

## ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.1.08 : 778.38

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УСАДКИ  
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ\*Е. Ф. Пен<sup>1,3</sup>, И. А. Зарубин<sup>1</sup>, В. В. Шелковников<sup>2,4</sup>, Е. В. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

<sup>2</sup>Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет,  
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

<sup>4</sup>Томский государственный университет,  
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36

E-mail: pen@iae.nsk.su

Разработана методика определения параметров усадки голографических фотополимерных материалов (включая изменения среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя) в процессе записи голограмм с погрешностью измерений, приемлемой для практики использования этих материалов. Экспериментальная проверка методики подтвердила её работоспособность.

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

DOI: 10.15372/AUT20160108

**Введение.** Голографические фотополимерные материалы (ФПМ), пройдя путь глубоких исследований и разработок, заслуженно нашли широкое применение в практической голографии [1, 2]. Наряду со многими положительными качествами (отсутствие мокрых процессов обработки, высокая дифракционная эффективность (ДЭ), широкая область спектральной чувствительности и др.) эти материалы имеют ряд недостатков, наиболее существенным из которых является усадка толщины регистрирующего слоя вследствие конверсии вещества (превращения мономера в более плотное вещество — полимер) в ходе фотохимических процессов [3]. Влияние данного эффекта на свойства объёмных пропускающих и отражательных голографических решёток хорошо известно [4]. Установлено также, что с уменьшением периода таких решёток из-за усадки, приводящим к коротковолновому сдвигу спектрального отклика отражательных голограмм или к увеличению угла Брэгга для пропускающих голограмм, происходит повышение среднего значения показателя преломления, вызывающего обратный эффект. В связи с этим в [5] введено понятие эффективной усадки, учитывающей фотоиндуцированные изменения как толщины регистрирующего слоя, так и показателя преломления, т. е. изменения оптического пути света, проходящего сквозь голограмму.

\*Работа выполнена при поддержке компании "Samsung Electronics" (GRO Agreement # 410/03533903/01195), Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00732) и Министерства образования и науки РФ (проект № 2012-218-03-004).

В практической работе актуальной является задача количественного определения параметров усадки, для чего предложены различные методы их измерений [5–8]. Применительно к отражательным голограммам в [5] рассмотрена методика раздельного определения изменения среднего значения показателя преломления и толщины ФПМ, предполагающая для этого запись нескольких голограмм, однако данный метод не предусматривает возможности измерений непосредственно в процессе записи голограмм так называемой эффективной усадки, отсутствует и детальный анализ погрешности измерений. В [6] представлена иная методика раздельного вычисления изменений среднего значения показателя преломления и толщины ФПМ, допускающая использование лишь одной записанной голограммы. Кроме того, сделан анализ погрешности метода, но также не уделено внимания измерениям эффективной усадки в процессе записи голограмм.

Цель данного исследования — разработка новой методики определения параметров эффективной усадки голографических фотополимерных материалов (включая изменения среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя) в процессе записи голограмм с погрешностью измерений, приемлемой для практики использования этих материалов.

**1. Методика определения параметров эффективной усадки ФПМ в процессе записи голограмм.** Специфика поставленной задачи состоит в том, что нельзя применять известные методы измерений среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя ФПМ (например, с помощью контактных рефрактометров, эллипсометров или методом оптического резонанса [9, 10]), поскольку измерения необходимо делать непосредственно в процессе записи голограмм, что исключает контактные методы или стороннее облучение (помимо записываемого голограмму). Лишь после завершения процесса записи можно провести дополнительное измерение дифракционных и спектральных характеристик голограммы, не снимая её с установки.

1.1. *Схема экспериментальной установки.* В связи с указанными особенностями предпочтительным является метод тестирования ФПМ, рассмотренный в [11, 12] и заключающийся в измерении спектрального отклика объёмной отражательной голограммы непосредственно в процессе её записи путём зондирования пучком белого света малой интенсивности.

В данной работе предложена модифицированная оптическая схема установки (рис. 1), придавшая этому методу новые возможности. Установка работает следующим образом: пучок излучения лазера проходит через затвор, расщепляется светоделителем на объектный ( $Ob$ ) и опорный ( $R$ ) пучки, которые с помощью зеркал направляются на один и тот же участок регистрирующей среды с противоположных сторон с отличающимися углами падения; в результате интерференции этих пучков формируется объёмная отражательная голограмма; на неё посылают пучок зондирующего белого света малой интенсивности перпендикулярно поверхности среды; прошедшее зондирующее излучение направляют в спектрофотометр; результат спектрального отклика наблюдают на экране дисплея. Измерение спектра пропускания образующей голограммы стартует синхронно с началом экспозиции и проводится периодически в течение всего процесса её записи. Результаты таких измерений будут представлены в следующем разделе.

Отличием и достоинством этой установки в сравнении с аналогичными устройствами [5] являются простота проведения экспериментов и минимум погрешностей измерений при реализации предлагаемой методики определения параметров эффективной усадки ФПМ, поскольку не требуется перестраивать оптическую схему для получения голограмм с отличающимися углами падения записываемых пучков, а также снимать образец с регистрирующей средой для проведения дополнительных измерений.

1.2. *Методика определения изменений среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя.* Помимо собственно измерений степени эффективной

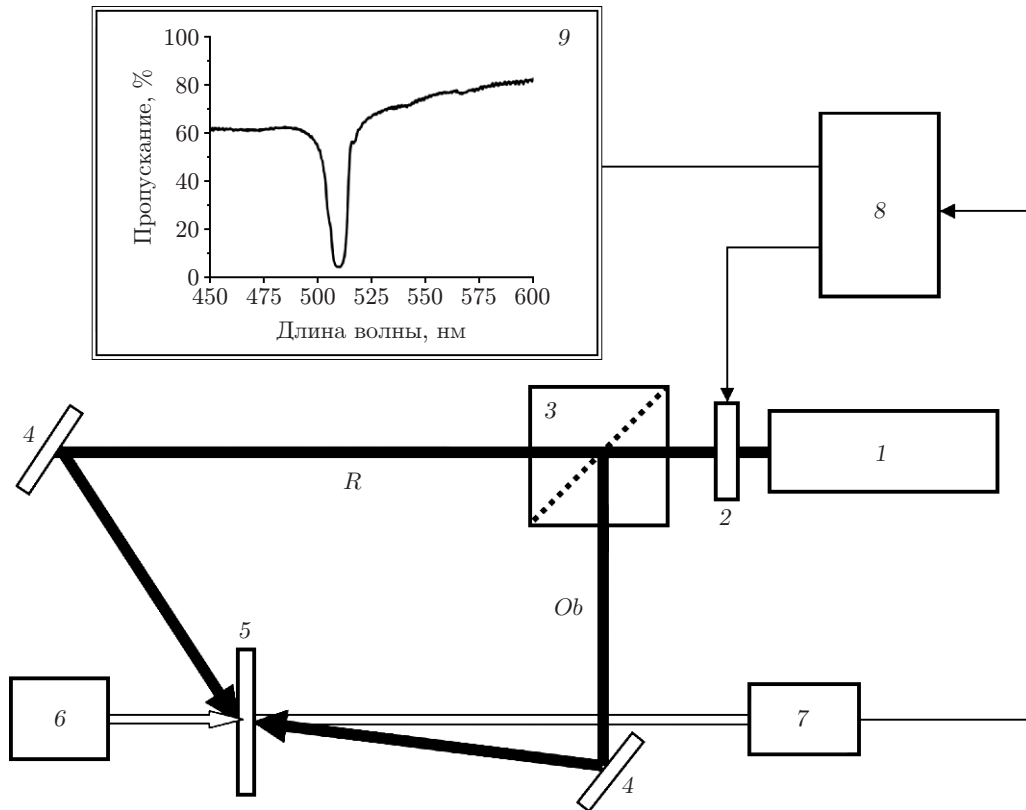


Рис. 1. Схема установки для измерения параметров эффективной усадки ФПМ: 1 — лазер, 2 — затвор, 3 — светоделитель, 4 — зеркала, 5 — регистрирующая среда, 6 — источник белого света, 7 — спектрофотометр, 8 — компьютер, 9 — дисплей

усадки в процессе записи объёмных отражательных голограмм рассматриваемая установка адекватна требованиям метода [5] для отдельного определения изменений среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя в результате усадки ФПМ, причём позволяет выполнить эти измерения с минимальными погрешностями.

Согласно методу [5] для решения поставленной задачи необходимо изготовить две объёмные отражательные голограммы с векторами решёток, перпендикулярными их поверхности, и с отличающимися периодами. В установке (см. рис. 1) эти решётки изготовлены с использованием метода записи отражательных голограмм, впервые предложенного Ю. Н. Денисюком [13], согласно которому на регистрирующую среду (в частности, ФПМ) направляют лишь один лазерный пучок, например  $R_1$ , а непосредственно за ФПМ располагают зеркало, отражающее падающее излучение и формирующее второй пучок  $Ob_1$ , необходимый для образования интерференционной картины (рис. 2).

Поскольку эти пучки направлены симметрично относительно поверхности ФПМ, но с противоположных сторон, то вектор образующейся решётки будет перпендикулярен её поверхности, как показано на рис. 3.

Аналогично может быть изготовлена вторая решётка, если на ФПМ направить только пучок  $Ob_2$  (на новое место относительно первой решётки), а зеркало расположить с другой стороны ФПМ.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:  $|\theta_{Ob}| = |\theta_R| = \theta_1$  — значения углов падения предметного и опорного (референтного) пучков в воздухе относительно нормали к поверхности ФПМ;  $\theta_0 = \sin^{-1}(\sin(\theta_1)/n_1)$  — их значения в среде;  $n_1$  — показатель преломления ФПМ в начальный момент экспозиции.

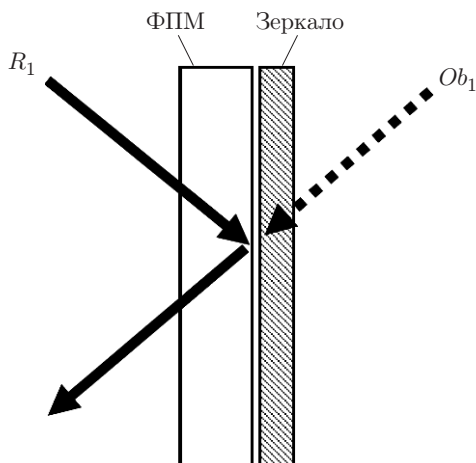


Рис. 2. Схема записи отражательных голограмм по методу Денисюка

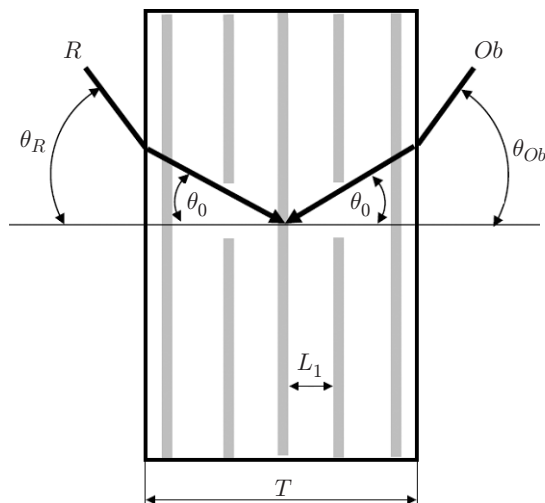


Рис. 3. Пояснения к параметрам внутренней структуры голографической решётки

В этом случае период решётки

$$L_1 = \lambda_1 / (2n_1 \cos \theta_0), \quad (1)$$

где  $\lambda_1$  — длина волны лазерного излучения при записи голограммы.

После записи голограммы и постобработки ФПМ показатель преломления среды станет равным  $n_2$ , а вследствие физической усадки толщины  $T$  фотополимерного материала период голографической решётки будет  $L_2 = L_1 S$  ( $S$  — коэффициент этой усадки). Если на такую голограмму направить параллельный пучок белого света перпендикулярно к поверхности ФПМ, как предусмотрено в схеме на рис. 1, то спектрофотометр зафиксирует узкий спектральный рефлекс с длиной волны  $\lambda_r$ . Данный факт можно интерпретировать как возможность записи такой голограммы в ФПМ с показателем преломления  $n_2$  при длине волны лазерного излучения  $\lambda_r$  в перпендикулярном направлении предметного и опорного пучков относительно поверхности ФПМ. Исходя из этого предположения, можно записать

$$\frac{\lambda_r}{2n_2} = \frac{S\lambda_1}{2n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_1 / n_1^2}}. \quad (2)$$

После преобразований выражения (2) получим

$$\sin^2 \theta_1 = n_1^2 - (Sn_2)^2 (\lambda_1 / \lambda_r)^2. \quad (3)$$

Будем считать, что вторая голограмма изготовлена при  $\lambda_1$  и  $\theta'_1$ . Тогда, рассуждая аналогично вышеизложенному, придём к выражению

$$\sin^2 \theta'_1 = n_1^2 - (Sn_2)^2 (\lambda_1 / \lambda'_r)^2. \quad (4)$$

Объединяя (3) и (4), имеем

$$\sin^2 \theta'_1 - n_1^2 = (\sin^2 \theta_1 - n_1^2) (\lambda_r / \lambda'_r)^2, \quad (5)$$

откуда получим искомое выражение для  $n_1$ :

$$n_1^2 = \frac{\sin^2 \theta'_1 - (\lambda_r / \lambda'_r)^2 \sin^2 \theta_1}{1 - (\lambda_r / \lambda'_r)^2}. \quad (6)$$

Для отдельного определения значений  $n_2$  и  $S$  с этими же двумя голограммами проведём другой эксперимент, а именно направим на обе голограммы излучение лазера с длиной волны  $\lambda_1$  и будем поворачивать каждую из голограмм в поиске значения угла  $\theta_2$ , при котором достигается её максимальная дифракционная эффективность. Тогда для первой голограммы справедливо соотношение

$$\frac{S\lambda_1}{2n_1\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1/n_1^2}} = \frac{\lambda_1}{2n_2\sqrt{1 - \sin^2 \theta_2/n_2^2}}, \quad (7)$$

а для второй —

$$\frac{S\lambda_1}{2n_1\sqrt{1 - \sin^2 \theta'_1/n_1^2}} = \frac{\lambda_1}{2n_2\sqrt{1 - \sin^2 \theta'_2/n_2^2}}. \quad (8)$$

Разделим левые и правые части этих выражений друг на друга, в результате получим

$$\frac{1 - \sin^2 \theta'_1/n_1^2}{1 - \sin^2 \theta_1/n_1^2} = \frac{1 - \sin^2 \theta'_2/n_2^2}{1 - \sin^2 \theta_2/n_2^2} = \beta. \quad (9)$$

Поскольку из первого эксперимента мы уже знаем значение  $n_1$ , а также значения  $\theta_1$  и  $\theta'_1$ , то после преобразований имеем

$$n_2^2 = \frac{\sin^2 \theta'_2 - \beta \sin^2 \theta_2}{1 - \beta}. \quad (10)$$

Возвращаемся к выражению (2) и находим коэффициент физической усадки толщины ФПМ:

$$S = (\lambda_r/\lambda_1)(n_1/n_2)\sqrt{1 - \sin^2 \theta_1/n_1^2}. \quad (11)$$

Следует отметить, что значения углов  $\theta_1, \theta'_1$  не должны быть слишком малыми, с тем чтобы при поиске углов  $\theta_2, \theta'_2$  удалось достичь максимально возможного значения ДЭ во втором эксперименте.

1.3. *Определение величины эффективной усадки.* В рассматриваемой установке в силу несимметричности углов падения опорного  $R$  и предметного  $Ob$  пучков вектор решётки составляет угол  $\psi$  как относительно поверхности ФПМ, так и относительно направления зондирующего пучка белого света  $W$  (рис. 4). На рисунке показаны направления предметного, опорного и зондирующего пучков, а также расположение отражающих плоскостей объёмной голограммы. В этом случае справедливы следующие соотношения [7]:

$$\theta_0 = \frac{1}{2}[\sin^{-1}((\sin \theta_R)/n_1) + \sin^{-1}((\sin \theta_{Ob})/n_1)]; \quad (12)$$

$$\psi_1 = \frac{1}{2}[\sin^{-1}((\sin \theta_R)/n_1) - \sin^{-1}((\sin \theta_{Ob})/n_1)]; \quad L_1 = \frac{\lambda_1}{2n_1 \cos \theta_0}.$$

С учётом условий зондирования отражательной голограммы длина волны её спектрального отклика в начальный момент записи

$$\lambda_{r\text{start}} = \frac{\lambda_1 \cos \psi_1}{\cos \theta_0}. \quad (13)$$

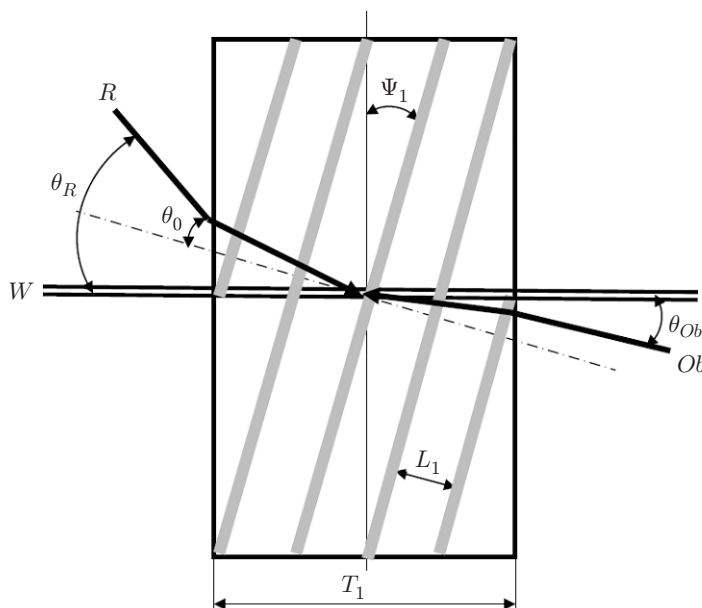


Рис. 4. Конфигурация световых пучков и внутренней структуры объёмной отражательной голограммы ( $T_1$  — толщина ФПМ до усадки)

Отметим, что в силу принятой нами конфигурации предметного, опорного и зондирующего пучков значение  $\lambda_{r_{start}}$  отличается от длины волны записывающего излучения.

В процессе записи голограммы происходят изменения среднего значения показателя преломления и толщины ФПМ. Вследствие этого меняются и параметры голографической решётки:

$$\psi_2 = \text{tg}^{-1}(S \text{tg} \psi_1); \quad L_2 = L_1 \frac{\sin \psi_2}{\sin \psi_1} = \frac{\lambda_1 \sin(\text{tg}^{-1}(S \text{tg} \psi_1))}{2n_1 \cos \theta_0 \cdot \sin \psi_1}. \quad (14)$$

Тогда выражение для длины волны спектрального отклика голографической решётки по окончании процесса записи приобретает вид

$$\lambda_{r_{finish}} = \frac{n_2 \lambda_1 \sin 2\psi_2}{2n_1 \cos \theta_0 \cdot \sin \psi_1}. \quad (15)$$

Введём определение коэффициента эффективной усадки:

$$S_{\text{eff}} = \lambda_{r_{finish}} / \lambda_{r_{start}}. \quad (16)$$

Отметим, что этот коэффициент характеризует относительное изменение оптической длины пути света вдоль вектора решётки, учитывающее как уменьшение толщины (приводящее к коротковолновому сдвигу спектрального отклика отражательной голограммы), так и увеличение среднего значения показателя преломления ФПМ (вызывающее обратный эффект).

**2. Экспериментальные результаты.** В соответствии с вышеописанной методикой проведены эксперименты с образцами фотополимерных материалов компании "Bayer MaterialScience" [14] и Новосибирского института органической химии (НИОХ СО РАН) [15]. Далее представлены результаты экспериментов.

2.1. *Определение значений параметров  $n_1, n_2, S$ .* В экспериментах использовался одностотный DPSS-лазер (фирмы "Beijing Viasho Technology Co., Ltd.") с длиной волны

$\lambda_1 = 532$  нм. Держатель образца ФПМ был закреплён на поворотном столике 7R172-2 (фирмы "Standa Ltd."), позволявшем установить значения углов опорного, предметного и зондирующего пучков с погрешностью  $\pm 0,25^\circ$ . Ранее отмечалось, что отличительной особенностью схемы экспериментальной установки является перпендикулярное направление распространения зондирующего пучка относительно поверхности ФПМ ( $\theta_W = 0^\circ$ ). Значения же углов опорного и предметного пучков, не имея жёстких ограничений, должны выбираться с учётом рекомендаций, указанных в разд. 1.2. В конкретных условиях описываемого эксперимента установлены  $\theta_R = (43 \pm 0,25)^\circ$ ,  $\theta_{Ob} = (-19 \pm 0,25)^\circ$ , что определило значения углов  $\theta_1 = 43^\circ$ ,  $\theta'_1 = -19^\circ$ . Спектральный отклик голограмм измерялся с помощью спектрофотометра «Колибри-2» (ВМК «Оптоэлектроника») [16] со спектральным разрешением  $\delta\lambda = \pm 0,1$  нм:  $\theta_1 = 43^\circ$ ,  $\theta'_1 = -19^\circ$ .

В результате экспериментов получены  $\lambda_r = (591,1 \pm 0,1)$  нм,  $\lambda'_r = (538,9 \pm 0,1)$  нм. Тогда из формулы (6) следует  $n_1 = 1,4945 \pm 0,0025$ .

Ошибку определения значения  $n_1$  можно оценить как

$$\delta n_1 = (n_1^{(+)} - n_1^{(-)})/2,$$

где  $n_1^{(+)} = 1,497$  при  $\lambda_r = 591$  нм и  $\lambda'_r = 539$  нм;  $n_1^{(-)} = 1,492$  при  $\lambda_r = 591,2$  нм и  $\lambda'_r = 538,8$  нм.

Далее в соответствии с описанной в разд. 1.2 методикой были найдены значения углов  $\theta_2 (41,5 \pm 0,25)^\circ$  и  $\theta'_2 (-14 \pm 0,25)^\circ$ , что позволило, используя формулы (10), (11), найти значение  $n_2 (1,515 \pm 0,0025)$  и значение коэффициента физической усадки  $S (0,9757 \pm 0,0006)$ , указывающее, что после записи голограммы толщина ФПМ уменьшилась на 2,5 %.

В свою очередь, применяя формулы (13)–(16), получим  $\lambda_{r_{\text{start}}} = (504,4 \pm 0,1)$  нм и  $\lambda_{r_{\text{finish}}} = (501,2 \pm 0,1)$  нм. Это означает, что расчётное значение величины эффективной усадки  $S_{\text{eff}} = 0,9936 \pm 0,0004$ . Таким образом, из-за усадки результирующий сдвиг спектрального отклика отражательной голограммы в коротковолновую область составил лишь 0,64 %.

**2.2 Измерения эффективной усадки.** Цель этих измерений — проследить динамику совместного воздействия изменений среднего значения показателя преломления и толщины ФПМ на величину эффективной усадки, определяемой выражением (16).

Как уже упоминалось в разд. 1.1, это можно сделать с помощью вышеописанной установки, включая спектрофотометр «Колибри-2», путём периодического измерения (с интервалом 25 мс) спектра пропускания голограммы в процессе её записи. Полученные данные измерений накапливаются в компьютере и после обработки могут быть представлены в виде временных срезов спектра пропускания.

На рис. 5 приведены диаграммы временных срезов спектра пропускания голограммы в различные моменты экспозиции. Здесь кривая 1 — спектр пропускания голограммы в самый начальный момент её проявления, когда энергия экспозиции составляла около 5 мДж/см<sup>2</sup>, при этом ДЭ — менее 1 %, а длина волны спектрального отклика  $\lambda_{r_{\text{start}}} = (503,8 \pm 0,4)$  нм; 2 — спектр пропускания голограммы в тот момент, когда энергия экспозиции была около 12 мДж/см<sup>2</sup>, ДЭ — около 35 %, длина волны спектрального отклика  $(502,3 \pm 0,1)$  нм; 3 — спектр пропускания голограммы в конце установленного времени экспозиции, энергия экспозиции составляла около 50 мДж/см<sup>2</sup>, ДЭ — около 60 %, а длина волны спектрального отклика сместилась до  $\lambda_{r_{\text{finish}}} = (500,5 \pm 0,1)$  нм. При дальнейшем увеличении энергии экспозиции ни длина волны спектрального отклика, ни ДЭ голограммы не меняются.

Обрабатывая полученные данные, можно оценить значение эффективной усадки как для любого выбранного, так и для конечного моментов времени экспозиции. Например, для кривой 2  $S_{\text{eff}} = 0,997 \pm 0,001$ , а для кривой 3  $S_{\text{eff}} = 0,9934 \pm 0,001$ .

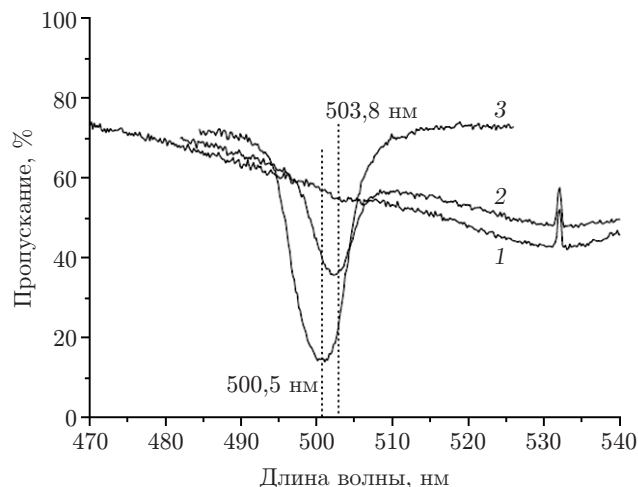


Рис. 5. Результаты измерений усадки ФПМ "Bayer MaterialScience" в различные моменты времени

На рис. 6 изображена кривая аппроксимации экспериментальных данных для определения длины волны рефлекса отражательной голограммы в начальный момент её проявления.

Сравнивая экспериментальные и расчётные данные для конечного момента записи, видим, что отличия составляют лишь  $\pm 0,01\%$ , это свидетельствует о высокой степени их совпадения, а следовательно, работоспособности предложенной методики определения параметров эффективной усадки ФПМ.

Подобные эксперименты для фотополимерных материалов НИОХ СО РАН дали следующие результаты:  $n_1 = 1,5686 \pm 0,0025$ ,  $n_2 = 1,5856 \pm 0,0025$ ,  $S_{\text{eff}} = 0,996 \pm 0,001$ ,  $S = 0,985 \pm 0,001$ . Отметим, что материалы НИОХ СО РАН имеют несколько меньшую усадку, чем их зарубежные аналоги, за счёт оригинальных компонент ФПМ [15].

Для практических применений голографии диапазон приемлемой эффективной усадки составляет от 0,999 до 0,99. В этом случае погрешность её определения должна быть в диапазоне 0,001–0,0005, чтобы выдержать заданные уровни ДЭ, длины волны спектрального отклика или угла дифракции соответственно в пределах  $\pm 1\%$ ,  $\pm 1\text{ нм}$ ,  $\pm 0,015^\circ$ , что

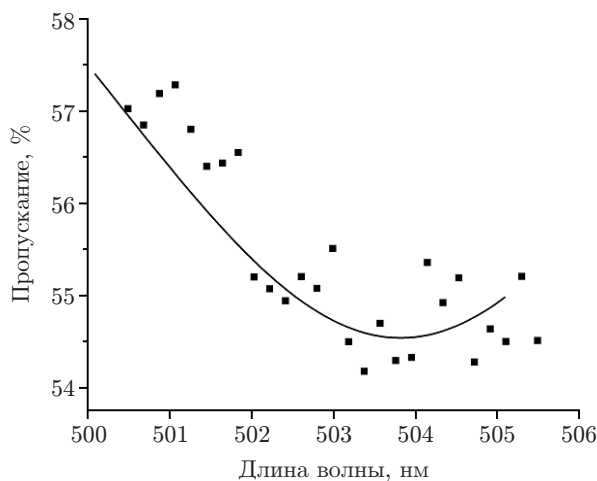


Рис. 6. Аппроксимация экспериментальных данных



хорошо согласуется с оценками погрешности измерений коэффициента усадки, полученными в [5, 6]. Рассматриваемая методика, относящаяся к косвенным методам нахождения значений оптических параметров светочувствительных материалов, вполне удовлетворяет указанным выше требованиям к погрешности.

**Заключение.** Разработана методика определения значений параметров эффективной усадки голографических фотополимерных материалов (включая изменения среднего значения показателя преломления и толщины регистрирующего слоя) в процессе записи голограмм с погрешностью измерений, приемлемой для практики использования этих материалов. Экспериментальная проверка методики на фотополимерных материалах "Bayer MaterialScience" и НИОХ СО РАН подтвердила её работоспособность. Установлено, в частности, что расчётные значения показателя преломления для первого материала до и после экспозиции составили  $n_1 = 1,4945 \pm 0,0025$ ,  $n_2 = 1,515 \pm 0,0025$ , а коэффициентов физической и эффективной усадки соответственно  $S = 0,9757 \pm 0,0006$  и  $S_{\text{eff}} = 0,9936 \pm 0,0004$ . Это означает, что после записи голограммы толщина ФПМ уменьшилась на 2,5 %, однако результирующий сдвиг спектрального отклика отражательной голограммы в коротковолновую область составил лишь 0,64 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lawrence J. R., O'Neill F. T., Sheridan J. T. Photopolymer holographic recording material // *Optik*. 2001. **112**, N 10. S. 449–463.
2. Gambogi W. J., Weber A. M., Trout T. J. Advances and applications of DuPont holographic photopolymers // *Proc. SPIE*. 1993. **2043**. P. 2–13.
3. Gallo J. T., Verber C. M. Model for the effects of material shrinkage on volume holograms // *Appl. Opt.* 1994. **33**, N 29. P. 6797–6804.
4. O'Neill F. T., Lawrence J. R., Sheridan J. T. Thickness variation of self-processing acrylamide based photopolymer and reflection holography // *Opt. Eng.* 2001. **40**, N 4. P. 533–539.
5. Stevenson S. H., Steijn K. W. Method for characterization of film thickness and refractive index in volume holographic materials // *Proc. SPIE*. 1995. **2405**. P. 88–97.
6. Trochtchanovitch P., Kostrov N., Goulanian E. et al. Method of characterization of effective shrinkage in reflection holograms // *Opt. Eng.* 2004. **43**, N 5. P. 1160–1168.
7. Moothanchery M., Naydenova I., Toal V. Study of the shrinkage caused by holographic grating formation in acrylamide based photopolymer film // *Opt. Express*. 2011. **19**, N 14. P. 13395–13404.
8. Pandey N., Naydenova I., Martin S., Toal V. A technique for characterization of dimensional changes in slanted holographic gratings by monitoring the angular selectivity profile // *Opt. Lett.* 2008. **33**, N 17. P. 1981–1983.
9. Campbell G., Kim T. J., Kostuk R. K. Comparison of methods for determining the bias index of a dichromated gelatin hologram // *Appl. Opt.* 1995. **34**, N 14. P. 2548–2555.
10. Tholl H. D., Dohmen M., Stojanoff C. G. Determination of the mean refractive index and thickness of dichromated gelatin holographic films using the thin film resonance method // *Proc. SPIE*. 1995. **2405**. P. 76–87.
11. Pen E. F., Shelkovnikov V. V., Goulanian E. H. et al. The method for the research of the dynamics of the spectral characteristics of the reflection holograms in photopolymer materials // *Proc. SPIE*. 2002. **4900**. P. 957–961.
12. 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.

13. **Денисюк Ю. Н.** Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // ДАН СССР. 1962. **144**, вып. 6. С. 1275–1278.
14. **Berneth H., Bruder F.-K., Fäcke T. et al.** Holographic recording aspects of high-resolution Bayfol HX photopolymer // Proc. SPIE. 2011. **7957**. 79570H-1. DOI: 10.1117/12.876202.
15. **Пат. № 2552351 РФ.** Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне /В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев и др. Оpubл. 10.06.2015; Бюл. № 16.
16. **Лабусов В. А., Путьмаков А. Н., Саушкин М. С. и др.** Многоканальный спектрометр «Колибри-2» и его использование для одновременного определения щелочных и щелочноземельных металлов методом пламенной фотометрии // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. **73**, № 7 (спец. выпуск). С. 35–39.

*Поступила в редакцию 20 марта 2015 г.*

---