

УДК 771.5

© 1992

ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ФАЗОВО-ЭКСПОЗИЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОСЛОЕВ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКЛОГРАММ

Чураев А. Л.

Теоретически и экспериментально рассмотрена запись спеклограмм на реальных галодосеребряных фотослоях. Показано, что дифракционная эффективность (ДЭ) спеклограмм может достигать 100% при учете нелинейности фазово-экспозиционной характеристики (ФЭХ) фотослоя, которая подобна ФЭХ голограмм. На фотопластинках типа ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ экспериментально показано, что величина отношения фазовых набегов спеклограмм и голограмм, определяющая контраст восстановленного изображения в случае высоких значений ДЭ голограммы, не зависит в широком диапазоне от длительности проявления и, следовательно, определяется типом фотоматериала и способом его химико-фотографической обработки.

Одной из важных проблем при определении качества восстановленного голографического изображения, особенно в случае достижения предельных дифракционных эффективностей на фазовых голограммах диффузно рассеивающих объектов, является рассеяние света на спеклограммах-структурах, образующихся в результате записи на фотослое пространственно неоднородного поля, создаваемого в плоскости голограммы диффузно рассеивающим объектом. Этой проблеме посвящен ряд теоретических работ [1-3], основное внимание в которых уделено исследованию влияния толщины голограмм на рассеяние света на спеклограмме.

Цель настоящей работы — исследование возможности количественного описания процесса рассеяния света на спеклограммах, зарегистрированных на галодосеребряных голографических фотоматериалах с учетом нелинейности фазово-экспозиционных характеристик реальных регистрирующих сред. Для решения поставленной задачи нами были выполнены подробные экспериментальные исследования процесса записи таких структур, а также сравнение найденных экспериментальных зависимостей дифракционной эффективности спеклограмм (ДЭСП) от экспозиции с рассчитанными теоретически зависимостями ДЭСП на основе предложенной ранее модели голографической регистрирующей среды [4, 5].

Экспериментальные исследования фазово-экспозиционных характеристик (ФЭХ) при записи спеклограмм ($\varphi^{сп}(E)$) были выполнены на серийных фотослоях ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ. Одновременно на этих же фотослоях осуществлялась запись голограмм на пространственной частоте 1000 мм^{-1} с целью определения их ФЭХ ($\varphi(E)$) при получении голографического изображения.

При проведении экспериментов длительность проявления при использовании проявителей ФГ, Д-19, Д-82 [6, 7] менялась в диапазоне от 1 до 16 мин с последующим отбеливанием [8] и при проявлении ГП-2 [9] от 4 до 64 мин. Для устранения влияния эффектов проявления на одной и той же фотопластинке записывались голограммы диффузно рассеивающего объекта с малым отношением

пучков ($M = 0.02$) и спеклограммы при различной величине экспозиции. При записи спеклограммы опорный пучок перекрывался, и в этом случае под экспозицией понималась величина экспозиции, создаваемой объектным пучком, усредненная по площади спеклограммы. Несущая частота записи голограммы была равна 1000 мм^{-1} , что обеспечивало запись толстослойных голограмм, а полоса частот объектного пучка составляла $\approx 300 \text{ мм}^{-1}$. После записи и химико-фотографической обработки фотопластиной изменялась зависимость ДЭ голограмм $\eta(E)$ и спеклограмм $\eta^{cn}(E)$ от экспозиции (E). Запись голограмм и спеклограмм и измерение их ДЭ проводились на длине волны He-Ne-лазера ($\lambda = 632.8 \text{ нм}$).

Определение ФЭХ записанных голограмм проводилось в соответствии с методикой, описанной в [4]. При определении параметров, характеризующих зависимость $\varphi^{cn}(E)$, предполагалось, что она описывается функцией

$$\varphi^{cn}(E) = \varphi_0^{cn} (1 - e^{-E/E_0^{cn}}), \quad (1)$$

которая подобна зависимости $\varphi(E)$ для голограмм [4, 5]

$$\varphi(E) = \varphi_0 (1 - \exp(-E/E_0)). \quad (2)$$

Однако величины E_0^{cn} и φ_0^{cn} в (1) полагались в общем случае отличными от E_0 и φ_0 (2) (φ_0 и φ_0^{cn} — предельно достижимые с ростом экспозиции величины фазовых набегов голограмм и спеклограмм, а E_0 и E_0^{cn} — величины экспозиций, характеризующих скорость нарастания ФЭХ в случае голограмм и спеклограмм). Для ФЭХ вида (1) рассчитывалась ДЭ спеклограммы $\eta^{cn}(E)$ [1], под которой понималось отношение количества рассеянного на спеклограмме света при прохождении через нее плоской волны к падающему при измерении ДЭ на спеклограмму количеству света

$$\eta^{cn}(E) = T (1 - A^2), \quad (3)$$

где T — среднее пропускание фотоматериала по интенсивности, а A — отношение амплитуд излучения, прошедшего через спеклограмму без рассеяния, к амплитуде падающего на нее излучения. Величина A определялась аналогично [1] выражением

$$A = \int_0^{\infty} e^{-m} e^{i\varphi_0^{cn} (1 - e^{-\epsilon_{cn} m})} dm, \quad (4)$$

где m — отношение локальной интенсивности света в картине спеклов к ее среднему значению, а $\epsilon_{cn} = E/E_0^{cn}$ — нормированное значение экспозиции.

При записи голограммы диффузно рассеивающего объекта наряду с записью в фотослое спеклограммы — интермодуляционной решетки и собственно голограммы — кроссмодуляционной решетки на фотослой воздействует также постоянная засветка опорного пучка, которая ведет к снижению величины контраста регистрируемой картины интерференции световых волн. Для оценки влияния рассеяния света на спеклоструктуре голограммы рассмотрим случай записи спеклограммы с дополнительной некогерентной засветкой, который достаточно хорошо передает распределение интенсивности света в регистрируемой на голограмме интерференционной картине в случае малых значений отношения интерферирующих объектного и опорного пучков M ($M \ll 1$). Экспериментально такая засветка реализовалась путем последовательной засветки фотопластинки объектным (диффузным) и опорным (гладким) пучками света.

В этом случае величина A определяется как

$$A = \int_0^{\infty} e^{-m} e^{i\varphi_0^{cn} [1 - e^{-(\epsilon_{cn} m + \epsilon_{rc})}] } dm, \quad (5)$$

где $\epsilon_{rc} = E_r/E_0^{cn}$.

Учитывая, что $\langle E_{об} \rangle / E_r = M$ — отношение средней экспозиции объектного пучка $\langle E_{об} \rangle$ к экспозиции опорного пучка E_r , выражение (5) может быть представлено в виде

$$A = \int_0^{\infty} e^{-m} e^{i \varphi_0^{сп}} |1 - e^{-\epsilon_{rc}(Mm+1)}| dm. \quad (6)$$

При записи голограмм с малым отношением пучков $M \ll 1$ выражение (6) упрощается, и величина A может быть найдена аналитически. В этом случае величина ДЭ спеклограммы $\eta^{сп}(\epsilon_{rc})$ с наложенной на нее некогерентной засветкой в соответствии с выражением (6) будет равна

$$\eta^{сп}(\epsilon_{rc}) = (\varphi_0^{сп})^2 \epsilon_{rc}^2 e^{-2\epsilon_{rc} M^2}. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что в отличие от ДЭ голограмм η , величина которой пропорциональна отношению объективного и опорного пучков — M ($M \ll 1$) [5], ДЭ спеклограмм пропорциональна квадрату отношения интенсивностей диффузного пучка и некогерентно наложенного опорного пучка — M^2 . Поэтому изменение отношения пучков при записи голограммы диффузно рассеивающего объекта от 1:1 до 1:10 ведет к уменьшению интермодуляционного шума примерно на 2 порядка, что и наблюдается на экспериментах при записи спеклограмм (рис. 1).

Результаты расчетов, проведенных по формуле (5), показывают, что при $\varphi_0^{сп} \leq 5$ рад зависимость $\eta^{сп}(E)$ имеет максимум при $E = 1.5 E_0^{сп}$, величина которого возрастает от 0.3 при $\varphi_0^{сп} = 2$ до 0.9 при $\varphi_0^{сп} = 5$ ($T = 1$). При $\varphi_0^{сп} \geq 6$ ДЭ спеклограмм достигает практически 100%, а положение максимума смещается к $E = E_0^{сп}$.

Результаты сравнения рассчитанных кривых $\eta^{сп}(E)$ с измеренными экспериментально показали, что полученные выражения являются достаточно хорошей аппроксимацией ФЭХ, описывающих запись спеклограмм на реальных регистрирующих средах. Из сравнения параметров ФЭХ для спеклограмм и голо-

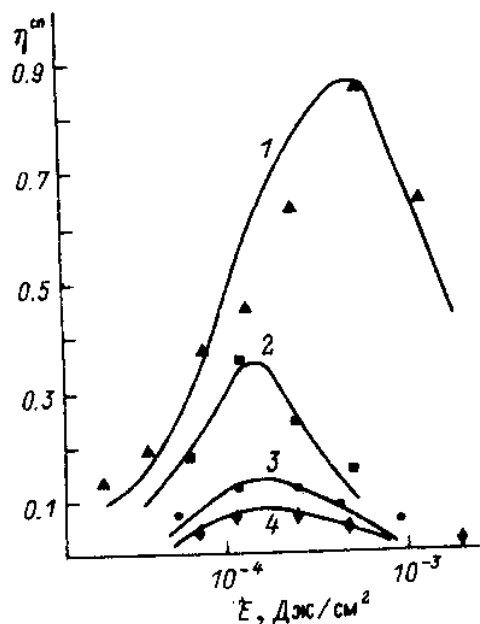


Рис. 1. Зависимости ДЭ спеклограмм ($\eta^{сп}$) от экспозиции для фотопластинок ЛОИ-2.

Сплошные линии — расчет, точки — эксперимент. 1 — спеклограмма, 2 — спеклограмма + фоновая засветка, $M = 1:1$; 3 — спеклограмма + фоновая засветка, $M = 1:2$, 4 — спеклограмма + фоновая засветка, $M = 1:4$.

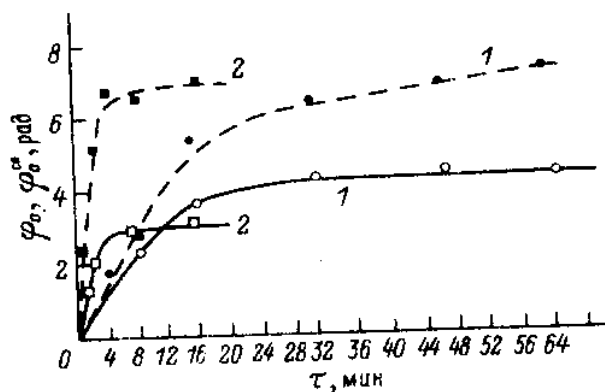


Рис. 2. Зависимость максимальных значений фазового набега голограмм φ_0 и спеклограмм $\varphi_0^{сп}$ от длительности проявления $\tau_{пр}$.

Сплошные линии — голограммы, штриховые — спеклограммы. Точки — эксперимент. 1 — ПЭ-2, ГП-2; 2 — ПЭ-2, обработка по [8].

грамм следует, что значения $E_0^{сп}$ и E_0 близки друг к другу, тогда как отношения фазовых набегов для спеклограмм и голограмм $\delta = \varphi_0^{сп} / \varphi_0$ заключены для исследованных голографических фотослоев в диапазоне от 0.4 до 2.5 в зависимости от типа фотоматериала, способа его химико-фотографической обработки и длительности проявления (рис. 2). Наибольшее значение $\varphi_0^{сп}$ достигалось на фотопластинах ВРЛ и составляло 6 рад. Результаты измерений $E_0^{сп}$ и $\varphi_0^{сп}$ на исследованных фотослоях с указанием фотохимической обработки приведены в таблице. Из результата проведенных экспериментов также следует, что величина отношения δ в широких изменениях длительности проявления $\tau_{пр}$ от него не зависит и таким образом может рассматриваться как параметр, определяемый типом фотоматериала и способом его

Результаты измерений

Тип фотоматериала	Способ химико-фотографической обработки	φ_0	$\varphi_0^{сп}$	$E_0 \cdot 10^3$
ПЭ-2	ФГ, 1—8 мин	2+9	1.4+3.6	12+8
	ГП-2, 2—64 мин	2+15	1.6+9	8
ЛОИ-2	* Д-82, 1—16 мин отбеливание	3+13	1.8+10.4	1.5+0.7
	ФГ, 3 мин	12	8.4	8
ВРЛ	* Д-19, 2—16 мин	2.4+10	7.2+13	1
	* Д-82, 0.5—3 мин	1.2+5	2.4+6.0	1

Примечание. * Фотослой отбеливался в соответствии с рекомендациями работы [8].

химико-фотографической обработки.

Таким образом, ФЭХ, описывающие рассеяние света на спеклограммах, по виду подобны ФЭХ для несущих изображение пространственных частот и могут использоваться для расчета ДЭСР, однако отличаются величинами наибольших фазовых набегов. Отношение этих величин для голографических галогосеребряных фотоматериалов не изменяется в широких пределах изменения длительности проявления и является одной из важных характеристик фотослоя, влияющей на ДЭ голограмм диффузно рассеивающих объектов и контраст восстановленных ими изображений. При записи голограмм с малым отношением пучков ($M \ll \ll 1$) ДЭ спеклограммы, а следовательно, и рассеивающие свойства интермодуляционной решетки меняются пропорционально квадрату отношения пучков при записи голограммы.

Список литературы

- [1] Upatnieks J., Leonard C. // JOSA. 1970. V. 60. N 3. P. 297—305.
- [2] Зельдович Б. Я., Шкунов В. В., Яковлева Т. В. // УФН. 1986. Т. 149. В. 3. С. 511—549.
- [3] Сидорович В. Г. // Опт. и спектр. 1976. Т. 41. В. 3. С. 507—510.
- [4] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. // Опт. и спектр. 1984. Т. 57. В. 4. С. 677—683.
- [5] Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. № 2. С. 306—313.
- [6] Микулин В. П. Фотографический рецептурный справочник. М., 1972. 319 с.
- [7] Денисюк Ю. Н., Загорская З. А., Курсакова А. М., Шевцов М. К., Шедрунова Т. В. // Тез. докл. Всес. конф. «Физические процессы на основе галогенидов серебра». Черноголовка, 27—29 июня 1983 г. М., 1983. С. 266—267.
- [8] Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко Л. С., Гуланян Э. Х. // Проблемы голограмм. В. 3. М., 1973. С. 122—124.
- [9] Усанов Ю. Е. // Регистрирующие среды для голографии. Л., 1979. С. 96—104.

Государственный оптический институт
им. С. И. Вавилова
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
2 октября 1991 г.