

МИКРОЛИНЗОВЫЕ РАСТРЫ И ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДИФфуЗОРЫ НА ГАЛОГЕНИДОСЕРЕБРЯНОМ ФОТОМАТЕРИАЛЕ ПФГ-01

© 2009 г. Н. М. Ганжерли*, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Гуляев**, канд. физ.-мат. наук;
И. А. Маурер*, канд. техн. наук; Д. Ф. Черных*, канд. техн. наук

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru, **gulyaev@rphf.spbstu.ru

Рассматриваются голографические методы получения диффузоров и микролинзовых растров на галогенидосеребряных фотоэмульсиях. В качестве технологий создания рельефно-фазовых структур используется метод фотодеструкции желатина воздействием на светочувствительный слой коротковолновым ультрафиолетовым (УФ) излучения и способы химического и светового дублирования фотоэмульсий, обработанных растворами бихромата.

Ключевые слова: рельефно-фазовые структуры, структурирование желатина, фотодеструкция желатина, пространственно-частотная характеристика.

Коды OCIS: 110.6880; 090.7330; 09.2900; 09.2890

Поступила в редакцию: 11.01.2009

Введение

Статья посвящена созданию голографических диффузоров с повышенной эффективностью пропускания света и микролинзовых растров. Голографические диффузоры и микролинзовые растры используются в устройствах формирования светового пучка, в дисплеях и световых экранах, в проекционных системах, в том числе системах воспроизведения голографических изображений, для задач мультиплицирования и т. д. [1–4].

В основе методов получения высокоэффективных голографических оптических элементов на галогенидосеребряных фотоэмульсиях лежит преобразование амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую. Методы формирования голографических структур на поверхности фотоэмульсии в виде фазового рельефа обычно базируются на избирательном дублировании, или структурировании желатина при дубящем отбеливании (сшивании желатиновых молекул) в растворах, содержащих бихроматы [5–9]. Образование рельефа связано с перераспределением объемов желатина в фотоэмульсионном слое.

Способ получения поверхностного рельефа воздействием на фотоэмульсионный слой коротковолновым УФ излучением (метод ВКУФ) [10] показал свою эффективность при создании регулярных структур типа решеток, зонных пластинок Френеля, дифракционных оптиче-

ских элементов со сложным профилем рельефа в периоде структуры, дискретно рассеивающих падающий пучок в некотором телесном угле, и голографических диффузоров [4, 11–13].

Подробное изучение метода ВКУФ было проведено в работе [13]. В частности, было показано, что под действием коротковолнового УФ излучения происходит фотодеструкция – разрыв основных связей в цепях желатиновых молекул. Количество энергии УФ излучения, поглощенного различными участками желатинового слоя, определяется оптической плотностью серебряного изображения, которое создается в фотоэмульсии за счет обычных операций проявления и фиксирования. Участки фотоэмульсии с наименьшей плотностью серебряного изображения 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 обрабатываемых растворов ранее были описаны в работе [10].

Упомянутые выше методы рельефно-фазовой записи позволяют получать глубину поверхностного рельефа порядка 1 мкм, 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.

Методика регистрации голографических диффузоров

Целью исследования при получении голографических диффузоров явилось определение влияния параметров оптической схемы регистрации и процесса фотохимической обработки галогенидосеребряных 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 d_1 апертуры A первичного рассеивателя D_1 . Для наибольшей регистрируемой пространственной частоты ν_{\max} при достаточно больших расстояниях L от первичного рассеивателя до регистрирующей среды H можно приближенно написать

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

где λ – длина волны излучения лазера.

В эксперименте изготавливались образцы голографических диффузоров с соотношениями внешнего диаметра d_1 к внутреннему d_2 , равными

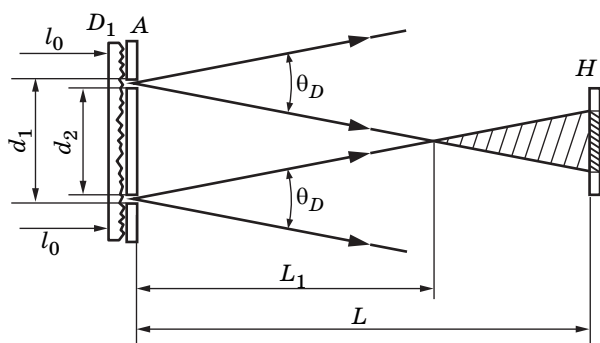


Рис. 1. Безопорная оптическая схема регистрации голографических диффузоров. l_0 – падающий пучок света, D_1 – первичный рассеиватель с шириной индикатрисы рассеивания θ_D , A – кольцевая апертура с внешним d_1 и внутренним d_2 диаметрами, H – голограмма.

1,06–1,07 (апертура в виде кольца) и ∞ (апертура в форме круга). Образцы голографических диффузоров после стадии первичной амплитудной записи, включающей проявление и фиксирование фотоэмульсии, обрабатывались дубящим отбеливанием или методом ВКУФ. Обработка с дубящим отбеливанием проводилась по следующей схеме: экспозиция фотопластинки когерентным излучением лазера – проявление – фиксирование – отбеливание в составе R-10 – 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, определяющим 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 $\nu = 200\text{--}1500 \text{ мм}^{-1}$ для всех галогенидосеребряных фотоматериалов с рельефно-фазовой записью наблюдается более или менее быстрый спад ПЧХ, причиной которого являются силы поверхностного натяжения, возникающие при сушке влажного фотоэмульсионного слоя [13, 14].

Обсуждение экспериментальных результатов

Основным результатом измерений явилось снятие индикатрис рассеяния диффузоров, полученных 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 на рис. 2 дает зависимость ширины нормированной индикатрисы рассеяния голо-

графических диффузоров $\Delta\theta$, измеренной на уровне 0,5, от значения 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 ($d_1/d_2 = \infty$). Как видно из рисунка, для небольших $d_1/L < 0,09$ 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 галогенидосеребряного материала в области более высоких пространственных частот 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 $0,05 < d_1/L < 1,8$ ширина индикатрисы рассеяния диффузоров, изготовленных с помощью кольцеобразной апертуры, может в два раза превышать соответствующие 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 снижает вклад низких пространственных частот в регистрируемый голограммой спектр. Несмотря на то, что кольцевая апертура задерживает большое количество света, падающего на регистрирующую среду, применение высокочувствительных галогенидосеребряных фотоматериалов дает возможность сохранить время экспонирования голограмм в разумных пределах.

Снижение значений ширины индикатрисы рассеяния при отношениях $d_1/L > 0,2$ может

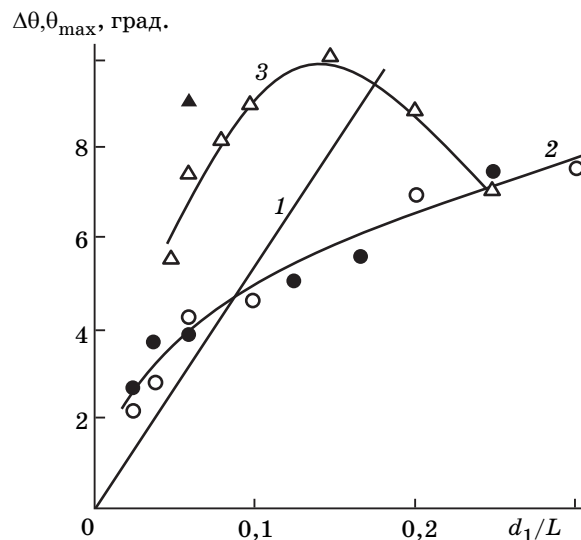


Рис. 2. Зависимости предельного угла рассеяния θ_{\max} (кривая 1) и ширины индикатрисы рассеяния голографических диффузоров $\Delta\theta$ для круговой апертуры (кривая 2) и апертуры в форме кольца (кривая 3) для различных значений d_1/L .

быть объяснено двумя факторами. Во-первых, это влияние уже упоминавшегося спада ПЧХ. 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 . Поэтому дифракционные свойства голографических диффузоров в этом диапазоне относительных апертур определяются не столько характеристиками первичного рассеивателя, сколько паразитным рассеянием света на элементах оптической схемы.

Использование кольцевой апертуры является более оптимальным по сравнению с круговой апертурой и с точки зрения такого параметра голографических диффузоров, как пропускаемый им свет в нулевом порядке дифракции I_0 (нерассеянная компонента). Эксперименты с кольцеобразными апертурами с отношениями внешнего диаметра к внутреннему 1,07–1,06 (рис. 3, кривые 1, 2) показали уменьшение почти на порядок интенсивности нерассеянной компоненты света I_0 для голографических диффузоров, обработанных по методу ВКУФ, по сравнению с диффузорами, полученными тем же методом при использовании круговой апертуры (рис. 3, кривая 3). Столь существенное уменьшение доли нерассеянного света, пропускаемого диффузором,

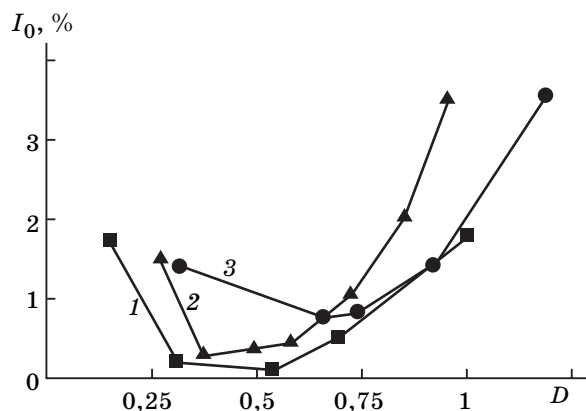


Рис. 3. Зависимости интенсивности нулевого порядка I_0 от средней оптической плотности первичного серебряного изображения D для голографических диффузоров, полученных с помощью апертур с различными отношениями внешнего и внутреннего диаметров d_1/d_2 : 1 – $d_1/d_2 = 1,07$, 2 – $d_1/d_2 = 1,06$, 3 – $d_1/d_2 = \infty$.

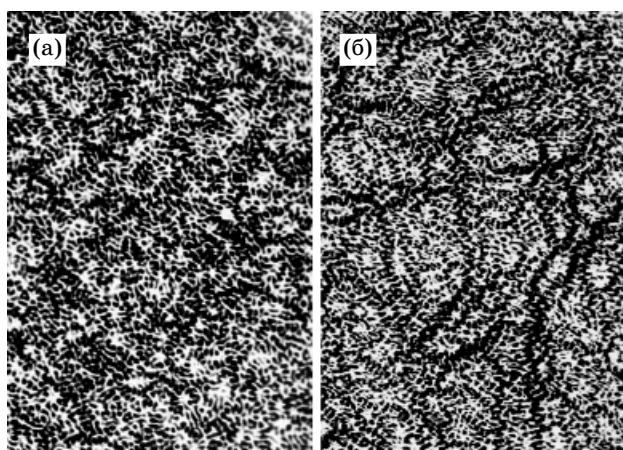


Рис. 4. Увеличенные изображения микроструктуры голографического диффузора на стадии амплитудной записи для круговой (а) и кольцевой (б) апертур.

может быть объяснено изменением топографии микроструктуры диффузора при переходе от круговой апертуры к кольцеобразной (рис. 4).

Для лучших образцов голографических диффузоров, полученных с использованием кольцевой апертуры, интенсивность света, прошедшего в нулевом порядке дифракции, составила 0,1–0,2% от интенсивности падающего света. Эффективность пропускания диффузора с учетом френелевских отражений была более 98%. В результате проведенного исследования найден ме-

ханизм управления шириной индикатрисы рассеяния голографического диффузора с помощью параметров оптической схемы регистрации.

Методика регистрации микролинзовых растров и экспериментальные результаты

В основе методики изготовления микролинзовых растров лежит создание первичной двумерной амплитудной голографической структуры, полученной при регистрации картины интерференции двух плоских волн, распространяющихся под углом друг к другу, при этом угол схождения пучков определяет пространственную частоту голографической решетки и 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 процедуры проявления и фиксирования, получается скрещенная двумерная голографическая решетка (ДГР). Вблизи любого минимума интерференционной картины распределение полной энергии света, падающего на фотопластинку за время двух экспозиций, будет представлять собой функцию, обладающую симметрией вращения относительно координатной точки этого минимума. После фотохимической обработки ДГР будет иметь вид повторяющихся рядов круглых прозрачных апертур на темном фоне.

В эксперименте были получены двумерные решетки с периодами 150 мкм, 70 мкм и 40 мкм, которые послужили исходными матрицами для получения микролинзовых растров. Для получения собирающих микролинзовых растров можно применить метод обращения. Обращение осуществлялось засветкой голографических фотопластинок ПФГ-01 через исходную матрицу круглых апертур методом контактной фотопечати. Полученные образцы фотохимически обрабатывались с помощью избирательного дублирования в отбеливателе R-10 с последующим фиксированием или воздействием коротковолнового УФ излучения. Были получены прозрачные растры положительных микролинз с фокусными расстояниями от 260 мкм до 400 мкм в случае избирательного дублирования и порядка 500 мкм для метода ВКУФ. Диаметры микролинз изменялись от 35 мкм до 90 мкм. Результаты экспериментов сведены в таблицу. На рис. 5 приведены фотографии микролинзового раstra при фокусировке

Параметры растров собирающих микролинз

Способ получения раstra микролинз	Время экспонирования первичной матрицы, с	Время экспонирования "сэндвичевой" структуры, с	Пространственная частота раstra, мм ⁻¹	Период раstra, мм	Диаметр линзы, мм	Фокусное расстояние линзы, мм
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

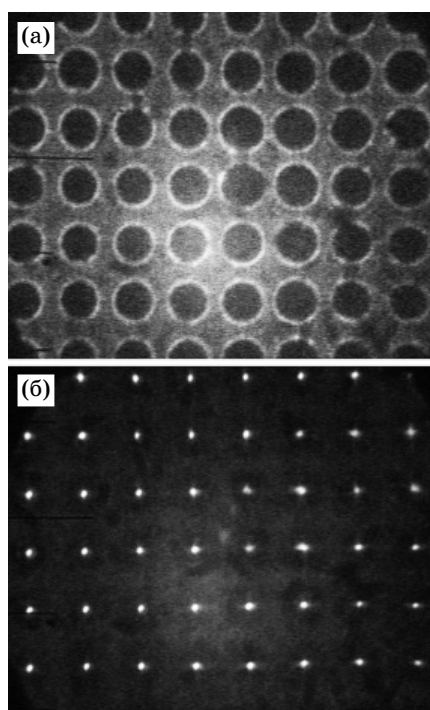


Рис. 5. Фотографии микролинзового раstra при фокусировке микроскопа: на поверхность фотоэмульсии (а) и на фокальную плоскость раstra микролинз (б).

микроскопа на поверхность фотоэмульсии (а) и на фокальную плоскость раstra микролинз (б).

Заключение

В результате проведенных исследований показана эффективность применения метода химического дублирования галогенидосеребряных фото-

материалов в присутствии бихроматов, а также метода фотодеструкции УФ излучением для формирования рельефно-фазовых структур на поверхности светочувствительного слоя. Данные методы были применены для изготовления голографических оптических элементов типа диффузоров и линзовых растров. Определены пути управления параметрами оптических элементов и совершенствования их характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun II Kim, Yoon Sun Choi, Yong Nam Ham, Ghong Yun Park, and Jong Man Kim. Holographic diffuser by use of a silver halide sensitized gelatin process // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. № 14. P. 2482–2491.
2. Jannsona T., Arikb E., Bennahmiasa M., Nathanb N., Wangb S., Leea K., Yub K., Poliakov E. Performance metrics for integrated lighting systems // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6225. P. 62251E-1– 62251E-19.
3. Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. Осевой диффузный экран на основе безопорной объемной голограммы // *ЖТФ.* 2005. Т. 75. № 2. С. 135–136.
4. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н. Голографические диффузоры на галогидосеребряных фотоэмульсионных слоях // *Оптический журнал.* 2007. Т. 74. № 9. С. 56–61.
5. Smith H.M. Photographic Relief Images // *JO SA.* 1968. V. 58. № 4. P. 533–539.
6. Бруй Е.Б., Корешев С.Н. Особенности использования тонких слоев фотоэмульсии ПЭ-2 для получения низкочастотных рельефных голограммных структур // *Опт. и спектр.* 1989. Т. 6. № 3. С. 685–688.
7. Гальперн А.Д., Калинина И.В., Селявко Л.В., Смаев В.П. О получении рельефно-фазовых голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и их ко-

- пировании // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 60. № 5. С. 1040–1042.
8. *Ecevit F. N., Alaçakir A., Aydin R.* Investigation of AGFA-8E56HD photographic emulsion and relief hologram structures by atomic force microscopy // *Appl. Opt.* 1996. V. 35. № 31. P. 6227–6230.
 9. *Navarrete-Garcia E., Calixto S.* Continuous surface relief micro-optical elements fabricated on photographic emulsions by use of binary and halftone masks // *Opt. Mat.* 2003. V. 23. P. 501–512.
 10. *Гуляев С.Н., Ратушный В.П.* Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании // *Оптический журнал.* 2003. Т. 70. № 2. С. 45–49.
 11. *Pshenay-Severin E.A., Gulyaev S.N.* Holographic fan-out elements synthesized by the repeated recording process // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5400. P. 70–178.
 12. *Gulyaev S.N., Isaev I.V.* Phenomenon of period-doubling in holographic periodic structures exposed to UV radiation // *Proc. SPIE.* 2001. V. 4348. P. 59–67.
 13. *Гуляев С.Н.* Рельефно-фазовые голограммы на фотоэмульсионных слоях, облученных ультрафиолетовым излучением // Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб.: СПб ГПУ, 2005. 196 с.
 14. *Бутусов М.М., Иоффе А.И.* Исследование параметров голографических структур-мультипликаторов // *Квант. электрон.* 1976. Т. 3. № 5. С. 969–974.
-