

УДК 535.421; 778.38

РЕГИСТРАЦИЯ РЕФЛЕКСОВ ВЫСОКИХ ПОРЯДКОВ В ОБЪЁМНЫХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ РЕШЁТКАХ

Е. Ф. Пен

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: pen@iae.nsk.su*

Экспериментально зарегистрированы рефлексы высоких порядков в объёмных отражательных голографических решётках в фотополимерном материале.

Ключевые слова: объёмные голограммы, брэгговская дифракция, отражательные решётки, фотополимеры.

DOI: 10.15372/AUT20180203

Введение. В работах [1, 2] сообщается о регистрации высоких порядков брэгговской дифракции на объёмных голографических пропускающих решётках в фотополимерных материалах (ФПМ) и условиях их появления. Данный факт объясняется тем, что профиль периодического распределения показателя преломления на конечной стадии формирования решёток существенно отличается от синусоидального вида картины засветки фотополимера в силу нелинейной зависимости дифракционной эффективности (ДЭ) решёток от интенсивности засветки, большой разницы скоростей диффузии мономера и фотополимеризации, а также насыщения изменения показателя преломления с ростом энергии засветки.

В работе [3] зафиксированы рефлексы (отражение света) высоких порядков в объёмных отражательных решётках в голографических галоидосеребряных эмульсиях типа ВВ640. К сожалению, авторам не удалось продемонстрировать присутствие этих рефлексов на едином графике спектров пропускания исследуемых решёток. Очевидно, это связано со сложностью подобных экспериментов, поскольку необходимо зарегистрировать значительно удалённые друг от друга рефлексы с высоким спектральным разрешением. В [3] данная проблема обойдена путём искусственного увеличения периода решёток с помощью технологии набухания желатины в воде.

Цель предлагаемой работы — экспериментальное подтверждение существования рефлексов высоких порядков в объёмных отражательных голографических решётках в ФПМ, получение новых данных о дифракционных и спектральных характеристиках таких решёток. Эти сведения могут быть полезны как в плане уточнения механизмов формирования голограмм в фотополимерных материалах, так и в практике их использования в спектральных фильтрах, дисплеях, защитных голограммах и т. д.

Обсуждение результатов экспериментов. В экспериментах применялся фотополимер ВАУФОЛ НХ ТР из линейки продуктов компании Bayer MaterialScience AG (Германия) [4]. Исследованные нами объёмные отражательные решётки 1 и 2 изготовлены с помощью голографической установки на основе He—Ne-лазера, содержавшей оптические призмы для ввода излучения в ФПМ и обеспечения необходимого угла схождения записывающих пучков в среде. Для решётки 1 применялась призма с основанием в виде равнобе-

ренного прямоугольного треугольника, опорный пучок направлялся примерно по нормали к узкой боковой грани, а ФПМ приклеивался к широкой боковой грани, что обеспечивало оптический контакт с призмой. Решётка 2 была изготовлена с помощью другой призмы (спектроскопической) с углом при вершине 67° , при этом угол падения опорного пучка в среде ФПМ подбирался близким к 65° , чтобы расчётные значения длин волн рефлексов основной решётки, её второй и третьей гармоник составляли 1500, 750 и 500 нм соответственно.

Измерение спектральных характеристик решёток проводилось с помощью спектрометра SHIMADZU UV/VIS 2501 PC с двойным монохроматором (фирма Shimadzu Corporation, Япония) и оптического анализатора спектров Yokogawa AQ6370 (фирма Yokogawa, Япония), работающих в диапазонах 190–1100 и 600–1700 нм соответственно с разрешением 0,1 нм.

Дифракционная эффективность объёмных отражательных голограмм оценивалась спектроскопическим методом [5] по формуле

$$\text{ДЭ} = (1 - \text{Tr}_r / \text{Tr}_0) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где Tr_r — коэффициент пропускания голограммы в области наименьших значений контура спектрального провала, вызванного отражением света; Tr_0 — коэффициент пропускания вне данной области (вблизи основания контура).

На рис. 1 представлен спектр пропускания объёмной отражательной решётки 1. На фоне остаточного спектра ФПМ, подвергнутого постобработке [4], хорошо видны узкие провалы, обусловленные отражением света (рефлексами) голографической решёткой, причём наряду с отражением, соответствующим основной решётке, присутствуют рефлексы, принадлежащие второй и третьей гармоникам.

В результате обработки экспериментальных данных установлено, что длина волны рефлекса основной решётки $\lambda_1^r \sim 904$ нм, ширина контура $\Delta\lambda_1^r \sim 8$ нм (на уровне 50 % от его глубины), ДЭ, вычисленная по формуле (1), составляет $\eta_1^r \sim 50$ %; для второй гармоники — $\lambda_2^r \sim 457$ нм, $\Delta\lambda_2^r \sim 4$ нм и $\eta_2^r \sim 17$ %; для третьей — $\lambda_3^r \sim 313$ нм, $\Delta\lambda_3^r \sim 1$ нм и $\eta_3^r \sim 3$ %. Заметим, что доля второй гармоники в спектре отражённого света существенна, а третьей — мала.

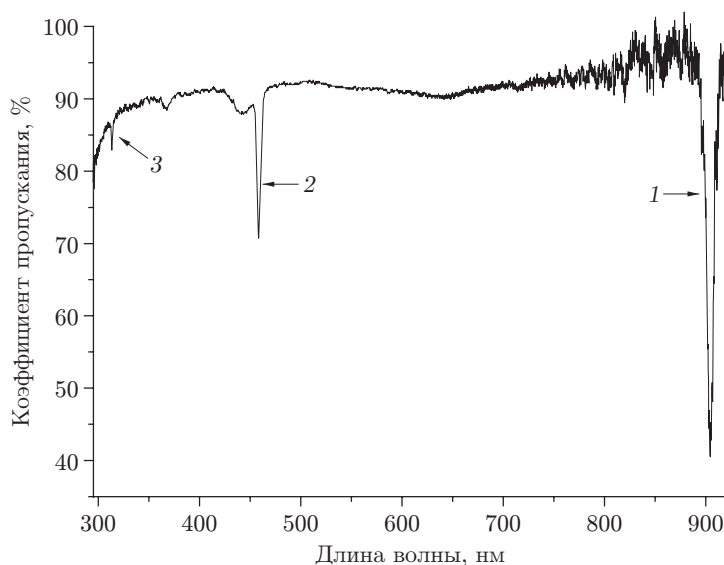


Рис. 1. Спектр пропускания объёмной отражательной решётки 1: 1 — рефлекс основной решётки; 2 и 3 — рефлексы второй и третьей гармоник

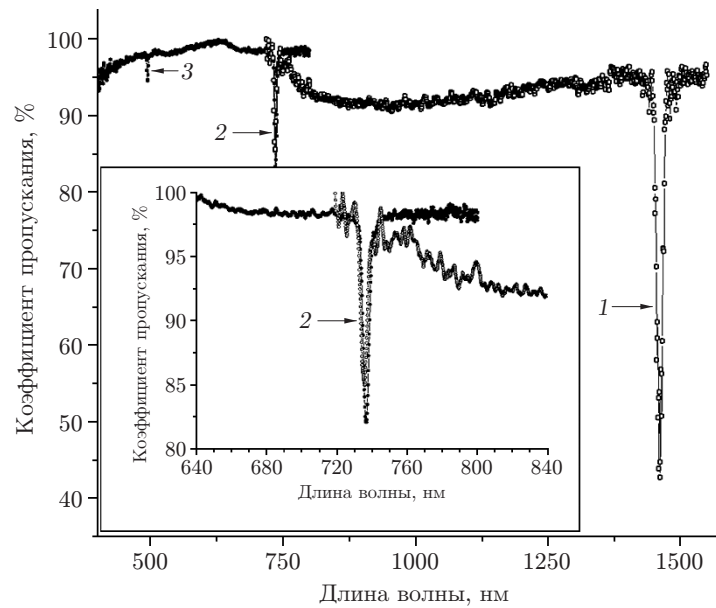


Рис. 2. Спектр пропускания объёмной отражательной решётки 2: 1 — рефлекс основной решётки; 2 и 3 — рефлексы второй и третьей гармоник (○ — спектр, зарегистрированный на анализаторе AQ6370, ● — спектр, полученный с помощью спектрофотометра 2501 PC)

На рис. 2 приведён график спектра пропускания объёмной отражательной решётки 2, сформированной с помощью He—Ne-лазера и ранее упомянутой спектроскопической призмы. График представляет собой сшивку двух спектров одной и той же решётки, полученных на разных спектральных приборах. Сшивка оказалась возможной благодаря тому, что рефлексы второй гармоники исследуемой решётки на обоих спектрах совпали, это хорошо видно на увеличенном изображении фрагмента спектра.

После обработки данных установлено, что длина волны рефлекса основной решётки $\lambda_1^r \sim 1462$ нм, ширина контура (на уровне 50 % от его глубины) $\Delta\lambda_1^r \sim 12$ нм, ДЭ составляет $\eta_1^r \sim 53$ %; для второй гармоники — $\lambda_2^r \sim 736$ нм, $\Delta\lambda_2^r \sim 4$ нм и $\eta_2^r \sim 15$ %; для третьей — $\lambda_3^r \sim 495$ нм, $\Delta\lambda_3^r \sim 1$ нм и $\eta_3^r \sim 3$ %, т. е. доля второй гармоники в спектре отражённого света достаточно заметна, а третьей — незначительна.

Отметим, что экспериментальные значения длин волн рефлексов λ^r как основных решёток 1 и 2, так и их гармоник, отличаются от расчётных (теоретических) $\bar{\lambda}^r$, которые могут быть найдены по формулам, приведённым в [6].

Эти отличия обусловлены, во-первых, отклонениями от законов брэгговской дифракции, связывающих период объёмной отражательной решётки L , её показатель преломления n и длину волны рефлекса соотношением [7]

$$\lambda^r = L2n. \quad (2)$$

Данные отклонения возникают в процессе записи решёток и постобработки ФПМ из-за так называемой эффективной усадки фотополимера S_{eff} [6, 8], учитывающей уменьшение толщины T ФПМ (геометрическая усадка) и увеличение среднего значения n . Геометрическая усадка $\Delta T/T$, достигающая 0,01–0,02 [6, 9], приводит к пропорциональному уменьшению периода решётки и, следовательно, к сдвигу рефлекса в коротковолновую область спектра, а увеличение показателя преломления фотополимера $\Delta n/n$ вследствие фотоиндуцированной конверсии мономера в полимер, составляющее 0,005–0,01 [6, 9], вызывает сдвиг рефлекса, наоборот, в длинноволновую область.

Заметим, что отношения $\lambda^r/\tilde{\lambda}^r$ для рефлексов основной решётки и её гармоник должны быть одинаковыми, поскольку независимо от периода решётки справедливо выражение

$$\lambda^r/\tilde{\lambda}^r = S_{\text{eff}} = (1 + \Delta n/n)(1 - \Delta T/T). \quad (3)$$

Вместе с тем расчёты показывают, что при длине волны лазера $\lambda = 633$ нм и показателе преломления ФПМ $n = 1,5$ основной период решётки 1 равен 305,4 нм, длина волны её рефлекса — $\tilde{\lambda}_1^r = 916$ нм, а второй и третьей гармоник — 458 и 305 нм. В таком случае соотношения экспериментальных и расчётных значений указанных рефлексов оказываются неодинаковыми и составляют 0,9869; 0,9978; 1,0262.

Для устранения этой нестыковки обратим внимание, что в соответствии с формулой (2) расчёт длины волны рефлекса решётки должен проводиться с учётом дисперсии показателя преломления ФПМ, т. е. его зависимости от длины волны наблюдения $n(\lambda)$. Подобная зависимость для фотополимеров Bayer MaterialScience приведена в [9], где видно (с экстраполяцией), что в интервале длин волн 900–300 нм среднее значение показателя преломления изменяется от 1,490 до 1,545 и заметно отличается от ранее принятого нами постоянного значения $n = 1,5$. Необходимое уточнение дало новые расчётные значения для решётки 1: $\tilde{\lambda}_1^r = 910$ нм, $\tilde{\lambda}_2^r = 460$ нм и $\tilde{\lambda}_3^r = 315$ нм, с которыми экспериментальные данные соотносятся как 0,9934, 0,9935 и 0,9936, т. е. практически одинаково.

Таким образом, найдено адекватное объяснение отличию экспериментальных и расчётных значений длин волн рефлексов решётки 1, заключающееся в учёте как эффективной усадки ФПМ, так и дисперсии его показателя преломления. Для решётки 2 можно провести аналогичный анализ.

Заключение. С помощью установки, содержащей оптические призмы для ввода излучения в ФПМ и обеспечения определённого угла схождения записывающих пучков, изготовлены объёмные отражательные решётки с периодами примерно 300 и 500 нм. Зарегистрированы рефлексы второго и третьего порядков на этих решётках. В частности, для решётки с основным рефлексом $\lambda_1^r \sim 904$ нм зарегистрированы гармоники $\lambda_2^r \sim 457$ нм и $\lambda_3^r \sim 313$ нм, их ДЭ составила $\eta_1^r \sim 50\%$, $\eta_2^r \sim 17\%$, $\eta_3^r \sim 3\%$ соответственно, а для решётки с $\lambda_1^r \sim 1462$ нм выявлены её гармоники $\lambda_2^r \sim 736$ нм, $\lambda_3^r \sim 495$ нм.

Установлено, что сопоставление экспериментальных и расчётных значений длин волн найденных рефлексов необходимо проводить с учётом как эффективной усадки ФПМ, так и дисперсии его показателя преломления.

Автор выражает благодарность канд. физ.-мат. наук С. Л. Микерину и канд. физ.-мат. наук В. С. Терентьеву за помощь в проведении измерений спектральных характеристик решёток и компании Bayer MaterialScience AG за предоставленные образцы ФПМ.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» в Институте автоматизации и электротехники СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Zhao G., Mourolis P.** Second order grating formation in dry holographic photopolymers // Opt. Commun. 1995. **115**, N 5–6. P. 528–532.
2. **Neipp C., Beléndez A., Gallego S. et al.** Angular responses of the first and second diffracted orders in transmission diffraction grating recorded on photopolymer material // Opt. Express. 2003. **11**, N 16. P. 1835–1843.
3. **Mas-Abellán P., Madrigal R., Fimia A.** Analysis of higher order harmonics with holographic reflection gratings // Proc. SPIE. 2015. **10233**. 1023303.

4. **Bruder F.-K., Deuber F., Fäcke T. et al.** Reaction-diffusion model applied to high resolution Bayfol® HX photopolymer // Proc. SPIE. 2010. **7619**. 76190I.
5. **Smothers W. K., Monroe B. M., Weber A. M., Keys D. E.** Photopolymers for holography // Proc. SPIE. 1990. **1212**. P. 20–29.
6. **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.
7. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // The Bell System Techn. Journ. 1969. **48**, N 9. P. 2909–2947.
8. **Stevenson S. H., Steijn K. W.** A method for characterization of film thickness and refractive index in volume holographic materials // Proc. SPIE. 1995. **2405**. P. 88–97.
9. **Bruder F.-K., Bang H., Fäcke T. et al.** Precision holographic optical elements in Bayfol® HX // Proc. SPIE. 2016. **9771**. 977103.

Поступила в редакцию 25 декабря 2017 г.
