

Оптический журнал

Голография
Holography

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-38-47

УДК 535.412; 535-3

Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах

Александр Викторович Архипов¹, Нина Мануиловна Ганжерли²✉,
Сергей Николаевич Гуляев³, Ирина Анатольевна Маурер⁴

^{1, 3}Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

^{2, 4}Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

¹arkhipov@rphf.spbstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-3321-7797>

²nina.holo@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-2933-2135>

³gulyaev@rphf.spbstu.ru <https://orcid.org/0000-0003-0549-0961>

⁴maureririna@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-9385-4221>

Аннотация

Предмет исследования. Процессы регистрации высокоеффективных рельефно-фазовых голографических структур на содержащих желатин светочувствительных средах на высоких пространственных частотах. **Цель работы.** Создание усовершенствованных технологий обработки регистрирующих сред, основанных на деструктивном воздействии коротковолнового ультрафиолетового излучения на желатин. **Метод.** Включение в технологию обработки светочувствительных слоев существенно укороченной по времени процедуры травления облученного ультрафиолетом желатина для подавления влияния сил поверхностного натяжения, сглаживающих поверхностный рельеф структуры на высоких пространственных частотах. В качестве травителей использовались вода и растворы ледяной уксусной кислоты в изопропиловом спирте. **Основные результаты.** Созданные образцы рельефно-фазовых голографических решеток на бихромированном желатине (фотопластинки ПФГ-04 ОАО «Компания Славич») демонстрируют высокую дифракционную эффективность в области пространственных частот 1200–1600 мм^{-1} до 67% и 42% на галоидсеребряной фотоэмulsionии (фотопластинки ПФГ-01 ОАО «Компания Славич») и обладают низкой угловой селективностью. Высокие значения дифракционной эффективности получены в широком диапазоне толщины слоев от 0,7 до 26 $\mu\text{м}$ использованных регистрирующих сред. **Практическая значимость.** Предложенные усовершенствованные методики обработки светочувствительных слоев, содержащих желатин, способствуют увеличению диапазона регистрируемых пространственных частот при формировании рельефно-фазовых голографических структур и тем самым расширяют сферу применения галоидсеребряных фотоэмulsionий и бихромированного желатина в голографии.

Ключевые слова: голографические решетки, бихромированный желатин, галоидсеребряные фотоэмulsionии, пластиинки фотографические ПФГ-01 и ПФГ-04, коротковолновое ультрафиолетовое излучение, поверхностный рельеф, дифракционная эффективность

Ссылка для цитирования: Архипов А.В., Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. Рельефно-фазовые высокочастотные голографические решетки на содержащих желатин светочувствительных средах // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 3. С. 38–47. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-38-47>

Коды OCIS: 090.0090, 160.5335, 120.6650, 260.7190, 350.5130, 180.5810

Relief-phase high-frequency holographic gratings on gelatin-containing photosensitive media

ALEXANDER V. ARKHIPOV¹, NINA M. GANZHERLI^{2✉}, SERGEY N. GULYAEV³, IRINA A. MAURER⁴

^{1, 3}Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

^{2, 4}Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

¹arkhipov@rphf.spbstu.ru <https://orcid.org/0000-0002-3321-7797>

²nina.holo@mail.ioffe.ru <https://orcid.org/0000-0002-2933-2135>

³gulyaev@rphf.spbstu.ru <https://orcid.org/0000-0003-0549-0961>

⁴maureririna@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-9385-4221>

Abstract

Subject of study. The registration processes of highly effective relief phase holographic structures on gelatin-containing photosensitive media at high spatial frequencies. **Aim of study.** The development of advanced technologies for processing recording media based on the destructive effect of short-wave ultraviolet radiation on gelatin. **Method.** The inclusion in the processing photosensitive layers technology of a significantly shortened time procedure for etching gelatin irradiated with ultraviolet radiation to suppress the influence of surface tension forces smoothing the surface relief of the structure at high spatial frequencies. Water and solutions of glacial acetic acid in isopropyl alcohol were used as etchants. **The main results.** The samples of relief phase holographic gratings created for the first time demonstrate high diffraction efficiency in the range of spatial frequencies $1200\text{--}1600\text{ mm}^{-1}$ up to 67% for dichromated gelatin (PFG-04 photographic plates of "Slavich Company") and 42% for silver halide emulsion (PFG-01 photographic plates of "Slavich Company") and have low angular selectivity. High diffraction efficiency values were obtained in a wide range of thicknesses from 0.7 to 26 μm of the recording media used. **Practical significance.** The proposed improved methods of processing gelatin-containing photosensitive layers contribute to an increase of the range of recorded spatial frequencies during the formation of relief phase holographic structures and thereby expand the scope of application of silver halide photoemulsions and dichromated gelatin in holography.

Keywords: holographic grating, dichromated gelatin, silver halide photoemulsion, photographic plates PFG-01 and PFG-04, short-wave ultraviolet radiation, surface relief, diffraction efficiency

For citation: Arkhipov A.V., Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Maurer I.A. Relief-phase high-frequency holographic gratings on gelatin-containing photosensitive media [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 3. P. 38–47. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-38-47>

OCIS codes: 090.0090, 160.5335, 120.6650, 260.7190, 350.5130, 180.5810

ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные голограммические решетки с пространственной частотой от 1000 mm^{-1} до субволнового диапазона широко используются в современной фотонике и лазерной технике [1–3]. Реализация подобных структур возможна, в частности, и на светочувствительных средах на основе желатина. Желатин как оптическая среда обладает высокими оптическими параметрами, поэтому по мере развития голограммии разрабатывались методы, позволяющие получать высокоэффективные голограммические структуры на этой среде [4]. Сам по себе желатин не обладает надмолекулярной рассеивающей структурой, поэтому на нем возможно регистрировать высокочастот-

ные пространственно-периодические структуры (ППС) на молекулярном уровне вплоть до нескольких тысяч линий на миллиметр [5], имеющие малое рассеяние света в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра.

Такие структуры можно получить, осуществляя избирательное воздействие некоторых видов излучения на желатин, что демонстрирует рис. 1, где приведены две схемы получения высокоэффективных фазовых голограммических структур на содержащих желатин средах.

Для галоидсеребряной фотоэмulsionии (рис. 1a) экспонирование когерентным светом видимого диапазона (например, излучением He-Ne лазера с длиной волны $\lambda = 630\text{ nm}$) и последующее фотографическое проявление

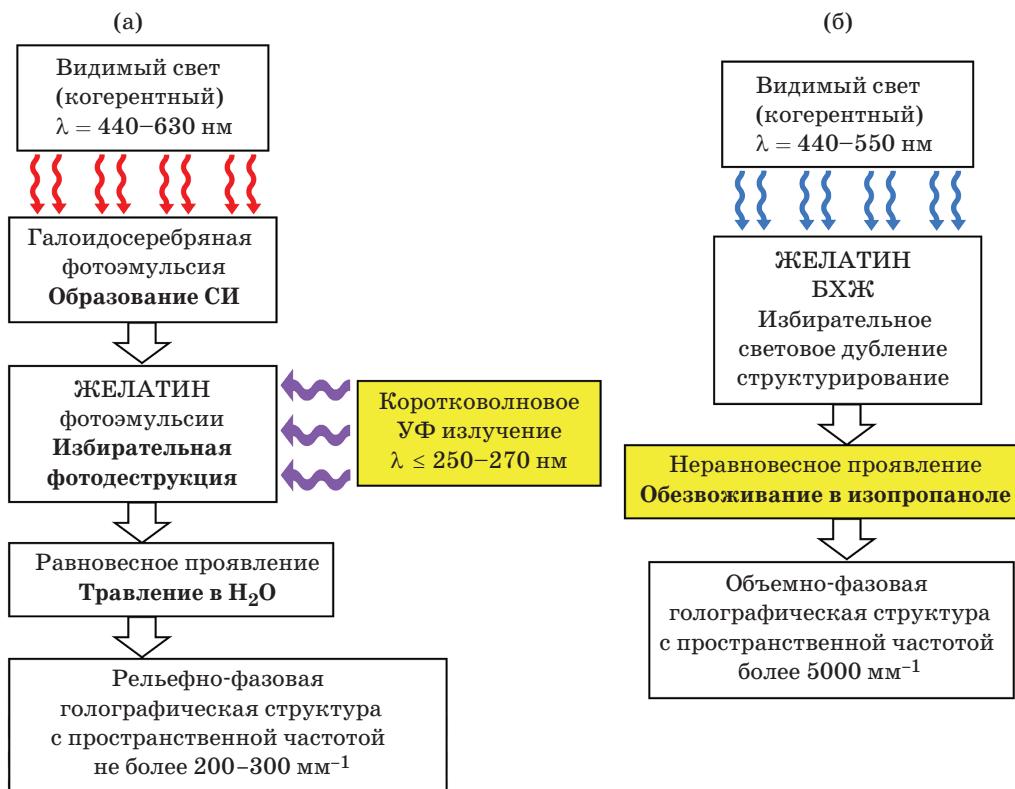


Рис. 1. Схемы получения высокоэффективных фазовых голограммических структур на регистрирующих средах, содержащих желатин. Фотоэмulsionия — (а), бихромированный желатин — (б). СИ — серебряное изображение, БХЖ — бихромированный желатин

Fig. 1. Schemes for obtaining highly efficient phase holographic structures on recording media containing gelatin. (a) Photoemulsion, (b) dichromated gelatin. СИ is silver image, БХЖ is dichromated gelatin

приводят к формированию серебряного изображения (СИ) интерференционных полос. На следующем этапе осуществляется облучение фотоэмulsionии коротковолновым ультрафиолетовым (УФ) излучением с длиной волны $\lambda \leq 250\text{--}270$ нм, которое быстро поглощаясь, действует только на поверхностные слои фотоматериала [4]. В качестве источника УФ излучения обычно используется ртутно-кварцевая лампа высокого давления. Избирательная фотодеструкция желатина при этом происходит за счет того, что СИ является экраном, модулирующим разрушающее действие высокоэнергетичных фотонов. Последним этапом процедуры обработки является равновесное проявление воздействия УФ излучения, которое состоит в погружении фотопластины в воду и вытравливании наиболее разрушенных участков желатина, совпадающих с минимумами оптической плотности СИ интерференционных полос. Итогом процедуры обработки является образование высокоэффективных

рельефно-фазовых структур, пространственно-частотный диапазон которых сравнительно невелик (менее $200\text{--}300$ мм^{-1}). Это связано со сглаживающим действием сил поверхностного натяжения при равновесном проявлении и медленной сушке мокрого коллоида [6].

На бихромированном желатине (БХЖ), схема обработки которого представлена на рис. 1б, экспонирование когерентным светом видимого диапазона (например, излучением Не-Cd лазера с $\lambda = 440$ нм) создает избирательное световое задубливание, или структурирование, желатина в соответствии с регистрируемой интерференционной картиной. Последующее неравновесное проявление, состоящее из быстрого обезвоживания слоя в концентрированных водных растворах изопропанола, приводит к образованию микропористой структуры и изменению показателя преломления желатина по всей толщине среды [7, 8]. В отличие от галоидосеребряной фотоэмulsionии на БХЖ получаются высокоэффективные

объемно-фазовые голограммы, пространственно-частотный диапазон которых простирается по крайне мере до нескольких тысяч линий на миллиметр. На слоях БХЖ также возможно создать и рельефно-фазовые периодические структуры со значительной глубиной поверхностного рельефа вплоть до 6 мкм на пространственной частоте 6 мм^{-1} [9]. Однако диапазон регистрируемых пространственных частот невелик и ограничивается значениями 100–200 мм^{-1} при глубине рельефа порядка микрона по указанной выше причине, связанной с поверхностным натяжением.

Таким образом, при рассмотрении представленных на рис. 1 схем процедуры обработки можно заключить следующее:

1. Введение в процедуру обработки облучения фотослоя коротковолновым УФ излучением приводит к образованию высокоеффективной рельефно-фазовой голографической структуры на поверхности желатина на сравнительно низких пространственных частотах.

2. Наличие в процедуре обработки слоя БХЖ неравновесного проявления позволяет получать высокоеффективные объемно-фазовые голографические структуры на высоких пространственных частотах.

Упомянутые выше две ключевые стадии процедуры обработки на рис. 1 затемнены.

Таким образом, целью работы является создание усовершенствованных технологий обработки регистрирующих сред, основанных на деструктивном воздействии коротковолнового ультрафиолетового излучения на желатин.

РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА БИХРОМИРОВАННОМ ЖЕЛАТИНЕ

Анализ технологии обработки светочувствительных сред, содержащих желатин, приводит к идее одновременного включения упомянутых выше двух ключевых этапов в общую процедуру обработки, например слоев БХЖ, с целью получить высокоеффективные рельефно-фазовые голографические структуры с существенно расширенным пространственно-частотным диапазоном. Этот подход имеет большое практическое значение, поскольку позволяет создать на таком распространенном фотоматериале, как БХЖ, кроме объемно-фазовых голографических структур, также и тонкие рельефно-фазовые структуры, обладаю-

щие низкой угловой селективностью и широко применяющиеся в дифракционной оптике.

Согласно новой схеме технологии обработки слоев БХЖ, изображенной на рис. 2, операция облучения желатина коротковолновым УФ излучением выполняется после избирательного светового задубливания желатина излучением He-Cd лазера. Эксперименты показали, что переменная задубленность слоя является столь же мощным фактором, модулирующим воздействие коротковолнового УФ излучения на желатин, как и СИ в случае галоидосеребряной фотоэмulsionии [4]. Происходит это потому, что задубленные структурированные участки желатина сопротивляются разрушающему действию УФ излучения гораздо сильнее, чем соседние незадубленные участки.

Вторая ключевая операция обработки — неравновесное проявление — осуществляется сразу после облучения слоя УФ излучением. Концепция проведения этой операции отличается от концепции неравновесного проявления, проводимого в традиционной обработке БХЖ, хотя в ней тоже используются изопропаноловые ванны. Задача этой процедуры состоит в том, чтобы осуществить быстрое травление поверхностного слоя желатина в воде или в смеси ледяной уксусной кислоты и изопропанола в течение примерно 10 с, прерывая его изопропаноловой ванной. При этом не происходит набухания желатина внутри и не развиваются силы поверхностного натяжения, сглаживающие поверхностный рельеф. Желатин при такой обработке ведет себя не как коллоид, а скорее как твердое тело, свойства которого как регистрирующей среды приближаются к свойствам фоторезистов [10]. Таким образом, достигается задача по расширению области регистрируемых пространственных частот в несколько раз [6].

Экспериментальные результаты, полученные на образцах слоев БХЖ, на которых записывались голографические рельефно-фазовые решетки с пространственной частотой около 1500–1600 мм^{-1} , представлены в сводной табл. 1. В работе использовались как слои на основе БХЖ, политые в лабораторных условиях согласно методике Шенкоффа [7], так и выпускаемые ОАО «Компания Славич» фотопластинки ПФГ-04.

Как видно из таблицы, высокие значения дифракционной эффективности (ДЭ) можно

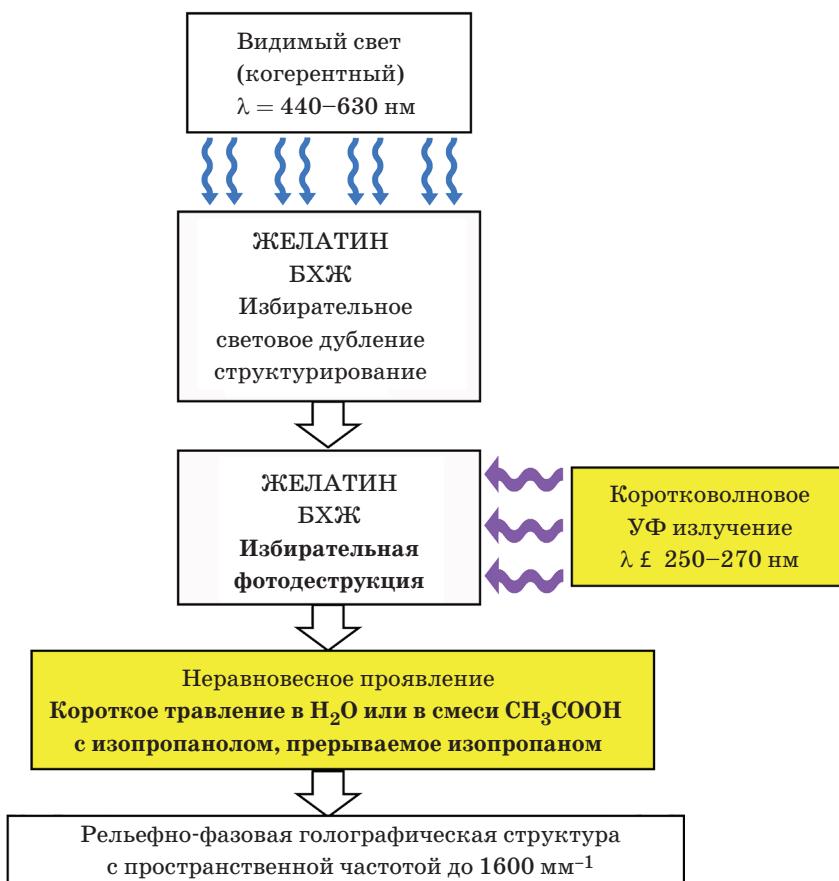


Рис. 2. Схема обработки слоев BXJ для получения высокочастотных рельефно-фазовых решеток
Fig. 2. Processing dichromated gelatin layers scheme to obtain high-frequency relief phase gratings

Таблица 1. Сводная таблица экспериментальных результатов обработки образцов рельефно-фазовых решеток на светочувствительных слоях на основе BXJ

Table 1. Summary table of processing samples experimental results for relief phase gratings on photosensitive layers based on dichromated gelatin

Тип фотоматериала	Толщина слоя, мкм	Тип травителя	ДЭ, % на $\lambda = 630 \text{ нм}$
*BXJ по Шенкоффу	0,7	H_2O	50
*BXJ по Шенкоффу	1,1	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:1	41
*BXJ по Шенкоффу	1,94	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:3	48
*BXJ по Шенкоффу	5,7	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:1	64
*BXJ по Шенкоффу	11	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:3	28,4
ПФГ-04	26	H_2O	54
ПФГ-04	26	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:1	67

Примечание. *Лабораторные образцы.

Note. *Laboratory samples.

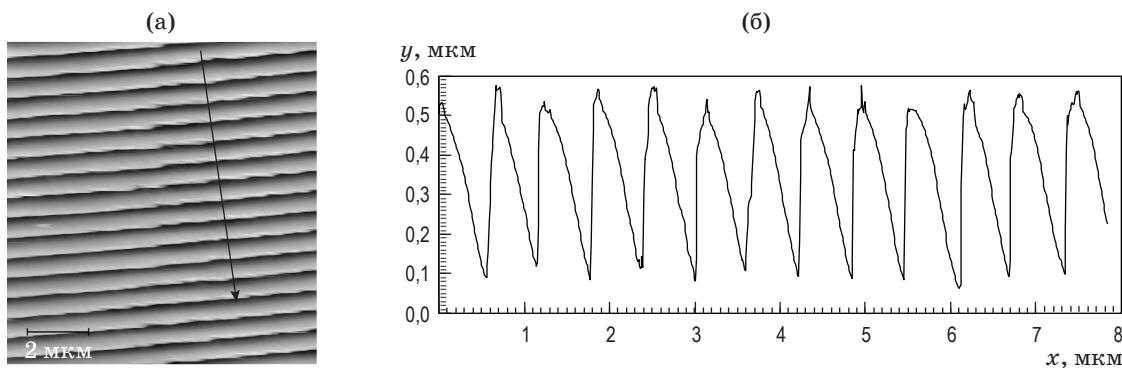


Рис. 3. Изображение, полученное в атомно-силовом микроскопе, поверхности образца БХЖ (фотопластиинка ПФГ-04) — (а) и профиль поверхности рельефа — (б). Стрелка на фотографии указывает направление сканирования поверхности рельефа

Fig. 3. (a) Image obtained in an atomic force microscope of surface a dichromated gelatin (photographic plate PFG-04) sample and (b) surface relief profile. The arrow in the photo indicates the surface relief scanning direction

получить как на образцах со сверхмалой толщиной в доли микрометра, так и на образцах в десятки микрометров, а также и в любых промежуточных случаях. Это говорит о том, что эффективная толщина светочувствительной среды, требуемая для создания рельефно-фазовой структуры, мала и составляет менее 1,5 мкм. Тонкий, не объемный характер зарегистрированных структур подчеркивается их очень малой угловой селективностью (полуширина угловой зависимости ДЭ на пространственной частоте 1500 mm^{-1} составляет почти 40°) [6].

На рис. 3 представлены данные атомно-силовой микроскопии в виде фотографии поверхности образца БХЖ (фотопластиинка ПФГ-04) и профиля поверхности рельефа, доказывающие рельефно-фазовый характер голограммической регистрации. Голограммическая регистрация эффективных рельефных высокочастотных ППС на сверхтонких слоях БХЖ роднит описанный выше метод с методами получения ППС на фоторезистах, однако в отличие от фоторезистов БХЖ в видимом диапазоне когерентного излучения имеет несравненно большую чувствительность и возможность нанесения на подложки больших размеров. Высота поверхности рельефа согласно профилограмме на рис. 3 приближается к длине волны света видимого диапазона, что вполне достаточно для получения высоких значений ДЭ в несколько десятков процентов согласно строгой электромагнитной теории пропускающих дифракционных решеток [11].

РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ГАЛОИДОСЕРЕБРЯНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

Эксперименты доказали высокую эффективность применения двух ключевых этапов обработки для создания высокочастотных рельефно-фазовых структур на слоях БХЖ. Нельзя ли эти этапы включить в общую процедуру обработки высокоразрешающих галоидосеребряных фотоэмulsionий, энергетическая чувствительность которых, как известно, почти на три порядка превышает чувствительность слоев БХЖ, и которые легко сенсибилизируются к любой области спектра излучения [12]?

Основные проблемы, возникающие при таком подходе, можно сформулировать следующим образом:

1. Как осуществить избирательное дубление желатина галоидосеребряной фотоэмulsionии перед операцией облучения коротковолновым УФ излучением?

2. Каким образом удалить первичное СИ, мешающее созданию полноценной фазовой голограммы на чисто желатиновом слое, работающей в проходящем свете?

Вариант решения этих проблем демонстрирует рис. 4, на котором последовательность этапов обработки обозначена широкими стрелками. Избирательное световое дубление желатина, характерное для БХЖ, в случае фотоэмulsionии заменяется избирательным химическим дублением при отбеливании в рас-

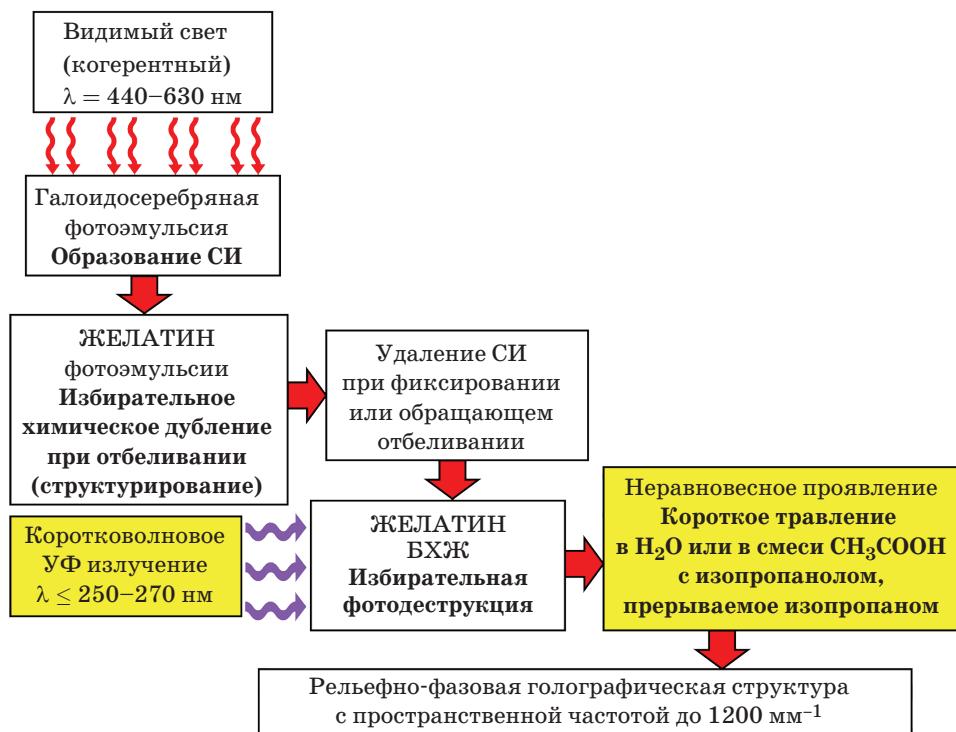


Рис. 4. Схема обработки слоев галоидосеребряного фотоматериала ПФГ-01 для получения высокочастотных рельефно-фазовых решеток

Fig. 4. Scheme of processing silver halide photographic material PFG-01 layers to obtain high-frequency relief phase gratings

Таблица 2. Сводная таблица экспериментальных результатов обработки образцов рельефно-фазовых решеток на фотоматериале ПФГ-01

Table 2. Summary table of processing samples experimental results for relief phase gratings on photographic material PFG-01

Тип фотоматериала	Толщина слоя, мкм	Тип травителя	ДЭ, % на $\lambda = 630$ нм
ПФГ-01 (прямое отбеливание)	6	H_2O	24
ПФГ-01 (прямое отбеливание)	6	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:1	42
ПФГ-01 (обращающее отбеливание)	6	смесь ледяной уксусной кислоты и изопропанола в отношении 1:1	34

творах, содержащих бихроматы. Удаление СИ легко осуществляется либо прямым отбеливанием и последующим фиксированием слоя с помощью тиосульфата натрия, либо просто применением обращающего отбеливания без операции фиксирования (отбеливатели типа R-9 или R-10) [13, 14]. Заключительные стадии обработки, включающие облучение фотоэмulsionи коротковолновым УФ излучением и

неравновесное проявление (короткое травление), полностью аналогичны этапам обработки слоев БХЖ.

Экспериментальные результаты обработки галоидосеребряной фотоэмulsionии представлены в табл. 2. В работе использовался фотоматериал ПФГ-01 ОАО «Компания Славич», на котором записывались голограммические решетки с пространственной частотой 1200 mm^{-1} [15].

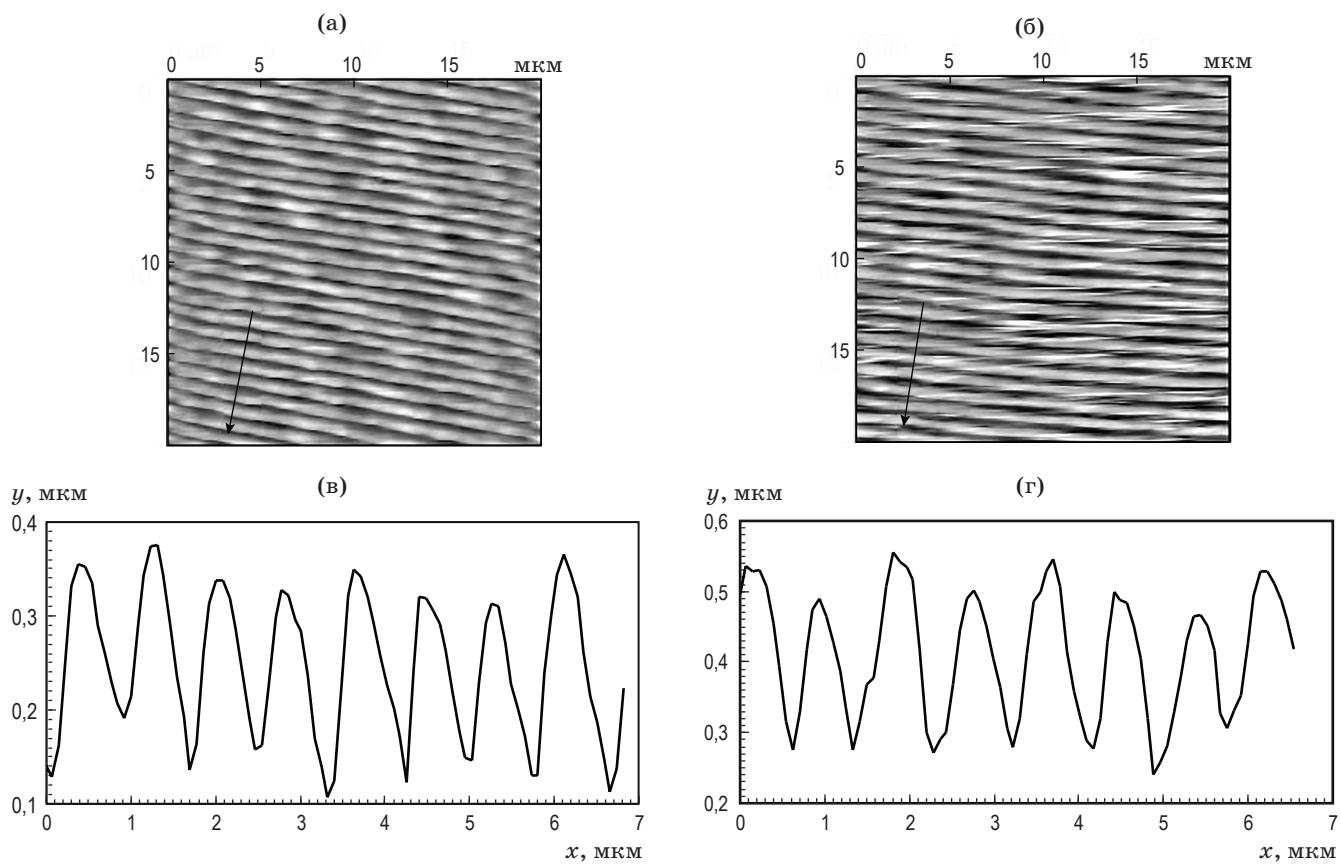


Рис. 5. Изображения, полученные в атомно-силовом микроскопе, поверхности (а, б) и профили рельефа решеток (в, г) на слоях фотоматериала ПФГ-01 при прямом отбеливании (а, в) и обращающем отбеливании (б, г). Стрелки (см. (а), (б)) указывают направление сканирования поверхности рельефа

Fig. 5. (a, b) Images obtained in an atomic force microscope of (a, b) the surface and (в, г) grating relief profiles (a, в) on PFG-01 photographic material layers during direct bleaching and (б, г) reverse bleaching. Arrows (see (а), (б)) indicate the surface relief scanning direction

Как и в случае БЖХ, рельефно-фазовый характер голограммической регистрации подтверждается данными атомно-силовой микроскопии, представленными на рис. 5. Меньшие значения полученной максимальной ДЭ (42%) по сравнению с БХЖ (67%) можно объяснить спадом пространственно-частотной характеристики фотоматериала ПФГ-01 вследствие присущей ему зернистой микроструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье исследования показывают новые перспективы использования содержащих желатин светочувствительных сред в голограммии. Установлено, что избирательная задубленность светочувствительного слоя, возникающая вследствие светового или химического воздействия на желатин, неза-

висимо от типа применяемого фотоматериала, является эффективным модулятором действия коротковолнового УФ излучения и причиной появления рельефной структуры.

Показано, что применение неравновесного проявления физико-химических изменений в желатине (короткого травления) приводит к образованию обладающих низкой угловой селективностью высокочастотных эффективных рельефно-фазовых структур, которые могут быть применены в дифракционной оптике. Установлено, что высокие значения ДЭ можно получить на образцах со сверхмалой толщиной в доли микрометра, что может привести к экономическому использованию светочувствительного материала при его производстве, уменьшению aberrаций и искажений голограммического изображения из-за неоднородностей внутри и на поверхности светочувстви-

тельного слоя. Достоинством новой методики обработки является ее применимость для промышленно выпускаемых галоидосеребряных фотоматериалов, обладающих высокой светочувствительностью и возможностью сенсибилизации к различным областям спектра.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Popov E. Introduction to diffraction gratings: Summary of applications. Theory and numeric applications. Marseille: Presses universitaires de Provence (PUP), 2012. P. 1.1–1.23. <http://www.fresnel.fr/numerical-grating-book>
2. Павлычева Н.К. Дифракционные решетки для спектральных приборов. Обзор // Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 3. С. 28–41. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-28-41>
3. Bonod N., Neauport J. Diffraction gratings: From principles to applications in high-intensity lasers // Adv. Opt. Photon. 2016. V. 8. № 1. P. 156–199. <https://doi.org/10.1364/aop.8.000156>
4. Calixto S., Ganzherli N., Gulyaev S., and Figueroa-Gerstenmaier S. Gelatin as a photosensitive material // Molecules. 2018. V. 8. № 23. P. 2064–2086. <https://doi.org/10.3390/molecules23082064>
5. 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. <https://doi.org/10.1364/ao.41.001522>
6. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А., Архипов А.В. Механизм создания рельефных высокочастотных голограммических структур на бихромированном желатине, облученном коротковолновым УФ-излучением // Автометрия. 2020. Т. 56. № 2. С. 92–99. <https://doi.org/10.15372/aut20200210>
7. Shankoff T.A. Phase holograms in dichromated gelatin // Appl. Opt. 1968. V. 7. № 10. P. 2101–2105. <https://doi.org/10.1364/ao.7.002101>
8. Lin L.H. Hologram formation in hardened dichromated gelatin film // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 5. P. 963–969. <https://doi.org/10.1364/ao.8.000963>
9. Calixto S., Piazza V., Garnica G. Surface profile studies of photoinduced gratings made with DCG films with optional papain development // Gels. 2022. V. 8. № 2. P. 102. <https://doi.org/10.3390/gels8020102>
10. Моро У. Микролитография: принципы, методы, материалы. Часть 1, 2. М.: Мир, 1990. 1249 с.
11. Досковович Л.Л. Расчет дифракционных решеток в рамках строгой электромагнитной теории. Самара: изд. СГАУ, 2007. С. 80.

Таким образом, показана возможность использования традиционно применяемых в голограммии желатиносодержащих фотоматериалов в новом качестве — как тонкой среды для записи голограммных оптических элементов, обладающей низкой угловой селективностью.

REFERENCES

1. Popov E. Introduction to diffraction gratings: Summary of applications. Theory and numeric applications. Marseille: Presses universitaires de Provence (PUP), 2012. P. 1.1–1.23. <http://www.fresnel.fr/numerical-grating-book>
2. Pavlycheva N.K. Diffraction gratings for spectral devices [Review] // J. Opt. Technol. 2022. V. 89. № 3. P. 142–150. <https://doi.org/10.1364/JOT.89.000142>
3. Bonod N., Neauport J. Diffraction gratings: From principles to applications in high-intensity lasers // Adv. Opt. Photon. 2016. V. 8. № 1. P. 156–199. <https://doi.org/10.1364/aop.8.000156>
4. Calixto S., Ganzherli N., Gulyaev S., and Figueroa-Gerstenmaier S. Gelatin as a photosensitive material // Molecules. 2018. V. 8. № 23. P. 2064–2086. <https://doi.org/10.3390/molecules23082064>
5. 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. <https://doi.org/10.1364/ao.41.001522>
6. Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Maurer I.A., Arkhipov A.V. Mechanisms of generation of relief high-frequency holographic structures on dichromated gelatin exposed to shortwave UV radiation // Optoelectronics, Instrumentation and Data Proc. 2020. V. 56. № 2. P. 77–83. <https://doi.org/10.3103/S87566999020020065>
7. Shankoff T.A. Phase holograms in dichromated gelatin // Appl. Opt. 1968. V. 7. № 10. P. 2101–2105. <https://doi.org/10.1364/ao.7.002101>
8. Lin L.H. Hologram formation in hardened dichromated gelatin film // Appl. Opt. 1969. V. 8. № 5. P. 963–969. <https://doi.org/10.1364/ao.8.000963>
9. Calixto S., Piazza V., Garnica G. Surface profile studies of photoinduced gratings made with DCG films with optional papain development // Gels. 2022. V. 8. № 2. P. 102. <https://doi.org/10.3390/gels8020102>
10. Moreau W.M. Semiconductor lithography: Principles, practices, and materials, plenum. NY: Plenum Press, 1988. 930 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0885-0>
11. Doskolovich L.L. Calculation of diffraction gratings within the framework of rigorous electromagnetic theory [in Russian]. Samara: SSAU Publisher, 2007. P. 80.

12. Барачевский В.А. Современное состояние разработки светочувствительных сред для голографии (обзор) // Опт. и спектр. 2018. Т. 124. № 3. С. 371–399. <https://doi.org/10.21883/os.2018.03.45659.238-17>
13. Ulibarrena M., Méndez M.J., Carretero L. Madrigal R., and Fimia A. Comparison of direct, rehalogenating, and solvent bleaching processes with BB-640 plate // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 20. P. 4120–4123. <https://doi.org/10.1364/AO.41.004120>
14. Neipp C., Pascual I., Beléndez A. Effects of overmodulation in fixation-free rehalogenating bleached holograms // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 20. P. 3402–3408. <https://doi.org/10.1364/ao.40.003402>
15. Ганжерли Н.М., Гуляев С.Н., Маурер И.А. Регистрация высокочастотных рельефно-фазовых структур на галоидосеребряном фотоматериале ПФГ-01 // Опт. и спектр. 2022. Т. 130. № 9. С. 1385–1388. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.09.53299.3786-22>
12. Barachevsky V.A. The current status of the development of light-sensitive media for holography (a review) // Optics and Spectroscopy. 2018. V. 124. № 3. P. 373–407. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18030062>
13. Ulibarrena M., Méndez M. J., Carretero L. Madrigal R., and Fimia A. Comparison of direct, rehalogenating, and solvent bleaching processes with BB-640 plate // Appl. Opt. 2002. V. 41. № 20. P. 4120–4123. <https://doi.org/10.1364/AO.41.004120>
14. Neipp C., Pascual I., Beléndez A. Effects of overmodulation in fixation-free rehalogenating bleached holograms // Appl. Opt. 2001. V. 40. № 20. P. 3402–3408. <https://doi.org/10.1364/ao.40.003402>
15. Ganzherli N.M., Gulyaev S.N., Maurer I.A. Registration of high-frequency relief-phase structures on silver halide photographic material PFG-01 [in Russian] // Optics and Spectroscopy. 2022. V. 130. № 9. P. 1385–1388. <https://doi.org/10.21883/OS.2022.09.53299.3786-22>

АВТОРЫ

Александр Викторович Архипов — доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия; Scopus ID: 7005731533; <https://orcid.org/0000-0002-3321-7797>; arkhipov@rphf.spbstu.ru

Нина Мануиловна Ганжерли — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 6603951921; <https://orcid.org/0000-0002-2933-2135>; nina.holo@mail.ioffe.ru

Сергей Николаевич Гуляев — кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий инженер, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Россия; Scopus ID: 6701324585; <https://orcid.org/0000-0003-0549-0961>; gulyaev@rphf.spbstu.ru

Ирина Анатольевна Маурер — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, 194021, Россия; Scopus ID: 7004588504; <https://orcid.org/0000-0001-9385-4221>; maureririna@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 01.11.2022
Одобрена после рецензирования 26.12.2022
Принята к печати 26.01.2023

AUTHORS

Alexander V. Arkhipov — Dr. Sci., Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia; Scopus ID: 7005731533; <https://orcid.org/0000-0002-3321-7797>; arkhipov@rphf.spbstu.ru

Nina M. Ganzherli — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 6603951921; <https://orcid.org/0000-0002-2933-2135>; nina.holo@mail.ioffe.ru

Sergey N. Gulyaev — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Lead Engineer, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251, Russia; Scopus ID: 6701324585; <https://orcid.org/0000-0003-0549-0961>; gulyaev@rphf.spbstu.ru

Irina A. Maurer — Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021, Russia; Scopus ID: 7004588504; <https://orcid.org/0000-0001-9385-4221>; maureririna@yandex.ru

*The article was submitted to the editorial office 01.11.2022
Approved after review 26.12.2022
Accepted for publication 26.01.2023*