

ПОЛИМЕРНЫЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ С ДИФфуЗИОННЫМ УСИЛЕНИЕМ ДЛЯ БЛИЖНЕЙ УФ ОБЛАСТИ

© 2012 г. Д. Н. Мармыш; А. И. Станкевич, канд. хим. наук;
В. В. Могильный, доктор физ.-мат. наук

Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: mogilny@bsu.by

Представлены результаты экспериментальных исследований оптической записи и термического усиления фазовых решеток в новой полимерной композиции с диффузионным усилением на основе ПММА и бензофенона. Фазовые решетки записывали экспонированием слоев некогерентным УФ излучением (365 нм) через амплитудную маску и интерференционной картиной, формируемой излучением импульсного Nd:YAG-лазера (355 нм). Постэкспозиционная термическая обработка слоев привела к усилению решеток. Кинетика процесса согласуется с представлениями о диффузионной природе усиления. Фото- и термостабильность решеток после усиления позволила сделать вывод о том, что в слоях происходит фотоприсоединение бензофенона к ПММА, приводящее к диффузионной релаксации неоднородного распределения концентрации бензофенона. Достигнута модуляция показателя преломления $1,6 \times 10^{-3}$ для слоев ПММА, содержащих бензофенон с мольной долей 2%.

Ключевые слова: фазовый регистрирующий материал, бензофенон, фотоприсоединение, диффузионное усиление.

Коды OCIS: 090.1970, 090.7330

Поступила в редакцию 14.02.2011

Полимерные голографические материалы с диффузионным усилением, допускающие нанесение слоев из раствора и длительное их хранение до записи, позволяют получать объемные голограммы с предельной дифракционной эффективностью и высокой лучевой прочностью без жидкостного проявления [1]. Эти достоинства существенны для применений в производственных технологиях, например, в УФ-фотолитографии с помощью голограммных фотошаблонов [2]. Запись и функционирование последних в УФ области спектра требует от голографических материалов чувствительности к УФ излучению, а от усиленных и фиксированных голограмм – максимальной прозрачности и устойчивости. Известные голографические материалы на основе фенантренхинона обеспечивают эффективную объемную запись в сине-зеленой области спектра, возможность восстановления ограничивается областью ≈ 400 нм. Более коротковолновое излучение поглощается фотопродуктами фенантренхинона. В связи с этим актуален поиск новых фоточувствительных соединений с оптическим поглощением в УФ области и фотохи-

мическими свойствами, подобными свойствам фенантренхинона. В настоящей работе исследуется полимерная композиция, включающая в качестве фоточувствительной добавки бензофенон (БФ), основной фотореакцией которого в полиметилметакрилате (ПММА), как и для фенантренхинона, является фотовосстановление.

Эксперимент

В работе использовали слои ПММА толщиной в пределах 1–100 мкм и мольной долей бензофенона 1–7%. Тонкие слои (до 5 мкм) готовили центрифугированием, слои большей толщины – поливом раствора ингредиентов на стеклянную подложку с последующей сушкой.

Измерения спектров электронного поглощения слоев проводили с помощью спектрофотометра Specord M40. Несинусоидальные тонкие пропускающие фазовые решетки (НФР) в слоях толщиной 20–40 мкм формировали экспонированием через маску, создающую периодическое распределение интенсивности в слое ($d = 9–30$ мкм). В качестве активирующей

щего излучения использовалась линия 365 нм ртутной лампы ДРШ-250-3, выделенная светофильтром. Голографическая запись велась импульсным излучением Nd:YAG-лазера (третья гармоника $\lambda = 355$ нм, $\tau = 20$ нс). По симметричной схеме в попутных пучках записывали голографические фазовые решетки (ГФР) с периодом 1,8 мкм. Для записи голограмм использовали слои ПММА толщиной 7–12 мкм и мольной долей БФ 1,5%. Измерение поверхностных рельефов проводили с помощью микроинтерферометра МИИ-4.

Полученные фазовые решетки зондировали лазерным излучением 650 нм (НФР) и 633 нм (ГФР), которое слои не поглощают. Для НФР в дифракцию существенный вклад вносили поверхностные рельефы. Их влияние устранялось с помощью стеклянной пластинки с иммерсионной жидкостью, прижатой к регистрирующему слою. Из измеренных значений дифракционной эффективности η голографических решеток рассчитывалась амплитуда модуляции показателя преломления Δn согласно формуле для объемных пропускающих фазовых голографических решеток [3]

$$\Delta n = \lambda \cos(\theta) \arcsin(\sqrt{\eta}) / (\pi h), \quad (1)$$

где λ – длина волны восстанавливающего излучения, h – толщина регистрирующего слоя, θ – угол Брэгга.

Для НФР вклад высших порядков дифракции не превышает 10% [4], поэтому для расчета амплитуды модуляции показателя преломления использовали выражение для дифракционной эффективности основной гармоники тонкой пропускающей фазовой решетки

$$\eta = J_1^2 \left[2\pi \Delta n h / (\lambda \cos(\theta)) \right], \quad (2)$$

где J_1 – функция Бесселя первого порядка.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены спектры электронного поглощения полимерных слоев, содержащих БФ, и их изменение под действием излучения ртутной лампы. До экспонирования оптическое поглощение в диапазоне 45 000–25 000 см^{-1} определяется БФ. Его спектр включает интенсивную полосу внутримолекулярного переноса заряда от бензольных колец к карбонильной группе БФ с максимумом около 39 700 см^{-1} (≈ 252 нм) и малоинтенсивную $\pi\pi^*$ -полосу с максимумом вблизи 29 700 см^{-1} (337 нм) [5]. Последняя обеспечивает оптимальную для оп-

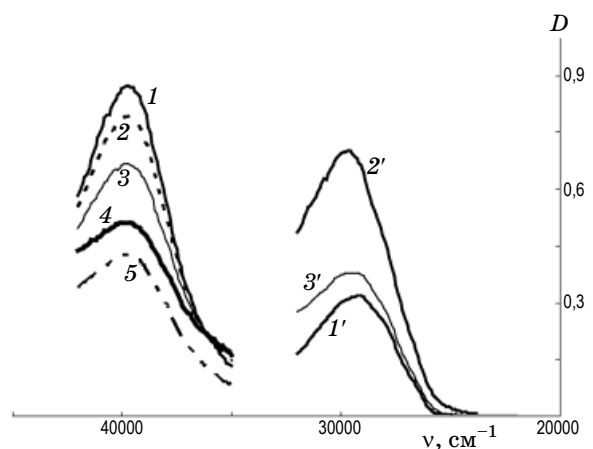


Рис. 1. Электронные спектры поглощения слоев ПММА, содержащих 2 моль. % БФ до экспонирования (1, 1'), в процессе экспонирования (2–4, 2'), после выдерживания экспонированного слоя при комнатной температуре в течение 14 часов (5) и прогрева в течение 10 минут при 110 °С (3'). Толщина слоев 1,5 мкм (1–5) и ≈ 20 мкм (1'–3'). Экспозиция излучением с $\lambda = 365$ нм 3,4 (2), 10,8 (3) и 25,9 (4) Дж/см² и с $\lambda > 300$ нм 3 Дж/см² (2').

тической записи величину поглощения при толщине слоя в десятки микрон в спектральном диапазоне 350–370 нм.

В процессе экспонирования наблюдается падение оптической плотности в области полосы переноса заряда и ее рост в области $\pi\pi^*$ -полосы (рис. 1, кривые 2–4 и 2'). Нарастание оптической плотности обратимо (рис. 1, кривые 5 и 3').

В ходе записи НФР и после нее дифракция на решетках не наблюдается ($\eta < 0,001$, $\Delta n(t_e) < 1,3 \times 10^{-4}$). При повышении температуры слоя с записанной НФР дифракционная эффективность монотонно растет до максимального значения. На рис. 2 представлены кинетики относительной амплитуды модуляции показателя преломления НФР при температуре 90 °С. Кривые описываются выражением (достоверность аппроксимации не ниже 0,99) вида

$$y = y_0 - A_1 \exp(-\beta t), \quad (3)$$

где y_0 , A_1 , β – параметры аппроксимации, t – время.

Данные табл. 1 показывают, что амплитуда модуляции усиленных НФР монотонно увеличивается с ростом экспозиции (Н) и достигает максимального значения $\Delta n = 1,6 \times 10^{-3}$.

По оценкам, коэффициент постэкспозиционного усиления амплитуды модуляции показателя преломления (отношение максимального Δn после усиления к Δn непосредственно после записи) составил $M > 12$.

При термической обработке слоев с НФР наблюдалось формирование рельефов на поверхности в виде превышения толщины экспонированных областей над толщиной неэкспонированных. Форма рельефа изображена на рис. 3а, закономерность изменения относительных высоты периодического рельефа $\Delta h/h$ и высоты подъема $\Delta l/h$ для фазовой решетки с периодом 23 мкм представлены на рис. 3б. В процессе отжига относительная высота периодического рельефа $\Delta h/h$ за 10 часов достигла 0,16 %, после чего практически не изменялась. Величина Δl демонстрировала монотонный рост на протяжении всего периода наблюдения.

Как и в случае НФР, непосредственно после оптической записи голографических решеток дифракция не наблюдается. Температурная обработка приводит к росту дифракционной эффективности, зависимость Δn от времени термической обработки также аппроксимируется выражением (3) с высокой достоверностью. В табл. 1 представлены значения амплитуды модуляции показателя преломления, достигнутые после окончания усиления голограмм. Максимальное значение $\Delta n = 1,1 \times 10^{-3}$ получено при экспозиции 3,7 Дж/см², дальнейший рост экспозиции приводит к уменьшению эффективности записи.

В основе диффузионного усиления фазовых решеток в материалах, подобных исследуемому, лежит присоединение молекулярных про-

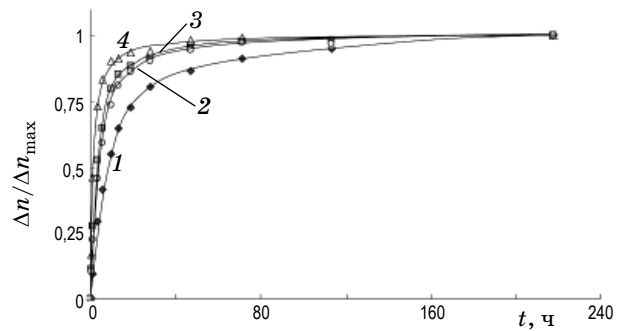


Рис. 2. Зависимости относительной амплитуды модуляции показателя преломления фазовых решеток в слоях ПММА с 2 моль.% БФ от времени термической обработки при 90 °С. Толщина регистрирующего слоя $h = 30$ мкм, экспозиция 2,2 Дж/см², период фазовых решеток 31 (1), 23 (2), 14 (3) и 10 (4) мкм.

Таблица 1. Параметры усиленных несинусоидальных и голографических решеток

Несинусоидальные решетки			Голографические решетки		
d , мкм	H , Дж/см ²	$\Delta n \times 10^3$	d , мкм	H , Дж/см ²	$\Delta n \times 10^3$
23	2,2	0,34	1,8	1,9	0,45
	5,0	0,58		3,7	1,13
	6,6	0,81		7,4	0,92
	22,6	1,60		11,2	0,96

дуктов фотореакций к полимерной матрице [6]. Возможность фотоприсоединения бензофенона к макромолекулам полимера под действием света обусловлена наличием в структуре моле-

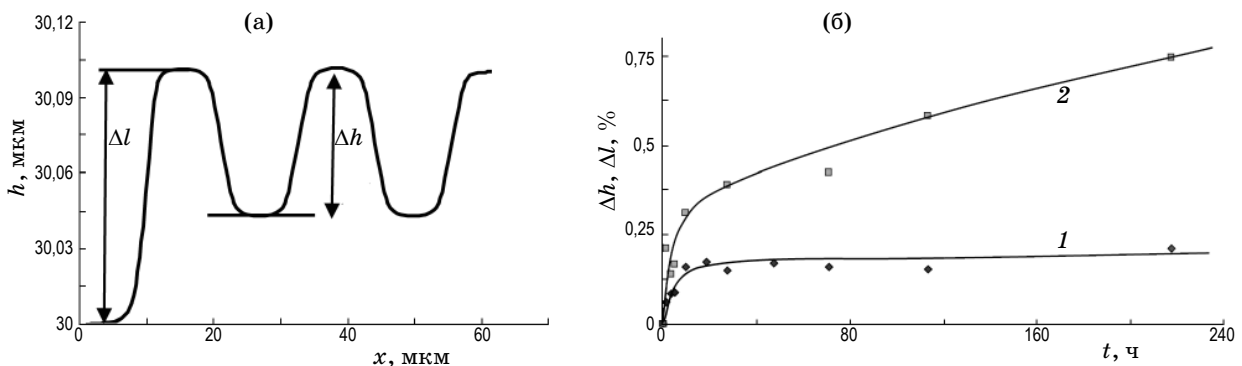


Рис. 3. Форма поверхностного рельефа (а) и зависимость относительных высоты подъема $\Delta l/h$ (б, кривая 1) и высоты рельефа $\Delta h/h$ (б, кривая 2) фазовой решетки с периодом 23 мкм от времени термической обработки при 90 °С слоя ПММА с 2 моль.% БФ. Экспозиция при экспонировании излучением $\lambda = 365$ нм 22,5 Дж/см².

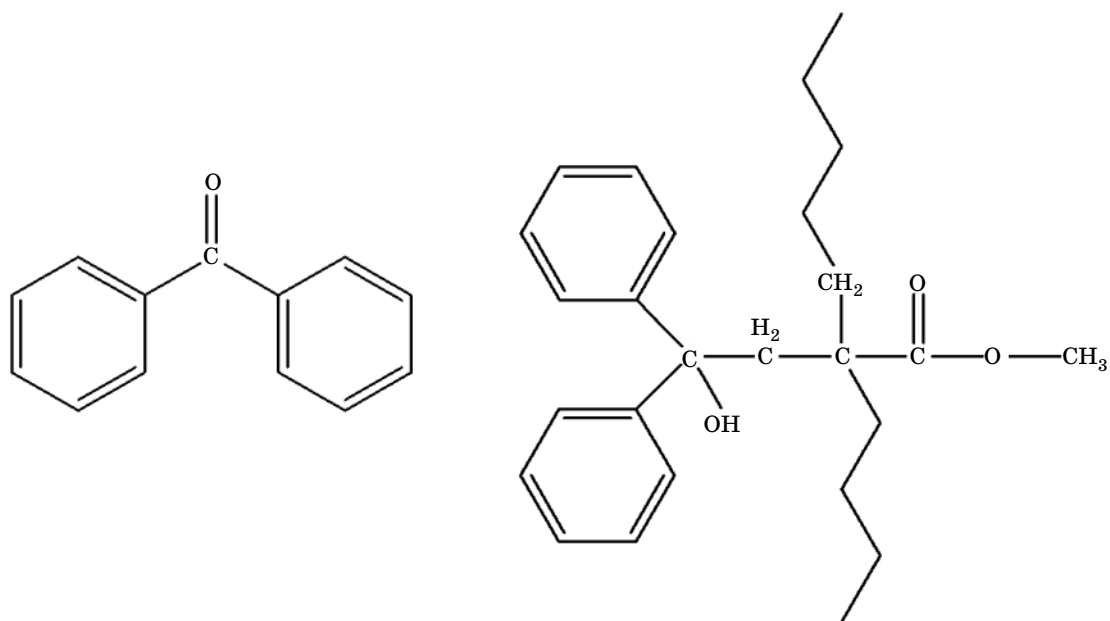


Рис. 4. Структурные формулы молекулы бензофенона и его вероятного присоединенного фотопродукта в ПММА.

кулы кетонной группы $C=O$, которая является фотохимически активным хромофором [7]. Один из основных путей расходования фотовозбужденных молекул БФ в полимерной матрице – фотовосстановление, которое заключается в отрыве атома водорода от макромолекулы полимера [8]. При этом образуется пара радикалов, в результате рекомбинации которой возможно образование фотопродукта, присоединенного к полимерной матрице. Структурные формулы БФ и его присоединенного фотопродукта представлены на рис. 4. Спектры, приведенные на рис. 1, демонстрируют фотопревращение карбонильной группы молекул БФ, вызывающее исчезновение интенсивной полосы переноса заряда.

При повышении температуры периодическое распределение концентрации присоединенных к полимеру фотопродуктов сохраняется благодаря отсутствию их поступательного смещения, тогда как соответствующее распределение непревращенных молекул БФ испытывает диффузионную релаксацию. Изменение амплитуды модуляции показателя преломления Δn фазовой решетки диффузией фоточувствительных молекул в постэкспозиционный период может быть описано выражением [9]

$$\Delta n = (n^2 + 2)^2 \Delta C_{BP} [R_p - R_{BP} \exp(-\gamma(t - t_e))] / (6n), \quad (4)$$

$$t \geq t_e,$$

где n – средний показатель преломления слоя, R_p и R_{BP} – молярные рефракции фотопродукта и исходного светочувствительного вещества, соответственно, ΔC_{BP} – амплитуда модуляции концентрации светочувствительных молекул, t_e – время записи решетки, $\gamma = D_{BP}(2\pi/d)^2$ – постоянная скорости усиления, D_{BP} – коэффициент диффузии бензофенона, d – период решетки. Очевидно, что выражение (4) по форме идентично выражению (3), использованному для аппроксимации экспериментальных кинетик усиления НФР и ГФР.

Вклад концентрационной решетки в амплитуду модуляции показателя преломления после окончания диффузионного процесса определяется выражением

$$\Delta n(\infty) = (n^2 + 2)^2 \Delta C_p R_p / (6n), \quad (5)$$

где ΔC_p – амплитуда модуляции концентрации фотопродукта.

Коэффициент диффузионного преобразования голограмм задается выражением

$$M = \Delta n(\infty) / \Delta n(t_e) = R_p / |\Delta R|, \quad (6)$$

где $\Delta R = R_p - R_{BP}$.

Согласно выражениям (2) и (3) $\Delta n(\infty)$ и коэффициент диффузионного усиления M определяются величинами молярной рефракции БФ, а также ее изменением при фотоприсоединении. Расчет значений этих величин по сумме групповых вкладов дает $R_{\text{БФ}} = 55,1 \text{ см}^3/\text{моль}$ и $\Delta R = -0,5 \text{ см}^3/\text{моль}$ [10]. Тогда согласно (2) оценка для коэффициента постэкспозиционного усиления составит $M = 110$.

Полученные данные указывают на то, что в материале реализуется фотоприсоединение бензофенона к макромолекулам полимера и происходит диффузионное усиление фазовых решеток. На это указывает низкая эффективность прямой записи фазовых решеток, наблюдаемая в эксперименте. Действительно, при концентрациях бензофенона в слое $C = 2,33 \times 10^{-4} \text{ моль}/\text{см}^3$ и $C = 1,75 \times 10^{-4} \text{ моль}/\text{см}^3$, соответствующих 2 и 1,5 моль. %, амплитуда модуляции показателя преломления должна составлять согласно (4) $\Delta n(t = t_e) = 1,2 \times 10^{-4}$ для НФР при экспозиции $22,6 \text{ Дж}/\text{см}^2$ и $\Delta n(t = t_e) = 6,1 \times 10^{-5}$ для голографических решеток при экспозиции $3,7 \text{ Дж}/\text{см}^2$. Оценка получена принимая во внимание плотность ПММА $\rho_{\text{ПММА}} = 1,185 \pm 0,15 \text{ г}/\text{см}^3$ [10] и плотность бензофенона $\rho_{\text{БФ}} = 1,11 \text{ г}/\text{см}^3$ [11]. Оценка глубины фотоконверсии БФ 50% для НФР и 35% для ГФР получена в предположении псевдомомолекулярной реакции и стабильного фотопродукта по закономерности уменьшения оптической плотности D на частоте $\nu = 39\,800 \text{ см}^{-1}$ (рис. 1).

О фотоприсоединении БФ свидетельствуют также закономерности усиления фазовых решеток, которые демонстрируют характерные для диффузионного механизма особенности. В частности, вид кинетики Δn аппроксимируется выражением (3), которое идентично (4) и описывает преобразование решеток диффузией БФ. В результате аппроксимации были определены постоянные скорости роста γ . На рис. 5 представлена зависимость величины γ от $1/d^2$. Кривая имеет линейный вид, что характерно для диффузионного процесса. С помощью значений γ были рассчитаны коэффициенты диффузии бензофенона, которые составили при $90 \text{ }^\circ\text{C}$ $D_{\text{БФ}} = 2,7 \times 10^{-16} - 5,9 \times 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ и $D_{\text{БФ}} = 7 \times 10^{-17} - 1,4 \times 10^{-16} \text{ м}^2/\text{с}$ при $80 \text{ }^\circ\text{C}$. Разброс коэффициентов диффузии можно объяснить разбросом толщин регистрирующих слоев и, как следствие, различным содержанием остаточного растворителя, играющего роль пластификатора.

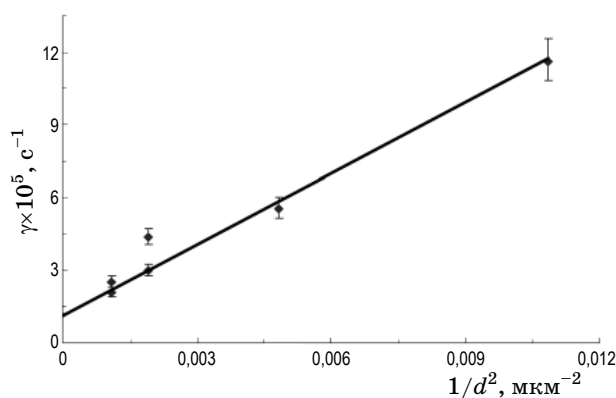


Рис. 5. Зависимость постоянной скорости роста амплитуды модуляции показателя преломления фазовых решеток γ от $1/d^2$.

Тестовые записи фазовых решеток позволили оценить достижимую в используемых условиях эксперимента амплитуду модуляции показателя преломления после усиления. Для НФР и ГФР максимальная $\Delta n(\infty) = 1,60 \times 10^{-3}$ и $1,13 \times 10^{-3}$, соответственно. Оценка величин $\Delta n(\infty)$ с помощью формулы (5) дает для этих двух случаев заметно большие значения: $1,3 \times 10^{-2}$ и $6,7 \times 10^{-3}$, соответственно. Это несоответствие можно связать с неоднородным расширением полимерного материала при термоусилении, наблюдавшемся для НФР в виде образования периодических рельефов на поверхности слоя (рис. 3). Такое неоднородное расширение преимущественно в экспонированных областях должно привести к уменьшению в них показателя преломления, а значит, и уменьшению Δn фазовой решетки. Однако оценка высоты рельефа, который может объяснить наблюдающееся различие, дает величину 1,8% от толщины слоя, что намного превышает измеренную величину 0,2%.

К наблюдаемому несоответствию могут привести изменения локальной плотности полимерной матрицы, которые вызваны ее фотохимической модификацией и диффузией БФ. Действительно, при фотоприсоединении БФ к звеньям ПММА происходит увеличение размера боковых групп полимера. Известно, что рост объема боковых групп ограничивает подвижность макромолекул [12] и уменьшает вероятность образования флуктуационных полостей, необходимых для обеспечения диффузии низкомолекулярных примесей, диспергированных в полимере. Вызванное фотоприсоединением

замораживание движений в полимерной матрице можно интерпретировать как связывание в результате фотореакций кластеров свободного объема. В результате образуется градиент концентрации подвижных кластеров и становится возможной его диффузионная релаксация. В структуре фазовой решетки диффузия кластеров представляет собой движение в направлении от минимумов освещенности к максимумам и совпадает с направлением движения молекул БФ. Исходя из моноэкспоненциальности кинетик фазовых решеток можно предположить, что движение кластеров свободного объема лимитирует диффузию молекул БФ так, что их коэффициенты диффузии совпадают. Очевидно, что в результате диффузии свободного объема должна формироваться решетка плотности полимерного материала, вклад которой в распределение показателя преломления противофазен вкладу решетки концентрации фотопродукта. Такая “антирешетка” компенсирует модуляцию показателя преломления молекул фотопродукта и уменьшает эффективность диффузионного усиления. Подобной диффузией свободного объема (но от поверхности фоточувствительного слоя) объясняют изменения скорости термоизмеризации замещенных антрацена с изменением толщины слоя [13].

Оценим величину кластера свободного объема, диффузия которого обеспечивает наблюдаемые значения амплитуды модуляции показателя преломления фазовых решеток. Будем считать, что фазовая решетка сформирована синусоидальным распределением фотопродукта и противофазным ей распределением плотности полимерного материала, возникшим в результате сонаправленной с движением молекул БФ диффузией кластеров свободного объема. Нетрудно показать, что изменение плотности полимерного материала в максимуме концентрации фотопродукта может быть задано выражением

$$\delta\rho = -\rho\Delta C_{\text{ВР}}\Delta V / (2 + \Delta C_{\text{ВР}}\Delta V), \quad (7)$$

где ρ – плотность полимерного материала, $\Delta C_{\text{ВР}}$ – модуляция концентрации БФ, созданная при оптической записи, ΔV – величина кластера свободного объема диффундирующего вместе с одной молекулой БФ. На ту же величину $\delta\rho$ одновременно происходит уменьшение плотности в минимуме распределения фотопродукта.

Учитывая, что вклад $\Delta n'$ в амплитуду модуляции показателя преломления за счет модуляции плотности материала описывается выражением, следующим из формулы Лорентц–Лоренца

$$\Delta n' = -(n^2 + 2)(n^2 - 1)2\delta\rho / (6n\rho), \quad (8)$$

можно записать выражение для суммарного Δn фазовой решетки после окончания диффузионного усиления в виде

$$\Delta n(\infty) = (n^2 + 2)^2 \Delta C_{\text{p}} R_{\text{p}} / (6n) - (n^2 + 2)(n^2 - 1)2\Delta C_{\text{ВР}}\Delta V / [6n(2 + \Delta C_{\text{ВР}}\Delta V)] - (n^2 + 2)(n^2 - 1)\Delta h / (6nh). \quad (9)$$

Первое слагаемое описывает вклад распределения концентрации фотопродукта, второе – вклад решетки плотности, образованной в результате диффузии свободного объема. Последнее слагаемое учитывает модуляцию плотности из-за расширения, создающего поверхностный рельеф. Если считать $\Delta C_{\text{p}} = \Delta C_{\text{ВР}}$, то согласно (9) наблюдаемые в эксперименте $\Delta n(\infty)$ соответствуют диапазону значений $\Delta V = 240\text{--}260 \text{ \AA}^3$. Это примерно в 1,5 раза превышает объем молекулы БФ.

Максимальная амплитуда модуляции показателя преломления составила $1,60 \times 10^{-3}$ при концентрации БФ 2 моль.%. Полученная величина Δn позволяет рассчитывать на приближение к максимальной эффективности голограмм в слоях с толщиной ≈ 150 мкм, кроме того существует возможность увеличения Δn за счет роста концентрации БФ в слое. Нами были выполнены пробные записи фазовых голограмм в слоях с различной толщиной и концентрацией БФ. В табл. 2 представлены результаты этих экспериментов, которые показывают, что с увеличением толщины и концентрации БФ рассчитанная амплитуда модуляции показателя преломления голографических решеток уменьшается. Этот факт можно связать с более

Таблица 2. Параметры ГФР при различной концентрации бензофенона и толщине регистрирующих слоев

Толщина h , мкм	Концентрация бензофенона, моль. %	η , %	$\Delta n(\infty) \times 10^3$	ΔD
10	1,5	0,26	1,13	0,25
50	1,5	3,78	0,78	1,3
100	3	11,4	0,68	1,8

существенным ростом в этих условиях оптической плотности при записи (ΔD в табл. 2).

Рост поглощения, вероятно, вызван образованием промежуточного продукта фотореакции радикального типа с временем жизни при комнатной температуре ≈ 5 часов. При повышении температуры до значений близких к температуре стеклования время жизни уменьшается до нескольких минут, т. е. реальна возможность улучшения условий записи путем повышения температуры образца. Существенное влияние на время жизни радикального продукта способно оказать полимерная матрица. Экспонирование слоя сополимера на основе бензальдегидсодержащего и метакрилатного мономера с БФ показало, что в этом случае ΔD заметно меньше, чем для БФ в ПММА.

Исследования процессов записи и термического усиления фазовых решеток в слоях ПММА, содержащих бензофенон, показали, что в слое под действием света образуется присоединенный фотопродукт и реализуется диффузионный механизм усиления. Достигнутая экспериментально амплитуда модуляции $\Delta l = 1,6 \times 10^{-3}$ существенно ниже теоретической оценки, что связывается с возникновением решетки плотности полимерного материала, которая возникает, в основном, за счет перераспределения свободного объема между областями с различной степенью фотоконверсии. Показано, что эффективность записи снижается с ростом поглощения при фотолизе БФ. Рассмотрены возможности ослабления этого явления.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Mahilny U.V., Marmysh D.N., Stankevich A.I., Tolstik A.L., Matusevich V., Kowarschik R.* Holographic volume gratings in a glass-like polymer material // *Appl. Phys B: Lasers and Optics*. 2006. V. 82. № 2. P. 299–302.
2. *Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J-C.* Holographic Microlithography // *Opt. Eng.* 1995. V. 34. № 9. P. 2724–2730.
3. *Кольер Р., Беркхардт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1975. 686 с.
4. *Райченко А.И.* Математическая теория диффузии в приложениях. Киев: Наук. думка, 1981. 396 с.
5. *Deeg F.W., Pinsl J., Brauchle Chr.* Hydrogen abstraction of benzophenone from polymer matrices: evaluation of quantum yields and photomechanical effects // *The Journal of Physical Chemistry*. 1986. V. 90. № 22. P. 5715–5719.
6. *Вениаминов А.В., Гончаров В.Ф., Попов А.П.* Усиление голограмм за счет диффузионной деструкции противозначных периодических структур // *Опт. и спектр.* 1991. Т. 70. № 4. С. 864–869.
7. *Гиллет Дж.* Фотофизика и фотохимия полимеров. Введение в изучение фото процессов в макромолекулах: Пер. с англ. д-ра хим. наук М.Г. Гольдфельда / Под ред. чл.-корр. АН СССР М.В. Алфимова. М.: Мир, 1988. 435 с.
8. *Brauchle Chr., Burland D.M., Bjorklund G.C.* Hydrogen abstraction by benzophenone studied by holographic photochemistry // *The Journal of Physical Chemistry*. 1981. V. 85. № 2. P. 123–127.
9. *Mahilny U.V., Marmysh D.N., Tolstik A.L., Matusevich V., Kowarschik R.* Phase hologram formation in highly concentrated phenanthrenequinone – PMMA media // *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2008. V. 10. № 8. 085302.
10. *Зефиоров Н.С.* Химическая энциклопедия: Т. 4. Полимерные – Трипсин / М.: Большая Российская энциклопедия. 1995. 639 с.
11. *Никольский Б.П.* Справочник химика. Т. 2. Изд-во “Химия”, 1971. 1168 с.
12. *Аскадский А.А., Кондращенко В.И.* Компьютерное материаловедение полимеров. Т. 1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Научный мир, 1999. 544 с.
13. *Могильный В.В., Лазарева А.М.* Влияние диффузии свободного объема на термоизомеризацию азометиновых соединений в стеклообразных полимерных пленках // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б.* 1994. Т. 36. № 2. С. 2088–2091.