

УДК 535.317.1 : 778.38

РАССЕЯНИЕ СВЕТА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ. ВЛИЯНИЕ ГОЛОГРАММ ШУМОВ И СПЕКЛОГРАММ

Стаселько Д. И., Чураев А. Л.

Показано, что при когерентном экспонировании основной вклад в светорассеяние проявленного фотоматериала при определенных условиях вносит рассеяние на голограммах шумов установки и непроявленного фотослоя. При высоких уровнях экспозиции, создаваемых на голограмме пространственно неоднородным объектным пучком, главным источником рассеяния света становятся спекл-структуры, образующиеся в результате записи на фотоматериале объектного поля.

В [1-4], посвященных исследованию светорассеяния в галодосеребряных фотослоях для голографии, отмечалось, что величина светорассеяния проявленных фотоматериалов зависит от когерентности экспонирующего излучения. В частности, в [1] наблюдалось некоторое увеличение интенсивности рассеянного света при переходе от некогерентного излучения к когерентному, а в [3, 4] — снижение пропускания фотопластинок в узкой области спектра, что связывалось авторами с голографической записью рассеянного в фотослое экспонирующего излучения в результате его интерференции с волной, распространяющейся в среде без рассеяния.

Светорассеяние проявленных и непроявленных фотослоев для голографии исследовалось нами под большими и малыми углами с помощью установки оптическая схема которой изображена на рис. 1 по методике, описанной в [5].

Согласно [6], светорассеяние как на непроявленных фотослоях, так и на фотослоях, экспонированных некогерентным светом, определяется двумя существенно разными механизмами, определяющими шумы материала под малыми углами (МУШ) и под большими (БУШ). Малоугловое рассеяние зависит в основном от поверхностного рельефа фотослоя, а под большими углами — от зернистой структуры эмульсий.

В таблице представлены основные параметры непроявленных, а также проявленных после экспонирования некогерентным излучением голографических фотослоев ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ, ИАЭ, Agfa Gevaert (AG) 8E75 и 10E75, характеризующие светорассеяние под большими (параметр β_0) и малыми углами (α_0), а также пропускание фотослоев по интенсивности T и эффективную толщину записанных на них голограмм $h_{эф}$, определяемую из измерений угловой селективности [6].

Как следует из таблицы, светорассеяние непроявленных фотослоев для разных типов фотоматериалов может изменяться в весьма широких пределах. Так, светорассеяние под большими углами изменялось для исследованных материалов более чем на порядок — от 0.1 % для ПЭ-2 до ~1.5 % для AG 10E75. Минимальным светорассеянием под малыми углами обладали фотопластинки AG 8E75 и 10E75, а также ПЭ-2 и ИАЭ (0.1 ÷ 0.2 %), наибольшее малоугловое рассеяние наблюдалось у фотопластинок ВРЛ (0.7 ÷ 1.5 %). Химико-фотографическая обработка экспонированных фотослоев в большинстве случаев приводила к повышению уровня светорассеяния под большими и под малыми углами, величина которого существенно зависела как от типа фотоматериала, так и от способа обработки (сравним, например, данные по мало

угловому рассеянию для фотопластинок ВРЛ и рассеяние под большими углами для ЛОИ-2). При этом с увеличением длительности проявления МУШ снижался или оставался постоянным, тогда как БУШ заметно возрастал. На-

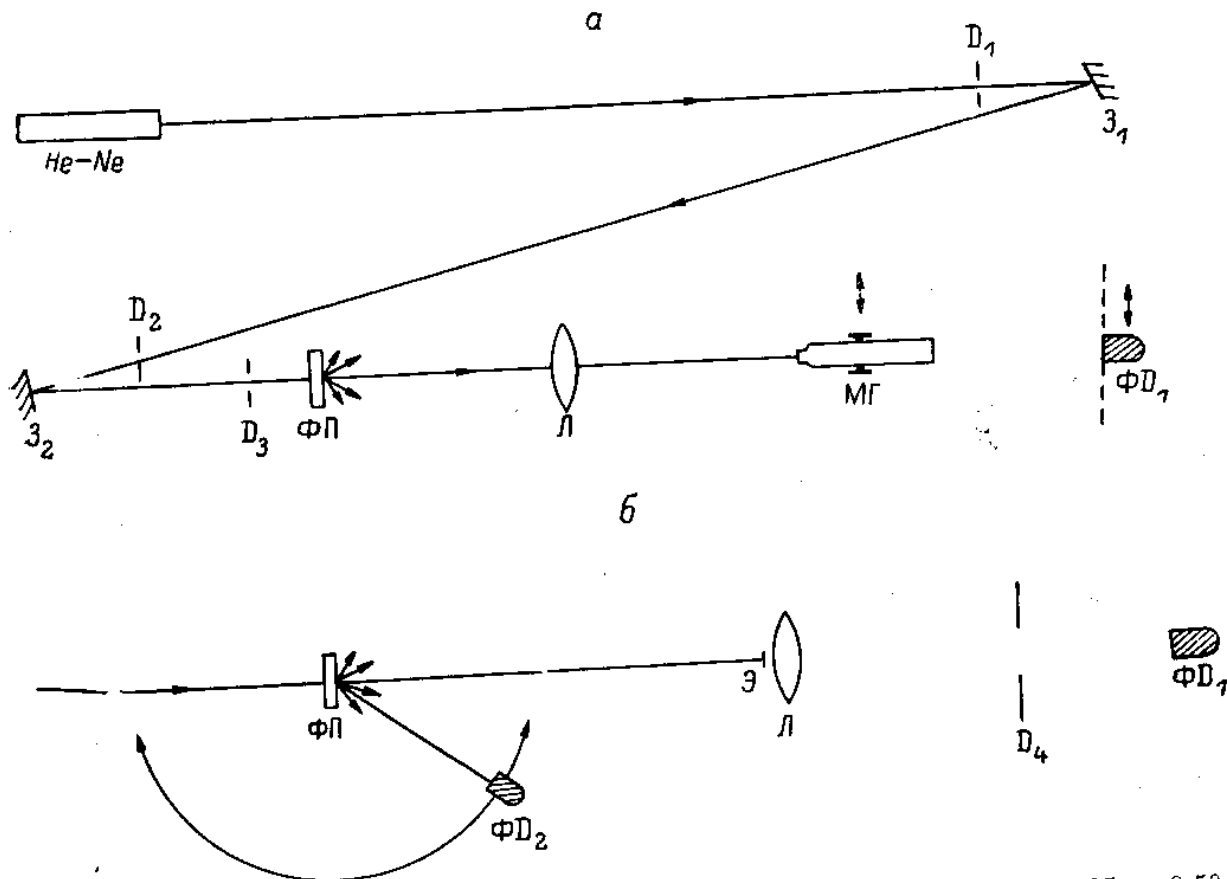


Рис. 1. Оптические схемы измерения света в фотослоях в диапазоне углов от 0.05 до 0.5° (а) и в диапазоне углов 0.5 до 5° и под большими углами (б).

$\Phi Д_1$, $\Phi Д_2$ — фотодиоды, $З_1$, $З_2$ — зеркала, $Д_1$ — $Д_4$ — диафрагмы, $\Phi П$ — исследуемая фотолампа, $Л$ — линза, $Э$ — экран, $МГ$ — горизонтальный микроскоп.

пример, при проявлении фотопластинок в проявителе ФГ с последующим отбеливанием МУШ вырос почти в 2 раза по сравнению с неэкспонированным фотослоем, а БУШ — более чем в 30 раз. Это подтверждает вывод о различии механизмов светорассеяния под большими и малыми углами в голографических галогидосеребряных средах.

Рассеяние на голограммах шумов установки и непроявленного фотослоя

Исследование зависимости светорассеяния от экспозиции показало, что существуют два качественно различных типа таких зависимостей.

Светорассеяние фотослоев, подвергнутых экспонированию некогерентным излучением, характеризовалось монотонным ходом с некоторым подъемом или спадом с ростом экспозиции. Такая же картина наблюдалась на ряде фотоматериалов и при когерентной засветке, причем уровень рассеянного света был близок к аналогичному при некогерентном экспонировании. В то же время на других фотоматериалах при определенных условиях обработки, при когерентном экспонировании наблюдались резко выраженные максимумы, уровень рассеяния в которых превосходил соответствующий уровень для некогерентной засветки до 10 и более раз. Максимумы рассеяния света под малыми и большими углами достигались для одного и того же фотоматериала при различных экспозициях — для малоуглового рассеяния требовалась экспозиция, меньшая в 3—5 раз, а максимумы рассеяния под большими углами совпадали по положению с максимумами дифракционной эффективности голограмм (рис. 2). Это наводит на мысль о том, что причиной наблюдаемого резкого увеличения светорассеяния проявленных фотоматериалов, подвергнутых когерентной за-

Тип фото-материала	Способ химико-фотографической обработки	ϵ_0 , %	β_0 , %	T	φ_0 , рад	E_0 , Дж/см ²	$\varphi_0^{сп}/\varphi_0$	$h_{эф}$, мкм	φ_0' , рад	E_0' , Дж/см ²	$\varphi_{лов}$, рад
ПЭ-2	Непроявленный слой ФГ; 1-8 мин обработка по [14] ГП-2; 2-64 мин	0.1-0.2	0.1	0.70	-	-	-	-	-	-	-
		0.5-0.6	0.3-0.9	0.82-0.79	2-9	(1.2-0.8)·10 ⁻²	0.7-0.4	1.3-3.6	<3-5	-	0.3
		0.5-0.15	0.2-0.6	0.78-0.22	2-15	8·10 ⁻³	0.8-0.6	2.5-3.3	<3-5	-	0.3
		0.15-0.25	0.1-0.2	0.67	-	-	-	-	-	-	-
ЛОИ-2	Непроявленный слой ГП-2: 24 мин Д-82: 1-16 мин отбеливание по [13] ФГ; 3 мин обработка по [14]	0.3	1.0	0.40	6	4·10 ⁻³	-	8	<3-5	-	0.7
		0.6-0.7	0.3-0.6	0.85-0.70	3-13	(1.5-0.7)·10 ⁻³	0.7	11-8	5-9	2·10 ⁻⁴	0.3
		0.5	6	0.40	12	8·10 ⁻³	0.6-0.8	8	<3-5	-	0.1
ВРЛ *	Непроявленный слой Д-19: 1-8 мин Д-82: 0.5-3 мин	0.7-1.5	0.7	0.74	-	-	-	-	-	-	-
		0.5-0.3	1.2-1.8	0.64-0.40	2.4-10	10 ⁻³	3-1.3	4-3.5	<3-5	-	1.1
		8-10	0.8-1.3	0.7-0.6	1.2-5	10 ⁻³	2-1.2	-	<3-5	-	-
ИАЭ *	Непроявленный слой Д-19: 5 мин	0.1-0.2	0.5-0.6	0.63	-	-	-	-	-	-	-
		0.5	1.5	0.5	5	5·10 ⁻⁴	-	-	7	10 ⁻⁴	0.7
8E75 *	Непроявленный слой Д-19: 2-16 мин Д-82: 2 мин	0.1	0.3	0.66	-	-	-	-	-	-	-
		0.6-0.6	0.7-1.5	0.8-0.75	4-9	10 ⁻⁴ -7·10 ⁻⁵	-	-	-	-	-
		0.7	1.0	0.76	6.2	1.5·10 ⁻⁴	-	-	-	5-20	2·10 ⁻⁵
10E75	Непроявленный слой Д-19: 2-8 мин Д-28: 2 мин	0.1	1-1.3	0.51	-	-	-	-	-	-	-
		0.01-0.3	1.0-1.5	0.8-0.7	2.5-6	(5-3)·10 ⁻⁵	-	-	-	-	-
		0.3	1.0	0.75	2	2·10 ⁻⁵	-	2.5-3.5	5-12	10 ⁻⁵	-

Примечание. * Проявленные фотослои отбеливались по рецепту [17].

светке, является голографическая запись шумовых потоков, которые возникают как в установке для экспонирования, так и в исследуемом слое [3, 4]. В области малых углов голографический характер рассеяния подтверждается тем, что распределение рассеянного света по углам при экспозициях, соответствующих максимуму, отличалось от обычной зависимости $I_{\text{ш}}(\theta) \sim 1/\theta^2$ и примерно повторяло распределение по углам шумов установки, которое характеризовалось значительно более быстрым спадом светорассеяния. В области больших углов в пользу данного объяснения говорит тот факт, что интенсивность светорассеяния подобно дифракционной эффективности решеток с аналогичной пространственной частотой имела ясно выраженный брэгговский макси-

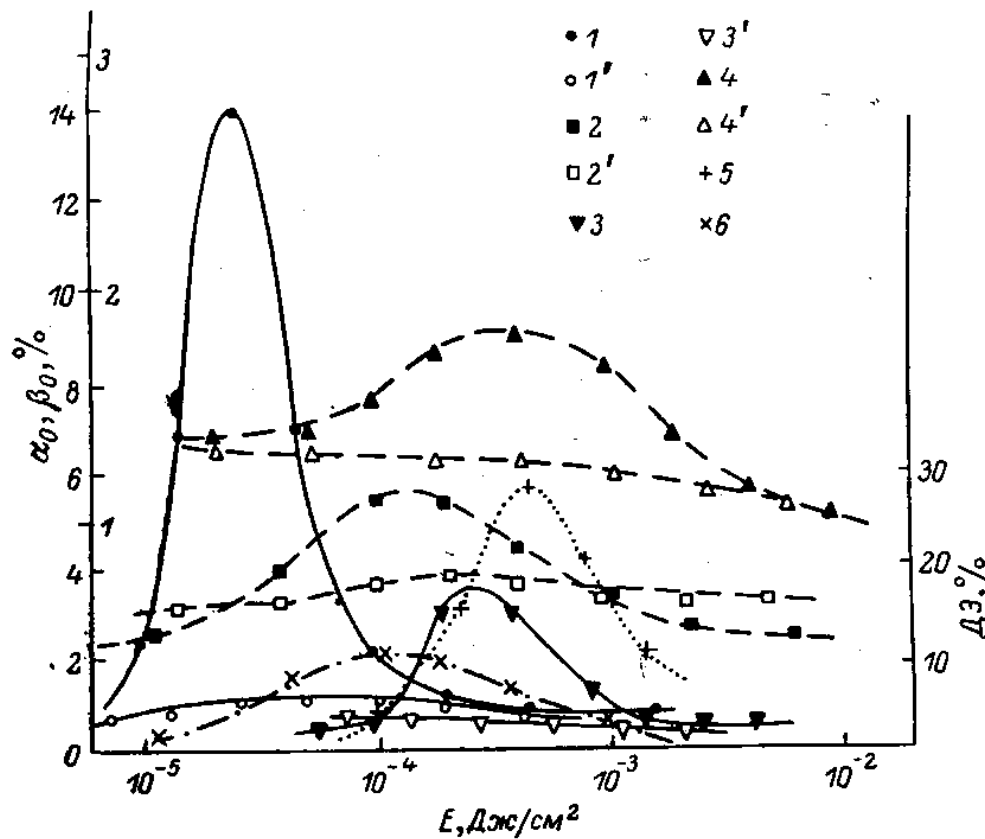


Рис. 2. Экспозиционные зависимости параметров светорассеяния под малыми α_0 (сплошные линии) и большими β_0 (штриховые линии) углами при когерентной (темные кружки) и некогерентной (светлые кружки) засветках.

1, 1'; 2, 2' — фотопластинка Agta Gevaert 8E75, проявление 8 мин в Д-19, отбеливание; 3, 3', 4, 4' — ЛОИ-2, Д-82, 16 мин, отбеливание. Зависимость ДЭ голограмм от экспозиции для фотопластинок Agta Gevaert 8E75 (6) и ЛОИ-2 (5) при той же обработке

мум, возникавший при освещении фотослоя в направлении экспонировавшего его пучка. Особенно четко этот эффект наблюдался на фотопластинках ПЭ-2, на которых были записаны шумы голограммного элемента, располагавшегося при экспонировании вплотную к этим фотопластинкам. Уровень светорассеяния элемента составлял около 1 %, а светорассеяние заэкспонированных таким образом фотопластинок после проявления в ПЭ-2 в течение 16—32 мин достигало 15—20 %. Однако расширение проявленного фотослоя путем купания в воде с целью увеличения объемности шумовых голограмм приводило при отклонении от брэгговского условия освещения проявленного слоя к снижению светорассеяния в 10—20 раз примерно до уровня, характерного для экспонирования некогерентным излучением.

Для оценки эффективности записи голограмм шумов воспользуемся представлением об усилении восстановленных голограммой световых пучков по сравнению с исходными, введенном в [7] при анализе копирования голографических элементов. Согласно [7], для фотослоя с экспоненциальной фазово-экспозиционной характеристикой (ФЭХ) вида $\varphi = \varphi_0 (1 - e^{-E/E_0})$, типичной для галогидосеребряных голографических фотоматериалов [8], усиление K_{γ_0} определяется величиной наибольшего фазового набегу φ_0 (в рад) и при оптимальной экспозиции ($E = E_0$) равно

$$K_{yc} = \left(\frac{\varphi_0}{e}\right)^2 T, \quad (1)$$

где T — пропускание фотослоя, e — основание натуральных логарифмов [9]. Возникает вопрос о том, при каких условиях рассеяние света на голограммах шумов дает основной вклад в полное светорассеяние фотослоя. Для его решения необходимо сравнить уровень светорассеяния $I_{ш}^{нк}$ для слоя, экспонированного некогерентным излучением, с уровнем светорассеяния $I_{ш}$, обусловленным шумами установки для экспонирования и непроявленного слоя, которые записываются в нем и усиливаются в результате проявления в соответствии с выражением (1). С этой целью была исследована зависимость от времени проявления

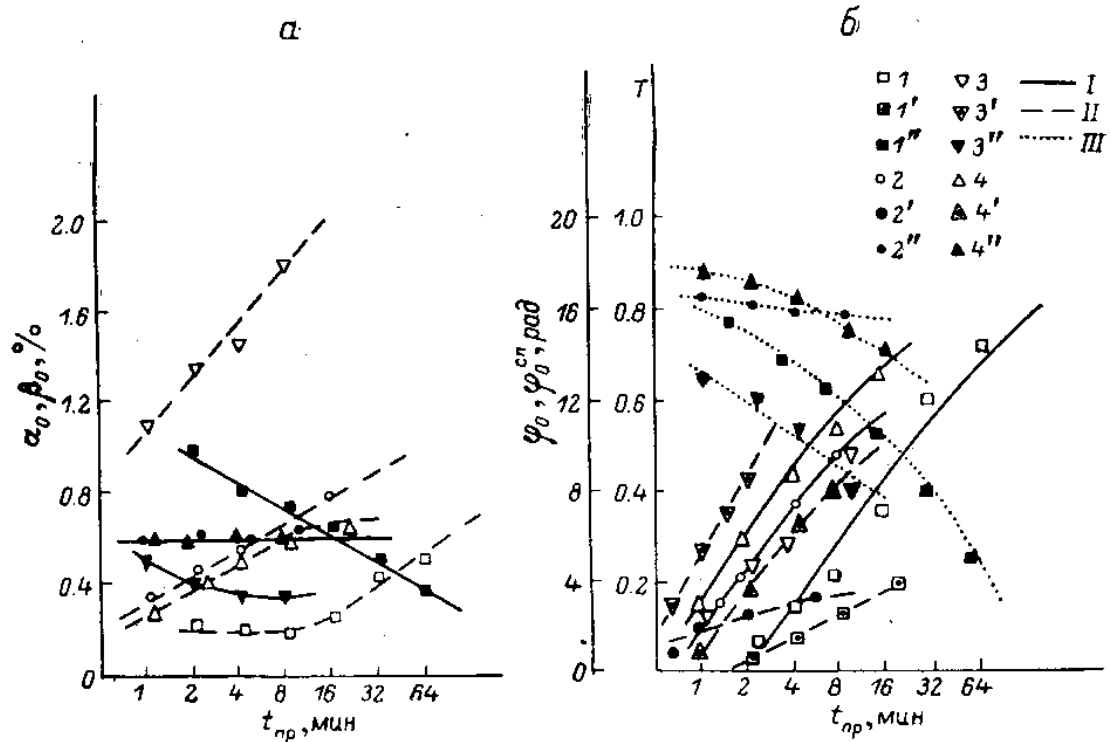


Рис. 3. Зависимости от длительности проявления параметров светорассеяния под малыми углами α_0 (I) и под большими углами β_0 (a), также наибольшего фазового набега при записи голограммы φ_0 (I), спектрограммы $\varphi_0^{ст}$ (II) и пропускания фотослоя T (III) (б).

1, 1', 1'' — ПЭ-2, ГП-2; 2, 2', 2'' — ПЭ-2, ФГ, 3, 3', 3'' — ВРЛ, Д-19; 4, 4', 4'' — ЛОИ-2, Д-82.

параметра φ_0 на пространственной частоте $\sim 1000 \text{ мм}^{-1}$, который, согласно [9], определялся максимальным значением дифракционной эффективности (ДЭ) голограмм η_m , записанных при заданном соотношении пучков M

$$\varphi_0 = e \sqrt{\frac{\eta_m}{TM}}. \quad (2)$$

Величина фазового набега φ_0 для всех исследованных слоев возрастала с увеличением длительности проявления, достигая значений от 5 до 15 рад (рис. 3, б, таблица), что, согласно (1), приводит к усилению шумов за счет их голографической записи от единиц до десятков раз. Таким образом, при уровнях светорассеяния в установке для экспонирования или в самом фотослое порядка долей процента и более, которые чаще всего и встречаются на практике, усиленные голограммой шумы превращаются в основной источник светорассеяния проявленных фотоматериалов.

Специального исследования фазовых набегов на низких пространственных частотах не проводилось, однако их величина φ_0' была приближенно оценена с помощью (2), где в качестве η_m принимались наибольшие значения малоуглового рассеяния проявленного слоя, а в качестве интенсивности объектного пучка при вычислении M — суммарный уровень малоугловых шумов установки и непроявленного фотослоя в пределах того же телесного угла ($0.5 \div 5^\circ$). Результаты таких оценок представлены в таблице вместе со значениями экспозиций

E_0' , соответствовавших максимумам малоуглового рассеяния. Наибольшие значения φ_0' наблюдались на фотослоях АГ 8Е75 при обработке в Д-19 и достигали ~ 20 рад [10]. При этом, как показали эксперименты с помещением фотослоев в иммерсию, большая часть указанного набега была связана с поверхностным рельефом эмульсии. В то же время на пространственных частотах ~ 1000 мм⁻¹ фазовые набеги, связанные с поверхностным рельефом $\varphi_0^{\text{пов}}$, были незначительными и для большинства исследованных материалов и режимов обработки не превосходили долей радиан (см. таблицу). Наиболее высокие значения $\varphi_0^{\text{пов}}$, как и в области низких пространственных частот, были получены на фотопластинках АГ 8Е75 и составили около 1.3 рад.

Рассеяние света на спектрограммах

В заключение остановимся на результатах исследования рассеяния света на спеклограммах — структурах, образующихся в результате записи на фотоматериале пространственно неоднородного поля, создаваемого в плоскости голограммы диффузно рассеивающим объектом [11]. С целью количественного описания рассеяния света на спеклограммах были экспериментально исследованы ФЭХ фотоматериалов ПЭ-2, ЛОИ-2 и ВРЛ по отношению к записи таких структур $\varphi^{\text{сп}}(E)$, а также их связь с ФЭХ, обеспечивающими запись голограмм на пространственной частоте 1000 мм⁻¹. Методика исследования ФЭХ спеклограмм была аналогична использованной в [8], полоса пространственных частот объектного пучка составляла 300 мм⁻¹. Оказалось, что ФЭХ для спеклограмм также имеет вид $\varphi^{\text{сп}}(E) = \varphi_0^{\text{сп}}(1 - e^{-E/E_0})$, причем величины $E_0^{\text{сп}}$ были практически теми же, что и E_0 , однако значения $\varphi_0^{\text{сп}}$ и φ_0 существенно отличались (рис. 2 и таблица) и их отношение менялось от 0.4 до 2.5 в зависимости от фотоматериала и типа его химико-фотографической обработки. Наибольшее значение $\varphi_0^{\text{сп}} \simeq 8$ рад достигалось на фотопластинках ВРЛ, что приводило к рассеянию на спеклограмме свыше 80 % потока падающего на нее излучения. При $\varphi_0^{\text{сп}} \simeq 2$ рад доля рассеянного излучения снижалась до 20—30 % при экспозиции $\sim 1.5 E_0^{\text{сп}}$, когда величина рассеянного потока достигала максимума. Таким образом, при неблагоприятных условиях (большие значения $\varphi_0^{\text{сп}}$ и высокая экспозиция, создаваемая на голограмме объектным пучком) вклад спеклограмм в общее рассеяние может намного превосходить вклады остальных механизмов светорассеяния. В целом проведенные исследования позволяют сделать ряд выводов.

1. Для непроявленных фотослоев, а также для проявленных при их некогерентном экспонировании имеются два существенно различных механизма светорассеяния, один из которых связан с поверхностным рельефом эмульсии и вносит основной вклад в малоугловое рассеяние, а второй — с зернами эмульсии и определяет рассеяние под большими углами. Параметры светорассеяния непроявленных фотослоев под малыми углами характеризуются типичными значениями $\alpha_0 \simeq 0.05 \div 0.3$ %, а под большими — $\beta_0 \simeq 0.1 \div 1$ %, после химико-фотографической обработки они возрастают от 1.5 до 5 раз и достигают соответственно 0.3—1 % и 0.2—1.5 %.

2. В случае когерентного экспонирования необходимо учитывать также рассеяние на голограммах шумов установки и непроявленного фотослоя, которое при больших фазовых набегах в фотослое может значительно превосходить рассеяние равномерно экспонированного фотоматериала как под большими, так и под малыми углами, поэтому в общем случае для описания светорассеяния фотослоев для голографии наряду с двумя параметрами, характеризующими рассеяние равномерно экспонированного проявленного слоя под малыми и большими углами, необходимо знать уровень шумов установки для экспонирования и шумов непроявленного слоя, а также величины соответствующих фазовых набегов фотоматериала при заданных условиях его обработки. Для некоторых фотоматериалов и режимов их обработки рассеяние на шумовых голограммах может достигать 10—20 % как под большими, так и под малыми углами.

3. Эффективным средством снижения малоуглового рассеяния при восстановлении является использование иммерсии на границе эмульсия—воздух,

которая практически не влияет на ДЭ голограмм, записанных на высоких пространственных частотах.

4. Выбор режимов обработки фотоматериалов следует связывать с угловыми размерами регистрируемых объектов. В случае записи объектов с небольшими угловыми размерами основную роль играет малоугловое рассеяние и критерием выбора является уменьшение высоты поверхностного рельефа фотослоя. Если же объект имеет большие угловые размеры, то важно снижать рассеяние света на обработанных зернах эмульсии. Однако в условиях, когда преобладающим механизмом рассеяния является голографическая запись шумов установки для непроявленного фотослоя, контраст восстановленных изображений перестает зависеть от условий химико-фотографической обработки и попытки улучшения качества изображений путем оптимизации этих условий становятся неэффективными.

5. Рассеяние света на спеклограммах является одним из важных источников шумов голографических фотоматериалов и играет определяющую роль при высоких уровнях экспозиции, создаваемых на голограмме пространственно неоднородными объектными пучками.

6. Совокупность данных, приведенных в таблице, позволяет на основе методов, изложенных в [12], дать количественную оценку качества восстановленных голографических изображений диффузно рассеивающих объектов, включая дифракционную эффективность голограммы и контраст изображений, для широкого круга голографических фотоматериалов и условий их химико-фотографической обработки.

Литература

- [1] Bieder mann K. — Optik, 1970, В. 31, Н. 4, S. 367.
- [2] Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М., 1978, с. 671.
- [3] Sums R. R. A., Soly mar L. — Opt. Commun., 1982, v. 43, N 2, p. 107.
- [4] Ward A. A., Heaton J. M., Soly mar L. — Opt. and Quant. Electron., 1984, v. 16, N 4, p. 365.
- [5] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. — Опт. и спектр., 1986, т. 61, в. 3, с. 591.
- [6] Семенов Г. Б., Даниленко М. Н., Загорская З. А., Шарова Л. В., Пилык Л. М. — Опт. и спектр., 1984, т. 56, в. 6, с. 1111.
- [7] Майер Б. О., Стаселько Д. И., Юрлова Л. А. — Опт. и спектр., 1984, т. 54, в. 6, с. 1104.
- [8] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. — Опт. и спектр., 1984, т. 57, в. 4, с. 677.
- [9] Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. — ЖТФ, 1984, т. 54, № 2, с. 302.
- [10] Smith H. M. — JOSA, 1968, v. 58, N 4, p. 533.
- [11] Upatnieks J., Leonard C. — JOSA, 1970, v. 60, N 3, p. 297.
- [12] Стаселько Д. И., Чураев А. Л. — ЖТФ, 1986, т. 56, № 2, с. 324.
- [13] Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко А. С., Гулянин Э. Х. — В кн.: Проблемы голографии. В. III. М., 1973, с. 122.
- [14] Денисюк Ю. Н., Загорская З. А., Курсакова А. М., Шевцов М. К., Щедрунова Т. В. — В кн.: Тезисы Всесоюз. конф. «Физические процессы на основе галогенидов серебра». Черногловка. М., 1983, с. 266.

Поступило в Редакцию 13 января 1986 г.