

## ЗАПИСЬ ТРЕХМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ НА ФОТОХРОМНОМ СТЕКЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЦЕССА ОПТИЧЕСКОГО ОБЕСЦВЕЧИВАНИЯ. I

Ю. В. Ащеулов и В. И. Сузанов

Проведен теоретический анализ процесса оптического обесцвечивания фотохромного стекла. Выведены соотношения, описывающие кинетику распределения коэффициента поглощения по глубине образца. Экспериментальная проверка выведенных соотношений показала их пригодность для практических расчетов.

В последнее время проводятся интенсивные исследования новых светочувствительных сред, пригодных для регистрации голограмм. К числу таких материалов относятся фотохромные стекла, которые обладают целым рядом преимуществ по сравнению с высокоразрешающими фотопластинками. Они не требуют химической обработки после экспонирования, не подвержены усадке и обладают значительной толщиной, что делает их особенно привлекательными для регистрации трехмерных голограмм.

Под действием коротковолнового излучения в длинноволновой области спектра фотохромного стекла появляется дополнительная полоса поглощения — происходит активация стекла [1]. Под действием длинноволнового излучения эта добавочная полоса поглощения исчезает — наблюдается процесс оптического обесцвечивания стекла [2]. Таким образом, запись голограмм можно осуществлять либо коротковолновым излучением с использованием процесса активации стекла, либо длинноволновым излучением, производя оптическое обесцвечивание предварительно активированного образца.

Настоящая работа посвящена исследованию процесса записи трехмерных голограмм с использованием оптического обесцвечивания фотохромного стекла. В первой части излагаются результаты исследования процесса оптического обесцвечивания фотохромного стекла, выводятся и экспериментально подтверждаются соотношения, определяющие кинетику распределения коэффициента поглощения по глубине стекла. Далее, во второй части, на основе этих соотношений анализируется процесс записи голограмм на фотохромном стекле.

Рассмотрим процесс оптического обесцвечивания фотохромного стекла. Предположим, что каждый светочувствительный центр фотохромного стекла может находиться в двух состояниях — активированном и неактивированном. Пусть на предварительно равномерно активированный образец фотохромного стекла падает длинноволновое излучение интенсивностью  $I_0$ . Под действием этого излучения в единичный промежуток времени каждый светочувствительный центр с вероятностью  $w$  может перейти из активированного состояния в неактивированное. Предположим, что число таких индуцированных переходов, происходящих под действием обесцвечивающего излучения, пропорционально концентрации активированных центров  $n_a$  и интенсивности излучения  $I$  в данном сечении об-

разца<sup>1</sup>. Одновременно происходит термическое обесцвечивание фотохромного стекла, в процессе которого каждый светочувствительный центр с вероятностью  $w_t$  может самопроизвольно перейти в неактивированное состояние. С учетом этого изменение концентрации активированных центров в данном сечении образца в единичный промежуток времени может быть описано формулой

$$\frac{dn_a}{dt} = -n_a [\alpha w I(x, t) + w_t], \quad (1)$$

где  $\alpha$  — коэффициент пропорциональности,  $x$  — расстояние рассматриваемого сечения от поверхности образца.

Предположим, что коэффициент поглощения  $k$  стекла в длинноволновой области спектра пропорционален концентрации активированных центров. Учитывая, что интенсивность света в данном сечении образца определяется законом Бугера,

$$\frac{dk}{dt} = -k \left[ \alpha w I_0 e^{-\int_0^x k dx} + w_t \right]. \quad (2)$$

По физическому смыслу зависимость коэффициента поглощения стекла от времени должна описываться функцией, непрерывной вместе со своими производными. Поэтому решение уравнения (2) может быть представлено в виде ряда

$$k(x, t) = k(x, 0) + \sum_1^{\infty} \frac{k^{(n)}(x, 0)}{n!} t^n. \quad (3)$$

Значения производных  $k^{(n)}(x, 0)$  в начальный момент времени можно непосредственно определить с помощью (2) и заданных начальных условий. Однако вычисление точного значения коэффициента поглощения стекла по формуле (3) не может быть выполнено без применения электронных вычислительных машин. В связи с этим найдем приближенное решение уравнения (2).

Прежде всего отметим, что зависимость коэффициента поглощения стекла от времени наиболее просто выражается для поверхностных слоев стекла. Интегрируя (2), при  $x=0$  получим

$$k_n = k_0 e^{-(\alpha w I_0 + w_t)t}, \quad (4)$$

где  $k_0$  — значение коэффициента поглощения в начальный момент времени. Очевидно, что оптическое обесцвечивание в глубине образца будет происходить медленнее, чем на поверхности из-за постоянного ослабления излучения по мере его распространения внутри образца. Допустим, что интенсивность света в данном сечении образца определяется коэффициентом поглощения на его поверхности, т. е.

$$I = I_0 e^{-\int_0^x k_n dx}. \quad (5)$$

Действительное значение интенсивности света в любом сечении образца несколько меньше чем то, которое определяется формулой (5). Поэтому принимая такое допущение, мы получим заниженные значения коэффициента поглощения стекла. Очевидно, что отклонение истинных данных от расчетных будет тем больше, чем больше толщина образца и время действия обесцвечивающего излучения.

<sup>1</sup> В приближении малых времен действия обесцвечивающего излучения такое предположение будет справедливо для любого порядка кинетики.

Подставляя (5) и (2) и произведя интегрирование, получим

$$k = k_0 e^{-(\alpha I_0 w + w_f)t + \frac{\alpha I_0 w}{\alpha I_0 w + w_f} \sum_1^{\infty} \frac{(-k_0 x)^n}{n n!} [e^{-(\alpha I_0 w + w_f) n t} - 1]} \quad (6)^2$$

Сравнивая (4) и (6), нетрудно заметить, что коэффициент поглощения внутри стекла отличается от коэффициента поглощения на его поверхности. Причем, чем больше значение коэффициента поглощения стекла в начальный момент времени, тем отчетливей будет выражена неравномерность распределения коэффициента поглощения по глубине стекла в процессе оптического обесцвечивания. Для практических расчетов формулу (6) удобно записать в виде

$$k = k_0 e^{\frac{\alpha I_0 w}{\alpha I_0 w + w_f} \{-Ei[-k_0 x] + Ei[-k_0 x e^{-(\alpha I_0 w + w_f)t}] - w_f t\}} \quad (7)$$

Здесь  $Ei(-y)$  — интегральная показательная функция, значения которой при заданном аргументе можно легко найти с помощью таблицы [3].

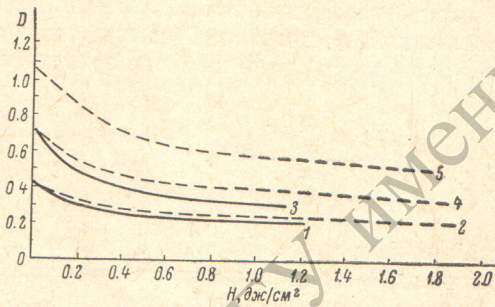


Рис. 1. Зависимость оптической плотности образцов стекла различной толщины от экспозиции.

1 —  $d=1.1$  мм,  $I_0=2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>; 2 —  $d=1.1$  мм,  $I_0=4 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>; 3 —  $d=2.1$  мм,  $I_0=2 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>; 4 —  $d=2.1$  мм,  $I_0=4 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>; 5 —  $d=3.2$  мм,  $I_0=4 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.

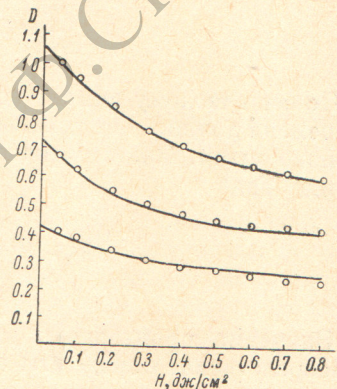


Рис. 2. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (кружки) значения оптической плотности образцов фотохромного стекла.

$I_0=4 \cdot 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>.  $d$  (мм) = 5 мм.

Для экспериментальной проверки полученных соотношений были изготовлены образцы стекла одного и того же типа, которые отличались друг от друга толщиной. Эти образцы, предварительно активированные в световой лампе ДРШ-250, подвергались оптическому обесцвечиванию излучением He—Ne лазера. При этом исследовалась зависимость оптической плотности образца от времени экспонирования при различной мощности обесцвечивающего излучения. Результаты измерений приведены на рис. 1. Нетрудно заметить, что при оптическом обесцвечивании фотохромного стекла закон взаимозаменяемости не выполняется. При одной и той же экспозиции оптическая плотность образца тем больше, чем больше мощность падающего на него излучения. Это, как уже отмечалось, объясняется действием термического обесцвечивания. Отклонение от закона взаимозаменяемости тем заметнее, чем больше толщина образца.

Поскольку производить вычисление оптической плотности фотохромного стекла с помощью формулы (7) крайне сложно, сопоставление экспериментальных и теоретических данных проводилось для малых времен действия обесцвечивающего излучения. В этом случае (7) может быть преобразовано к виду

$$k = k_0 e^{-(\alpha I_0 w e^{-k_0 x} + w_f)t} \quad (8)$$

<sup>2</sup> Выражение (6) выведено в предположении, что коэффициент поглощения полностью обесцвеченного стекла пренебрежимо мал, что в большинстве случаев выполняется на практике.

Проинтегрировав (8) по толщине стекла, нетрудно найти выражение для оптической плотности образца

$$D = -0.434e^{-w_t t} [\text{Ei}(-awI_0 t e^{-k_0 d}) - \text{Ei}(-awI_0 t)]. \quad (9)$$

Входящие в (9) параметры  $W_t$  и  $aw$  были определены, исходя из следующих соображений.

Пусть при действии излучения интенсивностью  $I_{01}$  образец стекла толщиной  $d$  достиг плотности  $D_1$  за время  $t_1$ , а при действии излучения интенсивностью  $I_{02}$  — плотности  $D_2$  за время  $t_2$ . Если  $I_{01}t_1 = I_{02}t_2$ , то из (9) получим

$$w_t = \frac{\ln \frac{D_1}{D_2}}{t_2 - t_1}. \quad (10)$$

С помощью (10) и экспериментальных кривых, изображенных на рис. 1, нетрудно вычислить  $w_t$ . В данном случае  $w_t = 2 \cdot 10^{-3}$  сек.<sup>-1</sup>. Для определения  $aw$  была вычислена зависимость разности интегральных показательных функций, входящих в (9), от параметра  $p = awI_0 t$  при заданной начальной плотности и толщине образца. Затем эта разность была определена для заданного  $t$ , исходя из экспериментально измеренного значения  $D$  и найденной величины  $w_t$ . Сопоставляя результаты вычислений, находим  $aw$  как частное от деления соответствующего значения параметра  $p$  на произведение  $I_0 t$ , которое нам известно. Определенное таким способом значение  $aw$  для данного типа стекла оказалось равным 1.6 см<sup>2</sup>/дж. Определив  $w_t$  и  $aw$ , мы рассчитали по формуле (9) зависимость оптической плотности  $D$  от времени экспонирования для образцов различной толщины. Результаты этих вычислений изображены на рис. 2 кружками. На этом же рисунке сплошными линиями изображены аналогичные зависимости, определенные экспериментально. Как видно из рис. 2, расчетные данные находятся в хорошем соответствии с результатами эксперимента. На основании этого можно сделать вывод, что выражение (7), из которого (9) было получено как частный случай для малых  $t$ , удовлетворительно описывает кинетику распределения коэффициента поглощения по глубине стекла в процессе обесцвечивания. Поэтому выведенные соотношения могут быть использованы для анализа процесса записи и реконструкции объемных голограмм на фотохромном стекле.

#### Литература

- [1] G. K. Megl'a. Appl. Opt., 5, 6, 1966.
- [2] В. А. Цехомский. Опт.-мех. промышл., № 7, 58, 1967.
- [3] Е. Янке, Ф. Эмде. Таблицы функций. Гостехиздат, М.—Л., 1948.

Получило в Редакцию 10 августа 1971 г.