

07; 12

© 1990 г.

ПРЕДЕЛЬНАЯ ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ТОЛЩИНЫ ФАЗОВЫХ
ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАММ,
ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА ГАЛОГЕНИДОСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОСЛОЯХ

И. М. Клиот-Дашинская, Е. Б. Бруй, А. М. Курсакова

Проведен теоретический анализ записи фазовых отражательных голограмм с учетом нелинейности фазово-экспозиционных характеристик регистрирующего фотоматериала и поглощения записывающего излучения непроявленным фотослоем. Представлены расчеты и экспериментальные данные, позволяющие вычислять предельные и максимальные реализуемые на практике значения дифракционной эффективности, а также оптимальные толщины фотослоев при записи фазовых отражательных голограмм на галогенидосеребряных фотографических материалах для различных условий записи и химико-фотографической обработки при восстановлении в лазерном свете.

В ряде важных применений голографии, таких как создание голографических оптических элементов, изобразительная голография, требуется получать отражательные фазовые голограммы с максимально высокой дифракционной эффективностью (ДЭ). До сих пор эта задача решалась путем подбора оптимальной толщины фотослоя при определенной химико-фотографической обработке (ХФО) либо ХФО для слоя заданной толщины [1-5].

Цель данной работы состояла в проведении теоретического анализа предельных значений ДЭ фазовых отражательных голограмм с учетом нелинейности фазово-экспозиционных характеристик (ФЭХ), поглощения записывающего излучения непроявленным фотослоем и отношения глубины фазовой модуляции к коэффициенту поглощения фотослоя после его ХФО, определении оптимальной толщины фотослоев при различных условиях ХФО и записи голограмм, а также сравнении теоретических и экспериментальных значений ДЭ фазовых отражательных голограмм, зарегистрированных на фотослоях различной толщины.

Для расчета зависимости ДЭ фазовых отражательных голограмм от толщины фотослоя и определения предельных значений ДЭ представим ДЭ исследуемых фазовых отражательных голограмм с поглощением [6, 7] в виде [8]

$$ДЭ = \left[-\frac{\ln T}{\varphi_1} + \left(1 + \frac{\ln^2 T}{\varphi_1^2} \right)^{1/2} \operatorname{cth} \left(\frac{\varphi_1^2}{4} + \frac{\ln^2 T}{4} \right)^{1/2} \right]^{-2}, \quad (1)$$

где T — пропускание фотографического слоя по интенсивности после ХФО, φ_1 — амплитуда первой гармоники фазовой модуляции среды.

Для фотоматериалов с нелинейными фазово-экспозиционными характеристиками вида

$$\varphi = \varphi_0 [1 - \exp(-E/E_0)], \quad (2)$$

где φ_0 — максимальное значение фазовой модуляции среды; E_0 — параметр, характеризующий голографическую чувствительность фотоматериала, амплитуда первой гармоники фазовой модуляции среды в выражении (1) имеет вид [9, 10]

$$\varphi_1 = 2\varphi_0 \exp[-\varepsilon_r(1+m)] I_1(2\varepsilon_r \sqrt{m}), \quad (3)$$

где m — соотношение интенсивностей объектного и референтного пучков, $\varepsilon_r = E_r/E_0$ — нормированное значение энергии референтного пучка E_r , I_1 — модифицированная функция Бесселя первого рода.

Учитывая, что $\varphi_0 = f_0 d$ и $T = e^{-\kappa d}$, где f_0 — максимальное значение фазовой модуляции среды, достигаемое на единичной толщине фотоматериала; κ — коэффициент поглощения слоя после его ХФО; d — толщина фотоматериала, преобразуем выражение (1) к виду

$$D\Delta = \left[\frac{B}{K} + \left(2 + \frac{B^2}{K^2} \right)^{1/2} \operatorname{cth} \frac{f_0 d}{B} \sqrt{1 + \frac{B^2}{K^2}} \right]^2, \quad (4)$$

где $K = \varphi_0 / (\kappa d) = f_0 / \kappa$ — приведенный фазовый набег (постоянная для данной ХФО фотоматериала, не зависящая от его толщины величина), а $B = [2 \exp \times \times [-\varepsilon_r (1+m)] I_1 (2\varepsilon_r/m)]^{-1}$ при значении $\varepsilon_r = 1$, доставляющем максимум $D\Delta$, зависит лишь от соотношения интенсивностей пучков при записи голограмм.

Так, для достаточно прозрачных фотослоев, когда m близко к 1, значение B составляет ~ 2.29 . Согласно (4), при возрастании аргумента гиперболического котангенса (например, при увеличении

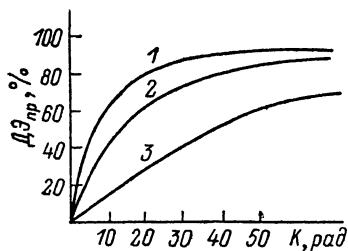


Рис. 1. Зависимости предельных значений $D\Delta$ от приведенного фазового набега K для соотношений интенсивности записываемых пучков $m=1$ (1), 0.1 (2), 0.01 (3).

толщины фотослоя) его значения стремятся к единице, а соответствующие значения $D\Delta$ достигают предельной величины

$$D\Delta_{\text{пр}} = \left[\frac{K}{B + \sqrt{K^2 + B^2}} \right]^2. \quad (5)$$

При значениях $K \gg B$ выражение (5) можно еще упростить так, что

$$D\Delta_{\text{пр}} \cong \left[\frac{K}{B + K} \right]^2.$$

Таким образом, предельные значения $D\Delta$ отражательных голограмм, которые возможно получить на фотоматериале с нелинейной фазово-экспозиционной характеристикой вида (2) при заданных условиях записи зависят лишь от величины приведенного фазового набега K , характеризующего применяемую ХФО. При $\kappa d = 1$ $K = \varphi_0$ и, таким образом, параметр K имеет смысл максимального фазового набега, который получает восстанавливающая волна при прохождении слоя с толщиной, уменьшающей интенсивность волны в e раз. Полученная зависимость предельных при данной ХФО значений $D\Delta$ от величины приведенного фазового набега приведена на рис. 1 для различных значений соотношения интенсивностей регистрирующих пучков. Видно, что при значениях $K \gg 25$, которые, как будет показано в дальнейшем, могут быть реализованы на практике, предельные значения $D\Delta$ при $m=1$ превосходят 80 %, а при $m=0.01$ — 40 %.

Т а б л и ц а 1

Фотоматериал	d , мкм	T	α , мкм ⁻¹
ПФГ-03	6—7	0.8	$3.4 \cdot 10^{-2}$
ПЭ-2 [12]	7—9	0.77	$3.3 \cdot 10^{-2}$
ЛОИ-2У } ЛОИ-3 }	12—13	0.85	$1.3 \cdot 10^{-2}$
МВР ЛИКИ	9—10	0.8	$2.4 \cdot 10^{-2}$
ИАЭ	11—12	0.68	$3.4 \cdot 10^{-2}$

Следующий шаг на пути оптимизации толщины фотослоя состоит в учете поглощения излучения в экспонируемом слое при записи голограмм, поскольку такое поглощение, с одной стороны, уменьшает величину экспонирующего голограмму потока, а в случае записи отражательных голограмм приводит также к изменению соотношения интенсивностей пучков по толщине фотослоя. Для оценки влияния поглощения в неэкспонированных фотослоях при записи голограмм были экспериментально измерены значения пропускания современных высокоразрешающих голографических фотоматериалов на длине волны записи голограмм (694 нм) при концентрациях оптического сенсбилизатора, обеспечивающих получение максимальных значений ДЭ. В табл. 1 приведены измеренные значения пропусканий при указанных толщинах фотослоя и соответствующие значения коэффициента поглощения непроявленного слоя α .

При учете поглощения в процессе записи голограммы объекта (зеркала в случае плоских волн) по схеме с двойным проходом референтной волны через фотопластинку эффективное соотношение пучков $m_{эфф}$ и энергия референтного пучка ϵ_r меняются по толщине голограммы следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{эфф} &= m \exp[-2\alpha(d-x)], \\ \epsilon_r &= \epsilon_{r_0} \exp(-\alpha x), \end{aligned} \quad (6)$$

где m — коэффициент отражения зеркала, ϵ_{r_0} — энергия референтного пучка на передней поверхности голограммы, x — переменное значение толщины фотослоя, равное 0 и d на передней и задней поверхностях голограммы соответственно.

В случае регистрации голограммы по схеме с независимым объектным пучком ($\epsilon_{об}$)

$$\begin{aligned} m_{эфф} &= \epsilon_{об}/\epsilon_{r_0} \exp[-\alpha(d-2x)], \\ \epsilon_r &= \epsilon_{r_0} \exp(-\alpha x). \end{aligned} \quad (7)$$

Расчеты зависимостей ДЭ от толщины слоя d проводились на ЭВМ по формуле (1) при различных значениях f_0 и κ для фотослоев с разными коэффициентами поглощения α при $\epsilon_{r_0} = 1$ как для малых значений соотношений пучков ($m = 0.02$), так и в случае значений соотношения пучков, близких к 1 ($m = 1$, $\epsilon_{об} = 1$). При расчете учитывалось, что для переменных по толщине голограммы значений соотношения и интенсивности регистрирующих пучков (выражения (6), или (7)) ДЭ голограммы определяется интегральным значением амплитуды первой гармоники фазовой модуляции среды

$$\varphi_1 = \frac{1}{d} \int_0^d \varphi_1(x) dx.$$

При малых значениях соотношения пучков ($m \ll 1$) выражение (1) существенно упрощается [11] и, учитывая (3) и (6),

$$\begin{aligned} \text{ДЭ} &\cong \frac{(T-1)^2}{\ln^2 T} \frac{\varphi_1^2}{4} = f_0^2 m \exp(-2\alpha d) \times \\ &\times \frac{[\exp(-\kappa d) - 1]^2}{(\kappa d)^2} \left[\int_0^d \exp[\exp(-\alpha x)] dx \right]^2. \end{aligned}$$

Видно, что толщина слоя, при которой достигается максимум ДЭ (определяемая из условия равенства нулю производной ДЭ по d), в этом случае уже не зависит от f_0 и m , а определяется лишь поглощением в слое до и после экспонирования и ХФО. В рассматриваемой области значений α и κ положение максимума ДЭ (d_{\max}) для малых значений соотношения интенсивностей пучков при записи голограммы по схеме с двойным проходом объектной волны через фотопластинку приближенно описывается формулой

$$d_{\max} \cong \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\alpha + 1.4\kappa}{\alpha}, \quad (8)$$

$$d_{\max} \cong \frac{1.7}{\alpha} \ln \frac{\alpha + 1.4\alpha}{\alpha}. \quad (9)$$

На рис. 2, а—г представлены результаты расчетов для схемы с двойным проходом объектной волны через фотопластинку при различных значениях f_0 , α и α для $m=1$, пунктиром отмечены предельные величины ДЭ и значения d_{\max} , вычисленные по формулам (5) и (8) (рис. 2, а, б приблизительно соответствуют фотоматериалам ЛОИ-3 и ПЭ-2), а на рис. 3 — при $\alpha=0.03$ мкм⁻¹ для $m=0.02$.

Из представленных расчетов видно, что учет поглощения света в непроявленном слое приводит к появлению максимума в зависимости ДЭ от толщины

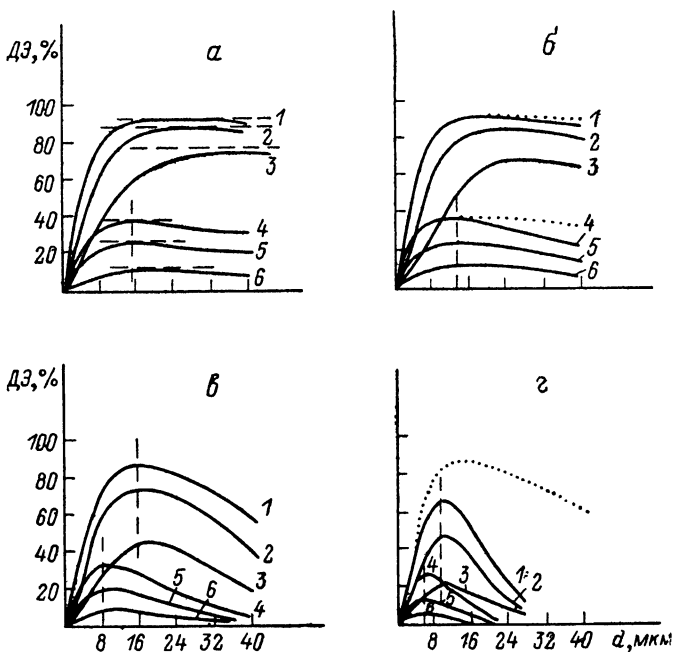


Рис. 2. Расчетные зависимости ДЭ от толщины фотоматериала при различных значениях приведенного фазового набега и коэффициентов поглощения непроявленного α и проявленного α слоев при соотношении пучков $m=1$ для схемы с двойным проходом объектной волны через фотопластинку (точками показаны соответствующие зависимости для схемы с независимым объектным пучком).

$\alpha=0.015$ (а), 0.03 (б), 0.07 (в), 0.15 (г) при $\alpha=0.02$ (1—3), 0.2 (4—6) и $f_0=1\bar{5}$ (1, 4), 0.7 (2, 5), 0.4 (3, 6).

слоя, положение и ширина которого зависят от параметров фотоматериала и ХФО (α , f_0 и α). Для слоев с высокой прозрачностью при достаточно больших величинах фазовой модуляции среды значения ДЭ близки к предельно возможным и в широком диапазоне изменения толщин фотоматериала сохраняют практически постоянное значение (рис. 2, а, б). В то же время при использовании ХФО с малыми значениями фазовых набегов, а также для фотоматериалов с большими значениями коэффициента поглощения ($\alpha > 0.1$ мкм⁻¹) максимальные реализуемые на практике значения ДЭ оказываются значительно меньшими, чем предельно возможные.

Положение максимума ДЭ также существенно зависит от поглощения в непроявленном слое и выбранной ХФО: так, при увеличении поглощения максимум ДЭ сдвигается в сторону меньших толщин, а необходимая для получения максимальных значений ДЭ толщина фотоматериала в случае отбеливания ($\alpha \sim 0.02$ мкм⁻¹) оказывается существенно большей, чем при обработке в проявителях типа ГП ($\alpha \sim 0.2$ мкм⁻¹).

Отметим, что влияние поглощения в непроявленном слое наиболее сильно

сказывается в случае, когда $\alpha \geq \kappa$, т. е. для отбеленных фотослоев. Например, при $\kappa = 0.02 \text{ мкм}^{-1}$ изменение α от 0.03 до 0.01 мкм^{-1} приводит к увеличению d_{max} вдвое. В то же время увеличение κ приблизительно на порядок при переходе от ХФО с отбеливанием к проявлению в проявителях типа ГП приводит к уменьшению d_{max} лишь в два раза, поэтому для ХФО определенного типа при различных временах проявления, когда κ меняется незначительно, зависимости d_{max} от времени проявления практически не наблюдается и, таким образом, оптимальная толщина фотослоя характеризует тип применяемой ХФО.

Выбор толщины фотоматериала, обеспечивающей максимальные величины ДЭ голограмм при малых значениях соотношения пучков, можно осуществлять в соответствии с формулами (8) или (9), а при соотношениях пучков, близких к 1, широкий максимум зависимости ДЭ (d) для прозрачных фотоматериалов позволяет получать высокие значения ДЭ на слоях со значительно меньшими толщинами, практически не зависящими от выбранной схемы записи (рис. 2, а, б).

Отметим, что расчеты, проведенные в данной работе для голограмм зеркально-отражающих объектов, можно полностью распространить и на случай регистрации толстослойных фазовых отражательных голограмм диффузно рассеивающих объектов, пользуясь соотношением $D_{\text{эфф}} \approx 0.75 D_{\text{зерк}}$, полученным в работе [11] и выполняющимся в широкой области значений пропусканий фотоматериала для величин $D_{\text{эфф}}$ вплоть до 80 %.

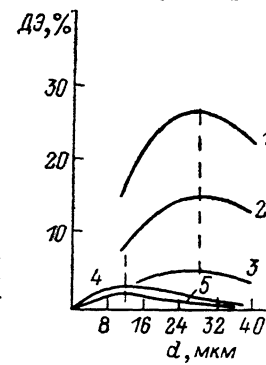


Рис. 3. Расчетные зависимости ДЭ от толщины фотоматериала с коэффициентом поглощения $\alpha = 0.03$ для соотношения пучков $m = 0.02$ при различных значениях приведенного фазового набега и коэффициентов поглощения проявленного слоя.

$\kappa = 0.02$ (1—3), 0.2 (4, 5) и $f_0 = 1$ (1, 4), 0.7 (2, 5), 0.4 (3).

Дальнейшая часть работы посвящена экспериментальному определению значений приведенного фазового набега при записи голограмм излучением импульсного рубинового лазера и исследованию различных методов ХФО с целью получения максимальных значений K .

В качестве источника излучения для записи голограмм использовался импульсный рубиновый лазер, работавший в режиме свободной генерации с длительностью импульса $\sim 3 \cdot 10^{-4}$ с и энергией 0.1 Дж. Голограммы плоских зеркал записывались по схеме Ю. Н. Денисюка с двойным проходом объектной волны через фотопластинку. Угол схождения пучков составлял 180° , экспозиция варьировалась от 10^{-5} до 10^{-2} Дж/см². Голограммы восстанавливались излучением He—Ne лазера. Пропускание фотослоев до их экспонирования измерялось с помощью спектрофотометра СФ-18 на длине волны записи голограмм, пропускание после ХФО измерялось He—Ne лазером на фотослоях, равномерно засвеченных референтным пучком. Для измерения ДЭ, интенсивности шума I_m и пропускания проявленных фотослоев T использовались селеновый фотоэлемент и фотоэлектронный умножитель ФЭУ-51. I_m измерялась под углом $\sim 1.5^\circ$ к восстановленному пучку. Условия записи и восстановления голограмм, а также методика измерения ДЭ, I_m и отношения сигнал/шум подробно изложены в работе [8]. Все значения ДЭ и T , используемые в работе, приведены с учетом Френелевских отражений. Экспериментальные измерения проводились на фотослоях ПЭ-2 [12], изготавливаемых в лабораторных условиях. Толщина слоя контролировалась с помощью двойного микроскопа МИС-11 и составляла 8 ± 1 мкм. Изготавливались также пластинки с полторной, двойной и тройной толщинами. При ХФО голограмм использовались проявители Д-94 [4], ПГ [5], ФГ [13], ГП-8 [14] и ГП-2 [15], в качестве растворителя галогенида серебра применялся роданистый калий, который вводился в рабочий раствор проявителей в количествах от 0 до 8 г/л, время проявления варьировалось от 6 до 36 мин. После проявления все голограммы фиксировались, а затем отбеливались в хлорной меди [16], отбеливателе Филлипса [4, 17],

парах брома [18] или в парах иода [5]. С целью контроля равномерности ХФО по толщине фотослоя исследовалась зависимость угловой селективности голограмм от толщины слоя. Для этого измерялся угол отклонения голограммы от брэгговского угла ($\Delta \theta$), при котором значения ДЭ падали вдвое. В исследованном диапазоне толщин фотослоя при всех рассматриваемых ХФО достаточно точно выполнялось условие $\Delta \theta \sim 1/d$, что свидетельствовало о равномерной проработке в процессе ХФО всей толщины фотослоя. Для вычисления значений ДЭ при различных толщинах фотослоя использовались результаты вышеприведенных расчетов.

Для определения значений приведенных фазовых набегов при различных методах ХФО были проведены экспериментальные измерения экспозиционных зависимостей ДЭ и $I_{\text{ш}}$ для проявления в вышеперечисленных проявителях во всем исследуемом диапазоне времен проявления при отбеливании в различных отбеливателях. С целью увеличения значений максимального фазового набега исследовалось также влияние концентрации растворителя галогенида серебра в проявителе на характеристики голограмм. Результаты исследований сведены в табл. 2, где приведены максимальные значения ДЭ, полученные для указанных ХФО при оптимальных временах проявления, соответствующие значения голографической чувствительности, а также измеренные значения пропускания голограмм и вычисленные на основе этих данных с помощью расчетов, проведенных в [11], значения максимальных фазовых набегов. В таблице представлены также значения приведенного фазового набега для различных ХФО и вычисленные с помощью выражения (5) предельные величины ДЭ ($D_{\text{пр}}$). Рассчитанные по формуле (8) значения d_{max} для исследуемых ХФО приведены в последней графе табл. 2.

Отметим, что приведенный фазовый набег, так же как и d_{max} , слабо зависел от времени проявления, а определялся главным образом типом используемой

Таблица 2

Проявитель	Отбеливатель	$t_{\text{пр}}$, мин	ДЭ, %	E_0 , Дж/см ²	T	φ_0 , рад
Д-94	CuCl ₂ Fe(NO ₃) ₃ Br ₂ } пары J ₂ }	18	27	1.5 · 10 ⁻³	0.86	3.1
			32	1.5 · 10 ⁻³	0.86	3.5
			38	2 · 10 ⁻³	0.82	4.0
			44	2 · 10 ⁻³	0.85	4.4
ПГ ФГ	J ₂ пары	15	44	7 · 10 ⁻⁴	0.85	4.4
			9	48	7 · 10 ⁻⁴	0.85
ФГ+2 г/л	Fe(NO ₃) ₃	9	57	2 · 10 ⁻³	0.84	5.6
ФГ+2 г/л		9	52	1.5 · 10 ⁻³	0.85	5.1
ГП-8	—	6	45	2 · 10 ⁻³	0.26	8.8
ГП-2	—	25	43	2 · 10 ⁻³	0.3	7.6

Таблица 2 (продолжение)

Проявитель	Отбеливатель	λ , мкм ⁻¹	f_0 , рад/мкм	K , рад	ДЭ _{пр} , %	ДЭ/ $I_{\text{ш}}$, отн. ед.	d_{max} , мкм
Д-94	CuCl ₂ Fe(NO ₃) ₃ Br ₂ } пары J ₂ }	1.9 · 10 ⁻² 1.9 · 10 ⁻² 2.5 · 10 ⁻² 2.1 · 10 ⁻²	0.39	20.5	81	0.75	30
			0.43	23	83	0.81	30
			0.50	20	80.5	0.75	28
			0.55	27	85	0.78	29.5
ПГ ФГ	J ₂ пары	2.1 · 10 ⁻² 2.1 · 10 ⁻²	0.55	27	85	1.0	29.5
			0.60	28.5	86	1.0	29.5
ФГ+2 г/л	Fe(NO ₃) ₃	2.2 · 10 ⁻²	0.70	32	87	1.0	29
ФГ+2 г/л		2.1 · 10 ⁻²	0.63	31.5	86.5	1.0	29.5
ГП-8	—	1.7 · 10 ⁻¹	1.1	6.5	50	1.4	12
ГП-2	—	1.5 · 10 ⁻¹	0.95	6.3	49	1.5	13

ХФО. Из табл. 2 следует, что максимальные значения ДЭ $\sim 48\%$ достигались при проявлении в проявителе ФГ и отбеливании в парах йода. Добавление 2 г/л роданистого калия в рабочий раствор проявителя повышало значения ДЭ до 57%, голографическая чувствительность при такой концентрации растворителя несколько падала и составляла $2 \cdot 10^{-3}$ Дж/см², а величина максимального фазового набега на всей толщине фотоматериала (~ 8 мкм) достигала 5.6 рад. Значения ДЭ, полученные на слое толщиной 8 мкм при обработке в проявителях типа ГП, были близки к предельным, в то время как при отбеливании они оказались существенно меньшими. Таким образом, при использовании слоев с увеличенной толщиной в случае обработки голограмм с отбеливанием можно ожидать существенного повышения значений ДЭ.

Необходимо отметить, что в соответствии с результатами работы [5] значения максимальных фазовых набегов при записи отражательных голограмм импульсным излучением рубинового лазера с длительностью импульса ~ 300 мкс приблизительно совпадают с величинами, полученными для записи непрерывным He—Ne лазером при проявлении в проявителях типа ГП, и оказываются несколько меньшими при отбеливании. Поэтому полученные ниже значения приведенного фазового набега для проявления в проявителях типа ГП применимы и при записи голограмм излучением He—Ne лазера, а в случае отбеливания их необходимо скорректировать, используя значения максимальных фазовых набегов, соответствующих регистрации в непрерывном режиме.

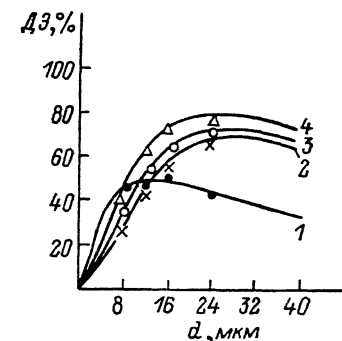


Рис. 4. Экспериментальные (точки) и расчетные (сплошные линии) зависимости ДЭ от толщины фотоматериала ПЭ-2 при проявлении в ГП-8 (1) и Д-94 (2—4) с отбеливанием в хлорной меди (2), отбеливателе Филлипса (3) и парах йода (4).

Рассматривая далее влияние толщины фотослоя на характеристики исследуемых голограмм, необходимо отметить, что при использовании слоев с тройной и более толщинами трудно было обеспечить равномерный нанос эмульсионного слоя на подложку [1, 16], образующиеся в слое дефекты приводили к нестабильности измеряемых параметров, поэтому экспериментальные измерения проводились на слоях с толщинами 8, 12, 16 и 24 мкм. Как показали эксперименты, изменение толщины слоя в указанных пределах еще позволяло обеспечить стабильность голографических параметров и равномерность ХФО по толщине фотослоя, не применяя специальных методов полива и ХФО фотоэмульсии. На рис. 4 точками показаны экспериментально измеренные значения ДЭ при проявлении образцов в ГП-2 и Д-94 с отбеливанием в хлорной меди, отбеливателе Филлипса и парах йода. Сплошными линиями показаны вычисленные с помощью выражения (1) по соответствующим значениям f_0 и κ (табл. 2) зависимости ДЭ от толщины фотоматериала при учете поглощения при записи голограмм.

Далее исследовались шумовые характеристики исследуемого фотоматериала при различных ХФО. Отношение сигнал/шум оказалось практически одинаковым для трех исследованных отбеливателей (при проявлении в проявителе Д-94), несколько повышалось при проявлении в ФГ, а при проявлении в проявителях типа ГП было в 1.5—2 раза выше, чем при ХФО с отбеливанием. Отношение сигнал / шум, как и в исследованиях, проведенных в [5], практически не зависело от времени проявления, слабо менялось в широком интервале экспозиций, превышающих E_0 , и быстро падало при меньших значениях плотности энергии. Зависимости отношения сигнал/шум от концентрации растворителя галогенида серебра в проявителе в исследованном диапазоне не наблюдалось. Экспериментальное измерение отношения сигнал/шум при различных методах отбеливания и при обработке в проявителях типа ГП также было проведено на слоях разной толщины. В исследованном диапазоне тол-

ция зависимости отношения сигнала/шум от толщины фотографического слоя обнаружено не было.

Из рис. 4 видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетными. При проявлении голограмм, зарегистрированных на фотоматериале ПЭ-2, в проявителях типа ГП уже при толщине слоя ~ 8 мкм ДЭ достигает значений, близких к предельным, и дальнейшее увеличение толщины слоя не приводит к увеличению яркости голограмм, в то же время при отбеливании, когда предельные значения ДЭ весьма высоки, увеличение толщины слоя дает возможность приблизительно в 1.5 раза повысить яркость отражательных голограмм при неизменном уровне отношения сигнал/шум.

Таким образом, представленные выше расчеты и экспериментальные данные позволяют вычислять предельные и реализуемые на практике максимальные значения ДЭ, а также оптимальные толщины фотослоев для фазовых отражательных голограмм, зарегистрированных на галогенидосеребряных фотоматериалах при различных методах ХФО и восстановлении в лазерном свете.

Отметим, что решение задачи получения голограмм с максимальной яркостью при их восстановлении в белом свете и визуальном наблюдении требует дополнительного рассмотрения с учетом спектральной селективности исследуемых голограмм и функции видности глаза.

В заключение авторы выражают благодарность Д. И. Стаселько за постоянное внимание к работе и плодотворное обсуждение ее результатов, Г. П. Пальцеву, В. И. Михайловой, Р. В. Рябовой и Н. Н. Ярославской за предоставленные образцы фотоматериалов, а также В. Н. Ведерниковой за проведение измерений толщин фотослоев.

Список литературы

- [1] Серов О. Б., Соболев Г. А., Чурсин В. Н. // Тр. НИКФИ. 1975. № 78. С. 193—198.
- [2] Любаская И. К., Серов О. Б., Смолович А. М. // Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. Вып. 1. С. 38—44.
- [3] Ворзобова Н. Д., Стаселько Д. И. // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по голографии. Л., 1978. С. 311—312.
- [4] Денисюк Ю. Н., Шевцов М. К., Артемьев С. В. и др. // Оптическая голография. Л.: Наука, 1983. С. 43—56.
- [5] Клиот-Дашинская И. М. // ЖТФ. 1988. Т. 58. Вып. 5. С. 902—907.
- [6] Ворзобова Н. Д., Лещев А. А., Семенов П. М. и др. // Опт. и спектр. 1978. Т. 45. Вып. 4. С. 779—787.
- [7] Алексеев-Попов А. В., Гевелюк С. А. // Тез. докл. республиканского семинара «Прикладная голография». Киев: Наукова думка, 1984. С. 52—54.
- [8] Kogelnik H. // The Bell System Technical J. 1969. Vol. 48. N 9. P. 2909—2947.
- [9] Андреева О. В., Суханов В. И. // Оптическая голография. Л.: Наука, 1979. С. 53—63.
- [10] Чураев А. Л., Стаселько Д. И., Бенкен А. А. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 2. С. 306—313.
- [11] Клиот-Дашинская И. М. // ЖТФ. 1986. Т. 56. Вып. 12. С. 2346—2352.
- [12] Бруй Е. Б., Клиот-Дашинская И. М., Курсакова А. М., Климзо Э. Ф. // Оптическая голография. Практические применения. Л.: Наука, 1985. С. 117—123.
- [13] Денисюк Ю. Н., Загорская З. А., Курсакова А. М. и др. // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Физические процессы на основе галогенидов серебра». М., 1983. С. 266—267.
- [14] Усанов Ю. Е., Кособокова Н. Л. // ЖНПФик. 1977. Т. 22. № 6. С. 447—448.
- [15] Усанов Ю. Е. // Регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1975. С. 98—105.
- [16] Кириллов Н. И. Высокорастворяющие фотоматериалы для голографии и процессы их обработки. М.: Наука, 1979.
- [17] Phillips N. J., Porter D. // J. Phys. E. 1976. Vol. 9. N 8. P. 631—634.
- [18] Graube A. // Appl. Opt. 1974. Vol. 13. N 2. P. 2942—2946.

Поступило в Редакцию
23 мая 1988 г.