

07

© 1991 г.

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИНЫ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА НА ГОЛОГРАФИЧЕСКУЮ ЗАПИСЬ

О. В. Сахно, Е. А. Тихонов

Изучено влияние изменений оптической толщины фотополимерных регистрирующих слоев при записи голограмм в реальном времени. Эксперименты выполнены с использованием фотополимерного материала ФПК-488, который находит практическое применение при разработке голографических оптических элементов.

Показано, что относительная величина усадки регистрирующего слоя заметно превышает относительное изменение показателя преломления. Причиной усадки является синергиз образующегося полимера и жидкого наполнителя, а следствием усадки является поворот изофазных плоскостей «наклонных» голограмм. Показано, что дифракционная эффективность «наклонных» элементарных голограмм пропускающего типа остается достаточно высокой (более 65 %), однако угол Брэгга из-за поворота изофазных плоскостей возрастает на величину $\approx 1^\circ$.

Введение

Регистрирующие голографические материалы можно разделить на две группы: с регистрацией записи в реальном времени и с образованием первоначально «скрытого» (для оптического считывания) изображения с его последующим проявлением и фиксацией. Пространственные частоты, соответствующие «скрытому» изображению, могут меняться на этапах постэкспозиционной обработки экспонированного материала, однако это не снижает прямым образом дифракционную эффективность получаемой голограммы. Фотополимерные голографические материалы [1] относятся к средам с регистрацией голограмм в реальном времени, когда процессы записи, проявления и фиксации во времени совмещены. При этом в большинстве случаев одновременно с пространственной модуляцией коэффициента преломления δn , величина которого определяет значение дифракционной эффективности (ДЭ) голограммы, изменяется во времени и средний по объему коэффициент преломления среды (ОКП). Если величина ОКП больше или сравнима с глубиной модуляции коэффициента преломления (КП), то в процессе записи происходит рассогласование координат интерференционного поля и записанной к данному моменту времени голограммы. Поскольку запись на фотополимере носит нерелаксирующий (накопительный) характер с непрерывным уменьшением чувствительности и динамического диапазона, то такое рассогласование приводит к существенному снижению дифракционной эффективности записываемых голограмм. Отрицательное влияние изменений ОКП на запись голограмм в реальном времени зависит от геометрии записи. Так, на фотополимерах реализованы голографические решетки пропускающего типа с ДЭ ≈ 1 ; эффективные дифракционные решетки отражательного типа на фотополимерах до настоящего времени не получены [1²].

В настоящей работе анализируется общий и частный случаи влияния подобных явлений (изменений ОКП) на примере голографического материала ФПК-488, разработанного для получения фазовых голограмм пропускающего типа [3, 4]. Целью работы является количественная и качественная оценка

изменений ОКП и оптической толщины на регистрирующих слоях фотополимера ФПК-488 в процессе записи, определение возможностей улучшения материала и режима записи на нем применительно к получению эффективных голограмм различных типов: пропускающих, отражательных, «наклонных».

Регистрирующий фотополимерный материал ФПК-488 используется для записи в виде триплексов (две стеклянные подложки со слоем полимера между ними). Голограммы, регистрируемые на данной среде, имеют фазовый характер и получаются за счет локально неоднородного фоторадикального механизма полимеризации, при котором исходно жидкая мономер-олигомерная смесь превращается в твердый полимер. При этом для долговременной фиксации голограммы [4], а также для увеличения глубины пространственной модуляции КП в композит кроме инициатора полимеризации добавляется химически нейтральная компонента с более высоким относительно исходной смеси коэффициентом преломления. В процессе записи эта компонента перераспределяется по фазовым плоскостям, повышая эффективность голограммы и обеспечивая ее долговременную стабильность [4].

Теоретические оценки

Фотополимеризация органических мономеров сопровождается некоторым уменьшением поляризуемости мономерных молекул при образовании полимерных цепей и ростом плотности за счет уменьшения свободного объема при замене ненасыщенных связей насыщенными. Дифференцируя выражение Лорентц—Лоренца для КП, находим, что результирующее изменение имеет вид

$$\Delta n(\rho, \alpha) = A(\alpha \Delta \rho - \rho \Delta \alpha), \quad (1)$$

где A — коэффициент пропорциональности; ρ , α — удельная плотность и поляризуемость.

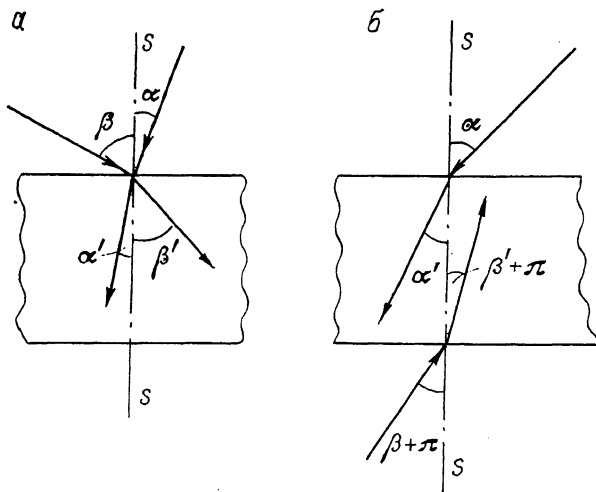


Рис. 1. Характерные схемы записи голограмм.

α — в попутных пучках, β — во встречных пучках; α , β — углы падения, α' , β' — углы преломления.

Типично, что ОКП образующихся полимеров выше, чем ОКП материнских растворов, т. е. $\Delta n > 0$. Опираясь на этот общий результат, можно оценить, как влияет изменение ОКП в процессе голографической записи в реальном времени на параметры решетки и слоя.

Пространственная частота элементарной голограммы независимо от геометрии записи подчиняется закону сохранения импульсов или условию Брэгга

$$\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2 = \mathbf{K}, \quad (2)$$

где k_1, k_2, K — волновые векторы референтного, сигнального пучков и вектор решетки.

На рис. 1, $a, б$ представлены две характерные схемы записи голограмм: в попутных пучках, или схема голографирования по Лейту, и схема записи во встречных пучках, или схема голографирования по Денисюку.

С использованием (2), закона преломления и рис. 1 находим пространственные частоты через внутренние углы:

$$v_A = \frac{2n}{\lambda} \sin \left| \frac{\alpha' + \beta'}{2} \right|, \quad (3a)$$

$$v_D = \frac{2n}{\lambda} \cos \left| \frac{\alpha' \mp \beta'}{2} \right|. \quad (3б)$$

Верхние знаки в сумме углов соответствуют записи лучами, ориентированными по разные стороны плоскости S , нижние знаки для лучей в одной (левой или правой) стороне от этой плоскости. Случаю $\alpha' \neq 0, \beta' = 0$ соответствует ориентация волнового вектора по оси $S-S$.

Проанализируем наиболее репрезентативные случаи записи элементарных голограмм в отношении девиации пространственной частоты за счет изменений ОКП. Для обеих схем записи можно рассматривать симметричный и асимметричный случаи. Симметричному случаю записи в попутных пучках соответствует равенство углов преломления $\alpha' = \beta'$, асимметричному — $\alpha' \neq 0$ и $\beta' = 0$.

Тогда в первом случае значения пространственной частоты и ее девиации равны

$$v_A = \frac{2n}{\lambda} \sin \alpha' = \frac{2}{\lambda} \sin \alpha, \quad \frac{dv_A}{dn} = 0. \quad (4)$$

В этом благоприятном случае пространственные частоты от изменений ОКП не зависят, он обеспечивает эффективную запись элементарных голограмм пропускающего типа, описанную во всех ранних публикациях с фотополимерным голографическим носителем [1].

Пространственная частота для асимметричного случая записи в попутных пучках равна

$$v_A = \frac{2n}{\lambda} \sin \frac{\alpha'}{2} = \frac{n\sqrt{2}}{\lambda} \sqrt{1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}}. \quad (5)$$

Соответствующие вариации (5) относительной величины пространственной частоты

$$\frac{1}{v_A} \frac{dv_A}{dn} = n^{-1} - \frac{\frac{\sin^2 \alpha}{2n^2}}{\left(1 - \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}\right)^{1/2}\right) \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}\right)^{1/2}}. \quad (6)$$

Видно, что в этом случае имеет место нулевое решение лишь при $\alpha \rightarrow 0$. Однако при этом асимметричная схема записи вырождается в симметричную с уменьшением пространственной частоты до 0.

В схеме записи встречными пучками также различают симметричный и асимметричный случаи. При знаке «—» (3б) симметричному случаю соответствует равенство углов $\alpha' = \beta'$, при этом волновые векторы записывающих пучков антипараллельны, а пространственная частота и ее вариации равны соответственно

$$v_D = \frac{2n}{\lambda}, \quad \frac{1}{v_D} \frac{dv_D}{dn} = n^{-1}. \quad (7)$$

Асимметричному случаю $\alpha' \neq 0, \beta' = 0$ в схеме встречной записи соответствует пространственная частота, определяемая выражением

$$v_D = \frac{2n}{\lambda} \cos \frac{\alpha'}{2} = \frac{\sqrt{2} \cdot n}{\lambda} \sqrt{1 + \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}}}. \quad (8)$$

Вариации относительной пространственной частоты с изменением ОКП равны

$$\frac{1}{v_D} \frac{dv_D}{dn} = n^{-1} + \frac{\frac{\sin^2 \alpha}{2n^3}}{\left(1 + \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}\right)^{1/2}\right) \left(1 - \frac{\sin^2 \alpha}{n^2}\right)^{1/2}}. \quad (9)$$

В этом случае нулевого решения не существует.

Таким образом, наибольшие осложнения при голографической записи в реальном времени возникают при получении отражательных решеток. Если изменение ОКП больше или равно глубине модуляции δn , то не существует геометрической схемы записи, в которой эффект «замывания» записываемой решетки можно было бы скомпенсировать. Принципиальное решение проблемы — переход к материалам и механизмам записи, при использовании которых можно пренебречь малым по сравнению с глубиной модуляции изменением ОКП при записи. В частности, к таким голографическим материалам можно отнести «реоксан» [5]. Другое принципиальное решение состоит в оптимизации предложенного и апробированного нами ранее способа записи на фотополимерах с темновым усилением первоначально слабой (ДЭ=1 %) голограммы [6]. По сути этот режим записи на фотополимерах приближается к регистрации голограмм на материалах со «скрытым» изображением (галогенидо-серебряные среды, бихромированная желатина).

Паллиативным решением задачи является подход, основанный на уменьшении изменения ОКП при записи до величины, по крайней мере равной глубине модуляции δn с соответствующим уменьшением толщины регистрирующего слоя T . Экспериментально уменьшение изменения ОКП достигается выбором рабочей точки записи на возможно более поздних этапах полимеризации. С этой целью начальные этапы полимеризации осуществляют некогерентным однородным полем или термическим способом радикальной полимеризации, проводя ее до определенной степени превращения мономер-олигомерной смеси в полимер [7].

Проведем количественные оценки перспективы такого подхода. Изменение пространственной частоты сопровождается смещением изофазных плоскостей решетки относительно друг друга, причем величина смещения нарастает с толщиной регистрирующего слоя так, что возникают «биения» на разностной частоте по толщине. Примем для определенности, что изменение пространственного периода $\Lambda_0 - \Lambda_k$ на толщине регистрирующего слоя не более $\Lambda_0/4$

$$\frac{(\Lambda_0 - \Lambda_k) \cdot T}{\Lambda_0} < \frac{\Lambda_0}{4}. \quad (10)$$

Для определенности также рассмотрим элементарную отражательную голограмму, соответствующую случаю записи (7). Тогда связь между значениями пространственных периодов в начале и в конце записи можно выразить

$$\Lambda_k - \Lambda_0 = -\frac{\lambda \Delta n}{2n^2}. \quad (11)$$

При подстановке (11) в (10) находим допустимое значение толщины T регистрирующего слоя

$$T \leq \frac{\lambda}{4\Delta n}. \quad (12)$$

Далее, допуская, что глубина пространственной модуляции равна изменению ОКП $\delta n = \Delta n$, из формулы для ДЭ отражательной фазовой голограммы-решетки находим

$$\text{ДЭ} = \text{th}^2\left(\frac{\pi \delta n T}{\lambda \cos \theta_0}\right) = \text{th}^2\left(\frac{\pi}{4}\right) \approx 44\%. \quad (13)$$

Неравенство (12) показательно в том смысле, что ограничивает возможность повышения ДЭ отражательной голограммы за счет толщины без соответствующего уменьшения изменений ОКП.

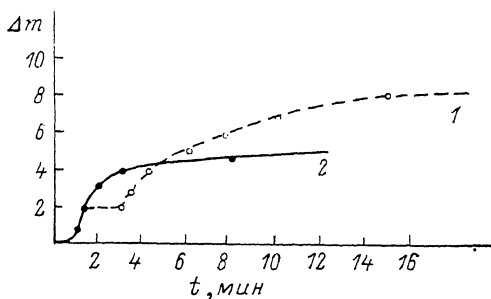
Для экспериментального подтверждения теоретических предположений о соотношении величин δn и Δn были проведены опыты на слоях ФПК-488.

Образцы готовились традиционно [2, 3]: пространство между двумя стеклянными подложками заполняется исходно жидким составом, причем начальная толщина жидкого слоя устанавливается калиброванными по толщине прокладками из тефлона. Затем производится предполимеризация сплошным некогерентным полем с точно выверенной экспозицией (таким образом выбирается рабочая точка голографической записи). После этой операции прокладки из зазора вынимаются, чтобы позволить слою свободно усаживаться в процессе записи, не вызывая напряжений в подложках и в полимере (напряжения, возникающие при усадке, если прокладки оставить в зазоре, вызывают двулучепреломление, нарушение адгезии на границе стекло—полимер). Изложенный выше материал основан на предположении, что при записи оптическая толщина слоя D не изменяется

$$\Delta D = T \cdot \Delta n - n \cdot \Delta T \equiv 0. \quad (14)$$

Рис. 2. Зависимость числа прошедших через щель интерференционных полос от времени полимеризации.

1 — процесс с извлечением прокладок из зазора, 2 — без извлечения.



Уравнение Лорентц—Лоренца дает следующую связь между относительным изменением ОКП и объема:

$$\frac{\Delta n}{n} = -C(\lambda) \frac{\Delta V}{V}. \quad (15)$$

Видно, что уравнение (15) сводится к равенству $(\Delta n)/n = (\Delta T)/T$ только в случае выполнения ряда специфических условий ($-C(\lambda) = 1$, $(\Delta S)/S \ll \ll (\Delta T)/T$, где S — площадь регистрирующего слоя). Наиболее вероятным является случай, когда $(\Delta D)/D < 0$, $(\Delta n)/n < |(\Delta T)/T|$.

Для определения знака и величины изменений оптической толщины слоя на ФПК-488 была изучена кинетика движения полос равной толщины в процессах предполимеризации и записи. Наблюдение полос велось в пучке He—Ne лазера (632,8 нм), предполимеризация и запись велась лампой ЛУФ-4 и аргоновым лазером (488 нм) соответственно. Метод наблюдения движения полос равной толщины предполагает образование фотополимерным слоем оптического клина. Действительно, такой клин образуется всегда и при прокладках толщиной 20 мкм измеренная по ширине интерференционных полос величина его угла равна

$$\alpha = \frac{\lambda}{2nl} \approx 90'',$$

где l — период интерференционной картины.

Существенно, что в процессе предполимеризации и записи ориентация двухгранного угла клина в пространстве не меняется, так как в противном случае изучить кинетику движения полос было бы затруднительно. На рис. 2 представлены две кривые, описывающие скорость движения полос равной толщины при полимеризации регистрирующего слоя лампой ЛУФ-4 без извлечения прокладок и с ними. Оказалось, что на протяжении всего времени предполимеризации и записи-полимеризации направление движения полос остается неизменным (некоторую неопределенность в измерение числа прошедших полос на всем цикле вносит операция удаления прокладок после предполимеризации, однако улучшить здесь измерительную операцию не удастся).

Таким образом, условие, определенное равенством (14), не выполняется: изменение показателя преломления не компенсируется усадкой материала по его толщине, т. е. в процессе записи оптическая толщина слоя изменяется.

Направление движения интерференционных полос соответствовало уменьшению оптической толщины, что определялось путем механической сдвигки клина перпендикулярной ориентации интерференционных полос (и другими независимыми методами). Из факта уменьшения оптической толщины слоя в процессе записи при положительном приросте ОКП следует, что величина относительной линейной усадки действительно больше, чем рост $(\Delta n)/n$. Учитывая, что в состав ФПК-488 входит около 50 % жидкости, не образующей полимерных молекул, можно предположить, что в данном полимере жидкость находится в термодинамически неравновесных условиях. К стати, это следует из механизма формирования голограмм на ФПК-488 [4]. Усадка материала при записи (полимеризации), вызываемая силами когезии, может приводить к синерезису данной жидкости из полимерного тела. Жидкость при этом «отжимается» на периферийную область образующегося полимера. Поскольку ОКП бромнафталина, используемого в качестве химически нейтральной жидкости, выше ОКП мономер-олигомерной смеси и их полимера, то синерезис этой жидкости уменьшает рост ОКП материала при полимеризации.

Полученные на рис. 2 кривые позволяют произвести количественный расчет величины линейной усадки (составляющей объемной усадки по толщине). С этой целью составим условия наблюдения интерференционных максимумов в полосах равной толщины [8]

$$2T_0 n_0 - \frac{1}{2} \lambda = m_0 \lambda, \quad (16a)$$

$$2T_0 n_{\text{ин}} - \frac{1}{2} \lambda = m_{\text{ин}} \lambda, \quad (16б)$$

$$2T_{\text{к}} n_{\text{к}} - \frac{1}{2} \lambda = m_{\text{к}} \lambda. \quad (16в)$$

Здесь T_0 и $T_{\text{к}}$ — начальная и конечная толщины слоя; n_0 , $n_{\text{ин}}$, $n_{\text{к}}$ — коэффициенты преломления в начальной, рабочей и конечной точках.

Вычитая (16а) из (16б), получаем возможность вычислить изменение ОКП на этапе предполимеризации (выбора рабочей точки). Фотохимическое поведение регистрирующего слоя после установки рабочей точки зависит от того, каким источником (интенсивность, длина волны) производится запись-полимеризация, устраняются прокладки или нет. Знание ОКП исходного материала и ОКП в конце записи позволяет с помощью (16а) и (16в) определить $T_{\text{к}}$ при известной начальной, задаваемой прокладками величине T_0 . Вычисленная таким образом величина усадки материала $(T_0 - T_{\text{к}})/T_{\text{к}} = 15.5\%$ при $T_0 = 20$ мкм и $T_{\text{к}} = 16.9$ мкм. При расчетах использовалась фактическая величина $m_{\text{к}}$, полученная при полимеризации лампой ЛУФ-4 и для записи в попутной симметричной схеме аргоновым лазером ЛГН-503. Относительная величина изменения $(n_{\text{к}} - n_0)/n_{\text{к}}$ равна 0.66 %. Фактически при записи голограммы, производимой после предполимеризации и удаления прокладок, величина усадки несколько меньше.

Таким образом, мы приходим к существенному для понимания механизма записи голограмм на ФПК-488 результату: относительная величина изменения толщины слоя при записи превышает относительную величину изменения ОКП. Влияет ли эта особенность на результаты, полученные в теоретической части работы, основанные на анализе изменения ОКП или, более точно, на тождестве (14)? Если движение подложек и слоя за счет усадки не сопровождается изменением величины и ориентации угла клина в пространстве, то влияния на запись пропускающей голограммы не происходит, поскольку разность фаз интерферирующих пучков остается постоянной. При записи же отражательных голограмм движение регистрирующего слоя относительно неподвижной интерференционной картины при $\Delta n = 0$ приводит к «смазыванию» записи и снижению ДЭ. Таким образом, на практике фактор $(\Delta T)/T$ наряду с изменением ОКП будет ухудшать качество голограмм почти во всех схемах записи.

Изучение характеристик записи пропускающих голограмм с наклонным к границе регистрирующей среды положением изофазных плоскостей позволяет оценить раздельное влияние $(\Delta T)/T$ и $(\Delta n)/n$ на ДЭ решеток и изменение угла Брэгга. Действительно, рассмотрим асимметричный вариант попутной записи, условия Брэгга для которого описываются уравнением (5). Первоначально определим изменение угла Брэгга за счет изменения ОКП. Дифференцируя (5) и проделав несложные выкладки, получим изменение угла Брэгга (угла преломления)

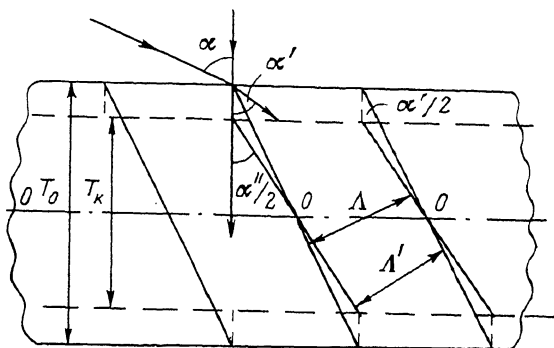
$$\Delta\alpha' = -\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha'}{2}\right) \frac{\Delta n}{n}. \quad (17)$$

В эксперименте измеряется изменение внешнего угла Брэгга (угла падения). Воспользовавшись законом преломления, находим связь между изменением ОКП и изменением угла падения

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta n \cos \alpha' \left(\operatorname{tg} \alpha' - \operatorname{tg} \frac{\alpha'}{2} \right)}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \alpha'}}. \quad (18)$$

Рис. 3. Геометрическая модель поворота изофазных плоскостей решетки.

$\alpha'/2$, $\alpha''/2$ — углы наклона изофазных плоскостей решетки до и после усадки; T_0 , T_k — начальная и конечная толщины регистрирующего слоя; Δ , Δ' — начальный и конечный пространственный периоды решетки.



Для типичных условий эксперимента при $\Delta n = 0.01$, $n = 1.5$, $\alpha' = 30^\circ$ изменение угла Брэгга $\Delta\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ рад, или 0.229° .

Теперь определим изменения, которые вызываются чистой усадкой, в случае элементарной наклонной голограммы. Модель процесса представлена на рис. 3. Штриховыми линиями показаны границы регистрирующего слоя, симметрично сдвинувшиеся относительно оси симметрии $0-0$ после усадки. Волновые векторы пучков ориентированы к границе слоя под углами $\beta = 0$ (k_1) и $\alpha \neq 0$ (k_2), что соответствует асимметричному случаю записи голограммы в попутных пучках. Внутренний угол Брэгга (угол преломления) в процессе усадки увеличивается с α' до α'' . Половинное значение этого угла равно углу наклона изофазных плоскостей решетки. Изофазные плоскости при усадке испытывают поворот вокруг точек пересечения с осью симметрии $0-0$ (рис. 3), при этом угол $\alpha'/2$ увеличивается до $\alpha''/2$. Таким образом, чистая усадка регистрирующего слоя поворачивает изофазные плоскости в направлении, противоположном вызываемому увеличением ОКП.

При усадке одновременно с поворотом изофазных плоскостей происходит изменение пространственного периода записываемой голограммы. Все это вместе при заданной длине волны записи изменяет внешний угол Брэгга. Он измеряется в эксперименте, и с его помощью можно определить величину усадки. Из рис. 3 следует

$$T \operatorname{tg}\left(\frac{\alpha'}{2}\right) = \operatorname{const}. \quad (19)$$

Отсюда вычисляется увеличение угла наклона изофазных плоскостей решетки при усадке

$$\Delta\alpha'_1 = -\frac{\Delta T}{T} \sin \alpha'. \quad (20)$$

Изменение пространственного периода при повороте изофазных плоскостей на угол $\Delta\alpha_1$ равно

$$\frac{\Delta\Lambda'}{\Lambda} = \frac{\cos\left(\frac{\alpha'}{2} + \Delta\alpha_1\right)}{\cos \frac{\alpha'}{2}} \approx 1 + 2 \frac{\Delta T}{T} \sin^2 \frac{\alpha'}{2}. \quad (21)$$

Так как пространственный период при этом уменьшается, то угол Брэгга при этом также возрастает. Это увеличение определим, воспользовавшись условием Брэгга для рассматриваемой геометрии записи (5),

$$\frac{\Lambda}{\Lambda'} = \frac{\sin\left(\frac{\alpha'}{2} + \Delta\alpha'\right)}{\sin\frac{\alpha'}{2}} \approx 1 + \Delta\alpha' \operatorname{ctg}\frac{\alpha'}{2} = \left(1 - 2\frac{\Delta T}{T} \sin^2\frac{\alpha'}{2}\right)^{-1}, \quad (22)$$

откуда

$$\Delta\alpha'_2 = \frac{2\frac{\Delta T}{T} \sin^3\frac{\alpha'}{2}}{\left(1 + 2\frac{\Delta T}{T} \sin^2\frac{\alpha'}{2}\right) \cos\frac{\alpha'}{2}}. \quad (23)$$

Результирующее изменение внутреннего угла Брэгга равно сумме изменений, вызванных поворотом (20) и изменением пространственного периода (23). Численные оценки этих углов при параметрах записи и усадке регистрирующего материала, полученной из интерферометрических измерений, а именно $(\Delta T)/T = 0.15$, $\alpha' = 30^\circ$, дают следующие значения этих углов: $\Delta\alpha'_1 = 0.075$ и $\Delta\alpha'_2 = 0.0006$. Изменение $\Delta\alpha$ за счет пространственного периода имеет второй порядок малости по сравнению с величиной $\Delta\alpha$ за счет поворота изофазных плоскостей. Поэтому в дальнейшем ролью второго фактора можно пренебречь.

Теперь остается найти связь между изменением внутреннего угла Брэгга и измеряемым на опыте изменением внешнего угла. Воспользовавшись законом синусов и условием $\Delta\alpha \leq 1^\circ$, имеем

$$\Delta\alpha = \frac{2n\Delta\alpha' \cos\alpha'}{\cos\alpha}. \quad (24)$$

Подставляя в (24) выражение для изменения внутреннего угла (20), находим связь между относительной величиной усадки и изменением внешнего угла Брэгга в рассматриваемой геометрии записи

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta T}{T} \frac{\sin 2\alpha}{\cos\alpha}. \quad (25)$$

Запись пропускающих голограмм с наклонными изофазными поверхностями проведена на регистрирующих слоях с $T_0 = 20$ мкм при времени предполимеризации 80 с (этой экспозиции соответствует изменение оптической толщины в две полосы $\Delta m = 2$ на $\lambda = 632.8$ нм), внешнем угле (рис. 1) $\alpha = 28^\circ$, втором угле $\beta \approx 0$ аргоновым лазером ($\lambda = 488$ нм). По окончании записи ДЭ на $\lambda = 488$ нм находилась в пределах 30–50 %. Однако она заметно возростала (до 70–80 %) при увеличении угла считывания (внешнего угла Брэгга) на величину $\approx 0.9^\circ$. Это соответствовало тому, что изофазные плоскости решетки испытывали поворот.

Расчет величины $(\Delta T)/T$ по формуле (23) при заданных $\alpha = 28^\circ$, $\Delta\alpha = 0.9^\circ$ дает величину 1.7 %. Соответствующее значение этой величины из интерферометрических измерений равнялось 15.5 %. Столь значительное расхождение, вероятно, связано с используемой моделью расчета поворота «штрихов» при усадке. Действительно, модель описывает случай, когда записанная решетка деформируется под действием усадки, т. е. формируется на начальных этапах записи-полимеризации, при этом $\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\max}$. Во втором случае, голограмма записывается на последнем интервале экспозиции, но при этом $\Delta\alpha = 0$. Истинное значение $\Delta\alpha$ лежит в области $0 < \Delta\alpha < \Delta\alpha_{\max}$. Уменьшаются величина $\Delta\alpha$ и поворот решетки в обратную сторону за счет роста ОКП. Ожидается, что предложенная модель применительно к ФПК-488 даст лучшее совпадение с опытом при записи «наклонных» голограмм на слоях из данного материала в режиме темнового усиления [6].

Заключение

На протяжении эффективного времени записи решетки в триплексном регистрирующем слое на основе ФПК-488 имеет место постоянное уменьшение оптической толщины слоя (рис. 2). Изменение оптической толщины D связано с объемной усадкой. Часть объемной усадки (линейную усадку) можно связать с вытеснением жидкой нейтральной компоненты из объема образующегося полимера на периферию. Первопричиной усадки является процесс полимеризации при записи. Ориентация образующегося случайным образом двухгранного угла клина в процессе записи не меняется. Благодаря этому процесс усадки регистрирующего слоя при голографической записи можно изучать интерферометрическим способом. Относительная величина линейной усадки, определенная интерферометрическим методом, равна 15.5 %. Эта же величина, но определенная экспериментально с использованием геометрической модели, равна 1.7 %. Неравенство этих значений в значительной степени связано с тем, что в первом случае расчет ведется с начальной точки полимеризации, а во втором — с истинной рабочей точки записи (полимеризации). Дифракционная эффективность «наклонных» фазовых голограмм пропускающего типа остается относительно высокой (60—80 %), однако запись сопровождается поворотом изофазных плоскостей и соответственно уходом начального угла Брэгга за счет усадки фотополимерного слоя на величину $\approx 1^\circ$.

Список литературы

- [1] Tomlinson W. J., Chandross E. A. // *Advances in Photochemistry*. 1980. Vol. 12: P. 202—281.
- [2] Тихонов Е. А., Гюльназаров Э. С., Смирнова Т. Н. // *Квантовая электроника*. Киев: Наукова думка, 1990. № 40. С. 3—20.
- [3] Гюльназаров Э. С., Смирнова Т. Н., Тихонов Е. А. // *ЖТФ*. 1988. Т. 58. Вып. 12. С. 2405—2407.
- [4] Гюльназаров Э. С., Смирнова Т. Н., Тихонов Е. А. // *Опт. и спектр.* 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 175—179.
- [5] Лашков Г. И., Попов А. П., Райнер О. Б. // *Опт. и спектр.* 1982. Т. 52. Вып. 4. С. 585—588.
- [6] Гюльназаров Э. С., Смирнова Т. Н., Тихонов Е. А. // *ЖТФ*. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 111—117.
- [7] Грищенко В. К., Маслюк А. Ф., Гудзера С. С. *Жидкие фотополимеризующиеся композиции*. Киев: Наукова думка, 1985. 206 с.
- [8] Годжаев Н. Н. // *Оптика*. М.: Высшая школа, 1977. 432 с.

Институт физики АН УССР
Киев

Поступило в Редакцию
10 октября 1990 г.
В окончательной редакции
13 мая 1991 г.