

## ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК 778.38.01:535

### ВЛИЯНИЕ ПОСТЭКСПОЗИЦИОННОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ ГОЛОГРАММ

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

Исследовано влияние постэкспозиционной термической обработки на изменения спектральных и дифракционных характеристик отражательных голограмм, полученных на голографических фотополимерных материалах разной толщины (8–10 и 20–25 мкм) в двух случаях постобработки: непосредственно по завершении их записи и после ультрафиолетового задубливания фотополимера. Выявлено, что длительная термообработка при 50 °С незадублированных голограмм толщиной 10 мкм приводит к увеличению амплитуды модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022. Для незадублированных голограмм выявлены существенное смещение спектрального отклика в коротковолновую область и уширение его контура вследствие значительной усадки фотополимера и искажений пространственной структуры голографической решётки. После процедуры задубливания термическая обработка не вызывает заметных изменений спектральных и дифракционных характеристик голограмм независимо от их толщины. Установлено, что нагрев/охлаждение в диапазоне 50–5 °С задублированных голограмм толщиной 25 мкм приводит к контролируемому в режиме реального времени батохромному/гипсохромному сдвигу спектрального отклика голограмм, в то время как для голограмм толщиной 8 мкм такие сдвиги отсутствуют, что создаёт предпосылки для формирования нечувствительных к изменениям температуры атермализованных голографических оптических элементов.

**Ключевые слова:** голография, фотополимерные материалы, отражательные голограммы, сенсоры, эффективная толщина голограмм, модуляция коэффициента преломления.

DOI: 10.15372/AUT20250311

EDN: SOLWBB

**Введение.** Голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) представляют собой класс оптических регистрирующих сред, привлекающих научный и промышленный интерес из-за своих уникальных функциональных свойств (широкого диапазона спектральной чувствительности, большого фотоиндуцированного изменения показателя преломления, высокого пространственного разрешения и др.) [1, 2]. В настоящее время эти материалы успешно применяются при изготовлении изобразительных и защитных голограмм, элементов дисплеев дополненной реальности, сенсоров, спектральных фильтров в астрономии и т. п. [3–11].

Эффективность формирования голограмм в ГФПМ определяется двумя основными факторами: диффузией мономера и глубиной протекания фотополимеризации. При регистрации голограммы в объёме регистрирующей среды в засвеченных (светлых) областях

интерференционной картины запускается реакция фотополимеризации, что приводит к градиенту концентрации мономера, который затем вызывает эффект диффузии мономера из тёмной области в светлую, в конечном результате пространственное распределение показателя преломления ГФПМ оказывается модулированным, согласно полосам интерференционной картины [12]. В некоторых случаях большая толщина фотополимеров подразумевает также дополнительный градиент мономера по глубине [13].

Из литературных данных известно, что постэкспозиционная термообработка может оказывать различное влияние на свойства голограмм в зависимости от типа ГФПМ. Так, в [14] авторы наблюдали диффузионное усиление голограмм, записанных в полимерной композиции на основе ПММА и бензофенона, и рост значений дифракционной эффективности (ДЭ) с 20 до 99 %. В [15–18] показано увеличение степени конверсии двойных связей мономера в фотополимерах и, как следствие, повышение ДЭ голограмм.

В [19] исследовано влияние постэкспозиционной термообработки на свойства фотополимерных голограмм с защитной плёнкой и без неё. Установлено, что голограммы с нанесённой защитной лавсановой плёнкой сохраняют высокую дифракционную эффективность  $\approx 90$  % и не приобретают дополнительной усадки при термической обработке в течение нескольких суток при температуре 80–90 °С. Для голограмм без защитной плёнки при нагревании в диапазоне температур 40–110 °С замечена эффективная усадка до 17 % без ухудшения дифракционной эффективности.

Изменение температуры может влиять также на спектральный отклик записанной голограммы [20], что находит применение в разработке голографических сенсоров [20–23]. Однако чувствительность голограмм к температурным изменениям может ограничить их использование в таких приложениях, как оптическая память, дисплеи дополненной реальности, спектральные фильтры и т. д. [24]. В работе [25] показано, что в режиме реального времени при увеличении температуры с 23 до 171 °С происходит батохромный сдвиг максимума спектрального отклика отражательной голограммы в фотополимерах Bayfol® HX200 с 565 до 605 нм. Помимо этого, в работе [26] при двухнедельном воздействии солнечного освещения авторы наблюдали значительное ухудшение эффективности дифракции и пропускания, сдвиг угла Брэгга, что делает непригодным данный материал для создания атермализованных оптических элементов.

Голограммы, сформированные на фотополимерах HRF-600 фирмы DuPont (США), показали отличную устойчивость к термическим изменениям в диапазоне 55–125 °С [27]. Данные голограммы после записи были предварительно задублилены с помощью ультрафиолетового (УФ) облучения и термообработки при 120 °С на протяжении 2 ч. Такое задубливание приводит к обесцвечиванию остаточного красителя, более глубокой степени полимеризации мономера, а также диффузионному усилению сформированной голограммы [28].

Характеристики ГФПМ, разработанных в Новосибирском институте органической химии им. Н. Н. Ворожцова (НАОХ СО РАН) для записи отражательных голограмм, такие как значения фоточувствительности и дифракционной эффективности, сопоставимы с известными фотополимерами компаний Covestro (Германия) и DuPont, однако влияние различных вариантов постэкспозиционной термообработки на свойства голограмм мало изучено.

Цель данной работы — выявление изменений спектральных и дифракционных характеристик фотополимерных отражательных голограмм в двух случаях термической постобработки: 1) непосредственно по завершении их записи; 2) после задубливания путём УФ-засветки и кратковременного нагрева при температуре 100 °С.

#### **Эксперименты.**

*Приготовление экспериментальных образцов ГФПМ.* В экспериментах использован ГФПМ на основе акриламидного мономера и поливинилацетата, разработанный

в НИОХ СО РАН [29]. Исследованный нами ГФПМ обладает свойством постэкспозиционного усиления сформированных голограмм за счёт диффузии мономера из необлучённых областей и, как следствие, темновой фотополимеризации. Методика приготовления фотополимерной композиции и ГФПМ различной толщины с оптимальными параметрами ранее подробно описана в [19]. На основе данной композиции получены экспериментальные образцы фотополимера с различной физической толщиной  $d_0$  (8–10 и 20–25 мкм).

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.

Толщины голограмм измерены с помощью компьютеризированного интерферометра МИИ-4 (ЗАО «Дифракция», Россия).

*Запись и характеристика отражательных голограмм.* Отражательные голограммы записывали с использованием лазера CNI Laser, MSL-FN-639 с длиной волны излучения  $\lambda_0 = 639$  нм, мощностью 200 мВт по схеме с двумя контрнаправленными пучками, угол схождения которых в среде ГФПМ составлял  $2\theta = 117^\circ$ , а соотношение интенсивностей в плоскости записи 1 : 1. Обеспечивалось равномерное распределение интенсивности засветки по площади пучков (за счёт расширения и коллимирования исходного лазерного пучка с помощью микрообъектива 40× и линзы с фокусным расстоянием 200 мм, а также ограничения площади засветки ирисовой диафрагмой диаметром 10 мм).

Из литературных данных [30, 31] известно, что величина дифракционной эффективности фотополимерных голограмм зависит и от энергии, и от интенсивности засветки. Для использованных нами материалов экспериментально установленные оптимальные (по критерию максимума результирующей ДЭ) значения этих параметров составили 20 мДж/см<sup>2</sup> и 2 мВт/см<sup>2</sup> соответственно.

Характеризация полученных голограмм включала в себя измерение спектра пропускания отражательной голограммы, оценку величин ДЭ и эффективной толщины  $d_{\text{эфф}}$ , амплитуды модуляции показателя преломления  $n_1$ , степени усадки толщины голограммы  $\Delta S$ . Методы и средства такой характеристики ранее описаны в работах [27, 31, 32], в частности, пиковые значения ДЭ оценивались на основе выражения

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

где  $T_r$  и  $T_0$  — пропускание голограммы на длине волны максимума контура спектрального отклика и вблизи его основания соответственно; эффективную толщину голограмм рассчитывали с помощью формулы [33]:

$$d_{\text{эфф}} = d_0 \exp(1 - D_0/2), \quad (2)$$

а степень усадки толщины голограммы вычисляли следующим образом:

$$\Delta S = \frac{\lambda_{\text{расч}} - \lambda_{\text{экс}}}{\lambda_{\text{расч}}} \cdot 100 \%, \quad (3)$$

где  $d_0$  — физическая толщина фотополимерного слоя,  $D_0$  — его оптическая плотность,  $\lambda_{\text{расч}}$  — расчётное значение длины волны максимума спектрального отклика отражательной голограммы в отсутствие усадки, а  $\lambda_{\text{экс}}$  — экспериментальное значение этого отклика на разных этапах постобработки, в том числе и сразу после записи голограммы. Значение  $\lambda_{\text{расч}}$  определяли как

$$\lambda_{\text{расч}} = \lambda_0 / \cos(90^\circ - \theta) = 639 / \cos(31,5^\circ) = 749 \text{ нм}. \quad (4)$$

Оценки значений параметров  $d_{\text{эфф}}$  и амплитуды модуляции показателя преломления  $n_1$  проводили путём сравнения экспериментальных и расчётных данных спектров пропускания отражательных голограмм. Расчёты выполнялись по известным формулам Когельника [34] в предположении, что голограммы являются объёмными, сугубо фазовыми с однородным распределением картины модуляции показателя по толщине голограммы.

Значения  $d_{\text{эфф}}$  показывают, что вследствие затухания света по мере его проникновения в глубину регистрирующей среды запись голограммы реально происходит на толщине меньшей, чем физическая толщина ГФПМ.

Экспериментально установлено, что для незадублированных голограмм толщиной 20–25 мкм термическая постобработка приводит к искажениям формы контура спектрального отклика, его уширению, несимметричности. В этом случае вместо формул Когельника применялся аппарат матриц передачи многослойных неоднородных структур [35]. Для сопоставления экспериментальных данных с расчётными параметрами использовали модели с переменными значениями периода решётки отражательной голограммы из-за неоднородной усадки и с неоднородным, экспоненциально затухающим по глубине голограммы, пространственным распределением модуляции показателя преломления.

*Термическая и УФ-обработка голограмм.* Голограммы подвергались термической обработке при 50 °С с помощью нагревательного столика ТП 1-10 (ТЕРМОПРО, Россия) в двух вариантах: 1) непосредственно по завершении их записи; 2) после задубливания путём одновременного УФ-облучения на расстоянии 10 см от образца и нагрева при температуре ~100 °С на протяжении 1 мин.

Изменение спектров поглощения задублированных голограмм в диапазоне температур (5–50 °С) в режиме реального времени получено на спектрофотометре Cary 5000 с помощью термостатированной кюветы (Varian, США).

Для повышения достоверности эксперимента проводилось не менее пяти циклов испытаний, включающих запись голограмм, их постобработку и измерение параметров.

**Результаты и обсуждения.** Ниже описаны результаты измерений и анализа спектральных и дифракционных характеристик исследованных нами голограмм.

*Термические изменения характеристик незадублированных голограмм.* Свойства тонких незадублированных голограмм толщиной 8–10 мкм. На рис. 1 представлены графики изменения спектрального отклика голограммы с начальной физической толщиной слоя 10 мкм. Кривые 1–4 соответствуют моментам непосредственно после окончания записи, после 30 с, спустя 10 мин и после длительного нагрева (при 50 °С). Видно, что вследствие усадки ГФПМ, происходящей в процессе записи голограммы, максимумы контуров спектральных откликов смещаются в коротковолновую область относительно расчётного значения  $\lambda_{\text{расч}}$  в среднем на 5 нм, например, для кривой 3. Глубина контуров увеличивается, их форма сходна с формой контуров, рассчитанных по формулам Когельника для однородных голограмм (кривая 1<sub>расч</sub> на рис. 2, а), что позволяет оценить эффективную толщину голограмм  $d_{\text{эфф}}$  и амплитуду модуляции показателя преломления  $n_1$ .

Так, для кривой 1<sub>расч</sub> значения искомых параметров составили  $d_{\text{эфф}} = 8,5$  мкм,  $n_1 = 0,014$ , соответствующая им ДЭ равна 22 %.

С увеличением времени нагрева глубина контура спектрального отклика быстро повышается, соответственно, возрастает ДЭ, которая через 10 мин достигает 43 %. Постэкспозиционная термообработка приводит к дополнительной сшивке остаточного непрореагировавшего мономера, из-за чего происходит увеличение  $n_1$  [36].

Далее спустя 18 ч нагрева рост ДЭ прекращается, происходят смещение и уширение контура спектрального отклика (кривая 4 на рис. 1). В результате, согласно кривой 4<sub>расч</sub> на рис. 2, б, расчётные параметры составили:  $n_1 = 0,022$ ,  $\Delta S = 3,2$  %.

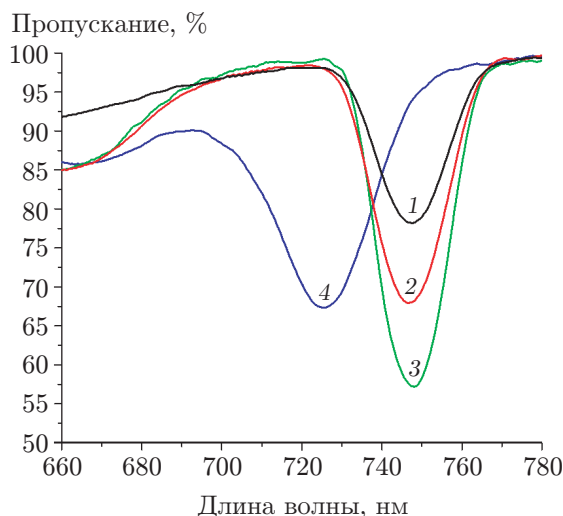


Рис. 1. Графики спектров пропускания голограммы толщиной 10 мкм при различном времени термообработки при 50 °С (кривая 1 — 0 мин, 2 — 5 мин, 3 — 10 мин, 4 — 18 ч)

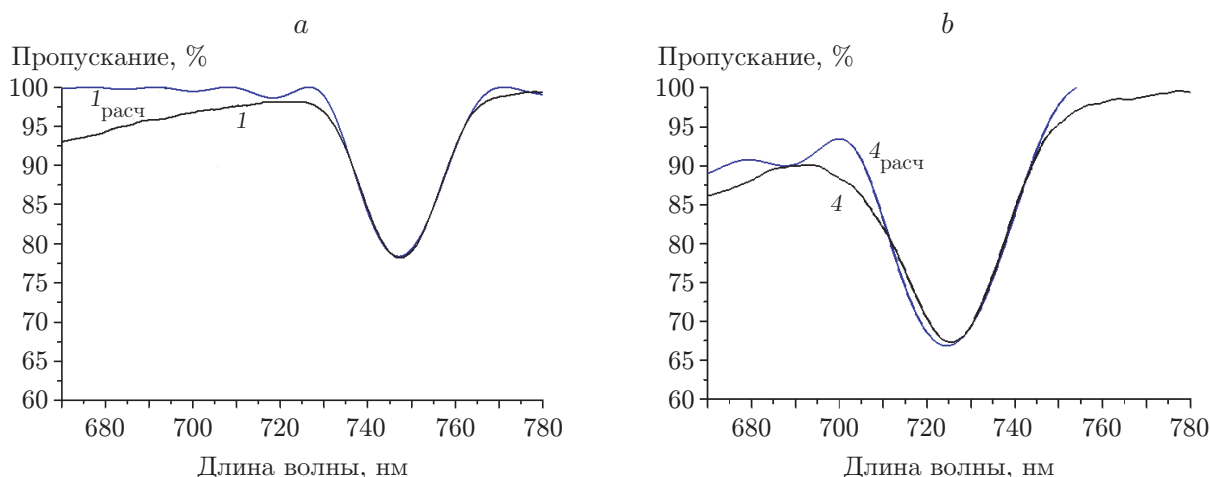


Рис. 2. Экспериментальные (кривые 1, 4) и расчётные (кривые  $1_{\text{расч}}$ ,  $4_{\text{расч}}$ ) графики спектров пропускания отражательных голограмм толщиной 10 мкм: а — после записи; б — после 18-часовой посттермообработки при 50 °С

*Свойства незадублированных голограмм толщиной 20–25 мкм.* На рис. 3 представлены графики, иллюстрирующие изменение спектрального отклика незадублированной голограммы с физической толщиной слоя 25 мкм после различного периода постобработки.

Путём сопоставления экспериментальных данных (кривая 1 на рис. 4, а) с расчётными значениями (кривая  $1_{\text{расч}}$  на рис. 4, а) установлено, что непосредственно после записи эта голограмма имеет эффективную толщину  $d_{\text{эфф}} = 20$  мкм,  $n_1 = 0,0085$  и значение ДЭ = 40 %. Характеристики сформированных голограмм приведены в табл. 1.

Далее проводили нагрев голограммы при фиксированной температуре и периодические измерения спектров пропускания (кривые 2–4 на рис. 1). Из полученных данных видно, что по мере увеличения длительности нагрева происходят повышение ДЭ, смещение спектрального отклика в коротковолновую область, изменения формы и ширины его контура. После 30 мин нагрева за счёт усиления голограмм при темновой полимеризации [37] ДЭ возрастает до 90 % (кривая 4 на рис. 3).

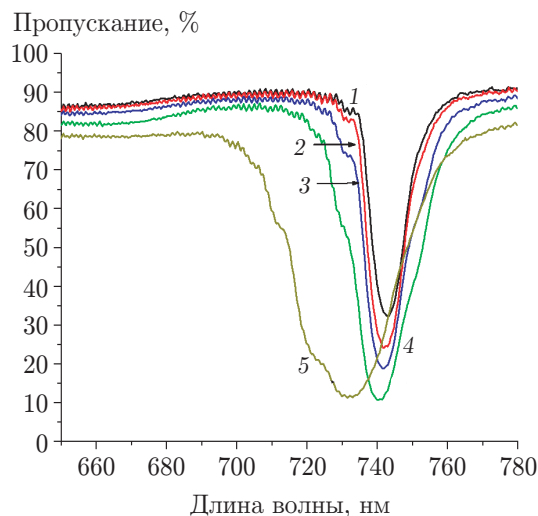


Рис. 3. Изменение спектрального отклика незадублированной голограммы толщиной слоя 25 мкм при постобработке при 50 °С в течение разного периода времени: кривая 1 — 0 мин, 2 — 1 мин, 3 — 5 мин, 4 — 30 мин, 5 — 18 ч

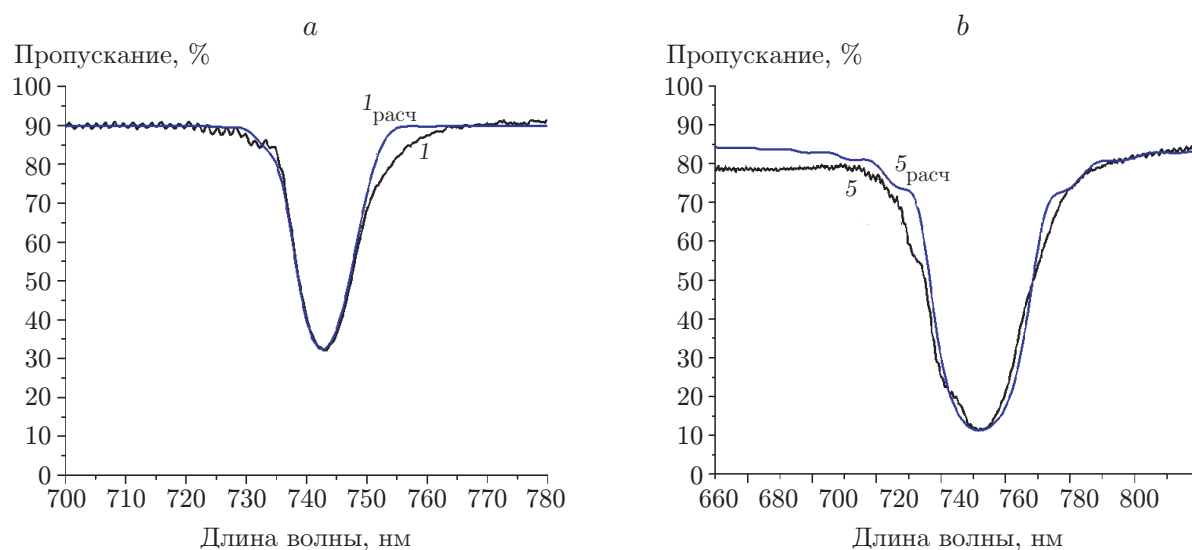


Рис. 4. Графики экспериментальных и расчётных спектров пропускания незадублированной голограммы толщиной 25 мкм: а — сразу после записи (кривые 1 и  $1_{\text{расч}}$ ); б — после 18 ч нагрева при 50 °С (кривые 5 и  $5_{\text{расч}}$ )

Таблица 1

**Характеристики голограмм толщиной 25 мкм,  
полученных без процедуры задубливания**

Параметр	Непосредственно после записи	Постобработка на протяжении 30 мин	Постобработка на протяжении 18 ч
$d_{\text{эфф}}$ , мкм	20	12	12 (усреднённое значение)
$n_1$	0,0085	0,017	0,018 (усреднённое значение)
Пиковая ДЭ, %	40	90	85
Интегральная ДЭ, %	—	17,1	26,8

Дальнейшая термообработка на протяжении 18 ч приводит к усадке  $\Delta S = 3,2 \%$  и значительному уширению контура спектрального отклика с 11 до 32 нм (на половинном значении провала). Кроме того, наблюдается несимметричность формы этого контура, что свидетельствует о неоднородности пространственной структуры решётки, включающей переменные величины модуляции коэффициента преломления  $n_1$  и периода решётки по глубине голограммы, которую можно интерпретировать как совокупность наложенных голограмм с различающимися значениями этих параметров. В связи с этим в табл. 1 приведены значения  $n_1$  и  $d_{\text{эфф}}$ , усреднённые по такой совокупности голограмм.

Согласно формуле (1), пиковое значение дифракционной эффективности составляет 85 %, однако, в данном случае уместно оценивать значение интегральной ДЭ, учитывающей отражение света в диапазоне всего контура спектрального отклика. Известно, что интегральную ДЭ можно определить как величину, пропорциональную произведению среднего значения ДЭ по диапазону контура конкретного спектрального отклика на ширину этого контура с коэффициентом 1/100 [38]. Значения интегральной ДЭ приведены в табл. 1. Для кривой 4 (см. рис. 3) эта характеристика составляет 17,1 %, а для кривой 5 (см. рис. 4) — 26,8 %. Таким образом, после указанного длительного нагрева интегральная ДЭ возросла в 1,57 раза.

*Влияние термообработки на свойства задубленных голограмм. Свойства задубленных голограмм толщиной 20–25 мкм.* На рис. 5 представлены графики изменения спектрального отклика голограммы с физической толщиной слоя 25 мкм. Кривые 1–3 соответствуют моментам непосредственно после окончания записи, процедуры задубливания и длительной посттермообработки на протяжении 48 ч. Видно, что глубина контуров спектральных откликов после процедуры задубливания увеличивается, но их форма не искажена асимметрией и описывается формой контуров однородных голограмм, рассчитанных по формулам Когельника (рис. 6, а). Расчётные значения эффективной толщины  $d_{\text{эфф}}$  и амплитуды модуляции показателя преломления  $n_1$  после записи и посттермообработки сформированных голограмм приведены в табл. 2.

Путём сопоставления экспериментальных данных с расчётными значениями (см. рис. 6) установлено, что непосредственно после записи голограмма имеет эффективную толщину  $d_{\text{эфф}} = 16,7$  мкм,  $n_1 = 0,01$  и значение ДЭ, равное 40 %. После процедуры задубливания характеристики голограмм изменились, произошёл гипсохромный сдвиг максимума спектрального отклика голограммы с 740 до 737 нм и увеличение значений ДЭ с 40 до 65 %. Данные изменения связаны с повышением степени конверсии двойных связей акриламидного мономера и уплотнением полимерной сетки [37]. Увеличение глубины полимеризации мономера при задубливании приводит к повышению  $n_1$  с 0,01 до 0,016, увеличению усадки ГФПМ  $\Delta S$  с 1,32 до 1,6 % и уменьшению расчётного значения  $d_{\text{эфф}}$  с 16,7 до 16,3 мкм.

В результате продолжительной 48-часовой постобработки наблюдается лишь небольшое увеличение значения усадки до  $\Delta S = 1,9 \%$ , что согласуется с ранее полученными данными, которые показали, что задубленные голограммы с нанесённой защитной плёнкой устойчивы к термической обработке вплоть до 100 °С [19].

Таким образом, задубливание голограмм является эффективным способом достижения стабильности их дифракционных и спектральных характеристик, что важно на практике.

*Изменение спектральных свойств задубленных голограмм в режиме реального времени.* При изменении условий (температуры, влажности и т. д.) окружающей среды наблюдаются изменения показателя преломления и толщины голографического слоя, которые приводят к спектральным сдвигам сформированных голограмм в режиме реального времени. Например, при повышении температуры происходит увеличение физической толщины материала и периода записанной решётки, что в итоге приводит к bathochromному сдвигу максимума спектрального отклика отражательной голограммы. Данный эффект находит

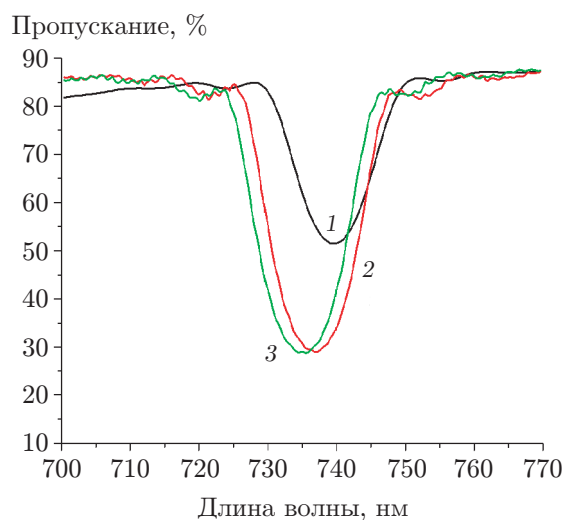


Рис. 5. Спектры отражения записанной голограммы (кривая 1) после процедуры задубливания на протяжении 2 мин (кривая 2) и дальнейшей термической обработки при 50 °С на протяжении 48 ч (кривая 3)

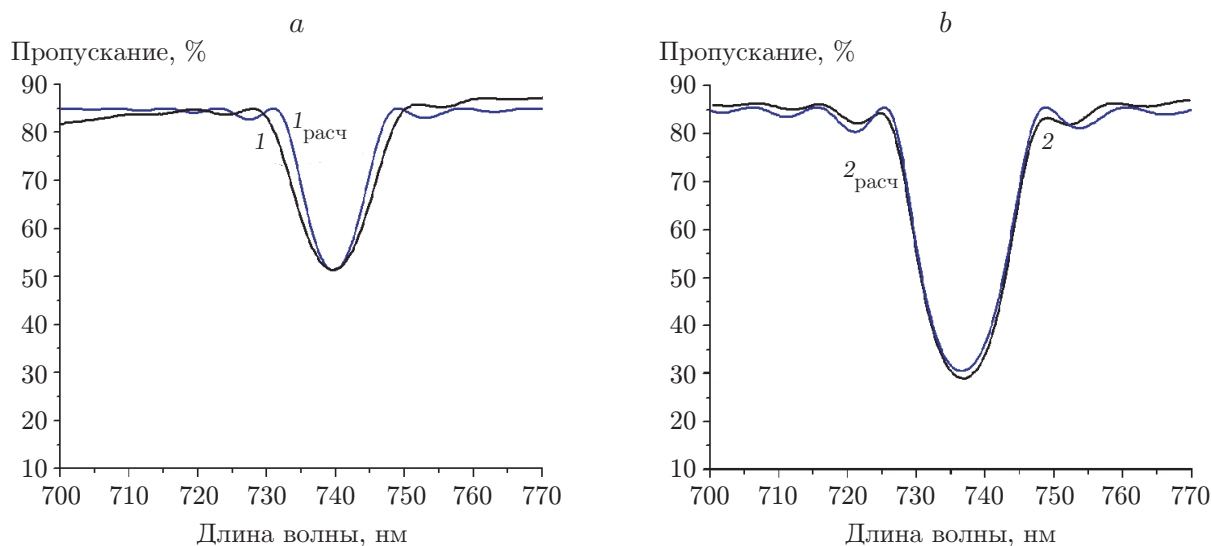


Рис. 6. Экспериментальные (кривые 1, 2) и расчётные (кривые 1<sub>расч</sub>, 2<sub>расч</sub>) спектральные отклики голограмм после записи (а) и процедуры задубливания (b)

Таблица 2

Характеристики голограмм, полученных при процедуре задубливания

Параметр	После записи	После задубливания	Постобработка на протяжении 48 ч
$d_{эфф}$ , мкм	16,7	16,3	16
$n_1$	0,01	0,016	0,017
Пиковая ДЭ, %	40	65	65
Усадка $\Delta S$ , %	1,32	1,6	1,9



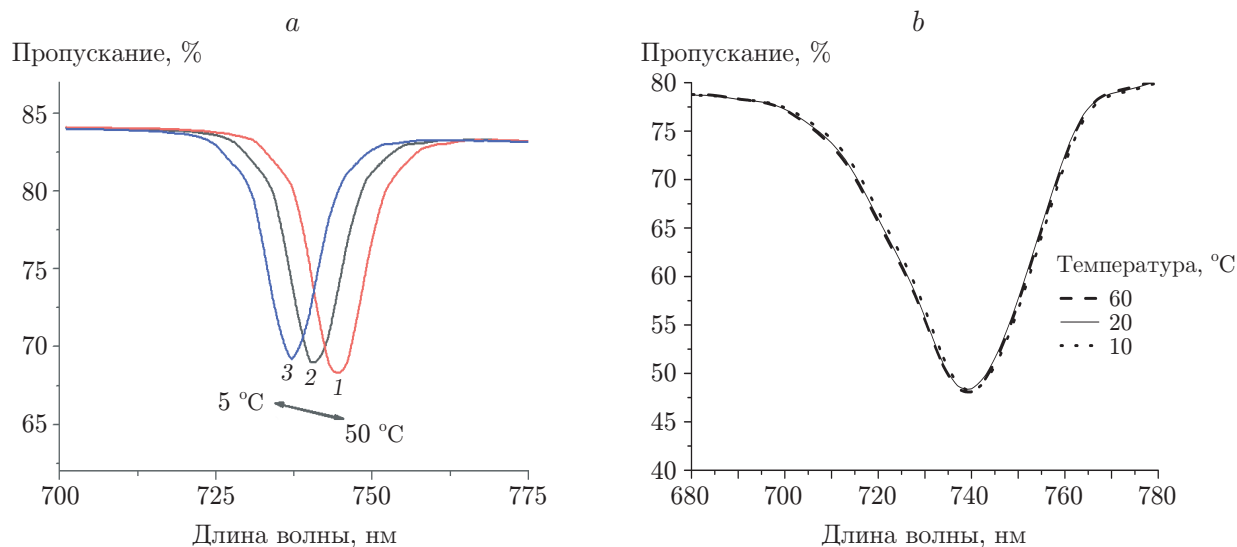


Рис. 7. Изменение спектральных откликов задубленных голограмм в диапазоне 5–50 °С: *a* — толщина слоя ГФПМ 25 мкм (кривая 1 — 50, 2 — 25, 3 — 5 °С); *b* — толщина слоя ГФПМ 8 мкм

своё применение в датчиках температуры [23]. Однако актуальной является разработка атермализованных голографических оптических элементов (ГОЭ), не испытывающих изменений свойств при нагреве [39]. В связи с этим интерес представляют исследования изменений спектральных откликов задубленных отражательных голограмм в режиме реального времени (рис. 7).

Пятикратное повторение процедуры нагрев/охлаждение задубленной голограммы, сформированной в ГФПМ толщиной 25 мкм, с 50 до 5 °С приводит к батохромному/гипсохромному обратимому сдвигу в режиме реального времени с 737 до 745 нм. Результаты работы могут быть полезны на практике при создании защитных голограмм или датчиков температуры [38, 39]. В то же время для голограмм, сформированных в ГФПМ толщиной 8 мкм, сдвиги спектрального отклика отсутствуют. Можно предположить, что при уменьшении толщины ГФПМ значительное противодействие расширению/сжатию материала оказывают силы когезии между ГФПМ и подложкой. Наблюдаемая стабилизация характеристик фотополимерной голограммы при её толщине менее 10 мкм даёт возможность получения тонких атермализованных ГОЭ.

**Заключение.** Исследовано влияние постэкспозиционной термической обработки на изменения спектральных и дифракционных характеристик фотополимерных отражательных голограмм с различной исходной толщиной 8–10 и 20–25 мкм.

Постобработка на протяжении 30 мин незадубленных голограмм толщиной 10 и 25 мкм увеличивает амплитуду модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022, а для тонких голограмм — с 0,0085 до 0,017. Длительная 18-часовая термообработка незадубленных голограмм с толщиной слоя 25 мкм приводит к значительной усадке фотополимера  $\Delta S = 3,2\%$  и, как следствие, к неоднородности пространственной структуры решётки, смещению спектрального отклика в коротковолновую область, изменению формы и ширины его контура с 11 до 32 нм, при этом наблюдается рост интегральной ДЭ с 17,1 до 26,8 %.

Показано, что длительная термообработка задубленных голограмм не приводит к изменению их дифракционных и спектральных характеристик. Наиболее вероятно, что процедура задубливания способствует формированию жёсткой полимерной сетки ГФПМ, ко-

торая препятствует диффузии макромолекул и, как следствие, сохраняет пространственную однородность первоначально сформированной голографической решётки.

Выявлено, что нагрев/охлаждение голограмм с толщиной слоя 25 мкм в диапазоне 50–5 °С приводит к контролируемому в режиме реального времени батохромному/гипсохромному сдвигу спектрального отклика голограмм в диапазоне 737–754 нм, в то время как для голограмм толщиной 8 мкм такие сдвиги отсутствуют.

**Благодарность.** Авторы выражают благодарность Химическому исследовательскому центру коллективного пользования СО РАН за проведение спектральных и аналитических измерений.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания «Создание и исследования органических и гибридных функциональных материалов» (FWUE-2025-0007), НИР «Высокоинформативные оптические методы исследования состава и микроструктуры материалов и веществ: физические основы, методы реализации и применения» № 124041700108-6 (FWNG-2024-0022).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zanutta A., Orselli E., Fäcke T., Bianco A.** Photopolymeric films with highly tunable refractive index modulation for high precision diffractive optics // *Opt. Mater. Exp.* 2016. **6**, Iss. 1. P. 252–263.
2. **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**, Iss. 39. P. 44103–44109.
3. **Neipp C., Francés J., Martínez F. J. et al.** Optimization of Photopolymer Materials for the Fabrication of a Holographic Waveguide // *Polymers*. 2017. **9**, Iss. 9. 395.
4. **Tork A., Pilot P., Galstian T. V.** New photopolymer materials for holographic data storage // *Opt. Data Storage. Conf. Digest*. 2000. N 00TH8491. P. 138–140.
5. **Liu T., Li W., Meng Y. et al.** High-fidelity multiplexing meta-hologram for information display, storage and encryption // *Mater. & Design*. 2022. **224**. 111353.
6. **Zhu J., Zou F., Wang L. et al.** Multiplexing Perfect Optical Vortex for Holographic Data Storage // *Photonics*. 2023. **10**, Iss. 7. 720.
7. **Yetisen A. K., Butt H., da Cruz Vasconcellos F. et al.** Light-Directed Writing of Chemically Tunable Narrow-Band Holographic Sensors // *Adv. Opt. Mater.* 2014. **2**, Iss. 3. P. 250–254.
8. **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*. 2018. **10**, Iss. 1. P. 1217–1224.
9. **Peng W.-T., Liu J., Li X. et al.** Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display // *Acta Phys. Sin.* 2018. **67**, N 2. 024213.
10. **Graceson A., Rinto Eyyalil J., Saji G. et al.** Optically accessible gas exposure apparatus for testing and characterization of holographic gas sensors // *Appl. Opt.* 2024. **63**, Iss. 19. P. 5039–5044.
11. **Chakraborty D., Georgiev R., Toal V. et al.** Comparison of holographic recording options for reflection-format and transmission-format coupler-type diffractive optical elements: Theoretical exploration and experimental validation // *Opt. Exp.* 2024. **32**, Iss. 11. P. 20385–20400.
12. **Zhao G., Mouroulis P.** Diffusion Model of Hologram Formation in Dry Photopolymer Materials // *Journ. Modern Opt.* 1994. **41**, Iss. 10. P. 1929–1939.

13. Mikulchyk T., Walshe J., Cody D. et al. Humidity and temperature induced changes in the diffraction efficiency and the Bragg angle of slanted photopolymer-based holographic gratings // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2017. **239**. P. 776–785.
14. Вениаминов А. В., Гончаров В. Ф., Попов А. П. Усиление голограмм за счёт диффузионной деструкции противофазных периодических структур // *Оптика и спектроскопия.* 1991. **70**, № 4. С. 864–869.
15. Деревянко Д. И., Басистый В. С., Шелковников В. В. и др. Гибридный фотополимерный материал на основе (8-акрилоил-1,4-дитиа-8-азаспиро[4.5]декан-2-ил)метил акрилата и тиол-силоксанового компонента для записи микроструктур: синтез, оптические и термомеханические свойства // *Высокомолекулярные соединения. Сер. Б.* 2020. **62**, № 5. С. 382–394.
16. Venhoven B. A., de Gee A. J., Davidson C. L. Light initiation of dental resins: dynamics of the polymerization // *Biomaterials.* 1996. **17**, Iss. 24. P. 2313–2318.
17. Patel M. P., Braden M., Davy K. W. Polymerization shrinkage of methacrylate esters // *Biomaterials.* 1987. **8**, Iss. 1. P. 53–56.
18. Kawana M., Takahashi J., Guo J., Tomita Y. Measurement of polymerization-shrinkage evolution during curing in photopolymer with a white-light Fabry-Pérot interferometer // *Opt. Exp.* 2015. **23**, Iss. 12. P. 15356–15364.
19. Шелковников В. В., Деревянко Д. И., Пен Е. Ф. Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и её использование для получения цветоделённых изображений // *Оптика и спектроскопия.* 2022. **130**, вып. 10. С. 1559–1566.
20. Blanche P.-A. Introduction to Holographic Principles // *Optical Holography: Materials, Theory and Applications* / Ed. by P.-A. Blanche. Ch. 1. St. Louis: Elsevier Inc., 2020. P. 1–39.
21. Vorzobova N., Sokolov P. Application of Photopolymer Materials in Holographic Technologies // *Polymers.* 2019. **11**, Iss. 12. 2020.
22. Liu H., Yu D., Mao D. et al. Modeling swelling and absorption dynamics for holographic sensing in analytes sensitive photopolymer // *Opt. Commun.* 2016. **368**. P. 95–104.
23. Antony G., Cody D., Naydenova I. Theoretical study of slanted holographic gratings for application in sensing // *Asian Journ. Phys.* 2023. **32**, N 5–8. P. 291–302.
24. Bruder F.-K., Frank J., Hansen S. et al. Expanding possibilities how to apply Bayfol HX<sup>®</sup> film into recording stacks and optical parts // *Proc. SPIE.* 2020. **11306**. 113060C.
25. Blanche P.-A., Mahamat A. H., Buoye E. Thermal Properties of Bayfol<sup>®</sup> HX200 Photopolymer // *Materials.* 2020. **13**, Iss. 23. 5498.
26. Chrysler B. D., Ayala Pelaez S., Wu Y. et al. Environmental stability study of holographic solar spectrum splitting materials // *Proc. SPIE.* 2020. **9937**. 99370N.
27. Gambogi W. J. Jr., Steijn K. W., Mackara S. R. et al. Holographic optical element (HOE) imaging in DuPont holographic photopolymers // *Proc. SPIE.* 1994. **2152**. P. 282–293. DOI: 10.1117/12.178083.
28. Gambogi W. J. Jr., Weber A. M., Trout T. J. Advances and applications of DuPont holographic photopolymers // *Proc. SPIE.* 1994. **2043**. P. 2–13.
29. Pat. **9874811** US. Photopolymer composition for holographic recording / C. C. Suwon, E. V. Vasiliev, V. V. Shelkovnikov, V. Loskutov. Publ. 16.03.2016.
30. Sheridan J. T., Lawrence J. R. Nonlocal-response diffusion model of holographic recording in photopolymer // *JOSA A.* 2000. **17**, Iss. 6. P. 1108–1114.
31. Шелковников В. В., Пен Е. Ф., Ковалевский В. И. и др. Голографическая запись на запрещённых синглет-триплетных электронных переходах // *Оптика и спектроскопия.* 2004. **97**, № 6. С. 1034–1042.

32. **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.
33. **Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials // Opt. Memory and Neural Networks. 2007. **16**, Iss. 2. P. 75–83.
34. **Kogelnik H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings // Bell Syst. Techn. Journ. 1969. **48**, N 9. P. 2909–2947.
35. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю.** Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 98–114.
36. **Derevyanko D. I., Shelkovnikov V. V., Kovalskii V. Yu.** Charge Transfer Complexes, Based on 2,4-Diethyl-9-oxo-10-(4-heptyloxyphenyl)-9H-thioxanthenium Hexafluorophosphate and Thiazole Derivatives, as Photoinitiators of Holographic Free Radical Photopolymerization // High Energy Chem. 2024. **58**, Iss. 5. P. 513–521.
37. **Stevenson S. H.** DuPont multicolor holographic recording films // Proc. SPIE. 1997. **3011**. P. 231–241.
38. **Корешев С. Н., Шевцов М. К.** Оптические системы голографических коллиматорных прицелов // Оптический журнал. 2015. **82**, № 9. С. 22–28.
39. **Пат. 161122 РФ.** Оптическая схема компактного коллиматорного прицела на основе объёмной голографической дифракционной решётки / В. И. Бобринев, М. С. Ковалев, С. Б. Одионов, Г. В. Соколов, А. Б. Соломашенко. Оpubл. 10.04.2016, Бюл. № 10.

*Поступила в редакцию 27.01.2025*

*После доработки 14.03.2025*

*Принята к публикации 29.04.2025*

---