

07; 03

© 1991 г.

ЗАПИСЬ БЕГУЩИХ ГОЛОГРАММ В СУСПЕНЗИЯХ, СОДЕРЖАЩИХ БАКТЕРИОРОДОПСИН

Ю. О. Барменков, Н. М. Кожевников

Экспериментально исследовано преобразование гармонической фазовой модуляции в модуляцию интенсивностей невырожденных по частоте световых пучков, записывающих динамическую голограмму в водной суспензии, содержащей бактериородопсин. Полученные результаты свидетельствуют о формировании в среде амплитудной и фазовой решеток (пространственная модуляция коэффициента поглощения и диэлектрической проницаемости), стационарные амплитуды которых зависят от разности частот световых пучков и постоянных времени фотоотклика. Кинетика изменений спектральных амплитуд колебаний интенсивностей выходных пучков при записи этих решеток имеет осциллирующий характер, обусловленный зависящим от времени пространственным рассогласованием решеток и интерференционной картины пучков.

Невырожденное по частоте двухпучковое взаимодействие (НДВ) в фоторефрактивных кристаллах [1], приводящее к формированию бегущих фазовых голограмм [2], широко используется для усиления энергообмена пучков (см., например, [3, 4]). Дополнительная высокочастотная (по сравнению с обратным временем релаксации нелинейного фотоотклика среды) гармоническая фазовая модуляция записывающих пучков позволяет расширить область практического применения НДВ. В частности, регистрация амплитуд колебаний интенсивностей выходных пучков на основной или удвоенной частоте (соответственно в случае нелокального или локального фоторефрактивного отклика) открывает возможность измерения малых разностей частот когерентных световых пучков [5]. При этом динамический характер голографической записи обеспечивает адаптивную пространственно-временную стабилизацию рабочей точки интерферометра [6].

Другое перспективное направление использования НДВ связано с исследованием характеристик нелинейного фотоотклика различных сред, так как зависимости спектральных амплитуд колебаний интенсивностей выходных пучков от скорости перемещения бегущей интерференционной картины (ИК) содержат информацию об амплитудах фотоиндуцированных решеток показателя преломления и коэффициента поглощения, угле пространственного рассогласования этих решеток и записывающей ИК, а также о временах релаксации фотоотклика. В настоящей работе на примере водных суспензий, содержащих бактериородопсин, (ВСБР) рассмотрена методика применения НДВ для изучения слабо-нелинейных сред с локальным керровским фотооткликом.

Схема экспериментальной установки для исследования НДВ в ВСБР приведена на рис. 1. Излучение гелий-неонового лазера ЛГН-215 I ($\lambda=0.63$ мкм)

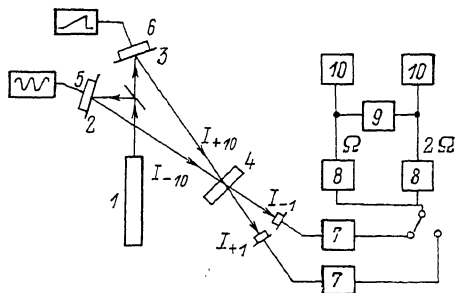


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

разделяется на два пучка $I_{\pm 10} = I_0 = 0.2$ мВт/мм², которые зеркалами 2, 3 сводятся на кювету с ВСБР 4. Зеркало 2 размещается на пьезоэлектрическом модуляторе 5, к которому подводится гармоническое напряжение с частотой $f = \Omega/2\pi = 10$ кГц. Для осуществления НДВ зеркало 3 наклеено на магнитоэлектрический модулятор 6, управляемый пилообразными импульсами с амплитудой, соответствующей кратному 2π изменению разности фаз взаимодействующих пучков. Период этих импульсов, очевидно, определяет линейную скорость Ω_0 изменения разности фаз (разность оптических частот) этих пучков.

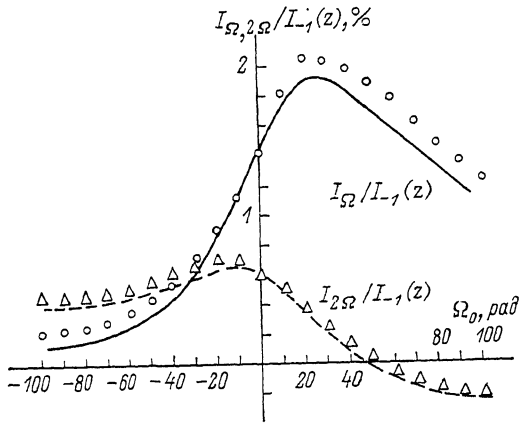


Рис. 2. Зависимости стационарных относительных амплитуд первой и второй гармоник колебаний интенсивности (-1)-пучка от скорости линейной модуляции оптической разности фаз.

Сплошная и штриховая линии — теория, треугольники и кружки — эксперимент.

После прохождения кюветы с ВСБР модулированные по интенсивности световые пучки детектируются фотоприемными устройствами (ФПУ) 7 (кремниевые $p-i-n$ -фотодиоды с преувеличительными усилителями на полевых транзисторах). Спектральные компоненты выходных сигналов ФПУ на частотах Ω и 2Ω после селективного усиления 8 (добротность ~ 100) регистрируются двухлучевым осциллографом 9 и вольтметрами 10. Синхронизация медленной развертки осциллографа и последовательности пилообразных импульсов позво-

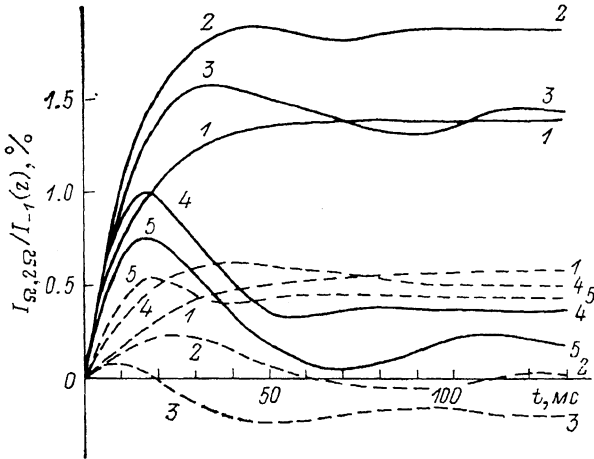


Рис. 3. Кинетика изменений относительных амплитуд первой (сплошные линии) и второй (штриховые линии) гармоник колебаний интенсивности (-1)-пучка.

$\Omega_0 = 0$ (1), 50 (2), 80 (3), -50 (4), -80 рад/с (5).

ляет наблюдать кинетику приближения спектральных амплитуд колебаний интенсивностей пучков к своим стационарным значениям.

На рис. 2 приведены результаты экспериментального исследования зависимостей стационарных относительных амплитуд первой и второй гармоник колебаний интенсивности (-1)-пучка от скорости линейной модуляции разности фаз Ω_0 . Соответствующие зависимости для (+1)-пучка симметричны относительно вертикальной оси графика. Отрицательные значения амплитуд означают изменение на π фазы колебания. Аналогичные экспериментальные результаты были получены в [5] для полимерных пленок, содержащих БР.

Кинетика голографической записи в рассматриваемых ВСБР при НДВ имеет более или менее ярко выраженный осциллирующий характер (рис. 3). При этом колебания интенсивностей (± 1)-пучков оказываются несинфазными.

Для интерпретации полученных результатов предположим, что в ВСБР могут формироваться как локальная амплитудная (модуляция коэффициента поглощения), так и локальная фазовая (модуляция показателя преломления) голографические решетки, обусловленные пространственной модуляцией распределения концентрации фотозвужденных молекул БР [7]. Запишем уравнения для комплексных амплитуд $\widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; t)$ и $\widetilde{\Delta}_\alpha(z; t)$ основных пространственных гармоник фотоиндуцированных изменений диэлектрической проницаемости $\widetilde{\Delta}_\varepsilon(x, z; t) = \widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; t) \exp(2ikx \sin \theta)$ и коэффициента поглощения $\widetilde{\Delta}_\alpha(x, z; t) = \widetilde{\Delta}_\alpha(z; t) \exp(2ikx \sin \theta)$

$$\frac{\partial}{\partial t} \widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; t) = \beta \sqrt{I_{+1}(z; t) I_{-1}(z; t)} \exp(i\varphi(z; t)) - \tau_\varepsilon^{-1} \widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \widetilde{\Delta}_\alpha(z; t) = \gamma \sqrt{I_{+1}(z; t) I_{-1}(z; t)} \exp(i\varphi(z; t)) - \tau_\alpha^{-1} \widetilde{\Delta}_\alpha(z; t), \quad (2)$$

где $E_{\pm 1}(x, z, t) = \sqrt{I_{\pm 1}(z; t)} \exp[i(\omega t - kz \cos \theta \pm kx \sin \theta + \varphi_{\pm 1}(z; t))]$ — напряженности электрических полей двух линейно поляризованных вдоль оси Y плоских волн, падающих в плоскости XZ на поверхность $z=0$ нелинейной среды симметрично относительно нормали к поверхности под углами $\pm \theta$; $\text{Im } \beta = \text{Im } \gamma = 0$; $\varphi(z; t) = \varphi_{+1}(z; t) - \varphi_{-1}(z; t)$; $k = 2\pi/\lambda$.

Решения уравнений (1), (2) с начальными условиями $\widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; 0) = \widetilde{\Delta}_\alpha(z; 0) = 0$ имеют вид

$$\widetilde{\Delta}_\varepsilon(z; t) = \beta S_\varepsilon(z; t), \quad \widetilde{\Delta}_\alpha(z; t) = \gamma S_\alpha(z; t), \quad (3)$$

$$S_{\varepsilon, \alpha} = \int_0^t \sqrt{I_{+1}(z; t') I_{-1}(z; t')} \exp\left[\frac{t' - t}{\tau_{\varepsilon, \alpha}} + i\varphi(z; t')\right] dt'. \quad (4)$$

В слабонелинейных средах ($\Delta\varepsilon \ll 1$, $\Delta\alpha \ll 1$), к которым относится ВСБР, можно пренебречь эффектами самодифракции пучков [8] и явлением «перекачки фазы» на начальной стадии процесса голографической записи [9]. В этом случае разность фаз $\varphi(z; t)$ определяется только смещениями зеркал интерферометра (рис. 1) $\varphi(z; t) = \varphi(t) = \Omega_0 t + a \sin \Omega t$, $\Omega \tau_{\varepsilon, \alpha} \gg 1$, а уравнения для интенсивностей световых пучков, распространяющихся в среде,

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} I_{\pm 1}(z; t) = & -\frac{\alpha}{\cos \theta} I_{\pm 1}(z; t) + \\ & + \text{Re} \left[I_{\pm 1}^{1/2}(z; t) I_{\mp 1}^{1/2}(z; t) \frac{\gamma S_\alpha(z; t) \pm k\beta S_\varepsilon(z; t)}{\cos \theta} e^{-i\varphi(z; t)} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

могут быть решены методом последовательных приближений.

В установившемся режиме ($t \rightarrow \infty$) из (5) легко получаются формулы для амплитуд первой и второй гармоник колебаний интенсивностей пучков

$$I_{2\varepsilon} = \frac{2}{\alpha} (\gamma \tau_\alpha B_\alpha \mp k\beta \tau_\varepsilon A_\varepsilon) J_0(a) J_1(a) I_0^2 T(z), \quad (6)$$

$$I_{2\alpha} = \frac{2}{\alpha} (\gamma \tau_\alpha A_\alpha \pm k\beta \tau_\varepsilon B_\varepsilon) J_0(a) J_2(a) I_0^2 T(z), \quad (7)$$

где $A_{\varepsilon, \alpha} = (1 + \Omega_0^2 \tau_{\varepsilon, \alpha}^2)^{-1}$, $B_{\varepsilon, \alpha} = \Omega_0 \tau_{\varepsilon, \alpha} (1 + \Omega_0^2 \tau_{\varepsilon, \alpha}^2)^{-1}$, $I_{\pm 1}(0) = I_0$, $T(z) = \exp(-\alpha z / \cos \theta) (1 - \exp(-\alpha z / \cos \theta))$, $J_0(a)$, $J_1(a)$, $J_2(a)$ — функции Бесселя; верхний знак в (6), (7) берется для (+1)-пучка.

На рис. 2 сплошной и штриховой линиями показаны зависимости относительных амплитуд первой и второй гармоник $I_{2\varepsilon}/I_{-1}(z)$, $I_{2\alpha}/I_{-1}(z)$ колебаний интенсивности (-1)-пучка ($I_{-1}(z) = I_0 \exp(-\alpha z / \cos \theta)$). При расчетах использовались следующие значения величин: $\beta \sim 2 \cdot 10^{-3}$ мм²/мДж, $\gamma \sim 10$ мм/мДж,

$\tau_e = 12$ мс, $\tau_a = 24$ мс (определяются экспериментально из графиков на рис. 3 при $\Omega_0 = 0$), $J_0(a)J_1(a) = 0.28$, $J_0(a)J_2(a) = 0.12$, $\alpha \sim 2$ мм⁻¹, $z = 1$ мм, $I_0 = 0.2$ мВт/мм². Удовлетворительное соответствие экспериментальных и теоретических результатов подтверждает предположение об амплитудно-фазовом характере нелинейного фотоотклика в ВСБР и обоснованность приближений, использованных в расчете. Кроме того, полученные значения постоянных β и γ позволяют оценить амплитуды решеток диэлектрической проницаемости $\Delta \varepsilon = \beta \tau_e J_0(a) I_0 \sim 4 \cdot 10^{-6}$ и коэффициента поглощения $\Delta \alpha = \gamma \tau_a J_0(a) I_0 \sim 3.5 \times 10^{-2}$ мм⁻¹.

Для анализа кинетики формирования амплитудной и фазовой решеток в режиме НДВ воспользуемся графическим методом, основанным на векторном представлении мгновенных и стационарных значений амплитуд этих решеток на комплексной плоскости (рис. 4). Легко показать, что в системе координат, перемещающейся синхронно с ИК взаимодействующих пучков, решения кинетических уравнений (1), (2) можно записать в виде

$$\Delta \varepsilon(z; t) = \Delta \varepsilon_{cr}(z) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_e}\right) \right),$$

$$\Delta \alpha(z; t) = \Delta \alpha_{cr}(z) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_a}\right) \right),$$
(8)

где $\tilde{\tau}_{\varepsilon, \alpha}^{-1} = \tau_{\varepsilon, \alpha}^{-1} + i\Omega_0$, $\Delta \varepsilon_{cr}(\Omega_0) = \Delta \varepsilon_{cr}(0) (1 + \Omega_0^2 \tau_e^2)^{-1/2}$, $\Delta \alpha_{cr}(\Omega_0) = \Delta \alpha_{cr}(0) (1 + \Omega_0^2 \tau_a^2)^{-1/2}$.

Вектор $\Delta \varepsilon_{cr}$ для (-1) -пучка составляет угол $\Psi_e^- = -\arctg \Omega_0 \tau_e$, а для $(+1)$ -пучка — угол $\Psi_e^+ = \pi - \arctg \Omega_0 \tau_e$ с вещественной осью. Направление вектора

$\Delta \alpha_{cr}$ для обоих пучков одинаково и составляет угол $\Psi_a^\pm = \frac{\pi}{2} - \arctg \Omega_0 \tau_a$ с вещественной осью.

Годографы мгновенных векторов $\Delta \varepsilon(z; t)$ и $\Delta \alpha(z; t)$ представляют собой спирали, начинающиеся из начала координат (если к моменту времени $t=0$ в среде отсутствовали соответствующие решетки) и приближающиеся к стационарным значениям векторов. Скорости движения концов мгновенных векторов по этим спиралям одинаковы, период движения по спирали $T = 2\pi/\Omega_0$. Скорости уменьшения модулей мгновенных векторов различны и определяются значениями Ω_0 и $\tau_{\varepsilon, \alpha}$, так как за время одного периода модуль функции $\exp(-t/\tau_{\varepsilon, \alpha})$ уменьшается в $\exp(-2\pi/\Omega_0 \tau_{\varepsilon, \alpha})$ раз. Поэтому чем больше $\tau_{\varepsilon, \alpha}$, тем глубже модуляция модулей векторов $\Delta \varepsilon(z; t)$, $\Delta \alpha(z; t)$ и тем длиннее процесс установления их стационарных значений.

При дифракции фазомодулированных ($\Omega \tau_{\varepsilon, \alpha} \gg 1$) пучков на решетках, описываемых векторами на комплексной плоскости, в соответствии с (5) вещественные проекции мгновенных амплитуд этих решеток определяют амплитуды нечетных гармоник модулирующей частоты Ω , а мнимые проекции — стационарный энергообмен и амплитуды четных гармоник колебаний интенсивностей пучков на выходе из среды. На рис. 4 приведена диаграмма, соответствующая голографической записи в ВСБР при указанных выше значениях параметров нелинейного фотоотклика и $\Omega_0 = 83.5$ рад/с. Временной интервал между прямыми, выходящими из концов векторов $\Delta \varepsilon_{cr}$ и $\Delta \alpha_{cr}$, соответствует $T/16$. Построив зависимости от времени сумм вещественных и мнимых проекций, умноженных соответственно на $J_0(a)J_1(a) = 0.28$ и $J_0(a)J_2(a) = 0.12$, получим зависимости амплитуд первой и второй гармоник выходного сигнала, которые отличаются от приведенных на рис. 3 экспериментальных графиков не более чем на несколько процентов.

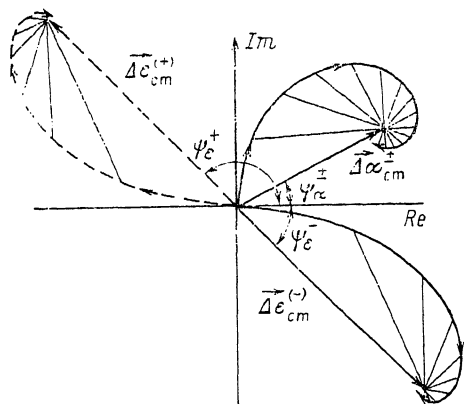


Рис. 4. Векторная диаграмма, соответствующая голографической записи в ВСБР при $\Omega_0 = 83.5$ рад/с.

Таким образом, в результате проведенного исследования удалось надежно зарегистрировать существование амплитудно-фазовых решеток в ВСБР и оценить вклад каждой из них в энергообмен фазомодулированных пучков. Приведенные выше зависимости спектральных амплитуд выходных сигналов от скорости перемещения бегущей ИК (в стационарном режиме) и от времени (в процессе формирования голограмм) могут быть использованы при разработке конкретных схем адаптивных голографических интерферометров, основанных на взаимодействии невырожденных по частоте световых пучков.

Список литературы

- [1] Петров М. П., Степанов С. И., Хоменко А. В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 270 с.
- [2] Степанов С. И. // Оптическая голография с записью в трехмерных средах. Л.; Наука, 1986. С. 17—30.
- [3] *Rejzger Ph., Solymar L., Rajbenbach H., Huignard J. P.* // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 58. N 1. P. 45—57.
- [4] *Hamel de Mouchenault G., Huignard J. P.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. N 3. P. 624—627.
- [5] Барменков Ю. О., Кожеевников Н. М. // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. Вып. 1. С. 65—69.
- [6] Барменков Ю. О., Зосимов В. В., Кожеевников Н. М. и др. // Опт. и спектр. 1988. Т. 64. Вып. 6. С. 1339—1343.
- [7] Всеволодов Н. Н. Биопигменты-фоторегистраторы: фотоматериал на бактериородопсине. М.: Наука, 1988. 224 с.
- [8] Винецкий В. Л., Кузтарев Н. В., Одулов С. Г., Соскин М. С. // УФН. 1979. Т. 129. № 1. С. 113—137.
- [9] Винецкий В. Л., Кузтарев Н. В., Соскин М. С. // Квантовая электрон. 1977. Т. 4. № 2. С. 420—425.

Ленинградский государственный технический университет

Поступило в Редакцию
8 октября 1990 г.