

07;12

Изображающие свойства двумерной скрещенной голографической решетки на галодосеребряных фотоэмульсиях

© Н.М. Ганжерли,¹ С.Н. Гуляев,² И.А. Маурер,¹ Д.Ф. Черных,¹ С.А. Ялович²

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет,
195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 16 ноября 2011 г.)

Предложена методика фотохимической обработки фотоэмульсий, позволяющая сформировать линзообразные фокусирующие элементы в узлах скрещенных двумерных голографических решеток (ДГР). Эксперименты по записи ДГР, проведенные на фотоматериале ПФГ-01 по данной методике, показали существенное улучшение изображающих свойств ДГР.

Введение

Для создания растровых изображений, в том числе микролинзовых растров, ранее было предложено использование скрещенных двумерных голографических решеток (ДГР) [1]. Скрещенную двумерную решетку легко получить, зарегистрировав дважды на галодосеребряном фотоматериале картину интерференции двух плоских волн, распространяющихся под некоторым углом друг к другу, при этом фотопластинка между двумя экспозициями должна быть повернута на угол 90° в своей плоскости. В работе [1] было показано, что распределение полной световой энергии вблизи любого минимума имеет вид функции с симметрией вращения относительно координатной точки этого минимума. В предельном случае для фотоматериала с абсолютным контрастом после проявления и фиксирования ДГР будут представлять собой матрицу круглых прозрачных апертур на темном фоне, а в реальном эксперименте границы круглых пропускающих апертур в ходе процесса химической обработки размываются.

ДГР в первом приближении можно рассматривать как набор из камер-обскур с отверстиями диаметром d_A , способных формировать периодически повторяющееся изображение на светочувствительной среде, находящейся на некотором расстоянии z от ДГР. Необходимый профиль распределения энергии в элементарном изображении раstra на светочувствительной среде (в зависимости от координат на ее поверхности) может быть получен разными способами. Например, для создания раstra микролинз можно применить светочувствительную среду, имеющую рельефно-фазовый отклик, при этом профиль распределения энергии в элементарном изображении, сформированный двумерной решеткой, должен обеспечить получение после фотохимической обработки требуемого распределения высоты поверхностного рельефа.

Обращение матрицы прозрачных апертур в ее негатив с помощью контактной печати с последующей обра-

боткой, включающей либо дубящее отбеливание [2,3], либо воздействие коротковолнового ультрафиолетового (УФ) излучения (метод ВКУФ) [4,5], формирует растр собирающих микролинз. Полученный растр состоит из круглых микролинз с большими зазорами между ними с коэффициентом заполнения площади $K = 0.3$ [1,5]. Использование оптических свойств ДГР как изображающей системы позволяет увеличить коэффициент заполнения K . Для этого на определенном расстоянии перед ДГР помещался квадратный транспарант с заданным распределением коэффициента пропускания света круговой симметрии. ДГР формировала матрицу изображений транспаранта на фоточувствительном материале — галодосеребряной фотоэмульсии ПФГ-01. После обработки фотоматериала любым из упомянутых выше способов [2–5] получалось рельефное изображение раstra микролинз со значительно большим коэффициентом заполнения ($K = 0.70$ и $K = 0.76$) [6], чем было получено ранее методом контактной печати.

В описанных выше примерах получения микролинзовых растров использовались ДГР, прозрачные апертуры которых были сформированы в результате обычного проявления и фиксирования фотоэмульсии. Как показано в работе [1], в этом случае круглым апертурам сопутствуют линзообразные впадины, поскольку толщина фотоэмульсионного слоя в местах с наименьшей плотностью серебряного изображения минимальна. Такая ДГР, состоящая из рассеивающих микролинз, кроме „дифракционной“, обладает еще и „линзовой“ расходимостью [1]. Как было показано в работе [1], несколько улучшить изображающие свойства ДГР удалось применением метода светового дубления желатин в присутствии бихроматов, введенным в галодосеребряную голографию Пеннингтоном и др. [7]. Световое дубление приводит к существенному уменьшению кривизны рассеивающих линз ДГР. Однако этим методом не удастся получить собирающие линзы, совмещенные с круглыми апертурами.

Формирование собирающих линз в узлах ДГР

Для формирования положительных линз, совмещенных с круглыми апертурами в ДГР, авторами предложен вариант обработки фотоэмульсионного слоя без операции фиксирования, состоящий из следующих этапов:

- экспозиция фотопластинок ПФГ-01 когерентным светом с целью формирования ДГР;
- проявление в контрастном проявителе Д-19;
- стоп-ванна на основе раствора уксусной кислоты;
- длительная промывка;
- сушка в темноте.

В результате такой обработки в местах круглых апертур формируется выпуклый рельеф, связанный с наличием в этих областях непроявленного галоида серебра AgBr, занимающего больший объем, чем восстановленное серебро в местах с наибольшей оптической плотностью D (см. рис. 1, *a*). Исследование полученных таким способом образцов ДГР на интерферометре МИИ-4 показало, что диаметр пропускающей круглой апертуры d_A существенно меньше диаметра линзы d_L , сформированной выпуклым рельефом (см. рис. 1, *b*).

Эксперимент показал, что высота поверхностного рельефа в центре положительных линз h_{\max} в диапазоне средних плотностей серебряного изображения D от 0.5 до 6.0 колеблется в пределах 0.2–0.4 μm . На рис. 2 изображены зависимости диаметра пропускающей круглой апертуры d_A и диаметра линзы d_L от средней

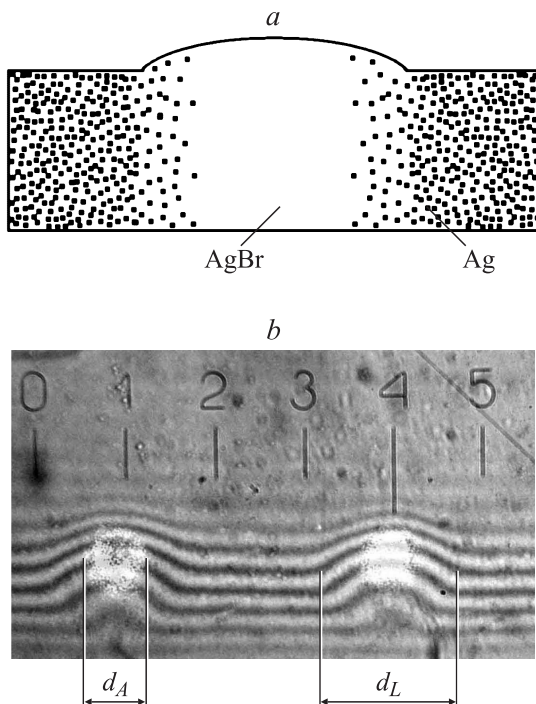


Рис. 1. Схематическое сечение фотоэмульсионного слоя после фотохимической обработки (*a*) и интерферограмма участка ДГР при дополнительной подсветке пропускающих апертур светом лазера (*b*).

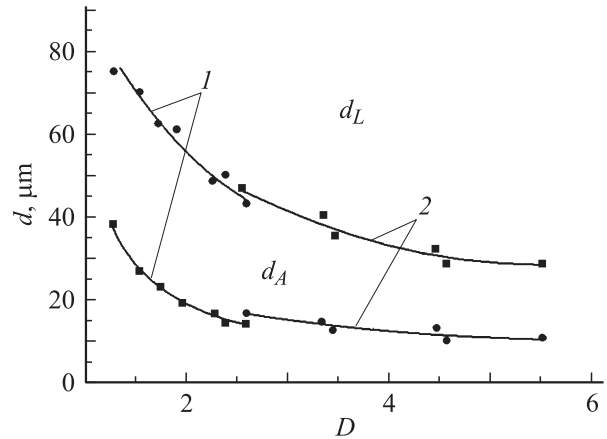


Рис. 2. Зависимость диаметра пропускающей круглой апертуры d_A и диаметра линзы d_L от средней плотности серебряного изображения D для двух партий эмульсии ПФГ-01 (кривые 1 и 2).

плотности серебряного изображения D . Как видно из рисунка, зависимости d_A и d_L от D для разных партий фотоэмульсий хорошо согласуются между собой.

Исследование изображающих свойств ДГР

Изображающие свойства ДГР определяются фокусирующими свойствами собирающих линз, совмещенных с круглыми пропускающими апертурами. Фокусирующие свойства, в свою очередь, определяются кривизной линзы и показателем преломления по всей толщине фотоэмульсионного слоя. Обратимся к рис. 3, где схематично представлено сечение фотоэмульсионного слоя в районе круглой апертуры, освещенное сверху параллельным пучком. Наличие непроявленных микрокристаллов AgBr определяет как высоту поверхностного рельефа, так и распределение показателя преломления внутри фотоэмульсионного слоя в местах круглых апертур.

Функция высоты поверхностного рельефа $h(x)$ в квадратичном приближении от координаты x описывается следующей зависимостью:

$$h(x) = \frac{4h_{\max}}{d_L^2} x^2. \quad (1)$$

Аналогично функция распределения показателя преломления может быть описана как

$$n(x) = n_0 + \Delta n_{\max} - \frac{4\Delta n_{\max}}{d_L^2} x^2, \quad (2)$$

где n_0 — показатель преломления участков фотоэмульсии с высокой плотностью серебряного изображения вне круглых апертур.

Фазовый набег световой волны, проходящей через круглую апертуру вдоль луча 1–2–3, в выходной плоскости, содержащей ось x , опускает постоянный фазовый

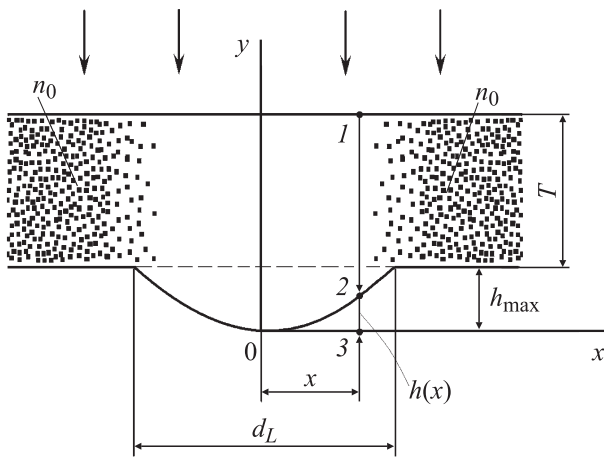


Рис. 3. Оптическая схема для вычисления фазового набега в районе круглой пропускающей апертуры.

сдвиг, можно описать формулой

$$\Delta\varphi(x) = k \left[\frac{4h_{\max}(1 - \Delta n_{\max} - n_0)}{d_L^2} x^2 - \frac{4\Delta n_{\max}(T + h_{\max})}{d_L^2} x^2 + \frac{16h_{\max}\Delta n_{\max}}{d_L^4} x^4 \right], \quad (3)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число световой волны в вакууме.

Первое слагаемое в формуле (3) обусловлено фазовым сдвигом, вносимым рельефной линзой на поверхности фотоэмульсионного слоя. Второе слагаемое учитывает наличие распределения показателя преломления внутри фотоэмульсионного слоя. Третьим слагаемым, являющимся перекрестным членом, по нашим оценкам можно пренебречь. Таким образом, функция фазового набега приобретает вид

$$\Delta\varphi(x) = k \left[\frac{4h_{\max}(1 - \Delta n_{\max} - n_0)}{d_L^2} x^2 - \frac{4\Delta n_{\max}(T + h_{\max})}{d_L^2} x^2 \right]. \quad (4)$$

Комплексная амплитуда сферической волны в выходной плоскости, сходящейся на расстоянии f от точки 0 на оси y , описывается формулой

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{k}{2f} x^2\right). \quad (5)$$

Приравняв фазовые набеги волн в формулах (4) и (5), получаем выражение для фокусного расстояния линзы, совмещенной с круглой апертурой:

$$f = \frac{d_L^2}{8[h_{\max}(n_0 - 1 + 2\Delta n_{\max}) + T\Delta n_{\max}]}. \quad (6)$$

На рис. 4,а сплошные кривые отражают зависимость экспериментально измеренных фокусных расстояний f от средней оптической плотности ДГР D для двух партий фотоэмульсии ПФГ-01 (кривые 1 и 2).

Попытаемся связать экспериментальные данные с теоретической зависимостью (6). Предположим, что $\Delta n_{\max} = 0$ (случай чисто рельефной линзы). Тогда формула (6) переходит в формулу (7)

$$f = \frac{d_L^2}{8[h_{\max}(n_0 - 1)]}. \quad (7)$$

Оценка фокусных расстояний по этой формуле дает интервал значений от 500 до 6000 μm , что значительно выше интервала значений экспериментальных данных (см. рис. 4, а). Таким образом, можно предположить, что основной вклад в величину f определяется наличием линзы показателя преломления. На рис. 4,а заштрихованная область соответствует рассчитанным по формуле (6) значениям f , определенным с учетом ошибок измерений параметров, входящих в формулу. Экспериментальные и теоретические данные хорошо совпадают, если величина $\Delta n_{\max} = 0.17$ при толщине фотоэмульсионного слоя $T = 7.7 \mu\text{m}$. Эта величина, определяющая максимальное изменение показателя преломления в области с наибольшим содержанием AgBr в фотоэмульсии,

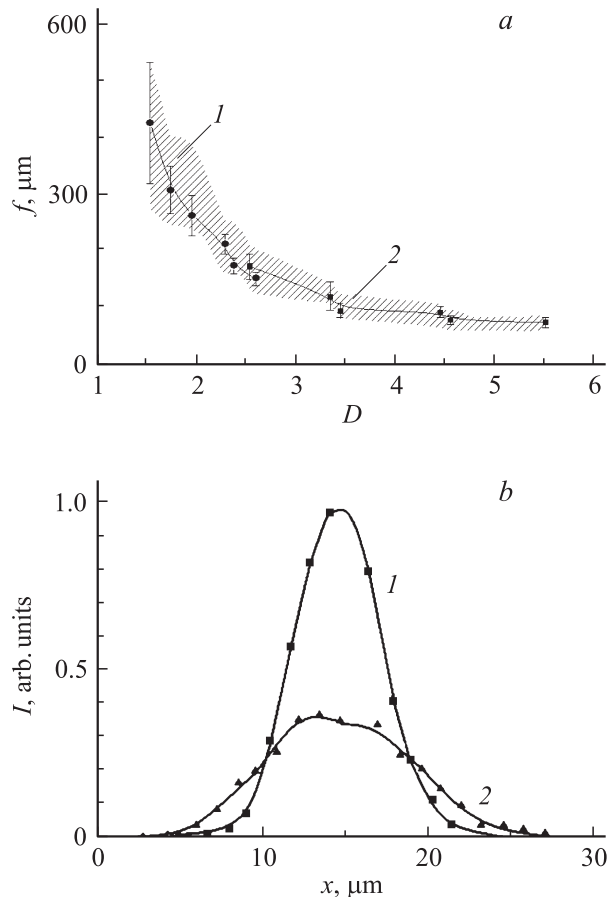


Рис. 4. Экспериментальная (сплошная кривая) и теоретическая (заштрихованная область) зависимости фокусных расстояний f от средней оптической плотности ДГР D (а) и распределение интенсивности света в плоскости фокального пятна микролинзы (кривая 1) и в плоскости круглой пропускающей апертуры (кривая 2) (б).

хорошо соответствует данным работ [8–10] по измерению максимальных вариаций показателя преломления в фотоэмульсионных слоях при отбеливании.

Для уточнения формы и размеров апертур микролинз и размеров фокальных пятен было проведено их сканирование с помощью фотодетектора в плоскости ДГР и в фокальной плоскости микролинз для двух образцов ДГР с различной средней плотностью серебряного изображения $D = 2.53$ и 5.5 (рис. 4, *b*).

Результаты сканирования для различных микролинз в одном и том же образце ДГР показали следующее:

- интенсивность света в фокальном пятне возрастает примерно в 2 раза за счет концентрации световой энергии вследствие фокусировки света собирающей линзой, совмещенной с круглой пропускающей апертурой;

- распределение интенсивности вдоль поперечной координаты x показывает заметное уменьшение размера фокального пятна по сравнению с диаметром круглой пропускающей апертуры d_A примерно в 1.5 раза;

- распределения интенсивности света, снятые для различных круглых пропускающих апертур, отличаются друг от друга и имеют большую неравномерность, что обусловлено когерентным шумом, проявляющимся при больших величинах экспозиции фотоэмульсии. В то же время распределение интенсивности в фокальном пятне представляет собой гладкую симметричную функцию и практически не зависит от выбора микролинзы.

Оценка диаметров фокальных пятен для различных образцов голограмм может быть произведена по известной формуле

$$2r = 2 \frac{1.22f\lambda}{d_A}, \quad (8)$$

где λ — длина волны освещающего пучка ($0.65 \mu\text{m}$), f — фокусное расстояние микролинзы, d_A — диаметр пропускающей круглой апертуры, совмещенной с микролинзой, r — радиус первого темного кольца, относящийся к критерию разрешения Релея.

На рис. 5 представлены зависимости диаметров фокальных пятен от оптической плотности серебряного изображения образцов голограмм, рассчитанные следующим образом:

- черные кружки и квадраты с указанием разброса значений — диаметры фокальных пятен, вычисленные по формуле (8), где f и d_A определены экспериментально с помощью интерферометра МИИ-4;

- заштрихованная полоса — интервал значений диаметров фокальных пятен, определенный по формуле (8), где f рассчитывалось теоретически по формуле (6), а значения d_A определены экспериментально с помощью интерферометра МИИ-4, как и в предыдущем случае;

- большие квадраты — значения диаметров фокальных пятен, определенные экспериментально, непосредственно из сканированных распределений света в локальных пятнах голограмм разной средней оптической плотности ($D = 2.53$ и $D = 5.5$).

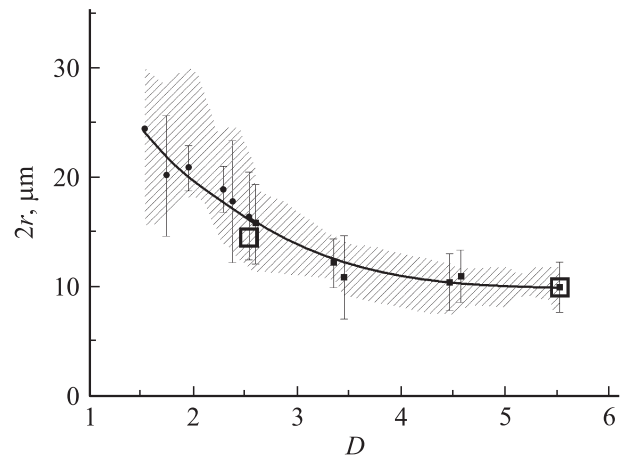


Рис. 5. Зависимость диаметра фокального пятна от плотности серебряного изображения.

Рис. 5 показывает, что данные по определению диаметров фокальных пятен, полученные разными методами, хорошо согласуются между собой, что служит дополнительным подтверждением предложенной теоретической модели фокусирующих свойств круглых пропускающих апертур. Однако существенное сужение (примерно на 30–35%) диаметра фокального пятна для голограммы со средней оптической плотностью $D = 5.5$ по сравнению с голограммой с $D = 2.53$ сопровождается, как показывают наши измерения, значительным уменьшением интенсивности света в максимуме распределения интенсивности в фокальном пятне примерно в 500 раз. Таким образом, практическое использование ДГР со средними оптическими плотностями серебряного изображения D существенно больше величины 2.53 нецелесообразно из-за сильного поглощения света такими структурами.

О разрешающей способности ДГР можно судить по диаметру пятна рассеяния, создаваемого ДГР как изображающей системы в плоскости регистрации растровых изображений. Сравним разрешающую способность ДГР, изготовленной по предложенной методике, с достигнутыми ранее результатами на основе обычной методики получения ДГР с помощью проявления и фиксирования [1]. Для сравнения была выбрана ДГР со средней оптической плотностью $D = 2.53$ со следующими параметрами: $f \approx 170 \mu\text{m}$, $d_A \approx 16 \mu\text{m}$ и диаметром пятна рассеяния в фокальной плоскости $2r = 14.1 \mu\text{m}$. Для расчета диаметров пятна рассеяния по данным работы [1] мы выбрали аналогичные параметры: $170 \mu\text{m}$ — расстояние от ДГР до плоскости регистрации растрового изображения, $d = 16 \mu\text{m}$ — диаметр круглой апертуры. Согласно работе [1], можно определить параметры пятна рассеяния, вызванного „дифракционной“ и „линзовой“ расходимостями.

Результаты расчетов приведены в таблице, из которой видно, что предложенная методика получения ДГР позволяет улучшить разрешающую способность

Диаметры пятна рассеяния для ДГР, полученных разными способами

Способ получения ДГР	Диаметр пятна рассеяния		Полный диаметр пятна рассеяния, μm
	обусловленного дифракционной расхожимостью, μm	обусловленного линзовой расхожимостью, μm	
Расчет по экспериментальным данным и формулам статьи [1]	29.4	34.7–53.4	63.1–82.8
Экспериментальные данные для ДГР с $D \approx 2.53$, полученной по новой методике	–	–	14.1

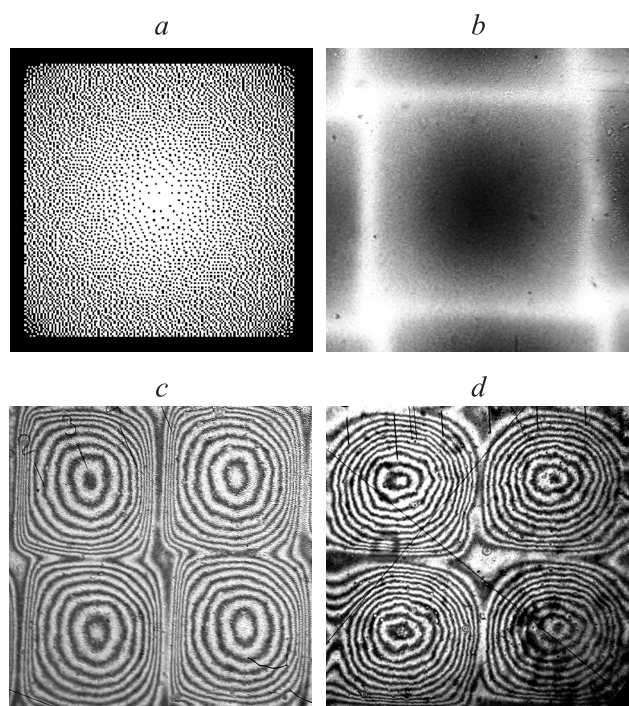


Рис. 6. Изображения транспаранта бинарного типа (*a*) и элемента амплитудной периодической растровой структуры (*b*) и интерферограммы участков рельефных растровых структур, полученных дубящим отбеливанием (*c*) и методом ВКУФ (*d*).

ДГР в 4–6 раз по сравнению с ранее достигнутыми и опубликованными результатами. Более высокая разрешающая способность дает возможность создавать растровые изображения с большим количеством деталей в элементе периода, в частности, использовать ДГР для записи растров микролинз с высоким коэффициентом заполнения.

Получение микролинзовых растров с помощью ДГР

ДГР, полученные по предложенной в настоящей работе методике, использовались для записи микролинзовых растров. Для этого изображение исходного транспаранта бинарного типа (рис. 6, *a*) с помощью ДГР с

фокусирующими свойствами регистрировалось на фотопластинках ПФГ-01 в виде амплитудного изображения, каждый элемент которого обладал круговой симметрией (рис. 6, *b*). Транспарант бинарного типа был необходим для создания распределения освещенности, которое обеспечивало получение линзообразного рельефа после фотохимической обработки. Далее амплитудное изображение преобразовывалось в поверхностный рельеф либо дубящим отбеливанием (рис. 6, *c*), либо методом ВКУФ (рис. 6, *d*). Изображения участков микролинзовых растров на рис. 6, *c*, *d* получены с помощью интерферометра МИИ-4. Как видно из рисунка, наблюдается более полное смыкание элементов микролинзового растра по сравнению с ранее полученными результатами.

Заключение

Показано, что предложенная методика получения ДГР позволяет улучшить разрешающую способность ДГР в 4–6 раз по сравнению с ранее достигнутыми и опубликованными в работах [1,6] результатами. Более высокая разрешающая способность дает возможность создавать растровые изображения с большим количеством деталей в элементе ДГР, в частности, использовать ДГР для записи растров микролинз с высоким коэффициентом заполнения.

Авторы выражают благодарность А.В. Гаврилову за расчет и изготовление освещающих транспарантов.

Список литературы

- [1] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Гурин А.С., Крамущенко Д.Д., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // Опт. журн. 2009. Т. 76. Вып. 7. С. 16–20.
- [2] Smith H.M. // J. Opt. Soc. Am. 1968. Vol. 58. N 4. P. 533–539.
- [3] Бруй Е. Б., Корешев С. Н. // Оптика и спектроскопия. 1989. Т. 66. Вып. 3. С. 685–688.
- [4] Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Опт. журн. 2003. Т. 70. Вып. 2. С. 45–49.
- [5] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Гурин А.С., Крамущенко Д.Д., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // ЖТФ. 2009. Т. 79. Вып. 7. С. 76–80.

- [6] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // Труды 9 Международной конф. „Прикладная оптика — 2010“. СПб.: 2010. Т. 1 (Ч. 2). Оптическое приборостроение. С. 45–46.
- [7] Pennington K.S., Harper J.S., Laming F.P. // Appl. Phys. Lett. 1971. Vol. 18. N 3. P. 80–84.
- [8] Neipp C., Pascual I., Beléndez A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. Vol. 35. P. 957–967.
- [9] Neipp C., Beléndez A., Pascual I. Optimization of fixation-free rehalogenating bleach for BB-640 holographic plates // Proceedings of SPIE. 2000. Vol. 4149. P. 91–99.
- [10] Neipp C., Pascual I., Beléndez A. // Appl. Opt. 2001. Vol. 40. N 20. P. 3402–3408.