

Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и её использование для получения цветоделённых изображений

© В.В. Шелковников¹, Д.И. Деревянко¹, Е.Ф. Пен²

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

² Институт автоматки и электротометрии Сибирского отделения РАН, 630090 Новосибирск, Россия

e-mail: derevyanko@nioch.nsc.ru

Поступила в редакцию 09.06.2022 г.

В окончательной редакции 27.07.2022 г.

Принята к публикации 27.07.2022 г.

Исследовано влияние термической пост-обработки на спектральные свойства фотополимерных отражательных голограмм, записанных по схеме Денисюка. Установлено, что голограммы с нанесенной защитной лавсановой пленкой сохраняют высокую дифракционную эффективность $\sim 90\%$ и не приобретают дополнительной усадки при термической обработке в течение нескольких суток при температуре $80\text{--}90^\circ\text{C}$. Голограммы без защитной пленки, снятой после экспонирования, при нагревании в диапазоне температур $40\text{--}110^\circ\text{C}$ демонстрируют эффективную усадку до 17% без ухудшения дифракционной эффективности. Зависимость степени усадки от времени выдерживания голограммы при заданной температуре описывается функцией биэкспоненциального роста с насыщением. Рассчитаны параметры аппроксимирующей функции. Характерные времена усадки в диапазоне температур $40\text{--}110^\circ\text{C}$ уменьшаются от часов до минуты для быстрой компоненты и от десятков суток до десятков минут для медленной компоненты. Эффект большого смещения спектрального отклика использован для создания цветоделённых голограмм при записи изображения на одной длине волны лазерного излучения. Цветоделённые голограммы получены в двух вариантах: двухслойный вариант с усадкой одного из слоёв, однослойный вариант с использованием фоторезистивного рисунка и усадки.

Ключевые слова: отражательные фотополимерные голограммы, термическая усадка, спектральные сдвиги, цветоделённое изображение.

DOI: 10.21883/OS.2022.10.53626.3795-22

1. Введение

В настоящее время разрабатываются голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) [1–4], которые используются в изобразительной и защитной голографии, системах хранения данных, голографических сенсорах и дисплеях [5–9].

Как для пропускающих, так и отражательных фотополимерных голограмм характерен процесс усадки материала. Усадка протекает непосредственно в момент записи вследствие контракции мономера при радикальной полимеризации и в процессе пост-обработки. При этом происходит уменьшение периода записанных решёток, в случае записи отражательной голограммы усадка приводит к гипсохромному сдвигу максимума спектрального отклика. Известны разработки фотополимерных композиций с „малой“ усадкой [10,11], когда избегают применения низкомолекулярных акрилатных мономеров и используют разветвлённые олигомероподобные мономеры, разделяющие силоксановые звенья, оксирановые мономеры [12]. В частности, для водорастворимых ГФПМ на основе акрилатных мономеров в поливиниловом спирте достигнута усадка $\sim 3\%$ при

записи отражательных голограмм [13]. Близкие значения получены для коммерческих малоусадочных акрилатных композиций [14,15].

При фотополимеризации наряду с уменьшением толщины фотополимерного слоя происходит изменение плотности ГФПМ и, как следствие, среднего значения показателя преломления. Поэтому в [16] введено понятие эффективной усадки, учитывающей оба фактора. В работе [17] предложен спектроскопический метод измерения эффективной усадки отражательных фотополимерных голограмм непосредственно в процессе их записи.

Как правило, в исследованиях, посвященных усадке фотополимерных материалов, акцент делается на способах достижения малой усадки при фотополимеризации и пост-обработке. Создание ГФПМ с большой степенью усадки, на наш взгляд, также представляет фундаментальный и практический интерес. Управляемый гипсохромный сдвиг спектрального отклика голограммы в широком спектральном диапазоне может быть полезен для придания изобразительным или защитным голограммам необычных дополнительных свойств. Исследования

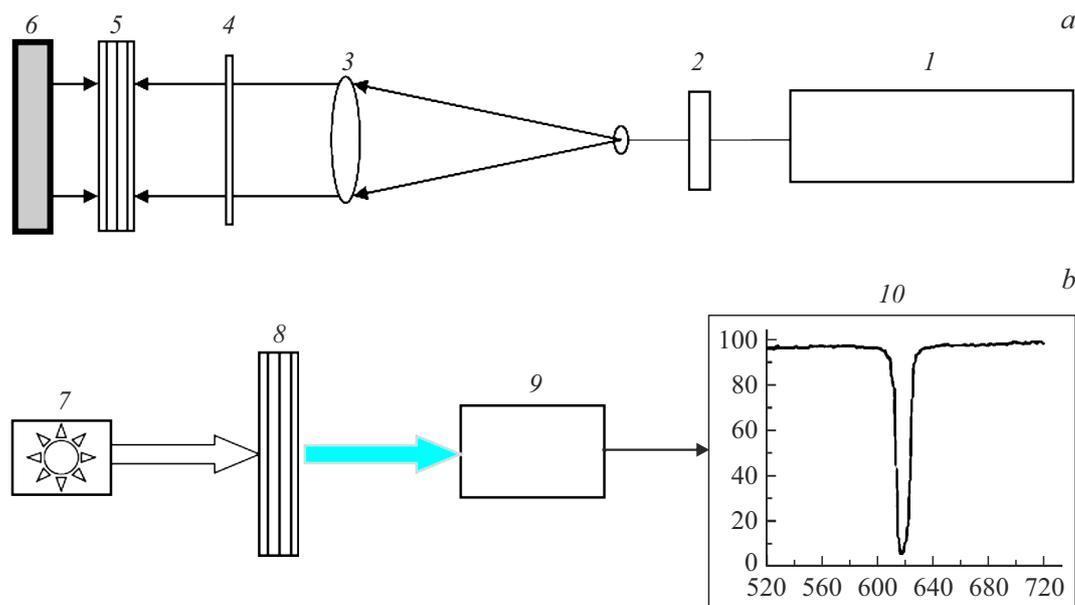


Рис. 1. Схемы установок для записи (а) и характеристики (б) объёмных отражательных голограмм: 1 — лазер (CNILASER, MSL-FN-639, 200 mW); 2 — автоматизированный фотозатвор (Thorlabs, SH05/M); 3 — двухлинзовый коллиматор, формирующий параллельный пучок; 4 — нейтральный светофильтр; 5 — образец ГФПМ; 6 — зеркало; 7 — галогенная лампа для формирования зондирующего пучка белого света; 8 — отражательная голограмма; 9 — цифровой спектрофотометр (Avantes, AVASPEC-ULS2048CL-EVO); 10 — управляющий компьютер и дисплей.

такой направленности в известных нам публикациях не представлены.

Целями настоящей работы являются: определение зависимости эволюции спектральных сдвигов отражательных голограмм в ГФПМ от времени при заданной температуре; выбор режима термической пост-обработки отражательных фотополимерных голограмм для достижения больших значений их спектральных сдвигов; реализация цветовых эффектов в двух- и однослойных ГФПМ за счёт использования усадки.

2. Экспериментальная часть

2.1. Объект исследования

Исследование влияния термической пост-обработки проводили в ГФПМ, чувствительном в красной области спектра и описанном в [18,19]. Композиция для получения ГФПМ содержала следующие основные компоненты: растворители, полимерное связующее (поливинилацетат), краситель Метиленовый Голубой, соинициатор, акриламидный мономер, полимеризующийся по свободнорадикальному механизму. Концентрацию красителя подбирали с учётом рекомендаций [20] таким образом, чтобы пропускание на длине волны записи лазерного излучения составляло 35–45%. До экспонирования 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. На основе данной композиции получены однослойные и двухслойные образцы ГФПМ толщиной по 20–30 μm , в которых были записаны отражательные монохромные голограммы.

Толщины голограмм и дополнительного фоторезистивного слоя были измерены с помощью компьютеризированного интерферометра МИИ-4 (ЗАО Дифракция, г. Новосибирск, Россия).

2.2. Запись, пост-обработка и характеристика объёмных отражательных голограмм

Запись голограмм проводилась с использованием лазера с длиной волны излучения 639 nm по схеме Ю.Н. Денисюка [20], объектом записи служило плоское металлическое зеркало с коэффициентом отражения $\sim 90\%$. Основные элементы этой схемы изображены на рис. 1, а.

Параллельный пучок лазерного излучения с длиной волны 639 nm диаметром 10 mm и с интенсивностью 1 mW/cm^2 , сформированный коллиматором, в данной схеме является опорным и направляется на образец фотополимера строго по нормали; далее прошедший сквозь ГФПМ пучок света отражается от зеркала, установленного непосредственно за фотополимером, создавая тем самым предметный пучок, который интерферирует с опорным в объёме ГФПМ, в результате чего образуется отражательная голограмма. Энергия засветки дозируется с помощью фотозатвора. Также для записи голограмм

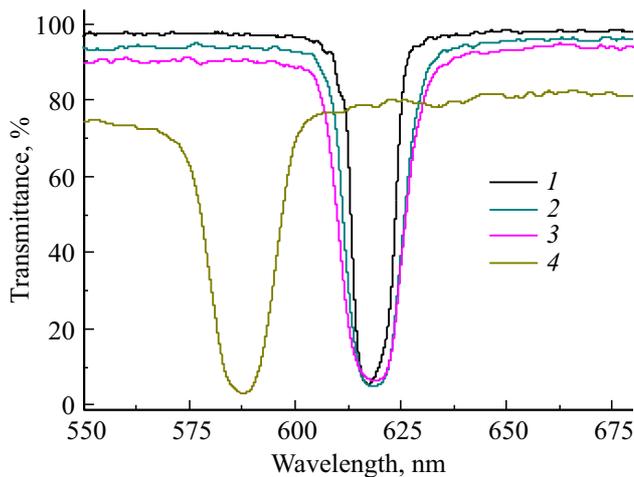


Рис. 2. Спектры пропускания голограмм при различных времени и температуре (в скобках) пост-термообработки: 1 — 0; 2 — 30 h (80°C); 3 — 16 h (90°C); 4 — 1 h (150°C).

использовали двухпучковую симметричную схему записи отражательных голограмм с углом схождения записывающих пучков 110° (в воздухе) и лазера с длиной волны излучения 639 nm [18]. В этом случае расчетная длина волны максимума спектрального отклика составляет 691 nm.

Из-за паразитных переотражений помимо основной голограммы формируются паразитные голограммы, однако экспериментально установлено, что их влияние на исследуемые нами эффекты незначительно.

После записи голограммы закрепляли путём пост-экспонирования всего образца галогенной лампой. Помимо световой пост-обработки дополнительно осуществляли термическую пост-обработку: путём выдерживания закреплённой голограммы в сушильном шкафу Venticell при заданной температуре и времени. Термической пост-обработке подвергали голограммы как при наличии на фотополимерном слое лавсановой защитной плёнки, так и без неё. Измерение дифракционной эффективности (ДЭ) и степени усадки голограммы проводили на установке, схема которой показана на рис. 1, б. Спектральные свойства отражательных голограмм определяли путём измерения параметров их спектров пропускания (формы, ширины и глубины контуров, длины волны в минимуме пропускания и др.). Для краткости обозначения спектрального отклика в целом нами используется также термин „рефлекс“.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Влияние термообработки на спектральные свойства голограмм с защитной пленкой

Одним из параметров, определяющих возможность использования голографических элементов на практике, является их устойчивость к температурным изменениям.

На рис. 2 представлено изменение спектрального отклика голограммы с толщиной слоя 25 μm при последовательном воздействии температуры 80, 90 и 150°C.

Экспериментальные значения ДЭ отражательных голограмм оценивались с помощью формулы

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

где T_r — пропускание голограммы на длине волны минимума контура спектрального отклика (рефлекса), T_0 — остаточное пропускание образца ГФПМ вне участка голограммы. Например, для голограммы с толщиной слоя 25 μm при значениях пропускания света T_r и T_0 , равных 5 и 95% соответственно, дифракционная эффективность составляет примерно 95%.

Степень усадки ΔS связана с относительным спектральным сдвигом отражательной голограммы и вычисляется по формуле

$$\Delta S = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1}, \quad (2)$$

где λ_1 — длина волны максимума исходного рефлекса отражательной голограммы после записи, λ_2 — длина волны рефлекса в результате пост-обработки. Заметим, что для безусловного ГФПМ теоретически ожидаемая длина волны рефлекса $\lambda_{исх}$ должна совпадать с длиной волны записывающего излучения, т.е. 639 nm, однако, как уже сказано выше, на практике непосредственно после записи наблюдается гипсохромный сдвиг рефлекса примерно на 20 nm, что соответствует степени усадки ~ 0.03 .

Из данных, представленных на рис. 2, видно, что в результате записи голограммы, пост-термообработки при 80°C на протяжении 30 h и дополнительной термообработки при 90°C на протяжении 16 h произошло незначительное увеличение ширины на полувысоте спектрального отклика голограммы с 11 до 15 nm. Дополнительная усадка голограммы при этом не наблюдается. Нагрев голограмм до 150°C приводит к дополнительному гипсохромному сдвигу рефлекса голограммы на 30 nm, в результате суммарная эффективная усадка составляет $\sim 8\%$ относительно длины волны 639 nm, однако происходит уменьшение пропускания за счёт возрастания светорассеивания, которое предположительно вызвано деструкцией полимерных и низкомолекулярных компонент композиции.

Проведенные эксперименты показывают, что записанные голограммы с нанесенной защитной пленкой устойчивы к термической пост-обработке до 100°C, сохраняют высокую ДЭ и не приобретают дополнительной усадки.

3.2. Влияние термообработки на спектральные свойства голограмм без защитной пленки

В отличие от ГФПМ, защищённых лавсановой плёнкой, термообработка голограмм при снятой лавсановой

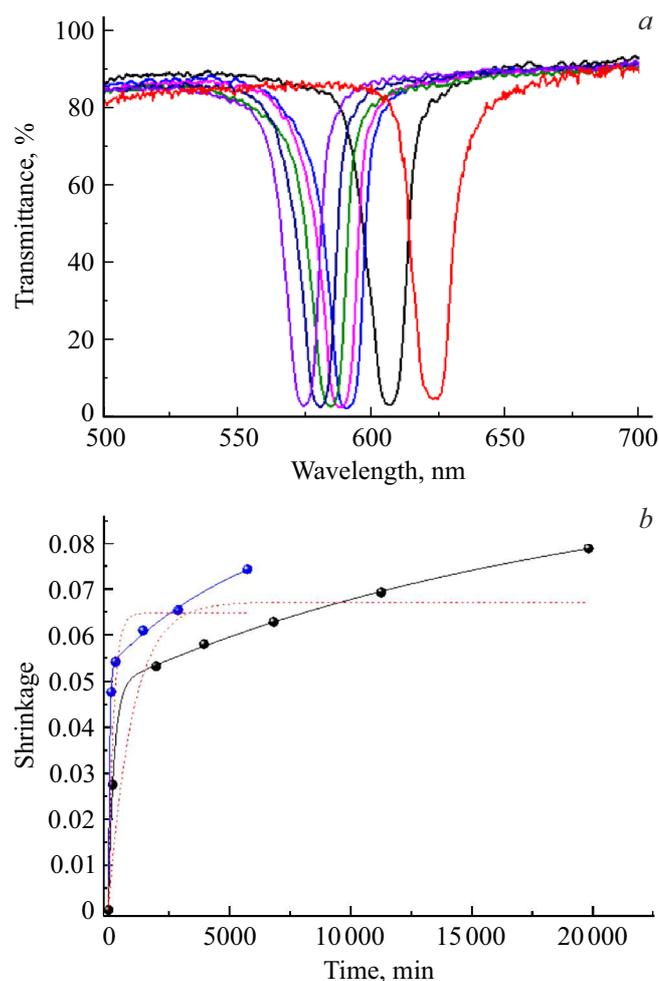


Рис. 3. (а) Графики сдвигов спектров пропускания голограмм в результате пост-термообработки без защитной пленки при 40°С в течение нескольких суток. (б) Изменение степени усадки голограмм от времени выдерживания при 40°С (чёрные точки) и 85°С (синие точки), аппроксимация данных по уравнению для биэкспоненциального роста (синяя и чёрная кривые) и моноэкспоненциального роста (красные пунктирные кривые).

пленке приводит к значительным гипсохромным сдвигам голографических рефлексов даже при низких температурах.

На рис. 3,а показаны рефлексы отражательной голограммы после стадий записи, пост-экспозиционного облучения галогенной лампой и последующей термообработки голограммы с удаленной защитной пленкой при 40°С.

Аналогичные данные по кинетике степени усадки были получены для разных температур. Для двух температур они приведены на рис. 3,б. Степень усадки при заданной температуре с течением времени стремится к насыщению. При описании усадки как следствия релаксации напряжений полимерной матрицы, возникших при фотополимеризации ГФПМ, следует учитывать полиэкспоненциальный характер спада напряжения в по-

лимерах с несколькими различающимися временами релаксации [21]. При экспоненциальном спаде напряжения обратной функцией, ассоциированной с экспонентой, является асимптотически ограниченный экспоненциальный рост

$T, ^\circ\text{C}$	A_1	t_1, h	A_2	t_2, h
40	0.05	3.7	0.047	324
60	0.064	3.1	0.013	70
85	0.053	0.95	0.025	57
95	0.07	0.06	0.047	0.43
105	0.082	0.07	0.037	0.58
110	0.1	0.02	0.03	0.11

лимерах с несколькими различающимися временами релаксации [21]. При экспоненциальном спаде напряжения обратной функцией, ассоциированной с экспонентой, является асимптотически ограниченный экспоненциальный рост

$$y' = A \exp(-x/t) \Rightarrow y = A(1 - \exp(-x/t)). \quad (3)$$

Принимая экспоненциальный характер релаксации матрицы ГФПМ при нагревании и соответствующий ей рост усадки, из полученных данных (рис. 3, б) следует предположить, что в области ограниченных температур 40–100°С наблюдается по крайней мере биэкспоненциальный характер накопления усадки с быстрой и медленной компонентой. Поэтому для аппроксимации увеличения спектральных сдвигов отражательных голограмм при усадке во времени была применена функция биэкспоненциального асимптотически ограниченного роста.

$$y = A_1(1 - \exp(-x/t_1)) + A_2(1 - \exp(-x/t_2)), \quad (4)$$

где A_1, A_2 — уровни насыщения, t_1, t_2 — характерные времена.

Вычисленные параметры уравнения (4) приведены в таблице. Отметим, что сумма коэффициентов ($A_1 + A_2$) даёт максимальное значение усадки при заданной температуре.

Из полученных параметров аппроксимации по уравнению (4) следует, что амплитуды быстрого и медленного процессов усадки для низкой температуры 40°С примерно равны, но при повышении температуры соотношение компонент меняется до 3:1 в пользу быстрой компоненты. Полная усадка в процентах составляет 10–14%. Характерные времена быстрой и медленной компонент закономерно уменьшаются при повышении температуры: t_1 от 3 часов при 40, 60°С до минуты при 110°С, t_2 соответственно уменьшается от десятков суток до десятков минут. Наибольшие изменения, ускоряющие усадку, происходят при температуре в области 100°С. При нагреве голограммы при 150°С полная усадка на 12% происходит за одну минуту. Дальнейшее повышение температуры приводит к увеличению светорассеивания образца.

Максимальное значение усадки 17% наблюдали для одного из образцов при нагревании до температуры

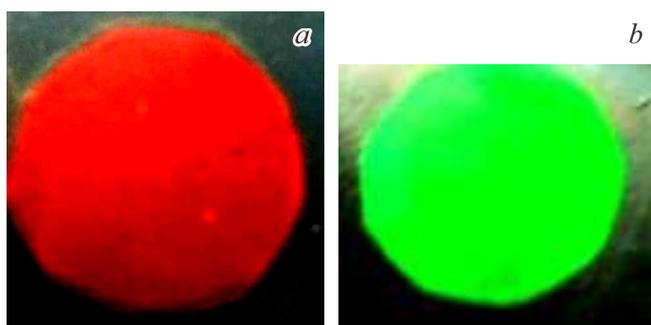


Рис. 4. Фотографии рефлексов отражательных голограмм до (а) и после (b) максимальной усадки.

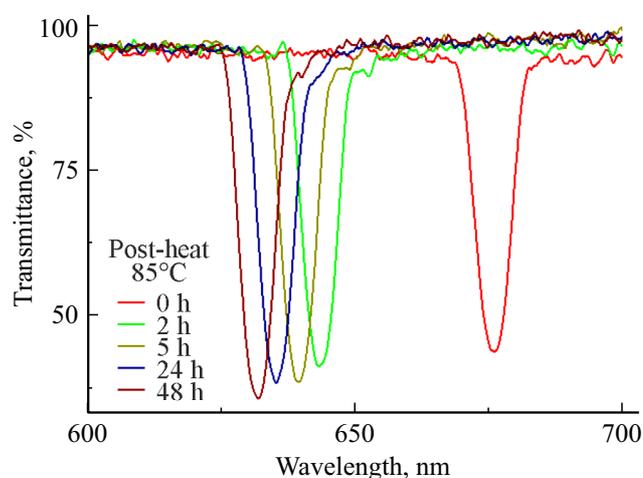


Рис. 5. Спектральные сдвиги пиков пропускания голограмм во времени при температуре 85°C.

выше 100°C. Визуально при спектральном сдвиге рефлекса, близком к насыщению, цвет голограммы изменяется с красного на жёлто-зелёный, как показано на фотографиях рис. 4.

Отметим, что в ходе пост-термообработки ГФПМ без защитной плёнки до температуры 110°C не наблюдается ухудшения дифракционных характеристик голограмм: величина ДЭ ~ 94%, пропускание за пределами пика поглощения голограммы составляет 85–90%. Более того, например, при термообработке голограммы при температуре 80–85°C в течение 2 суток наблюдалось увеличение ДЭ по мере гипсохромного сдвига, как это показано на рис. 5.

3.3. Создание цветоделённых двухслойных голограмм с помощью усадки фотополимерных слоев

Эффект контролируемой усадки ГФПМ без защитной пленки был использован для создания двухцветных голограмм в вариантах однослойных и двухслойных ГФПМ, схемы конструкций которых приведены на рис. 6.

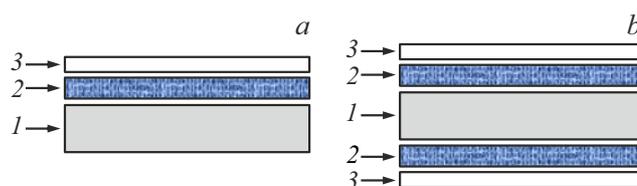


Рис. 6. Схемы конструкций однослойного (а) и двухслойного (b) ГФПМ: 1 — стеклянная подложка, 2 — фотополимер, 3 — защитная пленка.

Вначале на однослойном образце записывалась первая отражательная голограмма, которая подвергалась пост-экспозиционной обработке; после чего на тыльную сторону стеклянной подложки наносили второй слой ГФПМ с защитной пленкой, осуществлялась запись и пост-экспозиционная обработка второй голограммы, затем снимали защитную пленку одного из фотополимерных слоев, далее всю двухслойную структуру подвергли термической пост-термообработке при 45°C. Спектральные отклики полученной двухслойной цветной голограммы до и после пост-термообработки приведены на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что после пост-термообработки голограммы обладают большой шириной спектрального отклика (FWHM составляют 12 и 9 nm), ДЭ голограмм, полученных в каждом слое, составляет ~ 85%, чего не всегда возможно добиться в случае однослойных двухцветных ГФПМ [16]. По сравнению с однослойными голограммами наблюдается уменьшение пропускания из-за возрастания потерь света при прохождении двух слоев. Сдвиг максимума рефлекса отражательной голограммы с удаленной защитной пленкой составил ~ 36 nm. Отметим, что после нанесения защитной пленки на основе полипропилена на не закатанную часть ГФПМ и дополнительной обработки при 85°C на протяжении 24 h спектр пропускания двухслойной голограммы был идентичен исходному. Таким образом, достигнутый спектральный сдвиг при контролируемой усадке ГФПМ без защитной пленки может быть зафиксирован повторным защитным покрытием и использован для создания двухслойных цветных голограмм. Поскольку ширина спектрального рефлекса голограммы составляет 12 nm, то возможность фиксации спектрального сдвига, в свою очередь, создаёт принципиальную возможность проводить полихроматическое разделение цветов, фиксируя промежуточные цвета. При этом важно стремиться получить ГФПМ с максимально большой степенью усадки.

3.4. Создание голограмм со цветоделённым изображением

На рис. 8, а приведены фотографии голограммы зеркала, подвергнутой термообработке 50°C в течение 100 h при частично удалённой лавсановой плёнке и участок этой голограммы, снятый на электронном микроско-

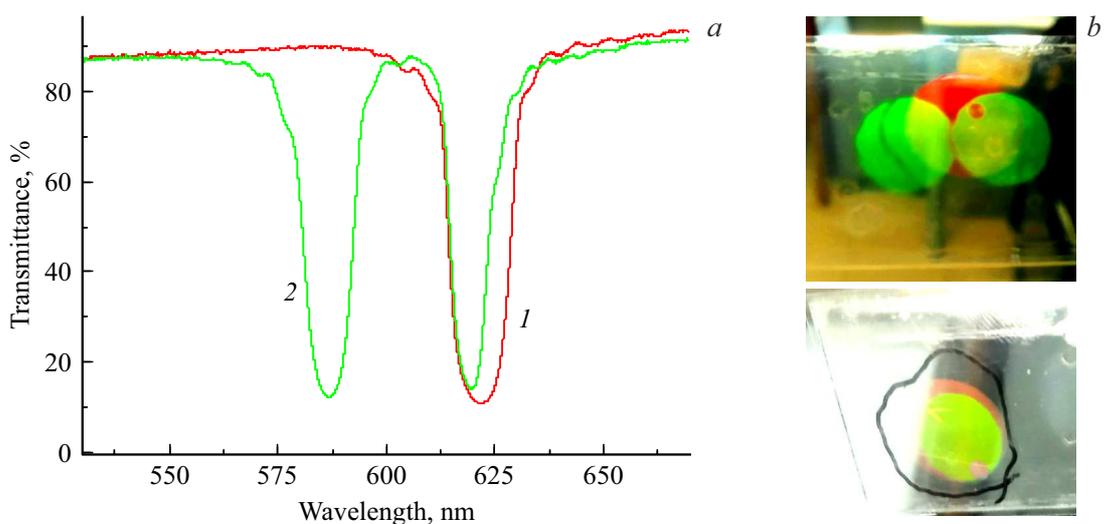


Рис. 7. Спектры пропускания двухслойной голограммы до и после пост-термообработки (*a*, кривые 1 и 2 соответственно); фотографии двухслойной голограммы (*b*).

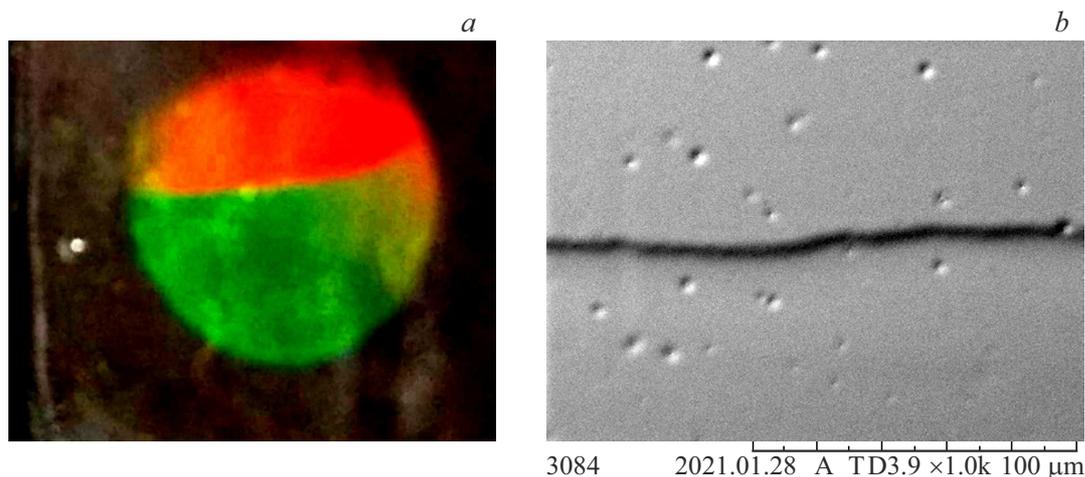


Рис. 8. Фотография (*a*) и СЭМ-изображение (*b*) голограммы (области с нанесенной и удаленной защитной пленкой) после пост-термообработки.

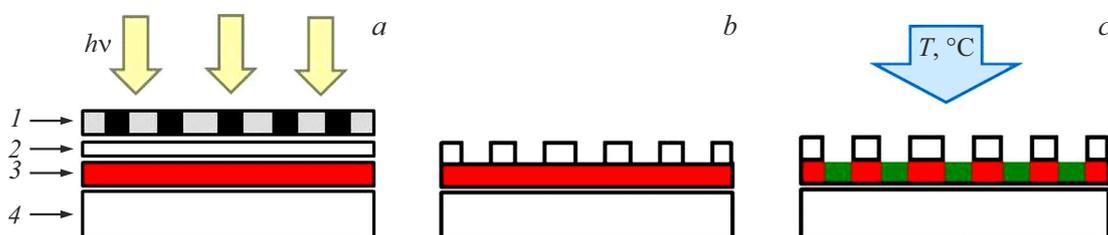


Рис. 9. Этапы создания комбинированной цветной голограммы с помощью метода фотолитографии: облучение (*a*), проявление (*b*), термообработка (*c*); фотошаблон с нанесенным макроизображением (1), фоторезист (2), ГФПМ с записанной голограммой (3), предметное стекло (4).

пе (рис. 8, *b*). При этом чётко видна граница раздела между красной и зелёной областями, связанная с селективностью усадки для защищённых и не защищённых участков голограммы. Поскольку в результате

один изначально монохромный слой разделяется на два цвета, то данный эффект обозначает получение бихроматичного цветоделённого изображения из монохромного.

Проявление селективной усадки позволяет разделить цвета изначально монохромного изображения, используя прозрачный трафарет, защищающий определённые места голограммы. Эффект гипсохромного смещения спектрального отклика голограммы при термической пост-обработке ГФПМ без защитной пленки был использован для получения цветоделённого изображения в монохромных голограммах с помощью фотолитографии и включал следующие основные этапы: нанесение фоторезиста на экспонированный ГФПМ, облучение через фотошаблон, проявление необлученных областей фоторезиста (рис. 9).

Для создания цветоделённого изображения на слой фотополимера с записанной голограммой был нанесен негативный фоторезист на основе гибридного светочувствительного материала [22,23]. Фоторезист наносили методом полива до равномерного растекания. В качестве фотошаблона использована полиэтилентерефталатная пленка с нанесенным буквенным изображением. Экспонирование фоторезиста осуществляли УФ облучателем CS-410. После экспонирования проявление фоторезиста проводили в ванне растворителя в течение 20 с при комнатной температуре. В итоге на голограмме был сформирован рельеф толщиной $\sim 100 \mu\text{m}$. Затем была осуществлена термообработка голограммы в сушильном шкафу при температуре 50°C в течение 5 дней.

На рис. 10 приведены фотографии голограммы с фоторезистом после термообработки и границы полимеризованного и проявленного фоторезиста.

Из фотографий видно, что в области с отвержденным фоторезистом голограмма имеет отклик в красной области видимого спектра, в то время как в проявленных областях фоторезиста голограмма вследствие спектрального сдвига после термообработки имеет отклик в желто-зеленой области. Цвет изображения после усадки можно контролировать путём установки времени выдерживания при заданной температуре, используя данные, приведённые выше.

Таким образом, разработанный процесс пост-обработки позволяет создавать отражательные голограммы с цветоделённым изображением при записи лазерным излучением на одной длине волны с помощью фотолитографии и последующей термостимулированной усадки.

Заключение

Исследовано влияние термической пост-обработки на спектральные характеристики отражательных голограмм. Установлено, что голограммы с нанесенной защитной лавсановой пленкой сохраняют высокую дифракционную эффективность 90% и не приобретают дополнительной усадки при термической обработке в течение нескольких суток при температуре $80\text{--}90^\circ\text{C}$.

Для голограмм без защитной пленки при нагревании в диапазоне температур $40\text{--}110^\circ\text{C}$ происходит эффек-

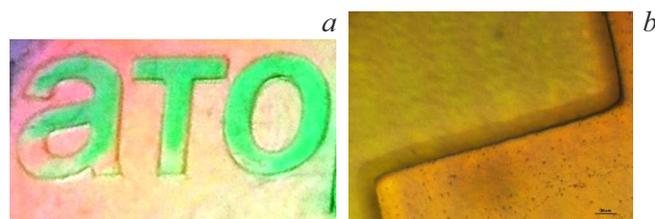


Рис. 10. Фотографии голограмм с фоторезистом: (а) фотография голограммы после термообработки, (б) граница проявленного фоторезиста.

тивная усадка до 14% без ухудшения их дифракционной эффективности. Зависимость степени усадки от времени выдерживания голограммы при заданной температуре описывается функцией биэкспоненциального роста с насыщением. Рассчитаны параметры аппроксимирующей функции. Характерные времена усадки в диапазоне температур $40\text{--}110^\circ\text{C}$ уменьшаются от часов до минуты для быстрой компоненты и от десятков суток до десятков минут для медленной компоненты.

Показано применение эффекта большого смещения спектрального отклика отражательной голограммы для создания цветоделённых изображений при записи монохромного изображения на одной длине волны лазерного излучения. Цветоделённые голограммы получены в двух вариантах: двухслойный вариант с усадкой одного из слоёв, однослойный вариант с использованием фоторезистивного рисунка и усадки. Эффект большого спектрального сдвига фотополимерной отражательной голограммы при пост-обработке представляет интерес при создании защитных голограмм.

Список литературы

- [1] J. Zheng, G. Sun, Y. Jiang, T. Wang, A. Huang, Y. Zhang, P. Tang, S. Zhuang, Y. Liu, S. Yin. *Opt. Express*, **19** (3), 2216–2224 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.002216
- [2] J. Guo, M.R. Gleeson, J.T. Sheridan. *Physics Research International*, **2012**, 2090–2220 (2012). DOI: 10.1155/2012/803439
- [3] Голография. Наука и практика [Электронный ресурс] URL: <http://www.holoexpo.ru>
- [4] M.S. Mahmud, I. Naydenova, N. Pandey, T. Babeva, R. Jallapuram, S. Martin, V. Toal. *Applied Optics*, **48** (14), 2642–2648 (2009). DOI: 10.1364/AO.48.002642
- [5] A.K. Yetisen, I. Naydenova, F. da Cruz Vasconcellos, J. Blyth, C.R. Lowe. *Chem. Rev.*, **114** (20), 10654–10696 (2014). DOI: 10.1021/cr500116a
- [6] J. Marín-Sáez, J. Atencia, D. Chemisana, M.-V. Collados. *Optics Express*, **24** (6), A720–A730 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.00A720
- [7] A. Zanutta, E. Orselli, T. Facke, A. Bianco. *Optical Materials Express*, **6** (1), 252–263 (2016). DOI: 10.1364/OME.6.000252
- [8] N. Vorzobova, P. Sokolov. *Polymers*, **11** (12), 1–14 (2020). DOI: 10.3390/polym11122020

- [9] K. Mitsube, Y. Nishimura, K. Nagaya, S. Takayama, Y. Tomita. *Optical Materials Express*, **4** (5), 982–996 (2014). DOI: 10.1364/OME.4.000982
- [10] N. Ilie, E. Jelen, T. Luedemann, R. Hickel. *Dental Materials J.*, **26** (2), 149–55 (2007). DOI: 10.4012/dmj.26.149
- [11] D. Acrylics, J. Antonucci, S. Dickens. *In Biomaterials science: an introduction to materials in medicine*. Ed. by B.D. Ratner et al. 3rd ed. (Elsevier/AP, Oxford, 2013), p. 1489–1519. ISBN 978-0-12-374626-9
- [12] S. Gallego, A. Márquez, C. Neipp, I. Pascual, A. Beléndez. *Materials*, **5**, 772–783 (2012). DOI: 10.3390/ma5050772
- [13] L.C. Boaro, F. Goncalves, T.C. Guimaraes, J.L. Ferracane, C.S. Pfeifer, R.R. Braga. *Dental Materials*, **29** (4), 398–404 (2013). DOI: 10.1016/j.dental.2013.01.006
- [14] B.A.M. Venhoven, A.J. de Gee, C.L. Davidson. *Biomaterials*, **14** (11), 871–875 (1993). DOI: 10.1016/0142-9612(93)90010-Y
- [15] S.H. Stevenson, K.W. Steijn. *Proc. SPIE*, 2405, 88–97 (1995). DOI: 10.1117/12.205352
- [16] E.F. Pen, I.A. Zarubin, V.V. Shelkovnikov, E.V. Vasil'ev. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, **52** (1), 49–56 (2016). DOI: 10.3103/S8756699016010088
- [17] C. Choi, E.V. Vasiliev, V.V. Shelkovnikov, V. Loskutov. Patent US9874811B2 Photopolymer composition for holographic recording (2016).
- [18] D.I. Derevyanko, E.F. Pen, V.V. Shelkovnikov, *Optoelectron. Instrument. Proc.*, (57), 584–591 (2021). DOI: 10.3103/S8756699021060042
- [19] V.V. Shelkovnikov, E.F. Pen, V.I. Kovalevsky. *Opt. Mem. Neural Networks*, **16** (2), 75–83 (2007). DOI: 10.3103/S1060992X07020038
- [20] Ю.Н. Денисюк. *Опт. и спектр.*, **15** (4), 522–532 (1963).
- [21] Г.М. Бартев, С.Я. Френкель. *Физика полимеров*. Под ред. А.М. Ельяшевича (Химия, Л., 1990), 432 с.
- [22] V.V. Shelkovnikov, L.V. Ektova, N.A. Orlova, L.N. Ogneva, D.I. Derevyanko, I.K. Shundrina, G.E. Salnikov, L.V. Yanshole. *J. Mater. Sci.*, **50** (23), 7544–7556 (2015). DOI: 10.1007/s10853-015-9265-9
- [23] N.G. Mironnikov, V.P. Korolkov, D.I. Derevyanko, V.V. Shelkovnikov. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, **53** (5), 466–473 (2017). DOI: 10.3103/S8756699017050065