

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 773.93; 535.421

СРАВНЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЁТОК  
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СХЕМ ЗАПИСИ  
В ФОТОПОЛИМЕРНОМ МАТЕРИАЛЕЕ. Ф. Пен<sup>1,2</sup>, В. В. Шелковников<sup>3</sup><sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20<sup>3</sup>Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9  
E-mail: pen@iae.nsk.su

Теоретически и экспериментально исследовано соотношение дифракционной эффективности объёмных отражательных голограмм, полученных с использованием как двухпучковой, так и однопучковой схем записи в поглощающих светочувствительных материалах. На примере конкретного фотополимерного материала продемонстрировано это соотношение.

*Ключевые слова:* голография, регистрирующие среды, фотополимерные материалы, отражательные голограммы, дифракционная эффективность.

DOI: 10.15372/AUT20180101

**Введение.** Особенности объёмных голограмм в поглощающих светочувствительных фотополимерных материалах (ФПМ) исследовались неоднократно и с разных сторон. Например, в [1] предложены и изучены модели пропускающих и отражательных решёток в таких материалах, показано существенное влияние поглощения света как на дифракционную эффективность (ДЭ) решёток, так и на их селективные свойства; в [2] изучено влияние поглощения света на формирование эффективной толщины голографической решётки; в [3] определена оптимальная оптическая плотность поглощающих светочувствительных материалов применительно к различным типам голограмм. Основная цель исследований — выяснение зависимости максимально возможного значения ДЭ голограмм от свойств ФПМ и вариантов схмотехники. При этом обычно рассматривается стандартная двухпучковая схема записи пропускающих, а также отражательных голограмм с равными интенсивностями референтного и объектного пучков, т. е. с максимальным контрастом интерференционных полос.

Однако остаются малоизученными практически важные аспекты, в частности оценка ДЭ объёмных отражательных голограмм, полученных с использованием однопучковой схемы Ю. Н. Денисюка [4], в которой второй пучок, необходимый для формирования голограммы, образуется в результате отражения от объекта записи (например, зеркала), расположенного за светочувствительным материалом. Такая схема удобна при тестировании характеристик светочувствительного материала [5, 6], когда требуется оперативно с помощью наиболее простых средств удостовериться в том, что испытываемый образец материала действительно обеспечивает заявленный уровень ДЭ. Обычно в этой схеме значение ДЭ меньше, чем в двухпучковой, поскольку интенсивности референтного и объектного пучков не равны, следовательно, контраст интерференционных полос снижен.

Представляется, что соотношение ДЭ для двухпучковой и однопучковой схем записи будет вполне определённым при фиксированных параметрах засветки в пределах линейного участка характеристической кривой светочувствительного материала.

Цель данного исследования — определить это соотношение теоретически и проверить экспериментально на конкретных образцах ФПМ.

**Теория.** Известно [7], что дифракционная эффективность фазовой объёмной отражательной голограммы (решётки)

$$\eta = \tanh^2 \left( \frac{\pi \Delta n V T}{\lambda \cos \psi} \right) = \tanh^2(\nu V). \quad (1)$$

Здесь  $\Delta n$  — амплитуда модуляции показателя преломления, пропорциональная энергии засветки;  $T$  — толщина голограммы;  $\lambda$  — длина волны записывающего излучения;  $\psi$  — угол схождения интерферирующих пучков, которые в случае отражательных голограмм направлены навстречу друг другу;  $\nu$  — параметр, описывающий изменение фазы света, проходящего сквозь голограмму, пропорциональный величине  $\Delta n$ ;  $V$  — контраст картины интерференции объектного и опорного пучков. Обычно  $\nu < \pi$ ,  $V < 1$ . Максимальное значение  $V = 2\sqrt{r}/(1+r) = 1$  достигается при соотношении интенсивностей опорного ( $R$ ) и объектного ( $S$ ) пучков:  $r = I_R/I_S = 1 : 1$ .

Такие решётки могут быть получены при использовании голографических фотополимерных материалов [8, 9]. Однако эти материалы на стадии записи голограмм обладают заметным поглощением света, что приводит к переменным значениям контраста интерференционной картины и энергии засветки по глубине голограммы. Выясним влияние переменных значений данных параметров на суммарное значение дифракционной эффективности этой голограммы применительно к различным схемам записи.

Пусть изменения интенсивностей опорного и объектного пучков света (распространяющихся навстречу друг другу в случае объёмных отражательных голограмм) по мере их проникновения в глубину ФПМ описываются выражениями

$$I_R(x) = I_0 \exp(-\alpha x); \quad I_S(x) = I_0 \exp(-\alpha(T - x)). \quad (2)$$

Здесь  $I_0$  — интенсивность света на входе регистрирующего слоя;  $\alpha$  — коэффициент поглощения света;  $x$  — пространственная координата по глубине ФПМ.

Тогда в формуле (1) следует записать  $\nu = \nu(x)$  и  $V = V(x)$ . В свою очередь,

$$\nu(x) \sim \Delta n(x) \sim t\sqrt{I_\Sigma(x)}, \quad (3)$$

где  $t$  — время засветки;  $I_\Sigma(x)$  — суммарная интенсивность света в результате интерференции опорной и объектной волн, падающих на ФПМ с противоположных сторон, в некотором сечении  $x$  регистрирующего слоя задаётся выражением

$$I_\Sigma(x) = I_0 \exp(-\alpha x) + I_0 \exp(-\alpha(T - x)) + 2I_0 \exp(-\alpha T/2). \quad (4)$$

Зависимость изменения показателя преломления  $\Delta n$  пропорционально корню квадратному из интенсивности света общеизвестна и обусловлена спецификой протекания реакции фотополимеризации радикального типа [9, 10]. Строго говоря, выражение (3) приближённо справедливо лишь в начальный момент записи, однако в данной работе мы ограничимся этим упрощением. Кроме того, далее предполагается, что запись проводится на квазилинейном участке характеристической кривой светочувствительного материала.

Графически вид зависимостей нормированных значений  $I_R(x)$  и  $V(x)$  изображён на рис. 1, *a, b*. Считаем, что для фотополимера  $T = 16$  мкм,  $\Delta n = 0,015$ ,  $\alpha = 0,05$  (соответствует характеристикам ФПМ фирмы BayerMaterialsScience AG (Германия) [8], использован-

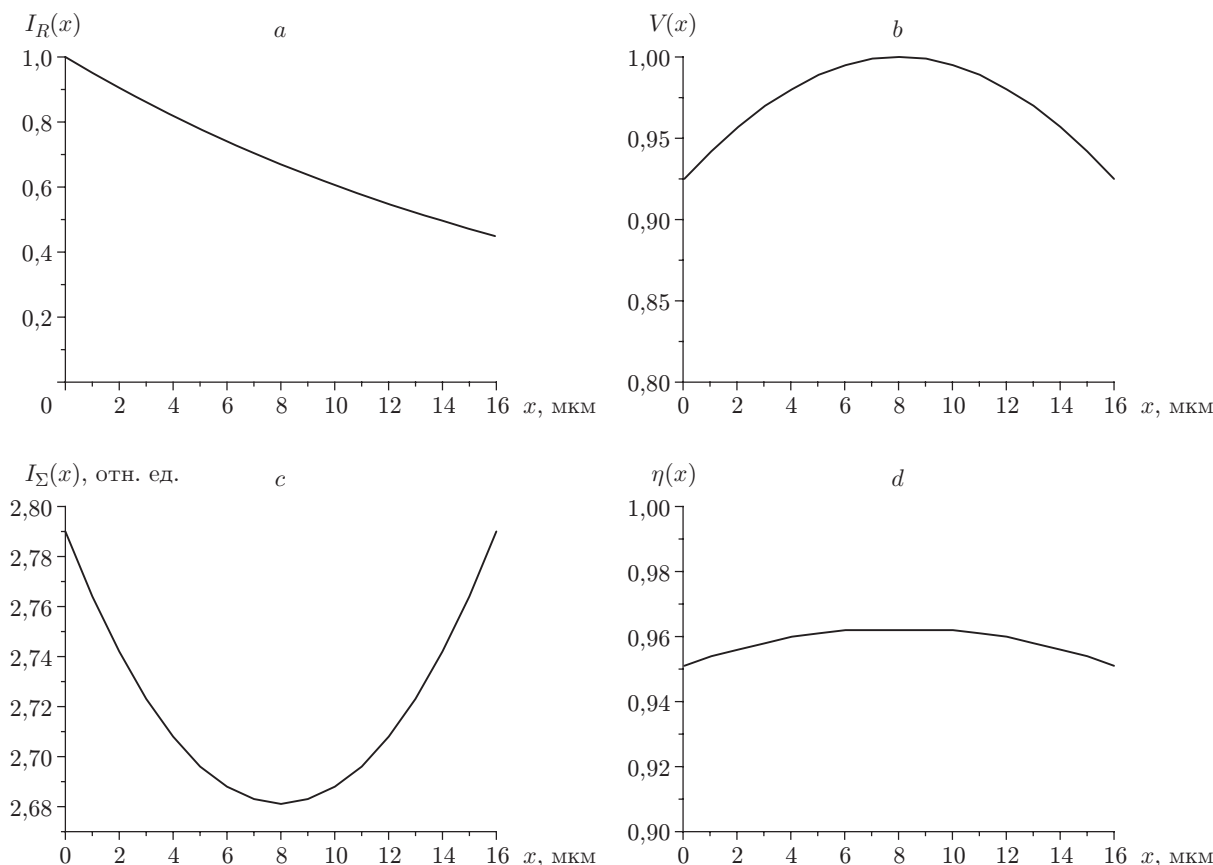


Рис. 1. Графики значений параметров записи и ДЭ по глубине голограммы

ного нами в экспериментах). Видно, что в этом случае интенсивность света по мере его распространения в глубину ФПМ уменьшается примерно в 2 раза, а  $V(x)$  достигает своего максимума ровно в середине толщины голограммы. Напротив, зависимость  $I_{\Sigma}(x)$ , приведённая на рис. 1 *c*, в данной точке демонстрирует минимум своего значения. Величина ДЭ, описываемая выражением (1), испытывает на себе совместное воздействие  $\nu = \nu(x)$  и  $V = V(x)$ , в результате чего складывается зависимость ДЭ по глубине голограммы, изображённая на рис. 1, *d*. При расчётах максимальное значение величины  $\nu(x)$  принято близким к  $\pi$ , тогда для  $\lambda = 0,532$  мкм расчётное среднее значение ДЭ равно 0,96 (усреднение проводилось по толщине голограммы).

Рассмотрим теперь ДЭ объёмных отражательных решёток, полученных с помощью однопучковой схемы Ю. Н. Денисюка. На практике важны два случая:

1. Для формирования объектной волны используется «глухое» зеркало с коэффициентом отражения 100 %, тогда

$$\begin{aligned}
 I_S(x) &= I_0 \exp(-\alpha T) \cdot \exp(-\alpha(T - x)); \\
 I_{\Sigma}(x) &= I_0 \exp(-\alpha x) + I_0 \exp(-\alpha T) \cdot \exp(-\alpha(T - x)) + 2I_0 \exp(-\alpha T).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Заметим, что при получении таких голограмм необходимо скорректировать время засветки  $t$  на коэффициент  $k$ , чтобы её энергия была равна энергии записи в двухпучковой схеме; в данном примере  $k = 1,13$ .

На рис. 2 видно, что характер зависимостей  $V1(x)$ ,  $I_{\Sigma}(x)$ , а также  $\nu = \nu(x)$  (на рисунке не показано) принципиально иной в сравнении с двухпучковой схемой (см. рис. 1, *b, c*), а именно  $V1(x)$ , монотонно возрастает и достигает максимума на тыльной поверхности

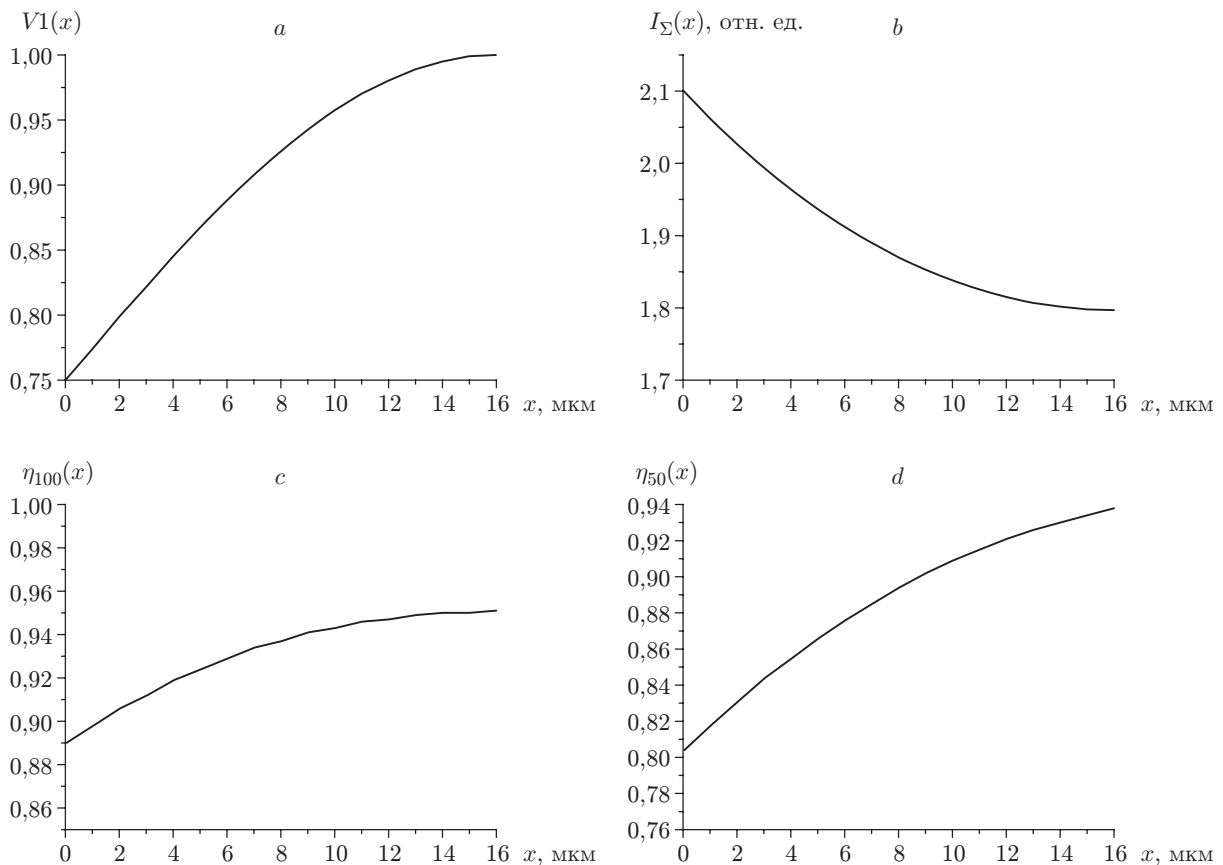


Рис. 2. Параметры объёмных отражательных голограмм, полученных с использованием однопучковой схемы

образца ФПМ, где функция  $I_{\Sigma}(x)$ , наоборот, имеет минимальное значение;  $\nu = \nu(x)$  не имеет экстремума и монотонно прирастает по мере увеличения толщины голограммы так же, как и зависимость дифракционной эффективности  $\eta_{100}(x)$ , изображённая на рис. 2 с, её среднее (по толщине голограммы) значение составляет ДЭ<sub>100</sub> ~ 0,93.

2. Если для формирования объектной волны используется зеркало с коэффициентом отражения менее 100 % (например, 50 %), что необходимо для мониторинга изменений ДЭ голограммы непосредственно в процессе её формирования [11], тогда

$$I_S(x) = 0,5I_0 \exp(-\alpha T) \cdot \exp(-\alpha(T - x)). \quad (6)$$

При этом значения  $V1(x)$ ,  $I_{\Sigma}(x)$  и  $\nu = \nu(x)$  изменятся, в том числе среднее значение ДЭ (с учётом коэффициента  $k = 1,35$  величина ДЭ<sub>50</sub> составит ~0,88 (рис. 2, d)), однако характер зависимостей будет аналогичным случаю с «глухим» зеркалом.

Таким образом, зависимости  $V(x)$ ,  $I_{\Sigma}(x)$  и  $\nu = \nu(x)$  для двухпучковой схемы записи объёмной отражательной голограммы и метода Ю. Н. Денисюка существенно различаются. Однако при выполнении указанных выше условий записи голограмм должно соблюдаться определённое соответствие значений их ДЭ.

Расчётный вид такого (в интервале ДЭ ~ (0,5–0,95)) соответствия изображён на рис. 3, где ситуации с «глухим» и двумя вариантами полупрозрачных зеркал (50 и 75 %) обозначены разными символами. Например, если в эксперименте с полупрозрачным зеркалом (50 %) ДЭ<sub>50</sub> = 0,8, то максимальная ДЭ, которую может обеспечить исследуемый экземпляр ФПМ, составит 0,9 и реализуется лишь в двухпучковой схеме. Несмотря на то

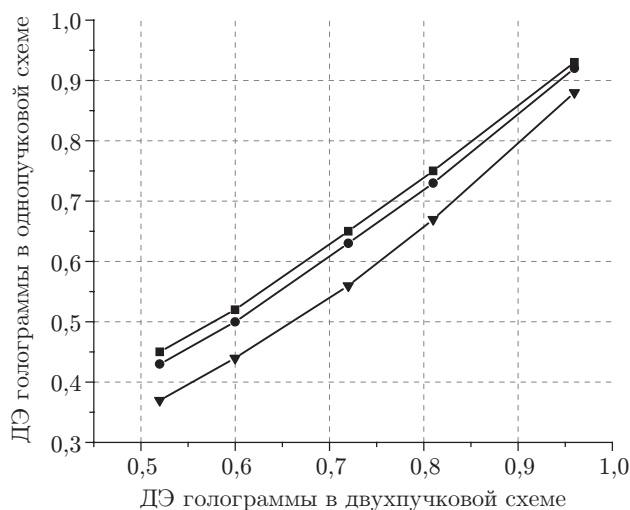


Рис. 3. Диаграмма соответствия ДЭ голограмм, полученных в двухпучковой и однопучковой схемах («глухое» зеркало (■), полупрозрачные зеркала с коэффициентами отражения 75 (●) и 50 % (▼))

что диаграмма получена для частного случая с одним набором параметров ФПМ, интересующее нас соответствие вполне наглядно.

**Экспериментальная часть.** Для проверки вышеизложенных рассуждений проведены экспериментальные исследования с использованием ФПМ фирмы BayerMaterial-science AG [8] и устройства тестирования голографических светочувствительных материалов [12]. Схема устройства изображена на рис. 4, где 1 — лазер; 2 — фотозатвор; 3 — зеркало, направляющее лазерный пучок  $R$ , называемый опорным, на ФПМ 4; 5 — полупрозрачное зеркало, формирующее предметный пучок  $S$ ; 6 — источник белого света; 7 — спектрофотометр; 8 — компьютер; 9 — дисплей. Дифракционная эффективность образующейся голографической отражательной решётки оценивается с помощью данных, получаемых при измерении спектра пропускания этой решётки [12]. В свою очередь, для

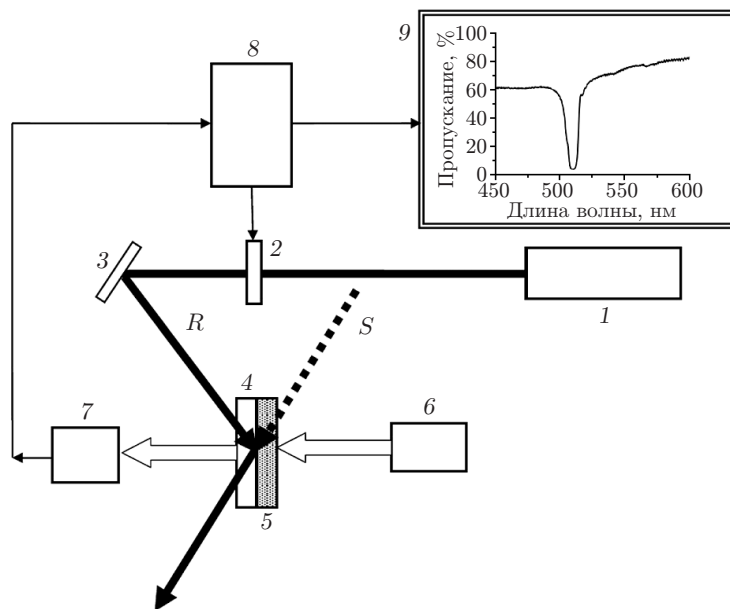


Рис. 4. Функциональная схема тестирования ФПМ

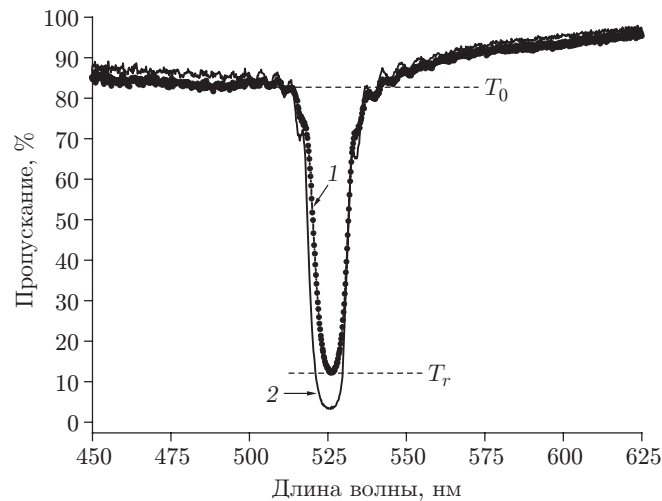


Рис. 5. Спектры пропускания объёмных отражательных голограмм, полученных в однопучковой схеме с использованием полупрозрачного (кривая 1) и «глухого» (кривая 2) зеркал

обеспечения возможности измерений в процессе записи голограммы коэффициент отражения полупрозрачного зеркала 5 должен быть менее 100 % (в наших экспериментах он составлял примерно 50 %).

В случае использования «глухого» зеркала с коэффициентом отражения 100 % зондирование записываемой отражательной голограммы пучком белого света таким образом невозможно. Измерение спектрального отклика проводилось уже после записи голограммы, при этом зеркало 5 убиралось.

При записи голограммы с полупрозрачным зеркалом интенсивность пучка  $R$  составляла  $2 \text{ мВт/см}^2$ , время экспозиции — 20 с. Для «глухого» зеркала время засветки равнялось 17 с, что в 1,13 раза меньше, чем в случае с полупрозрачным зеркалом. На рис. 5 кривая 1 обозначает спектральный отклик отражательной голограммы, полученной с помощью полупрозрачного зеркала с коэффициентом отражения 50 %, а кривая 2 соответствует спектральному отклику отражательной голограммы с «глухим» зеркалом. После записи голограммы подвергались постобработке путём засветки галогенной лампой мощностью 500 Вт на расстоянии 10 см в течение 30 с.

Видно, что сигнал, представленный кривой 1, слабее, чем сигнал, обозначенный кривой 2. Значения ДЭ, соответствующие этим сигналам, оценивались спектроскопическим методом [13] по формуле

$$\text{ДЭ} = (1 - T_r/T_0),$$

где  $T_r$  — пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика,  $T_0$  — остаточное пропускание образца ФПМ вне участка голограммы. Для кривых 1 и 2 получаем  $\text{ДЭ}_{50} \sim 0,85$  и  $\text{ДЭ}_{100} \sim 0,95$  соответственно. Напомним, что теоретические значения для этих двух ситуаций составили  $\text{ДЭ}_{50} \sim 0,88$  и  $\text{ДЭ}_{100} \sim 0,93$ . Таким образом, мы имеем хорошее совпадение экспериментальных и расчётных данных.

**Заключение.** Для оценки максимально достижимой дифракционной эффективности объёмных отражательных голограмм (решёток), записываемых на светопоглощающих фотополлимерных материалах, можно успешно использовать однопучковую схему Ю. Н. Денисюка, несмотря на то что в этом случае значение ДЭ ниже, чем в стандартной двухпучковой схеме, поскольку интенсивности референтного и объектного пучков не равны и, следовательно, контраст интерференционных полос снижен.

Теоретически и экспериментально показано, что при фиксированных условиях испытаний (интенсивности записывающих пучков и энергии засветки) наблюдается определённое соответствие значений ДЭ голограмм, полученных в однопучковой и двухпучковой схемах.

Результаты данного исследования могут быть полезны при разработке методов испытаний голографических светочувствительных материалов, особенно фотополимерных.

Авторы выражают благодарность фирме BayerMaterialsScience AG за предоставленные образцы фотополимерного материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sharangovich S. N., Dovolnov E. A.** Models of holographic record of reflection and transmitted diffraction gratings in optical absorbent photopolymeric materials // Proc. SPIE. 2004. **5464**. P. 399–410.
2. **Gallego S., Ortuño M., Neipp C. et al.** Maximum effective optical thickness of the gratings recorded in photopolymers // Proc. SPIE. 2005. **5827**. P. 107–117.
3. **Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I.** Optimal optical density of the absorbing holographic materials // Opt. Memory Neural Networks (Inform. Opt.). 2007. **16**, N 2. P. 75–83.
4. **Денисюк Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Оптика и спектроскопия. 1963. **15**, вып. 4. С. 522–532.
5. **Пен Е. Ф., Зарубин И. А., Шелковников В. В., Васильев Е. В.** Методика определения параметров усадки голографических фотополимерных материалов // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 60–69.
6. **Шелковников В. В., Васильев Е. В., Русских В. В. и др.** Свойства монохромных и двухцветных голограмм в слоистых фотополимерных материалах // Автометрия. 2016. **52**, № 4. С. 107–117.
7. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell Syst. Techn. Journ. 1969. **48**, N 9. P. 2909–2947.
8. **Bruder F.-K., Deuber F., Fäcke T. et al.** Reaction-diffusion model applied to high resolution Bayfol® HX photopolymer // Proc. SPIE. 2010. **7619**. 76190I.
9. **Шелковников В. В., Пен Е. Ф., Васильев Е. В., Твердохлеб П. Е.** Развитие голографических фотополимерных материалов и методов их исследований // Сб. тр. Всерос. сем. «Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии». С.-Пб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе, 2007. С. 241–261.
10. **Bagdasarian H. S.** Theory of Radical Polymerization. М.: Nauka, 1966. 300 p.
11. **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.
12. **Пат. 165622 РФ.** Устройство тестирования голографических светочувствительных материалов /Е. Ф. Пен. Опубл. 27.10.2016, Бюл. № 30.
13. **Smothers W. K., Monroe B. M., Weber A. M., Keys D. E.** Photopolymers for holography // Proc. SPIE. 1990. **1212**. P. 20–29.

*Поступила в редакцию 31 марта 2017 г.*