

ЗАПИСЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ ГОЛОГРАММЫ НА КРАСИТЕЛЯХ (ДВУХВОЛНОВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ)

В.В. Ивахник, М.В. Котляр, Е.В. Шильникова
Самарский государственный университет

При воздействии на раствор красителя интенсивного светового излучения с длиной волны, лежащей в полосе поглощения молекул красителя, наблюдается изменение населенностей основных и возбужденных состояний молекул, и, как следствие этого, изменение оптических характеристик раствора красителя. Растворы красителей явились первыми нелинейными средами, на которых были записаны динамические голограммы [1]. При анализе записи динамических голограмм в красителях, как правило, используется приближение, при котором интенсивность опорной и считывающей волн намного больше интенсивности сигнальной и восстановленной волн [2,3]. Другой не менее интересный и часто реализуемый на практике случай записи динамической голограммы при условии, что интенсивность волн, записывающих голограмму, намного больше интенсивности считывающей и восстановленной волн.

1. Модель красителя

Энергетическая структура многих органических красителей может быть удовлетворительно описана с помощью двух- трех- четырехуровневых моделей. Анализ насыщения поглощения моделей красителя методом уравнений баланса, согласно работе [4], приводит к следующему выражению для нелинейного коэффициента поглощения

$$\alpha = \alpha_0 \frac{1 + aI}{1 + bI + cI^2}, \quad (1)$$

где α_0 - начальный коэффициент поглощения, I интенсивность падающего излучения, a, b, c - параметры, представляющие собой комбинацию сечений поглощения и скоростей релаксации между энергетическими состояниями красителя. В случае трехуровневой модели красителя [5]: $a = \sigma_{23}/\vartheta_{21}$, $b = (\sigma_{12} + \sigma_{21})/\vartheta_{21}$, $c = \sigma_{12}\sigma_{23}/(\vartheta_{21}\vartheta_{23})$, где σ_{ij} и ϑ_{ij} - сечение поглощения и скорость энергетической релаксации между i -ым и j -ым состояниями соответственно.

2. Запись голограммы

Рассмотрим слой красителя расположенный между плоскостями $z=0$ и $z=L$, на который падают две плоские монохроматические волны, записывающие голограмму (рис.1). Волновое уравнение, описывающее распространение волн, имеет вид

$$\nabla^2 A + (k^2 - ik\alpha)A = 0 \quad (2)$$

Здесь $A = \sum_{j=1}^2 A_j(z) \exp(-ik_j \vec{r}) + \text{к.с.}$, \vec{k}_j - вол-

новой вектор, \vec{r} - радиус вектор, $k^2 = k_j^2$.

При условии, что в слое красителя распространяются две волны, в приближении медленно меняющихся амплитуд уравнение (2) с учетом (1) распадается на систему двух нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка для интенсивностей волн, записывающих голограмму, вида

$$k_{1z} \frac{dI_1}{dz} [1 + b(I_1 + I_2) + c(I_1^2 + I_2^2) + 4cI_1I_2] +$$

$$+ k_{2z}I_1 \frac{dI_2}{dz} [b + 2c(I_1 + I_2)] +$$

$$k\alpha_0(1 + aI_1 + 2aI_2)I_1 = 0$$

$$k_{2z} \frac{dI_2}{dz} [1 + b(I_1 + I_2) + c(I_1^2 + I_2^2) + 4cI_1I_2] +$$

$$+ k_{1z}I_2 \frac{dI_1}{dz} [b + 2c(I_1 + I_2)] + \quad (3)$$

$$k\alpha_0(1 + aI_2 + 2aI_1)I_2 = 0$$

Здесь k_{jz} - проекция j -ого волнового вектора на ось Z .

3. Считывание голограммы

Будем считывать голограмму излучением с длиной волны, совпадающей с длиной волны излучения, записывающего голограмму: $A_c = A_c(z) \exp(-ik_c \vec{r}) + \text{к.с.}$ (рис.1). Амплитуду восстановленной волны представим в виде: $A_b = A_b(z) \exp(-ik_b \vec{r}) + \text{к.с.}$ Здесь $\vec{k}_b = \vec{k}_c - (\vec{k}_1 - \vec{k}_2)$, \vec{k}_c - волновой вектор считывающей волны. Как и в случае записи голограммы, распространение в красителе считывающей и восстановленной волн описывается волновым уравнением (2). Тогда в приближении, что в голограмме распространяются только считывающая и восстановленная волны, наличие считывающей и восстановленной волн не меняет пространственное распределение фотохромных частиц, волновое уравнение распадается на систему связанных уравнений вида

$$k_{1z} \frac{dA_b}{dz} [1 + b(I_1 + I_2) + c(I_1^2 + I_2^2) +$$

$$+ 4c\sqrt{I_1I_2}] + k_{2z}\sqrt{I_1I_2} \frac{dA_c}{dz} [1 + a(I_1 + I_2)] +$$

$$- \frac{1}{2}k\alpha_0[1 + a(I_1 + I_2)]A_b - \frac{1}{2}ak\alpha_0\sqrt{I_1I_2}A_c = 0$$

$$\begin{aligned}
& k_{2z} \frac{dA_c}{dz} [1 + b(I_1 + I_2) + c(I_1^2 + I_2^2)] + \\
& + 4c\sqrt{I_1 I_2} + k_{1z} \sqrt{I_1 I_2} \frac{dA_b}{dz} [1 + a(I_1 + I_2)] + \\
& - \frac{1}{2} k\alpha_0 [1 + a(I_1 + I_2)] A_c - \frac{1}{2} a k\alpha_0 \sqrt{I_1 I_2} A_b = 0
\end{aligned} \quad (4)$$

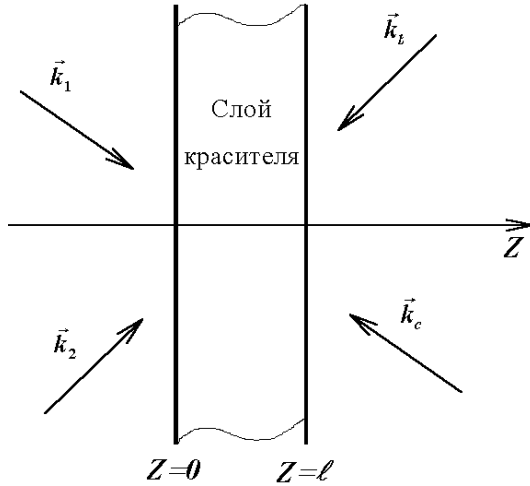


Рис.1 Схема записи-считывания голограммы

При выводе системы уравнений (4) считали, что $\vec{k}_c = -\vec{k}_1$ и $\vec{k}_b = -\vec{k}_2$. Системы уравнений (3), (4) дополним граничными условиями: для волн записывающих голограмму

$$I_j(z=0) = I_{j0}.$$

для считывающей и восстановленной волн

$$A_c(z=L) = 1, \quad A_b(z=L) = 0.$$

В частном случае $a = c = 0$ уравнения (3), (4) совпадают с уравнениями, описывающими запись и восстановление динамической голограммы в обратимой фотохромной среде [6].

4. Обсуждение результатов

Численный анализ систем уравнений (3), (4) совместно с граничными условиями позволяет проанализировать зависимость дифракционной эффективности голограммы ($h = A_b(z=L)A_c^*(z=0)$) от параметров красителя, интенсивностей волн, записывающих голограмму.

На рис.2 приведены характерные графики зависимости ДЭГ от приведенной толщины слоя красителя ($\alpha_0 L$). При фиксированных параметрах красителя характер зависимости ДЭГ от $\alpha_0 L$ существенным образом зависит от интенсивностей волн записывающих голограмму. Введем безразмерную интенсивность волн записывающих голограмму

$$M = \frac{\sigma_{12} + \sigma_{21}}{\vartheta_{21}} (I_{10} + I_{20}).$$

В зависимости от величины безразмерной интенсивности можно выделить несколько видов зависимости ДЭГ от приведенной толщины красителя. При «малом» значении нормированной интенсивности

рост толщины слоя красителя приводит вначале к увеличению, а затем к монотонному уменьшению дифракционной эффективности голограммы (кривая 1, рис.2). При дальнейшем увеличении интенсивности волн записывающих голограмму на кривой зависимости ДЭГ от $\alpha_0 L$ появляется еще один максимум, наблюдаемый при меньших значениях приведенной толщины слоя красителя (кривая 2, рис.2). Последующее увеличение параметра M приводит к изменению соотношения между наибольшими значениями максимумов. Наибольшее значение первого максимума становится больше наибольшего значения второго максимума (кривая 3, рис.2). При «большом» значении нормированной интенсивности, как и при «малой» рост толщины слоя красителя приводит вначале к увеличению, а затем к монотонному уменьшению дифракционной эффективности голограммы (кривая 4, рис.2). Область значений нормированной интенсивности, а значит и понятия «малой», «большой» толщины слоя красителя определяется значением параметров $\gamma_1 = \sigma_{23}/2\sigma_{21}$ и $\gamma_2 = \vartheta_{21}/2\vartheta_{23}$

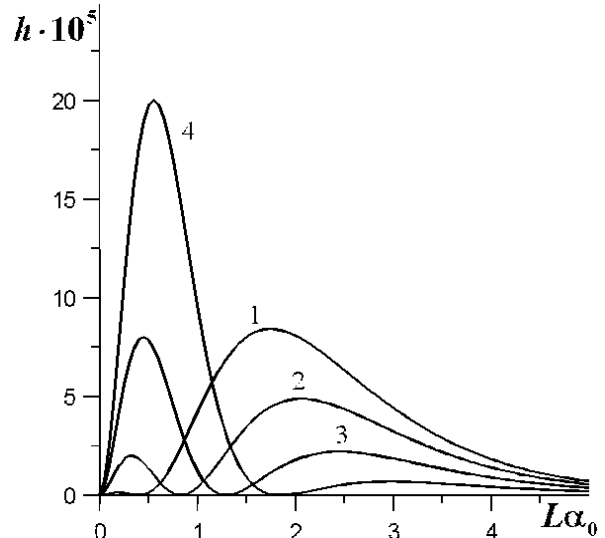


Рис.2 Зависимость дифракционной эффективности голограммы от приведенной толщины при

$$\begin{aligned}
& I_{10} = I_{20}, \quad \gamma_1 = 10, \quad \gamma_2 = 10; \\
& M = 0.05(1), 0.06(2), 0.07(3), 0.08(4)
\end{aligned}$$

При фиксированном значении отношения сечений поглощения изменение отношения скоростей энергетических релаксаций приводит к изменению величины области нормированной интенсивности волн записывающих голограмму, в пределах которой на кривой зависимости ДЭГ от нормированной толщины слоя красителя наблюдаются два максимума, по закону обратно пропорциональному параметру γ_2 . При фиксированном значении параметра γ_2 изменение параметра γ_1 слабо влияет на величину этой области.

Введем понятие оптимальной толщины голограммы (L_{opt}), как толщины, при которой ДЭГ принимает наибольшее значение.

На рис.3 приведены графики зависимости оптимальной толщины голограммы, а на рис.4 соответствующей ей дифракционной эффективности (h_{opt}) от нормированной интенсивности волн записывающих голограмму. В области "больших" значений параметра M зависимость L_{opt} от нормированной интенсивности волн записывающих голограмму носит линейный характер.

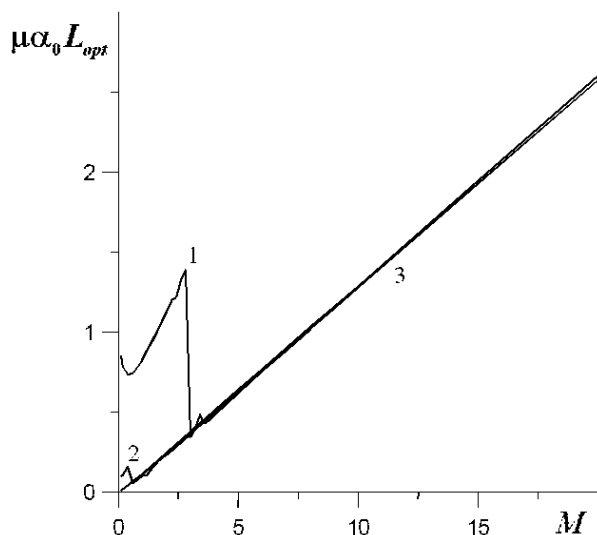


Рис. 3 Зависимость оптимальной толщины голограммы от параметра M при $I_{10} = I_{20}$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 0.1(1), 1(2), 10(3)$; $\mu = 1(1), 10(2), 100(3)$

Причем при фиксированном значении отношения сечений поглощения величина оптимальной толщины голограммы прямо пропорциональна отношению скоростей энергетических релаксаций. ДЭГ, соответствующая оптимальной толщине голограммы, с ростом нормированной интенсивности волн записывающих голограмму либо вначале убывает, а затем, возрастая, выходит на установившееся значение, либо вначале возрастает, а затем, убывая, вновь выходит на тоже самое установившееся значение. Установившееся значение ДЭГ слабо зависит от параметров красителя и составляет примерно 0.9%.

Литература

1. Степанов Б.И., Ивакин Е.В., Рубанов А.С. О регистрации плоских и объемных динамических

голограмм в просветляющихся веществах // ДАН СССР. 1971. Т.196. №3. С.567-569.

2. Кабанов В.В., Рубанов А.С. Энергетическая эффективность обращения волнового фронта при вырожденном четырехволновом взаимодействии в растворах красителей // Квантовая электроника. 1982. Т.9. №6. С.1277-1280.
3. Ивакин Е.В., Кабанов В.В., Рубанов А.С., Степанов Б.И. ОВФ в растворах красителей // Изв. АН СССР. Сер. физическая. 1988. Т. 52. №6. С.1224 – 1231.
4. Асланиди Е.Б., Гальдельман И.Л., Тихонов Е.А., Шпак М.Т. Нелинейное поглощение света растворами органических красителей // УФЖ. Т.15. №8, С.1284-1294.
5. Безродный В.И., Пржовская О.А., Тихонов Е.А., Шпак М.Т. Насыщение поглощения при двухступенчатых переходах в растворах красителей // Квантовая электроника. 1981.Т.8. №2. С.410-412.
6. Ивахник В.В., Ивахник Е.В., Никонов В.И.. Дифракционная эффективность голограммы, записанной в обратимой фотохромной среде (двухволновое приближение) // Оптика и спектроскопия 1999. Т.86. №5. С.851-855.

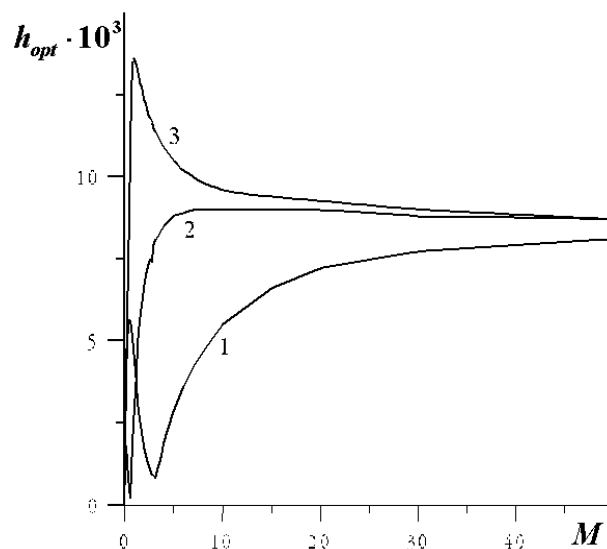


Рис. 4 Зависимость дифракционной эффективности голограммы, соответствующей оптимальной толщине, от параметра M при $I_{10} = I_{20}$, $\gamma_1 = 10$, $\gamma_2 = 0.1(1), 1(2), 10(3)$