

УДК 535.317.1

НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАПИСЬ ТОНКИХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНЫХ РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕДАХ

Бенкен А. А., Михальченко А. П., Чураев А. Л.

Теоретически и экспериментально рассмотрена запись тонких фазовых голограмм на галогидосеребряных регистрирующих средах. На примере промышленных слоев ВР-II и ЛОИ-2 получена фазовоэкспозиционная характеристика (ФЭХ) таких голограмм, теоретически учтено влияние нелинейности ФЭХ фотослоев на величину максимально достижимых значений дифракционной эффективности (ДЭ); проведен расчет зависимости ДЭ от экспозиции; показано, что при записи диффузно-рассеивающих объектов максимальная величина ДЭ составляет 26,5%; получены приближенные аналитические выражения, позволяющие с хорошей точностью определять ДЭ тонких голограмм в наиболее часто встречающемся на практике случае малого соотношения пучков.

Широкое использование тонких фазовых голограмм в ряде приложений голографии, а также в голографической интерферометрии вызвало значительный интерес исследователей к проблеме записи информации на тонких носителях. В [1-5] были рассмотрены отдельные вопросы записи тонких фазовых голограмм зеркально-отражающих и диффузно-рассеивающих объектов, однако отсутствие данных, позволяющих теоретически или экспериментально обосновать вид функциональной зависимости между фазовым набегом и экспозицией для исследуемой среды — фазоэкспозиционной характеристики (ФЭХ), не давало возможности применить полученные результаты к реальным регистрирующим средам.

В [6, 7] была исследована запись толстослойных фазовых голограмм на галогидосеребряных фотослоях, предложена методика определения их ФЭХ, проведен расчет дифракционной эффективности (ДЭ), а также сформулированы основные требования, которым должны удовлетворять фотослои для получения на них необходимых величин ДЭ. В данной работе этот подход распространен на запись тонких фазовых голограмм, где на примере выпускаемых в промышленности фотослоев ВР-II и ЛОИ-2 получен вид ФЭХ таких голограмм, теоретически учтено влияние нелинейности ФЭХ фотослоя на величину максимально достижимых значений ДЭ, проведено сопоставление точного и приближенного расчетов ДЭ тонких фазовых голограмм диффузно- и зеркально-отражающих объектов.

ФЭХ фотопластинок ЛОИ-2 и ВР-II определялись по методике, предложенной в [6], на основе экспериментальных зависимостей ДЭ голограмм диффузного и зеркального объектов от экспозиции в опорном пучке E при малых отношениях опорного к объектному пучков M ($M \leq 0.03 \div 0.1$) и значениях ДЭ $\eta \leq 5 \div 10$ %. Голограммы регистрировались в симметричной схеме записи при постоянном M излучением He-Ne- и Ar-лазеров на длинах волн 0.6328 и 0.5145 мкм для пластинок ЛОИ-2 и ВР-II соответственно. Угол схождения пучков составлял около 2° , что обеспечивало запись интерференционной картины с несущей пространственной частотой ~ 55 мм $^{-1}$ для $\lambda = 0.6328$ мкм и ~ 67 мм $^{-1}$ при $\lambda = 0.5145$ мкм. Одновременная обработка всех экспонированных фотослоев позволила снизить влияние нестабильности ее условий на воспроизводимость получаемых результатов.

Пластинки обрабатывались в проявителе Д-82 в течение 8 мин при $t=20^\circ\text{C}$, а затем отбеливались по рецепту [7]. Полученные голограммы имели высокую прозрачность (пропускание по интенсивности составляло 0.82—0.86 и практически не зависело от экспозиции, что позволило считать их чисто фазовыми).

В [6] было показано, что при записи толстослойных пропускающих голограмм для широкого класса голографических фотослоев (ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ, ИАЭ) ФЭХ имеет вид

$$\varphi(E) = \varphi_0 [1 - \exp(-E/E_0)], \quad (1)$$

где φ_0 — предельное значение фазового набега для исследуемого фотослоя; E_0 — экспозиция, соответствующая максимуму ДЭ при малом отношении объектного к опорному пучков. Фазоэкспозиционные характеристики фотослоев

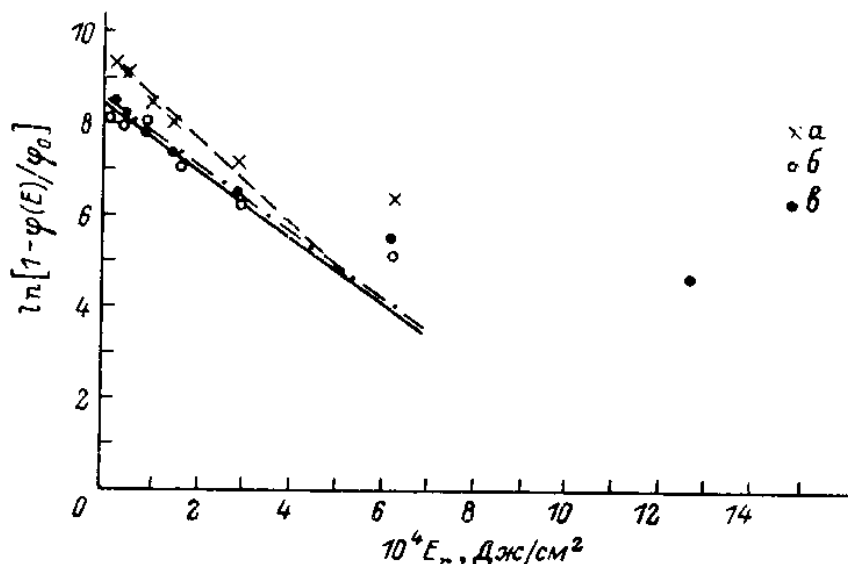


Рис. 1. ФЭХ фотослоев ВР-П и ЛОИ-2: а, б — ЛОИ-2 с иммерсией и без иммерсии соответственно, в — ВР-П. Отношение пучков $M=1:100$.

ВР-П и ЛОИ-2, экспериментально найденные по методике [6], приведены на рис. 1 в системе координат $y = \ln \left[1 - \frac{\varphi(E)}{\varphi_0} \right]$, E_r (E_r — экспозиция в опорном пучке), в которой зависимость (1) представляет собой прямую. Из рис. 1 видно, что ФЭХ для толстослойных голограмм удовлетворительно совпадают с зависимостью (1) вплоть до величин $E/E_0 \leq 3$ как в случае использования при восстановлении голограмм иммерсии (ортоксилол) для устранения поверхностного рельефа, так и без нее. Для исследованных типов фотоматериалов при указанном способе их химико-фотографической обработки величины E_0 и φ_0 принимают значения $1.0 \cdot 10^{-4}$ Дж/см² и 3.0 рад для ЛОИ-2 и $7.0 \cdot 10^{-5}$ Дж/см² и 3.3 рад для ВР-П.

В целом полученный результат подтверждает правильность предложенной в [6] модели галогеносеребряного фотослоя, из которой следует зависимость ФЭХ от экспозиции вида (1) и правомерность использованной в [6] аппроксимации ФЭХ при рассмотрении записи тонких фазовых голограмм.

ДЭ тонких фазовых голограмм и фф узно-отражающих объектов

Как известно [3, 5], ДЭ тонкой фазовой голограммы γ , двух плоских волн определяется первой гармоникой комплексной амплитуды ее пропускания T

$$\eta = T_1 T_1^*, \quad T = T_0 \exp[-i\varphi(\epsilon_r, \epsilon_s, \nu)], \quad (2)$$

где T_0 — модуль амплитудного пропускания голограммы T ; $\varphi(\epsilon_r, \epsilon_s, \nu)$ — некоторая функция, зависящая как от экспозиции в опорном ϵ_r и объектном пучках ϵ_s ($\epsilon_r, \epsilon_s = E_{r,s}/E_0$), так и от пространственной частоты записи ν . При записи тонкослойной пропускающей голограммы с учетом того, что распределение в пло-

скости фотослоя описывается как $\varepsilon = \varepsilon_r (1+m) + 2\sqrt{m} \varepsilon_r \cos kv$ ($k=2\pi/\lambda$), для T_1 имеем

$$T_1 = T_0 \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \exp(-i\varphi_0) \exp\{i\varphi_0 \exp[-\varepsilon_r(1+m)] \exp(-2\varepsilon_r \sqrt{m}) \cos kv\} \cos kv dv. \quad (3)$$

Выражение для ДЭ голограммы диффузно-рассеивающего объекта с релеевским распределением амплитуды объектной волны можно записать в виде [3, 8]

$$\eta_{1, \varrho} = \frac{1}{M} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{m}{M}\right) T_1(\varepsilon_r, m) T_1^*(\varepsilon_r, m) dm. \quad (4)$$

В формулах (3) и (4) M представляет собой среднее по сечению голограммы соотношение пучков, а m — переменную величину этого значения (для зеркального объекта $M \equiv m$).

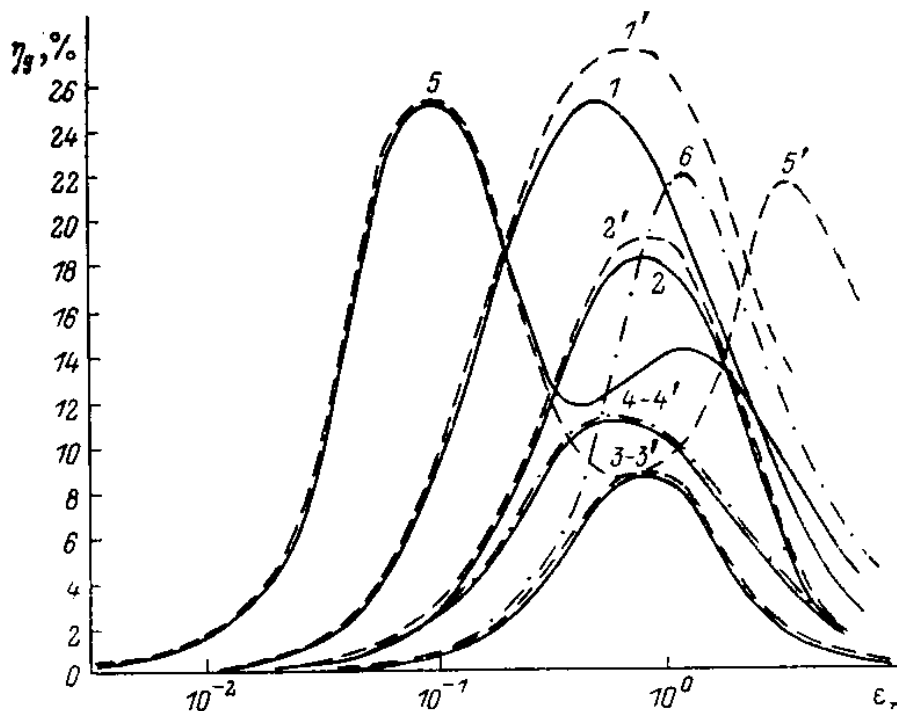


Рис. 2. Теоретические зависимости ДЭ от экспозиции: для $\varphi_0=4$ рад и $M=1; 0.5; 0.1$ (кривые 1-3, 1'-3'); для $M=1$, $\varphi_0=2, 4, 10$ рад (кривые 4-4', 1-1', 5-5'); 6 — линейное приближение ФЭХ.

В практически важном случае, когда запись голограмм осуществляется при малом соотношении пучков M (например, при съемке крупногабаритных или удаленных диффузно-рассеивающих объектов), выражение для ДЭ можно получить в аналитической форме. Разлагая в (2) экспоненциальный член в ряд по функциям Бесселя J_1 и I_1 и сохраняя лишь первый член разложения, получим, что величина ДЭ голограммы зеркально-отражающего объекта

$$\eta_1 \approx T_0^2 J_1^2 \{2\varphi_0 \exp[-\varepsilon_r(1+m)] I_1(2\varepsilon_r \sqrt{m})\}, \quad (5)$$

а ДЭ диффузно-рассеивающего

$$\begin{aligned} \eta_{1, \varrho} &\approx \frac{T_0^2}{M} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{m}{M}\right) J_1^2 \{2\varphi_0 \exp[-\varepsilon_r(1+m)] I_1(2\varepsilon_r \sqrt{m})\} dm = \\ &= T_0^2 J_1^2 \{2\varphi_0 \exp[-\varepsilon_r(1+m)] I_1(2\varepsilon_r \sqrt{m})\}, \end{aligned} \quad (6)$$

так как при малых отношениях пучков $M \ll 1$ функция Бесселя в подынтегральном выражении слабо меняется при изменении m по сравнению с экспо-

нентой. Таким образом при малых отношениях пучков изменение ДЭ голограмм диффузных и зеркальных объектов в широком диапазоне экспозиций описывается одной и той же функцией (6), отличающейся от хорошо известного линейного приближения аргументом, учитывающим изменение наклона ФЭХ с ростом экспозиции. На основании выражений (3)—(4) был проведен численный расчет ДЭ тонких фазовых голограмм диффузно-рассеивающих и зеркально-отражающих объектов в широком диапазоне экспозиций опорного пучка.

На рис. 2 приведены результаты расчета ДЭ голограмм диффузно-рассеивающего объекта, выполненного по точным (3), (4) и приближенному (6) выражениям (кривые 1—5 и 1'—5'), а также зависимость ДЭ от экспозиции, рассчитанная в линейном приближении ФЭХ (кривая 6). Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

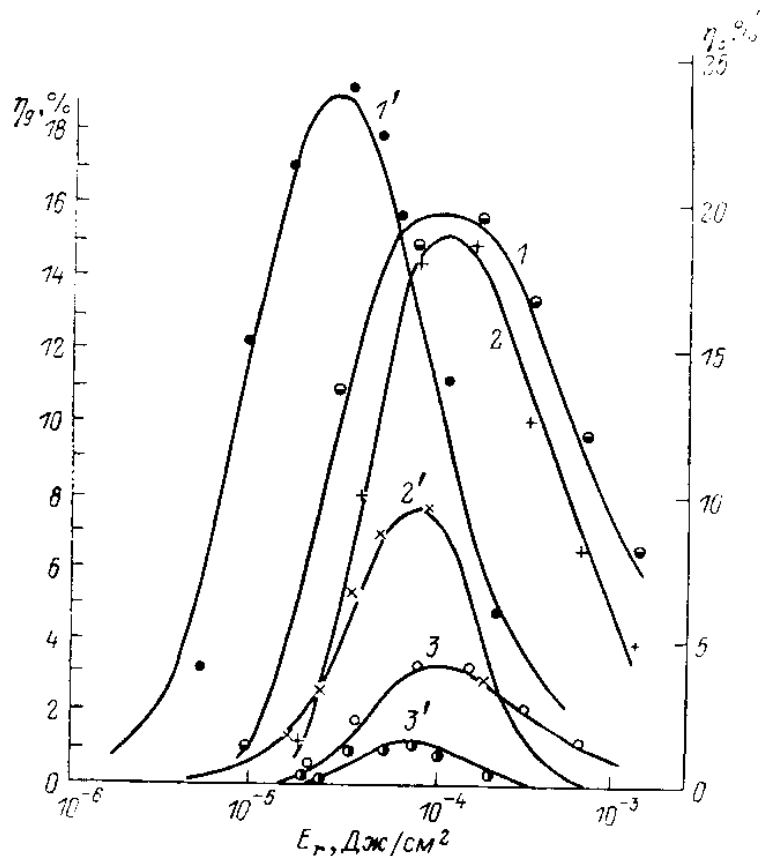


Рис. 3. Экспериментальные зависимости ДЭ от экспозиции тонких голограмм зеркального (ВР-П, кривые 1, 2, 3) и диффузного (ЛОИ-2, кривые 1', 2', 3') объектов для $M=1$; 0.1; 0.01.

1. Максимальное значение ДЭ при записи тонких фазовых голограмм диффузно-рассеивающих объектов на фотоматериалах, описываемых ФЭХ вида (1), составляет 26.5 %. в то время как в случае линейной аппроксимации ФЭХ — 22 % (рис. 2).

2. Приближенный расчет дает завышенные значения ДЭ, особенно при соотношениях пучков, близких к единице, и больших фазовых набегам (до 10 рад), хотя при этом формы кривых зависимости ДЭ от экспозиции достаточно близки между собой (рис. 2, кривые 1—1', 5—5'). Поэтому приближенным аналитическим выражением (6) можно пользоваться для оценки величины ДЭ с точностью 10—15 % при значениях M , не превосходящих 0.2—0.1, и небольших величинах φ_0 (до 2—4 рад, что обычно имеет место для большинства используемых на практике фотоматериалов при стандартных условиях обработки).

3. При отношениях пучков M , близких к единице, для достижения максимума ДЭ на реальных фотоматериалах требуются меньшие величины экспозиций в опорном пучке, чем это следует из приближенного расчета, что можно объяснить уменьшением вклада высших гармоник комплексной амплитуды пропускания голограмм в первый порядок дифракции (рис. 2, кривые 1, 1'). Эксперименты по записи тонких фазовых голограмм для разных соотношений пучков проводились на фотослоях ЛОИ-2 (диффузно-рассеивающий объект)

и ВР-II (зеркально-отражающий объект). Гол로그램 регистрировались и обрабатывались в тех же условиях, что и при определении ФЭХ; соотношение пучков при записи составляло 1, 0.1, 0.01. Полученные экспериментальные данные, а также теоретически рассчитанные зависимости ДЭ от экспозиции представлены на рис. 3, 4.

Как следует из приведенных данных (рис. 3, кривые 1'—3'), для фотослоев ВР-II в случае записи тонких голограмм зеркально-отражающих объектов экспериментальные точки хорошо ложатся на теоретические кривые. Результаты экспериментов по записи голограмм диффузно-рассеивающих объектов на фотослоях ЛОИ-2 (рис. 3, кривые 1—3, рис. 4) хорошо совпадали с расчетом при отношениях пучков $M=0.01 \div 0.1$ и заметно расходились при больших M . Такое расхождение, возможно, обусловлено влиянием на ДЭ голограмм поверхностного рельефа, который, как известно [$8-10$], особенно сильно проявляется на голографических фотослоях при малых пространственных частотах.

Для определения вклада в ДЭ тонких голограмм фазовой модуляции, обусловленной изменением показателя преломления фотослоя, голограмму помещали в кювету, с иммерсией — ортоксиллом, показатель преломления кото-

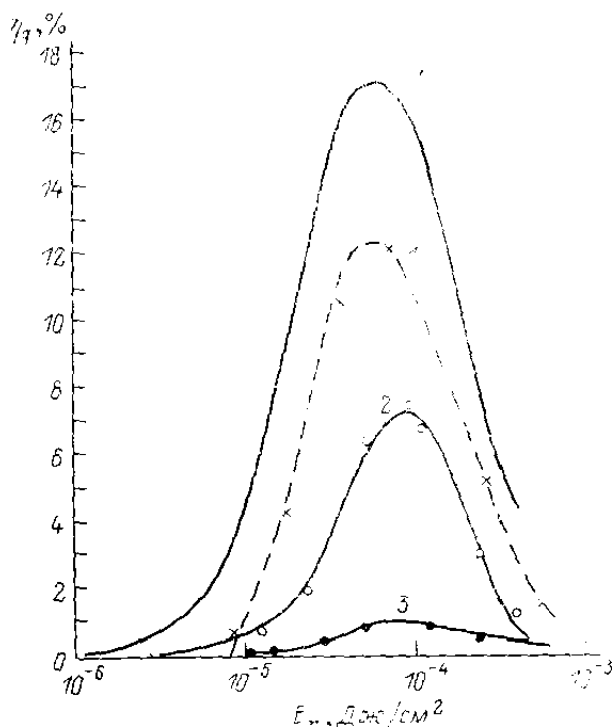


Рис. 4. Экспериментальные зависимости ДЭ от экспозиции тонких голограмм диффузного объекта для $M=1; 0.1; 0.01$, полученные с использованием иммерсии (ЛОИ-2) (кривые 1—3) соответственно; кривая 1 — теоретическая зависимость ДЭ от экспозиции для $M=1$.

рого ($n=1.506$) близок к показателю преломления желатинны ($n=1.520$). Результаты измерения зависимости ДЭ голограмм от экспозиции для разных соотношений пучков с использованием иммерсии представлены наряду с теоретическими кривыми на рис. 4, откуда следует, что расчет хорошо согласуется с экспериментом при $M \leq 0.1$, однако при $M=1$ между ними по-прежнему имеется расхождение до 50%. Последнее обстоятельство указывает на то, что зависимость ДЭ от экспозиции для рельефной голограммы имеет сложный вид, зависящий от соотношения пучков при записи голограммы, что, возможно, обусловлено эффектами проявления в фотослое [$11-13$], однако этот вопрос выходит за рамки данной работы и требует проведения дополнительных исследований. Подводя итог, еще раз отметим, что в ходе проделанной работы была экспериментально найдена ФЭХ тонкослойных фазовых голограмм, записанных на голографических галогеносеребряных фотослоях; проведен расчет зависимости ДЭ от экспозиций; получены приближенные аналитические выражения, позволяющие с хорошей точностью (до 10%) определять величину ДЭ тонких голограмм в наиболее часто встречающемся на практике случае малого соотношения пучков.

Литература

- [1] Локшии В. Н., Семенов Г. Б., Кавтрев А. Ф. // Опт. и спектр. 1979. Т. 36. В. 5. С. 1005—1011.
- [2] Локшии В. Н., Семенов Г. Б. // Материалы IV Всесоюз. школы по голографии. Л., 1973. С. 313—322.
- [3] Upraticks J., Leonard C. D. Characteristics of Dielectric Holograms IBM Journ. Res. and Develop. 1970. V. 14. N 5. P. 527—532.

- [4] Зельдович Б. Я., Лернер П. Б. // Квант. электрон. 1981. Т. 78. № 9. С. 1886—1990.
- [5] Hologram Efficiency and Response // Microwave. 1967. V. 6. N 11. P. 6973.
- [6] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1984. Т. 4. В. 5. С. 677—683.
- [7] Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 2. С. 306—313.
- [8] Smith N. M. // JOSA. 1968. V. 59. N 4. P. 535—539.
- [9] Hannes H. // Optik. 1967/1968. V. 26. N 4. S. 363—380.
- [10] Алексеев-Попов А. В. // Оптическая голография и ее применение. Л., 1977. С. 27—33.
- [11] Smith N. M., Callari C. J. // Phot. Sci. and Eng. 1975. V. 19. N 2. P. 130—135.
- [12] Андреева О. В., Суханов В. И. // Оптическая голография с записью в трехмерных средах. Л., 1986. С. 43—51.
- [13] Biedermann K., Johanson S. // JOSA. 1974. V. 68. N 6. P. 869—870.

Поступило в Редакцию 12 февраля 1988 г.
В окончательной редакции 3 июля 1988 г.
