

УДК 535.317.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕГИСТРИРУЮЩИХ СРЕД ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ

Стаселько Д. И., Чураев А. Л.

Экспериментально исследованы фазовые характеристики отечественных фотопластинок для голографии: ПЭ-2, ЛОИ-2, ИАЭ и ВРЛ. Найдена функция, описывающая фазово-экспозиционные характеристики всех исследованных материалов. Показана возможность применения этой функции для описания широкого класса регистрирующих сред для голографии.

Фазовые характеристики регистрирующих сред для голографии представляют собой зависимости фазовых набегов, возникающих в среде в результате записи голографических структур, от экспозиции (фазово-экспозиционные характеристики), от условий синтеза фотоматериалов и их химико-фотографической обработки, пространственной частоты структуры, длины волны считывающего излучения и других параметров. Актуальность исследования этих характеристик связана с тем, что фазовая запись голограмм обеспечивает наиболее высокие значения их дифракционной эффективности (ДЭ) [1, 2]. Существующие теории записи фазовых голограмм [3-5] базируются на использовании аппроксимаций фазово-экспозиционных характеристик (ФЭХ) линейными или другими функциями без достаточного теоретического или экспериментального обоснования. Методы исследования ФЭХ были предложены в [6-9], однако систематического изучения фазовых характеристик регистрирующих сред для голографии до настоящего времени не проводилось.

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование фазовых характеристик ряда наиболее распространенных отечественных галоидосеребряных фотоматериалов для голографии. Найдена функция, описывающая ФЭХ всех исследованных фотоматериалов, построена соответствующая ей физическая модель, отмечена возможность применения этой функции к описанию ФЭХ широкого круга несеребряных регистрирующих сред.

Методика определения фазовых характеристик фотослоев базировалась на измерении ДЭ голограмм в зависимости от экспозиции при фиксированном соотношении интенсивности пучков [6, 7]. Голограммы записывались в свете He-Ne-лазера ($\lambda=632.8$ нм) при угле схождения пучков, равном 45° , и симметричном их падении. Кроме того, в ряде экспериментов для записи голограмм использовались излучение импульсного лазера на рубине ($\lambda=694$ нм, $\tau_n=2 \cdot 10^{-8}$ с), а также симметричная схема регистрации во встречных пучках с углом схождения, равным 170° . Экспериментально было установлено, что изменение соотношения интенсивностей пучков от 1 : 50 до 1 : 1000 не влияло на результаты измерения фазовых характеристик. В этих условиях ДЭ голограмм не зависела и от того, является объектная волна плоской или диффузно рассеянной. Поэтому из соображений удобства записи голограмм и измерения ДЭ большинство экспериментов проводилось с диффузно рассеянными пучками при соотношении интенсивностей объектного и опорного пучков, равном 0.02. Измерения ДЭ и пропускания полученных голограмм проводились в свете He-Ne-лазера на длине волны 632.8 нм.

В качестве объектов исследования использовались промышленные образцы фотопластинок ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ и лабораторные образцы ИАЭ, сенсibilизированные в красной области спектра. Фотопластинки ЛОИ-2, ВРЛ и ИАЭ

Фотоматериал	Способ обработки	Время проявления, мин	Оптимальная экспозиция, Дж/см ²	Наибольший фазовый набег φ_0 , рад	Среднее пропускание по интенсивности, T
ВРЛ	Д-94, * [11]	5	$1 \cdot 10^{-3}$	7.0	0.65
	Д-19, * [10]	7	$1 \cdot 10^{-3}$	9.6	0.55
	Д-82, * [10]	7	$0.8 \cdot 10^{-3}$	12.6	0.65
ЛОИ-2	Д-94, * [11]	10	$2 \cdot 10^{-3}$	5.5	0.75
	Д-19, * [10]	7	$5 \cdot 10^{-3}$	4.0	0.83
	Д-82, * [10]	7	$3 \cdot 10^{-3}$	8.0	0.80
	ГП-2	12	$3 \cdot 10^{-3}$	6.2	0.45
ИАЭ	Д-94, * [11]	10	$6 \cdot 10^{-4}$	14.0	0.43
	Д-19, * [10]	7	$6 \cdot 10^{-4}$	4.0	0.69
	Д-82, * [10]	7	$4 \cdot 10^{-4}$	10.0	0.68
ПЭ-2	ГП-2	5	$3 \cdot 10^{-3}$	5.2	0.70
		15	$3 \cdot 10^{-3}$	12.1	0.40
		30	$4 \cdot 10^{-3}$	15.6	0.36
		60	$3 \cdot 10^{-3}$	16.4	0.32
	Д-94, * [11]	10	$3 \cdot 10^{-3}$	3.0	0.76
	Д-94, * [11]	10	$3 \cdot 10^{-3}$	6.2	0.74
	(встречные пучки) Д-94, * [12] (пары брома)	10	$3 \cdot 10^{-3}$	6.8	0.81

Примечание. * Способ обработки — отбеливание.

обрабатывались в проявителях Д-19, Д-82 и Д-94 в течение 5—7 мин, после чего отбеливались по рецепту [10]. Пластины ПЭ-2 обрабатывались в проявителе ГП-2, а также по рецепту, предложенному в [11], который обеспечивает высокую ДЭ отбеленных отражательных голограмм, причем отбеливание производилось не только согласно рецептуре [11], но и в парах брома [12].

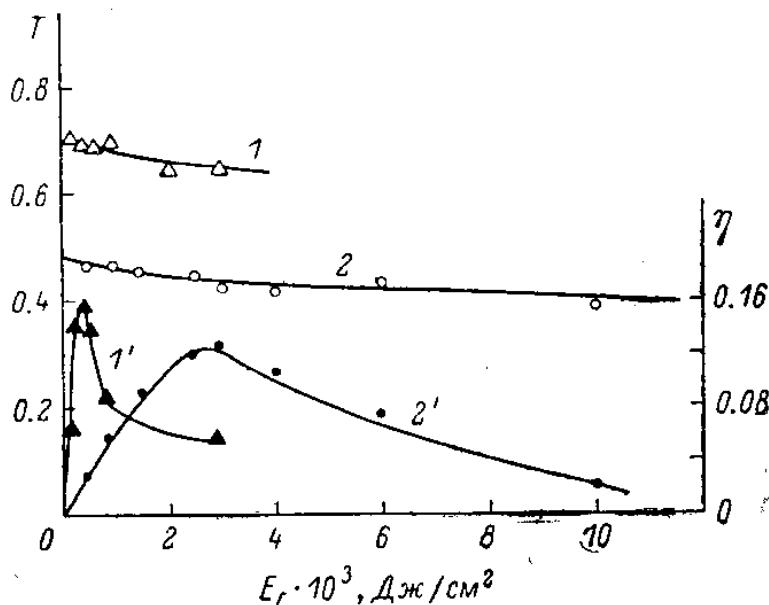


Рис. 1. Зависимость прозрачности T (1, 2) и ДЭ ($1'$, $2'$) от экспозиции.

1, $1'$ — фотопластины ИАЭ, проявитель Д-82, 2, $2'$ — ПЭ-2, ГП-2.

Как показали результаты измерений, прозрачность обработанных фотопластинок существенно менялась в зависимости от типа фотоматериала и способа его обработки (см. рис. 1 и таблицу). При этом наиболее высокое пропускание отбеленных голограмм было достигнуто на фотопластинках ПЭ-2, обработанных в парах ($T \approx 0.84$), наиболее низким пропусканием обладали фотопластины ВРЛ ($T \approx 0.55$).

Вместе с тем, согласно рис. 1, пропускание отбеленных фотослоев, а также слоев, обработанных в проявителе ГП-2, почти не зависело от экспозиции.

Это позволило при расчетах ДЭ голограмм пренебречь вкладом амплитудных компонент и рассматривать запись как чисто фазовую в среде, обладающей поглощением. Данное обстоятельство, а также малость соотношения пучков и невысокие значения ДЭ голограмм, использованных для определения фазовых характеристик ($\eta < 0.1$), позволили воспользоваться выражением для ДЭ пропускающих объемных фазовых голограмм в виде

$$\eta = T \sin(\varphi_1/2) \approx T \varphi_1^2/4 = T \left(\frac{d\varphi}{dE} \right)^2 E_r^2 M, \quad (1)$$

где $\varphi_1 = (d\varphi/dE) (\Delta E/2) = (d\varphi/dE) 2E_r \sqrt{M}$ — амплитуда первой гармоники фазовой модуляции среды, T — пропускание голограммы по интенсивности, φ — зависящий от экспозиции E фазовый набег, E_r — экспозиция, создаваемая

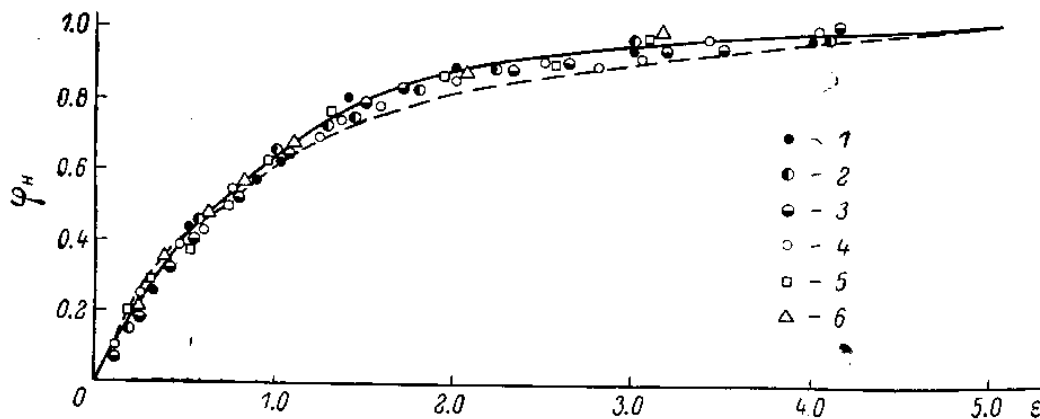


Рис. 2. Зависимость нормированного фазового набега φ_n от приведенной экспозиции ϵ для галодосеребряных фотоматериалов.

1 — ВРЛ, 2 — ЛОИ-2, 3 — ПЭ-2, 4 — ИАЭ (пропускающие голограммы, непрерывное излучение), 5 — ИАЭ (импульсное излучение), 6 — ПЭ-2 (отражательные голограммы, непрерывное излучение).

опорным пучком, $\Delta E = E_{\max} - E_{\min}$ — глубина модуляции интенсивности в интерференционной картине записывающих голограмму пучков, M — отношение интенсивностей объектного и опорного пучков. Интегрирование по E функции $(d\varphi/dE)$, найденной из (1), дает выражение для ФЭХ фотослоя $\varphi(E)$

$$\varphi(E) = \int_0^E \left[\frac{\eta(E')}{T(E')M} \right]^{1/2} \frac{dE'}{E'}. \quad (2)$$

Аналогичные выкладки для случая отражательных фазовых голограмм приводят к выражению

$$\varphi(E) = \int_0^E \{1 - \ln [T(E')^{1/2}]\} \left(\frac{\eta(E')}{M} \right)^{1/2} \frac{dE'}{E'}, \quad (3)$$

при $T \rightarrow 1$ совпадающему с (2).

Как показали проведенные с помощью (2) и (3) расчеты ФЭХ, все они имеют сходный вид: начальные участки ФЭХ близки к линейным, при дальнейшем увеличении экспозиции наблюдалось замедление роста фазового набега. Количественный анализ 20 полученных ФЭХ показал, что в области экспозиций, соответствующих линейному росту и переходу к насыщению фазового набега, указанные характеристики весьма удачно аппроксимируются удобными для расчетов функциями вида

$$\varphi(E) = \varphi_0 [1 - \exp(-E/E_0)]^{1/2}, \quad (4)$$

где φ_0 представляет собой наибольшее значение фазового набега на аппроксимируемом участке ФЭХ. Как показал эксперимент (рис. 1 и 2), экспозиция E_0 не только характеризует скорость нарастания фазового набега при увеличении экспозиции, но и одновременно соответствует максимальному значению ДЭ голограмм, т. е. является оптимальной. На рис. 2 сплошной линией представ-

лена нормированная на значения φ_0 зависимость фазового набега $\varphi_n = \varphi/\varphi_0$ от экспозиции $\varepsilon = E/E_0$, $\varphi_n(\varepsilon) = 1 - \exp(-\varepsilon)$, а также приведены экспериментальные данные, полученные для всех исследованных слоев, режимов записи и обработки голограмм. Видно, что при $E/E_0 \leq 5$ наблюдается достаточно хорошее (в пределах 10%) совпадение аппроксимирующей зависимости с экспериментальными данными. При больших экспозициях соответствие ухудшалось (до 15–20% при $E/E_0 \geq 10$). В случае фотопластинок ВРЛ некоторые отклонения от аппроксимации наблюдались также на начальном участке фазовой характеристики при $E/E_0 < 0.4$.

Таким образом, в широком диапазоне экспозиций, включающих в себя оптимальные значения, все исследованные ФЭХ оказалось возможным описать одной функцией независимо от вида фотоматериала, условий его обработки, длительности экспонирования и типа голограммы.

Значения наибольших фазовых набегов φ_0 изменялись в весьма широких пределах (от 3 до 16 рад), причем для фотослоев ПЭ-2 наблюдался результат, отмеченный ранее в [7] при исследовании фотопластинок ЛОИ-2 с другой

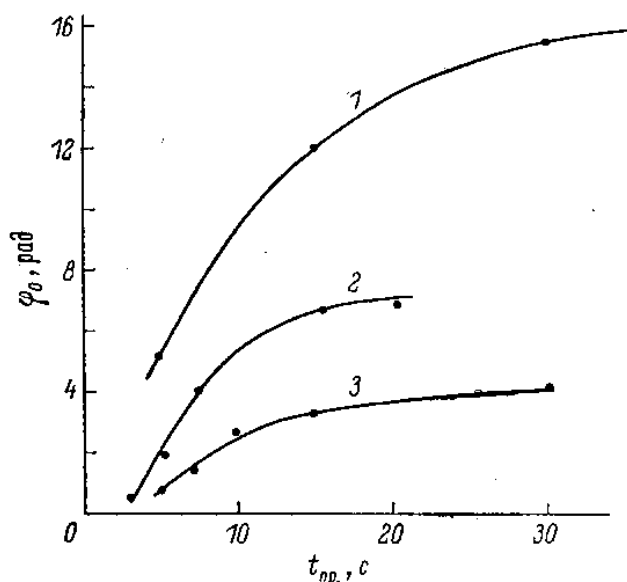


Рис. 3. Зависимость наибольшего фазового набега φ_0 от длительности проявления фотослоя.

1 — ПЭ-2, обработка в ГП-2, 2, 3 — ЛОИ-2 в Д-82 и Д-19 соответственно.

фотохимической обработкой, — двукратное увеличение фазового набега при переходе к записи отражательных голограмм по сравнению с записью голограмм пропускающего типа. Сравнивая достигнутые значения фазовых набегов при одинаковых условиях обработки, можно заметить, что более высокие значения φ_0 относятся к слоям с повышенным содержанием галогенида серебра. С другой стороны, сравнение действия на слои проявителя Д-19, широко применяемого в голографических исследованиях, и менее распространенного химически активного проявителя Д-82 показывает, что последний для всех исследованных фотослоев обеспечивал существенно более высокие значения фазовых набегов при одинаковых величинах пропускания обработанного слоя, т. е. оказался значительно более эффективным.

Значительный интерес представляет исследование зависимостей фазовых набегов от одной из основных характеристик процесса фотохимической обработки — длительности проявления. Эксперименты по кинетике проявления проводились на фотопластинках ПЭ-2 при обработке в проявителе ГП-2 от 5 до 60 мин, а также ЛОИ-2 с обработкой в Д-19 и Д-82 от 5 до 30 мин. Фотопластинки ПЭ-2 экспонировались излучением непрерывного He-Ne-лазера, а ЛОИ-2 — импульсного лазера на рубине. Полученные зависимости $\varphi(E)$ характеризовались одинаковыми значениями E_0 для данного фотоматериала и способа обработки независимо от длительности проявления. Что касается зависимостей от длительностей проявления параметра φ_0 , приведенных на рис. 3, то они достаточно хорошо описывались функциями вида

$$\varphi_0 = \varphi_{\infty} [1 - \exp(-k(t_{пр} - t_0))], \quad (5)$$

аналогичными общепринятым аппроксимациям кинетических кривых для достижимых значений плотностей почернения, известным из сенситометрических исследований фотографических слоев [13]

$$D_{max} = D_{\infty} [1 - \exp(-k(t_{пр} - t_0))]. \quad (6)$$

Для фотопластинок ПЭ-2, обработанных в проявителе ГП-2, период индукции t_0 определен не был, а в случае слоев ЛОИ-2 величина t_0 при обработке в Д-19 и Д-82 оказалась примерно одинаковой и составила около 3 мин.

Для аналитической оценки функциональной зависимости фазового набега от экспозиции воспользуемся идеализированной моделью галогидосеребряного фотослоя, состоящего из однородных по своим свойствам зерен. Будем характеризовать способность зерен галогенида серебра стать проявляемыми под действием света эффективным сечением σ , связанным с сечением поглощения излучения зерном σ_0 (собственного или сенсibilизированного), квантовым выходом фотолитиза γ и числом атомов фотолитического серебра m_0 , необходимым для проявления зерна, соотношением

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \gamma}{m_0}. \quad (7)$$

В общем случае величина σ является функцией интенсивности воздействующего на среду излучения. Например, при облучении слоя короткими интенсивными импульсами может наступить насыщение поглощения молекул сенсibilизирующего красителя, снижение квантового выхода фотолитиза из-за возрастания вероятности рекомбинации электронов и дырок при высоких уровнях возбуждения, а также увеличение числа m_0 вследствие образования более мелкодисперсного скрытого изображения [14]. Однако в пределах сравнительно небольшого диапазона изменений интенсивности излучения (один—два порядка), который обычно используется при определении фазовых характеристик, этими зависимостями можно пренебречь, и считать параметр σ постоянной величиной, не зависящей от экспозиции.

Предположим далее, что ослабление потока излучения по глубине фотослоя невелико, и плотность фотонов в объеме эмульсии является постоянной (данное предположение в случае фотопластинок для голографии, характеризуемых малым поглощением и рассеянием света, выполняется обычно достаточно хорошо). Тогда скорость изменения числа зерен эмульсии dN/dt , не достигших к моменту времени t с начала экспонирования способности к проявлению, может быть представлена как

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\sigma N(t) \Phi(t) + \frac{N_0 - N(t)}{\tau}, \quad (8)$$

где $\Phi(t)$ — плотность потока фотонов падающего на слой излучения, N_0 — плотность числа зерен эмульсии, способных стать проявляемыми после воздействия света, τ — время релаксации скрытого изображения. Рассмотрим сначала случай записи голограмм при достаточно высоком уровне освещенности фотослоя, когда длительность экспонирования t_0 мала по сравнению с τ , и процессы релаксации скрытого изображения можно не учитывать. Пренебрегая в (8) вторым членом и интегрируя оставшееся уравнение, находим, что

$$N(t) = N_0 \exp \left[-\sigma \int_0^{t_0} \Phi(t) dt \right]. \quad (9)$$

Используя (9), а также выражение для плотности фотонов излучения, падающего на эмульсию за время экспонирования $E_\Phi = \int_0^{t_0} \Phi(t) dt$, находим, что число зерен $N_{пр}$, ставших проявляемыми под действием экспозиции E_Φ , равно¹

$$N_{пр}(E_\Phi) = N_0 - N(t_0) = N_0 [1 - \exp(-\sigma E_\Phi)]. \quad (10)$$

Считая изменение фазового набега среды после отбеливания пропорциональным числу проявленных и отбеленных зерен, получаем

$$\varphi(E_\Phi) = \alpha N_{пр}(E_\Phi) = \varphi_0 [1 - \exp(-\sigma E_\Phi)], \quad (11)$$

¹ Определенная таким образом экспозиция связана с энергетическим ее значением E соотношением $E = E_\Phi h\nu$, где $h\nu$ — энергия фотона, действующего на слой излучения.

где $\varphi_0 = \alpha N_0$ в общем случае зависит от t_0 и соответствует предельному фазовому набегу среды, возникающему в результате превращения в прозрачные соли серебра всех зерен фотослоя, которые могут участвовать в процессах проявления и отбеливания, коэффициент пропорциональности α определяется типом и длительностью процессов проявления и отбеливания, а величина N_0 — условиями синтеза фотослоя и его обработки перед экспонированием.

Таким образом, возможность описания с помощью одной функции ФЭХ различных галогидосеребряных фотослоев при разных условиях их обработки и экспонирования следует из весьма общих предпосылок, и поэтому не является столь неожиданной, как это могло бы показаться на первый взгляд. Более того, поскольку рассмотренная схема работы регистрирующей среды и описывающие ее балансные уравнения присущи широкому классу фотоиндуциро-

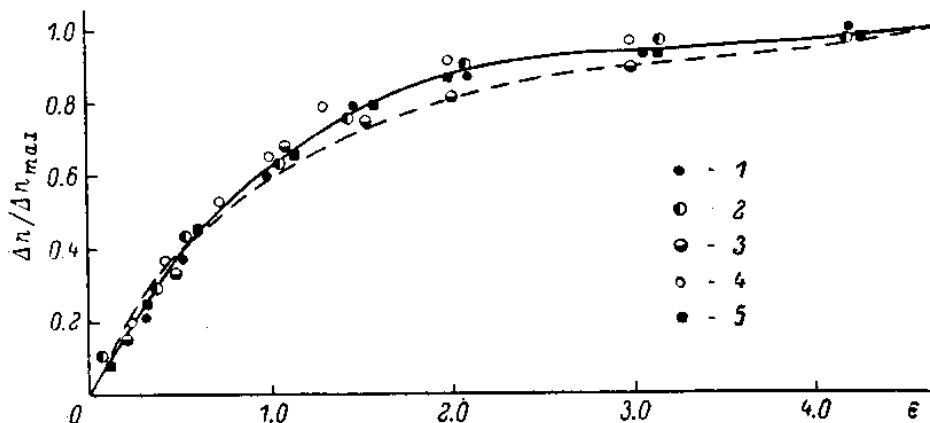


Рис. 4. Экспозиционная зависимость изменения нормированного показателя преломления $\Delta n_n = \Delta n / \Delta n_{\max}$ для несеребряных сред.

1 — кристалл ниобата лития [15], 2 — халькогенидная пленка [16], 3 — фотополимер [17], 4 — фотохромное стекло [6], 5 — бихромованная желатина [18].

ванных превращений веществ, можно ожидать, что ФЭХ аналогичного вида являются распространенными также и среди несеребряных регистрирующих сред для голографии. Это предположение подтверждается литературными данными об экспозиционных зависимостях изменения показателя преломления ряда несеребряных фотоматериалов — кристаллов ниобата лития, халькогенидных пленок, фотохромных стекол, фотополимеров и слоев бихромованной желатины, заимствованных из работ [6, 15-18] и представленных на рис. 4 в безразмерной форме наряду с функцией $1 - \exp(-\varepsilon)$ (сплошная линия).

В то же время следует отметить, что хорошее соответствие между экспериментальными данными и использованной в данной работе аппроксимирующей экспоненциальной функцией не является, вообще говоря, достаточным основанием для однозначного вывода о характере кинетики протекающих в фотослое фотохимических процессов. Обратимся, например, при анализе уравнения (8) к ситуации, противоположной рассмотренной выше, и предположим, что $t_0 \gg \tau$, а экспозиция регистрируется изменением освещенности фотоматериала. ФЭХ в этом случае будет описываться функцией вида

$$\varphi(\varepsilon) = \varepsilon / (1 + \varepsilon). \quad (12)$$

отличной от (11), которая хотя и хуже, чем (11), но все же довольно неплохо аппроксимирует экспериментальные данные (рис. 4, штриховая кривая). Кроме того, в общем случае следует принимать во внимание поглощение излучения в фотослое и неоднородность фоточувствительных центров, что может привести к заметным отклонениям реальных ФЭХ от зависимостей, полученных для идеализированной модели фотослоя. В целом проблема теоретического описания ФЭХ реальных регистрирующих сред требует дальнейших исследований с использованием более сложных моделей, учитывающих указанные выше факторы, а также экспериментальных данных, полученных в более широком диапазоне экспозиций.

Литература

- [1] Kogelnik H. — Bell Syst. Techn. J., 1969, v. 48, p. 2909.
- [2] Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М., 1973, с. 295.
- [3] Uraťnieks J., Leonard C. — JOSA, 1970, v. 60, p. 297.
- [4] Сидорович В. Г. — ЖТФ, 1976, т. 46, с. 1308.
- [5] Зельдович Б. Я., Яковлева Т. В. — Квант. электрон., 1980, т. 7, с. 519.
- [6] Аникин А. А., Малиновский В. К. — Автометрия, 1976, № 4, с. 76.
- [7] Ворзобова Н. Д., Лещев А. А., Семенов П. М., Сидорович В. Г., Стаселько Д. И. — Опт. и спектр., 1978, т. 45, в. 4, с. 779.
- [8] Гапоненко И. Е., Андреев Ю. С. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. Л., 1979, с. 90.
- [9] Андреева О. В., Суханов В. И. — В кн.: Оптическая голография. Л., 1979, с. 53.
- [10] Кириллов Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко А. С., Гулянян Э. X. — В кн.: Проблемы голографии. М., 1973, с. 122.
- [11] Денисюк Ю. Н., Артемьев С. В., Загорская З. А., Курсакова А. М., Шевцов М. К., Щедрунова Т. В. — Письма ЖТФ, 1982, т. 8, в. 10, с. 597.
- [12] Граубе А. — Appl. Opt., 1974, v. 12, p. 2942.
- [13] Миз М. Теория фотографического процесса. М.—Л., 1949, с. 304.
- [14] Джеймс Т. Теория фотографического процесса. Л., 1980, с. 138.
- [15] Micheron F., Bismuth G. — Opt. Commun., 1971, v. 3, p. 390.
- [16] Корсаков В. В., Наливайко В. И., Пен Е. Ф., Ремесник В. Г., Цукерман В. Г. — В кн.: Регистрирующие среды для голографии. Л., 1975, с. 143.
- [17] Передереева С. И., Козенков В. М., Кислица П. П. — В кн.: Несеребряные и необычные среды для голографии. Л., 1978, с. 51.
- [18] Майер Б. О., Стаселько Д. И., Юрлова Л. А. — Опт. и спектр., 1984, т. 56, в. 6, с. 1104.

Поступило в Редакцию 18 февраля 1983 г.