

УДК 535.317.1

© 1990

## ЗАПИСЬ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОГРАММ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ ЭКСПОЗИЦИИ, СОЗДАВАЕМОЙ ОБЪЕКТНЫМ ПУЧКОМ

*Чураев А. Л., Михальченко А. П.*

Теоретически и экспериментально изучены условия достижения максимальных значений дифракционной эффективности и видности полос при записи двухэкспозиционных интерферограмм, обеспечивающие наилучшее качество восстановленного голографического изображения. Обоснована методика записи пропускающих фазовых голографических интерферограмм крупногабаритных диффузно отражающих объектов импульсными и непрерывными лазерами в условиях ограниченной энергии экспонирования. Даны рекомендации по оптимальному выбору экспозиции в опорном пучке. Подчеркнута важность правильного выбора экспозиции опорного пучка, так как и недоэкспозиция, и переэкспозиция приводят к резкому падению дифракционной эффективности интерферограммы и снижению контраста восстановленного изображения и видности интерференционных полос.

Одной из важных задач, решаемых методами голографической интерферометрии, является неразрушающий контроль промышленных изделий [1]. Однако его применение для контроля крупногабаритных объектов нередко ограничивается малой величиной экспозиции, создаваемой на голограмме объектным пучком, что приводит к низкому качеству восстановленного изображения. Это обстоятельство делает актуальным решение вопроса о связи качества восстановленного изображения, полученного при низкой освещенности голограммы объектным пучком на реальных регистрирующих средах, с условиями записи — величинами экспозиций, создаваемых опорными  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  объектными пучками.

Одним из путей повышения качества изображения является оптимизация условий записи с учетом реальных характеристик регистрирующих сред [2]. Целью данной работы явилось теоретическое и экспериментальное изучение условий достижения максимальных значений дифракционной эффективности (ДЭ) и видности полос при записи двухэкспозиционных интерферограмм, обеспечивающих наилучшее качество восстановленного голографического изображения.

Для нахождения ДЭ двухэкспозиционной голограммы диффузно рассеивающих объектов воспользуемся результатами [3, 4], где на основе теории связанных волн были получены выражения, описывающие ДЭ голограмм, записанных в первой и второй экспозициях, для зеркально отражающих объектов

$$\begin{aligned} \eta_1 &= \frac{\varphi_{11}^2}{\varphi_{11}^2 + \varphi_{12}^2} \sin^2 \sqrt{\left(\frac{\varphi_{11}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_{12}}{2}\right)^2}, \\ \eta_2 &= \frac{\varphi_{12}^2}{\varphi_{11}^2 + \varphi_{12}^2} \sin^2 \sqrt{\left(\frac{\varphi_{11}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_{12}}{2}\right)^2}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\varphi_{11}$  — первая гармоника фазовой модуляции среды, соответствующая 1-й экспозиции;  $\varphi_{12}$  — первая гармоника, соответствующая 2-й экспозиции. Предположим далее, что при записи голограммы диффузно рассеивающего объекта распределение локального отношения объектного к опорному пучков  $m$  является релеевским [5], а сама картина спеклов определяется состоянием объекта в данный момент времени и не зависит от состояния объекта в предше-

ствующий и последующий моменты. Последнее означает, что полную функцию плотности вероятности локального отношения пучков  $f(m_1, m_2)$ , необходимую для расчета средней ДЭ, можно представить в виде произведения функций плотности вероятности для первой и второй экспозиций  $f(m_1), f(m_2)$  [6]

$$f(m_1, m_2) = f(m_1) f(m_2), \quad (2)$$

где

$$f(m_1) = \frac{1}{M_1} \exp\left(-\frac{m_1}{M_1}\right), \quad f(m_2) = \frac{1}{M_2} \exp\left(-\frac{m_2}{M_2}\right). \quad (3)$$

Здесь  $M_1, M_2$  — среднее по площади голограмм отношение интенсивностей объектного к опорному пучков при записи голограмм во время первой и второй экспозиций,  $m_1, m_2$  — локальные величины этих отношений. С учетом сделанных предположений, а также формул (1)–(3) выражение для средней ДЭ двухэкспозиционной интерферограммы диффузно рассеивающего объекта  $\eta_g$  будет иметь вид

$$\eta_g = \int_0^\infty \int_0^\infty f(m_1, m_2) \eta(m_1, m_2) dm_1, dm_2 = \frac{1}{M_1, M_2} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left[-\left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}\right)\right] \times \\ \times \sin^2 \sqrt{\left(\frac{\varphi_{11}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varphi_{12}}{2}\right)^2} dm_1 dm_2. \quad (4)$$

Выражения для  $\varphi_{11}$  и  $\varphi_{12}$  найдем, воспользовавшись результатами [7], где показано, что зависимость между фазовым набегом и экспозицией для галогендосеребряных фотоматериалов — фазовоэкспозиционной характеристикой — является экспоненциальной

$$\varphi = \varphi_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{E}{E_0}\right)\right]. \quad (5)$$

Здесь  $\varphi_0$  — предельно достижимое значение фазового набега для данного типа фотослоя и условий его химико-фотографической обработки,  $E_0$  — голографическая чувствительность фотослоя,  $E$  — величина экспозиции, полученная им при записи голограммы. Считая, что при записи интерферограммы суммарная экспозиция  $E = E_1 + E_2$ ,

где

$$E_1 = E_{r1}(1 + m_1) + 2E_{r1} \sqrt{m_1} \cos \theta, \quad E_2 = E_{r2}(1 + m_2) + 2E_{r2} \sqrt{m_2} \cos \theta, \quad (6)$$

а  $m_1 = E_{s1}/E_{r1}$ ,  $m_2 = E_{s2}/E_{r2}$  (индексы  $s$  и  $r$  относятся к объектному и опорному пучкам соответственно), и воспользовавшись известным разложением экспоненты по функциям Бесселя

$$\exp(-z \cos y) = I_0(z) + 2 \sum_{i=1}^{\infty} (-1)^i I_i(z) \cos \Phi, \quad (7)$$

после подстановки (6) и (7) в (5) получим выражения для  $\varphi_{11}$  и  $\varphi_{12}$

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} &= 2\varphi_0 \exp\{-[\varepsilon_{r1}(1 + m_1) + \varepsilon_{r2}(1 + m_2)]\} I_0(2\varepsilon_{r2} \sqrt{m_2}) I_1(2\varepsilon_{r1} \sqrt{m_1}), \\ \varphi_{12} &= 2\varphi_0 \exp\{-[\varepsilon_{r1}(1 + m_1) + \varepsilon_{r2}(1 + m_2)]\} I_0(2\varepsilon_{r1} \sqrt{m_1}) I_1(2\varepsilon_{r2} \sqrt{m_2}), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{r1} = E_{r1}/E_0$ ,  $\varepsilon_{r2} = E_{r2}/E_0$ .

Выражения (4) и (8) позволяют рассчитать ДЭ голографических интерферограмм диффузно рассеивающих объектов по известным параметрам, характеризующим фотослой  $\varphi_0$ ,  $E_0$  и условия записи  $\varepsilon_{r1}$ ,  $\varepsilon_{r2}$ ,  $M_1$ ,  $M_2$ .

Как было показано в [2], при регистрации голограмм крупногабаритных или удаленных объектов и малой величине объектного пучка максимальная ДЭ достигается при величине экспозиции опорной волны, значительно превышающей экспозицию объектной ( $\varepsilon_r \gg \varepsilon_o$ ). В этом случае при записи двухэкспозиционных голограмм выполняются неравенства  $m_1 \ll 1$ ,  $m_2 \ll 1$  и выражения для величин  $\varphi_{11}$  и  $\varphi_{12}$  будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \varphi_{11} &= 2\varphi_0 \exp[-(\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})] \varepsilon_{r1} \sqrt{m_1}, \\ \varphi_{12} &= 2\varphi_0 \exp[-(\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})] \varepsilon_{r2} \sqrt{m_2}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Величина ДЭ такой двухэкспозиционной голограммы равна

$$\eta_g = \frac{1}{M_1 M_2} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp \left[ - \left( \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \right] \varphi_0^2 \exp [-2 (\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})] (\varepsilon_{r1}^2 m_1 + \varepsilon_{r2}^2 m_2) dm_1 dm_2 = \\ = \varphi_0^2 \exp [-2 (\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{r2})] (\varepsilon_{r1} \varepsilon_{s1} + \varepsilon_{r2} \varepsilon_{s2}). \quad (10)$$

Подставляя (9) в (1), легко убедиться, что выражение (10) справедливо и для зеркально отражающих объектов и переходит при  $\varepsilon_{r2} = 0$  в выражение, полученное в [2] для одноэкспозиционных голограмм. Определим условия, при которых достигаются как максимальная ДЭ, так и максимальная видимость интерференционных полос в восстановленном изображении. Из определения видности интерференционных полос [8] следует, что она максимальна при равенстве интенсивностей интерферирующих пучков. Это означает, что ДЭ голограмм, записанных в первой и второй экспозициях, должны быть равны,

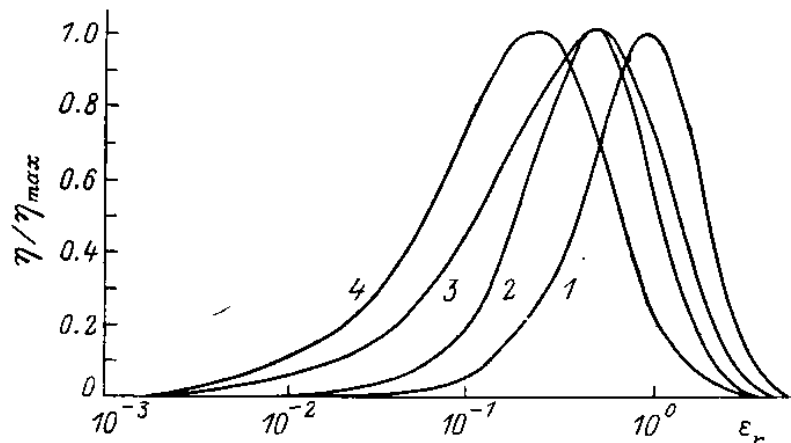


Рис. 1. Расчетные зависимости ДЭ от экспозиции, нормированные на максимальные значения.

1, 2 — для  $M = \text{const}$ ; 3, 4 — для  $E_s = \text{const}$  (одна и две экспозиции соответственно).

что в свою очередь выполняется, как следует из (1), при  $\varphi_{11} = \varphi_{12}$ . При неизменной экспозиции объектного пучка  $\varepsilon_s$  это равенство справедливо при  $\varepsilon_{r1} = \varepsilon_{r2} = \varepsilon$ . Величина суммарной ДЭ в этом случае равна

$$\eta_g (\varepsilon_s = \text{const}) = 2\varphi_0^2 \exp (-4\varepsilon_r) \varepsilon_s \varepsilon_r. \quad (11)$$

При использовании галогидосеребряных фотоматериалов величина предельного фазового набег  $\varphi_0$  обычно не превышает 5 рад, поэтому, как показывают расчеты, выражения (10), (11) справедливы с точностью до 10 % при отношении экспозиций, создаваемых пучками, удовлетворяющих неравенству  $\varepsilon_s < 0.03 \varepsilon_r$ .

Величину оптимальной экспозиции в случае использования непрерывных лазеров часто находят путем изменения длительности экспонирования при постоянном отношении интерферирующих пучков. Суммарная ДЭ в этом случае имеет вид

$$\eta_g (M = \text{const}) = 2\varphi_0^2 M \exp (-2\varepsilon_r) \varepsilon_r^2. \quad (12)$$

Из полученных выражений (10), (11), а также результатов [2] следует, что при постоянной экспозиции, создаваемой объектным пучком, максимальная видимость интерференционных полос при одновременно максимальной ДЭ двухэкспозиционной голограммы достигается при  $\varepsilon_r = 1/4$ , что в 2 раза меньше оптимальной экспозиции, необходимой для достижения максимальной ДЭ в случае одноэкспозиционной голограммы, записанной при постоянном объектном пучке, и в 4 раза меньше оптимальной экспозиции, создаваемой опорным пучком при записи одноэкспозиционной голограммы с постоянным отношением объектного к опорному пучкам. Последнее обстоятельство имеет существенное значение для записи качественных двухэкспозиционных голограмм, так как обычно в литературе приводятся данные о зависимости ДЭ от экспозиции при постоян-

ном отношении пучков при записи одноэкспозиционных голограмм [9]. Если выбрать величину экспозиции опорного пучка равную единице, ориентируясь на значения  $\epsilon_r$ , соответствующие максимуму ДЭ при записи голограмм при постоянном отношении пучков [2], то ДЭ такой двух экспозиционной голограммы при постоянном объектном пучке будет примерно в 5 ( $e^3/4$ ) раз меньше, чем величина максимальной ДЭ. Превышение  $E_0$  на 50 % приведет к более чем двадцатикратному падению ДЭ двухэкспозиционной голограммы и практическому отсутствию восстановленного изображения. Сказанное наглядно иллюстрирует рис. 1, на котором представлены нормированные на соответствующие максимальные значения зависимости ДЭ двух- и одноэкспозиционных голограмм, рассчитанные в соответствии с формулами (11), (12), а также в соответствии с выражениями, полученными в [2] для одноэкспозиционных голограмм.

Эксперименты по записи двухэкспозиционных голограмм диффузно отражающих объектов были выполнены на фотопластинках ЛОИ-2, которые экспо-

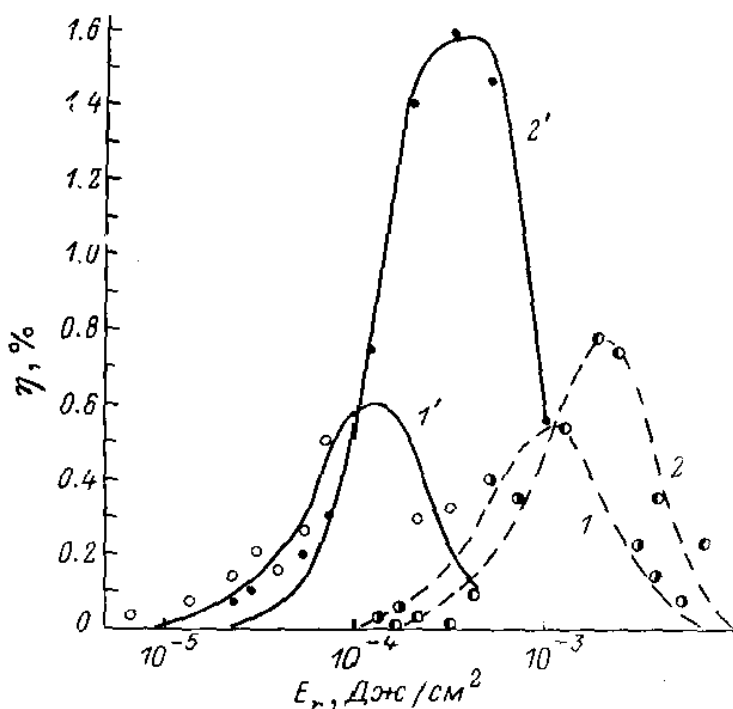


Рис. 2. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости ДЭ от экспозиции при  $M = \text{const}$ , полученные с помощью He—Ne-лазера (кривые 1', 2',  $M = 1 : 100$ ) и рубинового (кривые 1, 2,  $M = 1 : 40$ ) лазера.

1, 1' соответствуют двум экспозициям, 2, 2' — одной экспозиции.

нировались излучением непрерывного He—Ne и импульсного рубинового лазеров (последний работал в режиме свободной генерации с длительностью импульса, равной 1 мс). Объектом служил матовый стеклянный рассеиватель, а интерференционная картина в восстановленном изображении наблюдалась благодаря перемещению между экспозициями неоднородной стеклянной пластины, расположенной между диффузором и голограммой. Угол схождения объектного и опорного пучков составлял  $30^\circ$ , фотопластинки обрабатывались в проявителе Д-82 [10] в течение 8 мин и отбеливались по рецепту [9]. Экспериментальные результаты, полученные как при постоянной величине  $\epsilon_r$  объектного пучка, так и при постоянном отношении объектного к опорному пучков, приведены на рис. 2, 3. Кривые 1, 1' (рис. 2) представляют собой зависимости двухэкспозиционных интерферограмм диффузно рассеивающего объекта от экспозиции в опорном пучке  $\epsilon_r$ , записанных при помощи He—Ne- и рубинового лазеров соответственно, кривые 2, 2' — зависимости ДЭ от экспозиции для одноэкспозиционных голограмм. При этом отношение пучков  $M$  было постоянным в обоих случаях и равным 1 : 100 при записи He—Ne-лазером и 1 : 40 при записи рубиновым лазером. На рис. 3 представлены зависимости для одноэкспозиционных голограмм (кривая 1) и двухэкспозиционных интерферограмм (кривая 2), записанных He—Ne-лазером при неизменной величине экспозиции, создаваемой объектным пучком ( $E_r = 6 \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>). Из полученных данных следует,

что результаты эксперимента хорошо согласуются с расчетом в случае постоянного отношения пучков ( $M = \text{const}$ ) практически во всем диапазоне исследованных экспозиций. Однако в случае постоянной величины экспозиции, создаваемой объектным пучком ( $E_s = \text{const}$ ), экспериментальные зависимости хорошо совпадают с расчетными лишь в диапазоне экспозиций, равных или больших оптимальных. На начальном участке экспериментальные зависимости имеют значительно более крутой рост, чем теоретические. Это указывает на некоторое отличие фазово-экспозиционной характеристики исследуемого фотоматериала от ее аппроксимации, заданной выражением (5), однако дальнейшее обсуждение этого вопроса требует проведения дополнительных исследований. Для подтверждения правильности разработанной методики получения интерферограмм крупногабаритных диффузно-отражающих объектов были выполнены эксперименты по регистрации голографических интерферограмм промышленных объек-

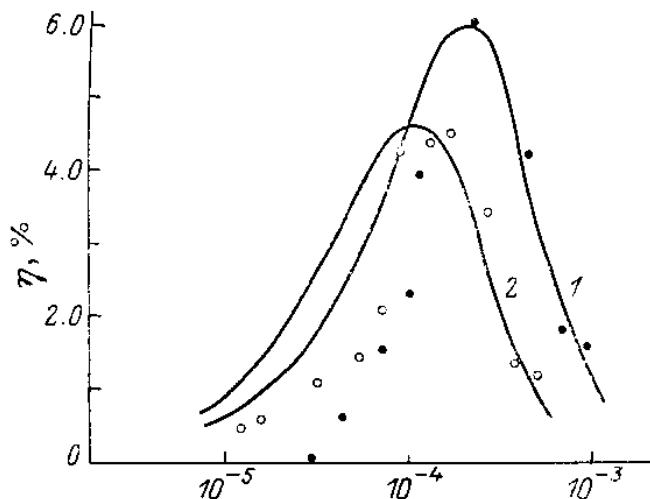


Рис. 3. Теоретические (линии) и экспериментальные (точки) зависимости ДЭ от экспозиции при  $E_s = \text{const}$  ( $E_s = 6 \cdot 10^{-6}$  Дж/см<sup>2</sup>), полученные с помощью He—Ne-лазера.

Кривые 1, 2 — одна и две экспозиции соответственно.

тов размерами  $\sim 1$  м<sup>2</sup> по методу двух экспозиций. Выходная энергия лазера составляла 160 мДж, плотность энергии в объектном пучке в плоскости голограмм —  $2 \cdot 10^{-7}$  Дж/см<sup>2</sup>. Запись осуществлялась на высокоразрешающую голографическую фотопленку ФГ-690, для которой оптимальная величина экспозиции в опорном пучке была равна  $1.4 \cdot 10^{-5}$  Дж/см<sup>2</sup> (запись двухэкспозиционной голограммы при постоянной экспозиции объектного пучка). Обработка фотопленки проводилась в проявителе Д-82 в течение 20 мин с последующим отбеливанием по рецепту [9]. ДЭ полученной интерферограммы была около 0.5 %, что вполне достаточно для наблюдения при восстановлении He—Ne-лазером записанной интерференционной картины.

В заключение отметим, что в настоящей работе теоретически и экспериментально обоснованы методика записи пропускающих фазовых голографических двухэкспозиционных интерферограмм крупногабаритных диффузно отражающих объектов импульсными и непрерывными лазерами в условиях ограниченной энергии экспонирования. Дана рекомендация по оптимальному выбору экспозиции в опорном пучке; показано, что в случае записи интерферограмм при постоянной плотности энергии в объектном пучке ( $\epsilon_s = \text{const}$ ) экспозицию в опорном пучке необходимо выбирать в 4 раза меньше, чем значение, соответствующее максимуму ДЭ, найденному при записи одноэкспозиционной голограммы при постоянном отношении интерферирующих пучков. Подчеркивается важность правильного выбора экспозиции опорного пучка, так как и недоэкспозиция, и переэкспозиция приводят к одному результату — резкому падению ДЭ двухэкспозиционной интерферограммы и снижению контраста восстановленного изображения и видности интерференционных полос.

### Список литературы

- [1] Вест Ч. Голографическая интерферометрия. М., 1982. 504 с.
- [2] Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 2. С. 306—313.
- [3] Alferness R., Case S. K. // JOSA. 1975. V. 65. N 6. P. 730—739.
- [4] Case S. K. // JOSA. 1975. V. 65. N 6. P. 724—729.
- [5] Upatnieckis J., Leonard C. D. // IBM Journ. Res. Develop. 1970. V. 14. N 5. P. 527—532.
- [6] Шкунов В. В., Яковлева Т. В. // Опт. и спектр. 1985. Т. 59. В. 3. С. 680—683.
- [7] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1984. Т. 57. В. 4. С. 677—683.
- [8] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1970. 855 с.
- [9] Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко Л. С., Гулянян Э. Х. // Проблемы голографии. М., 1973. С. 122—124.
- [10] Микулин В. П. Фотографический рецептурный справочник. М., 1972. 319 с.

Поступило в Редакцию 16 декабря 1988 г.  
В окончательной редакции 19 января 1989 г.

---