Краткие сообщения по физике № 1 1979

МОДОВАЯ ТЕОРИЯ ПРОСВЕТНЫХ ОБЪЕМНЫХ ГОЛОГРАММ С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ЗАПИСИ

Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов

УДК 535.36

Рассмотрена модовая теория объемных просветных голограмм с учетом поглощения при записи. Вычислена дифракционная эффективность голограммы для случаев плоской опорной волны и кодированной опорной волны.

Модовая теория восстановления изображения просветными голограммами в настоящее время разработана достаточно подробно /I-4/. Однако до сих пор поглощение материалом голограммы записывающего излучения не учитывалось. В настоящем сообщении мы покажем, как модифицируются результаты при учете этого фактора. Для того, чтобы наиболее отчетливо выделить влияние поглощения при записи, мы рассмотрим случай, когда нет "спектральных" искажений (см. /2,4/).

Записывающее поле в объеме голограммы $E_0(\vec{r},z)$ представим в виде

$$E_0(\vec{r},z) = e^{ikz} \sum_{\vec{q}} C(\vec{q}) \exp\left\{i\vec{q}\vec{r} - i\vec{q}^2 z/2k - \alpha_0 z/2\right\}. \qquad (I)$$

Тогда в рамках модовой теории можно пренебречь небрэгговскими перерассеяниями /I-4/, и для поля в голограмме $E(\vec{r},z)$ в процессе восстановления

$$E(\vec{r},z) = e^{ikz} \sum_{\vec{q}} S(\vec{q},z) \exp\left\{i\vec{q}\vec{r} - i\vec{q}^2 z/2k\right\} \qquad (2)$$

получим уравнения

$$\partial S/\partial z + \left[\varkappa(I - |C(\vec{q})|^2)\exp(-\alpha_0 z) + \alpha/2\right] S(\vec{q},z) = -\varkappa D \exp(-\alpha_0 z) C(\vec{q});$$
$$D(z) = \sum_{\vec{q}} C^*(\vec{q}) S(\vec{q},z). \qquad (3)$$

Здесь $I = \langle |E_0|^2 \rangle = \sum\limits_{\vec q} |C(\vec q)|^2$ – средняя по входному сечению голограммы интенсивность записывающего поля, α – коэффициент поглощения обработанной, но не экспонированной голограммы. Кроме того, в (3) введено обозначение $\varkappa = \varkappa' + i\varkappa''$ для коэффициента характеризующего локальные изменения показателя преломления $\delta n(\vec r, z)$ и коэффициента поглощения $\delta\alpha(\vec r, z)$ в результате экспозиции и обработки:

$$\varkappa |E_0(\vec r, z)|^2 = - i(\omega/c)\delta n(\vec r, z) + (1/2)\delta\alpha(\vec r, z). \qquad (4)$$

Система мод для уравнения (3) при $\alpha_0 = 0$ подробно исследована в /I–4/; там же приведены выражения для дифракционной эффективности объемных просветных голограмм. Аналогично, модой голограммы (модой уравнения (3)) мы будем называть такое (вообще говоря, приближенное) решение волновой задачи, пространственная структура которого подчиняется волновому уравнению без неоднородностей, а весь сложный эффект многократного перерассеяния сказывается лишь в виде экспоненциального множителя $\exp\int\mu(z)dz$. Отличие состоит лишь в том, что теперь мы допускаем зависимость величины μ от координаты z.

Нетрудно понять, что поперечная пространственная структура мод, связанных с уравнением (3), вообще не зависит от величин α_0, α и поэтому система мод совпадает с системой, найденной и подробно рассмотренной в /I,4/. Единственное изменение состоит в том, что теперь имеем

$$\begin{aligned} S(\vec q, z) &= S(\vec q)\exp\int\mu(z)dz, \\ \mu_i(z) &= -\alpha/2 + \tilde\mu_i \exp(-\alpha_0 z), \end{aligned} \qquad (5)$$

где не зависящая от z величина $\tilde\mu_i$ есть собственное значение для соответствующей моды при $\alpha_0 = \alpha = 0$. Явные выражения для $\tilde\mu_i$ зависят от вида опорной волны (плоская или с широким угловым спектром), от соотношения интенсивностей опорной и объектной волн и от типа регистрирующей среды, см. /I–4/. С учетом (4), (5), полученные ранее выражения для дифракционной эффективности $\eta(z)$ модифицируются по следующему закону: в формулах для $\eta(z)$ нужно сделать подстановку

$$z \to (1 - \exp(-\alpha_0 z))/\alpha_0 \qquad (6)$$

и после этого полученные выражения умножить на $\exp(-\alpha z)$. Приведем здесь окончательные выражения для скалярной задачи [*)]. Для случая записи и восстановления опорной волной с широким угловым спектром ("кодированной" опорной волной)

$$\eta(z) = \frac{4I_A I_B}{(I_A + I_B)^2} \exp\left\{-\alpha z - 3\mathrm{Re}\,\varkappa I\left[1 - \exp(-\alpha_0 z)\right]/\alpha_0\right\} \times$$

$$\times \left|\mathrm{sh}(\varkappa/2\alpha_0) I\left[1 - \exp(-\alpha_0 z)\alpha_0\right]\right|^2. \qquad (7а)$$

Для случая плоской опорной волны

$$\eta(z) = \frac{4I_B}{I_A + 4I_B} \exp\left\{-\alpha z - \mathrm{Re}\,\varkappa(3I_A + 2I_B)(1 - \exp(-\alpha_0 z))/\alpha_0\right\} \times$$

$$\times \left|\mathrm{sh}(\varkappa/2\alpha_0)\sqrt{I_A^2 + 4I_A I_B}\left[1 - \exp(-\alpha_0 z)\right]\right|^2. \qquad (7б)$$

Здесь I_A, I_B - интенсивности соответственно объектной (А) и опорной (В) волн; $I = I_A + I_B$.

Дифракционная эффективность, определяемая формулами (7а,б), понимается как отношение энергии части поля с пространственной структурой объектной волны на выходе из голограммы (в сечении $z = \mathrm{const}$) к энергии восстанавливающей опорной волны на входе (в сечении $z = 0$). Формулы (7а,б) содержат тривиальный множитель $\exp(-\alpha z)$, описывающий затухание интенсивности волны в обработанном веществе неэкспонированной голограммы. Для обсуждения специфических особенностей, связанных с поглощением при записи ($\alpha_0 \neq 0$) положим $\alpha = 0$. Поглощение при записи приводит к тому, что интенсивность поля (а значит, и глубина модуляции диэлектрической проницаемости) меняется по закону $\exp(-\alpha_0 z)$. Поэтому в обработанной голограмме по прохождении длины $z \sim \alpha_0^{-1}$ восстанавливающие волны практически перестают взаимодействовать, и дифракционная эффективность перестает зависеть от глубины голограммы z.

Таким образом, в настоящей работе количественно учтено влия-

[*)] Отметим, что эти же методы непосредственно переносятся на формулы модовой теории для просветной поляризационной голографии /3/ и для задачи о спектральной селективности просветных голограмм /2/.

ние поглощения при записи излучением с протяженным угловым спектром на процесс восстановления просветных объемных голограмм с высокой дифракционной эффективностью.

Поступила в редакцию
23 октября 1978 г.

Литература

1. В. Г. Сидорович, ЖТФ, 46, 1306 (1976).
2. В. Г. Сидорович, В. В. Шкунов, Оптика и спектроскопия, 44, 1001 (1978).
3. Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов, Препринт ФИАН № 57, 1978 г.
4. Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов, Препринт ФИАН № 170, 1978 г.