

04

## Схема записи во встречных пучках для получения рельефно-фазовых голографических решеток, работающих на пропускание

© Н.М. Ганжерли<sup>1</sup>, С.Н. Гуляев<sup>2</sup>, Д.А. Ильюшина<sup>2</sup>, И.А. Маурер<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФТИ 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, cherrysyrup2033@gmail.com, maureririna@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.09.2024 г.

В окончательной редакции 17.09.2024 г.

Принята к публикации 30.09.2024 г.

Представлены результаты экспериментов по записи во встречных пучках тонких рельефно-фазовых решеток, работающих на пропускание. Голографические решетки с пространственной частотой вплоть до  $800 \text{ mm}^{-1}$  изготавливались на фотоматериале ПФГ-01, в технологии обработки которого лежит дубящее отбеливание в отбеливателях, содержащих бихроматы, УФ облучение и травление в растворах ледяной уксусной кислоты в изопропиловом спирте. Ключевым моментом в технологии обработки является деструктивное воздействие на желатин фотоэмульсии коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее  $270 \text{ nm}$ . В ходе экспериментов получены рельефно-фазовые голографические решетки, работающие на пропускание.

**Ключевые слова:** голографические дифракционные решетки, пластинки фотографические ПФГ-01, коротковолновое УФ излучение, поверхностный рельеф, дифракционная эффективность, ледяная уксусная кислота, изопропиловый спирт.

DOI: 10.61011/OS.2024.09.59188.7086-24

### Введение

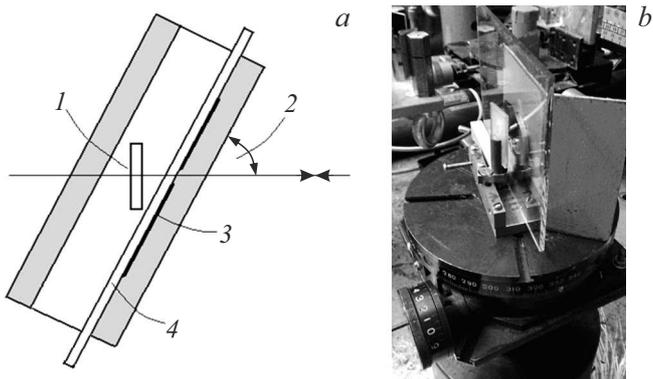
Ранее нами исследовалась регистрация голографических высокоэффективных высокочастотных рельефно-фазовых решеток на содержащих желатин светочувствительных средах в сходящихся пучках [1]. Также была разработана усовершенствованная технология обработки регистрирующих сред, основанная на деструктивном воздействии коротковолнового УФ излучения на желатин [2] и травлении слоев в различных травящих реагентах [1]. Были получены образцы рельефно-фазовых голографических решеток с пространственной частотой  $1200\text{--}1600 \text{ mm}^{-1}$  с высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) до 67% на бихромированном желатине и до 42% на галоидосеребряной фотоэмульсии (фотопластинки ПФГ-04 и ПФГ-01 ОАО „Компания Славич“) [1].

Для получения рельефных голографических решеток наряду с симметричной оптической схемой записи в сходящихся пучках интересно рассмотреть оптическую схему регистрации во встречных пучках (контрнаправленная схема). Данная схема предложена Ю.Н. Денисюком в 1962 г. как способ записи изображения в трехмерных средах, позволяющий сохранить информацию о фазе, амплитуде и спектральном составе волны, пришедшей от объекта [3]. Эта схема регистрации голограмм в основном используется в художественной голографии

для получения трехмерного изображения реального объекта. В случае плоских объектного и опорного пучков структура голограммы представляет собой набор параллельных штрихов, связанных с вариациями показателя преломления внутри фотоэмульсионного слоя. Поэтому такая голограмма работает на отражение, и период внутренней структуры примерно равен половине длины волны света в оптической среде.

Поскольку штрихи решетки выходят на поверхность под косым углом, то при изменении угла наклона штрихов появляется возможность записать поверхностную структуру в широком диапазоне пространственных частот. Данная возможность была реализована в работе [4], где в качестве светочувствительной среды использовались тонкие слои фоторезиста. При этом после травления фоторезиста и металлизации поверхности был получен пилообразный профиль рельефа, работающий на отражение. Контрнаправленная схема до сих пор успешно применяется при изготовлении голографических решеток с углом блеска для спектрографов [5].

Галоидосеребряная фотоэмульсия как светочувствительная среда по своим свойствам существенно отличается от фоторезистов. Поэтому следует ожидать, что оптические параметры голографических структур, полученных на галоидосеребряной фотоэмульсии в контрнаправленной схеме, будут существенно иными. Целью работы является исследование возможности использова-



**Рис. 1.** Регистрация решеток во встречных пучках. (а) схема расположения зеркала и фотопластинки относительно падающего пучка света: 1 — зеркало, 2 — угол поворота фотопластинки, 3 — диафрагма, 4 — фотопластинка; (б) фотография устройства поворота фотопластинки.

ния схемы во встречных пучках для записи рельефных решеток на фотоматериале ПФГ-01, работающих на пропускание.

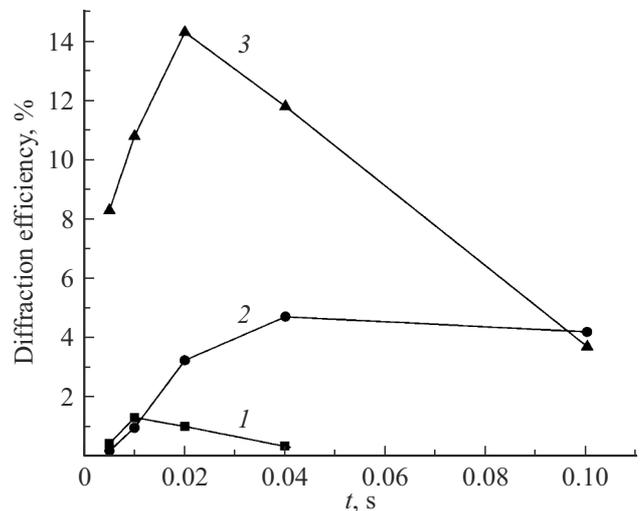
### Постановка эксперимента

Для регистрации решеток была использована оптическая схема, в которой отраженный от зеркала лазерный пучок (объектный) является обращенным по отношению к опорному пучку (рис. 1, а). В этом случае пространственную частоту решетки на поверхности фотоматериала можно легко регулировать в широких пределах за счет изменения наклона штрихов решетки внутри фотоматериала. Это осуществляется путем поворота помещенной перед зеркалом фотопластинки (рис. 1, б). Для данной схемы характерна простая юстировка и наладка установки, связанная с пространственным совпадением падающего и отраженного пучков в плоскости фотоэмульсии.

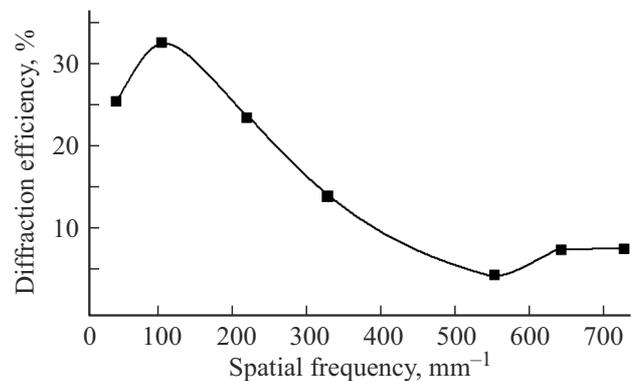
В работе в качестве регистрирующей среды для записи дифракционных решеток был выбран галлоидосеребряный фотоматериал ПФГ-01 для голографии толщиной эмульсионного слоя  $6 \mu\text{m}$ . Пространственная частота регистрируемых решеток варьировалась от 30 до  $800 \text{ mm}^{-1}$ . Формирование поверхностной рельефной структуры производилось такими же методами обработки, которые ранее использовались для записи рельефных решеток в сходящихся пучках [1].

Излучением He-Ne-лазера с длиной волны  $0.63 \mu\text{m}$  записывались первичные амплитудные структуры в виде серебряного изображения (СИ) наклонных штрихов в объеме фотослоя, проявленного в проявителе Д-19 в течение 4 min и фиксированного в кислоте фиксаже. На втором этапе обработки осуществлялось избирательное дублирование фотоэмульсии в отбеливателе R-10 на основе бихромата и удаление СИ из слоя эмульсии за счет второго фиксирования. Данная операция осуществляла

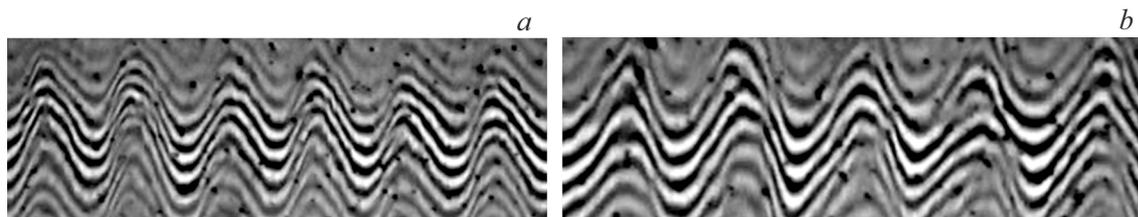
регалогенизирующее отбеливание с одновременным избирательным задубливанием фотоэмульсионного слоя. При этом на поверхности слоя создавались условия для эффективной модуляции деструктивного воздействия коротковолнового УФ излучения, разрушающего менее задублинные участки желатина. Источником коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее  $270 \text{ nm}$  служила ртутная лампа высокого давления ДРТ-230. Время облучения УФ лампой было 25 min. Следующим шагом фотохимической обработки являлось короткое травление (10 s) эмульсионного слоя в растворах ледяной уксусной кислоты (ЛУК) в изопропиловом спирте (ИПС) в соотношении 1:0 или 1:1. Далее следовало последовательное купание образцов в двух ваннах ИПС (100%) по 30 s в каждой.



**Рис. 2.** Зависимость ДЭ первичной амплитудной голограммы (1), рельефно-фазовой голограммы после избирательного дублирования (2), рельефно-фазовой голограммы после облучения УФ излучением и травления (3) от времени экспонирования когерентным излучением He-Ne-лазера для пространственной частоты  $\nu = 340 \text{ mm}^{-1}$ .



**Рис. 3.** Зависимость максимальной достигнутой ДЭ решеток от пространственной частоты  $\nu$ .



**Рис. 4.** Интерференционная картина, полученная с помощью микроинтерферометра МИИ-4 для симметричной (а) и асимметричной формы рельефа (b).

Интерферограммы решеток, отражающие рельеф поверхности, регистрировались с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

## Результаты эксперимента

Основным исследуемым параметром эксперимента являлась дифракционная эффективность голографических решеток (ДЭ). Приведенные графические материалы демонстрируют изменение ДЭ в зависимости от времени экспонирования  $t$  фотопластинок He-Ne-лазером и этапов обработки образцов (рис. 2), а также от пространственной частоты решетки  $\nu$  (рис. 3). Из рис. 2 видно, что для пространственной частоты  $\nu = 340 \text{ mm}^{-1}$  добавление операций УФ облучения и травления многократно увеличивают ДЭ решеток вследствие сильного возрастания глубины поверхностного рельефа и связанной с ней ДЭ решеток.

Эксперименты также выявили, что на низких пространственных частотах  $\nu \leq 100 \text{ mm}^{-1}$  рельеф формируется преимущественно силами натяжения, возникающими при обезвоживании мокрого коллоида [6]. Добавление к процедуре обработки операций облучения фотоэмульсии УФ излучением и травления лишь незначительно увеличивает высоту поверхностного рельефа, а ДЭ при этом может даже снижаться. На галоидосеребряном фотоматериале на низких частотах удается получить рельефы высотой  $1\text{--}1.6 \mu\text{m}$ , значительно превышающие длину волны света. В случае фоторезистов высота пилообразного рельефа не превышает величины  $0.2\text{--}0.3 \mu\text{m}$  [4]. В целом, в отличие от фоторезистов форма полученных поверхностных рельефов носит симметричный характер (рис. 4, а), однако некоторые образцы решеток на низких пространственных частотах ( $\approx 40 \text{ mm}^{-1}$ ) демонстрируют явную асимметрию (рис. 4, б).

## Заключение

Результаты работы показали, что в отличие от традиционной схемы записи Денисюка, с помощью которой регистрируют объемные отражательные голограммы, контрнаправленная схема также позволяет получить

тонкие рельефно-фазовые решетки, работающие на пропускание.

Было обнаружено, что в случае создания голографических решеток во встречных пучках наилучшие результаты получаются при травлении образцов после воздействия УФ излучения в неразбавленной ЛУК в отличие от регистрации решеток в сходящихся пучках, где концентрация ЛУК была вдвое меньше [1].

В отличие от фоторезистов, для которых предельная глубина травления составляла порядка половины длины волны в записывающей среде, на галоидосеребряном фотоматериале на низких частотах удается получить рельефы высотой  $1\text{--}1.6 \mu\text{m}$ , что значительно превышает длину волны регистрирующего голограмму излучения лазера.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.В. Архипов, Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер. Оптический журнал, **90** (3), 38 (2023). [A.V. Arkhipov, N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer. J. Opt. Technol., **90** (3), 38 (2023). DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-38-47].
- [2] С.Н. Гуляев, В.П. Ратушный. Оптический журнал, **70** (2), 45 (2003). [S.N. Gulyaev, V.P. Ratushnyi. J. Opt. Technol., 2003. V. **70** (2), 105 (2003). DOI: 10.1364/JOT.70.000105].
- [3] Ю.Н. Денисюк. ДАН СССР. **144** (6), 1275 (1962).
- [4] N.K. Sheridon. Appl. Phys. Lett., **12** (9), 316 (1968).
- [5] Н.К. Павлычева. Оптический журнал, **89** (3), 28 (2022). DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-03-28-41 [N.K. Pavlycheva. J. Opt. Technol., **89** (3), 142 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000142].
- [6] H.M. Smith. J. Opt. Soc. Am., **58** (4), 533 (1968).