

Голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления

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

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Новосибирский институт органической химии им. Н.Н. Ворожцова Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

Разработан голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления. Получены объёмные отражательные и пропускающие голограммы, демонстрирующие первый и второй порядки дифракции с высокой равной дифракционной эффективностью (~80 % для отражающих и 50% для пропускающих голограмм).

Ключевые слова: Фотополимерные голограммы, Нелинейность модуляции показателя преломления.

Цитирование: Деревянко, Д. И. Голографический фотополимерный материал с большой нелинейностью модуляции показателя преломления / Д. И. Деревянко, Е. Ф. Пен, В. В. Шелковников // HOLOEXPO 2022: XIX Международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — Барнаул: ИП Колмогоров И. А., 2022. — С. 341–345.

Введение

В настоящее время голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) благодаря своим характеристикам и простоте пользования нашли практическое применение в изобразительной и защитной голографии, интегральной оптике, дисплеях дополненной реальности, сенсорах [1-3].

В результате реакции фотополимеризации в ГФПМ происходит пространственная модуляция показателя преломления в соответствии с картиной засветки, имеющая вид синусоидального распределения в случае элементарных голографических решёток [4]. Однако на практике, в силу нелинейности физико-химических процессов формирования этих решёток на стадиях записи и постобработки голограмм результирующий профиль показателя преломления может существенно отличаться от синусоидального [5-7]. Данное обстоятельство приводит к появлению высоких порядков дифракции в пропускающих и отражательных голографических решётках [8].

Известны разработки, целенаправленно использующие данный эффект для создания планарных световодов [9]. Так, например, в [8] сообщается о дифракционной эффективности ~17% во втором порядке дифракции в объёмных пропускающих решётках на фотополимерах Bayfol NX (Bayer Material-Science AG, Германия).

Целью данной работы является исследование возможностей формирования в ГФПМ, синтезированных в НИОХ СО РАН, отражательных и пропускающих голограмм с высокой дифракционной эффективностью в первом и втором порядках дифракции.

2. Основная часть

2.1. Фотополимерная композиция

В работе применялись ГФПМ, разработанные в НИОХ СО РАН, чувствительные в красной области спектра и описанные в [10,11], содержащие следующие основные компоненты: растворители, полимерное связующее (поливинилацетат), краситель Метиленовый Голубой, соинициатор, акриламидный мономер (АМ). Концентрацию красителя подбирали с учётом рекомендаций [12] таким образом, чтобы пропускание на длине волны записи лазерного излучения составляло 35–45 %. До экспонирования на фотополимерный слой накатывали защитную полиэтилентерефталатную 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 образцы толщиной 20 – 30 мкм.

2.2. Режимы записи и пост-обработки фотополимерных голограмм.

Отражательные и пропускающие фотополимерные голограммы записывали с использованием известных двухпучковых схем и лазера с длиной волны излучения 639 нм [13]. Пространственные частоты объёмных отражательной и пропускающей решёток составляли ≈ 4400 л/мм и 1000 л/мм (углы схождения записывающих пучков соответственно 110 и 37 градусов в воздухе). Интенсивность излучения в одном пучке составляла 1.3 мВт/см², а энергия экспозиции – 30 мДж/см². После записи голограммы закрепляли путём пост-экспонирования всего образца галогенной лампой.

Характеризация полученных голограмм включала в себя измерение контура угловой селективности пропускающих голограмм и спектра пропускания отражательных голограмм, оценку величин их дифракционной эффективности, модуляции показателя преломления. Указанные измерения и оценки параметров (представленные ниже) проводились с помощью ранее разработанных нами методик и стендов [14,15].

3. Анализ экспериментальных данных.

На рис. 1 показаны экспериментальные (1) и расчетные (2) кривые контуров спектрального отклика (рефлекса) образцов отражательной голограммы с толщинами $T \approx 20 - 30$ мкм, изготовленных в соответствии с ранее описанной процедурой записи и постобработки. Хорошо видны узкие провалы, обусловленные брэгговским отражением света, причём наряду с отражением (рефлексом) на длине волны $\lambda_1 \sim 722$ нм, соответствующим основной решётке, присутствует рефлекс на длине волны $\lambda_1 \sim 370$ нм, принадлежащий второй гармонике пространственного распределения показателя преломления. Отметим, что вопреки ожиданиям, длина волны второй гармоники не равна половине длины волны рефлекса

основной решетки. Данное обстоятельство находит объяснение при учете дисперсии показателя преломления при расчете эффективной усадки ГФПМ, имеющей место в процессе записи и постобработки голограмм [8].

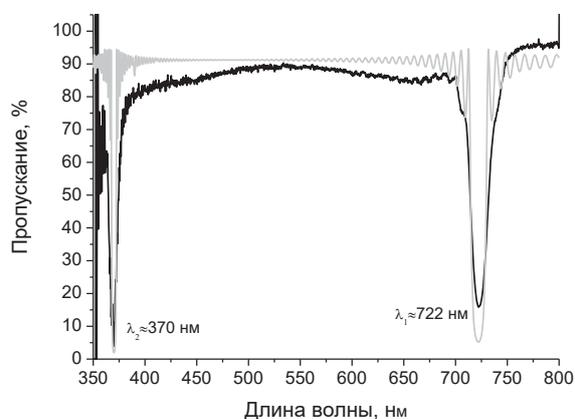


Рис. 1. Экспериментальные (—) и расчетные (---) графики спектров пропускания отражательных голограмм

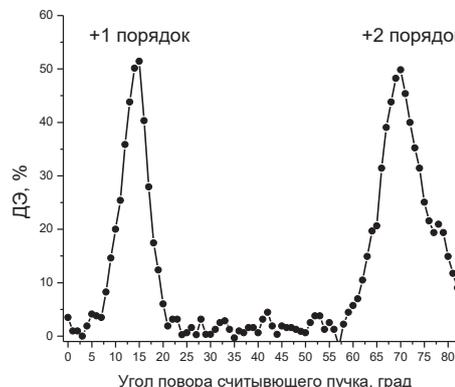


Рис. 2. Экспериментальный график контура угловой селективности пропускающих голограмм

На рис.2 изображены графики контуров угловой селективности +1 и +2 порядков пропускающей голограммы. Видно, что ДЭ этих порядков примерно равны и составляют 50% каждый. При расчетах предполагалось, что толщина решёток 20 мкм. Характеристики записанных голограмм приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Вид голограммы	ДЭ1, %	ДЭ2, %	FWHM1, нм	FWHM2, нм	$\Delta n1$	$\Delta n2$
Отражательная	~ 80	~ 90	16 нм	7 нм	~ 0.013	~ 0.013
Пропускающая	~ 50	~ 50	6 градусов	10 градусов	~ 0.008	~ 0.008

Длина волны рефлекса основной решётки $\lambda_{r1}=722$ нм, ширина контура $FWHM_{r1} \sim 16$ нм (по уровню 50 % от его глубины). $\lambda_{r2}=370$ нм, $FWHM_{r2}= 7$ нм; дифракционная эффективность и модуляция показателя преломления основной решётки и её второй гармоники составили примерно 80% и 0.013 соответственно.

Высокие значения дифракционной эффективности указывают на большую нелинейность модуляции показателя преломления разработанного ГФПМ, которая связана со скоростью полимеризации и диффузией мономера [16] Выявление связи скорости полимеризации и диффузией мономера и их влияния на природу высокой нелинейности модуляции коэффициента преломления ГФПМ требует дополнительных исследований и является предметом дальнейших исследований.

Заключение

Найдены режимы записи и постобработки отражательных и пропускающих голограмм в ГФПМ, синтезированных в НИОХ СО РАН, обеспечивающие высокую дифракционную эффективность в первом и втором порядках дифракции. Экспериментально зарегистрированы рефлексы основных решёток, а также их вторых гармоник соответственно на длине волны 722 нм и 370 нм, их ДЭ составила ~ 80 %. Для пропускающей решетки ДЭ в первом и втором порядках ~ 50 %.

Список источников

- [1] **Vorzobova N.** Application of Photopolymer Materials in Holographic Technologies / Vorzobova N., Sokolov P. // Polymers. — 2019. — 11. — 2020.
- [2] **Bruder F.-K.,** Bang H., Fdcke T. Precision Holographic Optical Elements in Bayfol HX Photopolymer/ Bruder F.-K., Bang H., Fdcke T. // Proc. of SPIE. — 2016. — 9771. — P. 977103.
- [3] **Akbari H.** Using acrylamide-based photopolymers for fabrication of holographic optical elements in solar energy applications/ Akbari H., Naydenova I., Martin S. // Appl. Opt. — 2014. — 53. — P. 1343–1353.
- [4] **Kogelnik, H.** Coupled Wave Theory for Thick Hologram Gratings// The Bell Syst. Tech. J. — 1969 —48—2909.
- [5] **Zhao G.** Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material / Zhao G., Mourolis P.// Opt. Commun. — 1995—P. 115–528.
- [6] **Neipp C.** Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material/ C. Neipp, A. Beléndez, S. Gallego, M. Ortuño, I. Pascual, J. T. Sheridan // Optics Express—2003.—11.—16.— 1835.
- [7] **Massenot S.** of the dynamic formation of transmission gratings recorded in photopolymers and holographic polymer-dispersed liquid crystals / Massenot S., Kaiser J.-L., Chevallier R., Renotte Y. // Appl. Opt. — 2004— 43—5489.
- [8] **Пен Е. Ф.** Экспериментальное исследование рефлексов высоких порядков от объёмных отражательных голографических решёток //Квантовая электроника. — 2018.— 48.—6.—545.
- [9] **Bruder F.** Diffractive optics with high Bragg selectivity: volume holographic optical elements in Bayfol® HX photopolymer film / Friedrich-Karl Bruder; Thomas Fäcke; Rainer Hagen; Dennis Hönel; Enrico Orselli; Christian Rewitz; Thomas Rölle; Günther Walze // Proc. SPIE.—2015.— 9508.—95080G-1.
- [10] **Шелковников, В.В.,** Васильев Е.В., Пен Е.Ф., Твердохлеб П.Е. Развитие голографических фотополимерных материалов и метод их исследований / Шелковников В.В., Васильев Е.В., Пен Е.Ф., Твердохлеб П.Е. // Сб. тр. Всеросс. Семинара «Юрия Николаевича Денисюка - основоположник отечественной голографии». С.-Пб.: ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 2007. С. 241-261.
- [11] **Патент РФ № 2552351.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне /В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев и др., — Опубл. 10.06.2015.
- [12] **Shelkovnikov, V. V.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials / Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I. // Opt. Mem. Neural Networks. — 2007.— 16.—2.—P. 75–83.
- [13] **Деревянко, Д. И.** Тонкослойные голографические фотополимерные материалы с большим изменением показателя преломления / Д.И. Деревянко, Е.Ф. Пен, В.В. Шелковников, С.И. Алиев // Автометрия.—2021.— Т. 57.—№ 6.— с.29–37.].
- [14] **Бабин, С. А.** Методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов / С.А. Бабин, Е. В. Васильев, В.И. Ковалевский Методы //Автометрия. — 2003.—№ 2.—С. 57–70;

- [15] **Пен, Е.Ф.** Регистрация и анализ характеристик угловой селективности голограмм в фотополимерных материалах / Пен Е.Ф., Вьюхина Н.Н., Твердохлеб П.Е., Васильев Е.В., Дервянко Д.И., Шелковников В.В., Алиев С.И. // Приборы и техника эксперимента. — 2022.—№2.— С. 99–108
- [16] **Colvin, V. L.** Quantitative model of volume hologram formation in photopolymers /V. L. Colvin, R. G. Larson, A. L. Harris, and M. L. Schilling //Journal of Applied Physics. — 1997.— P. 81–5913.

Holographic photopolymer material with high non-linearity modulation of the refractive index

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

Developed photopolymer material with a large nonlinearity of refractive index modulation. Volume reflective and transmissive holograms were obtained. The holograms have the first and second order of diffraction with a high equal diffraction efficiency (~ 80% for reflective and 50% for transmissive holograms).

Keywords: Photopolymer holograms, Nonlinearity of refractive index modulation.