

07;12

Формирование случайных и регулярных рельефно-фазовых структур на галоидосеребряных фотоэмульсиях голографическими методами

© Н.М. Ганжерли,¹ С.Н. Гуляев,² А.С. Гурин,¹ Д.Д. Крамущенко,¹ И.А. Маурер,¹ Д.Ф. Черных¹

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 9 июля 2008 г.)

Рассматриваются голографические методы получения диффузоров и микролинзовых растров на галоидосеребряных фотоэмульсиях. Проведено сравнение технологий преобразования амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую: избирательного дублирования и воздействия коротковолновым УФ-излучением на желатин эмульсионного слоя.

PACS: 42.40.Eq, 42.40.Ht, 42.70.Ln

Введение

Статья посвящена созданию диффузоров с повышенной эффективностью пропускания света в определенном направлении, обладающих улучшенной индикатрисой рассеяния, и микролинзовых растров голографическими методами. Голографические диффузоры используются в устройствах формирования светового пучка, в дисплеях и световых экранах, проекционных системах, в том числе системах воспроизведения голографических изображений кругового обзора и т.д. [1–4].

Микролинзовые растры находят применение в оптических системах для задач мультиплицирования, в системах построения объемных изображений на основе ЖК-экранов в стереодисплеях и в трехмерных дисплеях, воспроизводящих объемное изображение в виде нескольких последовательных ракурсов объемной сцены, любые два из которых составляют стереопару [5]. Одним из перспективных методов применения микролинзовых растров является их использование в многоканальных системах обработки оптической информации, когда фокальная плоскость растра сопрягается с матрицей фотоприемников. С помощью микролинзовых растров можно осуществлять измерения линейных перемещений, а также прецизионный мониторинг искривленных поверхностей и фазовых неоднородностей.

В основе методов получения высокоэффективных голографических оптических элементов на галоидосеребряных фотоэмульсиях лежит преобразование амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую. Существуют методы формирования голографических структур на поверхности фотоэмульсии в виде рельефа. Данные методы позволяют получать глубину поверхностного рельефа порядка $1\ \mu\text{m}$, что допускает использование полученных структур в качестве эталонов для промышленного тиражирования методом тиснения. Формирование поверхностного рельефа голографической структуры на макроуровне с характерными размерами,

превышающими длину волны видимого света, происходит за счет периодической пространственной модуляции физико-химических свойств желатина на молекулярном уровне. Обычно методы голографической рельефно-фазовой записи базируются на избирательном дублировании, или структурировании желатина с помощью дубящего отбеливания (сшивания желатиновых молекул) в растворах, содержащих бихроматы [6–10]. Образование рельефа связано с перераспределением объемов желатина в фотоэмульсионном слое.

Альтернативным избирательному дублированию является способ получения рельефа с помощью воздействия на фотоэмульсионный слой коротковолновым УФ-излучением (метод ВКУФ) [11]. В данном случае происходит деструкция — разрыв основных связей в цепях желатиновых молекул. Метод ВКУФ ранее применялся и показал свою эффективность при создании регулярных структур типа решеток, зонных пластинок Френеля, дифракционных оптических элементов со сложным профилем рельефа в периоде структуры, дискретно рассеивающих падающий пучок в некотором телесном угле, голографических диффузоров [12–15].

Образование рельефа на поверхности фотоматериала по методу ВКУФ основано на свойстве желатиновых слоев изменять свою толщину под воздействием УФ-излучения с последующей обработкой в воде. Количество энергии УФ-излучения, поглощенного различными участками желатинового слоя, определяется оптической плотностью серебряного изображения, которое создается в эмульсии за счет обычных операций проявления и фиксирования. Непроявленные участки фотоэмульсии поглощают УФ-излучение более интенсивно и после обработки в воде и сушки приобретают меньшую толщину по сравнению с участками, где УФ-излучение экранируется серебряным изображением. Таким образом, голографическая информация записывается на фотоматериале в виде поверхностного рельефа. Процедура

обработки по методу ВКУФ и состав растворов были описаны ранее в работе [11].

Простота фотохимической обработки и высокая воспроизводимость результатов по методу избирательного дубления и методу ВКУФ послужили причиной того, что именно они были выбраны нами как основные в сравнительных исследованиях по синтезу голографических диффузоров и микролинзовых растров.

Методика регистрации голографических диффузоров

Целью исследования при получении голографических диффузоров явилось определение влияния параметров оптической схемы регистрации и процесса фотохимической обработки галоидосеребряных фотоэмульсий на рассеивающие характеристики диффузоров. В качестве оптической схемы регистрации диффузоров была выбрана безопорная схема записи голограмм.

Область пространственных частот ν , регистрируемых голограммой (рис. 1), определяется внешним диаметром апертуры d_1 первичного рассеивателя D_1 . Для предельной пространственной частоты ν_{\max} при достаточно больших расстояниях L от первичного рассеивателя до регистрирующей среды H можно приближенно записать:

$$\nu_{\max} \approx d_1/\lambda L, \quad (1)$$

где λ — длина волны излучения лазера.

В эксперименте изготавливались образцы голографических диффузоров, полученные при соотношениях внешнего диаметра d_1 к внутреннему d_2 , равных 1.07 (апертура в виде кольца) и ∞ (апертура в форме круга). Образцы голографических диффузоров после стадии первичной амплитудной записи подвергались дубящему отбеливанию либо воздействию коротковолновым УФ-излучением. Дубящее отбеливание проводилось по следующей схеме: экспозиции фотопластинки когерентным излучением лазера— проявление— фиксирование— отбеливание в составе R-10—

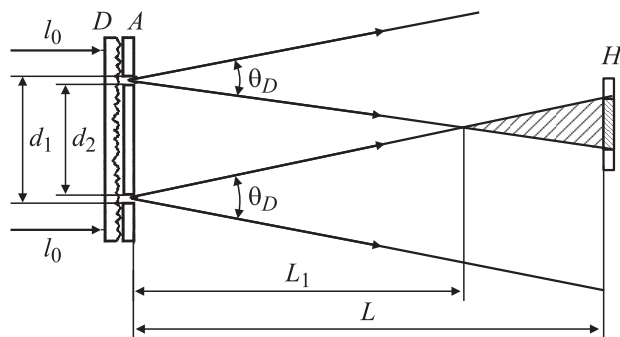


Рис. 1. Безопорная оптическая схема регистрации голографических диффузоров: l_0 — падающий пучок света, D — первичный рассеиватель с шириной индикатрисы рассеивания θ_D , A — кольцевая апертура с внешним (d_1) и внутренним (d_2) диаметрами, H — голограмма.

фиксирование. Метод ВКУФ включал в себя следующее: экспозиция— проявление— фиксирование— облучение фотопластинки УФ-излучением— отбеливание в недубящем медном отбеливателе— фиксирование. В обоих случаях серебряное изображение удалялось из фотоэмульсионного слоя, в результате чего получались чисто рельефно-фазовые рассеивающие структуры. Для получения диффузоров использовался отечественный голографический фотоматериал ПФГ-01.

Одним из основных факторов, определяющих рассеивающие свойства голографических диффузоров, является пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) светочувствительной среды, отражающая зависимость дифракционной эффективности или высоты рельефа голографической структуры от пространственной частоты интерференционной картины. В области пространственных частот $\nu = 200\text{--}1500\text{ mm}^{-1}$ для всех галоидосеребряных фотоматериалов с рельефно-фазовой записью наблюдается более или менее быстрый спад ПЧХ, причиной которого являются силы поверхностного натяжения, возникающие при сушке влажного фотоэмульсионного слоя [16]. Согласно работе [14], увеличение площади поверхности высушенной фотоэмульсии с ростом пространственной частоты при постоянной величине высоты поверхностного рельефа возможно только до некоторой пороговой величины ν_{\max} . Значения глубины поверхностного рельефа h в указанном диапазоне пространственных частот, оцененные по этой модели для метода ВКУФ, хорошо согласуются с данными, полученными для галоидосеребряных фотоэмульсионных слоев и для слоев бихромированного желатина с помощью разных способов получения рельефно-фазовых структур.

Таким образом, следует ожидать, что рассеивающие свойства голографических диффузоров должны определяться не только параметрами оптической схемы записи, но и передаточными характеристиками светочувствительной среды.

Обсуждение экспериментальных результатов

Основным результатом измерений явилось снятие индикатрис рассеяния диффузоров при разных соотношениях между внешним диаметром d_1 первичного рассеивателя и расстоянием L от него до плоскости регистрации. Предельный угол рассеяния голографического диффузора θ_{\max} , записанного в линейном режиме регистрации (амплитудная запись), определяется областью регистрируемых пространственных частот и в радианной мере равен

$$\theta_{\max} \approx \lambda \nu_{\max} \approx d_1/L. \quad (2)$$

Кривая 1 на рис. 2 отражает эту зависимость, кривая 2 дает зависимость ширины нормированной индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$, измеренной

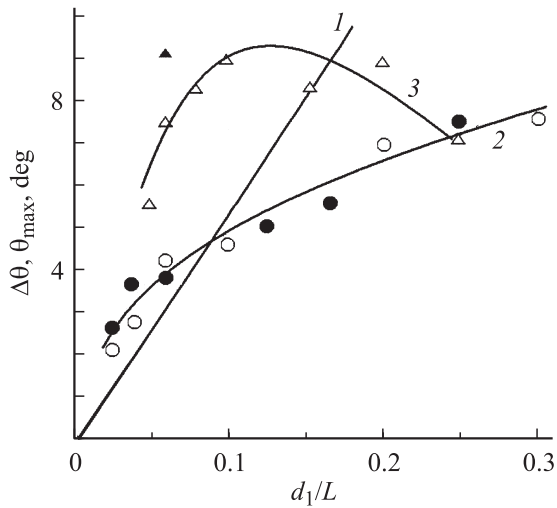


Рис. 2. Зависимость предельного угла рассеяния θ_{\max} (кривая 1) и ширины индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$ для круговой апертуры (кривая 2) и апертуры в форме кольца (кривая 3) для различных значений относительной величины апертуры первичного рассеивателя d_1/L .

на уровне 0.5, от величины относительной апертуры первичного рассеивателя d_1/L для метода ВКУФ (черные кружки) и для метода, включающего дубящее отбеливание в R-10 (белые кружки) при использовании круговой апертуры ($d_1/d_2 = \infty$). Из рисунка видно, что для небольших относительных апертур первичного рассеивателя ($d_1/L < 0.09$) в силу сугубо нелинейного характера рельефно-фазовой голографической записи ширина индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$ существенно превышает предельный угол рассеяния θ_{\max} . В то же время при $d_1/L > 0.1$ рост ширины индикатрисы рассеяния замедляется по сравнению с теоретической зависимостью для максимальных углов рассеяния θ_{\max} . Это объясняется влиянием спада ПЧХ галодосеребряного материала при рельефно-фазовой записи, на что указывалось выше. Наблюдается устойчивая корреляция между величиной d_1/L и $\Delta\theta$, причем точки, соответствующие разным методам преобразования амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую, хорошо ложатся на одну кривую.

На рис. 2 (кривая 3) приведена зависимость ширины индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$ от величины d_1/L для апертуры в форме кольца с отношением внешнего диаметра d_1 к внутреннему d_2 , равным 1.07 (для метода ВКУФ — черный треугольник, а для метода дубящего отбеливания — белые треугольники). Следует отметить, что область значений относительной апертуры d_1/L , в которой ширина индикатрисы рассеяния превышает теоретическую зависимость для θ_{\max} , существенно расширилась. При этом в области $0.05 < d_1/L < 0.18$ ширина индикатрисы рассеяния диффузоров, изготовленных с помощью кольцеобразной апертуры, в два раза превышает со-

ответствующие значения для диффузоров, полученных при использовании круговой апертуры. Таким образом, использование кольцевой апертуры позволяет управлять шириной индикатрисы рассеяния в более широких пределах. Это связано с тем, что использование апертуры в виде кольца позволяет снизить вклад низких пространственных частот в регистрируемой голограммой спектр. Высокая чувствительность галодосеребряных фотоматериалов даже при использовании кольцевых апертур, задерживающих большое количество света, позволяет сохранить время экспонирования голограмм в разумных пределах.

Снижение значений ширины индикатрисы рассеяния при отношении $d_1/L > 0.2$ может быть объяснено двумя факторами. Во-первых, это влияние спада ПЧХ, о чем упоминалось выше; во-вторых, согласно рис. 1, при больших относительных апертурах d_1/L ($L < L_1$) не существует зоны эффективного перекрытия пучков света, исходящих из крайних точек кольцевой апертуры вследствие ограниченной ширины индикатрисы рассеяния первичного диффузора θ_D .

Использование кольцевой апертуры является оптимальным и с точки зрения такого параметра голографических диффузоров, как величина пропускаемого им света в нулевом порядке дифракции I_0 (нерассеянный компонент). Эксперименты с кольцеобразными апертурами с отношениями внешнего диаметра к внутреннему порядка 1.07 (рис. 3, кривые 1, 2) показали уменьшение почти на порядок интенсивности нулевого порядка I_0 для голографических диффузоров, обработанных по методу ВКУФ, по сравнению с диффузорами, полученными при использовании круговой апертуры тем же методом (см. рис. 3, кривая 3). Столь существенное уменьшение доли нерассеянного света, пропускаемого диффузором, объясняется изменением топографии микроструктуры

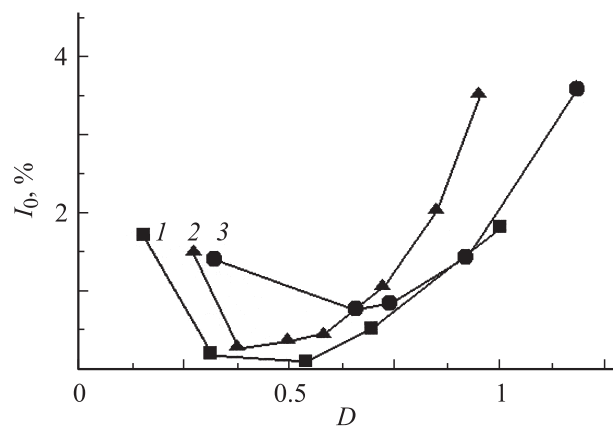


Рис. 3. Зависимость интенсивности нулевого порядка I_0 от средней оптической плотности первичного серебряного изображения D для голографических диффузоров, сделанных с помощью апертур с различными отношениями внешнего и внутреннего диаметров d_1/d_2 : 1 — $d_1/d_2 = 1.07$; 2 — 1.06; 3 — ∞ .

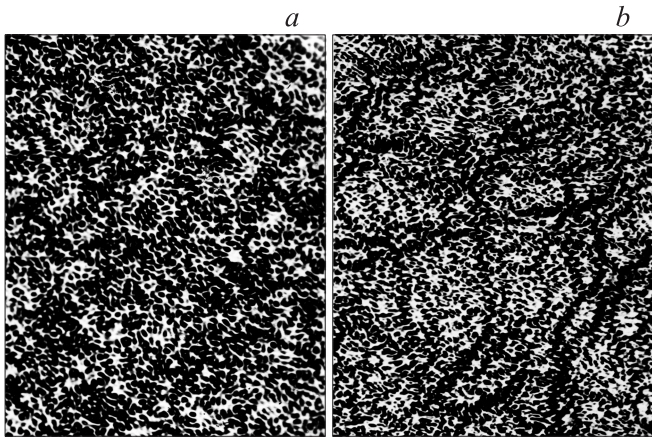


Рис. 4. Увеличение изображения микроструктуры голографического диффузора на стадии амплитудной записи для круговой (*a*) и кольцевой (*b*) апертур.

диффузора при переходе от круговой к кольцеобразной апертуре (рис. 4).

Для лучших образцов голографических диффузоров, полученных с использованием кольцевой апертуры, значение интенсивности света, прошедшего в нулевом порядке дифракции, составило несколько долей процента от интенсивности падающего света. Эффективность пропускания диффузора с учетом френелевских отражений была более 98%. В результате проведенного исследования найден механизм управления шириной индикатрисы рассеяния голографического диффузора с помощью параметров оптической схемы регистрации и характеристиками рассеяния исходного диффузора.

Методика регистрации микролинзовых растров и экспериментальные результаты

Описанные выше методы формирования рельефно-фазовых структур на галлодосеребряных материалах могут быть успешно применены для создания микролинзовых растров. В основе методики изготовления микролинзовых растров лежит получение первичной двумерной амплитудной голографической структуры, полученной при регистрации картины интерференции двух плоских волн, распространяющихся под небольшим углом друг к другу. Угол схождения интерферирующих пучков определяют пространственную частоту голографической решетки и, как следствие, является одним из основных факторов, отвечающих за размер элементов раstra. Необходимым этапом получения двумерной структуры является поворот фотопластинки в своей плоскости на угол 90° между двумя экспозициями. После фотохимической обработки, включающей в себя процедуру проявления и фиксирования, получается скрещенная голографическая решетка.

Теоретически можно показать, что вблизи любого минимума полной энергии, падающей на фотопластинку за время двух экспозиций, коэффициент пропускания голограммы будет представлять функцию, обладающую симметрией вращения относительно координатной точки этого минимума. Если фотоматериал обработан контрастным проявителем, т. е. обладает z -характеристикой для коэффициента пропускания от величины экспозиции, на негативе будут наблюдаться повторяющиеся ряды круглых прозрачных апертур на почти непрозрачном фоне. Из-за неидеальности z -характеристики фотоматериала границы прозрачных апертур размываются.

В эксперименте были получены двумерные голографические структуры с периодами 150, 70 и $40 \mu\text{m}$, которые послужили исходными матрицами для растров положительных микролинз. Поскольку описанные выше методы получения поверхностного рельефа формируют желательный слой максимальной толщины в области с наибольшей плотностью серебряного изображения, возникает необходимость обратить серебряное изображение исходной матрицы круглых прозрачных апертур. Экспериментально это осуществлялось с помощью засветки голографических фотопластинок ПФГ-01 через исходную матрицу круглых апертур в сэндвичевой структуре. Полученные образцы фотохимически обрабатывались с помощью избирательного дублирования в отбеливателе *R-10* с последующим фиксированием или

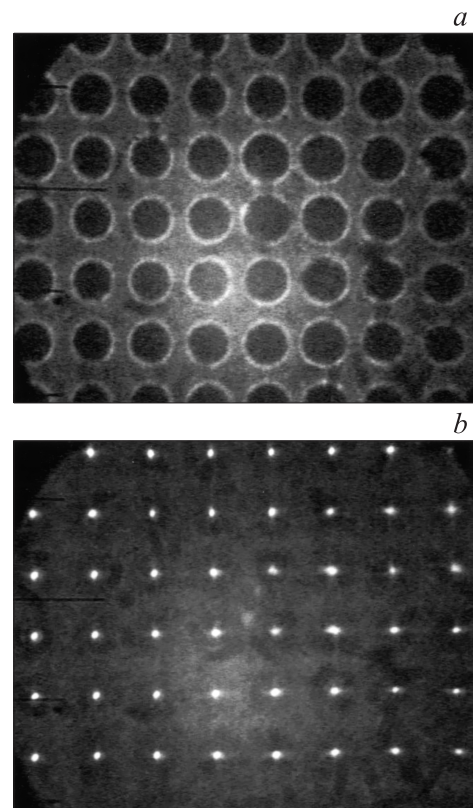


Рис. 5. Фотографии микролинзового раstra при фокусировке микроскопа: на поверхность эмульсии (*a*) и на фокальную плоскость раstra (*b*).

Параметры микролинзовых растров

Способ получения раstra микролинз	Время экспонирования первичной матрицы, s	Время экспонирования сандвичевой структуры, s	Пространственная частота раstra, mm^{-1}	Период раstra, mm	Диаметр линзы, mm	Фокусное расстояние линзы, mm
Отбеливание в R-10	8	90	26.5	0.038	0.037	0.30
Отбеливание в R-10	8	90	14.5	0.069	0.040	0.36
Отбеливание в R-10	8	30	6.6	0.150	0.057	0.40
Отбеливание в R-10	8	90	6.6	0.150	0.047	0.32
Отбеливание в R-10	12	90	6.6	0.150	0.045	0.26
Метод ВКУФ	8	90	6.6	0.150	0.092	0.50

воздействием коротковолнового УФ-излучения (метод ВКУФ). Были получены прозрачные растры положительных микролинз с фокусными расстояниями от 260 до 400 μm в случае избирательного дублирования и порядка 500 μm для УФ-воздействия. Диаметры микролинз изменялись от 35 до 90 μm .

Результаты экспериментов сведены в таблицу.

На рис. 5 приведены изображения, полученные при фокусировке микроскопа: на поверхность фотоэмульсии (а) и на фокальную плоскость микролинз раstra (б).

Заключение

В результате проведенных исследований была доказана эффективность применения двух альтернативных методов формирования рельефных структур на поверхности галоидосеребряных фотоэмульсий для изготовления голографических оптических элементов типа диффузоров и линзовых растров. Определены пути управления параметрами оптических элементов и совершенствования их характеристик.

Список литературы

- [1] Kim S.I., Chi Y.S., Ham Y.N., Park Gh.Y., and Kim J.M. // Appl. Opt. 2003. Vol. 42. N 14. P. 2482–2491.
- [2] Jannsona T., Arikb E., Bennahmiasa M., Nathanb N., Wangb S., Leea K., Yub K. and Poliakov E. // Proc. SPIE. 2006. Vol. 6225. P. 62 251E = 1–62 251E = 19.
- [3] Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 2. С. 135.
- [4] Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Маурер И.А., Черных Д.Ф. // Изв. РАН. Сер. физ. 2005. Т. 69. № 8. С. 1147–1149.
- [5] Валюс Н.А. Растровые оптические приборы. М., 1966. 208 с.
- [6] Smith H.M. // J. Opt. Soc. Am. 1968. Vol. 58. N 4. P. 533–539.
- [7] Бруй Е.Б., Корешев С.Н. // Опт. и спектр. 1989. Т. 6. № 3. С. 685–688.
- [8] Гальперин А.Д., Калинина И.В., Селявко Л.В., Смаев В.П. // Опт. и спектр. 1986. Т. 60. № 5. С. 1040–1042.
- [9] Ecevit F.N., Alaçakir A. and Aydin R. // Appl. Opt. 1996. Vol. 35. N 31. P. 6227–6230.
- [10] Navarrete-Garcia E., Calixto S. // Opt. Mat. 2003. Vol. 23. P. 501–512.
- [11] Гуляев С.Н., Ратушный В.П. // Оптич. журн. 2003. Т. 70. № 2. С. 45–49.
- [12] Pshenay-Severin E.A., Gulyaev S.N. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5400. P. 170–178.
- [13] Gulyaev S.N., Isaev I.V. // Proc. SPIE. 2001. Vol. 4348. P. 59.
- [14] Гуляев С.Н. Рельефно-фазовые голограммы на фотоэмульсионных слоях, облученных ультрафиолетовым излучением. Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб.: СПб ГПУ, 2005.
- [15] Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. // Оптич. журн. 2007. Т. 74. № 9. С. 56–61.
- [16] Бутусов М.М., Иоффе А.И. // Квант. электрон. 1976. Т. 3. № 5. С. 969–974.