

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-16-25

УДК 535.42

# Формирование и свойства объемных и рельефных голографических решеток в фотополимерных материалах

НАДЕЖДА ДМИТРИЕВНА ВОРЗОБОВА<sup>1</sup>✉, ПАВЕЛ ПАВЛОВИЧ СОКОЛОВ<sup>2</sup>

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>vorzobova@mail.ifmo.ru <https://orcid.org/0000-0003-0362-0101><sup>2</sup>sokol7858@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-5448-5435>

## Аннотация

**Предмет исследования.** Условия получения, дифракционные и селективные свойства голографических решеток различных типов в фотополимерных материалах. **Цель работы.** Исследование дифракционных и селективных свойств одномерных объемных ненаклонных и наклонных решеток, рельефных решеток, гибридных структур и двумерных решеток в различных фотополимерных материалах в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве и определение условий расширения углового диапазона, в котором достигаются высокие дифракционные свойства. **Методология.** Исследование дифракционной эффективности и угловой селективности пропускающих решеток в отличие от традиционной методики проводилось при падении излучения в широком угловом диапазоне в различных плоскостях при изменении ориентации решетки. **Основные результаты.** Определены условия получения эффективных пропускающих объемных решеток в перспективных фотополимерных материалах и их свойства. Показано, что при падении излучения в брэгговской плоскости максимальная дифракционная эффективность достигается в диапазоне углов до  $80^\circ$  при полуширине контура угловой селективности до  $120^\circ$ . Существуют направления прохождения излучения через решетку (косое прохождение), отличные от традиционного брэгговского направления, при которых возможно получить максимальную дифракционную эффективность. Максимальная дифракционная эффективность достигается при больших углах падения — около  $70^\circ$ . Определены условия формирования эффективных гибридных структур, сочетающих свойства объемной и рельефной решеток. Показано, что расширение диапазона углов падения излучения обеспечивается за счет вклада рельефной составляющей гибридной структуры. Показана возможность получения эффективных рельефных решеток в не исследованном ранее серийном фотополимерном материале. Определены условия получения эффективных двумерных решеток с перспективой плавного изменения интенсивностей в дифрагированных пучках при повороте элемента. **Практическая значимость.** Показано, что расширение углового диапазона может быть получено за счет вариации характеристик и ориентации решеток, что исключает необходимость составных элементов. Установленные свойства голографических решеток могут быть использованы для решения задач солнечной энергетики, дифракционной оптики, технологий защищенной печати.

**Ключевые слова:** объемная голографическая решетка, наклонная и ненаклонная решетки, одномерная и двумерная решетки, гибридная структура, рельефная решетка, дифракционная эффективность, угловая селективность, фотополимерный материал

**Благодарность:** работа выполнена при финансовой поддержке Университета ИТМО, грант № 621317. Авторы выражают благодарность сотрудникам Университета ИТМО Б.А. Наседкину

за предоставление лазера (375 нм) и И.Д. Скурлову за измерение оптической плотности образцов решеток.

**Ссылка для цитирования:** Ворзобова Н.Д., Соколов П.П. Формирование и свойства объемных и рельефных голографических решеток в фотополимерных материалах // Оптический журнал. 2022. Т. 90. № 3. С. 16–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-16-25>

**Коды OCIS:** 090.1970, 090.2890, 090.7330

# Formation and properties of volume and relief holographic gratings in photopolymer materials

NADEZHDA D. VORZOBOVA<sup>1</sup>✉, PAVEL P. SOKOLOV<sup>2</sup>

ITMO University, St. Petersburg, Russia

<sup>1</sup>[vorzobova@mail.ifmo.ru](mailto:vorzobova@mail.ifmo.ru) <https://orcid.org/0000-0003-0362-0101>

<sup>2</sup>[sokol7858@yandex.ru](mailto:sokol7858@yandex.ru) <https://orcid.org/0000-0001-5448-5435>

## Abstract

**Subject of study.** Formation conditions, diffraction, and selective properties of various types holographic gratings in photopolymer materials. **Aim of study.** The diffraction and selective properties investigation of one-dimensional non-slanted and slanted gratings, relief gratings, hybrid structures and two-dimensional gratings in various photopolymer materials in radiation incidence angles the wide range in three-dimensional space and determination of the conditions for expanding the angular range in which high diffraction properties are achieved. **Methodology.** The study of the transmission gratings diffraction efficiency and angular selectivity, in contrast to the traditional technique, was carried out with the incidence of radiation in a wide angular range in different planes with a change in the orientation of the grating. **Main results.** The conditions for obtaining effective transmission volume gratings in advanced photopolymer materials and their properties are determined. It is shown that when the radiation is incident in the Bragg plane, the maximum diffraction efficiency is achieved in the angles range up to 80° with the full width at half maximum of the angular selectivity contour up to 120°. There are directions of radiation passage through the grating (oblique transmission), which differ from the traditional Bragg direction, at which the maximum diffraction efficiency is achieved. The maximum diffraction efficiency is achieved at large angles of incidence, about 70°. The conditions for the formation of effective hybrid structures combining the properties of a volume and relief grating are determined. It is shown that the range of radiation incidence angles is extended due to the contribution of the relief component of the hybrid structure. The implementation possibility of effective relief gratings in a previously unexplored serial photopolymer material is leted us. The conditions for obtaining effective two-dimensional gratings with the possibility of a smooth change in the intensities in diffracted beams when the element is rotated are determined. **Practical significance.** It is shown that the angular range expansion can be achieved by varying the characteristics and orientation of the gratings, which eliminates the need for stacked elements. The holographic gratings established properties can be used to solve problems for solar energy, diffractive optics, and security printing technologies.

**Keywords:** volume holographic grating, slanted and non-slanted gratings, one-dimensional and two-dimensional gratings, hybrid structure, relief grating, diffraction efficiency, angular selectivity, photopolymer material

**Acknowledgment:** this work was supported financially by ITMO University, grant № 621317. The authors are grateful to ITMO University staff B.A. Nasedkin for providing the laser (375 nm) and I.D. Skurlov for measuring the grating samples optical density.

**For citation:** Vorzobova N.D., Sokolov P.P. Formation and properties of volume and relief holographic gratings in photopolymer materials [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 3. P. 16–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-03-16-25>

**OCIS codes:** 090.1970, 090.2890, 090.7330

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка и постоянное совершенствование голографических фотополимерных материалов [1–5] определяют новые возможности создания голографических оптических элементов с необходимыми для решения практических задач свойствами. Интерес к использованию фотополимерных материалов для получения дифракционных голографических элементов связан с простотой процесса получения голографических решеток — структуры формируются в результате экспонирования без трудоемких процессов предварительной или последующей обработки. Однако ряд материалов, обеспечивающих высокие дифракционные свойства [1–3], изготавливается в лабораторных условиях. Для расширения практических применений актуальной является ориентация на промышленно выпускаемые материалы [4, 5].

В последние годы появился ряд задач, требующих новых свойств дифракционных голографических элементов. Если в предыдущие годы интерес к голографическим решеткам был связан преимущественно с возможностью получения высоких дифракционных и селективных свойств и использованием в качестве узкополосных фильтров, то в настоящее время существуют задачи, требующие сочетания высоких дифракционных свойств с широким диапазоном углов падения излучения. К ним относятся получение элементов голографических солнечных концентраторов, элементов, используемых в технологиях защищенной печати, дифракционных расщепителей лазерных пучков.

Применительно к проблемам солнечной энергетики в публикациях, наряду с фокусирующими элементами [1, 2, 6–10], рассматриваются дифракционные дефлекторы [11–16] на основе голографических решеток, направляющих излучение из широкого диапазона углов в одно направление. Одним из актуальных требований к элементам голографических солнечных концентраторов является увеличение углового диапазона, в котором обеспечиваются высокие дифракционные свойства. Угловая селективность объемных решеток в ряде работ [7, 12, 16] определяется по традиционной схеме в одной плоскости, порождающей узкий контур, что неизбежно приводит к концепции составных голографических элементов для увеличения углового диапазона. Рассматривается также возможность использо-

вания необъемных рельефных решеток [13]. Предлагаемые подходы, основанные на угловом мультиплексировании [9], получении составных элементов [8, 10] на одном или различных участках регистрирующего материала, формировании сложенных объемных решеток [12, 14], использовании рельефных решеток [13], изменении ориентации решетки [15], обеспечивают увеличение углового диапазона до  $40\text{--}50^\circ$ , однако, требуют сложных технологических решений.

Задачей данной работы является исследование дифракционных и селективных свойств одномерных объемных ненаклонных и наклонных решеток, рельефных решеток, гибридных структур и двумерных решеток в различных фотополимерных материалах в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве с целью определения условий расширения углового диапазона, в котором достигаются высокие дифракционные свойства. В работе приводятся установленные свойства, позволяющие исключить сложные решения для расширения углового диапазона, и обсуждается возможность их использования для решения практических задач.

## 1. УСЛОВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Пропускающие голографические решетки записывались в попутных пучках непрерывным излучением с длинами волн 633, 442 и 375 нм. В качестве регистрирующих материалов использовались промышленные фотополимеры *Bayfol HX* (Covestro AG), *Nano Clear* (Fun To Do) и лабораторные акрилатные композиции (ИТМО).

Дифракционная эффективность (ДЭ) определялась как отношение интенсивностей дифрагированного и падающего пучков на длине волны излучения 650 нм. Для измерений ДЭ и угловой селективности (УС) наряду с традиционно используемой схемой, когда направление падающего излучения изменяется в плоскости падения (при записи решетки), использовалась схема, приведенная на рис. 1. Образец поворачивается на  $90^\circ$  относительно положения при записи, т.е. диэлектрические плоскости в исходном положении параллельны плоскости падения излучения, и изменяется угол поворота вокруг оси  $Z$  — угол  $\alpha$ , а также угол поворота вокруг оси  $X$  — угол  $\beta$ .

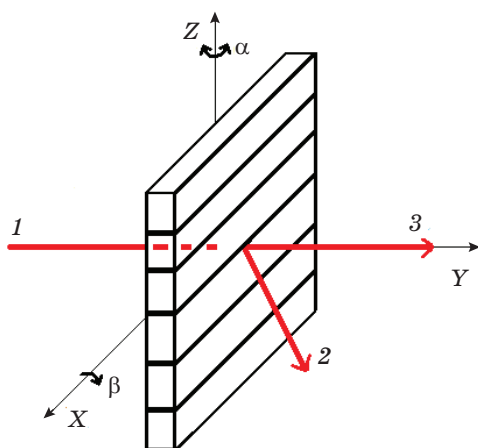
## 2. СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ РЕШЕТОК

Для получения объемных решеток использовался материал *Bayfol NX* [4]. В работах [17, 18] определены условия записи для получения наибольшей ДЭ и частично рассмотрены свойства решеток. Остановимся на свойствах объемных ненаклонных решеток, полученных при оптимальных условиях: длина волны излучения при записи 633 нм, длительность экспонирования 10 с при плотности мощности  $1,2 \times 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>, период 1,6 мкм.

Определение УС по традиционно используемой схеме, т.е. при изменении направлений падающего пучка в одной плоскости — плоскости падения (при записи решетки), дает классический узкий контур с полушириной около 8°.

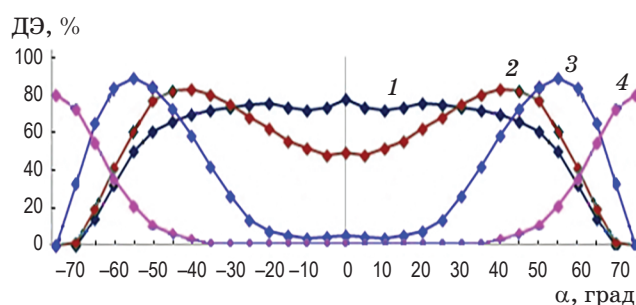
При изменении ориентации решетки и измерениях контуров УС в различных плоскостях по схеме, приведенной на рис. 1, получаем более интересные результаты, представленные на рис. 2.

Можно видеть следующие закономерности. Если угол  $\beta$  равен углу Брэгга ( $\Theta_{Br}$ ), или, другими словами, если излучение падает на решетку в брэгговской плоскости, максимальные значения ДЭ сохраняются в широком диапазоне углов  $\alpha$  — около 80°. Контур УС широкий — с шириной на уровне половины максимума ДЭ около 120°. При падении из-



**Рис. 1.** Схема измерений дифракционной эффективности. Падающий пучок — 1, дифрагированный пучок — 2, прошедший пучок — 3

**Fig. 1.** Scheme the diffraction efficiency measuring. (1) Incident beam, (2) diffracted beam, (3) transmitted beam



**Рис. 2.** Контур угловой селективности объемной решетки.  $\beta = \Theta_{Br} = 12^\circ$ ;  $\Delta\beta = 0^\circ$  — 1,  $\Delta\beta = 5^\circ$  — 2,  $\Delta\beta = 13^\circ$  — 3,  $\Delta\beta = 30^\circ$  — 4

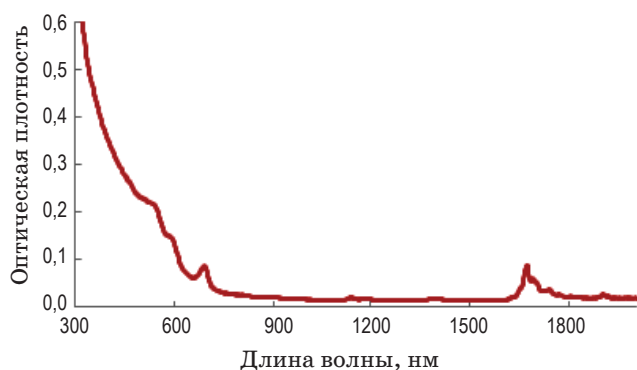
**Fig. 2.** Angular selectivity contours of a volume grating.  $\beta = \Theta_{Br} = 12^\circ$ ; (1)  $\Delta\beta = 0^\circ$ , (2)  $\Delta\beta = 5^\circ$ , (3)  $\Delta\beta = 13^\circ$ , (4)  $\Delta\beta = 30^\circ$

лучения в плоскостях, составляющих угол  $\Delta\beta$  с брэгговской плоскостью, максимальные значения ДЭ сдвигаются в сторону больших углов  $\alpha$  при увеличении  $\Delta\beta$ . Это означает, что в решетке существуют направления прохождения излучения (косое прохождение), отличные от традиционного брэгговского направления, при которых достигается максимальная ДЭ. При этом контуры УС остаются достаточно широкими. Важно отметить возможность получения максимальной ДЭ при больших углах падения — более 70°.

Существенного влияния поляризации излучения на дифракционные свойства полученных структур не выявлено. При изменении поляризации падающего излучения с вертикальной, использованной при проведении измерений, на горизонтальную изменения ДЭ не превышают погрешности измерений (10%). Необходимо также отметить малое поглощение полученных решеток в видимой и инфракрасной областях спектра (рис. 3). Спектр получен с использованием спектрофотометра *UV-3600i Plus (Shimadzu)*. Высокая прозрачность решеток позволяет предположить возможность достижения высоких дифракционных свойств в широком спектральном диапазоне.

Наряду с ненаклонными объемными решетками были исследованы наклонные объемные решетки с углами наклона от 5 до 20°. Закономерности изменения ДЭ при изменении углов  $\alpha$  и  $\beta$  аналогичны закономерностям, полученным для ненаклонных решеток. При падении излучения в брэгговских плоскостях,





**Рис. 3.** Спектр поглощения объемной решетки, записанной в фотополимере *Bayfol HX*

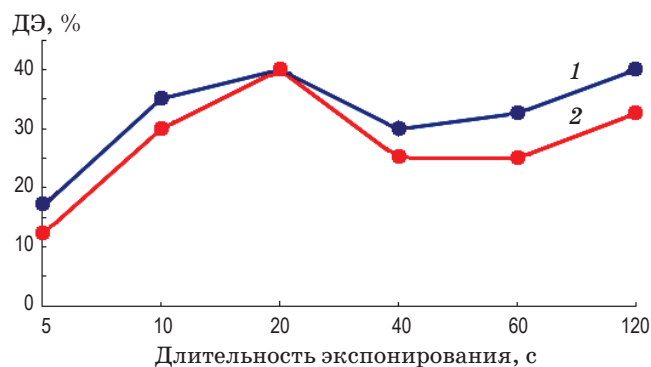
**Fig. 3.** Absorption spectrum of a volume grating recorded in Bayfol HX photopolymer

т.е. при  $\beta = \Theta_{Br}$ , профили УС широкие, а при увеличении  $\Delta\beta$  максимумы ДЭ сдвигаются в сторону больших значений углов  $\alpha$ . Однако брэгговские плоскости расположены несимметрично относительно нормали к поверхности решетки и могут располагаться по одну сторону от нормали (в случае угла наклона  $20^\circ$ ). Кроме того, ширина на уровне половины максимума ДЭ несколько меньше (до  $100^\circ$ ), чем у ненаклонных решеток, а также отличается (на единицы градусов) в случае положительных и отрицательных значений угла  $\alpha$ .

Таким образом, показана возможность существенного увеличения углового диапазона, в котором достигаются высокие дифракционные свойства, при изменении ориентации решетки, традиционно используемой для определения контура УС.

### 3. РЕЛЬЕФНЫЕ РЕШЕТКИ В МАТЕРИАЛЕ NANO CLEAR

В данной работе исследована возможность использования нового прозрачного фотополимера *Nano Clear* для голографической записи. Для записи пропускающих решеток использовалось излучение с длиной волны 375 нм. Так как материал не исследовался ранее, предварительно были определены зависимости ДЭ от длительности экспонирования (в диапазоне от 5 с до 3 мин), плотности мощности ( $3 \times 10^{-3}$ – $1,2 \times 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>), периода решетки (1–3,5 мкм), толщины слоя (50–150 мкм), постэкспозиционной обработки в различных растворителях (изопропанол, этанол) и от после-



**Рис. 4.** Зависимости дифракционной эффективности рельефных решеток, записанных в материале *Nano Clear*, от длительности экспонирования. Постэкспозиционная засветка — 1, обработка в этаноле — 2

**Fig. 4.** The diffraction efficiency dependences of relief gratings recorded in the Nano Clear material on exposure duration. (1) Post-exposure illumination, (2) processing in ethanol

дующей засветки ультрафиолетовым (УФ) излучением.

Эффективных решеток в объеме материала записать не удалось, однако были получены рельефные решетки с достаточно хорошими дифракционными свойствами (рис. 4). Рельефные решетки формируются в результате снятия покрывающей пленки после экспонирования. Приведенные результаты получены при оптимальных условиях: плотность мощности  $6 \times 10^{-3}$  Вт/см<sup>2</sup>, период структур 3,2 мкм, толщина слоя 100 мкм, постэкспозиционная засветка рассеянным УФ излучением или промывка в этаноле.

Полученные дифракционные свойства достигаются в широком диапазоне углов падения — до  $100^\circ$ . Следует также отметить, что после обработки в этаноле решетка остается на пленочной подложке, однако легко отделяется от нее и может наноситься на другие поверхности, в том числе произвольной формы.

Таким образом, исследованный материал может быть использован для голографической записи рельефных решеток с низкой УС.

### 4. ГИБРИДНЫЕ РЕШЕТКИ

Гибридные решетки — это объемные решетки (получающиеся в результате фотоиницированного изменения показателя преломления

в объеме материала), на поверхности которых формируются рельефные решетки. Для получения гибридных структур использовалась жидкая мономерная акрилатная композиция [19]. Условия получения эффективных гибридных структур приведены в работе [20]. Решетки, сочетающие высокие дифракционные свойства объемной и рельефной компонент, формируются на начальном этапе записи в узком диапазоне экспозиций после снятия покрывающей пленки.

Механизм формирования поверхностного рельефа в интерференционном поле обычно связывается с известными процессами диффузионного массопереноса и усадки при записи. Однако возникновение поверхностного рельефа после снятия покрывающей пленки не вполне понятно. Можно предположить, что восстановление распределения материала, являющегося результатом этих процессов, после снятия покрытия, сдавливающего структуру, определяется проявлением сил упругости материала решетки.

В гибридных решетках наблюдается сочетание свойств объемной и рельефной компонент. На рис. 5 приведены зависимости ДЭ от углов падения излучения на структуры, полученные при оптимальных условиях: длина волны записи 442 нм, период решетки 3 мкм, длительность экспонирования 40 с при плотности мощности  $3 \times 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup>.

Как и в случае объемных решеток, при падении излучения в брэгговской плоскости максимальная ДЭ сохраняется в широком диапазоне углов  $\alpha$ . При отклонении от брэггов-

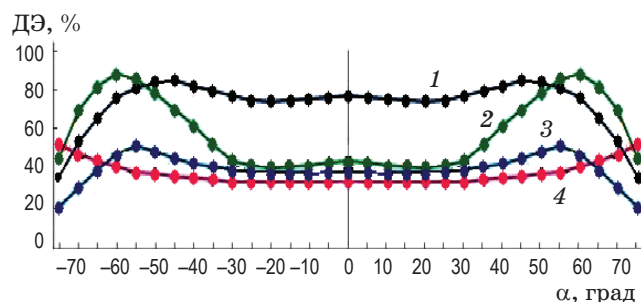
ской плоскости, т.е. увеличении  $\Delta\beta$ , сначала ( $\Delta\beta$  до  $6^\circ$ ) проявляются свойства объемной составляющей гибридной структуры, при дальнейшем увеличении  $\Delta\beta$  (до  $60^\circ$ ) проявляются свойства рельефной компоненты.

Таким образом, расширение диапазона углов падения излучения возможно за счет вклада рельефной составляющей гибридной структуры.

## 5. ДВУМЕРНЫЕ РЕШЕТКИ

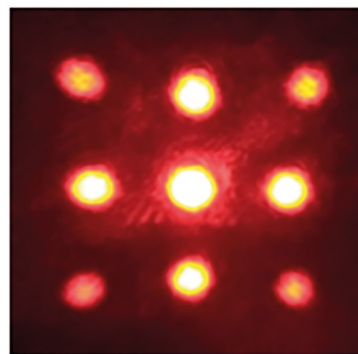
Рассматривались два способа получения двумерных решеток с использованием фотополимерного материала *Bayfol NX*. Первый способ основан на последовательной записи в этом материале одномерных пропускающих решеток с поворотом на  $90^\circ$  при второй экспозиции. Однако при реализации данного способа выявилась высокая критичность ДЭ и светорассеяния к составляющим экспозициям.

Лучшие результаты получены при реализации второго способа, основанного на интерференционном копировании шаблона, записанного в высокоразрешающем галогенидосеребряном материале. Для получения шаблона использовался материал ПФГ-03М (АО «Компания «Славич»). Последовательная запись одномерных решеток проводилась на длине волны 442 нм при плотности энергии  $2,7 \times 10^{-3}$  Дж/см<sup>2</sup>, для обработки использовался проявляющий состав CW C2 и отбеливающий состав RBU [21]. Приведенные условия позволили получить ДЭ около 80% для одномерных решеток. На рис. 6 приведена картина дифракции на двумерной решетке в материале



**Рис. 5.** Контуры угловой селективности гибридной решетки.  $\beta = \Theta_{Br} = 6^\circ$ ;  $\Delta\beta = 0^\circ$  — 1,  $\Delta\beta = 4^\circ$  — 2,  $\Delta\beta = 20^\circ$  — 3,  $\Delta\beta = 60^\circ$  — 4

**Fig. 5.** The hybrid grating angular selectivity contours.  $\beta = \Theta_{Br} = 6^\circ$ ; (1)  $\Delta\beta = 0^\circ$ , (2)  $\Delta\beta = 4^\circ$ , (3)  $\Delta\beta = 20^\circ$ , (4)  $\Delta\beta = 60^\circ$



**Рис. 6.** Картина дифракции на двумерной решетке в материале ПФГ-03М

**Fig. 6.** Diffraction pattern on a two-dimensional grating in the PFG-03M material

ПФГ-03М. Результаты представляют самостоятельный интерес, однако для получения решетки требуется процедура постэкспозиционной химической обработки.

На рис. 7а приведен вид картины дифракции на двумерной решетке, полученной в материале *Bayfol HX* методом интерференционного копирования шаблона (отношение интенсивностей  $I_{+1}/I_0 = 1:1,5$ ). Условия записи: длина волны записывающего излучения 633 нм, плотность энергии  $6 \times 10^{-2}$  Дж/см<sup>2</sup>, период структуры 1,6 мкм. На рис. 7б, в демонстрируется изменение картины дифракции при повороте решетки вокруг вертикальной оси. На рис. 7г приведена зависимость ДЭ в +1 и –1 порядках дифракции (кривые 1 и 2 соответственно) от угла поворота решетки.

Аналогичные результаты получены при повороте решетки вокруг горизонтальной оси. Поворот вокруг обеих осей обеспечивает более плавное изменение интенсивностей за счет

свойств составляющих объемных решеток, рассмотренных в разделе 2.

Таким образом, определены условия получения эффективных двумерных решеток с широким профилем УС и возможностью плавного изменения интенсивностей в дифрагированных пучках при повороте элемента.

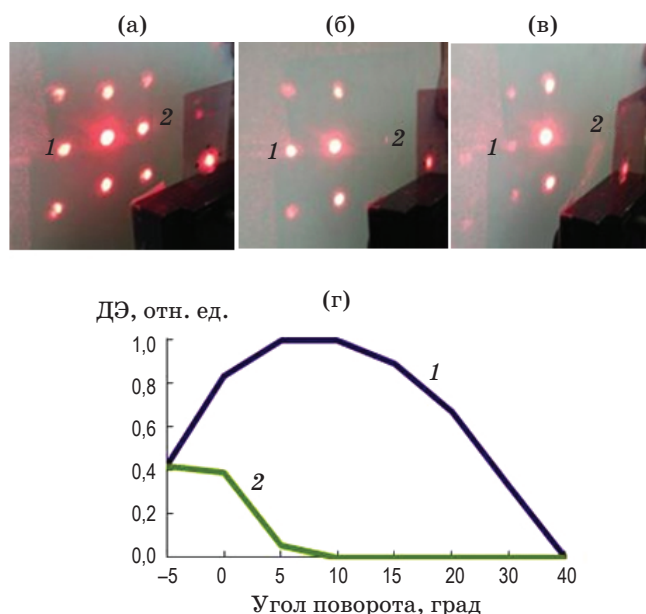
## 6. ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Установленные дифракционные и селективные свойства объемных и гибридных решеток определяют возможность существенного расширения диапазона углов падения излучения, в котором достигается высокая ДЭ, что представляет интерес для решения задач солнечной энергетики. Увеличение углового диапазона по сравнению с существующими решениями [12–16] достигается за счет свойств решеток, что исключает необходимость составных конструкций.

Применительно к проблемам солнечной энергетики установленные свойства могут использоваться для получения дифракционных дефлекторов, как компонент голографических солнечных концентраторов, перенаправляющих излучение в широком диапазоне углов в одно направление и исключающих необходимость отслеживания траектории движения Солнца.

2. Применительно к технологиям защищенной печати актуальными представляются результаты, показавшие возможность использования коммерчески доступного материала (*Nano Clear*) для голографической записи. Рельефные решетки в данном материале, а также гибридные решетки, проявляющие достаточно высокие дифракционные свойства в широком угловом диапазоне, могут использоваться для получения защитных элементов на основе пропускающих решеток в технологиях защищенной печати, в том числе базирующихся на визуальном контроле, требующем наблюдения изображений в широком диапазоне углов.

3. Двумерные решетки могут представлять интерес для получения управляемых многоканальных расщепителей лазерных пучков. Полученные дифракционные и селективные свойства позволяют управлять интенсивностью излучения в каналах при повороте элемента



**Рис. 7.** Картина дифракции на двумерной решетке, записанной в фотополимере *Bayfol HX* (а). Изменения картины дифракции при повороте решетки (б, в). Зависимости дифракционной эффективности в +1 (1) и –1 (2) порядках дифракции от угла поворота вокруг вертикальной оси (г)

**Fig. 7.** (a) Diffraction pattern on a two-dimensional grating recorded in *Bayfol HX* photopolymer. (б, в) Changes in the diffraction pattern when the grating is rotated. (г) Dependences of the diffraction efficiency in (1) +1 and (2) –1 diffraction orders on the angle of rotation around the vertical axis

без предъявления высоких требований к его позиционированию. Элементы имеют преимущества перед традиционными оптическими элементами (светоделительные зеркала, кубики) за счет увеличения числа рабочих каналов, уменьшения энергетических потерь в оптических схемах, а также простоты процесса получения. Кроме того, двумерные решетки могут использоваться в качестве элементов солнечных концентраторов (вместе с фокусирующими элементами). При изменении направления падения излучения в широком угловом диапазоне все дифрагированные пучки при их зонтичной геометрии будут фокусироваться на меньшей площади фотоячейки по сравнению с использованием только фокусирующего элемента.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлены и обобщены дифракционные и селективные свойства объемных, рельефных и гибридных решеток, а также двумерных структур в фотополимерных материалах в широком диапазоне углов падения излучения в трехмерном пространстве.

Показано, что увеличение диапазона углов падения излучения, соответствующего высокой ДЭ, обеспечивается установленными свойствами структур и их ориентацией, что исключает необходимость сложных техноло-

гических решений. При ширине контура УС на уровне половины максимума ДЭ до  $120^\circ$  и падении излучения в брэгговской плоскости максимальная ДЭ объемных решеток сохраняется в диапазоне углов до  $80^\circ$ . В решетке существуют направления прохождения излучения (косое прохождение), отличные от традиционного брэгговского направления, при которых ДЭ доходит до максимальных значений. Максимальная ДЭ получена при углах падения до  $70^\circ$ .

Определены условия получения эффективных гибридных структур, сочетающих свойства объемной и рельефной решеток. Показано, что расширение диапазона углов падения излучения, соответствующего высокой ДЭ, происходит за счет вклада рельефной составляющей гибридной структуры.

Показана возможность использования нового фотополимерного материала *Nano Clear* для голографической записи и получения эффективных рельефных решеток.

Определены условия получения эффективных двумерных решеток с возможностью плавного изменения интенсивностей в дифрагированных пучках при повороте элемента.

Установленные свойства структур определяют возможность их применения для решения задач солнечной энергетики, дифракционной оптики, технологий защищенной печати.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Rogers B., Mikulchyk T., Oubaha M., Cody D., Martin S., Naydenova I. Improving the holographic recording characteristics of a water-resistant photosensitive Sol-Gel for use in volume holographic optical elements // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 636. <https://doi.org/10.3390/photonics9090636>
2. Ferrara M.A., Borbone F., Coppola G. Holographic optical lenses recorded on a glassy matrix-based photopolymer for solar concentrators // *Photonics*. 2021. V. 8. P. 585. <https://doi.org/10.3390/photonics8120585>
3. Neipp C., Francés J., Martínez F.J., Fernández R., Alvarez M.L., Bleda S., Ortuño M., Gallego S. Optimization of photopolymer materials for the fabrication of a holographic waveguide // *Polymers*. 2017. V. 9. P. 395. <https://doi.org/10.3390/polym9090395>
4. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol®HX film holographic polymers // *Polymers*. 2017. V. 9. P. 472. <https://doi.org/10.3390/polym9100472>

## REFERENCES

1. Rogers B., Mikulchyk T., Oubaha M., Cody D., Martin S., Naydenova I. Improving the holographic recording characteristics of a water-resistant photosensitive Sol-Gel for use in volume holographic optical elements // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 636. <https://doi.org/10.3390/photonics9090636>
2. Ferrara M.A., Borbone F., Coppola G. Holographic optical lenses recorded on a glassy matrix-based photopolymer for solar concentrators // *Photonics*. 2021. V. 8. P. 585. <https://doi.org/10.3390/photonics8120585>
3. Neipp C., Francés J., Martínez F.J., Fernández R., Alvarez M.L., Bleda S., Ortuño M., Gallego S. Optimization of photopolymer materials for the fabrication of a holographic waveguide // *Polymers*. 2017. V. 9. P. 395. <https://doi.org/10.3390/polym9090395>
4. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol®HX film holographic polymers // *Polymers*. 2017. V. 9. P. 472. <https://doi.org/10.3390/polym9100472>



5. Hui-Ying W., Chang-Won S., Ki-Chul K., Kwon-Yeon L., Nam K. Time-scheduled exposure method for full-color high diffraction efficiency and uniformity of a photopolymer // *Optics and Laser Technol.* 2022. V. 156. P. 108555. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108555>
6. Ferrara M., Striano V., Coppola G. Volume holographic optical elements as solar concentrators: An overview // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. P. 193. <https://doi.org/10.3390/app9010193>
7. Akbari H., Naydenova I., Ahmed H., McCormack S., Martin S. Development and testing of low spatial frequency holographic concentrator elements for collection of solar energy // *Solar Energy.* 2017. V. 155. P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.067>
8. Marin-Saez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.V. Full modeling and experimental validation of cylindrical holographic lenses recorded in Bayfol HX photopolymer and partly operating in the transition regime for solar concentration // *Opt. Exp.* 2018. V. 26. P. 398–412. <https://doi.org/10.1364/oe.26.00a398>
9. Lee J.-H., Wu H.-Y., Piao M.-L., Kim N. Holographic solar energy concentrator using angular multiplexed and iterative recording method // *IEEE Photonics J.* 2016. V. 8. P. 8400511. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2634699>
10. Keshri S., Rogers B., Murphy K., Reynolds K., Naydenova I., Martin S. Development and testing of a dual-wavelength sensitive photopolymer layer for applications in stacking of HOE lenses // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 5564. <http://doi.org/10.3390/app11125564>
11. Castro J.M., Zhang D., Myer B., Kostuk R.K. Energy collection efficiency of holographic planar solar concentrators // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. P. 858–870. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000858>
12. Akbari H., Naydenova I., Martin S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. P. 1343–1363. <https://doi.org/10.1364/AO.53.001343>
13. de Jong T., de Boer D., Bastiaansen C. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. P. 15127–15143. <https://doi.org/10.1364/OE.19.015127>
14. Xiang X., Kim J., Escuti M.J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 7202. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25535-0>
15. Marin-Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.-V. Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications // *Opt. Exp.* 2016. V. 24. P. 720–730. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A720>
5. Hui-Ying W., Chang-Won S., Ki-Chul K., Kwon-Yeon L., Nam K. Time-scheduled exposure method for full-color high diffraction efficiency and uniformity of a photopolymer // *Optics and Laser Technol.* 2022. V. 156. P. 108555. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108555>
6. Ferrara M., Striano V., Coppola G. Volume holographic optical elements as solar concentrators: An overview // *Appl. Sci.* 2019. V. 9. P. 193. <https://doi.org/10.3390/app9010193>
7. Akbari H., Naydenova I., Ahmed H., McCormack S., Martin S. Development and testing of low spatial frequency holographic concentrator elements for collection of solar energy // *Solar Energy.* 2017. V. 155. P. 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.04.067>
8. Marin-Saez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.V. Full modeling and experimental validation of cylindrical holographic lenses recorded in Bayfol HX photopolymer and partly operating in the transition regime for solar concentration // *Opt. Exp.* 2018. V. 26. P. 398–412. <https://doi.org/10.1364/oe.26.00a398>
9. Lee J.-H., Wu H.-Y., Piao M.-L., Kim N. Holographic solar energy concentrator using angular multiplexed and iterative recording method // *IEEE Photonics J.* 2016. V. 8. P. 8400511. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2016.2634699>
10. Keshri S., Rogers B., Murphy K., Reynolds K., Naydenova I., Martin S. Development and testing of a dual-wavelength sensitive photopolymer layer for applications in stacking of HOE lenses // *Appl. Sci.* 2021. V. 11. P. 5564. <http://doi.org/10.3390/app11125564>
11. Castro J.M., Zhang D., Myer B., Kostuk R.K. Energy collection efficiency of holographic planar solar concentrators // *Appl. Opt.* 2010. V. 49. P. 858–870. <https://doi.org/10.1364/AO.49.000858>
12. Akbari H., Naydenova I., Martin S. Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Appl. Opt.* 2014. V. 53. P. 1343–1363. <https://doi.org/10.1364/AO.53.001343>
13. de Jong T., de Boer D., Bastiaansen C. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators // *Opt. Exp.* 2011. V. 19. P. 15127–15143. <https://doi.org/10.1364/OE.19.015127>
14. Xiang X., Kim J., Escuti M.J. Bragg polarization gratings for wide angular bandwidth and high efficiency at steep deflection angles // *Sci. Rep.* 2018. V. 8. P. 7202. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25535-0>
15. Marin-Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.-V. Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications // *Opt. Exp.* 2016. V. 24. P. 720–730. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A720>

16. Keshri S., Marín-Sáez J., Naydenova I., Murphy K., Atencia J., Chemisana D., Garner S., Collados M.V., Martin S. Stacked volume holographic gratings for extending the operational wavelength range in LED and solar applications // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. P. 2569–2579. <https://doi.org/10.1364/AO.383577>
17. Vorzobova N., Sokolov P. Application of photopolymer materials in holographic technologies // *Polymers*. 2019. V. 11. P. 2020. <https://doi.org/10.3390/polym11122020>
18. Vorzobova N., Sokolov P. Properties of holographic elements based on periodic structures in a wide range of angles of incidence // *Photonics*. 2021. V. 8. P. 562. <https://doi.org/10.3390/photonics8120562>
19. Бурункова Ю.Э., Семина С.А., Капорский Л.Н., Левичев В.В. Наномодифицированные оптические акрилатные композиты // *Оптический журнал*. 2008. Т. 75. № 10.
20. Vorzobova N.D., Sokolov P.P., Veselov V.V., Schelkanova I.J. Holographic formation and diffractive properties of hybrid periodic structures // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. P. 3323–3328. <https://doi.org/10.1364/AO.57.003323>
21. Bjelkhagen H.I. Silver-halide recording materials for holography and their processing. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1995. 461 p.
16. Keshri S., Marín-Sáez J., Naydenova I., Murphy K., Atencia J., Chemisana D., Garner S., Collados M.V., Martin S. Stacked volume holographic gratings for extending the operational wavelength range in LED and solar applications // *Appl. Opt.* 2020. V. 59. P. 2569–2579. <https://doi.org/10.1364/AO.383577>
17. Vorzobova N., Sokolov P. Application of photopolymer materials in holographic technologies // *Polymers*. 2019. V. 11. P. 2020. <https://doi.org/10.3390/polym11122020>
18. Vorzobova N., Sokolov P. Properties of holographic elements based on periodic structures in a wide range of angles of incidence // *Photonics*. 2021. V. 8. P. 562. <https://doi.org/10.3390/photonics8120562>
19. Burunkova Yu.E., Semina S.A., Kaporski L.N., Levichev V.V. Nanomodified optical acrylate composites // *J. Opt. Technol.* 2008. V. 75. P. 653–657. <https://doi.org/10.1364/JOT.75.000653>
20. Vorzobova N.D., Sokolov P.P., Veselov V.V., Schelkanova I.J. Holographic formation and diffractive properties of hybrid periodic structures // *Appl. Opt.* 2018. V. 57. P. 3323–3328. <https://doi.org/10.1364/AO.57.003323>
21. Bjelkhagen H.I. Silver-halide recording materials for holography and their processing. Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 1995. 461 p.

## АВТОРЫ

**Ворзобова Надежда Дмитриевна** — кандидат технических наук, доцент, старший преподаватель, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 6603382623; <https://orcid.org/0000-0003-0362-0101>; vorzobova@mail.ifmo.ru

**Соколов Павел Павлович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 57201696982; <https://orcid.org/0000-0001-5448-5435>; sokol7858@yandex.ru

## AUTHORS

**Nadezhda D. Vorzobova** — PhD, Associate Professor, Senior Lecturer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 6603382623; <https://orcid.org/0000-0003-0362-0101>; vorzobova@mail.ifmo.ru

**Pavel P. Sokolov** — PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57201696982; <https://orcid.org/0000-0001-5448-5435>; sokol7858@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 02.11.2022  
Одобрена после рецензирования 18.12.2022  
Принята к печати 26.01.2023

The article was submitted to the editorial office 02.11.2022  
Approved after review 18.12.2022  
Accepted for publication 26.01.2023