

Эффективная толщина пропускающих голограмм в фотополимерных материалах

С. И. Алиев¹, Д. И. Деревянко¹, Е. Ф. Пен², В. В. Шелковников¹

¹ Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

Записаны пропускающие объёмные элементарные голограммы с использованием голографических фотополимерных материалов (ГФМ) на основе двух типов фотоиницирующих систем: красителя-соинициатора (КС) и сульфоний-боратного комплекса с переносом заряда (КПЗ). Выявлено, что для ГФМ-КС увеличение оптической плотности с 0,8 до 1,7 привело к уменьшению эффективной толщины пропускающей голограммы с 25 до 20 мкм. В ГФМ-КПЗ сформированы толстые (~ 50 мкм) пропускающие голограммы, у которых эффективная и физическая толщины совпали, модуляция коэффициента преломления составила ~ 0,002, а наличие боковых лепестков в контуре угловой селективности свидетельствует о равномерной пространственной структуре голограммы по толщине слоя.

Ключевые слова: голография, эффективная толщина голограмм, фотополимерные материалы.

Цитирование: Алиев, С. И. Эффективная толщина пропускающих голограмм в фотополимерных материалах / 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. 454–458.

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]. ГФМ включает в себя полимерную матрицу, мономер, инициатор и краситель-соинициатор (КС). Поскольку КС обладает большой экстинкцией $\varepsilon \approx 10^4\text{--}10^5 \text{ л}\cdot\text{М}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, это приводит к значительному поглощению света на определённой длине волны. В работе [6] авторами выявлено, что диапазон оптической плотности $D = 0,48\text{--}0,7$ является оптимальным для записи в ГФМ пропускающих голограмм с наибольшим значением дифракционной эффективности (ДЭ). Однако, влиянию D на эффективную толщину $T_{эф}$ записанных голограмм ранее было уделено мало внимания [6,7].

Отметим, что при выборе систем фотоиницирования альтернативным подходом является использования светочувствительных комплексов с переносом заряда (КПЗ), одним из преимуществ которых, в сравнении с традиционными системами, является небольшое значение коэффициента экстинкции $\varepsilon = 10\text{--}10^3 \text{ М}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$ [8], которое позволяет проводить фотополимеризацию в толстых фотополимерных слоях, вплоть до 30 см [9].

Однако, ряд авторов наблюдали несоответствие эффективной толщины записанных голограмм с физической толщиной регистрирующего слоя [10, 11]. Одной из причин этого эффекта является неравномерное поглощение излучения материала.

Целью данной работы было изучение влияния оптической плотности материала на эффективную толщину записанных голограмм с использованием фотоиницирующих систем КС и КПЗ.

Экспериментальная часть

В работе использован фотополимерный материал на основе акриламидного мономера и поливинилацетата [12]. Методики приготовления плёнок и составы фотополимерных слоев при использовании КС, приведены в работе [13], при использовании КПЗ – в работе [8]. Запись голограмм проводили с использованием лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 639$ нм и $\lambda = 532$ нм. Подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [14].

На рис.1 показаны расчётные и экспериментальные спектры угловой селективности пропускающих голограмм, записанных на ГФМ-КС с оптической плотностью 0,8 и 1,7 при физической толщине T_ϕ слоя образцов 30 мкм ($\lambda = 639$ нм). Расчеты проводились с использованием известной теории Когельника [15]. На основании наложения экспериментальных и теоретических графиков видно, что значение эффективной толщины $T_{эф}$ голограмм уменьшается с 25 мкм до 20 мкм, а модуляция коэффициента преломления n_1 увеличивается с 0,006 до 0,01 при увеличении D .

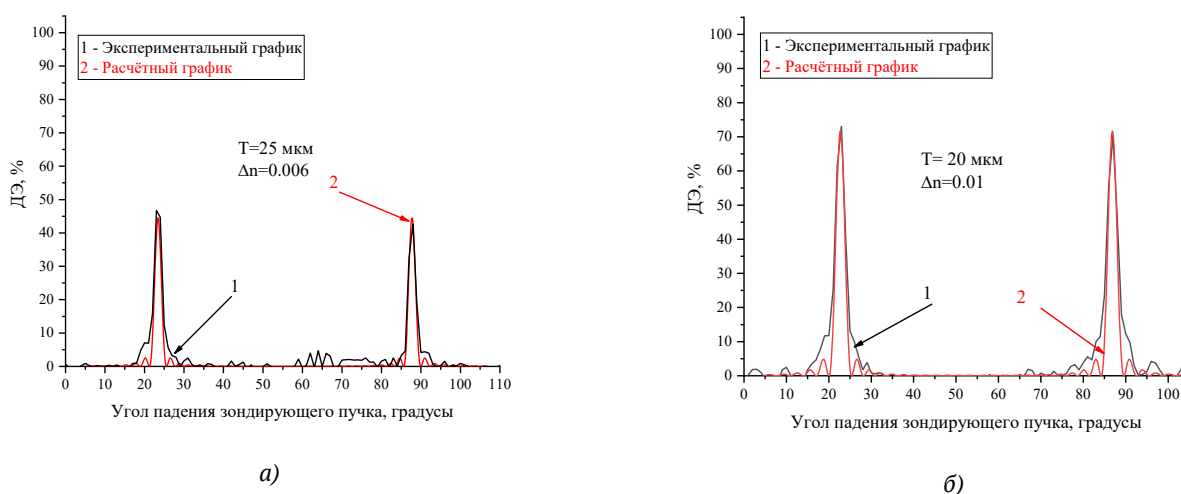


Рис. 1. Спектр угловой селективности пропускающих голограмм с оптической плотностью 0,8 (а) и 1,7 (б)

На рис. 2 показан расчётный и экспериментальный графики угловой селективности пропускающей голограммы с использованием ГФМ-КПЗ, для которых при T_ϕ образцов 50 мкм оптическая плотность оставляла 0,05 ($\lambda = 532$ нм). Из графиков видно, что $T_{эф} = 50$ мкм и $n_1 = 0,0021$. Наличие боковых лепестков в графике контура угловой селективности

свидетельствует об однородности пространственной структуры голографической решетки. Следует отметить, что физическая и эффективная толщины слоя совпадают.



Рис. 2. Спектр угловой селективности пропускающей голограммы с использованием КПЗ

Заключение

Исследована зависимость эффективной толщины голограмм от оптической плотности слоя. Показано, что при увеличении оптической плотности слоя с 0.8 до 1.7 происходит уменьшение эффективной толщины голограммы с 25 мкм до 20 мкм. В то же время использование КПЗ позволяет записывать голограммы, у которых физическая и эффективная толщины слоя совпадают.

Благодарность

Работа выполнена в рамках госзадания «Научные основы синтеза гибридных соединений и создания функциональных материалов и полимеров для оптики, электроники, сенсорики» (АААА-А21-121011490013-7).

Список источников

- [1] **Tork, A.** New photopolymer materials for holographic data storage / A. Tork, P. Pilot, T.V. Galstian // 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] **Shelkovnikov, V. V.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials / V. V. Shelkovnikov, E. F. Pen, V. I. Kovalevsky // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. — 2007. — Vol. 16. — № 2 — P. 75–83. — DOI:10.3103/s1060992x07020038
- [7] **Gallego, S.** Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers / S. Gallego, M. Ortuño, C. Neipp, A. Márquez, A. Beléndez, I. Pascual, J. V. Kelly, J. T. Sheridan // *Optics Express*. — 2005. — Vol. 13. — № 6 — P. 1939–1947. — DOI:10.1364/OPEX.13.001939
- [8] **Derevyanko, D.I.** The Charge Transfer Complex Formed between the Components of Photopolymer Material as an Internal Sensitizer of Spectral Sensitivity / D. I. Derevyanko, V. V. Shelkovnikov, V. Y. Kovalski, I. L. Zilberberg, S. I. Aliev, N. A. Orlova, V. D. Ugozhaev // *ChemistrySelect*. — 2020. — Vol. 5. — № 38 — P. 11939–11947. DOI:10.1002/slct.202002163
- [9] **Garra, P.** Charge Transfer Complexes as Pan-Scaled Photoinitiating Systems: From 50 µm 3D Printed Polymers at 405 nm to Extremely Deep Photopolymerization (31 cm) / P. Garra, B. Graff, F. Morlet-Savary, C. Dietlin, J.-M. Becht, J.-P. Fouassier, J. Lalevée. // *Macromolecules*. — 2017. — Vol. 51. — № 1. — P. 57–70. — DOI:10.1021/acs.macromol.7b02185
- [10] **Gallego, S.** Improved maximum uniformity and capacity of multiple holograms recorded in absorbent photopolymers / S. Gallego, M. F. Ortuño, C. Neipp, E. Fernández, A. Beléndez, I. Pascual // *Optics express*. — 2007. — Vol. 15. — P. 9308–9319. — DOI:10.1364/OE.15.009308
- [11] **Gallego, S.** Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers / S. Gallego, M. F. Ortuño, C. Neipp, A. Márquez, A. Beléndez, // *Optics express*. — 2005. — Vol. 13. — № 6. — P. 1939–1947. — DOI:10.1364/OPEX.13.001939
- [12] **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.
- [13] **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.
- [14] **Деревянко, Д. И.** Запись монохромных и цветных голограмм в фотополимерном материале с использованием боратсульфониевого комплекса с переносом заряда / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников, В. В. Бардин // *HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 322–329.
- [15] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings / H. Kogelnik // *The Bell System Technical Journal*. — 1969. — Vol. 48. — № 9. — P. 2909–2947.

Effective Thickness of Transmissive Holograms in Photopolymer Materials

S. I. Aliev¹, D. I. Derevianko¹, E. F. Pen², V. V. Shelkovnikov¹

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

² Institute of Automation and Electrometry of the SB RAS, Novosibirsk, Russia

Transmissive volumetric elementary holograms were recorded using holographic photopolymer materials (HPM) based on two types of photoinitiating systems: co-initiator dye (CD) and charge-transfer sulfonium-borate complex (CTC). It was found that for the HPM-CD, an increase in the optical density from 0.8 to 1.7 led to a decrease in the effective thickness of the transmission hologram from 25 to 20 μm . Thick transmissive holograms with the same effective and physical thicknesses of $\sim 50 \mu\text{m}$ were formed in the HPM-CTC, the modulation of the refractive index was ~ 0.002 , and the presence of side lobes in the angular selectivity contour indicates that the hologram was recorded uniformly over the layer thickness.

Keywords: Holography, Effective thickness of holograms, Photopolymer materials.