

УДК 535.317.1; 535.41; 535.843.312; 778.38.01:535

ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ДИФфуЗОРЫ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЯХ

© 2007 г. Н. М. Ганжерли*, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Гуляев**, канд. физ.-мат. наук

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

E-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

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

E-mail: gulyaev@rphf.spbstu.ru

Обсуждаются возможности метода создания рельефно-фазовых структур, включающего воздействие коротковолнового ультрафиолетового излучения на желатин галогидосеребряных фотоэмульсий, с целью создания голографических диффузоров большой площади.

Коды OCIS: 110.6880, 090.7330, 090.2900, 090.2890.

Поступила в редакцию 01.02.2007.

1. Введение

Благодаря росту мультимедийных применений в последнее время значительно вырос рынок жидкокристаллических (ЖК) дисплеев. ЖК дисплеи используются в мониторах прямого видения, в качестве компактных дисплеев в карманных или портативных компьютерах, в мобильных телефонах и т. д. Одним из главных требований, предъявляемых к ЖК дисплеям, является высокая, равномерная по поверхности дисплея яркость, поскольку дисплеи должны быть наблюдаемы и при дневном освещении. Возможным путем достижения высокой световой эффективности этих устройств является использование набора оптических элементов в системе освещения дисплея. Одним из таких элементов в качестве формирующего освещающий пучок устройства и для создания равномерной подсветки ЖК дисплея пропускающего типа являются диффузоры, в том числе голографические [1].

Другим возможным примером использования голографических диффузоров является применение их в качестве экранов в проекционных оптических системах [2]. Наиболее общими характеристиками во всех применениях диффузоров являются эффективность пропускания и индикатриса рассеяния.

Для регистрации голографического диффузора может использоваться оптическая схема, представленная на рис. 1. Диффузор D освещается когерентным излучением I_0 . В результате взаимной интерференции излучения, рассеянного всеми точками $P_1, P_2, P_3 \dots$ диффузора D , возникает сложная объемная

картина интерференции, которая записывается в светочувствительном материале F .

Ранее нами был предложен, изготовлен и исследован голографический диффузор [3, 4] как элемент осевой проекционной системы, зарегистрированный в объемном самопроявляющемся бихромированном желатине (БХЖ), чувствительном в синей области спектра [5]. Такой голографический спекл-экран обладает свойством концентрировать свет в сформированную в определенном телесном угле зону видения, допускает запись в одном диапазоне спектра (в области чувствительности регистрирующей среды), а реконструкцию и проекцию высококачественных изображений – белым светом. Однако чувствительность использованного объемного материала на основе БХЖ низка, что не позво-

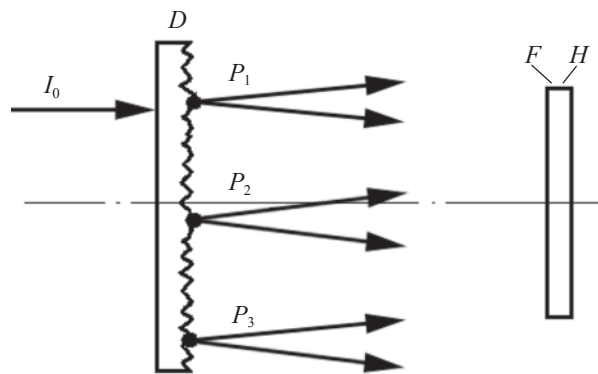


Рис. 1. Схема регистрации голографического диффузора. Пояснения см. в тексте.

лило нам создать голографический диффузор достаточного размера.

2. Фазовые голограммы на галодосеребряных фотоэмульсиях

В последнее время вновь возрождается интерес к использованию для создания голографических оптических элементов, к которым мы относим и голографические диффузоры, вместо БХЖ высоко-разрешающих голографических галодосеребряных эмульсий. Высокая чувствительность голографических материалов в красной области спектра дает возможность использовать в качестве источника излучения доступные гелий-неоновые лазеры и сократить время экспонирования при записи голограмм до секунд и долей секунды. Характерным отличием промышленно выпускаемых голографических фотоматериалов от самопроявляющегося БХЖ является на порядок меньшая толщина слоя (5–10 мкм). Это ведет к тому, что интегральное фазовое возмущение, вносимое в волновой фронт, при одинаковой глубине фазовой модуляции для галодосеребряной фотоэмульсии будет значительно меньше, чем для толстых слоев самопроявляющегося БХЖ. Таким образом, при изготовлении голографических диффузоров на фотоматериалах возникает проблема подавления нулевого порядка в прошедшем через диффузор свете.

В настоящее время для голографических галодосеребряных фотоматериалов разработаны методы фазовой записи, которые используют практически всю толщину фотоэмульсионного слоя и позволяют получить большую глубину фазовой модуляции светового пучка в объеме светочувствительной среды, достаточную для создания высокоэффективных дифракционных оптических элементов. Среди технологий, используемых для преобразования первичной амплитудной голографической структуры в объемно-фазовую, за рубежом и в России наиболее распространены различные технологии прямого и обращющего отбеливания фотоэмульсий [6–10], а также SHSG-метод (Silver Halide Sensitized Gelatin – галодосеребряный очувствленный желатин) [11–15]. С точки зрения создания голографических диффузоров, обладающих стабильностью характеристик и высокой эффективностью пропускания, оба вышеуказанных метода имеют существенные недостатки.

Отбеливание фотоэмульсионного слоя приводит к чувствительности голографической структуры к воздействию света. Кроме того, отбеленные голограммы обладают неконтролируемым дополнительным светорассеянием, вызванным наличием микрорекристаллов галоида серебра в толщине фото-

эмульсионного слоя. Последний факт может нежелательным образом сказаться на форме индикатрисы рассеяния диффузора. SHSG-метод связан со сложной химической обработкой фотопластинок, которая включает в себя неравновесное проявление или, другими словами, быстрое обезвоживание желатинового слоя с помощью изопропанола. В этом случае процесс образования объемной фазовой структуры сходен с процессом образования подобной структуры в классическом БХЖ. Поэтому основным недостатком этого метода является чрезвычайная зависимость окончательных результатов от таких факторов, как температура обрабатываемых растворов, концентрация реагентов и тип используемой фотоэмульсии.

Кроме указанных выше двух методов получения объемно-фазовых голографических структур, существуют также способы голографической записи, которые не связаны с обязательным включением в процедуру обработки неравновесного проявления (обезвоживания изопропанолом) [16]. Эти методы позволяют получить значительно более предсказуемые и стабильные результаты, однако фазовая модуляция пучка голограммой в данном случае осуществляется за счет поверхностного рельефа, глубина которого составляет обычно небольшую часть общей толщины фотоэмульсионного слоя. Так, например, для фотоэмульсии ПЭ-2 при контрасте записываемой интерференционной картины, равном 1 и оптимальном значении пространственной частоты удалось получить глубину поверхностного рельефа, составляющую 35% от толщины фотоэмульсии в диапазоне 5–10 мкм, характерном для большинства коммерчески выпускаемых голографических фотоматериалов [17]. Учитывая, что осевой голографический диффузор должен записываться в широком диапазоне пространственных частот и контраст регистрируемой спекл-структуры может значительно отличаться от идеального, следует признать, что соотношение между глубиной рельефа и толщиной фотоэмульсионного слоя будет еще значительно меньше указанной выше величины.

3. Использование УФ излучения для записи рельефно-фазовых голограмм на галодосеребряных фотоэмульсиях

Обычные методы голографической рельефно-фазовой записи основаны на избирательном дублировании или структурировании желатина с помощью дубящего отбеливания в растворах, содержащих бихроматы [16–20]. Менее известен способ получения рельефа с помощью воздействия на фотоэмульсионный слой коротковолновым УФ излучением и последующим удалением (травлением) желатина в

водных растворах (ВКУФ-метод) [21]. Проведенные ранее исследования ВКУФ-метода для получения рельефно-фазовых голограмм показали хорошие результаты при изготовлении регулярных структур типа решеток, зонных пластинок Френеля и т. п. Глубина поверхностного рельефа в пределах 1–2 мкм на пространственных частотах до 200–300 мм⁻¹ легко воспроизводилась независимо от типа голографического фотоматериала и параметров химической обработки.

Метод ВКУФ также применялся и показал свою эффективность при создании дифракционных оптических элементов со сложным профилем рельефа периодической структуры, дискретно рассеивающих падающий пучок в некотором телесном угле [22, 23]. При регистрации этих элементов использовалась многократная перезапись множества плоских волновых фронтов. На рис. 2 представлен дифракционный спектр рельефно-фазовой голографической структуры третьего этапа перезаписи, полученный при освещении голограммы светом с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм. Как видно из рисунка и как показывают измерения, интенсивность нулевого порядка дифракции достигает весьма малых значений, сравнимых с интенсивностью боковых порядков дифракции, и составляет 0,6%–1,8% от интенсивности падающего пучка. Таким образом, ВКУФ-метод позволяет создавать достаточно большие значения глубины фазовой модуляции падающего пучка в случае изготовления эффективной сложной периодической структуры. Приведенные выше достоинства ВКУФ-метода обусловили то, что именно этот метод был выбран нами как

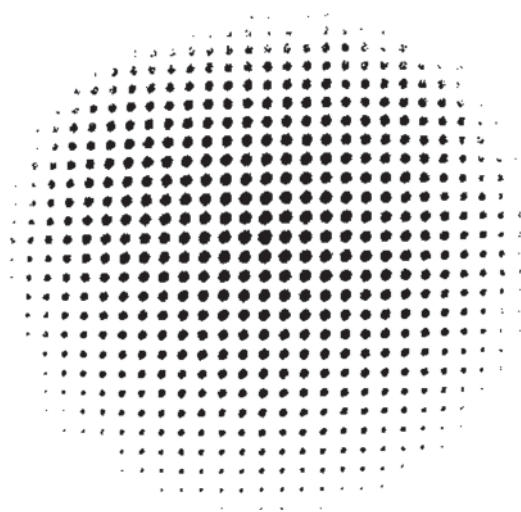


Рис. 2. Дифракционный спектр рельефно-фазовой голографической структуры третьего этапа перезаписи, зарегистрированный с помощью цифровой камеры в фокальной плоскости линзы.

основной в исследованиях по синтезу голографических диффузоров.

4. Методика получения рельефно-фазовых голограмм

Образование рельефа на поверхности фотоматериала по ВКУФ-методу основано на свойстве желатиновых слоев изменять свою толщину при воздействии УФ излучения и последующей обработке их 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 экранировалось серебряным изображением. Таким образом, голографическая информация записывается на фотоматериале в виде поверхностного рельефа.

Процедура обработки и состав растворов по ВКУФ-методу были описаны ранее в работе [21]. В наших экспериментах по изготовлению голографических диффузоров использовался вариант процедуры обработки, не содержащей операции первичного отбеливания. Следует отметить, что заключительные операции отбеливания и фиксирования позволяли удалить серебряное изображение из объема фотоэмульсии и получить чисто фазовую голографическую структуру.

5. Экспериментальные результаты и выводы

Первичная амплитудная голографическая структура диффузоров записывалась с помощью излучения гелий-неонового лазера по безопорной оптической схеме (рис. 1) с использованием того же узконаправленного диффузора D , который применялся при записи спекл-экранов в объемном самопроявляющемся БХЖ. На рис. 3 приведены картины дифракционных полей, полученные с помощью цифровой камеры на удаленном экране, при освещении голографических диффузоров плоской волной. Время экспонирования фотопластинок когерентным излучением при регистрации диффузоров изменялось в диапазоне 0,2–0,5 с. Из рисунка видно, что, варьируя время экспонирования при прочих равных условиях, можно достичь практически полного подавления нулевого порядка в свете, прошедшем через диффузоры, полученные по выше описанной схеме.



Рис. 3. Картины дифракционных полей, создаваемых голографическими диффузорами, для разных экспозиций фотопластинок когерентным светом.

Параметры голографических диффузоров, записанных на различных регистрирующих средах

Регистрирующий материал	Толщина материала, мкм	Эффективная толщина записи, мкм	Вид обработки и структура голограммы	Общее пропускание с учетом френелевских отражений, %	Ширина индикатрисы рассеяния для $\lambda = 0,63$ мкм, град.
ПФГ-01	7	1–1,5	ВКУФ, рельеф	> 97	10,5–12,5
ВР-Л	14	1–1,5	ВКУФ, рельеф	> 97	8,6–10,6
ПФГ-01	7	≈ 5,5	Отбеливание, рельеф + объём	86	14–18
БХЖ	100–150	≈ 100	Самопроявляющиеся слои, объём	55	10

В таблице приведены значения ширины индикатрисы рассеяния голографических диффузоров, полученных ВКУФ-методом. Для сравнения в таблице также приведены данные для диффузоров, изготовленных на объемных слоях самопроявляющегося БХЖ, и диффузоров, выполненных на фотоэмульсионном слое путем обработки фотоматериала в широко известном дубяще-отбеливающем растворе R-10.

Ширина индикатрисы рассеяния диффузоров, полученных ВКУФ-методом, довольно слабо зависит от времени экспонирования фотопластинок когерентным светом и составляет величину порядка 10° . Этот факт позволяет надеяться на успешное применение таких типов диффузоров в качестве экранов в системах проекции изображений и других случаях.

Авторы выражают благодарность А.П. Погode за помощь в проведении эксперимента.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 04-02-17593).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun H Kim, Yoon Sun Choi, Yong Nam Ham, Ghong Yun Park, Jong Man Kim. Holographic diffuser by use of a silver halide sensitized gelatin process // Appl. Opt. 2003. V. 42. № 14. P. 2482–2491.
2. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М. Осевого диффузного направленного экрана на основе пропускающей голограммы Габова // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 1. С. 65–69.
3. Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н., Маурер И.А., Черных Д.Ф. Осевого диффузного экрана на основе безопорной объемной голограммы // ЖТФ. 2005. Т. 75. № 2. С. 135–136.
4. Ганжерли Н.М., Денисюк Ю.Н., Сердобинцева А.П., Черных Д.Ф. Эффект концентрации света с помощью спекл-экрана на основе безопорной объемной голограммы // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. № 12. С. 71–76.
5. Денисюк Ю.Н., Ганжерли Н.М., Маурер И.А., Писаревская С.А. Толстослойный глицеринсодержащий бихромированный желатин для записи объемных голограмм // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 4. С. 62–65.
6. Neipp C., Pascual I., Beléndez A. Effects of overmodulation in fixation-free rehalogenating bleached holograms // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 20. P. 4092–4103.
7. Ulibarrena M., Carretero L., Madrigal R., Blaya S., Fimia A. Multiple band holographic reflection gratings recorded in new ultra-fine grain emulsion BBVPan // Optics Express. 2003. V. 11. № 25. P. 3385–3392.
8. Bányász I. Spatial frequency dependence of the nonlinear characteristics of bleached silver-halide holographic materials // Optics Commun. 2003. V. 225. P. 269–275.
9. Bányász I. Direct measurement of the refractive index profile of phase gratings, recorded in silver halide holographic materials by phase-contrast microscopy // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83. № 21. P. 4282–4284.
10. Лим С.В., Чой Д.В., Сон С.Х. Повышение дифракционной эффективности пропускающих голограмм на фотопластинках ПФГ-01 // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 1. С. 30–35.
11. Kim J. M., Choi B. S., Kim S. I., Kim J. M., Bjelkhagen H. I., Phillips N. J. Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part 1.

- Transmission holographic optical elements // *Appl. Opt.* 2001. V. 40. № 5. P. 622–632.
12. Kim J.M., Choi B.S., Choi Y.S., Kim J.M., Bjelkhagen H.I., Phillips N.J. Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part 2. Reflection holographic optical elements // *Appl. Opt.* 2002 V. 41. № 8. P. 1522–1533.
 13. Усанов Ю.Е., Шевцов М.К. Принципы получения микропустотных галогенидосеребряных желатиновых голограмм // *Опт. и спектр.* 1990. Т. 69. № 1. С. 183–187.
 14. Усанов Ю.Е., Шевцов М.К., Кособокова Н.Л., Кириенко Е.А. Механизм образования микропустотной структуры и методы получения галогенидосеребряных желатиновых голограмм // *Опт. и спектр.* 1991. Т. 71. № 4. С. 651–658.
 15. Neipp C., Márquez A., Pascual I., Beléndez A. Thick phase holographic gratings recorded on BB-640 and PFG-01 silver halide materials // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2003. V. 5. P. S183–S188.
 16. Smith H.M. Photographic Relief Images // *JOSA.* 1968. V. 58. № 4. P. 533–539.
 17. 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.
 18. Гальперн А.Д., Калинина И.В., Селявко Л.В., Смаев В.П. О получении рельефно-фазовых голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и их копировании // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 60. № 5. С. 1040–1042.
 19. 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.
 20. Navarrete-Garcia E., Calixto S. Continuous surface relief micro-optical elements fabricated on photographic emulsions by use of binary and halftone masks // *Optical Materials.* 2003. V. 23. P. 501–512.
 21. 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.
 22. Pshenay-Severin E.A., Gulyaev S.N. Holographic fan-out elements synthesized by the repeated recording process // *Proc. SPIE.* 2004. V. 5400. P. 170–178.
 23. Карнов М.А., Пшенай-Северин Е.А., Гуляев С.Н. Экспериментальный синтез расщепителей лазерного пучка // Сб. межвузовской научной конференции “XXXII неделя науки СПбГТУ”. Изд. СПбГТУ. Ч. VI. 2004. С. 68–71.