

09.6

## Регистрация высокочастотных рельефно-фазовых голографических структур на фотоматериале ПФГ-04

© Н.М. Ганжерли<sup>1</sup>, С.Н. Гуляев<sup>2</sup>, И.А. Маурер<sup>1</sup>, А.В. Архипов<sup>2</sup><sup>1</sup> Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

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

Поступило в Редакцию 30 июня 2021 г.

В окончательной редакции 14 июля 2021 г.

Принято к публикации 15 июля 2021 г.

Предложен новый вариант обработки фотографических пластинок для голографии на основе бихромированного желатина ПФГ-04 (производство ОАО „Компания Славич“, Переславль-Залесский) для изготовления высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток с пространственной частотой вплоть до  $1500 \text{ mm}^{-1}$ . В основе технологии лежат избирательное деструктивное воздействие на желатин коротковолнового УФ-излучения и последующее травление слоя различными реагентами. Впервые на фотопластинках ПФГ-04 получены рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки с максимальной дифракционной эффективностью 67%.

**Ключевые слова:** голографические рельефно-фазовые решетки, бихромированный желатин, пластинки фотографические ПФГ-04, коротковолновое УФ-излучение, ледяная уксусная кислота.

DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51621.18941

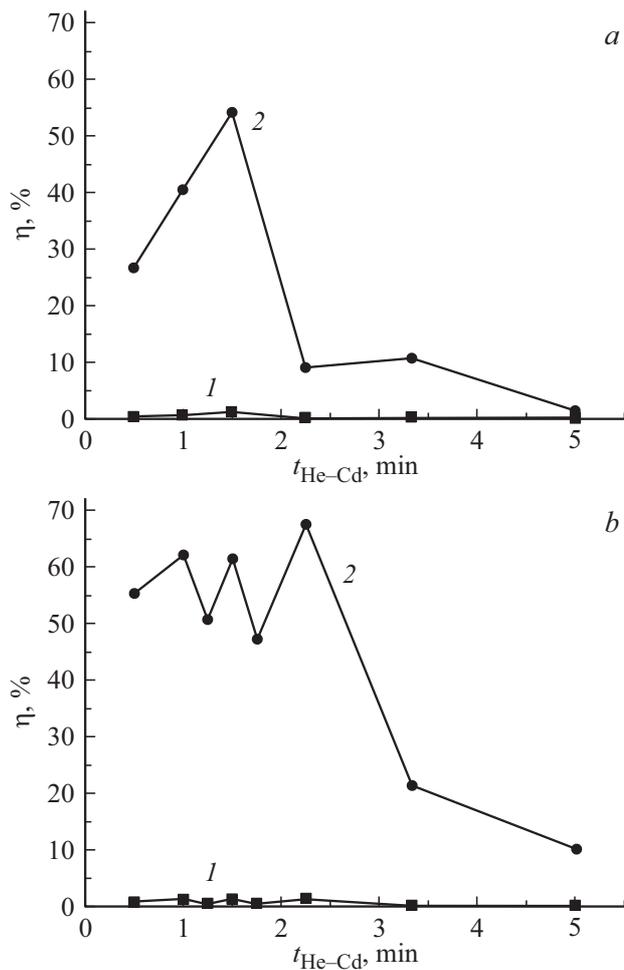
Фотоматериалы на основе бихромированного желатина (БХЖ) наряду с галоидосеребряными фотоэмульсиями традиционно считаются одними из ведущих регистрирующих сред для голографии благодаря хорошим оптическим параметрам, высоким разрешающей способности и дифракционной эффективности записанных структур [1]. Рекомендованная производителем пластинок ПФГ-04 процедура обработки слоев после экспонирования голограмм включает обезвоживание слоя последовательно в водных растворах изопропилового спирта с концентрациями 25, 50, 75 и 100%, что позволяет получать объемно-фазовые решетки с дифракционной эффективностью (ДЭ)  $\eta \approx 70\%$ . В отличие от этого традиционного метода изготовления объемных голограмм на БХЖ в настоящей работе нами предложен и исследован способ получения тонких высокочастотных рельефно-фазовых голографических структур на материале ПФГ-04. Методика основана на деструктивном воздействии на желатин коротковолнового УФ-излучения с длиной волны  $< 270 \text{ nm}$  [2] и последующем травлении слоя с помощью различных травящих реагентов.

На первом этапе записью голографических решеток с пространственной частотой  $1500 \text{ mm}^{-1}$  по симметричной оптической схеме двумя плоскими пучками излучения He–Cd лазера (длина волны  $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$ ) создавалась избирательная задубленность желатина в соответствии с интерференционной картиной. Затем проводились „купание“ фотопластинок в 2% растворе сульфата натрия, водная промывка и сушка, после чего следовало облучение образцов коротковолновым УФ-излучением ртутно-кварцевой лампы ДРТ-220 в течение 20–25 min. При этом менее задубленные участки

желатина, лежащие в минимумах интерференционной картины, разрушались сильнее под воздействием УФ-излучения и, как следствие, в результате последующего травления удалялись с поверхности слоя в первую очередь. Таким образом, для структур с пространственной частотой до  $200\text{--}300 \text{ mm}^{-1}$  создавался глубокий поверхностный рельеф [3].

Для регистрации высокочастотных дифракционных рельефных решеток на БХЖ была предложена усовершенствованная методика, позволяющая сократить влияние сил поверхностного натяжения, сглаживающих поверхностный рельеф во влажном слое при сушке. Методика характеризовалась сокращением времени пребывания слоя в воде до нескольких секунд [4], что приводило к уменьшению набухания слоя желатина и получению глубокого поверхностного рельефа на высоких пространственных частотах после травления и окончательной сушки.

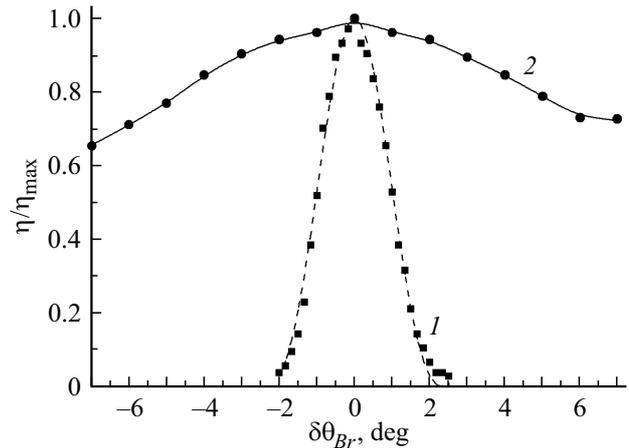
В настоящей работе для осуществления операции травления кроме воды мы также использовали 50% раствор ледяной уксусной кислоты в изопропанол. Как и вода, ледяная уксусная кислота является эффективным растворителем желатина [5,6], однако в отличие от воды она не вызывает сильного набухания поверхностных слоев БХЖ, что способствует сохранению глубокого рельефа на высоких пространственных частотах. Для обоих типов растворителей операция травления резко прерывалась погружением фотопластинки последовательно в две ванны со 100% изопропиловым спиртом, после чего следовала сушка струей воздуха. Время травления в воде составляло 10 s, в растворе ледяной уксусной кислоты в изопропанол — 8 s.



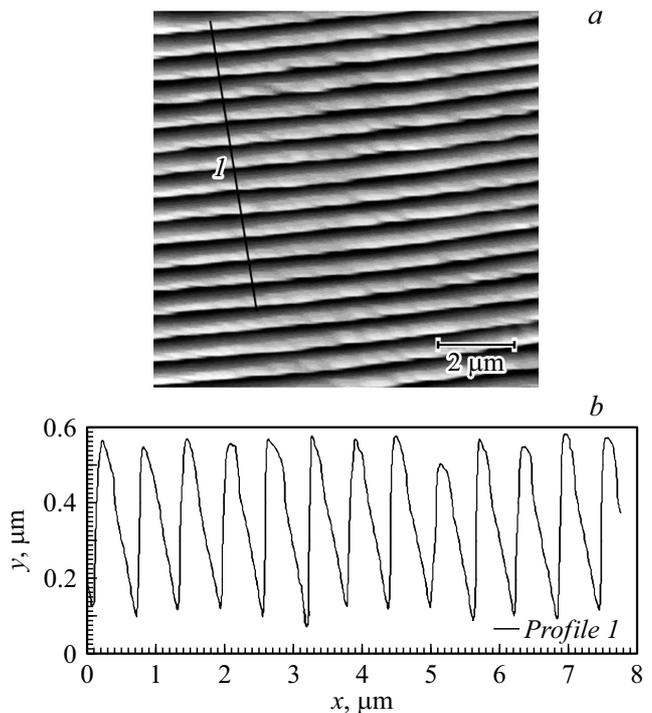
**Рис. 1.** Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  от времени  $t_{\text{He-Cd}}$  экспонирования решеток излучением He–Cd лазера. *a* — травящий реагент  $\text{H}_2\text{O}$ , *b* — травящий реагент 50% раствор  $\text{CH}_3\text{COOH}$  в изопропанол. 1 — до обработки, 2 — после обработки.

Оценка эффективности полученных голографических решеток определялась измерением ДЭ решеток как отношения интенсивности пучка света He–Ne лазера ( $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ ), дифрагированного в +1 порядок, к интенсивности считывающего пучка, падающего на голограмму под углом Брэгга, который в воздухе составлял  $28^\circ$ . Состояние поляризации считывающего пучка не контролировалось. На рис 1, *a, b* приведены зависимости ДЭ от времени экспонирования ( $t_{\text{He-Cd}}$ ) БХЖ излучением He–Cd лазера ( $\lambda = 0.44 \mu\text{m}$ ) до и после обработки фотопластинок, включающей УФ-облучение и травление. После УФ-облучения для обоих типов травящих реагентов имеет место значительное увеличение ДЭ (свыше 50–60%). Обработка фотопластинок коротковолновым УФ-излучением является ключевым моментом, поскольку исключение его из процесса снижает максимальную ДЭ рельефно-фазовых решеток до 3–4% независимо от типа травителя, что было проверено экспериментально.

Рельефно-фазовый характер обработанных голографических структур подтверждается кривыми угловой селективности. На рис. 2 приведены зависимости нормированной ДЭ от угла брэгговского рассогласования  $\delta\theta_{\text{Br}}$ . Экспериментальные точки 1 представляют собой значения ДЭ для решеток, не подвергнутых УФ-облучению и не обработанных травящим реагентом, для них ДЭ не превышает 1.2%. Полученная высокая угловая селективность свидетельствует об объемно-фазовом характере



**Рис. 2.** Экспериментальное определение угловых зависимостей ДЭ для фотопластинок ПФГ-04 (точки) и расчет ДЭ в рамках скалярной теории Когельника. Эксперимент: 1 — до УФ-облучения и травления, 2 — после обработки, включающей УФ-облучение и травление.



**Рис. 3.** Изображение поверхности голографической решетки (*a*) и профилограмма участка поверхности на материале ПФГ-04 (*b*).

решеток. Штриховая кривая, практически совпадающая с экспериментальной зависимостью, рассчитана по теории Когельника для объемно-фазовой решетки толщиной  $26\ \mu\text{m}$ , среднего показателя преломления БХЖ  $n_0 = 1.53$  и глубины модуляции показателя преломления  $n_1 = 0.005$ . Измеренная на профилометре ПРОФИ-130 (ОАО „Завод Протон-МИЭТ“, Москва) толщина слоя ПФГ-04 имеет значение  $31\ \mu\text{m}$ , а в сертификате качества данной партии пластинок ПФГ-04 (ОАО „Компания Славич“, Переславль-Залесский) приведена величина  $25 \pm 2\ \mu\text{m}$ . Все приведенные выше значения толщины слоя близки. Это указывает на то, что внутренняя решетка показателя преломления занимает практически всю толщину фотоматериала ПФГ-04.

Зависимость 2 на рис. 2 относится к измерениям ДЭ для решетки после обработки, включающей УФ-облучение и травление с помощью 50% раствора ледяной уксусной кислоты в изопропанол. Максимальная ДЭ составляла 65%. Видно, что брэгговский характер угловой зависимости исчезает и объемная решетка показателя преломления после обработки трансформируется в поверхностную рельефную решетку.

В дополнение к предыдущим исследованиям был проведен прямой анализ поверхностной структуры методом атомно-силовой микроскопии. Пример полученных с помощью атомно-силового микроскопа Nano DST (Pacific Nanotechnology Inc.) картины поверхности и профиля рельефа голографической решетки показан на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Данные приведены для решетки с ДЭ 58%, экспонированной излучением He–Cd лазера в течение  $3\ \text{min}\ 20\ \text{s}$ , подвергнутой УФ-облучению ( $24\ \text{min}$ ) и обработанной с помощью 50% раствора ледяной уксусной кислоты в изопропанол.

Сканирование поверхности образца велось вдоль горизонтального направления под небольшим углом к штрихам решетки для уменьшения деформации слоя материала зондом, поскольку атомно-силовой микроскоп работал в контактной моде с использованием зонда средней жесткости CSG10/W2C (фирма NT-MDT) с типичным значением силовой константы  $0.11\ \text{N/m}$ . Профиль рельефа (рис. 3, *b*) вдоль направления *l* (рис. 3, *a*) имеет среднюю высоту  $h = 0.48\ \mu\text{m}$ . Чтобы получить истинную высоту рельефа, эту величину нужно умножить на экспериментально полученный коэффициент 1.3–1.8, который учитывает эффект деформации материала зондом в процессе сканирования. В итоге глубина поверхностного рельефа *h* как минимум составляет величину  $0.6\ \mu\text{m}$ , т. е. соответствует длине волны считывающего излучения He–Ne лазера, что необходимо для получения высокой ДЭ согласно строгой электромагнитной теории пропускающих дифракционных решеток [7].

Таким образом, в работе впервые показана возможность получения высокоэффективных высокочастотных рельефно-фазовых решеток на промышленно выпускаемом светочувствительном материале ПФГ-04. Используемый метод обработки слоев БХЖ является альтернативой традиционному методу получения

объемно-фазовых голограмм на этом фотоматериале. Результаты работы будут способствовать расширению области применения фотоматериала для голографии ПФГ-04 на основе бихромированного желатина.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] В.А. Барачевский, *Оптика и спектроскопия*, **124** (3), 371 (2018). DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51621.18941 [V.A. Barachevsky, *Opt. Spectrosc.*, **124** (3), 373 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18030062].
- [2] С.Н. Гуляев, В.П. Ратушный, *Опт. журн.*, **70** (2), 45 (2003). [S.N. Gulyaev, V.P. Ratushnyi, *J. Opt. Technol.*, **70** (2), 105 (2003). DOI: 10.1364/JOT.70.000105].
- [3] Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер, *Письма в ЖТФ*, **42** (19), 26 (2016). [N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer, *Tech. Phys. Lett.*, **42** (10), 988 (2016). DOI: 10.1134/S1063785016100060].
- [4] Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер, А.В. Архипов, *Автометрия*, **56** (12), 92 (2020). DOI: 10.15372/AUT20200210 [N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer, A.V. Arkhipov, *Optoelectron. Instrum. Data Process.*, **56** (2), 77 (2020). DOI: 10.3103/S8756699020020065].
- [5] Т.Х. Джеймс, *Теория фотографического процесса* (Химия, Л., 1980), с. 66. [T.H. James. *The theory of the photographic process* (Macmillan Publ. Co, N.Y., 1977)].
- [6] J.Q. Umberger, *Phot. Sci. Eng.*, **11** (6), 385 (1967).
- [7] Л.Л. Досколович, *Расчет дифракционных решеток в рамках строгой электромагнитной теории* (Изд-во СГАУ, Самара, 2007).