

УДК 778.38.01:535

## ТОНКОСЛОЙНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ ФОТОПОЛИМЕРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ С БОЛЬШИМ ИЗМЕНЕНИЕМ ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

© Д. И. Деревянко<sup>1</sup>, Е. Ф. Пен<sup>2,3</sup>, В. В. Шелковников<sup>1,3</sup>, С. И. Алиев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

<sup>2</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: derevyanko@nioch.nsc.ru

Методом записи отражательных и пропускающих объёмных элементарных голограмм исследованы модифицированные голографические фотополимерные материалы (ГФПМ), разработанные в НИОХ СО РАН, обеспечивающие в результате постобработки высокую дифракционную эффективность (ДЭ) при малой толщине регистрирующего слоя. Получены образцы объёмных отражательных голограмм с ДЭ порядка 90 % при толщине регистрирующего слоя около 6 мкм и модуляции показателя преломления  $\Delta n$  не менее 0,036. Полученные голограммы имеют высокую прозрачность во всём видимом диапазоне спектра, малую усадку и хорошую однородность пространственной структуры решётки, о чём свидетельствует чёткая картина боковых лепестков контура спектрального отклика.

*Ключевые слова:* фотополимеры, отражательные и пропускающие голограммы, модуляция коэффициента преломления.

DOI: 10.15372/AUT20210603

**Введение.** В настоящее время голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) благодаря своим характеристикам и простоте использования нашли практическое применение в изобразительной и защитной голографии, оптической памяти, дисплеях, сенсорах [1–3].

Существуют коммерческие варианты ГФПМ, производимые фирмами DuPont (США) [4] и Covestro AG (Германия) [5], вместе с тем продолжают исследования и разработка новых оригинальных материалов [6, 7].

Важными параметрами ГФПМ являются толщина регистрирующего слоя  $T$  и амплитуда модуляции (изменения) показателя преломления  $\Delta n$ . Конкретные приложения формулируют свои требования к этим параметрам, например, в голографической 3D-памяти необходимы толстослойные материалы (более 250 мкм) с большим динамическим диапазоном изменения показателя преломления [8]. В голографических дисплеях, в частности устройствах дополненной реальности, коллиматорных прицелах [9], концентраторах и трекерах солнечного излучения [10], востребованы ГФПМ толщиной ( $T$ ) порядка 10 мкм и  $\Delta n$  не менее 0,03 для достижения широких контуров угловой и спектральной селективностей одновременно с высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) голограмм.

При использовании голограмм важно отсутствие рассеяния и поглощения света из-за неоднородностей ГФПМ и остаточных следов красителей, также большое значение имеет степень усадки толщины голограммы в результате процессов фотополимеризации и постобработки.

Известны разработки тонкослойных голографических материалов, например бихромованная желатина (БХЖ) имеет  $\Delta n$  порядка 0,1 и толщину слоя около 3 мкм, но она

нуждается в тщательной специфической мокрой пред- и постобработке, что накладывает ограничения для массового производства голографических элементов на основе БХЖ [11]. В работе [12] описаны результаты испытаний тонких плёнок на основе акриламидных производных полифторхалконов, с помощью которых получены рельефно-фазовые решётки со значениями ДЭ примерно 60 % и шириной контура угловой селективности  $55^\circ$ . Эти материалы чувствительны лишь в области 350–400 нм и требуют для записи решёток энергии не менее 6 Дж/см<sup>2</sup>. Привлекательными материалами являются фотополимеры Bayfol HX, имеющие  $\Delta n$  порядка 0,035 и толщину слоя 16 мкм, однако для них наблюдается снижение  $\Delta n$  до 0,01 при уменьшении пространственной частоты голографической решётки с 4525 до 1000 л/мм [5].

В работах [6, 7] при проведении радикальной полимеризации серосодержащих мономеров в полиуретановой матрице удалось достичь модуляции показателя преломления, равной 0,039 при толщине решётки 5 мкм и пространственной частоте около 2000 л/мм. Вместе с тем отмечено, что при уменьшении частоты решётки до 1000 л/мм величина  $\Delta n$  падала до 0,02. Кроме того, спектральный отклик отражательной голограммы показал значительное уширение контура спектральной селективности в сравнении с теоретическим ожиданием, что свидетельствует о неоднородности пространственной структуры голограммы, обусловленной, по мнению авторов, объёмной усадкой материала и перемодуляцией показателя преломления.

Цель данной работы — создание тонкослойных фотополимеров с большой модуляцией показателя преломления для применения в перспективных голографических устройствах, разработка новых методов записи, постобработки и характеристики объёмных отражательных и пропускающих голограмм.

**Фотополимерная композиция и технология приготовления образцов.** В предлагаемой работе использовался базовый состав патентозащищённой фотополимерной композиции [13], разработанный с обновлённой (оптимизированной) концентрацией основных компонент, чтобы обеспечить необходимые значения оптической плотности и модуляции показателя преломления в тонких слоях ГФПМ.

Композиция обладает чувствительностью в красной области видимого спектра и содержит следующие основные компоненты: полимерное связующее — поливинилацетат, краситель фотоинициатор — Метиленовый Голубой (МГ), соинициатор, мономер акриламидного типа, растворители — хлороформ и ацетон.

Концентрации красителя, спектр поглощения которого показан на рис. 1, подбирались с учётом рекомендаций [14] таким образом, чтобы при вариации толщины ГФПМ оптическая плотность на длине волны записи лазерного излучения составила 0,4.

Заданное количество раствора композиции наносили на предметное стекло ( $76 \times 26 \times 1$  мм) с помощью микропипетки. Предметное стекло располагали на отъюстированной горизонтальной поверхности. Полученный образец закрывали чашкой Петри, чтобы достичь избытка паров растворителя над поверхностью фотополимерного слоя и обеспечить равномерность покрытия. Слой сушили при наличии паров растворителя в течение 18–20 ч при температуре 23–26 °С и влажности 20 %. Количество нанесённой композиции определяет конечную толщину фотополимерного слоя. Например, в результате высушивания 10 мкл/см<sup>2</sup> фотополимерной композиции получается фотополимерный слой толщиной  $\approx 10$  мкм. После сушки на фотополимерный слой накатывали защитную полиэтилентерефталатную (ПЭТ) плёнку, которая предотвращает доступ кислорода к фоточувствительному слою, а также служит для защиты ГФПМ от механических повреждений и воздействий окружающей среды. Измерения толщин образцов проводились с помощью модернизированного интерференционного микроскопа МИИ-4 (ЗАО «Дифракция», Россия).

Для исследований было изготовлено несколько серий образцов с вариациями концентраций красителя МГ, а также с толщинами светочувствительного слоя от 5 до 25 мкм.

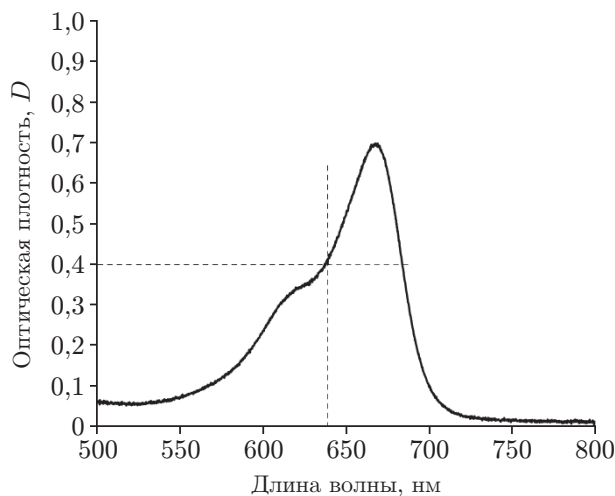


Рис. 1. Спектр поглощения красителя МГ в ГФПМ с оптимальной концентрацией

**Запись, постобработка и характеристика объёмных отражательных и пропускающих голограмм.** Отражательные голограммы изготавливались с использованием лазера с длиной волны излучения 639 нм (CNILASER, MSL-FN-639, 200 мВт) по схеме с двумя контрнаправленными пучками, угол схождения которых составлял  $110^\circ$  (в воздухе), а соотношение интенсивностей в плоскости записи  $\sim 1 : 1$ . Функциональная схема установки записи показана на рис. 2, где 1 — лазер; 2 — автоматизированный фотозатвор (Thorlabs, SH05/M); 3 — коллиматор; 4 — диафрагма; 5, 7, 8, 9 — плоские зеркала; 6 — светоделительный кубик; 10 — образец ГФПМ; 11 — спектрографическая галогенная лампа для формирования зондирующего пучка белого света; 12 — цифровой спектрофотометр (Avantes, AVASPEC-ULS2048CL-EVO); 13 — управляющий компьютер.

Оптимальная интенсивность и энергия засветки (по критерию максимума результирующей ДЭ) регулировались с помощью нейтрального светофильтра и автоматизированного фотозатвора и составляли в плоскости записи  $2 \text{ мВт/см}^2$  и  $20 \text{ мДж/см}^2$  соответственно.

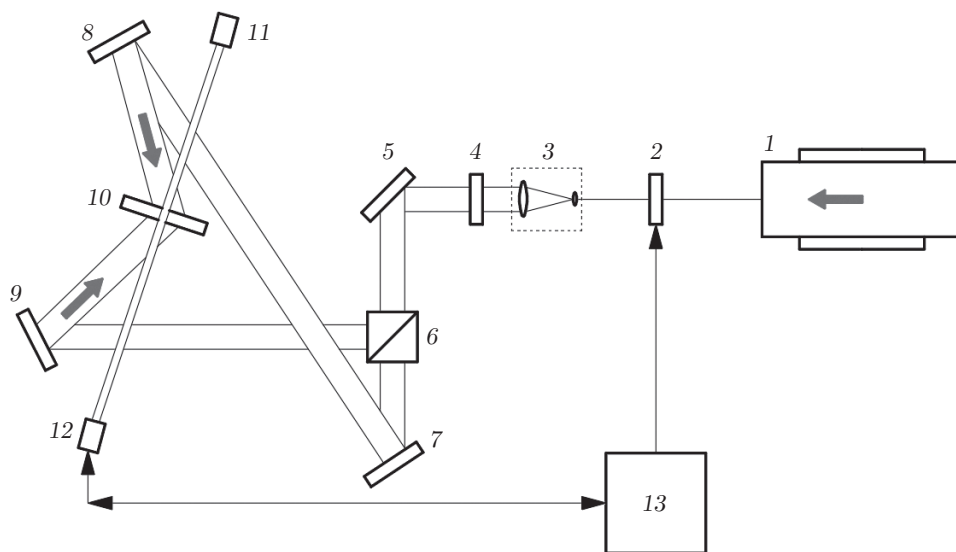


Рис. 2. Функциональная схема установки записи объёмных отражательных голограмм

Особенностью схемы, изображённой на рис. 2, является возможность контроля динамики ДЭ голограмм путём измерения спектра пропускания непосредственно в процессе записи с помощью цифрового спектрофотометра [15].

После записи голограмм осуществлялась экспериментально отлаженная процедура их постобработки путём одновременного УФ-облучения и нагрева при температуре  $\approx 100$  °С в течение 3 мин. Установлено [4], что при подобной постобработке происходит обесцвечивание остаточного красителя за счёт УФ-облучения и более глубокая степень полимеризации мономера.

Пропускающие голограммы записывались также с помощью лазера с длиной волны 639 нм с использованием стандартной симметричной двухпучковой схемы [7, 16], угол схождения пучков составлял  $45^\circ$  (в воздухе), соотношение их интенсивностей в плоскости записи — 1 : 1.

Пространственная частота объёмной отражательной голографической решётки примерно равна 4400 л/мм, а пропускающей — 1000 л/мм.

Характеризация полученных голограмм включала в себя измерение спектра пропускания отражательной голограммы, оценку величин дифракционной эффективности, модуляции показателя преломления, степени усадки толщины ГФПМ и ширины контура угловой селективности, измерение которого проводилось с помощью стенда на базе столика с вращением голограммы относительно зондирующего пучка [15].

Представленные расчётные кривые построены с учётом формул, описывающих дифракционную эффективность объёмных пропускающих и отражательных голограмм ( $\eta_t$ ,  $\eta_r$  соответственно), а также их угловую и спектральную селективность [16, 17]:

$$\eta_t(\theta) = \frac{\sin^2(\xi^2(\theta) + \nu^2)^{1/2}}{\xi^2(\theta) + \nu^2}; \quad \eta_r(\lambda) = \frac{k^2 \sinh^2(T\gamma(\lambda))}{k^2 \sinh^2(T\gamma(\lambda)) - C_R C_S \gamma^2(\lambda)}, \quad (1)$$

где для пропускающих голограмм (при равенстве длин волн записывающего и считывающего излучений)

$$\nu = \frac{\pi \Delta n T}{\lambda_0 (C_R C_S)^{1/2}}, \quad \xi(\theta) = \frac{T \vartheta_t(\theta)}{2 C_S}, \quad \vartheta_t(\theta) = (\theta - \theta_b) K \cos \theta_b,$$

$$C_S = C_R = \cos \theta_R, \quad |\mathbf{K}| = \frac{2\pi}{d}, \quad d = \frac{\lambda_0}{2\bar{n} \sin \theta_b},$$

$\theta_b = (|\theta_R| + |\theta_S|)/2$  — угол Брэгга, а для отражательных голограмм

$$\gamma^2(\lambda) = -\frac{\vartheta_r^2(\lambda)}{4C_S^2} - \frac{k^2}{C_R C_S}, \quad \vartheta_r(\lambda) = \frac{4\pi\bar{n} \cos_R \theta_b}{\lambda_0} \left( \cos \theta_R - \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \cos \theta_b \right),$$

$$C_R = \cos \theta_R, \quad C_S = \cos \theta_R - 2 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right) \cos \theta_b, \quad k = \frac{\pi \Delta n}{\lambda}.$$

Для простоты расчётов предполагается симметричная геометрия записывающих пучков, а  $\bar{n}$ ,  $\Delta n$  — среднее значение и амплитуда модуляции показателя преломления регистрирующей среды;  $\theta_S$ ,  $\theta_R$ ,  $\theta$  — углы падения предметного, опорного и считывающего пучков (в среде);  $\lambda_0$ ,  $\lambda$  — длины волн излучения, используемого при записи и при считывании голограмм соответственно.

При строгом соблюдении брэгговских условий считывания голограмм  $\vartheta_r(\lambda) = 0$ ,  $\vartheta_t(\theta) = 0$ , тогда

$$\eta_r = \tanh^2(\nu); \quad \eta_t = \sin^2(\nu); \quad \nu = \pi T \Delta n / \lambda_0 \sqrt{C_R C_S}. \quad (2)$$

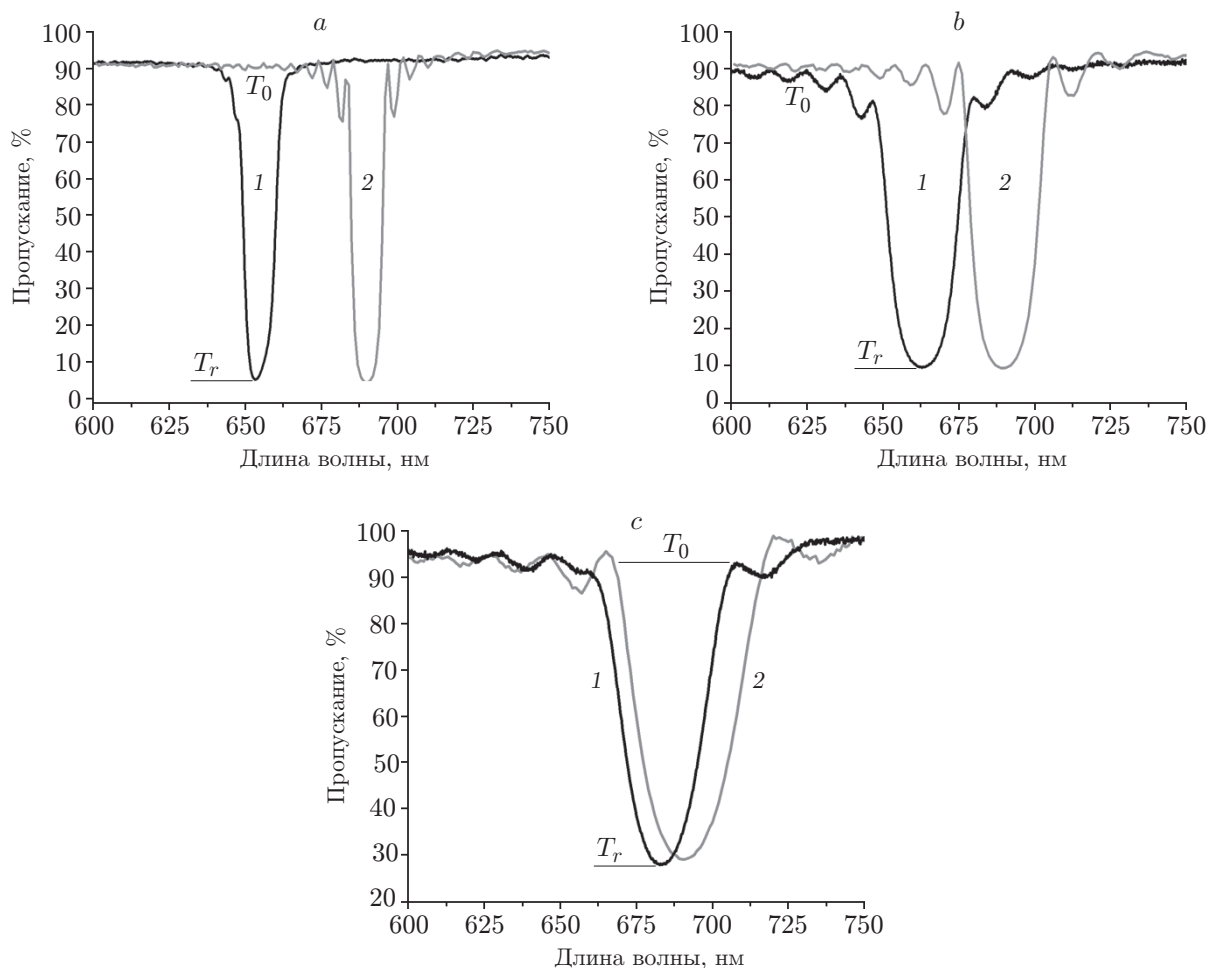


Рис. 3. Экспериментальные (кривые 1) и расчётные (кривые 2) спектры пропускания отражательных голограмм с толщинами слоёв: а — 25 мкм; б — 10 мкм; с — 6 мкм

**Анализ экспериментальных данных.** На рис. 3 показаны экспериментальные (1) и расчётные (2) кривые контуров спектрального отклика образцов отражательных голограмм с толщинами, равными 25, 10 и 6 мкм, изготовленных в соответствии с описанной процедурой записи и постобработки.

Экспериментальные значения ДЭ отражательных голограмм оценивались с помощью формулы

$$\eta_r = (1 - T_r/T_0) \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $T_r$  — пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика,  $T_0$  — остаточное пропускание образца ГФПМ вне участка голограммы.

Например, в рассматриваемых случаях для голограммы с толщиной слоя 25 мкм значения пропускания света  $T_r$  и  $T_0$  равны 5 и 95 % соответственно, поэтому согласно вышеприведённой формуле ДЭ составляет примерно 95 %; характеристики записанных отражательных голограмм с разными толщинами приведены в табл. 1.

С уменьшением толщины ГФПМ в полном соответствии с теоретическими ожиданиями наблюдается увеличение ширины контуров спектрального отклика на полувысоте (FWHM): так, для голограмм толщиной 25 мкм она составила 10 нм, а для толщины

Таблица 1

Экспериментальные данные толщин ГФПМ,  $\Delta n$ , ДЭ, степени усадки для отражающих голограмм

Толщина ГФПМ, мкм	$T_0$ , %	$T_r$ , %	ДЭ, %	$\Delta n$	FWHM, нм	Степень усадки, $S_{eff}$ , %
25	95	5	95	0,018	11	5,35
10	93	10	90	0,036	25	3,91
6	95	25	74	0,04	30	1

10 мкм — свыше 25 нм. На рис. 3, *b* и 3, *c* отчётливо видны боковые лепестки контура спектрального отклика, их наличие свидетельствует об однородности пространственной структуры решётки по глубине голограммы. Напротив, отсутствие этих лепестков (см. рис. 3, *a*) и тем более значительное несимметричное уширение контура, отмеченное в [7], указывает на неравномерное распределение амплитуды модуляции показателя преломления по глубине голограммы, а также нарушение периодичности и направления вектора решётки [18].

При указанных ранее параметрах схемы записи, толщине и ДЭ голограммы с учётом формул (1)–(3) сходство расчётных и экспериментальных данных отражательных голограмм по глубине и ширине спектрального отклика достигается при величине  $\Delta n$ , равной 0,018 для голограммы с толщиной слоя 25 мкм (см. рис. 3, *a*), и  $\Delta n$  не менее 0,036 для толщины 10 мкм (см. рис. 3, *b*). Отметим, что значению дифракционной эффективности 74 % при толщине слоя 6 мкм соответствует расчётное значение  $\Delta n$  около 0,04, что заметно больше, чем у голограмм с толщинами 10 и 25 мкм.

Подбор значений переменных  $T$  и  $\Delta n$  осуществлялся с учётом схождения расчётных и экспериментальных данных по глубине и ширине спектрального отклика, при этом не преследовалась степень схождения со среднеквадратическим отклонением (СКО) меньше 5%, поскольку воспроизводимость экспериментальных данных была такого же порядка.

Расчётные кривые получены с учётом дисперсии спектра пропускания участка ГФПМ, не экспонированного лазерным излучением, но подвергнутого постобработке (рис. 4). Видно, что спектр имеет высокое пропускание во всём видимом диапазоне и лишь незначительные следы остаточного красителя в синей области спектра.

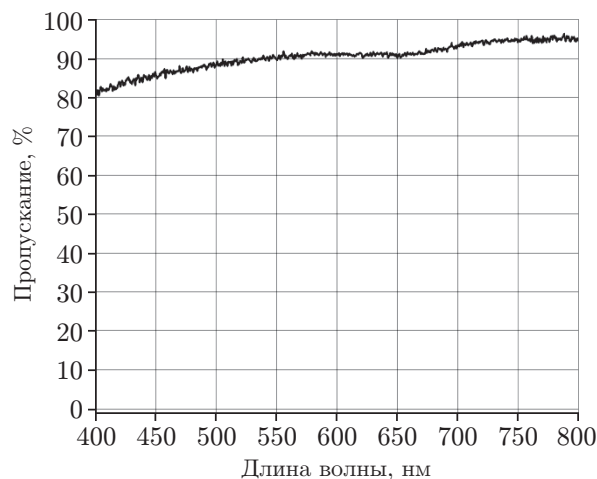


Рис. 4. Спектр пропускания неэкспонированного участка ГФПМ, подвергнутого постобработке

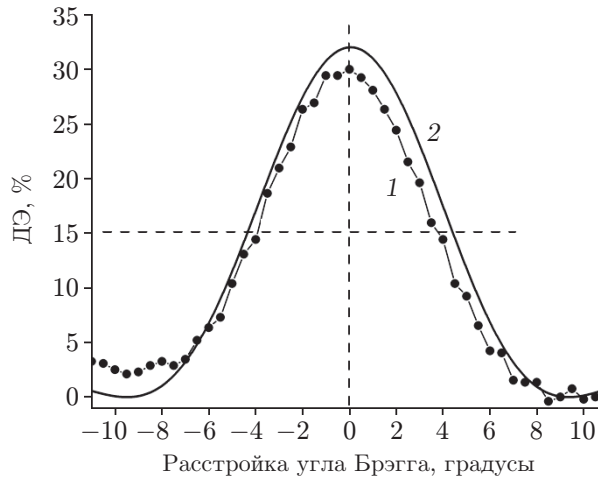


Рис. 5. Экспериментальный (1) и расчётный (2) графики контура угловой селективности пропускающей голограммы

Во всех проведённых экспериментах замечено отличие в длинах волн максимумов экспериментального  $\lambda_{\text{эксп}}$  и теоретического [16] спектральных откликов ( $\lambda_{\text{теор}} = \lambda_0 / \cos(\arcsin(\theta_R)) = 690$  нм). Так, на рис. 3 значения  $\lambda_{\text{эксп}}$  для голограмм с толщинами 25, 10 и 6 мкм составляют 653, 663 и 683 нм соответственно. Спектральный сдвиг пика отражения голограммы объясняется эффективной усадкой ГФПМ [19]. В процессе фотополимеризации происходит увеличение плотности ГФПМ, в результате чего толщина плёнки ГФПМ уменьшается, следовательно, уменьшается и период голографической решётки, что вызывает коротковолновый спектральный сдвиг. Однако в результате радикальной полимеризации происходит увеличение среднего значения показателя преломления ГФПМ, которое приводит к обратному эффекту — смещению спектрального отклика в длинноволновую область. Эффективная усадка  $S_{\text{eff}} = (1 - \lambda_{\text{эксп}}/\lambda_{\text{теор}}) \cdot 100\%$  учитывает оба указанных фактора. В рассматриваемых нами экспериментах  $S_{\text{eff}}$  составила 5,35, 3,91 и 1 % для ранее указанных толщин голограмм. Можно предположить, что снижение эффективной усадки при малой толщине ГФПМ связано как с уменьшением геометрической усадки, так и увеличением среднего значения показателя преломления из-за специфики фотополимеризации. Эта гипотеза требует, конечно, дополнительных исследований природы усадки в ГФПМ и методов её характеристики, подобных работам [20, 21].

На рис. 5 показаны экспериментальный и расчётный (кривые 1 и 2 соответственно) графики контура угловой селективности пропускающей голограммы с  $T \approx 10$  мкм. Наилучшее сходство кривых получено при условии, что  $\Delta n$  составляет порядка 0,012. Ширина контура на его полувисоте составила примерно  $9^\circ$ . Экспериментальное значение ДЭ этой голограммы определялось по формуле

$$\eta_t = \frac{I_1}{I_1 + I_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где  $I_1$  и  $I_0$  — интенсивности пучков: дифрагированного в первый порядок и прошедшего сквозь голограмму без дифракции.

Видно, что у исследованной пропускающей голограммы значения ДЭ и амплитуды модуляции показателя преломления заметно ниже, чем в случае отражательной голограммы при той же толщине.

Таким образом, с уменьшением пространственной частоты голографической решётки с 4400 до 1000 л/мм наблюдается снижение дифракционной эффективности с 90 до 30 %,

а  $\Delta n$  — с 0,036 до 0,015. Это явление обычно называют срезом (cutoff) низких пространственных частот [5], которое авторы связывают с эффектами диффузионного размытия.

**Заключение.** Разработаны отечественные голографические фотополимерные материалы, обеспечивающие в результате постобработки высокую дифракционную эффективность объёмных отражательных и пропускающих голограмм при малой толщине регистрирующего слоя; в частности, получены образцы отражательных голограмм с ДЭ примерно 74 % при толщине регистрирующего слоя 6 мкм за счёт модуляции показателя преломления  $\Delta n$  порядка 0,04. Вместе с тем установлено, что для пропускающих голограмм с пространственной частотой решётки менее 1000 л/мм при такой же толщине слоя ДЭ снижается до 30 %, а  $\Delta n$  — до 0,015. Кроме того, замечено, что с уменьшением толщины ГФПМ эффективная усадка уменьшается. Эти факты требуют дальнейшего исследования.

Полученные голограммы имеют высокую прозрачность во всём видимом диапазоне, малую усадку и хорошую однородность пространственной структуры решётки, об этом свидетельствует чёткая картина боковых лепестков контура спектрального отклика.

Результаты работы могут быть использованы при создании новых голографических элементов и устройств, например защитных голограмм, экранов дополненной реальности, элементов концентраторов солнечного излучения и др.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность к.х.н. Н. А. Орловой, к.х.н. А. Д. Бухтояровой за полезные обсуждения результатов работы и ведущему инженеру Н. Н. Вьюхиной за помощь в проведении экспериментов по измерению контуров угловой селективности пропускающих голограмм.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках НИР по государственному заданию № 121022000126-9 (государственная регистрация № АААА-А21-121011490013-7).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vorzobova N., Sokolov P.** Application of photopolymer materials in holographic technologies // *Polymers*. 2019. **11**, N 12. DOI: 10.3390/polym11122020.
2. **Bruder F.-K., Bang H., Fäcke T. et al.** Precision holographic optical elements in Bayfol HX photopolymer // *Proc. SPIE*. 2016. **9771** P. 977103\_1–21.
3. **Akbari H., Naydenova I., Martin S.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications // *Appl. Opt.* 2014. **53**, Iss. 7. P. 1343–1353.
4. **Gambogi W. J., Weber A. M., Trout T. J.** Advances and applications of DuPont holographic photopolymers // *Proc. SPIE*. 1993. **2043**. P. 2–13.
5. **Bruder F.-K., Fäcke T., Rölle T.** The chemistry and physics of Bayfol HX film holographic photopolymer // *Polymers*. 2017. **9**, N 10. P. 472–494.
6. **Alim M. D., Glugla D. J., Mavila S. et al.** High dynamic range ( $\Delta n$ ) two-stage photopolymers via enhanced solubility of a high refractive index acrylate writing monomer // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. **10**, N 1. P. 1217–1224.
7. **Hu Y., Kowalski B. A., Mavila S. et al.** Holographic photopolymer material with high dynamic range ( $\Delta n$ ) via thiol-ene click chemistry // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2020. **12**, N 39. P. 44103–44109.
8. **Dhar L., Curtis K., Tackitt M. et al.** Holographic storage of multiple high-capacity digital data pages in thick photopolymer systems // *Opt. Lett.* 1998. **23**, N 21. P. 1710–1712.
9. **Pat. 5483362 US.** Compact holographic sight /A. M. Tai, J. Upatnieks, E. J. Siczka. Publ. 09.01.1996.



10. **Marin-Saez J., Atencia J., Chemisana D., Collados M.** Characterization of volume holographic optical elements recorded in Bayfol HX photopolymer for solar photovoltaic applications // *Opt. Mater. Express*. 2016. **6**, N 1. P. 252–263.
11. **Castro J. M., Zhang D., Myer B., Kostuk R. K.** Energy collection efficiency of holographic planar solar concentrators // *Appl. Opt.* 2010. **49**, N 5. P. 858–870.
12. **Деревяшкин С. В., Соболева Е. А., Шелковников В. В., Спесивцев Е. В.** Голографическая запись в микронных плёнках на основе полифторхалконов // *Химия высоких энергий*. 2018. **52**, № 6. С. 507–514.
13. **Пат. 2552351 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне /В. В. Шелковников, Е. В. Васильев, В. В. Русских, Л. В. Эктова, Е. Ф. Пен. Опубл. 10.06.2015; Бюл. № 16.
14. **Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials // *Opt. Mem. Neural Networks*. 2007. **16**, N 2. P. 75–83.
15. **Бабин С. А., Васильев Е. В., Ковалевский В. И. и др.** Методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов // *Автометрия*. 2003. **39**, № 2. С. 57–70.
16. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // *The Bell Syst. Technical Journ.* 1969. **48**, N 9. P. 2909–2947.
17. **Brotherton-Ratcliffe D., Shi L., Osanlou A., Excell P.** Comparative study of the accuracy of the PSM and Kogelnik models of diffraction in reflection and transmission holographic gratings // *Opt. Express*. 2014. **22**, N 2. P. 32384–32405.
18. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю., Шелковников В. В.** Влияние неоднородности объёмных голограмм в фотополимерных материалах на их селективные свойства // *Оптический журнал*. 2006. **73**, № 7. С. 60–65.
19. **Stevenson S. H., Steijn K. W.** Method for characterization of film thickness and refractive index in volume holographic materials // *Proc. SPIE*. 1995. **2405**. P. 88–97.
20. **Moothanchery M., Bavigadda V., Toal V., Naydenova I.** Shrinkage during holographic recording in photopolymer films determined by holographic interferometry // *Appl. Opt.* 2013. **52**, N 35. P. 8519–8527.
21. **Борисов В. Н., Окунь Р. А., Бородина Л. Н., Лесничий В. В.** Экспериментальный метод определения направления усадки при голографической записи в среде BAYFOL HX // *Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики*. 2020. **20**, № 3. С. 307–317.

*Поступила в редакцию 25.05.2021*

*После доработки 11.06.2021*

*Принята к публикации 12.07.2021*