

53. Создание высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток на бихромированном желатине при использовании деструктивного воздействия УФ излучения

Н. М. Ганжерли¹, С. Н. Гуляев², И. А. Маурер¹, Д. Р. Хазвалиева²

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

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

Впервые показана возможность создания рельефно-фазовых голографических решеток с высокой пространственной частотой 1500 мм^{-1} на слоях бихромированного желатина (БХЖ) при использовании деструктивного воздействия коротковолнового УФ излучения на желатин.

Ключевые слова: Голографические дифракционные решетки, Поверхностный рельеф, Коротковолновое УФ излучение, Бихромированный желатин.

Цитирование: Ганжерли, Н. М. Создание высокочастотных рельефно-фазовых голографических решеток на бихромированном желатине при использовании деструктивного воздействия УФ излучения / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Р. Хазвалиева // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 290–296.

Введение

Воздействие коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 250–270 нм на желатин проявляется в разрыве связей в основных цепях макромолекул желатина, что приводит к деструкции желатинового каркаса. Последующие водные процедуры сопровождаются вымыванием разрушенных участков желатина. Этот эффект применяется для преобразования амплитудной голографической записи в рельефно-фазовую на галоидосеребряных фотоматериалах [1]. Процедура обработки, основанная на деструктивном воздействии на желатин коротковолнового УФ излучения (метод ВКУФ), была использована для создания различных случайных и регулярных рельефно-фазовых структур, таких как голографические диффузные экраны, микролинзовые растры, дифракционные решетки и т. д. [2, 3]. Метод ВКУФ дает возможность получения структур с глубиной поверхностного рельефа порядка 1 мкм и более. В последствие этот метод был применен к слоям БХЖ для создания низкочастотных дифракционных решеток с частотой ν порядка $100\text{--}200 \text{ мм}^{-1}$ и высотой поверхностного рельефа h около 1 мкм [4–6].

Современные оптические технологии используют дифракционные решетки с более высокой пространственной частоты ν от 1000 мм^{-1} до субволнового диапазона. Такие решетки имеют широкое применение в телекоммуникационных системах и лазерной технике в качестве дифракционных оптических элементов, антиотражающих поверхностей, модуляторов,

оптических датчиков линейных и угловых перемещений, фильтров, поляризационных элементов, светоделителей и т. д. [7–12]. Поэтому важное значение имеет поиск методов обработки слоев БХЖ, позволяющих существенно расширить диапазон пространственных частот рельефно-фазовых голографических структур, записанных используя воздействие коротковолнового УФ излучения на желатин.

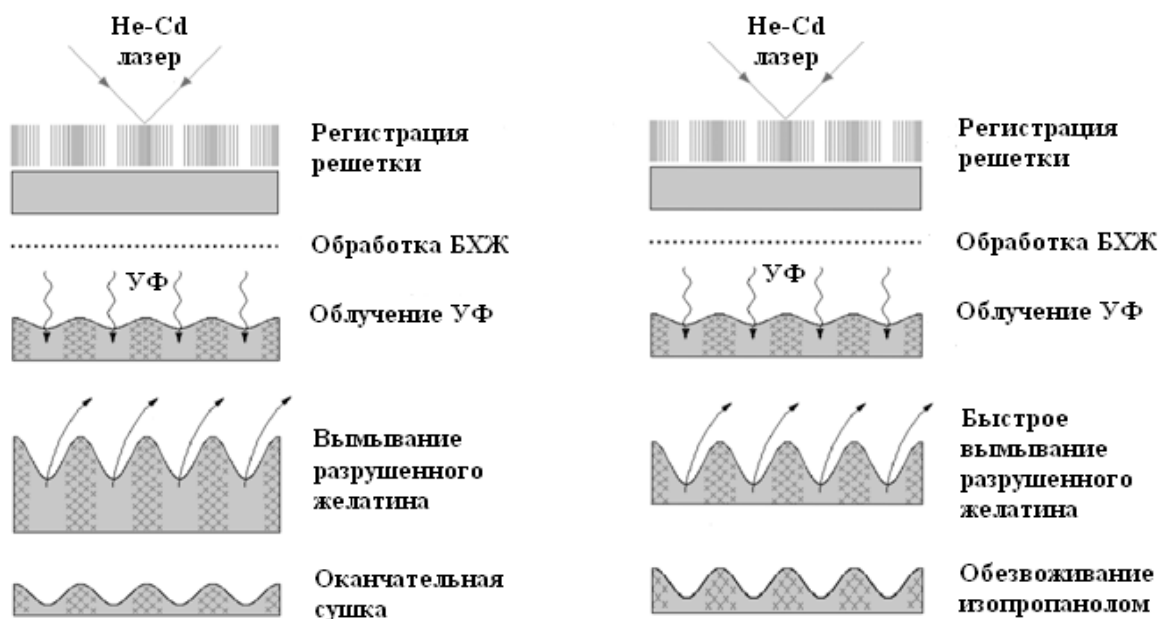
1. Стандартная методика получения голографических рельефно-фазовых структур на БХЖ

При голографической записи интерференционной картины на БХЖ излучением He–Cd лазера происходит изменение физико-химических свойств желатина вследствие избирательного светового дубления лазерным излучением в присутствии бихроматов, что проявляется в структурировании, т. е. в установлении большого количества поперечных связей между молекулами желатина в максимумах интерференционной картины (см. рисунок 1а).

Первичная обработка образцов после экспонирования решеток He–Cd лазером заключается в «купании» в 2 % растворе сульфита натрия в течение 6 мин для завершения процессов дубления желатина и удаления соединений хрома из слоя и сушки. Высота поверхностного рельефа h , определенная как перепад между гребнями и впадинами, после водной обработки и сушки получается менее 0,1 мкм. Такая высота рельефа в соответствии с критериями создания эффективных голографических решеток [13] будет недостаточна для получения высоких значений дифракционной эффективности (ДЭ). На следующих стадиях обработки образцов (см. рисунок 1а) происходит засветка слоев УФ излучением. При этом участки желатинового слоя, подвергнутые световому дублению лазерным излучением, менее поддаются разрушающему воздействию коротковолнового УФ излучения, поскольку большое количество поперечных связей препятствует фрагментации желатиновых макромолекул и растворению их в воде. Таким образом, горбы поверхностного рельефа на слое БХЖ после воздействия УФ света и водной процедуры образуются в максимумах интерференционной картины.

Ранее было получено [14], что содержащие желатин регистрирующие среды для голографии, в обработку которых входит продолжительное пребывание в водных растворах, независимо от методов получения рельефно-фазовых структур имеют ограничения по передаче пространственно-частотного спектра в области высоких частот $\nu \geq 200 \text{ мм}^{-1}$ (см. рисунок 2).

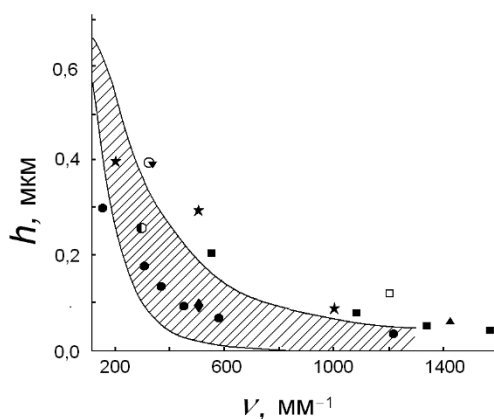
Спад высоты поверхностного рельефа h и связанной с ним ДЭ может быть теоретически объяснен сглаживающим воздействием сил поверхностного натяжения, возникающих во влажном желатиновом слое, роль которых существенно возрастает на высоких пространственных частотах [14, 15]. Продолжительное купание образцов в воде в течение нескольких минут после засветки УФ излучением по используемой нами стандартной методике обработки слоев [4, 5] приводит к набуханию слоя БХЖ по всей толщине (см. рисунок 1а). Поэтому мягкий податливый желатин легко деформируется под действием сил поверхностного натяжения, в результате чего при окончательной сушке на воздухе происходит сглаживание поверхностного рельефа на высоких частотах [14, 15].



а) стандартная методика обработки БХЖ

б) модифицированная методика обработки БХЖ

Рис. 1. Этапы обработки слоев БХЖ для получения поверхностного рельефа на высоких пространственных частотах



Заштрихованная область — для метода ВКУФ, символы — для альтернативных методов

Рис. 2. Зависимость высоты поверхностного рельефа h от пространственной частоты ν голографической структуры

2. Модифицированная методика получения голографических рельефно-фазовых структур на БХЖ

Задачей данной работы было уменьшение влияния сил поверхностного натяжения для получения значительной высоты поверхностного рельефа на высоких пространственных частотах. Для этого было предложено существенно сократить время «купания» образцов в воде после УФ облучения. В этом случае разрушенные ультрафиолетом участки желатина успевают раствориться в воде быстрее, чем набухнут внутренние слои желатина. Для предотвращения

набухания слоя желатина по толщине также было предложено использование ванны с изо-пропиловым спиртом непосредственно после короткой водной обработки (см. рисунок 1б). При этом в образовании голографической структуры участвует только поверхностный слой желатина, а действие сил поверхностного натяжения минимизировано.

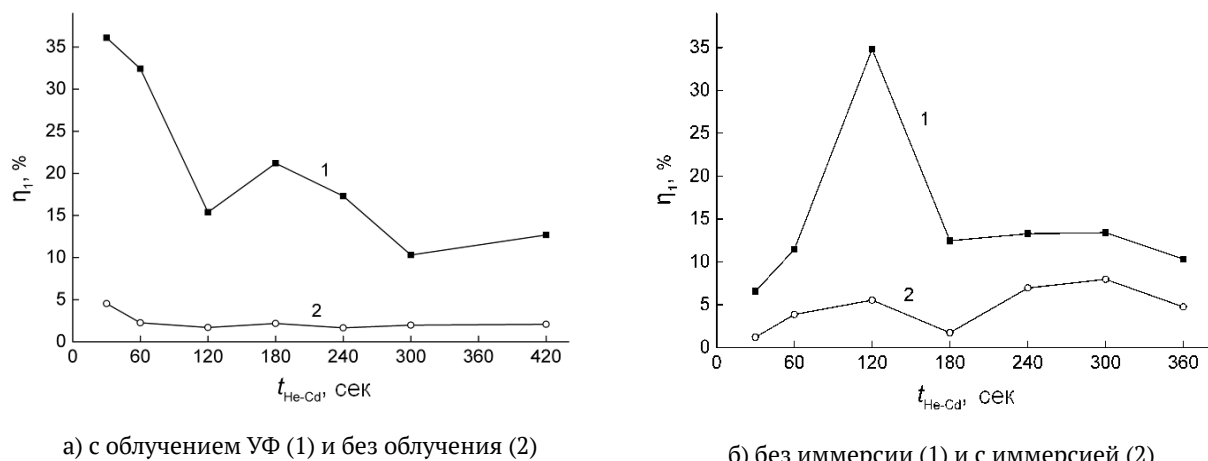
3. Эксперимент

Слои БХЖ изготавливались в лабораторных условиях подобно известному способу, описанному в работе [16]. Запись голографических решеток с пространственной частотой $\nu = 1500 \text{ мм}^{-1}$ осуществлялась по симметричной оптической схеме излучением He–Cd лазера с длиной волны 440 нм. После экспонирования и первичной обработки промытые в воде и высушенные образцы решеток засвечивались УФ излучением с помощью ртутно-кварцевой лампы высокого давления ДРТ-220 в течение 20–24 мин. Затем образцы обрабатывались в течение 10 сек в воде и немедленно погружались в чистый изопропиловый спирт последовательно в две ванны (по 1 минуте в каждой) для быстрого обезвоживания слоя.

Измерение ДЭ решеток проводилось при считывании лучом He–Ne лазера с длиной волны 630 нм при оптимальном угле падения на образец со стороны желатинового слоя. На рисунке 3а (кривая 1) приведена зависимость ДЭ в первом порядке дифракции от времени экспонирования решеток He–Cd лазером $t_{\text{He–Cd}}$. Толщина слоя БХЖ для данного образца в области решетки составляла $T = 5,1 \text{ мкм}$. Достигнутая максимальная ДЭ, равная 35 %, многократно превышает эту величину (1,73 %) для образцов решеток той же пространственной частоты, обработанных после засветки УФ по ранее использованной стандартной методике [4, 5]. Кривая 2 на рисунке 3а отражает ДЭ участков того же образца, не облученных УФ излучением. Сравнение кривых 1 и 2 говорит о существенной роли деструктивного воздействия УФ излучения в формировании поверхностного рельефа за счет удаления водой разрушенных УФ излучением участков желатина

Факт наличия эффективной рельефной решетки подтверждается экспериментами с применением иммерсионной жидкости. На рисунке 3б показана зависимость ДЭ от времени экспозиции когерентным излучением лазера $t_{\text{He–Cd}}$ для голографических решеток с открытой поверхностью (кривая 1) и с поверхностью с нанесенной иммерсионной жидкостью, покрытой покровным стеклом (кривая 2). Толщина слоя БХЖ вне решетки составляла 5,1 мкм. В качестве иммерсионной жидкости использовалось укропное масло, показатель преломления которого приблизительно равнялся показателю преломления желатина. Представленные на рисунке 3б зависимости свидетельствуют о преимущественно рельефно-фазовом механизме дифракции.

Максимальная ДЭ для решеток, зарегистрированных на слоях БХЖ толщиной порядка 3,9–5,1 мкм в области решетки, в наших экспериментах доходила до величин 40–45 %. При понижении толщины слоев БХЖ до величины порядка 1,3 мкм экспериментально зарегистрированы максимальные значения ДЭ до 49–55 % (см. рисунок 4). Высокие значения ДЭ для



а) с облучением УФ (1) и без облучения (2)

б) без иммерсии (1) и с иммерсией (2)

Рис. 3. Зависимость ДЭ η_1 решеток при оптимальном угле падения луча лазера на образец со стороны желатинового слоя от времени экспонирования голограмм He-Cd лазером $t_{\text{He-Cd}}$.

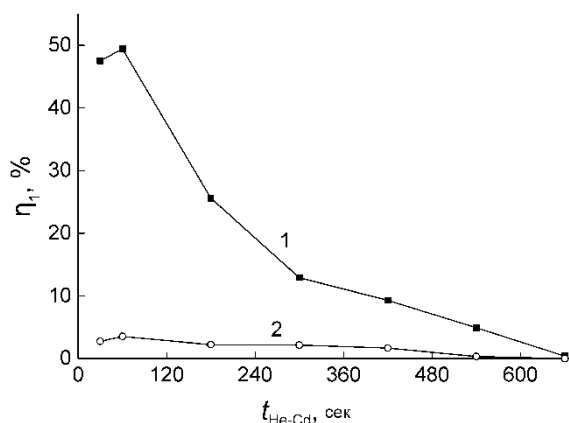


Рис. 4. Зависимость ДЭ η_1 решеток при оптимальном угле падения луча лазера на образец толщиной $T = 1,3$ μm в области решетки со стороны желатинового слоя от времени экспонирования голограмм He-Cd лазером: без использования иммерсии (1) и с использованием иммерсии (2)

решеток, полученных на сверхтонких слоях БХЖ, являются дополнительным аргументом в пользу существования эффективной рельефной поверхностной структуры.

Также была измерена величина ДЭ в зависимости от угла падения считывающего луча He-Ne лазера. Угловые зависимости ДЭ решеток на слоях разной толщины приведены на рисунке 5а и 5б. Значение $\delta\theta$, равное 0, на обоих графиках соответствует точному условию Брэгга. Видно, что максимумы экспериментальных зависимостей (кривые 1) соответствует условию дифракции Вульфа-Брэгга. На рисунке 5 также приведены результаты теоретической оценки угловой зависимости ДЭ (кривые 2) для объемной решетки указанных толщин согласно Когельнику [17]. Из сравнения кривых 1 на рисунках 5а и 5б следует, что ширина угловой зависимости ДЭ слабо зависит от толщины слоя БХЖ в отличие от теоретических кривых 2 для объемных решеток. Это также говорит о наличии рельефной структуры на поверхности слоя БХЖ.

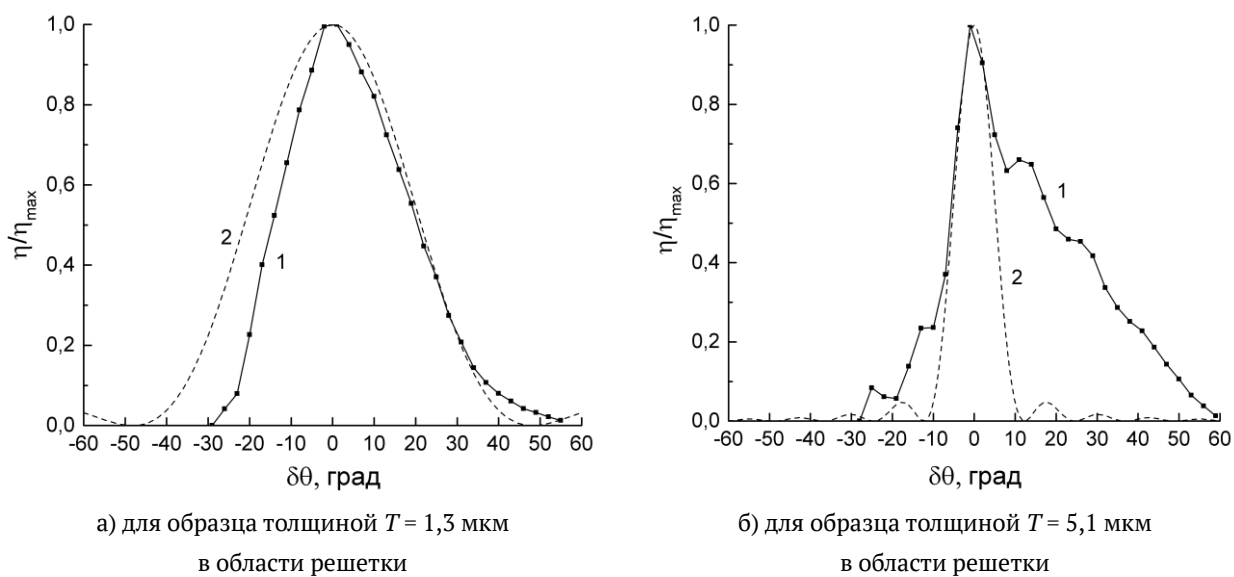


Рис. 5. Угловые зависимости нормированной ДЭ

Заключение

В работе показана эффективность усовершенствованной методики изготовления голографических структур на слоях БХЖ, подвергнутых деструктивному воздействию коротковолнового УФ излучения, суть которой заключается в существенном сокращении времени процедуры водной обработки. Это позволило впервые получить на БХЖ рельефные голографические решетки с высокой пространственной частоте $\nu = 1500 \text{ мм}^{-1}$ и максимальной ДЭ порядка 55 %, превышающей значения дифракционной эффективности для полученных ранее низкочастотных голографических решеток [4, 5].

В заключение отметим, что результаты работы будут способствовать расширению сферы применения рельефных голографических решеток, регистрируемых на таком широко распространенном и обладающем высокими оптическими параметрами светочувствительном материале для голографии как БХЖ.

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 журн. — 2003. — Том 70. — № 2. — С. 45–49.
- [2] **Ганжерли, Н. М.** Формирование случайных и регулярных рельефно-фазовых структур на галодосеребряных фотоэмульсиях голографическими методами / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, А. С. Гурин, Д. Д. Крамущенко, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных // ЖТФ. — 2009. — Том 79. — № 7. — С. 76.
- [3] **Ганжерли, Н. М.** Изображающие свойства двумерной скрещенной голографической решетки на галодосеребряных фотоэмульсиях / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер, Д. Ф. Черных, С. А. Ялович // ЖТФ. — 2012. — Том 82. — № 9. — С. 49.
- [4] **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. — В. 19. — С. 26–30.

- [5] **Ганжерли, Н. М.** Свойства голографических структур на бихромированном желатине, подвергнутых воздействию коротковолнового УФ излучения / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Оптический журн. — 2017. — Том 84. — № 9. — С. 1–5.
- [6] **Ганжерли, Н. М.** Эффект воздействия коротковолнового УФ излучения при записи голографических структур на содержащих желатин регистрирующих средах (обзор) / Н. М. Ганжерли, С. Н. Гуляев, И. А. Маурер // Оптика и Спектроскопия. — 2018. — Том 125. — В. 7. — С. 62–70.
- [7] **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.
www.fresnel.fr/numerical-grating-book
- [8] **Bondos, N.** Diffraction gratings: from principles to applications in high-intensity lasers / N. Bondos, J. Neauport // Advances in Optics and Photonics. — 2016. — Vol. 8. — N 1. — P. 1–44.
- [9] Diffraction gratings. Mechanically ruled or holographically recorded / URL:
<https://www.zeiss.com/spectroscopy/products/gratings.html>
- [10] **Shiraishi, K.** A Polarizer Using Thin Metallic-Film Subwavelength Grating for Infrared to Terahertz Region / K. Shiraishi, S. Oyama, and Chen S. Tsai // Journal of Lightwave Technology. — 2011. — Vol. 29. — № 5. — P. 670–677.
- [11] **Zhong, Q.** Focusing-curved subwavelength grating couplers for ultra-broadband silicon photonics optical interfaces / Q. Zhong, V. Veerasubramanian, Y. Wang, W. Shi, D. Patel, S. Ghosh, A. Samani, L. Chrostowski, R. Bojko, and D. V. Plant // Optics Express. — 2014. — Vol. 22 — № 15. — P. 18224–18231.
- [12] **Harzendorf, T.** Surface relief gratings manufactured by lithographic means being a candidate for VLT MOONS instrument's main dispersers / T. Harzendorf, D. Michaelis, T. Flügel-Paul, A. Bianco, E. Oliva and U. Zeitner // Proc. of SPIE. — 2018. — Vol. 10706. — P. 1070621.
- [13] **Calixto, S.** Gelatin as a Photosensitive Material / S. Calixto, N. Ganzherli, S. Gulyaev and S. Figueroa Gerstenmaier // Molecules. — 2018. — Vol. 23. — P. 2064–2086.
- [14] **Гуляев, С. Н.** Формирование поверхностного рельефа голографических структур, полученных при воздействии коротковолнового УФ излучения на фотоэмульсию // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Основной выпуск. — 2008. — Том 3. — № 59. — С. 105–114.
- [15] **Бутусов, М. М.** Исследование параметров голографических структур-мультипликаторов / М. М. Бутусов, А. И. Иоффе // Квантовая электроника. — 1976. — Том 3. — № 5. — С. 969–974.
- [16] **Shankoff, T. A.** Phase holograms in dichromated gelatin // Appl. Opt. — 1968. — Vol. 7. — N 10. P. 2101–2105.
- [17] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // Bell System Technical Journal. — 1964. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.