

# Влияние пост-экспозиционной термической обработки на свойства фазовых голографических решёток

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

<sup>1</sup> Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Исследовано влияние термической пост-обработки на спектральные свойства фотополимерных отражательных голограмм, имеющих толщину слоя 10 мкм и 30 мкм. Пост-термообработка голограмм с толщиной слоя 10 мкм привела к уменьшению эффективной толщины с 8,5 мкм до 6,5 мкм и увеличению модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022, в то время как, для голограмм с толщиной слоя 30 мкм, эффективная толщина уменьшилась с 30 мкм до 12 мкм, а модуляция коэффициента преломления увеличилась с 0,006 до 0,017.

*Ключевые слова:* Голография, Фотополимерные материалы, Эффективная толщина голограмм, Модуляция коэффициента преломления.

*Цитирование:* Алиев, С. И. Влияние пост-экспозиционной термической обработки на свойства фазовых голографических решёток / С. И. Алиев, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2023: 20-я Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2023. — С. 459–463.

## Введение

На сегодняшний день активно разрабатываются и исследуются голографические фотополимерные материалы (ГФМ) [1, 2], которые используются в защитной голографии, системах хранения информации, голографических дисплеях [3 – 5]. Много внимания уделяется разработке голографических сенсоров для контроля влажности и температуры [6]. В связи с этим актуальной задачей является изучение пост-экспозиционных процессов в ГФМ при изменении внешних условий. Например, в работе [7] в результате пост-экспозиционной термической обработки авторы наблюдали диффузионное усиление голограмм, записанных в фотополимере типа Реоксан, и рост значений дифракционной эффективности с 20 % до 99 %. В другой работе [8] авторы наблюдают увеличение степени конверсии двойных связей мономера в фотополимерном материале в результате пост-экспозиционной обработки. В то же время изменению эффективной толщины голограммы и модуляции коэффициента преломления ГФМ при термической пост-экспозиционной обработке уделено мало внимания.

Целью данной работы является определение зависимости изменения эффективной толщины и модуляции коэффициента преломления ГФМ с разной физической толщиной от времени пост-экспозиционной термообработки при заданной температуре.

## Экспериментальная часть

В работе использован фотополимерный материал на основе акриламидного мономера и поливинилацетата [9]. Методика приготовления образцов описана в работе [10]. Все образцы покрывались защитной плёнкой.

Запись отражательных голограмм проводили с использованием лазерного излучения с длиной волны 639 нм, плотность мощности излучения составила 20 мВт×см<sup>-2</sup>.

Экспериментальные значения дифракционной эффективности (ДЭ) отражательных голограмм оценивались по формуле:

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

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

Известно, что в ГФМ в процессе записи голограмм и их постобработки вследствие физико-химических процессов происходит изменение толщины регистрирующего слоя, получившее общепринятое название — усадка [11].

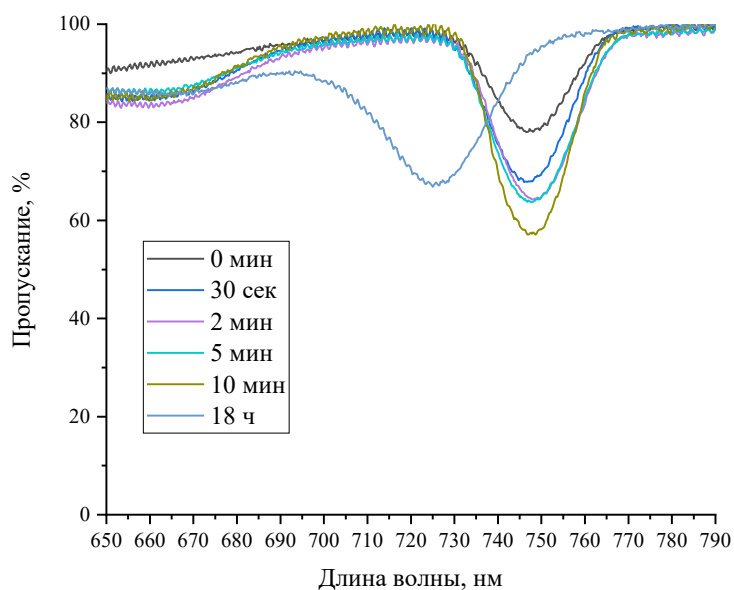
Степень усадки  $\Delta S$  оценивают по относительному сдвигу спектрального отклика отражательной голограммы по формуле:

$$\Delta S = \frac{\lambda_{исх} - \lambda_{ус}}{\lambda_{исх}} \cdot 100\%,$$

где  $\lambda_{исх}$  — длина волны максимума спектрального отклика отражательной голограммы сразу после записи,  $\lambda_{ус}$  — длина волны максимума этого отклика в результате пост-обработки.

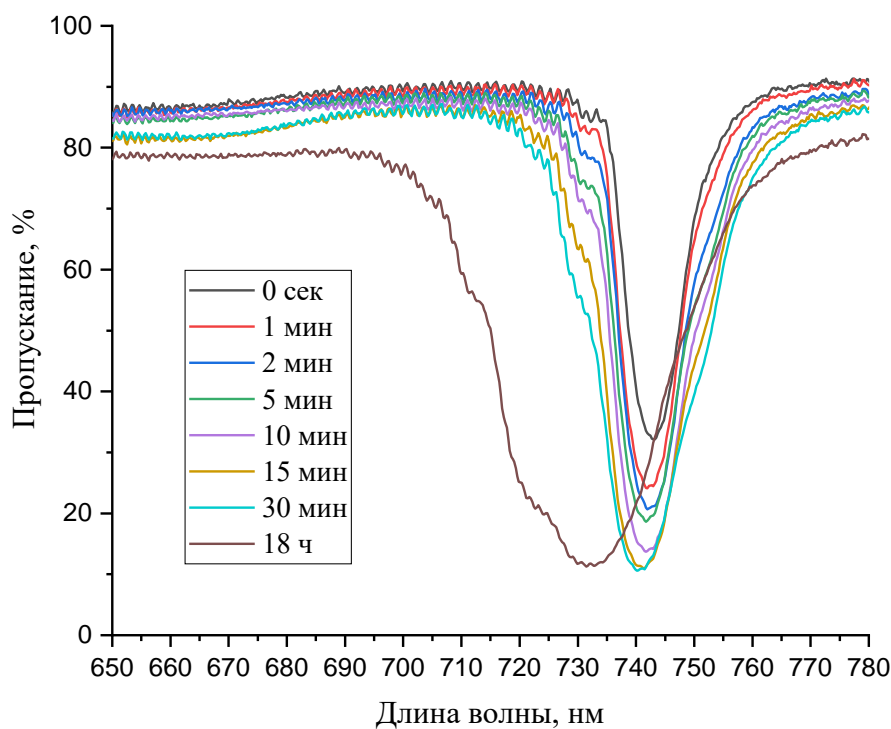
Получение значений эффективной толщины ( $T_{эф}$ ) и модуляции коэффициента преломления ( $n_l$ ) записанных голограмм осуществляли путём сопоставления экспериментального и расчетного спектра с подгонкой параметров, удовлетворяющих их наибольшему сходству.

На рис.1 представлено изменение спектрального отклика голограммы с физической толщиной слоя 10 мкм при нагреве с температурой 50 °С. В результате пост-обработки через 18 ч. нагрева  $T_{эф}$  уменьшилась с 8,5 мкм до 6,5 мкм, а  $n_l$  увеличилась с 0,014 до 0,022. Видно, что через 10 мин. нагрева ДЭ голограммы увеличилась с 10 % до 43 %, а через 18 ч. уменьшилась до 22 %. Также наблюдается уширение пика на полувысоте с 20 нм до 27 нм через 10 мин. и 18 ч. соответственно. Значение  $\Delta S = 3$  %. Можно предположить, что пост-экспозиционная термообработка приводит к дополнительной сшивке непрореагировавшего мономера, из-за чего происходит увеличение  $n_l$ , вследствие чего увеличивается и ДЭ в первые 10 мин. нагрева.



**Рис. 1.** График спектров пропускания голограммы толщиной 10 мкм при различном времени термообработки

На рис. 2 представлено изменение спектрального отклика голограммы с толщиной слоя 30 мкм при нагреве 50 °С. Записанная голограмма имеет  $T_{эф} = 30$  мкм,  $n_1 = 0.006$  и значение ДЭ = 60 %. С увеличением времени нагрева до 18 ч. значение  $T_{эф}$  уменьшилось до 12 мкм, значение  $n_1$  увеличилось до 0,017, а ДЭ в максимуме составила 75 % через 3 часа нагрева. Также наблюдается уширение пика на полувысоте с 12 нм до 32 нм. Значение  $\Delta S = 1,5$  %.



**Рис. 2.** График спектров пропускания голограммы толщиной 30 мкм при различном времени термообработки

Из полученных данных можно предположить, что в результате нагрева при 50 °С на протяжении 10-30 минут, в зависимости от толщины ГФПМ, происходит диффузионное усиление голограмм за счет раскрытия непрореагировавших двойных связей мономера. Дальнейший нагрев приводит к уширению спектральных откликов записанных голограмм и уменьшению эффективной толщины. Вероятно, что в результате длительной пост-экспозиционной термической обработки ГФМ с нанесенной защитной пленкой, происходит снятия напряжения в матрице по иному механизму, чем в случае длительной пост-обработки образцов без защитной пленки. Так в работе [10] авторы наблюдали появление дополнительной усадки вплоть до 20 % без явного увеличения ширины на полувысоте. В то же время, как отмечено выше, усадка голограмм с нанесенной защитной плёнкой составила не более 3 %. Следует отметить, что создание модели пост-экспозиционных процессов в ГФПМ является предметом дальнейших исследований.

### Заключение

Исследовано влияние термической пост-экспозиционной обработки на свойства фазовых пропускающих голограмм. Установлено, что пост-экспозиционная термообработка при 50 °С в течение 18 часов в случае голограмм с толщиной слоя 10 мкм привела к уменьшению эффективной толщины с 8,5 мкм до 6.5 мкм и увеличению модуляции коэффициента преломления с 0,014 до 0,022. В то же время для голограмм с толщиной слоя 30 мкм эффективная толщина уменьшилась с 30 мкм до 12 мкм, а модуляция коэффициента преломления увеличилась с 0,006 до 0,017. Также обнаружено уширение контура спектрального отклика с 20 нм до 27 нм и с 12 нм до 32 нм для голограмм с толщиной 10 мкм и 30 мкм соответственно.

### Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Научные основы синтеза гибридных соединений и создания функциональных материалов и полимеров для оптики, электроники, сенсорики» (AAAA-A21-121011490013-7).

### Список источников

- [1] **Tork, A.** New photopolymer materials for holographic data storage / A. Tork, P. Pilot, T.V. Galstian // 2000 Optical Data Storage. Conference Digest — 2000. — P. 138–140. — DOI:10.1109/ODS.2000.848006.
- [2] **Neipp, C.** Optimization of Photopolymer Materials for the Fabrication of a Holographic Waveguide / C. Neipp, J. Francés, F. J. Martínez, R. Fernández, M. L. Alvarez, S. Bleda, M. Ortuño, S. Gallego // Polymers. — 2017. — Vol. 9. — № 9 — P. 395. — DOI:10.3390/polym9090395.
- [3] **Liu, T.** High-fidelity multiplexing meta-hologram for information display, storage and encryption / T. Liu, W. Li, Y. Meng, W. Tang, H. Ma, X. Li, R. Zhu, C. Liu, H. Zhang, J. Wang, S. Qu // Materials & Design. — 2022. — Vol. 224. — P. 111353. — DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111353.
- [4] **Zhu, J.** Multiplexing Perfect Optical Vortex for Holographic Data Storage / J. Zhu, F. Zou, L. Wang, X. Lu, S. Zhao // Photonics. — 2023. — Vol. 10. — P. 720. — DOI:10.3390/photonics10070720.

- [5] **Peng, W.-T.** Novel materials and devices bring new opportunities for holographic display / W.-T. Peng, J. Liu, X. Li, G.-L. Xue // *Acta Physica Sinica (Chinese Edition)*. — 2018. — Vol. 67. — № 2 — DOI: 10.7498/aps.67.20172026.
- [6] **Mikulchyk, T.** Development of holographic sensors for monitoring relative humidity and temperature / T. Mikulchyk // *Doctoral Thesis. Technological University Dublin*. — 2016. — DOI:10.21427/D7HS3X.
- [7] **Вениаминов А. В.** Усиление голограмм за счет диффузионной деструкции противofазных периодических структур / А. В. Вениаминов, В. Ф. Гончаров, А. П. Попов // *Оптика и спектроскопия*. — 1991. — Том 70. — № 4. — С. 864–869.
- [8] **Деревянко Д. И.** 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 / Д. И. Деревянко, В. С. Басистый, В. В. Шелковников, И. К. Шундрин, А. Д. Бухтоярова, Г. Е. Сальников, В. Н. Бережная, А. А. Чернонос // *Высокомолекулярные соединения (серия Б)*. — 2020. — Том 62. — № 5. — С. 382–394. — DOI:10.31857/S2308113920050046.
- [9] **Патент № 25 523 51 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне / В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев, В. В. Русских, Л. В. Эктова. — Оpubл. 10.06.2015.
- [10] **Шелковников В. В.** Влияние термической пост-обработки на спектральные сдвиги фотополимерных отражательных голограмм и её использование для получения цветоделённых изображений. / В. В. Шелковников, Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен. // *Оптика и спектроскопия*. — 2022. — Том 130. — № 5. — С. 1559-1566. — DOI:10.21883/OS.2022.10.53626.3795-22.
- [11] **Gallo, J. T.** Model for the effects of material shrinkage on volume holograms / J. T. Gallo, C. M. Verbe // *Applied Optics*. — 1994. — Vol. 33. — № 29. — P.6797–6804. DOI:10.1364/AO.33.006797

## Influence of post-exposure heat treatment on the properties of phase holographic gratings

*S. I. Aliev<sup>1</sup>, D. I. Derevianko<sup>1</sup>, E. F. Pen<sup>2</sup>, V. V. Shelkovnikov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> N. N. Vorozhtsov Novosibirsk Institute of Organic Chemistry of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

The effect of thermal post-processing on the spectral properties of photopolymer reflective holograms with a layer thickness of 10  $\mu\text{m}$  and 30  $\mu\text{m}$  has been studied. Such post-processing of holograms with a layer thickness of 10  $\mu\text{m}$  led to a decrease in the effective thickness from 8.5  $\mu\text{m}$  to 6.5  $\mu\text{m}$  and an increase in the modulation of the refractive index from 0.014 to 0.022, while for holograms with a layer thickness of 30  $\mu\text{m}$ , the effective thickness decreased from 30  $\mu\text{m}$  to 12  $\mu\text{m}$ , and the modulation of the refractive index increased from 0.006 to 0.017.

*Keywords:* Holography, Photopolymer materials, Effective thickness of holograms, Refractive index modulation.