

Запись высокоэффективных объемных голограмм в толстослойном гелеобразном желатине, допированном эозином Н

В. М. Катаркевич¹, Д. Пантелич², Т. Ш. Эфендиев¹

¹Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by;

²Институт физики, Белградский университет, Белград, Сербия

Приводятся результаты исследований по глубокой объемной голографической записи в новой самопроявляющейся светочувствительной среде - геле биополимера (желатин), допированный эозином Н. В работе использовались 10%-ные водно-желатиновые растворы эозина Н с концентрацией $C_d \sim 0,119$ мг/г и толщиной регистрирующего слоя $d = 1$ мм. Запись стационарных фазовых объемных голограмм (период $\Lambda = 5,11$ мкм) осуществлялась с помощью двух интерферирующих пучков излучения непрерывного Аг лазера ($\lambda_w = 514$ нм). Временной ход дифракционной эффективности записываемых решеток контролировался по интенсивности дифрагированного пучка излучения He-Ne лазера ($\lambda_r = 632,8$ нм), которое не поглощалось светочувствительной средой. Дифракционная эффективность зарегистрированных голограмм достигала $\eta \sim 90$ % при угловой селективности $\Delta\theta_{0,5} \sim 20,5'$, эффективной толщине $d' \sim 0,96$ мм и амплитуде модуляции показателя преломления $\Delta n \sim 2,6 \times 10^{-4}$.

Ключевые слова: светочувствительная среда, допированный красителем желатиновый гель, объемные голограммы, дифракционная эффективность, угловая селективность.

Введение

Поиск и исследование подходящих регистрирующих сред является одной из наиболее актуальных проблем голографии. На сегодняшний день разработаны и нашли свое применение как галогенид-серебряные, так и несеребряные голографические регистрирующие среды органического и неорганического происхождения как с обратимым, так и необратимым характером записи [1–3]. При этом с точки зрения создания голографических оптических элементов (ГОЭ) и устройств на их основе особый интерес представляют объемные регистрирующие среды с нерелаксирующим фазовым откликом, позволяющие осуществлять запись как одиночных, так и наложенных голограмм. К таким средам предъявляются достаточно строгие требования. Они должны иметь чрезвычайно высокую разрешающую способность, чувствительность к спектру большинства существующих источников лазерного излучения, высокие значения амплитуды модуляции показателя преломления, низкие потери на поглощение и рассеяние на рабочей длине волны, сохранять свои свойства при хранении и многократном считывании голограмм. Существенное значение также имеют технологичность изготовления и невысокая стоимость светочувствительной среды. Наряду с этим, в связи с все более широким использованием голографических технологий при создании различных биофотонных устройств (голографические сенсоры, фотонные кристаллы, брэгговские отражатели, лазеры с распределенной обратной связью (РОС) и др.), в последние годы все большее внимание уделяется такому важному ее параметру как экологичность [4–6].

Ранее нами был предложен и исследован новый вид самопроявляющегося светочувствительного материала для стационарной фазовой объемной записи – активированный лазерным красителем (родамин 6Ж, родамин С) гелеобразный желатин [7]. В отличие от всех опубликованных работ, посвященных записи фазовых голограмм в желатиновых слоях, в предложенной нами среде бихромат аммония не используется. Установлено, что такая среда позволяет на слоях толщиной ~ 1 мм осуществлять запись как одиночных, так мультиплексных голограмм с высокими значениями дифракционной эффективности и угловой селективности [8, 9]. Благодаря высокому пространственному

разрешению (> 5000 лин./мм), такой материал оказался весьма подходящим для создания лазера на красителе со стационарной РОС, работающего в первом порядке брэгговского отражения и обеспечивающего получение генерации узкополосного излучения как на одной, так и на нескольких длинах волн одновременно [10]. Вместе с тем известно, что в большинстве своем родамины являются достаточно токсичными соединениями [11]. Поэтому применительно к использованию в устройствах биомедицинского назначения разработанная нами регистрирующая среда не в полной мере удовлетворяла требованиям безопасности и экологичности.

Целью настоящей работы было улучшение экологических свойств разработанного ранее светочувствительного материала путем перехода от токсичных органических соединений к более безопасным для человека и окружающей среды. В качестве подходящего кандидата для замены нами был выбран эозин Н (динатриевая соль эозина), получаемый бромированием другого широко известного ксантенового красителя – флуоресцеина. Эозин Н нашел успешное применение как в биомедицинской практике [11], так и при разработке регистрирующих сред [12, 13].

1. Материалы и методы

Для приготовления светочувствительной среды в работе использовались следующие компоненты: краситель эозин Н ($\mu = 691,85$ г/моль), дистиллированная вода и фотографический желатин. Вначале готовился раствор красителя в дистиллированной воде с концентрацией $C_d \sim 0,132$ мг/г. К девяти частям раствора добавлялась одна часть (по весу) желатина, который набухал в нем в течение 1–2 часов при комнатной температуре. Затем раствор помещался в водяную баню ($T = 50\text{--}60^\circ\text{C}$) и выдерживался при периодическом помешивании в течение 1–1,5 часов. Приготовленный водно-желатиновый раствор заливался в герметично закрывающуюся плоскопараллельную стеклянную оптическую кювету с толщиной рабочего слоя $l = 0,1$ см и студенился при комнатной температуре в течение не менее одних суток. Готовая среда представляла собой достаточно плотный гель, отличающийся хорошей оптической однородностью. Концентрация желатина в геле составляла $C_g \sim 0,1$ г/г при концентрации красителя $C_d \sim 0,119$ мг/г.

Запись голограмм в гелевом растворе красителя осуществлялась с помощью двух симметрично сходящихся под углом $2\theta = 5,77^\circ$ пучков вертикально поляризованного излучения непрерывного Ag-лазера ($\lambda_w = 514$ нм). Это обеспечивало формирование пространственной решетки с периодом $\Lambda = \lambda_w / 2\sin\theta = 5,11$ мкм. Диаметр зоны облучения геля составлял $d \approx 0,4$ см. В процессе своей записи решетки под углом Брэгга считывались пучком излучения одномодового He-Ne-лазера ($\lambda_r = 632,8$ нм, $P \sim 1$ мВт), которое не поглощалось светочувствительной средой. Измерение энергетических характеристик пучков излучения Ag и He-Ne лазеров осуществлялось с помощью фотодиодов ФД–24К и восьмиканального двенадцатиразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ADCS5K-12-8.

2. Экспериментальные результаты

Рисунок 1 демонстрирует влияние дозы облучения геля E и интенсивности записывающих пучков I на дифракционную эффективность голографических решеток $\eta = I_1 / (I_1 + I_0)$, где I_1 и I_0 – интенсивности дифрагированного и прямо прошедшего пучков, соответственно. Видно, что увеличение дозы облучения сопровождается соответствующим ростом дифракционной эффективности решетки с последующим выходом значения η на некоторый максимальный (насыщенный) уровень $\eta_{\max}$.

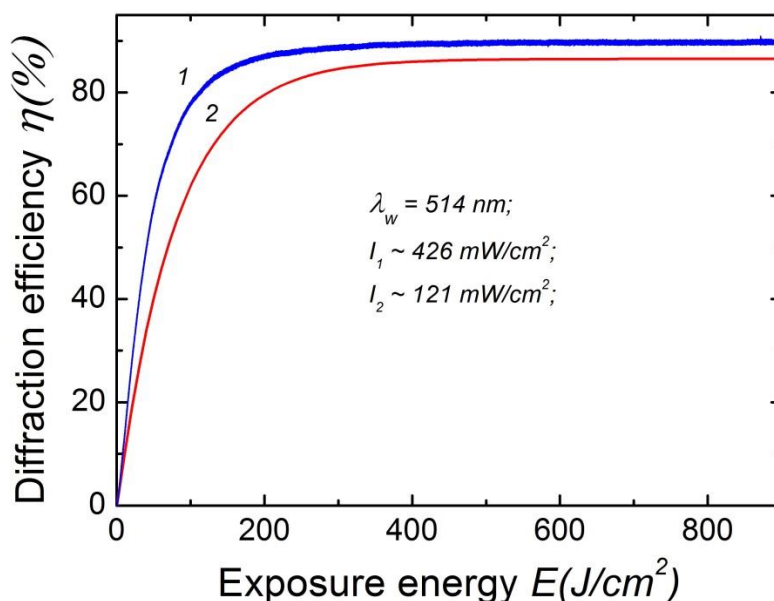


Рис. 1 – Зависимость дифракционной эффективности записываемой решетки η от дозы облучения E при интенсивности записывающего излучения $I \sim 426 \text{ мВт/см}^2$ (1) и 121 мВт/см^2 (2).

Из рис. 1 также видно, что уменьшение интенсивности излучения записи в $\sim 3,5$ раза сопровождается лишь незначительным (с $\eta_{\max} \sim 90\%$ до $\eta_{\max} \sim 86\%$) падением дифракционной эффективности голограммы. При этом в обоих случаях выход значения η на максимальный уровень достигается при сходных дозах облучения среды $\Delta E_{\max} \sim 560 \text{ Дж/см}^2$.

Измерение угловой селективности полученных голограмм показали, что она составляет $\Delta\theta_{0,5} \sim 20\text{--}20,5'$. При этом рассчитанные с использованием формул теории связанных волн [14] значения эффективной толщины решеток d' , а также амплитуды модуляции показателя преломления светочувствительной среды в зоне их записи Δn составили $d' = 0,95\text{--}0,96 \text{ мм}$ и $\Delta n = (2,5\text{--}2,6) \times 10^{-4}$, соответственно.

Заключение

Таким образом, показано, что гелеобразный желатин, допированный эозином Н, позволяет осуществлять запись глубоких объемных голограмм с высокими (близкими к теоретическому пределу) значениями дифракционной эффективности и угловой селективности. Благодаря своим голографическим характеристикам, а также безопасности и экологичности, разработанный светочувствительный материал может найти применение при создании фотонных устройств биомедицинского и экологического профиля.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № Ф20СРБГ-006).

Литература

1. Naydenova I., Babeva T., Nazarova D. (ed.). Holographic Materials and Optical Systems. BoD–Books on Demand. 2017.
2. Барачевский В. А. Современное состояние разработки светочувствительных сред для голографии (обзор). Опт. и спектр. 2018. Т. 124, №. 3. С. 371–399.

3. Weber M. J. Handbook of optical materials. CRC press. 2018.
4. Cody D., Naydenova I., Mihaylova E. New non-toxic holographic photopolymer material J. Opt. 2011. V. 14, No. 1. P. 015601 (4 pp).
5. Cody D., Gribbin S., Mihaylova E., and Naydenova I. Low-toxicity photopolymer for reflection holography. ACS Appl. Mater. Interfaces. 2016. V. 8, No. 28. P. 18481–18487.
6. V. Navarro-Fuster, M. Ortuño, R. Fernández, S. Gallego, A. Márquez, A. Beléndez, and I. Pascual. Peristrophic multiplexed holograms recorded in a low toxicity photopolymer. Opt. Mater. Express. 2017. V. 7, No. 1. P. 133–147.
7. Efendiev T.Sh., Katarkevich V.M., Rubinov A.N., Stupak A.P. Spectral–Luminescent and Generation Characteristics of a Gel–Like Gelatin Doped with a Dye. J. Appl. Spectrosc. 2001. V. 68, No. 1. P. 124–129.
8. Efendiev T.Sh., Katarkevich V.M., Rubinov A.N. Recording volume holograms in dye-activated aqueous gelatin gel. Tech. Phys. Lett. 2006. V. 32, No. 11. P.945–947.
9. Katarkevich V.M., Rubinov A.N., Efendiev T.Sh. Highly efficient volume hologram multiplexing in thick dye-doped jelly-like gelatin. Opt. Lett. 2014. V. 39, № 15. P. 4627–4630.
10. Эфендиев Т.Ш., Катаркевич В.М., Каджар Ч.О., Карамалиев Р.А., Измайлов А.Ч. Малогабаритный лазер на красителях со стационарной распределенной обратной связью. Известия НАН Азербайджана. 2009. Т. 29, № 5. С. 67–73.
11. Sabnis R. W. Handbook of Biological Dyes and Stains: Synthesis and Industrial Applications (Edition 1). Wiley. 2010.
12. Farsari M., Filippidis G., Sambani K., Drakakis T. S., Fotakis C. Two-photon polymerization of an Eosin Y-sensitized acrylate composite. J. Photochem. Photobiol. A: Chem. 2006. V. 181, No. 1. P. 132–135.
13. Conde-Cuatzo M. G., Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Fuentes-Tapia I., Ambrosio-González M. A. Real-time holographic gratings recorded in Norland Optical Adhesive 65 and yellow eosin. In *Practical Holography XXXIV: Displays, Materials, and Applications*. International Society for Optics and Photonics. 2020. V. 11306. P. 113060O.
14. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings. Bell System Tech. J. 1969. V. 48, No.9. P. 2909–2947.

Highly efficient volume holograms recording in a thick-layer eosin Y doped jelly-like gelatin

V.M. Katarkevich¹, D. Pantelic², T.Sh. Efendiev¹

¹*B.I. Stepanov Institute of Physics, NAS of Belarus, Minsk, Belarus;
e-mail: katarkevich@dragon.bas-net.by*

²*Institute of Physics, University of Belgrade, Belgrade, Serbia*

The results of studies on deep volumetric holographic recording in a new self-developing photosensitive medium - eosin Y doped biopolymer (gelatin) gel are presented. 10% water-gelatin solutions of eosin Y with a concentration of ~ 0.119 mg/g and a recording layer thickness $d = 1$ mm were used. Stationary volume phase holograms (period $\Lambda = 5.11$ μm) were recorded using two interfering beams of cw Ar laser radiation ($\lambda_w = 514$ nm). The real time course of the grating diffraction efficiency was monitored by the intensity of the diffracted beam of He-Ne laser ($\lambda_r = 632.8$ nm), which was not absorbed by the photosensitive medium. The diffraction efficiency of the recorded holograms reached $\eta \sim 90$ % at an angular selectivity of $\Delta\theta_{0.5} \sim 20.5'$, an effective thickness $d' \sim 0.96$ mm and refractive index modulation amplitude $\Delta n \sim 2.6 \times 10^{-4}$.

Keywords: photosensitive medium, dye-doped gelatin gel, volume holograms, diffraction efficiency, angular selectivity