

ИЗБРАННЫЕ МАТЕРИАЛЫ XXXII ШКОЛЫ ПО ГОЛОГРАФИИ. ЧАСТЬ III PROCEEDINGS OF THE XXXII SCHOOL ON HOLOGRAPHY. PART III

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-1-13

УДК 535.421, 535.15

Характеризация голографического фотополимера Bayfol HX в инфракрасной области спектра

Владимир Николаевич Борисов¹, Андрей Дмитриевич Зверев²,
Владимир Александрович Камынин³, Мария Сергеевна Копьева⁴,
Роман Александрович Окунь⁵, Владимир Борисович Цветков⁶

¹ Независимый исследователь, Санкт-Петербург, Российская Федерация

^{2,3,4,5,6} Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация

⁴ Российский университет дружбы народов, Москва, 117198, Российская Федерация

¹ pvlc2013@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3525-5698>

² izverevad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3383-906X>

³ kamyninva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>

⁴ mashutka_kopyova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2113-6607>

⁵ romaokun@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2461-9978>

⁶ tsvetkov@lsk.gpi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1483-3308>

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрена возможность создания дифракционных элементов на основе голографического фотополимера Bayfol HX, работающих в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Исследованы динамический диапазон показателя преломления фотополимера и амплитудно-фазовые характеристики голограмм в инфракрасном диапазоне. Изучено влияние параметров записи (плотности мощности записывающего излучения, времени записи) на распределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками решетки. **Метод.** Анализ амплитудно-фазового характера голограмм выполнен с помощью измерения спектров пропускания исследуемого фотополимера после реакции фотополимеризации. Проведена оценка динамического диапазона показателя преломления фотополимера в спектральном диапазоне от 405 до 2099 нм. Предварительно осуществлены измерение и анализ контуров угловой селективности голограмм с периодами от 414 до 2100 нм, оптимизированных под разные части исследуемого спектрального диапазона. Выполнен анализ влияния параметров записи на распределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками решетки. Произведен расчет амплитуд первой и второй гармоник модуляции показателя преломления из экспериментально измеренных контуров угловой селективности голограмм, сформированных при разных длительностях записи при постоянной дозе облучения. **Основные результаты.** Показано, что динамические диапазоны показателя преломления фотополимера в ближнем инфракрасном диапазоне и в длинноволновой части видимого диапазона отличаются на величину, не превышающую точности измерений. Продemonстрировано ярко выраженное нарушение закона взаимозаменяемости при масштабировании интерференционной картины и/или изменении плотности мощности записывающего излучения. **Практическая значимость.** Найдены оптимальные условия записи голограмм в исследуемом фотополимере для их применения в инфракрасном диапазоне спектра. Исследованный голографический материал может найти применение в телекоммуникационной оптике.

Ключевые слова

голография, Bayfol, фотополимер, инфракрасное излучение, дифракционная оптика

Благодарности

Работа выполнена на базе Научного центра мирового уровня «Фотоника» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (грант № 075-15-2020-912). Авторы благодарят доктора Фридриха-Карла Брудера за предоставление голографической среды Bayfol HX, а также Василия Валерьевича Лесниченко за консультации по вопросам анализа экспериментальных результатов.

Ссылка для цитирования: Борисов В.Н., Зверев А.Д., Камынин В.А., Копьева М.С., Окунь Р.А., Цветков В.Б. Характеризация голографического фотополимера Bayfol HX в инфракрасной области спектра // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 1. С. 1–13. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-1-13

Characterization of the holographic photopolymer Bayfol HX in the IR region

Vladimir N. Borisov¹, Andrey D. Zverev², Vladimir A. Kamynin³, Maria S. Kopyeva⁴,
Roman A. Okun⁵✉, Vladimir B. Tsvetkov⁶

¹ Independent Researcher, Saint Petersburg, Russian Federation

^{2,3,4,5,6} Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation

⁴ RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation

¹ pvlc2013@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-3525-5698>

² izverevad@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-3383-906X>

³ kamyninva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>

⁴ mashutka_kopyeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2113-6607>

⁵ romaokun@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2461-9978>

⁶ tsvetkov@lsk.gpi.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1483-3308>

Abstract

The possibility of creating holographic optical elements operating in the near infrared spectral range based on the Bayfol HX holographic photopolymer has been considered. The dynamic range of the refractive index of the photopolymer and the amplitude-phase nature of the holograms in the infrared range have been studied. The influence of recording parameters (power density of recording radiation, recording time) on the distribution of the dynamic range of the refractive index between grating harmonics has been studied. The analysis of the amplitude-phase nature of holograms was carried out by measuring the transmission spectra of the studied photopolymer after the photopolymerization reaction. The dynamic range of the refractive index of a photopolymer evaluated in the spectral range from 405 nm to 2099 nm. For this purpose, the angular selectivity contours of holograms with periods from 414 nm to 2100 nm, optimized for different parts of the specified spectral range, were measured and analyzed. The influence of recording parameters on the distribution of the dynamic range of the refractive index between the grating harmonics was analyzed by calculating the amplitudes of the first and second harmonics of the refractive index modulation from the experimentally measured angular selectivity contours of holograms recorded with different recording time at a constant irradiation dose. It was shown that the dynamic range of the refractive index of the photopolymer in the near infrared spectral range, as compared with the long-wavelength part of the visible region of the spectrum, differs by a value that does not exceed the measurement accuracy. A pronounced violation of the reciprocity was demonstrated with scaling of the interference pattern or with changing of the power density of the recording radiation. The optimal recording conditions for holograms calculated for the infrared spectral range for the studied photopolymer were found. The possibility of using of the studied holographic material in telecommunication optics has been demonstrated.

Keywords

holography, Bayfol, photopolymer, IR radiation, diffractive optics

Acknowledgements

This research was funded with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant number 075-15-2020-912, and carried out on the basis of the World-Class Research Center “Photonics”. The authors thank Dr. Friedrich-Karl Bruder for providing the Bayfol HX holographic medium, and Lesnichii Vasilii Valerievich for consultations on the analysis of experimental results.

For citation: Borisov V.N., Zverev A.D., Kamynin V.A., Kopyeva M.S., Okun R.A., Tsvetkov V.B. Characterization of the holographic photopolymer Bayfol HX in the IR region. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 1, pp. 1–13 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-1-1-13

Введение

В настоящее время голографические оптические элементы активно применяются для управления излучением в широком спектральном диапазоне: от ближнего ультрафиолетового [1] до среднего инфракрасного (ИК) [2]. При решении различных задач возникает потребность как в высокоселективных брэгговских зеркалах, так и в низкоселективных спектральных фильтрах и диспергирующих элементах. На сегодняшний день наиболее распространенный и коммерчески успешный голографический фотополимер, позволяющий получать низкоселективные голографические структуры — Bayfol HX [3]. Данный материал используется

для решения максимально широкого круга задач [4–12]. Голографическая запись в фотополимере происходит при использовании видимого излучения, тем самым в большинстве случаев ограничивая спектральную область применения. В работе [13] предложена модификация материала, позволяющая производить голографическую запись в ближнем ИК диапазоне, что может расширить область применения фотополимера. Но на данный момент характеристики оригинального Bayfol HX 200 в ближнем ИК диапазоне (длина волны 1–2,1 мкм) не исследованы.

В настоящей работе исследованы спектральные характеристики пропускания фотополимера Bayfol HX 200 в ближней ИК области спектра. Сделан вывод

об амплитудно-фазовом характере голограмм в этой области спектра. В фотополимере записаны несколько серий голограмм. Параметры голограмм лежат в диапазонах: периоды голограмм — от 414 до 2100 нм, плотность мощности записывающего излучения — от 10 до 500 мВт/см², время записи — от 32 до 1000 с. Голограммы записаны в видимом диапазоне излучения. Выполнен анализ модуляции показателя преломления в диапазоне длин волн от 405 до 2100 нм. Рассмотрено влияние условий записи (период интерференционной картины, плотность мощности записывающего излучения) на распределение динамического диапазона (Δn) фотополимера между гармониками голографической решетки. Исследовано нарушение закона взаимозаместимости при изменении условий записи, а также влияние кислорода на процесс записи.

Материалы и методы

Голографическая среда. Голографический материал Bayfol HX 200 реализует механизм записи с ортогональной химией [14]: исходная композиция содержит по два типа мономеров и инициаторов полимеризации. В материале использованы два механизма полимеризации (две пары «мономер-инициатор»), которые не подвержены перекрестным реакциям. Первый механизм имеет низкую скорость и инициируется за счет теплового воздействия, а второй — запускается благодаря фотореакции, и его компоненты — ключевые для голографической записи. Исходная композиция нанесена слоем толщиной 16 мкм на полимерную подложку из триацетата целлюлозы толщиной 60 мкм и подвергнута тепловому воздействию, благодаря чему происходит полимеризация по первому механизму. Полимеризовавшаяся часть композиции выполняет функцию связующего (биндер [15]) — жесткой матрицы, в которой находится оставшаяся часть композиции. В таком виде материал готов к голографической записи.

Механизм записи голограмм в материале Bayfol HX основан на радикальной фотополимеризации и фотоиндуцированной диффузии [16] (другое название — фотоиндуцированное разделение фаз [17]). В простейшем варианте данный эффект может быть рассмотрен для двухкомпонентных систем, включающих в себя мономер и химически нейтральную компоненту. За счет фотополимеризации при голографической записи образуется периодический градиент химического потенциала, и создается диффузионный поток мономера в зоны полимеризации. Таким образом, химически нейтральная компонента вынужденно вымещается из зон полимеризации для сохранения объема. В результате голографической записи возникает противofазное периодическое распределение двух химических фаз: полимера и химически нейтральной компоненты. Данный эффект можно в грубом приближении назвать обратным осмосом [18].

Методы исследования и аппаратура. Важную информацию об амплитудно-фазовом характере голограмм и о динамическом диапазоне показателя преломления голографического материала в разных спектральных областях может показать его спектр эк-

стинкции — мнимая часть комплексного показателя преломления:

$$n' = n - i \times \kappa,$$

где n — действительная часть показателя преломления; κ — коэффициент экстинкции, который имеет вид [19]

$$\kappa = \frac{\alpha \lambda}{4\pi}, \quad (1)$$

где λ — длина волны пробного излучения; α — натуральный показатель поглощения среды

$$\alpha = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{1}{T} \right),$$

где l — протяженность среды; T — коэффициент пропускания среды.

Проведем измерения спектра экстинкции исследуемого материала в спектральном диапазоне 800–2300 нм при помощи спектрофотометра Shimadzu UV-3101PC. Из-за малой толщины (16 мкм) и высокой эластичности спектр экстинкции непосредственно фотополимера измерить сложно. Для получения информации о пропускании материала в ИК области используем три образца:

образец 1 — голографический фотополимер до обесцвечивания (в светочувствительном состоянии) на подложке из триацетата целлюлозы;

образец 2 — голографический фотополимер после обесцвечивания (в несветочувствительном состоянии) на подложке из триацетата целлюлозы;

образец 3 — подложка из триацетата целлюлозы, с которой фотополимер был полностью удален механически.

Из полученного спектра образца 2 вычтем спектр образца 3 и, таким образом, получим спектр экстинкции фотополимера после реакции фотополимеризации. Также найдем разность спектров образцов 1 и 2 и покажем отличие спектров экстинкции фотополимера до и после реакции фотополимеризации.

Анализ модуляции показателя преломления исследуемого фотополимера осуществим с помощью записи голографических решеток и измерения их контуров угловой селективности. Запись голограмм проведем с использованием двулучевого интерферометра. Для записи применим одномодовый (TEM⁰⁰) непрерывный одночастотный твердотельный лазер с диодной накачкой (Cobolt Bolero DPSS) с длиной волны излучения $\lambda = 639,6$ нм и выходной мощностью 500 мВт. На время записи фотополимер расположим на темном стекле с оптической плотностью на длине волны записи $D \approx 7$ для исключения отражения света от выходной грани образца и записи побочных голограмм. Отметим, что Bayfol HX обладает хорошими адгезионными свойствами, благодаря чему имеется возможность накатывать его на стеклянные поверхности, создавая границу раздела сред фотополимер — стекло. После записи голограммы были обесцвечены белым некогерентным светом с плотностью мощности около 20 мВт/см² в течение 60 мин [16] и перенесены на прозрачную стеклянную подложку.

Для измерения угловой селективности голограмм используем лазерные диоды с длинами волн: 405, 450, 635, 850, 980, 1062, 1549 нм, вторая гармоника твердотельного Nd:YAG лазера с длиной волны излучения 532 нм и волоконный гольмиевый лазер с длиной волны излучения 2099 нм [20]. Лазерное излучение s-поляризовано при помощи поляризатора с соотношением более 100:1. Голограммы установим на электромеханическом поворотном столике Thorlabs HDR50/M с заявленным минимальным шагом порядка 0'0.1", шаг между измерениями постоянен и находится для разных серий образцов в пределах от 3' до 4'12".

Контуры угловой селективности, полученные на разных длинах волн, с учетом Френелевского отражения, аппроксимируем при помощи теории связанных волн Когельника [21]. Построение теоретического контура угловой селективности выполним отдельно для каждой гармоники голограммы, видимой в экспериментальном контуре, по теории связанных волн для случая фазовых пропускающих решеток. Далее осуществим суммирование отдельных контуров пропорционально значениям эффективности (рис. 1, а). Полученную зависимость вычтем из единицы. Теоретический контур сравним с экспериментальным, и путем подбора параметров голограммы (толщины, модуляции показателя преломления) получим минимальные отличия контуров (рис. 1, б). Аппроксимация экспериментального контура угловой селективности теорией связанных волн позволила однозначно определить модуляцию показателя преломления голограммы. В результате полученная точность составила до $\Delta n_1 = \pm 0,001$.

Анализ каждой голограммы осуществлялся в определенном спектральном диапазоне, обладающим длинноволновой и коротковолновой границами. Минимальная длина волны восстановления обусловлена требованием величины угла дифракции менее 50°, поскольку при больших углах восстановления существенно изменяется апертура исследуемой области голограм-

мы из-за наклонного падения пучка. Максимальная длина волны восстановления — требованием углового расстояния между исследуемыми порядками дифракции более 14°, для минимизации влияния порядков дифракции друг на друга.

Экспериментальные результаты

Спектры экстинкции фотополимера в ИК диапазоне. Исследуем амплитудно-фазовый характер голограмм в ИК диапазоне, записанных в Bayfol HX 200, для этого по формуле (1) рассчитаем спектр экстинкции фотополимера после реакции фотополимеризации, который соответствует спектру восстановления записанной голограммы (рис. 2, а). Видно, что на приведенном спектре отсутствуют полосы поглощения, а коэффициент экстинкции соответствует значению $\approx 0,5 \cdot 10^{-4}$. Можно сделать вывод о преимущественно фазовом характере голограмм в данном спектральном диапазоне. Также показано отличие спектров экстинкции фотополимера до и после реакции фотополимеризации (рис. 2, б). Наблюдаемые биения на приведенных спектрах связаны с интерференцией света в образцах, представляющих собой пленки толщинами 60 мкм (образец 3) и 76 мкм (образцы 1 и 2).

Спектр на рис. 2, б демонстрирует, что существенные изменения поглощения материала в ближнем ИК диапазоне при фотополимеризации отсутствуют. Разностный спектр экстинкции в своих предельных значениях оценен числом $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$, а модуляция показателя преломления исследуемого фотополимера в видимом диапазоне длин волн оценена значением $3 \cdot 10^{-2}$, что в 200 раз больше. Отсюда следует, что модуляция показателя преломления материала не обусловлена изменением поглощения в ИК диапазоне. Таким образом, по спектрам пропускания в видимом диапазоне длин волн (из работ [3, 7] известно, что после фотополимеризации и обесцвечивания в диапазоне длин волн 400–800 нм

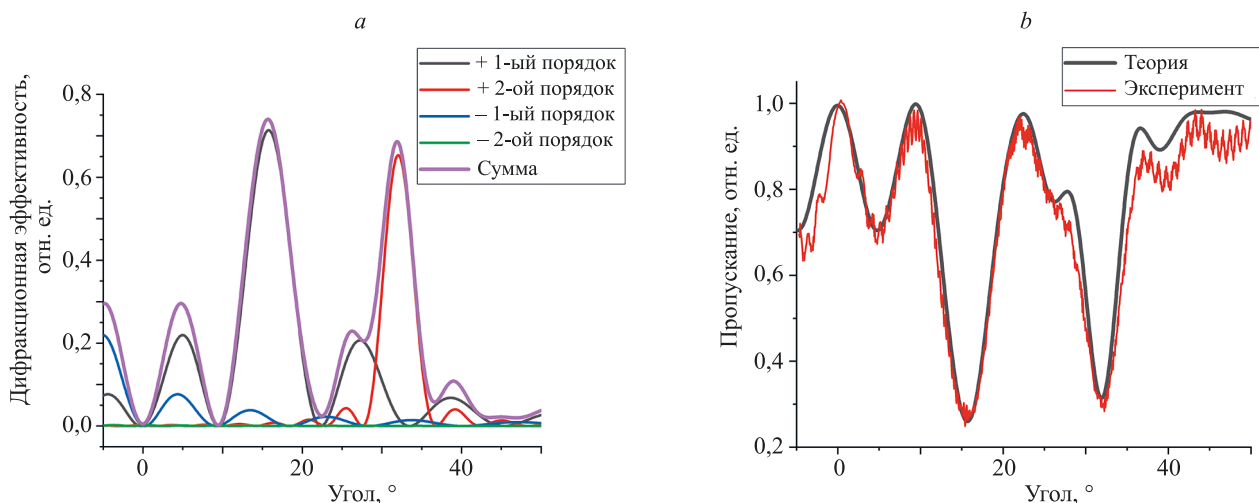


Рис. 1. Пример аппроксимации экспериментального контура теорией связанных волн. Теоретические контуры +1-го, +2-го, -1-го и -2-го порядков дифракции и их сумма (а), теоретический и экспериментальный контуры нулевого порядка дифракции (б)

Fig. 1. An example of approximation of an experimental contour by the Coupled waves theory. Theoretical contours of the +1st, +2nd, -1st and -2nd diffraction orders and their sum (а), theoretical and experimental zero-order diffraction contours (б) are shown

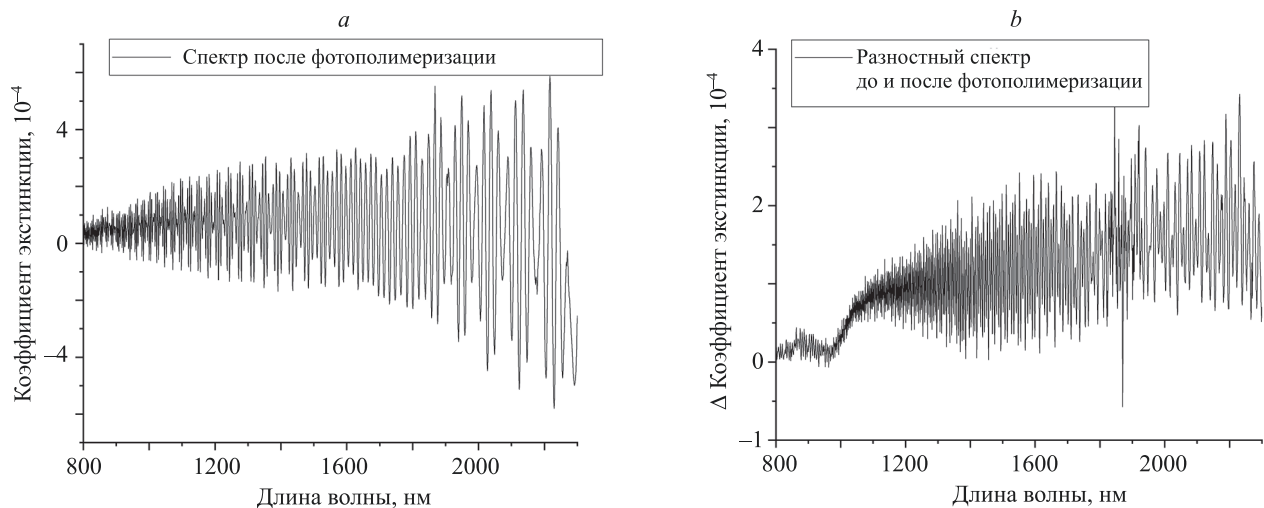


Рис. 2. Спектр экстинкции фотополимера Bayfol HX 200 после фотополимеризации (a) и разность спектров экстинкции до и после фотополимеризации (b)

Fig. 2. Extinction spectrum of Bayfol HX 200 photopolymer after photopolymerization (a) and difference between extinction spectra before and after photopolymerization (b)

материал характеризуется пропусканием более 85 %) и спектрам экстинкции в ИК диапазоне, приведенным в настоящей работе, можно предположить наличие модуляции коэффициента экстинкции только в ультрафиолетовом диапазоне спектра, и, в соответствии с соотношениями Крамерса–Кронига [19] (асимптотическое убывание модуляции показателя преломления с ростом длины волны). При изучении других материалов при помощи соотношений Крамерса–Кронига получено, что модуляция показателя преломления асимптотически уменьшается при отдалении от максимума модуляции коэффициента экстинкции [22].

Спектр модуляции показателя преломления. Основной вопрос, исследуемый в данной работе — возможность достижения высокой модуляции показателя преломления голограмм в ИК диапазоне, находящемся на достаточном спектральном отдалении от максимума модуляции коэффициента экстинкции.

Для сравнения модуляции показателя преломления в видимой и ИК областях спектра в фотополимере Bayfol HX 200 толщиной 16 мкм запишем 6 пропускающих решеток с периодами (d) от 414 до 2100 нм и нормальной ориентацией голографических плоскостей к поверхности элемента (образец 4). Плотность мощности каждого из записывающих пучков в области установки образца составила $P_{\text{зап}} = 500$ мВт/см². Время записи выбрано равным $t = 32$ с, для достижения плотности энергии записывающего излучения (дозы, $E = 2P_{\text{зап}}t \cos\theta$, где θ — угол падения или половинный угол сведения) для каждой голограммы $E > 20$ мДж/см², которая является достаточной для получения максимальной модуляции показателя преломления в фотополимере (табл. 1).

Для построения спектра модуляции показателя преломления измерим контуры угловой селективности голограмм в нулевом порядке дифракции на нескольких длинах волн от 405 до 2099 нм. По результатам анализа контуров голограмм образца 4 получим амплитуды первой (n_1) и второй (n_2) гармоник модуляции показателя

преломления исследуемого фотополимера в разных частях спектрального диапазона (рис. 3).

По полученным результатам видно, что с ростом периода амплитуды гармоник модуляции показателя преломления (n_1 и n_2) снижаются. Сумма n_1 и n_2 для решеток с периодами в диапазоне 661–2100 нм также монотонно снижается со значения 0,054 для решетки с периодом 661 нм до — 0,031 для решетки с периодом 2100 нм. Снижение n_1 и n_2 при увеличении периода решетки является явным нарушением закона взаимозаместимости (то же, что и закон Бунзена–Роско [23]), так как он постулирует зависимость амплитуд всех гармоник модуляции показателя преломления только от дозы и инвариантность условиям ее достижения. Наблюдаемое на рис. 3 снижение n_1 и n_2 может объясняться уменьшением динамического диапазона материала примерно в 1,5 раза, однако в эксперименте отсутствуют предпосылки для такого явления. Также снижение n_1 и n_2 при неизменном Δn может происходить из-за увеличения амплитуд высших гармоник модуляции показателя преломления (n_3 , n_4 и т. д.), т. е. трансформации профиля показателя преломления к несинусоидальной форме и появлению высших порядков дифракции. Такой вывод косвенно подтверждается визуально наблюдаемыми в эксперименте порядками

Таблица 1. Условия записи образца 4
Table 1. Sample 4 recording conditions

Период, нм	Доза, мДж/см ²	Половинный угол сведения
414	20,3	50°34'32"
661	28,0	28°56'4"
826	29,5	22°46'42"
1206	30,9	15°22'38"
1634	31,4	11°17'11"
2100	31,6	8°45'33"

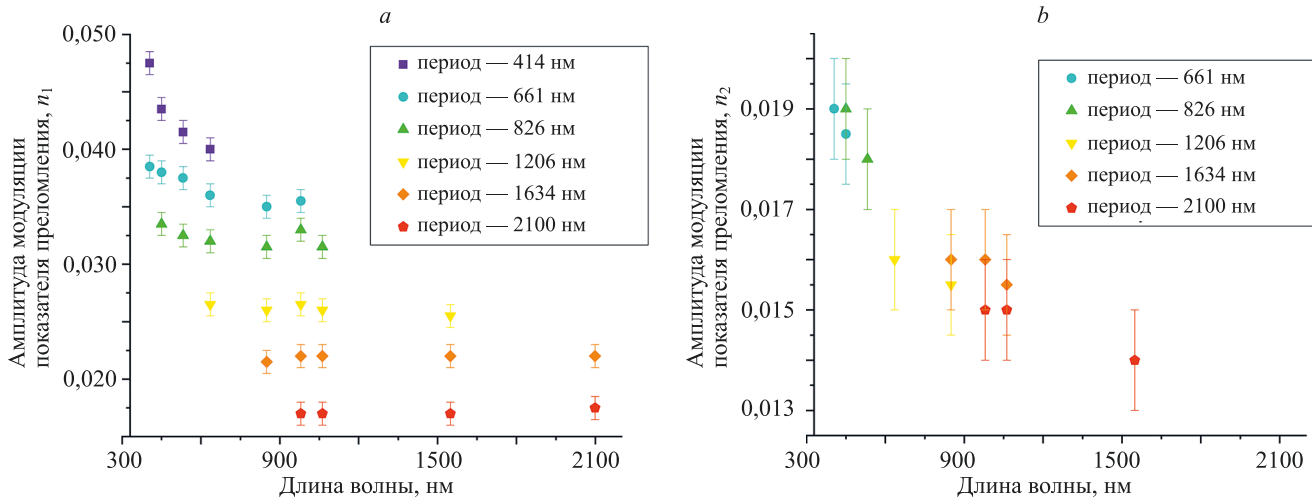


Рис. 3. Спектры амплитуд n_1 (a) и n_2 (b) фотополимера Bayfol HX 200 для голограмм с периодами 414–2100 нм

Fig. 3. Spectra of n_1 (a) and n_2 (b) amplitudes of the Bayfol HX 200 photopolymer for holograms with periods of 414–2100 nm

дифракции вплоть до седьмого (рис. 4) на длине волны восстановления 405 нм для голограммы с периодом 1634 нм (и до 9-го для голограммы с периодом 2100 нм, фото не приведено). Таким образом, можно заключить, что профиль показателя преломления голограмм существенно отличается от синусоиды.

Однозначно проанализировать контуры угловой селективности порядков дифракции выше второго не удалось из-за суперпозиции откликов всех порядков дифракции.

Как видно из результатов эксперимента, модуляция показателя преломления Bayfol HX 200 в ближнем ИК по сравнению с длинноволновой частью видимой области спектра отличается на величину, не превышающую точности измерений. Также наблюдается ярко выраженное нарушение закона взаимозаместимости в зависимости от масштаба интерференционной картины — дифракционная эффективность голограмм уменьшается с увеличением пространственного периода.

Исследование влияния плотности мощности записи на распределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками. Выполним анализ соблюдения закона взаимозаместимости при различных скоростях фотополимеризации (которые напрямую связаны с плотностью мощности записывающего излучения [16]). Для проведения анализа распределения динамического диапазона по-

казателя преломления между гармониками запишем 8 голограмм с одинаковыми периодами $d = 1634$ нм, различными плотностями мощности записи ($P_{\text{зап}}$ от 10 до 500 мкВт/см² в одном канале) и одинаковой дозой 20 мДж/см² (условия записи образца 5 приведены в табл. 2). Таким образом, при сохранении неизменной дозы в эксперименте время записи варьируется от нескольких десятков до тысячи секунд.

Для образца 5 измерены контуры угловой селективности на длинах волн 850 и 980 нм и определена дифракционная эффективность в угле Брэгга на — 1549 и 2099 нм. По результатам анализа измеренных дифракционных характеристик голограмм образца 5 построены зависимости n_1 и n_2 (рис. 5). Незначительное снижение модуляции показателя преломления на длине волны 1549 нм, предположительно, связано с низкой степенью коллимации используемого в эксперименте источника.

По полученным графикам видно, что с уменьшением $P_{\text{зап}}$ от 500 до 25 мкВт/см² происходит перераспределение динамического диапазона показателя преломления между n_1 и n_2 . С уменьшением $P_{\text{зап}}$ происходит рост n_1 и подавление n_2 . Исключение из этой тенденции составляет голограмма, записанная при $P_{\text{зап}} = 10$ мкВт/см². Явление может объясняться тем, что при снижении $P_{\text{зап}}$

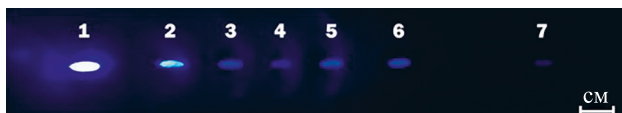


Рис. 4. Фотография семи порядков дифракции голограммы с периодом 1634 нм (длина волны восстановления 405 нм, угол восстановления $60^\circ 10' 11''$, что соответствует углу Брэгга для 7-ой гармоники решетки)

Fig. 4. Photo of seven diffraction orders of a hologram with a period of 1634 nm (reconstruction wavelength was 405 nm, reconstruction angle was $60^\circ 10' 11''$ which corresponds to Bragg angle for the 7th grating harmonic)

Таблица 2. Условия записи образца 5

Table 2. Sample 5 recording conditions

Плотность мощности, мкВт/см ²	Время записи, с
10	1020,0
25	408,0
50	204,0
75	136,0
100	102,0
200	51,0
350	29,0
500	20,5

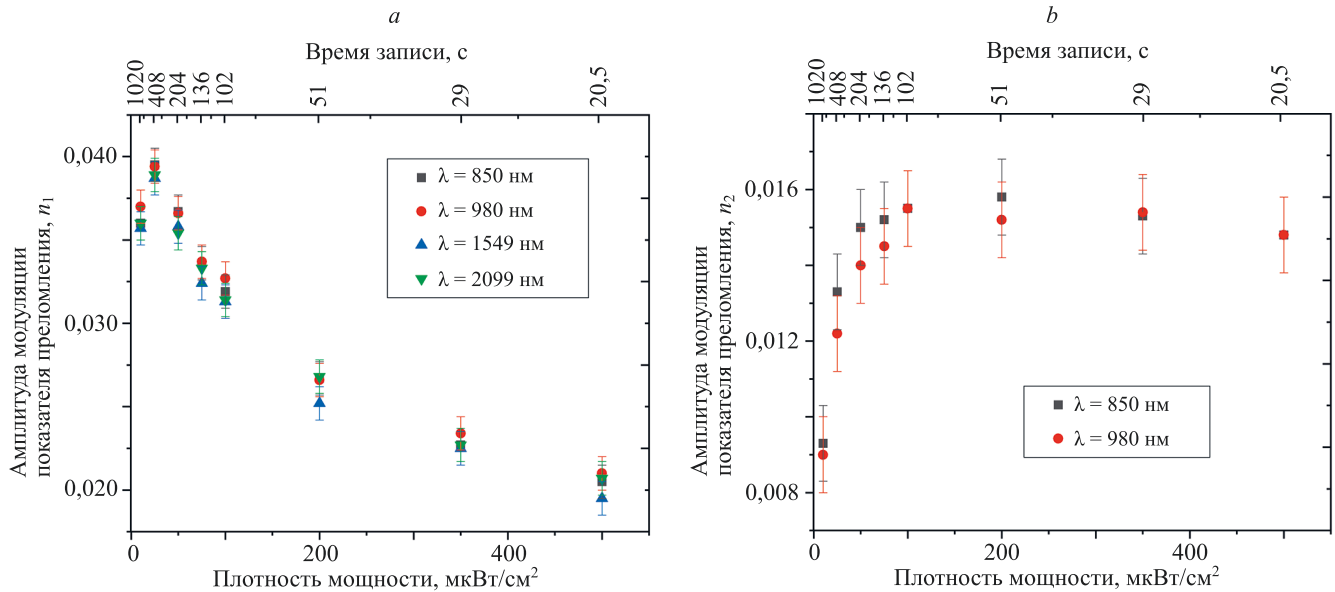


Рис. 5. Зависимости n_1 (a) и n_2 (b) для образца 5 от плотности мощности записи при $d = 1634$ нм

Fig. 5. Dependence of n_1 (a) and n_2 (b) for sample 5 on the recording power density with $d = 1634$ nm

и, соответственно, увеличении времени записи, увеличивается влияние притока кислорода из атмосферы через подложку фотополимера. Постоянно притекающий во время записи через подложку фотополимера кислород окисляет радикализованный фотоинициатор, который не может участвовать в реакции полимеризации, и динамический диапазон фотополимера снижается [16]. При снижении $P_{\text{зап}}$ скорость радикализации фотоинициатора уменьшается, тогда как скорость притока кислорода остается постоянной и из-за увеличения времени записи начинает вносить все больший вклад в уменьшение динамического диапазона показателя преломления фотополимера.

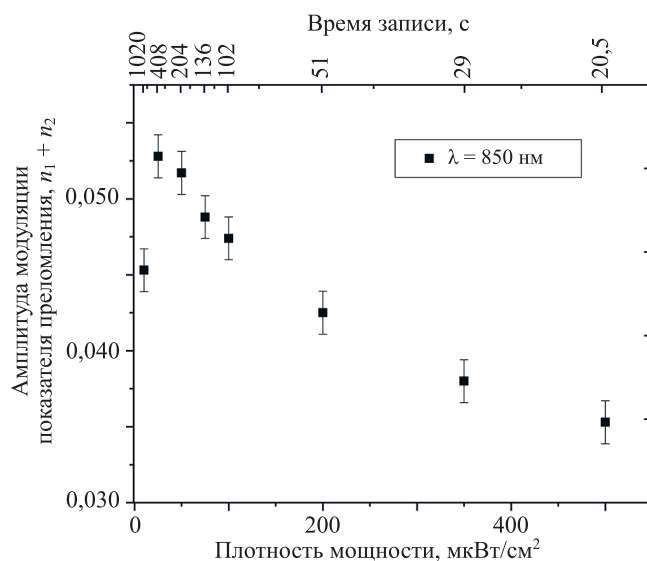


Рис. 6. Зависимость $(n_1 + n_2)$ для образца 5 от плотности мощности записи при $d = 1634$ нм

Fig. 6. Dependence of $(n_1 + n_2)$ for sample 5 on the recording power density with $d = 1634$ nm

Отметим, что сумма n_1 и n_2 для голограмм образца 5, записанных при $P_{\text{зап}}$ 25–500 мкВт/см², уменьшается с ростом $P_{\text{зап}}$ (рис. 6), что косвенно свидетельствует о перераспределении динамического диапазона показателя преломления между низшими и высшими гармониками при изменении $P_{\text{зап}}$.

В эксперименте при восстановлении голограммы с периодом 1634 нм, записанной при $P_{\text{зап}} = 25$ мкВт/см², видны всего пять порядков дифракции (рис. 7, a), тогда как при восстановлении голограммы, записанной при $P_{\text{зап}} = 500$ мкВт/см² — семь порядков (рис. 7, b).

Выполним численный анализ дифракционной эффективности. Для наиболее сильной голограммы с образца 5 ($P_{\text{зап}} = 25$ мкВт/см², $n_1 = 0,039$) дифракционная эффективность на длине волны восстановления 1550 нм

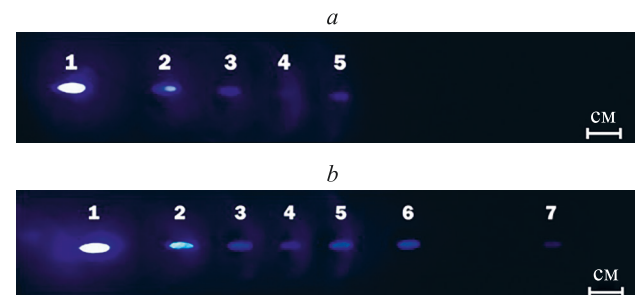


Рис. 7. Фотографии пяти порядков дифракции голограммы с периодом 1634 нм при $P_{\text{зап}} = 25$ мкВт/см² (a) и семи порядков — $P_{\text{зап}} = 500$ мкВт/см² (b). Длина волны восстановления 405 нм, угол восстановления $60^\circ 10' 11''$, что соответствует углу Брэгга для 7-ой гармоники решетки

Fig. 7. Photo of five diffraction orders of a hologram with a period of 1634 nm and a recording power density of 25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (a), photo of seven diffraction orders of a hologram with a period of 1634 nm and a recording power density of 500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (b), (reconstruction wavelength was 405 nm, reconstruction angle was $60^\circ 10' 11''$, which corresponds to Bragg angle for the 7th grating harmonic)

составила 97 %, а на длине волны 2099 нм — 75 %. Дифракционная эффективность 97 % соответствует потерям на элементе менее 0,135 дБ, что делает Bayfol HX 200 привлекательным материалом для изготовления дифракционной оптики, в том числе для телекоммуникационных применений [24]. Также приведенные цифры свидетельствуют о возможности расширения спектральной области применения дифракционных оптических элементов на базе Bayfol HX 200 до 2100 нм.

Таким образом, при анализе спектра модуляции показателя преломления и исследовании влияния плотности мощности записи на распределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками продемонстрировано выраженное нарушение закона взаимозаменяемости как от масштаба интерференционной картины, так и при уменьшении плотности мощности записи.

Исследование влияния условий записи на амплитуду модуляции первой гармоники показателя преломления. Применительно к Bayfol HX, нарушение закона взаимозаменяемости может иметь различные функциональные зависимости в разных диапазонах времени записи вследствие наличия двух конкурирующих процессов, вызванных эффектами массопереноса: фотоиндуцированного разделения фаз [25] и диффузии кислорода [16]. При малом времени записи фотоиндуцированное разделение фаз вносит доминирующий вклад в нарушение закона взаимозаменяемости, что связано с изменением скорости фотополимеризации при изменении плотности мощности излучения [26–28]. Из-за этого происходит перераспределение динамического диапазона показателя преломления между гармониками при увеличении времени записи с сохранением фиксированной дозы. При большом времени записи возрастает влияние диффузии кислорода, который вносит заметный противоположный вклад, вследствие

чего происходит снижение динамического диапазона показателя преломления материала.

Механизм нарушения закона взаимозаменяемости, связанного с фотоиндуцированным разделением фаз, описан моделью полимеризации и линейной диффузии в фотополимерах [26], применимой для Bayfol HX [29]. В явном виде в модели введен параметр R , связывающий материальные константы (скорости фотополимеризации k и диффузии D), и условия записи (среднюю интенсивность записывающего излучения в среде I и пространственную частоту решетки $K = \frac{2\pi}{d}$):

$$R = \frac{K^2 D}{I k}. \quad (2)$$

Значение параметра R определяет амплитуды гармоник модуляции показателя преломления голограммы. Таким образом, сопоставление амплитуды модуляции показателя преломления и величины R может рассматриваться как критерий выбора оптимального соотношения условий записи.

Для анализа описанных нарушений в дополнение к образцам 4 и 5 записаны несколько серий решеток (образцы 6–9) с разными периодами (414, 470 и 1206 нм), неизменной дозой ($E = 20$ мДж/см²), разным временем записи (от 20 до 1365 с) и плотностью мощности записывающего излучения (от 10 до 500 мВт/см²) (табл. 3). А также одна решетка (образец 10) с периодом $d = 661$ нм, дозой $E = 20$ мДж/см², временем записи $t = 457$ с и плотностью мощности записывающего излучения $P_{\text{зап}} = 25$ мВт/см².

Экспериментальные результаты обрабатываем с использованием формулы (2). При этом в настоящей работе эквивалентом средней интенсивности в среде является удвоенная плотность мощности каждо-

Таблица 3. Условия записи образцов 6–9

Table 3. Samples 6–9 recording conditions

Плотность мощности, мВт/см ²	Время записи, с	Плотность мощности, мВт/см ²	Время записи, с
Образец 6: $d = 414$ нм, $E = 20$ мДж/см ²		Образец 7: $d = 1206$ нм, $E = 20$ мДж/см ²	
25	630,0	10	1037,0
50	315,0	25	415,0
75	210,0	50	207,0
100	158,0	75	138,0
200	79,0	100	104,0
350	45,0	200	52,0
500	31,5	350	30,0
—	—	500	20,5
Образец 8: $d = 470$ нм, $E = 20$ мДж/см ²		Образец 9: $d = 470$ нм, $E = 20$ мДж/см ²	
10	1365,0	25	546,0
15	910,0	50	273,0
25	546,0	100	137,0
35	390,0	350	39,0
50	273,0	—	—

го из записывающих пучков умноженная на косинус угла Брэгга, как следствие, I заменим на $2P_{\text{зап}} \cos \theta$. Поскольку значения скоростей полимеризации и диффузии — коммерческая тайна (k и D неизвестны), дальнейшие рассуждения, связанные с параметром R , проводятся с точностью до материальных констант:

$$Rk/D = \frac{K^2}{2P_{\text{зап}} \cos \theta}. \quad (3)$$

Посчитанные значения n_1 для всех голограмм образцов 4–10 сопоставим с условиями записи (рис. 8). При этом, для того чтобы отделить нарушение закона взаимозаместимости, связанное с диффузией кислорода, голограммы с характерным временем записи более 408 с обведены красным овалом, как вероятно подверженные влиянию кислорода. Основанием для такого разделения стали зависимости, полученные для образца 5 на рис. 5 и 6, из которых следует, что голограмма с характерным временем записи более 408 с подвержена влиянию диффузии кислорода.

Из рис. 8 видна зависимость n_1 от условий записи, анализ которой важен для достижения максимальных значений n_1 . Наблюдается закономерность возрастания n_1 при соблюдении условий записи, обеспечивающих более медленный процесс формирования голограммы. Такой характер зависимости прослеживается для голограмм, записанных при значениях $Rk/D < 0,8$ пВт⁻¹, максимальные значения n_1 достигаются в диапазоне значений Rk/D от 0,8 до 1,2 пВт⁻¹. Однако из эксперимента остается неясным характер зависимости при $Rk/D > 1,2$ пВт⁻¹ из-за существенного влияния диффузии кислорода на динамический диапазон фотополимера при записи голограмм с периодами более 400 нм. Запись голограмм с меньшими периодами в используемом интерферометре невозможна в связи с его габаритными ограничениями. В связи с этим для уточнения значений n_1 при $Rk/D > 1,2$ пВт⁻¹ возникает необходимость записи голограмм с ограничением притока кислорода в фотополимер.

Для окончательного отделения влияния диффузии кислорода на величину n_1 запишем образцы 11–14 (параметры голограмм и условия записи приведены в табл. 4). Во время записи образцов 11–14 ограничим приток кислорода в фотополимер. Ограничение реализовано за счет иммерсирования непроницаемой для кислорода, но прозрачной для света, стеклянной пластины (пропускание более 99 %, без учета потерь на отражение) поверх подложки фотополимера на время записи голограммы. Схематично условия записи голограмм показаны на рис. 9.

Выполним обработку полученных результатов в соответствии с моделью полимеризации и линейной диффузии в фотополимерах при помощи формулы (3). Значения n_1 для голограмм образцов 11–14 сопоставлены с условиями записи на рис. 10, а. Также для наглядного сравнения влияния кислорода продублировано распределение значений n_1 для голограмм образцов 4–10 (рис. 10, б)

На приведенной зависимости виден рост n_1 при увеличении Rk/D , однако максимальное значение n_1

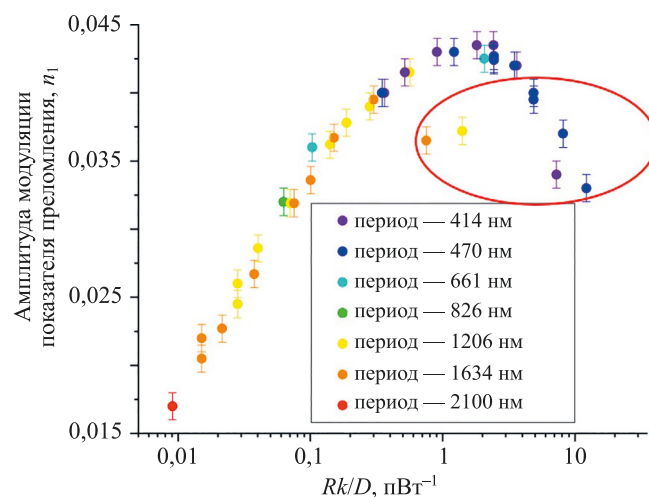


Рис. 8. Распределение n_1 голограмм от условий записи (частоты решетки и плотности мощности излучения), приток кислорода не ограничен

Fig. 8. The distribution of n_1 of the holograms on the recording conditions (grating frequency and recording power density), the oxygen flow is not limited

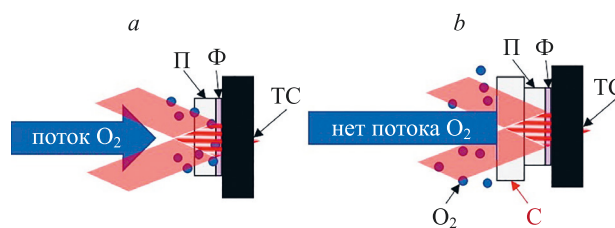


Рис. 9. Схематичное изображение условий записи голограмм: приток кислорода неограничен (а), приток кислорода ограничен (б).

П — подложка из триацетата целлюлозы; Ф — фотополимер; TC — темное стекло; С — стеклянная пластина; O₂ — кислород

Fig. 9. Schematic representation of the conditions for hologram recording: with oxygen flow (a), without oxygen flow (b).

П — cellulose triacetate substrate; Ф — photopolymer; TC — dark glass; C — glass plate; O₂ — oxygen

в случае ограничения притока кислорода достигается раньше, уже при $Rk/D \approx 0,5$ пВт⁻¹. Заметим, что в случае записи голограмм с ограничением притока кислорода (рис. 10, а), в отличие от случая записи голограмм без ограничения (рис. 10, б), наблюдается выход на насыщение $n_1 \approx 0,043$. Также отметим, что при ограничении притока кислорода наблюдается нестабильность характеристик получаемых голограмм (некоторые голограммы имеют очень малые значения n_1 , выбивающиеся из зависимости), что, предположительно, связано с неотработанным процессом иммерсирования стеклянной пластины, ограничивающей приток кислорода.

Экспериментально продемонстрировано влияние фотоиндуцированного разделения фаз на нарушение закона взаимозаместимости для Bayfol HX 200. Благодаря анализу нарушения закона взаимозаместимости для исследуемого фотополимера выявлены условия записи, при которых достигается наибольшая

Таблица 4. Условия записи образцов 11–14

Table 4. Samples 11–14 recording conditions

Плотность мощности, мВт/см ²	Время записи, с	Плотность мощности, мВт/см ²	Время записи, с
Образец 11: $d = 1206$ нм, $E = 20$ мДж/см ²		Образец 12: $d = 470$ нм, $E = 20$ мДж/см ²	
10	1037,0	10	1365,0
25	415,0	15	910,0
50	207,0	25	546,0
75	138,0	35	390,0
100	104,0	50	273,0
200	52,0	25	546,0
350	30,0	—	—
500	20,5	—	—
Образец 13: $d = 1634$ нм, $E = 20$ мДж/см ²		Образец 14: $d = 414$ нм, $E = 20$ мДж/см ²	
10	1020,0	25	630,0
25	408,0	75	210,0
50	204,0	200	79,0

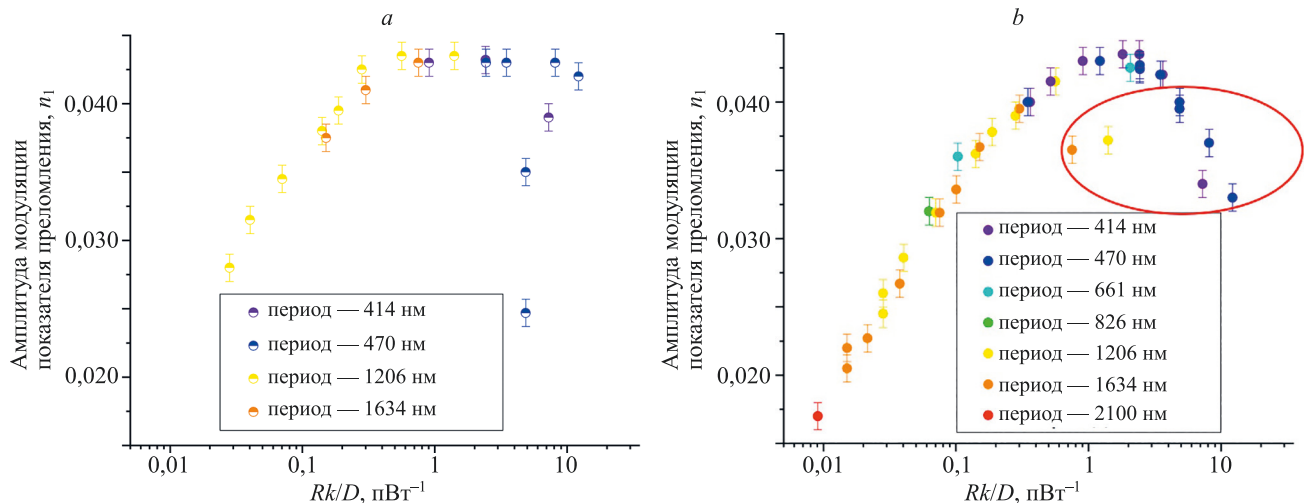


Рис. 10. Распределение n_1 голограмм от условий записи (частоты решетки и плотности мощности излучения), приток кислорода ограничен (а), приток кислорода не ограничен (для сравнения приведен рис. 8) (b)

Fig. 10. The distribution of n_1 of the holograms on the recording conditions (grating frequency and recording power density), the oxygen flow is limited (a), the oxygen flow is not limited (b)

модуляция первой гармоники показателя преломления. Показано, что в случае голографической записи без ограничения притока кислорода время записи должно быть менее 408 с, а величина Rk/D должна выбираться больше 0,8 пВт⁻¹. В случае ограничения притока кислорода величина Rk/D должна выбираться больше 0,5 пВт⁻¹.

Заключение

В работе исследован потенциал использования голографического фотополимера Bayfol HX 200 в диапазоне длин волн восстановления до 2100 нм. Показано, что модуляция показателя преломления в исследуемом фотополимере в ближнем инфракрасном диапазоне по сравнению с длинноволновой частью видимого диапа-

зона спектра отличается на величину, не превышающую точности измерений.

Впервые проведен численный анализ нарушения закона взаимозаменяемости для фотополимера Bayfol HX 200. С практической точки зрения анализ нарушения закона взаимозаменяемости в настоящей работе позволил выявить оптимальные условия для записи голограмм с наиболее сильным первым порядком дифракции для широкого диапазона периодов (414–1634 нм). Оптимальные условия записи найдены для двух случаев: голографическая запись происходит с постоянным притоком кислорода в фотополимер и без притока. Так, для случая, когда кислород поступает в фотополимер беспрепятственно, найдено ограничение по времени записи. Для случая записи с ограничением притока кислорода — оптимальные условия определяются соотно-

шением пространственной частоты решетки и средней интенсивности записывающего излучения.

Отметим, что дифракционная эффективность голограмм, записанных в Bayfol HX 200 толщиной 16 мкм, составила 97 % на длине волны восстановления 1550 нм, что делает его привлекательным материалом для изготовления дифракционной оптики, в том числе

для телекоммуникационных применений. Также дифракционная эффективность записанных голограмм достигала 75 % на длине волны восстановления 2099 нм, что также позволяет эффективно применять Bayfol HX 200 для создания дифракционной оптики для спектрального диапазона до 2100 нм.

Литература

1. Quintana J.A., Boj P.G., Crespo J., Pardo M., Satorre M.A. Line-focusing holographic mirrors for solar ultraviolet energy concentration // *Applied Optics*. 1997. V. 36. N 16. P. 3689–3693. <https://doi.org/10.1364/AO.36.003689>
2. Glebov L.B., Smirnov V., Rotari E., Cohanoschi I., Glebova L., Smolski O.V., Lumeau J., Lantigua C., Glebov A. Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses // *Optical Engineering*. 2014. V. 53. N 5. P. 051514. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.051514>
3. Berneth H., Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Jürbergs D., Rölle T., Weiser M.-S. Holographic recording aspects of high-resolution Bayfol HX photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2011. V. 7957. P. 79570H. <https://doi.org/10.1117/12.876202>
4. Bruder F.-K., Hansen S., Kleinschmidt T., Künzel R., Manecke C., Orselli E., Rewitz C., Rölle T. Integration of volume holographic optical elements (vHOE) made with Bayfol® HX into plastic optical parts // *Proceedings of SPIE*. 2019. V. 10944. P. 1094402. <https://doi.org/10.1117/12.2510109>
5. Vázquez-Martín I., Gómez-Climente M., Marín-Sáez J., Collados M.V., Atencia J. True colour Denisyuk-type hologram recording in Bayfol HX self-developing photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10233. P. 102331U. <https://doi.org/10.1117/12.2265802>
6. Marín-Sáez 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 // *Optics Express*. 2018. V. 26. N 10. P. A398–A412. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A398>
7. Bruder F.-K., Fäcke T., Grote F., Hagen R., Hönel D., Koch E., Rewitz C., Walze G., Wewer B. Performance optimization in mass production of volume holographic optical elements (vHOEs) using Bayfol HX photopolymer film // *Proceedings of SPIE*. 2017. V. 10233. P. 102330G. <https://doi.org/10.1117/12.2265022>
8. Berneth H., Bruder F.-K., Fäcke T., Jürbergs D., Hagen R., Hönel D., Rölle T., Walze G. Bayfol HX photopolymer for full-color transmission volume Bragg gratings // *Proceedings of SPIE*. 2014. V. 9006. P. 900602. <https://doi.org/10.1117/12.2038399>
9. Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Walze G. Diffractive optics with high Bragg selectivity: volume holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer film // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9626. P. 96260T. <https://doi.org/10.1117/12.2191587>
10. Bruder F.-K., Bang H., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Vukicevic D., Walze G. Precision holographic optical elements in Bayfol HX photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2016. V. 9771. P. 977103. <https://doi.org/10.1117/12.2209636>
11. Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Kleinschmidt T.P., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Walze G. Diffractive optics in large sizes: computer-generated holograms (CGH) based on Bayfol HX photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2015. V. 9385. P. 93850C. <https://doi.org/10.1117/12.2077139>
12. Marín-Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.V. Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications // *Optics Express*. 2016. V. 24. N 6. P. A720–A730. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A720>
13. Bruder F.-K., Frank J., Hansen S., Lorenz A., Manecke C., Meisenheimer R., Mills J., Pitzer L., Pochorovski I., Rölle T. Expanding the property profile of Bayfol HX films towards NIR recording and ultra-high index modulation // *Proceedings of SPIE*. 2021. V. 11765. P. 117650J. <https://doi.org/10.1117/12.2579235>

References

1. Quintana J.A., Boj P.G., Crespo J., Pardo M., Satorre M.A. Line-focusing holographic mirrors for solar ultraviolet energy concentration. *Applied Optics*, 1997, vol. 36, no. 16, pp. 3689–3693. <https://doi.org/10.1364/AO.36.003689>
2. Glebov L.B., Smirnov V., Rotari E., Cohanoschi I., Glebova L., Smolski O.V., Lumeau J., Lantigua C., Glebov A. Volume-chirped Bragg gratings: monolithic components for stretching and compression of ultrashort laser pulses. *Optical Engineering*, 2014, vol. 53, no. 5, pp. 051514. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.5.051514>
3. Berneth H., Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Jürbergs D., Rölle T., Weiser M.-S. Holographic recording aspects of high-resolution Bayfol HX photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2011, vol. 7957, pp. 79570H. <https://doi.org/10.1117/12.876202>
4. Bruder F.-K., Hansen S., Kleinschmidt T., Künzel R., Manecke C., Orselli E., Rewitz C., Rölle T. Integration of volume holographic optical elements (vHOE) made with Bayfol® HX into plastic optical parts. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 10944, pp. 1094402. <https://doi.org/10.1117/12.2510109>
5. Vázquez-Martín I., Gómez-Climente M., Marín-Sáez J., Collados M.V., Atencia J. True colour Denisyuk-type hologram recording in Bayfol HX self-developing photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10233, pp. 102331U. <https://doi.org/10.1117/12.2265802>
6. Marín-Sáez 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. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 10, pp. A398–A412. <https://doi.org/10.1364/OE.26.00A398>
7. Bruder F.-K., Fäcke T., Grote F., Hagen R., Hönel D., Koch E., Rewitz C., Walze G., Wewer B. Performance optimization in mass production of volume holographic optical elements (vHOEs) using Bayfol HX photopolymer film. *Proceedings of SPIE*, 2017, vol. 10233, pp. 102330G. <https://doi.org/10.1117/12.2265022>
8. Berneth H., Bruder F.-K., Fäcke T., Jürbergs D., Hagen R., Hönel D., Rölle T., Walze G. Bayfol HX photopolymer for full-color transmission volume Bragg gratings. *Proceedings of SPIE*, 2014, vol. 9006, pp. 900602. <https://doi.org/10.1117/12.2038399>
9. Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Walze G. Diffractive optics with high Bragg selectivity: volume holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer film. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9626, pp. 96260T. <https://doi.org/10.1117/12.2191587>
10. Bruder F.-K., Bang H., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Vukicevic D., Walze G. Precision holographic optical elements in Bayfol HX photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2016, vol. 9771, pp. 977103. <https://doi.org/10.1117/12.2209636>
11. Bruder F.-K., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Kleinschmidt T.P., Orselli E., Rewitz C., Rölle T., Walze G. Diffractive optics in large sizes: computer-generated holograms (CGH) based on Bayfol HX photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2015, vol. 9385, pp. 93850C. <https://doi.org/10.1117/12.2077139>
12. Marín-Sáez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.V. Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications. *Optics Express*, 2016, vol. 24, no. 6, pp. A720–A730. <https://doi.org/10.1364/OE.24.00A720>
13. Bruder F.-K., Frank J., Hansen S., Lorenz A., Manecke C., Meisenheimer R., Mills J., Pitzer L., Pochorovski I., Rölle T. Expanding the property profile of Bayfol HX films towards NIR recording and ultra-high index modulation. *Proceedings of SPIE*, 2021, vol. 11765, pp. 117650J. <https://doi.org/10.1117/12.2579235>

14. Peng H., Nair D.P., Kowalski B.A., Xi W., Gong T., Wang C., Cole M., Cramer N.B., Xie X., McLeod R.R., Bowman C.N. High performance graded rainbow holograms via two-stage sequential orthogonal thiol-click chemistry // *Macromolecules*. 2014. V. 47. N 7. P. 2306–2315. <https://doi.org/10.1021/ma500167x>
15. Monte F.D., Martínez O., Rodrigo J. A., Calvo M. L., Cheben P. A volume holographic sol-gel material with large enhancement of dynamic range by incorporation of high refractive index species // *Advanced Materials*. 2006. V. 18. N 15. P. 2014–2017. <https://doi.org/10.1002/adma.200502675>
16. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer // *Polymers*. 2017. V. 9. N 10. P. 472. <https://doi.org/10.3390/polym9100472>
17. Kargaran A., Ebrahimi M., Riaz M., Hosseiny A., Jafari G.R. Quartic balance theory: Global minimum with imbalanced triangles // *Physical Review*. 2020. V. 102. N 1. P. 012310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.012310>
18. Spiegler K.S., Kedem O. Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes // *Desalination*. 1966. V. 1. N 4. P. 311–326. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80018-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80018-1)
19. Lucarini V., Saarinen J.J., Peiponen K.-E., Vartiainen E.M. *Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research*. Springer Science & Business Media, 2005. 162 p. (Springer Series in Optical Sciences. V. 110). <https://doi.org/10.1007/b138913>
20. Kopyeva M.S., Filatova S.A., Kamynin V.A., Trikshev A.I., Kozlikina E.I., Astashov V.V., Loschenov V.B., Tsvetkov V.B. Ex-vivo exposure on biological tissues in the 2-μm spectral range with an all-fiber continuous-wave holmium laser // *Photonics*. 2021. V. 9. N 1. P. 20. <https://doi.org/10.3390/photonics9010020>
21. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings // *Bell System Technical Journal*. 1969. V. 48. N 9. P. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
22. Borisov V.N., Angervaks A.E., Ryskin A.I., Veniaminov A.V. Two-model spectral study of volume holograms in materials with diffusion-based mechanisms // *Optical Engineering*. 2019. V. 58. N 2. P. 024102. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.024102>
23. Mees E.K., James T.H. *The Theory of the Photographic Process*. New York: Macmillan, 1967. Chap. 7. P. 132.
24. Pottier P., Strain M.J., Packirisamy M. Integrated microspectrometer with elliptical Bragg mirror enhanced diffraction grating on silicon on insulator // *ACS Photonics*. 2014. V. 1. N 5. P. 430–436. <https://doi.org/10.1021/ph400165j>
25. Liu P., Zhao Y., Li Z., Sun X. Improvement of ultrafast holographic performance in silver nanoprisms dispersed photopolymer // *Optics Express*. 2018. V. 26. N 6. P. 6993–7004. <https://doi.org/10.1364/OE.26.006993>
26. Sheridan J.T., Lawrence J.R. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer // *Journal of the Optical Society of America A*. 2000. V. 17. N 6. P. 1108–1114. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.001108>
27. Zhao G., Mouroulis P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials // *Journal of Modern Optics*. 1994. V. 41. N 10. P. 1929–1939. <https://doi.org/10.1080/09500349414551831>
28. Kelly J.V., O'Neill F.T., Sheridan J.T., Neipp C., Gallego S., Ortuno M. Holographic photopolymer materials with nonlocal and nonlinear response // *Proceedings of SPIE*. 2003. V. 5216. P. 127–138. <https://doi.org/10.1117/12.509138>
29. Bruder F.-K., Deuber F., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Jurbergs D., Rölle T., Weiser M.-S. Reaction-diffusion model applied to high resolution Bayfol HX photopolymer // *Proceedings of SPIE*. 2010. V. 7619. P. 76190I. <https://doi.org/10.1117/12.841956>
14. Peng H., Nair D.P., Kowalski B.A., Xi W., Gong T., Wang C., Cole M., Cramer N.B., Xie X., McLeod R.R., Bowman C.N. High performance graded rainbow holograms via two-stage sequential orthogonal thiol-click chemistry. *Macromolecules*, 2014, vol. 47, no. 7, pp. 2306–2315. <https://doi.org/10.1021/ma500167x>
15. Monte F.D., Martínez O., Rodrigo J. A., Calvo M. L., Cheben P. A volume holographic sol-gel material with large enhancement of dynamic range by incorporation of high refractive index species. *Advanced Materials*, 2006, vol. 18, no. 15, pp. 2014–2017. <https://doi.org/10.1002/adma.200502675>
16. Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer. *Polymers*, 2017, vol. 9, no. 10, pp. 472. <https://doi.org/10.3390/polym9100472>
17. Kargaran A., Ebrahimi M., Riaz M., Hosseiny A., Jafari G.R. Quartic balance theory: Global minimum with imbalanced triangles. *Physical Review*, 2020, vol. 102, no. 1, pp. 012310. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.102.012310>
18. Spiegler K.S., Kedem O. Thermodynamics of hyperfiltration (reverse osmosis): criteria for efficient membranes. *Desalination*, 1966, vol. 1, no. 4, pp. 311–326. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)80018-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)80018-1)
19. Lucarini V., Saarinen J.J., Peiponen K.-E., Vartiainen E.M. *Kramers-Kronig Relations in Optical Materials Research*. Springer Science & Business Media, 2005. 162 p. Springer Series in Optical Sciences, vol. 110. <https://doi.org/10.1007/b138913>
20. Kopyeva M.S., Filatova S.A., Kamynin V.A., Trikshev A.I., Kozlikina E.I., Astashov V.V., Loschenov V.B., Tsvetkov V.B. Ex-vivo exposure on biological tissues in the 2-μm spectral range with an all-fiber continuous-wave holmium laser. *Photonics*, 2021, vol. 9, no. 1, pp. 20. <https://doi.org/10.3390/photonics9010020>
21. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. *Bell System Technical Journal*, 1969, vol. 48, no. 9, pp. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>
22. Borisov V.N., Angervaks A.E., Ryskin A.I., Veniaminov A.V. Two-model spectral study of volume holograms in materials with diffusion-based mechanisms. *Optical Engineering*, 2019, vol. 58, no. 2, pp. 024102. <https://doi.org/10.1117/1.OE.58.2.024102>
23. Mees E.K., James T.H. *The Theory of the Photographic Process*. New York, Macmillan, 1967, chap. 7, pp. 132.
24. Pottier P., Strain M.J., Packirisamy M. Integrated microspectrometer with elliptical Bragg mirror enhanced diffraction grating on silicon on insulator. *ACS Photonics*, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 430–436. <https://doi.org/10.1021/ph400165j>
25. Liu P., Zhao Y., Li Z., Sun X. Improvement of ultrafast holographic performance in silver nanoprisms dispersed photopolymer. *Optics Express*, 2018, vol. 26, no. 6, pp. 6993–7004. <https://doi.org/10.1364/OE.26.006993>
26. Sheridan J.T., Lawrence J.R. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer. *Journal of the Optical Society of America A*, 2000, vol. 17, no. 6, pp. 1108–1114. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.17.001108>
27. Zhao G., Mouroulis P. Diffusion model of hologram formation in dry photopolymer materials. *Journal of Modern Optics*, 1994, vol. 41, no. 10, pp. 1929–1939. <https://doi.org/10.1080/09500349414551831>
28. Kelly J.V., O'Neill F.T., Sheridan J.T., Neipp C., Gallego S., Ortuno M. Holographic photopolymer materials with nonlocal and nonlinear response. *Proceedings of SPIE*, 2003, vol. 5216, pp. 127–138. <https://doi.org/10.1117/12.509138>
29. Bruder F.-K., Deuber F., Fäcke T., Hagen R., Hönel D., Jurbergs D., Rölle T., Weiser M.-S. Reaction-diffusion model applied to high resolution Bayfol HX photopolymer. *Proceedings of SPIE*, 2010, vol. 7619, pp. 76190I. <https://doi.org/10.1117/12.841956>

Авторы

Борисов Владимир Николаевич — кандидат физико-математических наук, независимый исследователь, Санкт-Петербург, Российская Федерация, orcid.org/0000-0003-3525-5698, pvlc2013@gmail.com

Зверев Андрей Дмитриевич — и.о. младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-3383-906X>, izverevad@gmail.com

Authors

Vladimir N. Borisov — PhD (Physics & Mathematics), Independent Researcher, Saint Petersburg, Russian Federation, orcid.org/0000-0003-3525-5698, pvlc2013@gmail.com

Andrey D. Zverev — Acting Junior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-3383-906X>, izverevad@gmail.com

Камынин Владимир Александрович — кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>, kamyninva@gmail.com

Копьева Мария Сергеевна — и.о. младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация; аспирант, Российский университет дружбы народов, Москва, 117198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-2113-6607>, mashutka_koryova@mail.ru

Окунь Роман Александрович — и.о. младший научный сотрудник, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-2461-9978>, romaokun@rambler.ru

Цветков Владимир Борисович — доктор физико-математических наук, заместитель директора, Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Москва, 119991, Российская Федерация, [sc 57218466660, https://orcid.org/0000-0002-1483-3308](https://orcid.org/0000-0002-1483-3308), tsvetkov@lsk.gpi.ru

Vladimir A. Kamynin — PhD (Physics & Mathematics), Senior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4265-3478>, kamyninva@gmail.com

Maria S. Kopyeva — Acting Junior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation; PhD Student, RUDN University, Moscow, 117198, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-2113-6607>, mashutka_kopyova@mail.ru

Roman A. Okun — Acting Junior Researcher, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-2461-9978>, romaokun@rambler.ru

Vladimir B. Tsvetkov — D.Sc., Deputy Director, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 119991, Russian Federation, [sc 57218466660, https://orcid.org/0000-0002-1483-3308](https://orcid.org/0000-0002-1483-3308), tsvetkov@lsk.gpi.ru

*Статья поступила в редакцию 15.07.2022
Одобрена после рецензирования 10.11.2022
Принята к печати 29.01.2023*

*Received 15.07.2022
Approved after reviewing 10.11.2022
Accepted 29.01.2023*



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»