

УДК 535.36 : 539.1.073.7

**РАССЕЯНИЕ СВЕТА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНЫМИ
ФОТОМАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ГОЛОГРАФИИ.
ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ СВЕТА
НА МИКРОКРИСТАЛЛАХ И ПОВЕРХНОСТНОМ
РЕЛЬЕФЕ ЭМУЛЬСИИ**

Чураев А. Л., Стаселько Д. И.

Экспериментально исследовано светорассеяние голографических галогидосеребряных фотослоев. Показано, что в случае некогерентного экспонирования светорассеяние обусловлено двумя механизмами — светорассеянием на поверхностном рельефе эмульсии, обуславливающим малоугловое рассеяние, и светорассеянием на зернах эмульсии, что определяет светорассеяние под большими углами.

Рассеяние света в регистрирующих средах является одной из фундаментальных проблем голографии, поскольку оно определяет информационную емкость систем записи и обработки оптической информации, а также контраст изображений пространственно протяженных объектов [1-4]. Изучению светорассеяния высокоразрешающих фотографических слоев для голографии посвящен ряд работ [4-10]. Наиболее подробно исследовалось угловое распределение света, рассеянного проявленными неотбеленными фотопластинками Kodak 649-F, Kodak HRP и Agfa Gevaert 8E70, 10E70, 14C70, а также фотоэмульсиями ФПГВ-3 и Микрат-900 [6-9]. Было показано, что в области малых углов рассеяния θ ($\theta \leq 5-10^\circ$) интенсивность рассеянного света быстро падает как θ^n с $n \approx 1.8-2.0$ [7, 8], а затем более плавно [4-9].

Значительное число исследований посвящено также рассеянию в отбеленных фотоматериалах [10-12]. Здесь основное внимание уделялось изучению особенностей отдельных механизмов рассеяния, связанных с микрокристаллической структурой солей серебра в фотослое [12], поверхностным рельефом эмульсии [13-14], а также голографической записью шумов непроявленных фотослоев [15]. Вместе с тем до настоящего времени отсутствуют работы, в которых сравнивались бы вклады различных механизмов в общее светорассеяние фотослоя и обосновывались параметры, измерение которых дает возможность провести такую оценку.

В данной работе на основе систематического изучения светорассеяния под большими и малыми углами ряда отечественных и зарубежных фотоматериалов для голографии определена совокупность параметров, позволяющая достаточно полно описать рассеивающие свойства реальных галогидосеребряных фотослоев, и предложена методика их измерения, с помощью которой указанные параметры найдены для наиболее широко применяемых в голографии промышленных фотопластинок.

Измерения индикатрисы рассеяния проводились на длине волны гелий-неонового лазера ($\lambda = 632.8$ нм). При измерениях малоуглового рассеяния излучение, прошедшее через фотопластинку, фокусировалось линзой с фокусным расстоянием, равным 330 мм. При изучении индикатрисы рассеяния в области углов от 0.05 до 0.5° фокальная плоскость линзы проецировалась горизонтальным микроскопом с 20-кратным увеличением в плоскость фотодиода, перемещавшегося в пределах поля зрения микроскопа, которое в свою очередь

перемещалось по фокальной плоскости. Диаметр диафрагм приемника соответствовал в этом случае угловому размеру, равному примерно $3'$. При переходе к углам рассеяния от 0.5 до 5° в плоскости линзы устанавливался непрозрачный экран диаметром 5 мм, в фокальной плоскости диафрагма, диаметр которой плавно регулировался от 5 до 50 мм. Фотоприемник располагался в плоскости изображения фотопластинки, создаваемого линзой, причем диаметр диафрагмы фотоприемника соответствовал диаметру пучка излучения, падающего на фотопластинку.

Таким образом, в этом случае измерялся интегральный поток излучения, рассеянного под малыми углами. Специальные меры принимались для снижения уровня шумов в лазерных пучках, использовавшихся для экспонирования фотоматериалов и для их освещения при измерении светорассеяния. С этой целью длина пути от лазера до схемы эксперимента выбиралась достаточно большой (≥ 3 м), а на пути пучка устанавливались диафрагмы, диаметр которых на 10 — 15 % превосходил диаметр пучка по основанию. Особое внимание уделялось чистоте поверхностей поворотных зеркал, использованных для увеличения длины пути лазерного пучка.

В результате уровень интегральных шумов схемы экспонирования не превосходил 0.3 %, а схемы измерений 0.15 % в интервале углов 0.5 — 5° . В диапазоне углов от 5 до 175° для измерений индикатрисы рассеяния использовался фотоприемник, который перемещался вокруг освещенного участка фотопластинки по окружности радиусом 300 мм. Диаметр апертуры фотоприемника составлял 2 мм, что соответствовало телесному углу около $3.5 \cdot 10^{-5}$ ср. В некоторых экспериментах измерялась также величина полного потока рассеянного фотослоем света в интервале телесных углов от 10^{-4} до 2 ср. В этом случае фотоприемник с диаметром приемной части 10 мм располагался сначала вплотную к фотослою, а затем удалялся от него на расстояние 1 м, при этом рассеянный поток определялся разностью показаний фотоприемника на различных расстояниях от фотослоя. Такой способ измерения индикатрисы не требовал создания каких-либо оптических схем и при уровнях рассеянного потока свыше 5 — 10 % давал вполне приемлемые результаты, согласующиеся с данными измерений по схемам, описанным ранее.

Объектами исследования служили отечественные фотопластинки типа ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ и ИАЭ, а также зарубежные Agfa Gevaert 8E75 и 10E75. Химико-фотографическая обработка включала в себя проявление в Д-19 и Д-82 длительностью от 2 до 16 мин с последующим отбеливанием по рецепту [16] в проявителе ГП-2 от 4 до 64 мин, а также в фенидонгидрохиноновом проявителе ФГ от 1 до 8 мин, который, согласно [17], позволяет достичь высоких значений дифракционной эффективности (ДЭ) при записи отражательных фазовых голограмм.

Экспонирование фотопластинок производилось излучением гелий-неонового лазера на длине волны 632.8 нм, а также некогерентным излучением от лампы накаливания, пропущенным через фильтр КС-13. В случае лазерного экспонирования использовалась либо одна плоская волна, либо две с соотношением интенсивностей $1 : 50$, которые записывали решетку с пространственной частотой около 1000 мм $^{-1}$.

Р а с с е я н и е п о д б о л ь ш и м и у г л а м и

Типичные результаты измерений светорассеяния в диапазоне углов от 5 до 175° приведены на рис. 1 для ряда фотоматериалов при различных условиях экспонирования и химико-фотографической обработке. Из представленных результатов, а также из аналогичных данных, полученных при других режимах, следует, что величина светорассеяния сравнительно слабо изменяется в диапазонах углов 20 — 60° и 120 — 160° , резко возрастает при приближении к направлению падающего пучка и быстро убывает при переходе к перпендикулярному направлению. Отношение интенсивностей рассеяния вперед и назад при одинаковых азимутальных углах было заключено в интервале от 1.0 до 2.0 для всех исследованных фотослоев и режимов обработки. Сравнение формы индикатрис рассеяния, полученных для различных фотоматериалов, показало отсутствие

зависимости хода его углового распределения от типа фотоматериала, экспозиции или химико-фотографической обработки. Такой же вид индикатриса имела и для непроявленных фотослоев. Наблюдаемый ход индикатрисы рассеяния в области больших углов может быть объяснен на основе представления о рассеянии света на зернах эмульсии как на частицах, близких к релеевским, с уче-

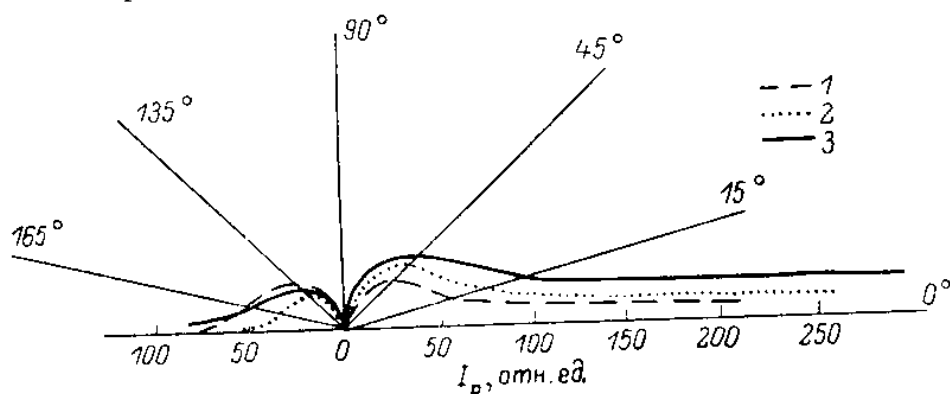


Рис. 1. Индикатрисы светорассеяния в полярных координатах фотослоев. 1 — ПЭ-2, ГП-2 15 мин, 2 — ИАЭ, Д-19 5 мин, 3 — ЛОИ-2, Д 82 8 мин при отбеливании ИАЭ и ЛОИ-2 по [16].

том преломления на границе фотопластинка—воздух. Действительно, излучение, рассеянное в фотослое под углами, большими чем 42° , не может выйти за пределы фотопластинки вследствие полного внутреннего отражения на этой границе [5]. В пределах же этого диапазона углов индикатриса рассеяния релеевских частиц остается практически равномерной. Однако при переходе рассеянного излучения из фотопластинки в воздух оно ослабляется из-за френелевского отражения, коэффициент которого зависит от угла падения света, на границу фотопластинка—воздух. Кроме того, вследствие изменения направления распространения излучения при переходе этой границы происходит также изменение линейного угла, в пределах которого распространяется рассеянное излучение, пропорционально отношению косинусов углов падения и преломления. Совместное действие этих факторов описывается множителями вида

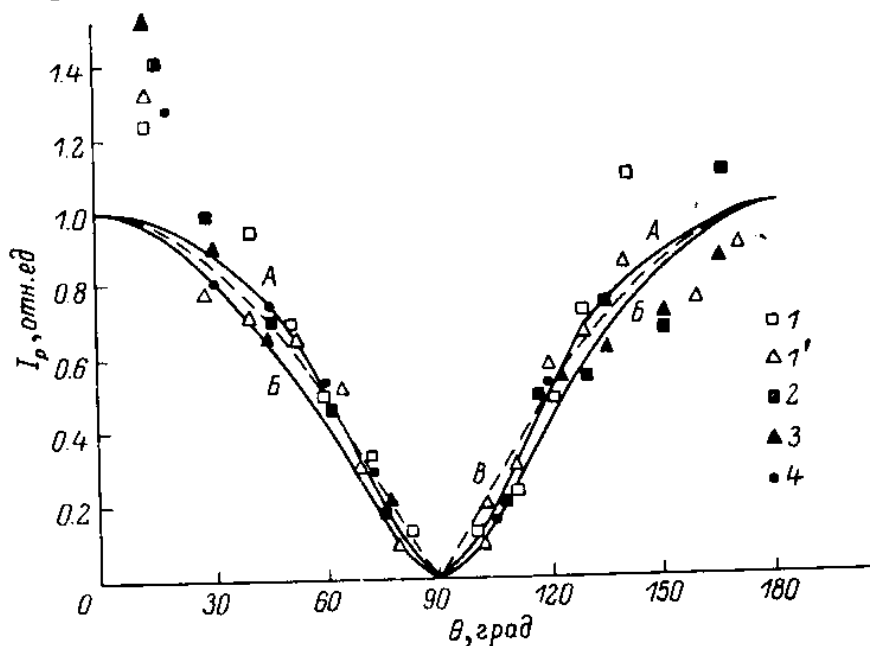


Рис. 2. Индикатрисы светорассеяния релеевских частиц с учетом френелевских отражений для поляризации перпендикулярной плоскости падения (А), параллельной плоскости падения (Б) и $\cos \theta$ (В).

Экспериментальные данные для поляризации (А), нормированные в точках $\theta=60$ и 120° . 1 — ЛОИ-2, 1' — ИАЭ не экспонированный, 2 — ЛОИ-2, Д-82 8 мин; 3 — ИАЭ, Д-82 2 мин; 4 — ПЭ-2, ГП-2 15 мин. ЛОИ-2 и ИАЭ отбеливались по рецепту [16].

евских частиц остается практически равномерной. Однако при переходе рассеянного излучения из фотопластинки в воздух оно ослабляется из-за френелевского отражения, коэффициент которого зависит от угла падения света, на границу фотопластинка—воздух. Кроме того, вследствие изменения направления распространения излучения при переходе этой границы происходит также изменение линейного угла, в пределах которого распространяется рассеянное излучение, пропорционально отношению косинусов углов падения и преломления. Совместное действие этих факторов описывается множителями вида

$$F_{\pm} = \left(\frac{\cos \theta}{n_{\phi} \cos \theta_{\phi}} \right)^2 \frac{\sin 2\theta \sin \theta_{\phi}}{\sin^2(\theta + \theta_{\phi})} \quad (1)$$

в случае поляризации падающей световой волны перпендикулярно плоскости наблюдения, и

$$F_{\parallel} = F_{\perp} \frac{\cos^2 \theta_{\phi}}{\cos^2 (\theta - \theta_{\phi})} \quad (2)$$

для ортогональной поляризации.

В (1), (2) n_{ϕ} — показатель преломления фотослоя, а $\theta_{\phi} = \arcsin \left(\frac{1}{n_{\phi}} \sin \theta \right)$ — угол рассеяния света в фотографическом слое. В (2) учтена также известная зависимость от угла θ индикатрисы рассеяния релеевских частиц для этой поляризации [18].

На рис. 2 индикатрисы рассеяния проявленных и непроявленных фотоматериалов, нормированные на значения интенсивностей при 60° , изображены вместе с зависимостями, описываемыми выражениями (1) и (2). Соответствие

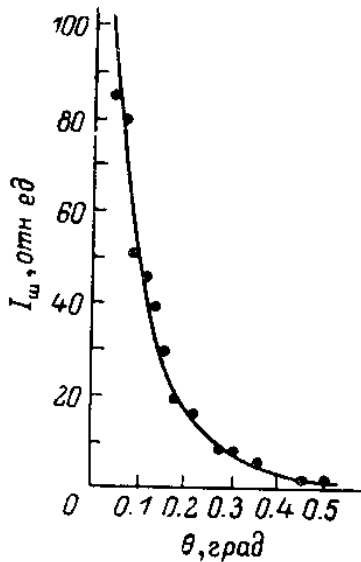


Рис. 3. Индикатриса малоуглового рассеяния фотопластинок ВРЛ (проявленные в Д-19 4 мин с отбеливанием) в диапазоне углов $0.05-0.5^\circ$.

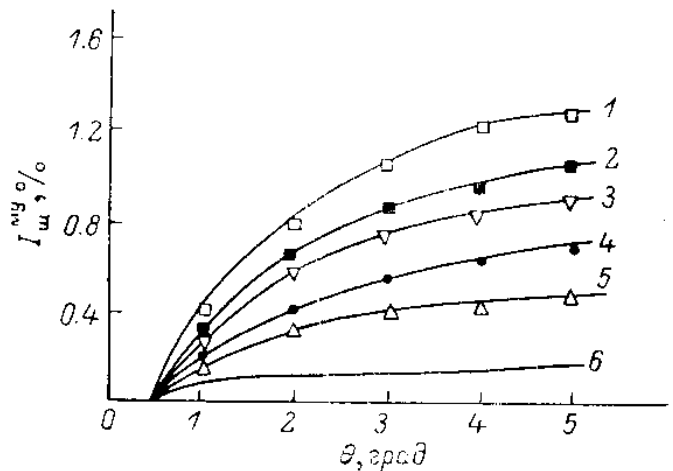


Рис. 4. Малоугловое рассеяние проявленных и непроявленных фотопластинок для голографии.

1 — ПЭ-2, ФГ, 1 мин; 2 — Agfa Gevaert D-19, 4 мин с отбеливанием; 3 — ВРЛ, Д-19, 4 мин с отбеливанием; 4 — ЛОИ-2, ГП-2, 24 мин; 5 — ЛОИ-2 без обработки; 6 — светорассеяние установки. Точки — эксперимент, линии — аппроксимация (6).

результатов расчета и эксперимента подтверждает справедливость рассмотренного ранее представления о формировании наблюдаемой индикатрисы рассеяния. Заключив рассмотрение индикатрисы рассеяния галогосеребряных фотослоев для голографии в области больших углов, следует отметить, что экспериментальные данные с весьма высокой точностью при $\theta \geq 30^\circ$ могут быть аппроксимированы функцией вида

$$I(\theta) = I(0) \cos \theta, \quad (3)$$

более удобной для аналитических оценок, чем (1), (2) (рис. 2). Зависимость интегрального потока светорассеяния под большими углами $\Phi_m(\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^\theta I(\theta) \times \sin \theta d\theta d\varphi$ представляется, например, с помощью (3) как

$$\Phi_m(\theta) = \pi \sin^2 \theta I(0). \quad (4)$$

М а л о у г л о в о е р а с с е я н и е

Результаты измерения малоуглового светорассеяния приведены на рис. 3 (индикатриса рассеяния фотопластинок ВРЛ в интервале углов $0.05-0.5^\circ$) и рис. 4 (интегральный поток в пределах углов рассеяния от 0.5 до 5° , фотопластины ПЭ-2, ЛОИ-2, ВРЛ, Agfa Gevaert 8E75). Анализ полученных за-

зависимостей показывает, что экспериментальные данные по индикатрисе рассеяния в области малых углов независимо от типа фотоматериала, экспозиции и условий обработки достаточно хорошо аппроксимируются степенной функцией $\frac{I_m(\theta)}{I_m(\theta_0)} = \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^n$ с показателем степени n , близким к 2 [8],

$$\frac{I_m(\theta)}{I_m(\theta_0)} = \left(\frac{\theta_0}{\theta}\right)^2, \quad (5)$$

а интегральный поток рассеянного света соответственно как

$$\Phi_m(\theta) = \alpha_0 \ln\left(\frac{\theta}{\theta_0}\right). \quad (6)$$

В отдельных экспериментах наблюдались отклонения n от указанного значения, однако, как показало специальное исследование, эти отклонения были связаны либо с голографической записью малоугловых шумов установки (в случае $n > 2$), либо с вкладом в интегральный измеряемый поток релеевского рассеяния на зернах эмульсии (для $n < 2$).

Таким образом, изучение индикатрис рассеяния фотографических слоев

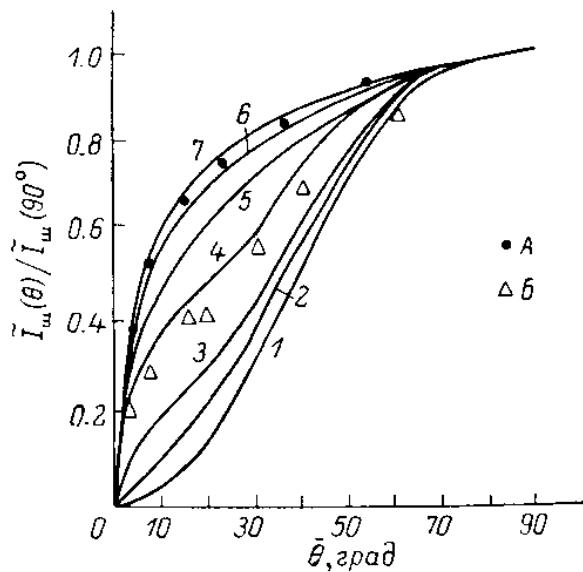


Рис. 5. Нормированное интегральное светорассеяние фотослов.

Кривые — расчет по формуле (7) при $\alpha_0/\beta_0 = 0$ (1); 0.1 (2); 0.3 (3); 1 (4); 3 (5); 10 (6); ∞ (7). Точки — эксперимент: А — ВР1, П-82, 3 мин, $\alpha_0/\beta_0 \sim 15$; В — ПЭ-2, ФГ, 4 мин, $\alpha_0/\beta_0 \sim 1$.

для голографии показывает, что для их описания достаточно задать два параметра, один из которых характеризует малоугловое рассеяние, а другой — рассеяние в области больших углов. Для практических оценок удобно, например, измерять интегральный малоугловой шумовой (МУШ) поток α_0 при отношении углов, соответствующих границам измеряемого интервала $\theta_{\max}/\theta_{\min}$, равном e , а шум под большими углами (БУШ) — интегральным потоком β_0 , приходящимся на телесный угол в 1 ср. В эксперименте параметр β_0 определялся путем измерения с помощью фотоприемника потока излучения, рассеянного под углом 30° к нормали фотопластинки в пределах телесного угла $2.8 \cdot 10^{-3}$ ср. Полученные значения делились затем на величину потока излучения, падающего на фотопластинку, и пересчитывались на телесный угол, равный 1 ср.

С учетом (4) и (6) общий интегральный поток светорассеяния в пределах заданного телесного угла от θ_{\max} до θ_{\min} определяется выражением

$$\Phi_m(\theta_{\max}, \theta_{\min}) = \alpha_0 \ln \frac{\theta_{\max}}{\theta_{\min}} + 4\pi\beta_0 \left[\sin^2\left(\frac{\theta_{\max}}{2}\right) - \sin^2\left(\frac{\theta_{\min}}{2}\right) \right]. \quad (7)$$

Вид этой зависимости, нормированной на значение функции при $\theta_{\max} = \pi/2$, приведен на рис. 5 для $\theta_{\min} = 10^{-2}$ рад и определяется параметром α_0/β_0 , характеризующим соотношение потоков светорассеяния под малыми и большими углами. При $\alpha_0/\beta_0 < 0.1$ основной вклад в светорассеяние вносит рассеяние под большими углами, при $\alpha_0/\beta_0 > 10$ — малоугловое рассеяние. Для исследованных фотослов это соотношение изменялось в зависимости от типа фотоматериала и условий химико-фотографической обработки в пределах от 5 (фотопластинки ПЭ-2, 2-4 минутное проявление в ПИ-2) до 0.2 (фотопластинки ЛОИ-2, проявление в ФГ 3 мин с отбеливанием), однако для большинства слу-

чаев было заключено в интервале от 2 до 0.5.¹ На рис. 5 представлены также результаты измерений интегральных шумов потоков $\Phi_{\text{ш}}$ для фотопластинок ВРЛ и ПЭ-2, полученные путем измерения пропускания фотопластины при различных удалениях от нее фотоприемника. Значения параметра α_0/β_0 для этих же фотослоев, найденные путем непосредственного измерения шумов под малыми и большими углами, составляли для фотопластинок ВРЛ около 15 и для ПЭ-2 ~1. Согласие результатов, полученных различными методами, подтверждает правильность предлагаемого приближенного описания рассеивающих свойств фотослоев.

С целью выяснения природы рассеяния света фотографическими эмульсиями были проведены эксперименты с непроявленными и проявленными фотослоями, в которых изучалось рассеяние света под большими и малыми углами при помещении фотослоев в иммерсию, а также при удалении из них соединений серебра. В качестве иммерсии использовался орто-ксилол, проявленные зерна эмульсии удалялись с помощью растворов бихромата калия, а непроявленные или отбеленные — гипосульфита.

Из результатов этих экспериментов следует, что малоугловое рассеяние непроявленных и проявленных фотослоев происходит преимущественно на поверхностном рельефе желатина и мало зависит от наличия или отсутствия эмульсионных зерен, тогда как рассеяние под большими углами обусловлено главным образом зернами эмульсии. Действительно, при удалении зерен эмульсии рассеяние под малыми углами почти не менялось, а в области больших углов оно снижалось от 3 до 10 раз. При помещении фотопластинок в иммерсию, напротив, БУШ оставался неизменным, а МУШ уменьшался в 5—10 раз. О различии механизмов светорассеяния под малыми и большими углами свидетельствует также сравнение соответствующих зависимостей от длительности проявления. При увеличении последней МУШ несколько снижался или оставался постоянным, тогда как БУШ заметно возрастал.

Таким образом, проведенные исследования выявили существенную общность индикатрис рассеяния фотослоев для голографии независимо от типа фотоматериала, способа его химико-фотографической обработки и величины экспозиции.

Показано, что индикатрисы рассеяния исследованных слоев могут быть представлены в виде суммы двух компонентов, резко отличающихся угловой зависимостью распределения шумов: малоуглового рассеяния, обусловленного главным образом поверхностным рельефом эмульсии, и рассеяния под большими углами, связанного с микрокристаллической структурой фотографического слоя.

Литература

- [1] Biederma n K. — Opt. Acta, 1975, v. 22, N 2, p. 103.
- [2] Гуревич С. Б., Константинов В. Б., Соколов В. К., Черных Д. Ф. Передача и обработка информации голографическими методами. М., 1978, с. 304.
- [3] Nemuga H., Okoshi T. — Appl. Opt., 1976, v. 15, N 2, p. 550.
- [4] Фризер Х. Фотографическая регистрация информации. М., 1978, с. 671.
- [5] Иванов А. П., Лойко В. А. Оптика фотографического слоя. Минск, 1983, с. 304.
- [6] Vilkomerson D. H. R. — Appl. Opt., 1970, v. 9, N 9, p. 2080.
- [7] Smith H. M. — Appl. Opt., 1972, v. 11, N 1, p. 26.
- [8] Biederma n K. — Optik, 1970, B. 31, h. 4, S. 367.
- [9] Стожарова К. А. — ОМП, 1979, № 4, с. 8.
- [10] Стаселько Л. И., Образцов В. С. — ЖНПФик, 1972, т. 17, № 2, с. 115.
- [11] Андреев Ю. С., Вахтанова Л. П., Гапоненко Е. И., Груз Э. А., Янушевская Т. А. — В кн.: Регистрирующие среды для изобразительной голографии и киноголографии. М., 1979, с. 96.
- [12] Repesse van R. L. — Phot. Sci. and Eng., 1980, v. 24, N 2, p. 114.
- [13] Лозневой Г. И., Пальцев Г. П. — ЖНПФик, 1979, т. 24, № 1, с. 3.

¹ Аналогичные измерения, выполненные на слоях бихромированной желатины, показали, что отношение α_0/β_0 может достигать для этих фотоматериалов значений порядка 30—100.

- [14] Smith H. M. — JOSA, 1968, v. 58, N 4, p. 533.
[15] Sums R. R. A., Solyman L. — Opt. Commun., 1982, v. 43, N 2, p. 107.
[16] Кирilloв Н. И., Масленкова Н. Г., Петренко А. С., Гулянян Э. Х. — В кн.: Проблемы голографии. В. III. М., 1973, с. 122.
[17] Денисюк Ю. Н., Загорская Э. 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.
[18] Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М., 1970, с. 856.

Поступило в Редакцию 13 января 1986 г.
