

34. Критерии создания эффективных регулярных и случайных структур на содержащих желатин регистрирующих средах, облученных коротковолновым УФ излучением

Н. М. Ганжерли¹, С. Н. Гуляев²

¹ Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются возможности метода деструктивного воздействия коротковолнового УФ излучения на содержащие желатин регистрирующие среды по созданию поверхностного рельефа. Для этого произведена теоретическая оценка необходимой величины рельефа для получения высокоэффективных регулярных и случайных голографических структур.

Ключевые слова: УФ излучение, Галогидосеребряный фотоматериал, Бихромированный желатин, Голографический диффузор, Микролинзовый растр, Дифракционная решетка, Дифракционная эффективность, Полиметилметакрилат.

Цитирование: Ганжерли, Н. М. Критерии создания эффективных регулярных и случайных структур на содержащих желатин регистрирующих средах, облученных коротковолновым УФ излучением / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 150–153.

Введение

Голограммные оптические элементы (ГОЭ) применяются в современных оптических схемах. Независимо от способа их создания (голографический метод, фотолитография, прямая лазерная запись и др.), ГОЭ предъявляют высокие требования к оптическим свойствам материалов, на которых они созданы. Эти требования включают высокую прозрачность, большую дифракционную эффективность (ДЭ), низкий уровень оптического шума, устойчивость к влиянию окружающей среды. Таким требованиям полностью или частично удовлетворяет желатин. Широкий диапазон пропускания желатина (350–2000 нм) и возможность записи голографических структур на слоях с толщиной от долей мкм до десятков и даже сотен и тысяч мкм (для самопроявляющихся слоев) позволили создать на светочувствительных средах, содержащих желатин, как тонкие, так и высокоселективные объемные ГОЭ, работающие в широком диапазоне излучения.

Желатин является основным компонентом двух наиболее распространенных светочувствительных сред: галогидосеребряных фотоматериалов и слоев бихромированного желатина (БХЖ). Поэтому внимание исследователей в области голографии всегда были направлены на разработку методов обработки фотоматериалов, с помощью которых возможно получение высокоэффективных непоглощающих голографических фазовых структур при использовании изменений (модуляции) физико-химических свойств желатина при различных воздействиях на него.

В данной работе рассматривается один из методов получения фазовых голограмм — метод деструктивного воздействия коротковолнового УФ излучения на галогидосеребряные фотоэмульсии и слои БХЖ и определены критерии получения эффективных голографических структур. Метод первоначально был разработан для галогидосеребряных фотоэмульсий (метод ВКУФ) [1]. Действие коротковолнового УФ излучения

($\lambda \leq 250\text{--}270$ нм) основано на фотодеградации желатина в местах, не экранированных наличием серебряного изображения (СИ), возникающем после фотохимической обработки фотоэмульсии проявлением и фиксированием. При этом происходит разрыв основных связей в длинных цепях желатиновых макромолекул и их фрагментация, что приводит к растворимости желатина в водных растворах. Таким образом, после травления в воде фотодеградированного желатина и сушки гребни поверхностного рельефа образуются в местах с наибольшей плотностью СИ.

Применение разрушающего эффекта коротковолнового УФ излучения возможно и в случае слоев БХЖ, на которых интерференционная картина создается излучением He—Cd лазера в виде переменной задубленности слоя. Более задубленные места БХЖ менее подвержены разрушительному действию УФ излучения. На этих участках после травления в воде и сушки образуются гребни рельефа поверхности. Таким образом, в случае БХЖ формирование рельефно-фазовой голограммы происходит при последовательном применении как селективного структурирования излучением лазера, так и применением деструктивного воздействия УФ излучения.

1. Критерий получения эффективных регулярных голографических рельефно-фазовых структур

Для метода ВКУФ пространственно-частотная характеристика (ПЧХ) в области низших пространственных частот ν равномерна вплоть до $\nu = 0$. В области более высоких пространственных частот в действие вступают силы поверхностного натяжения, сглаживающие поверхностный рельеф. Математическая модель получения рельефно-фазовых голограмм воздействием коротковолнового УФ излучения, описывающая спад ПЧХ в области высоких частот ($\nu = 200\text{--}1500$ мм⁻¹), приведена в работе [2].

Дифракционная эффективность (ДЭ) рельефно-фазовых голографических структур в значительной мере определяется высотой поверхностного рельефа h ,

Табл. 1. Параметры регулярных голографических структур, полученных с помощью метода ВКУФ на галлоидосеребряных фотоэмульсиях разных производителей и слоях БХЖ

П.	Тип содержащей желатин регистрирующей среды	Толщина слоя, μm	Тип структуры	Максимально достигнутая величина высоты рельефа h_{max} , μm	Максимально полученная ДЭ η_{imax} , %
1	Фотопластинки ВРЛ	14–18	зонная пластинка Френеля 0–57 mm^{-1}	1,2–2	34
2	Фотопластинки ВРЛ	14–18	решетка 110 mm^{-1}	1,1	17
3	Фотопластинки ВРЛ	14–18	решетка 110 mm^{-1}	0,63	21,1
4	Фотопластинки ПФГ-01	7	решетка 65 mm^{-1}	1,35	28,5
5	Фотопластинки ПФГ-01	7	растр микролинз 10 mm^{-1}	2,6–2,8	—
6	Фотопластинки Agfa-Gevaert 8E75	6–7	решетка 40 mm^{-1}	1,54	—
7	Фотопластинки Agfa-Gevaert Millimask	5	решетка 130 mm^{-1}	1,4	23
8	Фотопластинки Kodak HR	5	решетка 130 mm^{-1}	1,2	25
9	Фотопластинки СРБШ	1,8	решетка 130 mm^{-1}	—	24
10	Слой БХЖ	51–86	решетка 103 mm^{-1}	1,35–1,45	25
11	Слой БХЖ	0,6–1,1	решетка 103 mm^{-1}	0,6–0,9	28–30

измеряемой как перепад между гребнем и впадиной интерференционной картины. Поскольку диапазон пространственных частот, регистрируемых на содержащих желатин светочувствительных средах, не превышает нескольких сотен mm^{-1} , дифракция света может быть описана приближением Рамана — Ната [3]. Согласно этому приближению, ДЭ пропускающей структуры с синусоидальным профилем рельефа в первом порядке дифракции η_1 может быть представлена как [1]

$$\eta_1 = J_1^2 \frac{\pi(n_0 - 1)h}{\lambda} \times 100\%, \quad (1)$$

где в аргументе функции Бесселя первого порядка J_1 стоит величина амплитуды фазовой модуляции освещающего пучка. Квадрат функции Бесселя приобретает максимальное значение $\approx 0,34$ при значении аргумента порядка $\pi/2$

$$\frac{\pi(n_0 - 1)h}{\lambda} \approx \frac{\pi}{2}.$$

Поскольку желатин имеет показатель преломления, близкий к 1,5, то величина высоты поверхностного рельефа h , обеспечивающая максимальную величину интенсивности первого порядка дифракции η_1 приблизительно равна λ . Именно эту величину можно считать критерием величины глубины поверхностного рельефа регулярной периодической структуры, которая необходима для эффективной дифракции.

В табл. 1 представлены основные параметры регулярных голографических структур, полученных с помощью метода ВКУФ на галлоидосеребряных фотоэмульсиях разных производителей и слоях БХЖ, полных в лабораторных условиях [1, 2, 4–8]. Максимальные значения глубины поверхностного рельефа существенно превышают длину волны видимого света. Величина ДЭ, приближающаяся к теоретическому пределу для тонких фазовых голограмм порядка 34 %, говорит о

возможности создания высокоэффективных регулярных пропускающих дифракционных структур, работающих в видимой и инфракрасной областях спектра.

2. Критерий получения эффективных случайных голографических рельефно-фазовых структур

В отличие от регулярных голографических структур типа решеток, подход при определении требуемой величины глубины поверхностного рельефа для сложных голографических структур (диффузоров) несколько иной. Для практических применений диффузоров необходимо обеспечить минимальную долю нерассеянной компоненты света (нулевой порядок дифракции), прошедшего через диффузор. Интенсивность нерассеянной компоненты определяется фазовым возмущением, вносимым диффузором в волновой фронт падающей волны, и зависит от величины флуктуаций поверхностного рельефа.

Согласно теории рассеяния света на крупномасштабных неоднородностях в приближении Кирхгофа и в случае, если распределение высоты рельефа описывается функцией Гаусса [9], амплитудный коэффициент отражения нерассеянной компоненты равен

$$V(\psi) = \exp(-2k^2\sigma^2 \sin^2 \psi), \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число, λ — длина волны света, σ — среднеквадратичное отклонение высоты рельефа и ψ — угол скольжения пучка. Легко показать, что для структур, работающих на пропускание, при $\psi = 90^\circ$ формула (2) преобразуется в формулу

$$\eta_0 = \exp\left[-\frac{4\pi^2}{\lambda^2}(n_0 - 1)^2 \sigma^2\right] \times 100\%, \quad (3)$$

где η_0 — относительная интенсивность (дифракционная эффективность) пучка нулевого порядка в процентах от падающего пучка, n_0 — средний показатель преломления желатина, равный 1,53 (для $\lambda = 0,6328$ мкм).

При выводе формулы (3) учитывалось то, что для одной и той же величины среднеквадратичного отклонения σ модуляция фазового набег для пропускающих структур в $2/(n_0 - 1)$ раз меньше, чем для отражающих.

Из формулы (3) следует, что малые значения относительной интенсивности прошедшей через диффузор нерассеянной компоненты ($\eta_0 \leq 0,1\%$) достигаются при величине среднеквадратичного отклонения высоты поверхностного рельефа $\sigma \geq 0,5$ мкм. В какой-то мере последнее соотношение является критерием эффективности рассеивающей структуры, работающей на пропускание.

В табл. 2 представлены основные параметры голографических диффузоров, полученных на фотопластинках ПФГ-01 с помощью метода ВКУФ. Низкие значения интенсивности нерассеянной компоненты света, прошедшей через диффузор, говорят о том, что метод ВКУФ способен обеспечить требуемую согласно формуле (3) величину среднеквадратичного отклонения высоты рельефа (образец 1).

Существенно более низкие значения интенсивности нерассеянной компоненты η_0 менее $0,1\%$ (образцы 2, 3) можно получить и при величинах среднеквадратичного отклонения σ , которые значительно меньших значений, чем требуется классической теорией рассея-

Табл. 2. Параметры голографических диффузоров

№ образца	Средняя толщина фотослоя после обработки ВКУФ, μm	σ , μm	h_{max} , μm	η_0 , %
1	1,4	0,54	1,9	0,12
2	2,4	0,36	1,5	0,079
3	3,4	0,41	1,8	0,057

ния. В работе [10] показано, что сама структура рассеивателей, полученных с помощью мультиплексной голограммы [11], может в значительной мере сохранять свою регулярность, что позволяет снизить долю нерассеянной компоненты до сотых долей процента.

Заключение

Предложенные в статье критерии позволили оценить диапазон значений глубины рельефа фазовой структуры, которые необходимы для создания на содержащих желатин светочувствительных материалах эффективных регулярных, случайных и псевдослучайных структур: решеток, растров микролинз, узконаправленных диффузоров, работающих в видимом диапазоне спектра. Глубина поверхностного рельефа, формируемого методом ВКУФ на галогидосеребряных фотоэмульсиях и слоях БХЖ, не зависимо от типа светочувствительного материала, достаточна для получения максимальных значений ДЭ, предсказанных теорией.

Список источников

- [1] **Гуляев, С. Н.** Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании / С. Н. Гуляев, В. П. Ратушный // Оптический журнал. — 2003. — Том 70. — № 2. — С. 45–49.
- [2] **Гуляев, С. Н.** Рельефно-фазовые голограммы на фотоэмульсионных слоях, облученных ультрафиолетовым излучением / С. Н. Гуляев. — Дис. канд. физ.-мат. наук. — СПб: СПб ГПУ, 2005. — 196 с.
- [3] **Raman, C. V.** The diffraction of light by high frequency sound waves, Part I / C. V. Raman, M. S. N. Math // Proc. Indian Acad. Sci. (India). — 1935. — Vol. 2A. — P. 406–412.
- [4] **Gulyaev, S. N., Isaev I. V.** Phenomenon of period-doubling in holographic periodic structures exposed to UV radiation / S. N. Gulyaev, I. V. Isaev // Proceedings of SPIE. — 2001. — Vol. 4348. — P. 59–63.
- [5] **Ganzherli, N. M.** Creation of raster relief structures on silver-halide photographic emulsions with the help of two-dimensional holographic gratings / N. M. Ganzherli, S. N. Gulyaev, I. A. Maurer, G. Y. Sotnikov, D. F. Chernykh // Proceedings of SPIE. — 2011. — Vol. 8074. — P. 80740T-1–80740T-8.
- [6] **Ганжерли, Н. М.** Влияние УФ-излучения на свойства дифракционных решеток на бихромированном желатине / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Письма в ЖТФ. — 2016. — Том 42. — № 19. — С. 26–30.
- [7] **Ганжерли, Н. М.** Свойства голографических структур на бихромированном желатине, подвергнутых воздействию коротковолнового УФ излучения / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Оптический журнал. — 2017. — Том 84. — № 9. — С. 1–5.
- [8] **Ганжерли, Н. М.** Изображающие свойства двумерной скрещенной голографической решетки на галогидосеребряных фотоэмульсиях / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных, С. А. Яловик // ЖТФ. — 2012. — Том 82. — № 9. — С. 49–54.
- [9] **Басс, Ф. Г.** Рассеяние волн на статистически неровной поверхности / Ф. Г. Басс, И. М. Фукс. — М: Наука, 1972. — 494 с.
- [10] **Ганжерли, Н. М.** Формирование поверхностного рельефа сложных голографических структур на фотоматериале / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 3. — С. 37–42.
- [11] **Ганжерли, Н. М.** Создание оптических рассеивателей на галогидосеребряных фотоматериалах с помощью мультиплексных голограмм / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // ЖТФ. — 2014. — Том 84. — № 12. — С. 112–116.

Criteria for the creation of effective regular and random structures on gelatin-containing recording media exposed to short-wave UV radiation

N. M. Ganzherli¹, S. N. Gulyaev²

¹ Ioffe Institute, Saint Petersburg, Russia

² Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russia

The article considers the possibility of using short-wave UV radiation (SWUV method) in relation to gelatin-containing recording materials. The method is used to create a surface relief structures. The theoretical estimation of the required relief values for obtaining high-performance regular and random holographic structures is carried out.

Keywords: UV radiation, Silver halide photomaterial, Bichromated gelatin, Holographic diffuser, Micro-lens raster, Diffraction grating, Diffraction efficiency, Polymethyl methacrylate.