения. Случайная ошибка измерений определялась для 6 опытов при коэффициенте Стьюдента  $t = 3$  и доверительной вероятности  $\alpha = 0.96$ . Суммарная относительная погрешность измерений составила 5.2%. При малых эффективностях дифракции (менее 10%) имеется возможность получить параметры математической модели в первом приближении, как это показано в [1]. Полученные результаты приведены в таблице 1 ( $T_p$  - характеристическое время полимеризации,  $D_m$  - коэффициент диффузии,  $\delta n_p$  вклад в  $\Delta n$  за счет полимеризации и  $\delta n_i$  - за счет вытеснения инертной компоненты мономером).

Таблица 1

$\alpha$ , угол	$2 \delta n_p$	$\delta n_{st}$	$T_p$	$b_1$	$b$	$\delta n_i$	$T_m$ , сек	$D_m$
10 °	$2 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-3}$	21.33	-	-	-	-	-
20 °	$2 \times 10^{-2}$	$4.56 \times 10^{-3}$	24.38	0.86	0.55	$2.91 \times 10^{-3}$	44.35	$1.88 \times 10^{-11}$
30 °	$2 \times 10^{-2}$	$6.98 \times 10^{-3}$	28.47	1.69	1.07	$1.2 \times 10^{-3}$	26.54	$1.41 \times 10^{-11}$
40 °	$2 \times 10^{-2}$	$4.57 \times 10^{-3}$	17.52	0.95	0.61	$1.22 \times 10^{-3}$	28.97	$7.42 \times 10^{-12}$
среднее			23.46			$1.78 \times 10^{-3}$	33.29	$1.34 \times 10^{-11}$

Полученные данные качественно согласуются с результатами других исследований [3]. При подстановке полученных параметров в математическую модель динамики записи [1, 2] в области больших эффективностей дифракции (более 80%) расхождение экспериментальных и теоретических кривых составило не менее 24%. Для уточнения параметров математической модели мы воспользовались методом градиентного спуска, приняв данные таблицы 1 за первое приближение. Уточненные таким образом параметры математической модели приведены в таблице 2.

Таблица 2

$\alpha$ , угол	$\delta n_p$	$Tr$	$\delta n_i$	$D_m$
10 °	$1.5 \times 10^{-2}$	21	$1.78 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-11}$
20 °	$2.4 \times 10^{-2}$	19	$1.78 \times 10^{-3}$	$0.2 \times 10^{-11}$
30 °	$2.8 \times 10^{-2}$	20	$1.78 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-11}$
40 °	$1.8 \times 10^{-2}$	9	$1.7 \times 10^{-3}$	$1.3 \times 10^{-11}$
среднее	$2.13 \times 10^{-2}$	17.25	$1.76 \times 10^{-3}$	$0.9 \times 10^{-11}$

На рисунке 2 показаны результаты совмещения экспериментальных и теоретических зависимостей кинетики записи, полученных на основе параметров табл.2. Как видно, среднеквадратическое расхождение составляет не более 4%.

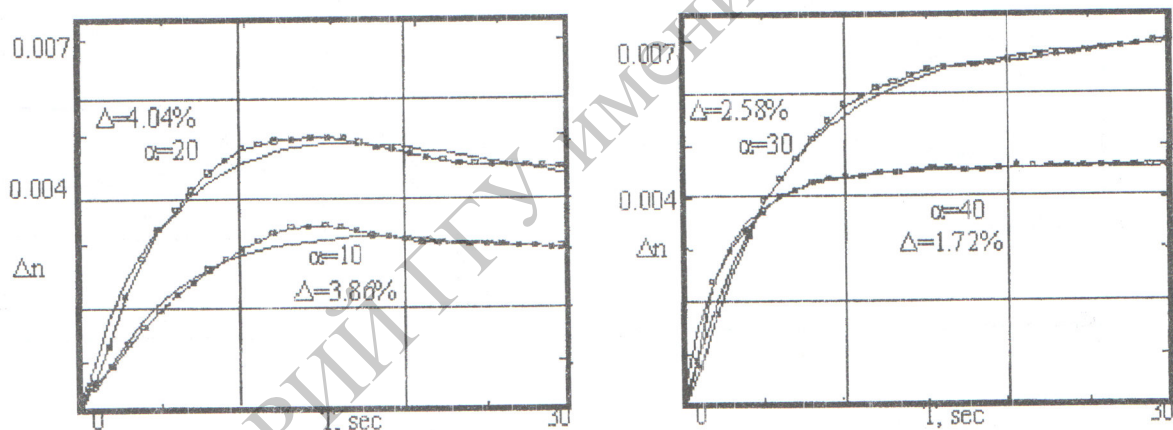


Рис. 2. Совмещение экспериментальных и расчетных (сплошные кривые) зависимостей кинетики записи голограмм в фотополимере при разных углах записи.

Таким образом, представленные результаты экспериментальных исследований и полученные на их основе параметры математической модели записи голографических решеток в фотополимерных материалах свидетельствуют о возможности использования развитой в работе [2] теории записи голограмм в голографических фотополимерных материалах как при малых, так и больших эффективностях дифракции. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процессов записи голограмм в фотополимерах и при создании частотно-избирательных элементов спектральных мультиплексоров.

Через год после проведения первых экспериментов образцы с записью были вновь взяты для исследований по предмету изменения дифракционных характеристик записанных год назад голограмм. Каждый образец с голограммой исследовался 6 раз для получения достоверных результатов, которые затем пересчитывались в дифракционные характеристики: коэффициент дифракции  $K_{диф}$  и нормированный коэффициент дифракции  $K_{диф\ норм}$  (для оценки угловой селективности). На рис.3 представлены графики зависимости  $K_{диф}$  от угла считывания для голограмм, записанных под разными

углами в 2000 году (а), и исследуемых через год хранения т.е. в 2001 году (б).

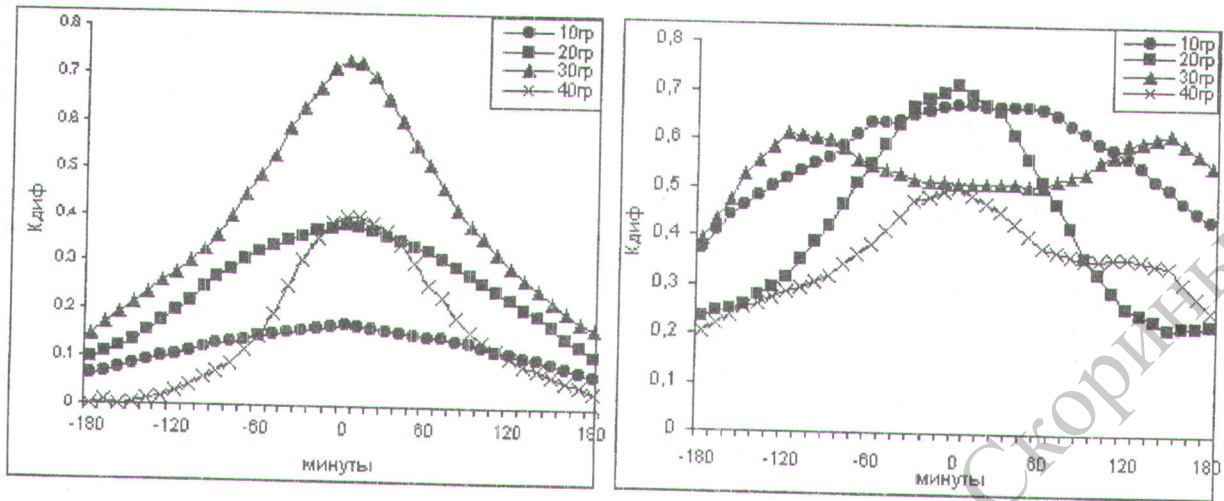


Рис. 3. Графики зависимости  $K_{\text{диф}}$  от угла для голограмм, записанных под разными углами, полученные в 2000 году (а) и 2001 году (б).

Из полученных данных видно, что увеличилась эффективность дифракции. Это можно объяснить тем, что голограмма не была закреплена тепловым либо световым излучением, т.е. вне области записи в полимере остался неизрасходованный мономер, что стало причиной проявления эффектов оптического и темнового усиления голографических решеток.

Так как запись голографической решетки складывается из двух составляющих, как это видно из (1), то данные эффекты можно объяснить следующим образом.

В процессе записи голограммы мономер полностью использовался в области голограммы. Так как область голограммы много меньше площади образца, то с течением времени при долговременном хранении мономер вследствие его градиента концентрации диффундирует в область записи. Вследствие этого в области записанной голографической решетки происходит перераспределение компонент фотополимерной композиции. В результате вытеснения инертной компоненты из минимумов в максимумы решетки увеличивается ее амплитуда, т.е. наблюдается эффект темнового усиления. Эффект оптического усиления наблюдается в процессе считывания голографических решеток. В этом случае при освещении голограммы одним пучком (процесс считывания) на голографической решетке происходит дифракция, в результате чего дифрагированный и прошедший пучки, интерферируя, дозаписывают голограмму, используя диффундированный мономер.

Из рис. 3 (б) видно, что для угла записи  $30^\circ$  дифракционная характеристика имеет <двугорбый> вид, что можно объяснить нелинейностью амплитудно-фазового распределения результирующей голографической решетки.

Для оценки величины изменения угловой селективности голографических решеток на рис.4 представлены графики зависимости  $K_{\text{дифнорм}}$  от угла считывания для голограмм, записанных под разными углами, полученные в 2000 году (а) и 2001 году (б).

Для практических приложений в WDM и DWDM устройствах важна полоса пропускания по длине волны, поэтому угловую селективность пересчитываем по формулам перехода в селективность по длине волны. Так как общий вид дифракционных характеристик остается неизменным, то результаты приведем в виде таблицы. В таблице 3 наглядно представлены изменения эффективности дифракции ( $K_{\text{диф}}$ ) и полосы

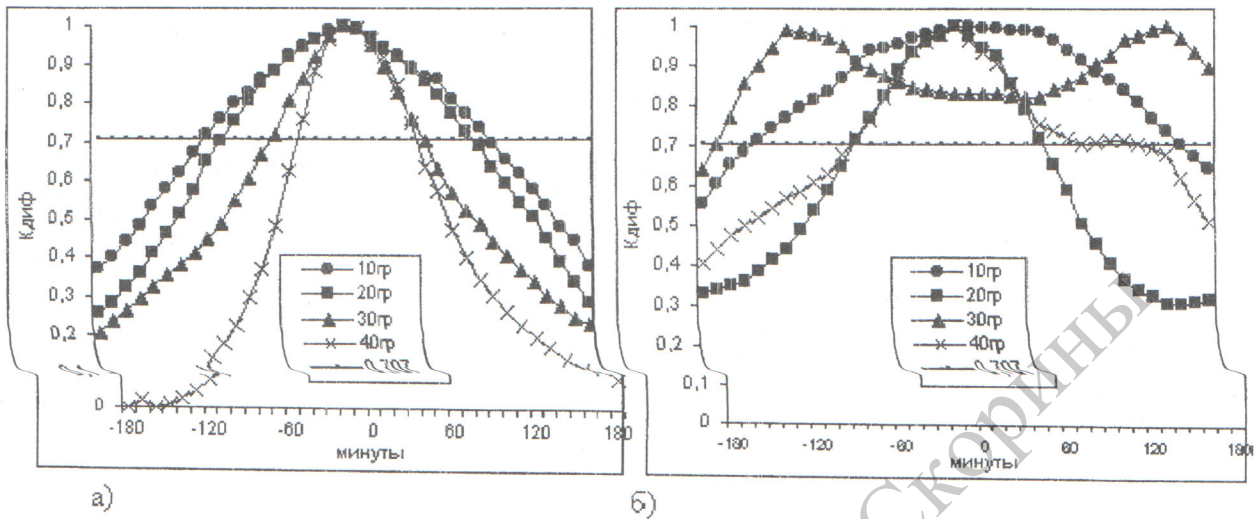


Рис. 4. Графики зависимости  $K_{\text{дифнорм}}$  от угла для голограмм, записанных под разными углами, полученные в 2000 году (а) и 2001 году (б).

пропускания  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\lambda$  (по углу и по длине волны), произошедшие за год хранения.

Таблица 3

	$K_{\text{диф}}$	$K_{\text{диф}}$	$\Delta\alpha$ , мин.	$\Delta\lambda$ , мкм
$\alpha$ , угол	2000	2001	2000	2001
10 °	0.17	0.67	0.44	0.62
20 °	0.38	0.71	0.19	0.140
30 °	0.73	0.51	0.08	0.26
40 °	0.4	0.5	0.05	0.1

### Литература

- [1] E.Kovalenko, S.Sharangovich, T.Zelenskaya // Synthetic metals. №83,1996.P.293-300.
- [2] E.S. Kovalenko, S.N. Sharangovich, V.V. Sysuev // Proc/ SPIE. Paper № 3516-65 1998. P.456-464.
- [3] R.H.Wopschall, T.R.Pampalone, *Appl. Optics*, vol.11, N9, 1972. .P.2096-2097.