ВРЕМЕННОЙ ОТКЛИК ТОНКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАММЫ В РАСТВОРЕ КРАСИТЕЛЯ, МОДЕЛИРУЕМОМ ЧЕТЫРЕХУРОВНЕВОЙ СХЕМОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ

Е.В. Воробьева, В.В. Ивахник

Самарский государственный университет

Аннотация

Для тонкой динамической голограммы в растворе красителя, моделируемом четырехуровневой схемой энергетических уровней, найден вид временного отклика в виде суммы трех экспоненциальных функций. Получены зависимости весовых коэффициентов и скоростей уменьшения экспоненциальных функций от интенсивности излучения, записывающего голограмму, параметров красителя.

Введение

Любое оптическое устройство, в том числе и динамическая голограмма, осуществляет преобразование комплексной амплитуды падающей на нее волны с определенной точностью [1-3]. При использовании динамической голограммы в лазерных измерительных устройствах необходимо установление однозначной связи между пространственной, временной структурой, энергетическими параметрами взаимодействующих волн. Вид этой связи существенным образом зависит от характеристик нелинейной среды, в которой осуществляется запись динамической голограммы.

В настоящей работе для тонкой динамической голограммы в растворе красителя, моделируемого четырехуровневой схемой энергетических уровней, анализируется связь между временными зависимостями комплексных амплитуд предметной и восстановленной волн.

1. Модель красителя

Рассмотрим раствор красителя, моделируемого четырехуровневой схемой энергетических уровней, два из которых синглетные, а два других - триплетные (рис.1).

Система кинетических уравнений, описывающая изменение заселенности энергетических уровней, есть [4]

$$\begin{cases} \dfrac{dN_2}{dt} = I\sigma_{12}N_1 - \left(I\sigma_{21} + \delta_{21} + \delta_{23}\right)N_2, \\ \dfrac{dN_3}{dt} = \delta_{23}N_2 - \left(I\sigma_{34} + \delta_{31}\right)N_3, \\ \dfrac{dN_4}{dt} = I\sigma_{34}N_3 - \delta_{41}N_4, \\ N_1 + N_2 + N_3 + N_4 = N. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь N_1 и N_2 - заселенности основного и возбужденного синглетных состояний, N_3 и N_4 - заселенности триплетных состояний, σ_{ij} и δ_{ij} - сечения поглощения (испускания) и вероятности безызлучательных переходов между i и j энергетическими уровнями, I - интенсивность излучения.

2. Запись динамической голограммы

Пусть тонкий слой красителя располагается в плоскости $z = 0$. Будем записывать голограмму плоскими волнами, падающими на слой красителя под одинаковыми углами.

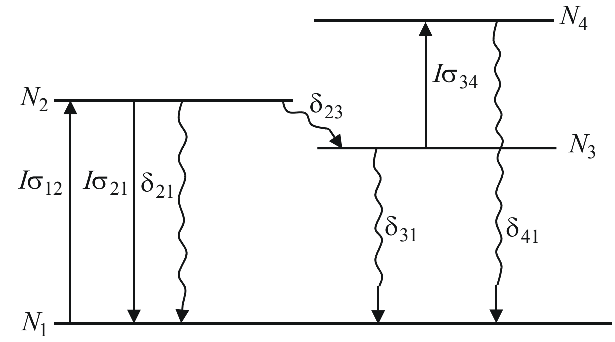

Рис.1. Схема энергетических уровней.

Тогда распределение интенсивности в зависимости от поперечной координаты x будет иметь следующий вид:

$$I = I_0\left(1 + f\cdot\cos\left[Kx + \varphi(t)\right]\right). \quad (2)$$

Здесь I_0 и $\varphi(t)$ - средняя интенсивность и разность фаз волн, записывающих голограмму, K и f - волновое число и глубина модуляции записываемой интерференционной решетки.

Периодическое изменение интенсивности излучения приводит к периодическому изменению заселенности энергетических уровней красителя.

Используя разложение в ряд Фурье, представим заселенности энергетических уровней в виде суммы:

$$N_l = \sum_{j=-\infty}^{\infty} N_{lj}\exp\left(-ijKx\right), l = 1 \div 4. \quad (3)$$

Будем использовать следующие приближения: 1. пространственное изменение заселенностей происходит по гармоническому закону $\left(N_{l1} >> N_{l2} >> ...\right)$, 2. глубина модуляции заселенностей небольшая ($N_{l0} >> N_{l1}$).

С учетом сделанных приближений после подстановки (2), (3) в систему уравнений (1) она распадается на систему двух дифференциальных уравнений, первая из которых совпадает по виду с системой уравнений (1) при замене в ней N_l на N_{l0} и I на I_0, а вторая имеет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dN_{21}}{dt} = I_0\sigma_{12}N_{11} - \left(I_0\sigma_{21} + \delta_{21} + \delta_{23}\right)N_{21} + \\ +F_1(t), \\ \dfrac{dN_{31}}{dt} = \delta_{23}N_{21} - \left(I_0\sigma_{34} + \delta_{31}\right)N_{31} + F_2(t), \\ \dfrac{dN_{41}}{dt} = I_0\sigma_{34}N_{31} - \delta_{41}N_{41} - F_2(t), \\ N_{11} + N_{21} + N_{31} + N_{41} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Здесь $F_j(t) = F_{j0}(t)\exp\{-i\varphi(t)\}$, $F_{10}(t) = \frac{1}{2}I_0 f\left(N_{10}\sigma_{12} - -N_{20}\sigma_{21}\right)$, $F_{20}(t) = -\frac{1}{2}I_0 f\sigma_{34}N_{30}$.

С учетом начальных условий $N_{20}(t=0) = = N_{30}(t=0) = N_{40}(t=0) = 0$, $N_{10}(t=0) = N$ для средних значений заселенностей энергетических уровней в случае установившегося процесса $\left(\frac{dN_{l0}}{dt} = 0, \quad l = 1 \div 4\right)$ имеем

$$\begin{aligned} N_{20} &= NI_0\sigma_{12}\delta_{41}pP, \\ N_{30} &= NI_0\sigma_{12}\delta_{23}\delta_{41}P, \\ N_{40} &= NI_0^2\sigma_{12}\sigma_{34}\delta_{23}P. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $P = \left\{\left[I_0\left(\sigma_{12} + \sigma_{21}\right) + \delta_{21} + \delta_{23}\right]p\delta_{41} + +I_0\sigma_{12}\delta_{23}\delta_{41} + I_0^2\sigma_{12}\sigma_{34}\delta_{23}\right\}^{-1}$, $p = I_0\sigma_{34} + \delta_{31}$.

Решая систему уравнений (4) с учетом граничных условий $\left(N_{l1} = 0 \quad l = 1 \div 4\right)$, получим

$$\begin{aligned} N_{21} &= \sum_{j=1}^{3} C_j \exp\left(\lambda_j t\right), \\ N_{31} &= \delta_{23}\sum_{j=1}^{3}\frac{C_j \exp\left(\lambda_j t\right)}{\left(\lambda_j + p\right)}, \\ N_{41} &= I_0\sigma_{34}\delta_{23}\sum_{j=1}^{3}\frac{C_j \exp\left(\lambda_j t\right)}{\left(\lambda_j + p\right)\left(\lambda_j + \delta_{41}\right)}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $C_j(t) = \frac{\Delta_j}{\Delta_0}\int_0^t \exp\left\{-\lambda_j t_1 - i\varphi(t_1)\right\}dt_1$,

$$\Delta_1 = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\left(\lambda_2 + p\right)\left(\lambda_2 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_3 + p\right)\left(\lambda_3 + \delta_{41}\right)} \times$$
$$\times\left\{F_{10} - \frac{F_{20}}{\delta_{23}}\left[\frac{\left(\lambda_2 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_3 + \delta_{41}\right)}{I_0\sigma_{34}} + \lambda_2 + \lambda_3 + p + \delta_{41}\right]\right\},$$

$$\Delta_2 = \frac{\lambda_3 - \lambda_1}{\left(\lambda_1 + p\right)\left(\lambda_1 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_3 + p\right)\left(\lambda_3 + \delta_{41}\right)} \times$$
$$\times\left\{F_{10} - \frac{F_{20}}{\delta_{23}}\left[\frac{\left(\lambda_1 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_3 + \delta_{41}\right)}{I_0\sigma_{34}} + \lambda_1 + \lambda_3 + p + \delta_{41}\right]\right\},$$

$$\Delta_3 = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\left(\lambda_1 + p\right)\left(\lambda_1 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_2 + p\right)\left(\lambda_2 + \delta_{41}\right)} \times$$
$$\times\left\{F_{10} - \frac{F_{20}}{\delta_{23}}\left[\frac{\left(\lambda_1 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_2 + \delta_{41}\right)}{I_0\sigma_{34}} + \lambda_1 + \lambda_2 + p + \delta_{41}\right]\right\},$$

$$\Delta_0 = \left\{\left(\lambda_1 + p\right)\left(\lambda_1 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_2 - \lambda_3\right) + \left(\lambda_2 + p\right)\left(\lambda_2 + \delta_{41}\right) \times \right.$$
$$\left. \times\left(\lambda_3 - \lambda_1\right) + \left(\lambda_3 + p\right)\left(\lambda_3 + \delta_{41}\right)\left(\lambda_1 - \lambda_2\right)\right\} \times$$
$$\times \frac{1}{\prod_{j=1}^{3}\left(\lambda_j + p\right)\left(\lambda_j + \delta_{41}\right)}, \quad \lambda_1 = M_1 + M_2 - \frac{a}{3},$$

$$\lambda_{2,3} = -\frac{M_1 + M_2}{2} \pm i\frac{M_1 - M_2}{2}\sqrt{3} - \frac{a}{3},$$

$$M_{1,2} = \left\{-\left(\frac{a}{3}\right)^3 + \frac{ab}{6} - \frac{c}{2} \pm \left[\left(-\frac{a^2}{9} + \frac{b}{3}\right)^3 + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \left(\left(\frac{a}{3}\right)^3 - \frac{ab}{6} + \frac{c}{2}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}\right\}^{\frac{1}{3}},$$

$$a = I_0\left(\sigma_{12} + \sigma_{21} + \sigma_{34}\right) + \delta_{21} + \delta_{23} + \delta_{31} + \delta_{41},$$

$$\begin{aligned} b = {} & I_0\sigma_{12}\left(\delta_{23} + \delta_{31} + \delta_{41}\right) + \\ & + I_0\sigma_{34}\left(I_0\sigma_{21} + \delta_{21} + \delta_{23} + \delta_{41}\right) + \\ & + \left(I_0\sigma_{21} + \delta_{21} + \delta_{23}\right)\left(\delta_{31} + \delta_{41}\right) + I_0^2\sigma_{12}\sigma_{34} + \delta_{31}\delta_{41}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c = {} & I_0^2\sigma_{34}\left[\sigma_{12}\left(\delta_{41} + \delta_{23}\right) + \sigma_{21}\delta_{41}\right] + \\ & + I_0\delta_{41}\left[\sigma_{12}\left(\delta_{23} + \delta_{31}\right) + \sigma_{21}\delta_{31} + \sigma_{34}\left(\delta_{21} + \delta_{23}\right)\right] + \\ & + \delta_{31}\delta_{41}\left(\delta_{21} + \delta_{23}\right). \end{aligned}$$

3. Считывание голограммы

Будем считывать голограмму излучением на длине волны, совпадающей с длиной волны излучения, записывающего голограмму. Тогда для рассматриваемой четырехуровневой модели красителя коэффициент поглощения связан с заселенностью основного энергетического уровня соотношением вида

$$\alpha = N_1\sigma_{12} - N_2\sigma_{21} + N_3\sigma_{34} \quad (7)$$

С учетом (3) коэффициент поглощения красителя можно представить в виде суммы

$$\alpha = \sum_{j=-\infty}^{\infty}\alpha_j \exp\left(-ijKx\right). \quad (8)$$

Подставив выражения для заселенностей энергетических уровней (6), (7) в формулу для коэффициента поглощения (8) при $j = 1$, получим для установившегося процесса выражение для амплитуды первой гармоники в разложении коэффициента поглощения в ряд:

$$\alpha_1 = \int_0^t \left[\sum_{j=1}^{3} A_j \exp\left(\lambda_j \left(t - t_1\right)\right) \right] \exp\left(-i\varphi\left(t_1\right)\right) dt_1 , \quad (9)$$

где $A_j = -\frac{\Delta_j}{\Delta_0}\left[\left(\sigma_{12} + \sigma_{21}\right) + \frac{\left(\sigma_{12} - \sigma_{34}\right)\delta_{23}}{\left(\lambda_j + p\right)} + \right.$

$$\left. + \frac{I_0 \sigma_{12} \sigma_{34} \delta_{23}}{\left(\lambda_j + p\right)\left(\lambda_j + \delta_{41}\right)} \right].$$

Если голограмма тонкая, т.е. изменением интенсивностей волн, записывающих голограмму, на ее толщине можно пренебречь, то амплитуда волны, восстановленной с голограммы $\left(A_d\right)$, с точностью до постоянного множителя определяется амплитудой первой гармоники в разложении коэффициента поглощения в ряд

$$A_d = \alpha_1 .$$

Тогда временной отклик тонкой динамической голограммы в растворе красителя, моделируемом четырехуровневой схемой энергетических уровней, будет иметь вид:

$$\chi\left(t - t_1\right) = \sum_{j=1}^{3} A_j \exp\left\{\lambda_j \left(t - t_1\right)\right\} . \quad (10)$$

Временной отклик тонкой динамической голограммы представляет сумму трех экспоненциальных функций, весовые коэффициенты $\left(A_j\right)$ и скорость уменьшения во времени $\left(\lambda_j\right)$ которых зависят от интенсивности излучения, записывающего голограмму, параметров красителя.

Литература

1. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир. 1971.
2. Васильев Л.А., Галушкин М.Г., Серегин А.М., Чебуркин Н.В. // Квантовая электроника. 1982. Т.9. №8. С.1571-1575
3. Гаращук В.П., Ивахник В.В., Никонов В.И. // Оптика и спектроскопия. 1998. Т.85. №4. С.671-676.
4. Тихонов Е.А., Шпак М.Т.. Нелинейные оптические явления в органических соединениях. - Киев. Н.:Думка. 1979.

Time response of a thin dynamic hologram in a dye solution simulated by a four-energy-level diagram

E.V. Vorobeva [1], V.V. Ivakhnik [1]
[1] Samara State Aerospace University

Abstract

The equation for time response function as a sum of three exponential functions have been obtained for thin dynamic hologram in a solution of dye, simulated by a four-level energetic scheme. The authors have derived the dependences of weight coefficients and reduction velocities of exponential functions on the intensity of the hologram write radiation.

Keywords: dynamic hologram, four-energy-level, weight coefficient, reduction velocitie, exponential function.

Citation: Vorobeva EV, Ivakhnik VV. Time response of a thin dynamic hologram in a dye solution simulated by a four-energy-level diagram. Computer Optics 2002; 24: 91-93.

References

[1] Papoulis A. Systems and transforms with applications in optic. McGraw-Hill Book Company; 1968.
[2] Vasilev LA, Galushkin MG, Seregin AM, Cheburkin NV. Wavefront reversal in four-wave interaction in a medium with a thermal nonlinearity. Soviet Journal of Quantum Electronics 1982; 12(8):1007-1009.
[3] Garashchuk VP, Ivakhnik VV, Nikonov VI. Temperature dependence of the diffraction efficiency of a dynamic hologram in a reversible photochromic medium. Optics and Spectroscopy 1998; 85(4): 613-618.
[4] Tikhonov EA, Shpak MT. Nonlinear optical phenomena in organic compounds [In Russian]. Kyiv: "Naukova Dumka" Publisher; 1979.