

[4] Д е Ж е н П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 400 с.

Институт физики АН УССР,
Киев

Поступило в Редакцию
28 марта 1988 г.
В окончательной редакции
30 сентября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 5
07; 12

12 марта 1989 г.

ПОЛУЧЕНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ГОЛОГРАММ С ПРЕДЕЛЬНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

М.Д. Л а в р е н т о в и ч, И.И. П е ш к о, А.В. С а в ч у к

В настоящее время продолжается интенсивный поиск бессеребряных сред, пригодных для голографической записи информации. В качестве таковых успешно используется ряд сильнопоглощающих тонкопленочных материалов, в частности металлические пленки [1]. Обладая весьма значительными достоинствами (дешевизна, хорошая технологичность, большой коэффициент поглощения α в оптической области), они имеют довольно низкую чувствительность [2], либо не позволяют записывать голограммы с высокой эффективностью. В данном сообщении описан метод одновременного достижения максимально возможных значений чувствительности к записи и дифракционной эффективности стационарных рельефных голографических решеток при формировании их в тонких металлических пленках.

Рассмотрим, какими параметрами среды определяется чувствительность тонкого металлического слоя, нанесенного на диэлектрическую подложку. При записи рельефной голограммы материал регистрирующей среды нагревается до температуры фазового перехода (плавления, испарения) и затем удаляется с подложки в местах воздействия максимумов световой интерференционной картины. Чувствительность его тем выше, чем больше коэффициент поглощения и чем меньше энергии требуется для нагрева и удаления вещества пленки. При поглощении света в среде его интенсивность I экспоненциально уменьшается с ростом толщины, а объем нагреваемой области линейно растет. Значение поглощенной энергии E_a растет медленнее, чем величина объема. При этом чувствительность среды уменьшается при увеличении толщины пленки d , несмотря на уменьшение общей прозрачности:

$$E_a = \int_0^{\tau} \int_0^d \alpha I_0 e^{-\alpha x} dx dt = E_0 (1 - e^{-\alpha d}), \quad (1)$$

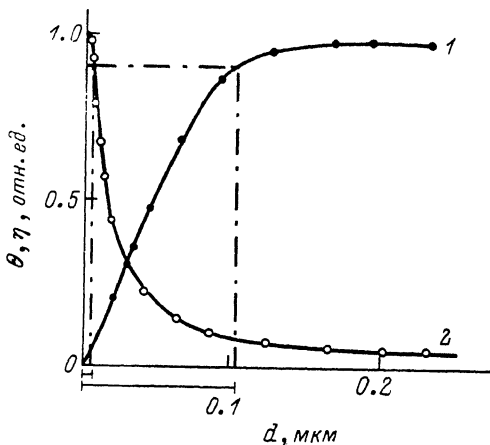


Рис. 1. Расчетные зависимости дифракционной эффективности (1) и чувствительности (2) голограммы, записанной в пленках золота ($\alpha = 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, $n = 0.47$), от толщины пленки.

где E_0 - плотность энергии импульса света длительностью τ . В случае, когда τ больше времени диффузии тепла в глубь пленки, но меньше времени тепловой диффузии между штрихами интерференционной картины (обычно выполняемые условия), температура слоя при облучении изменяется на величину

$$\Delta T = \frac{E_0(1 - e^{-\alpha d})}{c\rho Sd}, \quad (2)$$

где c - теплоемкость, ρ - плотность вещества, S - площадь освещенной поверхности. Величина ΔT пропорциональна чувствительности поглощающей пленки. При $d \rightarrow 0$ ΔT стремится к максимальному значению $\frac{\alpha E_0}{c\rho S}$. Чувствительность слоя минимально возможной толщины максимальна, несмотря на минимум поглощенной энергии. Дополнительно увеличить чувствительность слоя можно, предварительно нагревая его [3] и вторично освещая со стороны прозрачной подложки. В этом случае в области между слоем и подложкой происходят явления взрывного характера, и наблюдается удаление пленки еще до момента ее полного испарения. С учетом оптимизации по теплофизическим и оптическим параметрам наиболее подходящими для записи являются пленки Al , Bi , Au , W [4].

Рассмотрим, какую дифракционную эффективность можно получить при записи решеток в металлических пленках. Стационарные рельефные голограммы в поглощающем слое, нанесенном на прозрачную подложку, обычно носят амплитудный характер из-за практически полного поглощения оптического излучения в слоях металлов более 0.1 мкм. Однако при толщинах в десятки нанометров пленка еще

достаточно прозрачна, голограмма будет амплитудно-фазовой с большей, чем в предыдущем случае, эффективностью.

Найдем оптимальную толщину рельефной голограммы с учетом параметров материала пленки.

Для периодической амплитудно-фазовой решетки с прямоугольным профилем штриха дифракционная эффективность η определяется отношением

$$\eta_m = \frac{b_m^2}{4I_0},$$

где

$$b_m = \frac{1}{l} \int_{-l}^0 C_1 \sin \frac{m\pi x}{l} dx + \frac{1}{l} \int_0^l C_2 \sin \frac{m\pi x}{l} dx = \frac{2(C_2 - C_1)}{\pi m};$$

$$C_1 = \sqrt{I_0 l^{-\alpha d}} e^{-iknd}; \quad C_2 = \sqrt{I_0} e^{-ikd};$$

b_m^2 - квадрат коэффициента разложения в ряд Фурье функции вида

$$f(x) = \begin{cases} C_1 & -l < x < 0 \\ C_2 & 0 < x < l, \end{cases} \quad (5)$$

k - волновой вектор, для считывающего излучения; m - порядок дифракции; n - показатель преломления материала.

Для первого порядка дифракции η_1 имеет вид:

$$\eta_1 = \frac{1}{\pi^2} \left\{ 1 + e^{-\alpha d} - 2\sqrt{e^{-\alpha d}} \cos[kd(n-1)] \right\}. \quad (6)$$

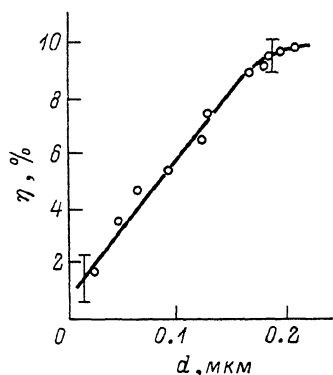
Из равенства нулю производной $\frac{\partial \eta_1}{\partial d}$ получаем условие, определяющее связь параметров материала, при котором дифракционная эффективность будет максимальна:

$$\cos[kd(n-1)] + \frac{2k}{\alpha} (n-1) \sin[kd(n-1)] = \sqrt{e^{-\alpha d}}. \quad (7)$$

Из расчетной зависимости дифракционной эффективности η_1 от толщины для пленки золота ($\alpha = 6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$, $n = 0.47$) (рис. 1) видно, что η_{1max} наблюдается при значениях d примерно в 30 раз больших по сравнению с толщиной пленки, при которой чувствительность близка к предельно возможной.

Таким образом, максимальные значения чувствительности и дифракционной эффективности голограмм достигаются при существенно различных толщинах пленок. Поэтому наиболее выгодным с точки зрения оптимизации по обоим параметрам является двухэтапный процесс с записью голограммы на тонкой пленке ($d = 1-10 \text{ нм}$) и

Рис. 2. Экспериментальная зависимость дифракционной эффективности голограммы, записанной в пленках золота, от толщины пленки при обработке голограммы методом электролитического осаждения.



последующим увеличением толщины до значения, при котором эффективность максимальна. Для металлов эту стадию можно выполнить путем электролитического осаждения металла на готовую голограмму.

Запись стационарных голограмм производилась по обычной двухлучевой схеме излучением рубинового лазера с модулированной добротностью на тонкой металлической пленке, нанесенной на диэлектрическую подложку. В качестве регистрирующего материала использовались пленки золота, никеля и хрома, нанесенные на стеклянные и ситаловые подложки, площадью 5 см^2 , толщиной 5 – 15 нм. Пленки получались методом вакуумного напыления. Из-за малой толщины пленок полученные значения дифракционной эффективности низки и составляют доли процента. Для увеличения глубины рельефа образец с записанной голограммой помещали в электролитическую ванну, где происходило осаждение металла на удаленные участки пленки.

В результате наращивания штрихов решетки глубина рельефа увеличивалась до величины, при которой достигались значения дифракционной эффективности в пределах 10–15% (рис. 2). Таким образом, получено максимальное увеличение дифракционной эффективности в 50 раз при сохранении минимальных плотностей энергии записи рельефных голограмм.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Комар А.П., Стабников М.В., Турухано Б.Г., Турухано Н. // Оптика и спектроскопия. 1967. Т. 23. В. 5. С. 827–828.
- [2] Amodei J.J., Mazrich R.S. // Appl. Phys. Lett. 1969. V. 15. N 2. P. 45–46.
- [3] Пешко И.И., Хижняк А.И. // УФЖ. 1984. Т. 29. № 9. С. 1316–1321.
- [4] Гродзинская М.Д., Пешко И.И., Салькова Е.Н., Хижняк А.И. // Квантовая электроника. 1987. В. 32. С. 67–75.

Институт физики
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.
В окончательной редакции
8 января 1989 г.