

О ПРИМЕНЕНИИ КАПИЛЛЯРНОГО ТЕРМОФОРЕЗА В ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАФИИ

Н.К. Бергер*, В.И. Иванов*, А.Т. Суходольский

Предложено в качестве нелинейной регистрирующей среды в динамической голографии использовать микроэмульсии, в которых происходит капиллярный термофорез частиц дисперсной фазы. Представлено решение одномерной задачи тепло- и массопереноса для оценки эффективности предложенного метода записи.

Известно применение гетерогенных сред с жидкой дисперсной средой в динамической голографии, когда динамическая запись голограмм осуществлялась за счет переноса частиц дисперсной фазы под действием электрострикционных сил [1, 2]. В [3] исследован эффект каналированного светофореза жидких капель в эмульсиях, состоящий в направленном переносе частиц дисперсной фазы навстречу лазерному лучу за счет капиллярной конвекции, индуцированной на границе раздела фаз, которая приводит к движению частицы как целого [4].

Представляется интересным применить лазерно-индуцированные термокапиллярные механизмы переноса для записи динамических голограмм, что может служить основой для создания принципиально новых регистрирующих сред. С этой целью в данной работе исследуется запись динамической решетки в микроэмульсиях для оценки чувствительности и быстродействия предлагаемого механизма записи.

Рассмотрим нелинейную гетерогенную среду (микроэмульсию), состоящую из сферических прозрачных частиц дисперсной фазы и поглощающей дисперсной среды. Радиус частиц r предполагаем меньше длины волны излучения λ . Концентрация частиц c мала, при этом выполняется условие $cr^3 \ll 1$. При освещении поглощающей среды излучением в ней формируется температурное поле, под действием которого за счет термокапиллярных сил происходит изменение концентрации частиц дисперсной фазы. Если показатели преломления дисперсной фазы n_1 и среды n_2 отличаются, то термофорез приводит к модуляции диэлектрической проницаемости среды.

Пусть слой гетерогенной среды толщиной h нагревается двумя интерферирующими лазерными пучками. Коэффициент поглощения вещества дисперсной среды $a \ll h^{-1}$. Распределение интенсивности в плоскости слоя имеет вид

$$I(x, t) = I_0(t) [1 + \sin Kx], \quad (1)$$

где $\Lambda = 2\pi/K$ – период интерференционной картины.

Изменение концентрации частиц дисперсной фазы находим, решая систему уравнений термокапиллярного массопереноса и теплового баланса для одномерного случая без учета влияния подложек:

$$dc/dt = -D\Delta c + \text{div}(cv), \quad (2)$$

$$d\tau/dt = -\kappa\Delta\tau + aI(x, t)/c_p\rho, \quad (3)$$

* Хабаровский политехнический институт.

где c — концентрация частиц; D — коэффициент броуновской диффузии частиц /5/; τ — температура среды; κ — коэффициент температуропроводности; c_p, ρ — теплоемкость и плотность дисперсной среды; v — скорость термокапиллярного дрейфа. Скорость дрейфа согласно /4/ можно представить в виде

$$v = -4\gamma(\partial\sigma/\partial\tau)\nabla\tau/3(3\eta_1 + 2\eta_2), \quad (4)$$

где $\partial\sigma/\partial\tau$ — температурный коэффициент поверхностного натяжения; η_1, η_2 — вязкости дисперсной среды и фазы соответственно.

Учитывая (1), решение уравнений (2) — (3) ищем в виде

$$c(x, t) = c_0 + \delta c(t) \sin Kx, \quad (5)$$

$$\tau(x, t) = \tau_0(t) + \tau_1(t) \sin Kx, \quad (6)$$

где c_0, τ_0 — средняя концентрация частиц и температура слоя, $\delta c(t), \tau_1(t)$ — амплитуды концентрационной и тепловой решеток.

Решая (3) с учетом (6) и (1), получаем

$$\tau_1(t) = \frac{a}{c_p \rho} \int_0^t I(\Theta) e^{-\Gamma(t-\Theta)} d\Theta, \quad (7)$$

где $\Gamma^{-1} = (\kappa K^2)^{-1}$ — время релаксации температурной решетки. Для $I(t) = I_0 = \text{const}$ выражение (7) принимает вид

$$\tau_1(t) = (a I_0 \Gamma^{-1} / c_p \rho) (1 - e^{-\Gamma t}). \quad (8)$$

Подставляя (4), (5) и (8) в (2), находим амплитуду концентрационной решетки

$$\delta c(t) = \frac{4c_0 \gamma (\partial\sigma/\partial\tau) a I_0 \Gamma^{-1} K^2 [G^{-1} (e^{-Gt} - 1) + (G - \Gamma)^{-1} e^{-Gt} (e^{(G - \Gamma)t} - 1)]}{3(3\eta_1 + 2\eta_2)}, \quad (9)$$

где $G^{-1} = (DK^2)^{-1}$ — время релаксации концентрационной решетки. Так как обычно $G^{-1} \gg \Gamma^{-1}$, то выражение (9) упрощается:

$$\delta c(t) = \frac{4c_0 \gamma (\partial\sigma/\partial\tau) a I_0 \Gamma^{-1} G^{-1} K^2 (e^{-Gt} - 1)}{3(3\eta_1 + 2\eta_2) c_p \rho} \quad (10)$$

Считая, что средний показатель преломления среды определяется объемными концентрациями частиц дисперсной фазы и дисперсной среды, и используя (10), в стационарном случае находим эффективный параметр нелинейности $\partial n/\partial I$:

$$\frac{\partial n}{\partial I} = \frac{4c_0 \gamma^4 (n_1 - n_2) (\partial\sigma/\partial\tau) a \Lambda^2 c_p \rho}{9\pi \kappa D (3\eta_1 + 2\eta_2)} \quad (11)$$

Для среды с размером частиц 10^{-2} мкм, объемной концентрацией $сг^3 = 10^{-5}$, $\partial\sigma/\partial\tau = 10^{-1}$ дин/см·К, $\Lambda = 10^{-3}$ см, $\alpha = 1$ см $^{-1}$ оценка по формуле (11) дает для $\partial n/\partial I$ значение 10^{-6} см 2 /Вт. Для сравнения в табл. 1 приведены данные для других механизмов нелинейности, в том числе в гетерогенных средах.

Таблица 1

Сравнение механизмов оптической нелинейности

	$\partial n/\partial I$, см 2 /Вт	$T_{\text{пер}}$, с	Литература
CS $_2$ (ориентационный механизм)	10^{-13}	10^{-12}	/6/
Жидкости (тепловой механизм)	10^{-10}	10^{-4}	/6/
Суспензии (электрострикционный механизм)	$3 \cdot 10^{-9}$	1	/1/
Микроэмульсии (электрострикционный механизм)	10^{-8}	10^{-1}	/2/
Микроэмульсии (термокапиллярный механизм)	10^{-6}	1	Формула (11)

Из таблицы видно, что предложенный механизм оптической нелинейности в гетерогенных средах обладает высокой эффективностью и может быть использован в целях динамической голографии. В качестве нелинейной среды могут использоваться не только микроэмульсии, но и расслаивающиеся растворы, в которых диспергирование и запись информации осуществляются одновременно в процессе фазового перехода. Результаты экспериментов по записи дифракционных решеток в таких системах будут опубликованы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Smith P. W., Maloney P. J., Ashkin A. Opt. Lett., 7, 347 (1982).
2. Freysz E. et al. IEEE J. of Quant. Electr., QE-22, n. 8, 1258 (1986).
3. Суходольский А. Т. Известия АН СССР, сер. физ., 50, 1095 (1986).
4. Братухин Ю. К. Известия АН СССР, МЖГ, № 5 (1975).
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М., Наука, 1986.
6. Келих С. Молекулярная нелинейная оптика. М., Наука, 1981.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 1 июня 1988 г.