

07;12

## Температурная стабильность и лучевая прочность голографических решеток на фотополимерных материалах

© Т.Н. Смирнова, О.В. Сахно, И.А. Стрелец, Е.А. Тихонов

Институт физики АН Украины,  
252650 Киев, Украина

(Поступило в Редакцию 8 января 1997 г.)

Представлены результаты исследований температурной зависимости дифракционной эффективности и лучевой прочности объемных фазовых голограмм — решеток пропускающего типа. Обратимые дифракционные эффективности описываются диаграммами фазового равновесия системы полимер–диффузанта. Лучевая прочность исследованных голограмм-решеток определяется порогами фототермолитического распада используемого диффузанта — бромнафталина. Изучены композиции, содержащие диффузанта с высокими порогами процессов фотолиза и термолита. В результате предложены модификации фотополимерной регистрирующей среды с лучевой прочностью более  $200 \text{ MW/cm}^2$ .

### Введение

Фоточувствительные полимерные композиции (ФПК) для голографической записи постоянно разрабатываются и совершенствуются [1–6]. Достижения последних лет выявили новые возможности фотополимеров, такие как запись отражательных голограмм в реальном времени [4,5], термический способ проявления скрытого голографического изображения [6]. Известными преимуществами ФПК в сравнении с бихромированной желатиной являются режим получения голограммы без стадий химической обработки скрытого изображения, широкие возможности оптимизации композиций при более высокой воспроизводимости основных параметров. Фазовый характер записанной информации при широкой возможности выбора толщины и площади регистрирующего материала делает указанные материалы привлекательными для изготовления и разработки разнообразных голографических оптических элементов (ГОЭ).

Авторами настоящего сообщения базовая фотополимерная композиция для голографической записи ФПК-488 и ее модификации используются для изготовления различных типов ГОЭ уже продолжительное время: это — дифракционные решетки пропускающего и автоколлимационного типов [7], дифракционные светофильтры [8], селективно отражающие дифракционные решетки [9].

Применения оптических устройств на основе полимерных ГОЭ в приборостроении не могут не опираться на стабильность основных рабочих параметров при эксплуатации приборов или систем. Среди факторов влияния на фотополимерные ГОЭ выделяется температура. Влажность или механические воздействия не столь существенны, так как выбранный композит не набухает в воде, а элемент представляет собой жесткую конструкцию из пары подложек и голограммы между ними. Температура же является неустраняемым фактором, поскольку локальное повышение температуры может иметь место вследствие диссипативных потерь при канализации лазерных пучков большой интенсивности.

Общий и локальный нагревы ГОЭ на первой стадии влияют обратимо на его спектральные и угловые характеристики. С ростом температуры ее влияние может вызывать необратимые изменения и разрушение голограммы. С похожей ситуацией исследователь встречается в случае взаимодействия решеток с интенсивными лазерными пучками. При взаимодействии с интенсивными лазерными пучками между названными двумя стадиями может появиться третья, природа которой связана с нелинейным оптическим откликом материала решетки (кубической по полю нелинейностью в изотропной среде). Эта стадия является предметом дальнейших исследований, в то время как результаты изучения первой и второй стадий представлены в настоящей работе.

Одним из существенных практических достижений данной работы явилось создание модификаций базовой композиции, которая характеризуется лучевой прочностью выше, чем бихромированная желатина.

### Строение и свойства голографического носителя на ФПК

Голографический носитель на основе ФПК-488 изготавливается в виде триплекса: подложка–ФПК–подложка с зазором от единиц микрона до  $1 \text{ mm}$  в зависимости от требований к угловой селективности изготавливаемого ГОЭ. Зазор типично образуется за счет прокладок, не препятствующих усадке полимерного слоя. Изготовление такого носителя производится перед записью и для размеров до  $10 \text{ cm}$  технологических трудностей не создает. ФПК данного класса представляют собой композиции, включающие три взаимодействующие подсистемы: полимеризационноспособная мономер-олигомерная смесь; смесь двух или более компонент, образующая эффективный инициатор процесса радикальной полимеризации; химический компонент, играющий основную роль в необратимой пространственной модуляции показателя преломления, образующейся за счет диффузии, — химически нейтральный диффузанта (ХНД).

Таблица 1.

Наименование ФПК	Чувствительность,* mJ/cm <sup>2</sup>	Разрешающая способность, mm <sup>-1</sup>	Амплитуда модуляции показателя преломления $\delta n^{**}$
ФПК-488	300	> 6000	0.012–0.015
ФПК-488М	60	> 6000	0.025
ФПК-488Н	150	> 6000	0.012–0.014

\* Светочувствительность регистрирующей среды определена как экспозиция, необходимая для достижения максимальной дифракционной эффективности при интенсивности записывающих пучков 0.2 mJ/cm<sup>2</sup> на длине волны записи  $\lambda = 0.488 \mu\text{m}$ .

\*\* Амплитуда модуляции показателя преломления вычислена при считывании решеток пучком с  $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$  и вектором напряженности поля  $E$ , параллельным "штрихам" решетки ( $s$ -поляризация).

Некоторые характеристики разработанных ФПК приведены в табл. 1. ФПК-488М отличаются от базовой композиции ФПК-488 [5] мономер-олигомерной составляющей, ФПК-488Н-диффузантом.

В основе механизма голографической записи для данных композиций лежат процессы радикальной фотополимеризации мономер-олигомерной смеси и взаимодиффузии мономера и ХНД между фазовыми плоскостями формирующейся голограммы, которые соответствуют максимумам и минимумам интенсивности света в интерференционном световом поле [10,11]. Возникающая в результате пространственная модуляция концентрации ХНД многократно усиливает и стабилизирует модуляцию показателя преломления полимерного слоя.

### Температурная стабильность параметров голографических решеток ФПК-488

В работе исследовалась температурная зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  и пропускания  $T_0$  голографических решеток, записанных на слоях ФПК-488 и ФПК-488М. С указанной целью измерялись изменения ДЭ в температурном диапазоне  $-50$ – $+250^\circ\text{C}$ . Пропускающая дифракционная решетка помещалась в термощкаф с регулируемой в диапазоне  $+20$ – $+250^\circ\text{C}$  температурой  $T$ . Измерение ДЭ в области  $T = -100$ – $+20^\circ\text{C}$  осуществлено с помощью азотного криостата с изменяемой температурой. Тестирование изменений ДЭ решетки осуществлялось пучком He-Ne лазера ( $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ), падавшего на исследуемую решетку под углом Брэгга. Мощности падающего ( $P_{\text{in}}$ ), прошедшего ( $P_{\text{out}}$ ) и дифрагирующего ( $P_{\text{dif}}$ ) пучков контролировалась с помощью фотодиодов ФД-26 с выходом сигнала на автоматическую систему регистрации и обработки данных.

Дифракционная эффективность определялась как отношение  $P_{\text{dif}}/(P_{\text{dif}} + P_{\text{out}})$ . Потери на светорассеяние ( $\rho = 1 - T_0$ ) учитывались путем измерения пропускания решетки  $T_0 = (P_{\text{in}} - P_{\text{fr}} - P_{\text{out}})/P_{\text{in}}$ , где  $P_{\text{fr}}$  — френелевские потери, измеренные при падении тестирующего пучка на решетку под углом, для которого  $P_{\text{dif}} = 0$ .

Результатом исследований являются следующие данные. Нагревание решеток до  $100^\circ\text{C}$  приводит к незначительному изменению ДЭ. При повышении  $T > 100^\circ\text{C}$

наблюдается уменьшение ДЭ с выходом на стационарное значение, которое остается неизменным при постоянной  $T$  в течение времени наблюдения (до 8 h). Охлаждение решетки до первоначальной (комнатной) температуры сопровождается возвратом величины ДЭ к ее первоначальному значению.

На рис. 1 представлена зависимость ДЭ =  $f(T)$  пропускающих решеток для композиций ФПК-488 и ФПК-488М. Обратимое по температуре восстановление ДЭ имеет место до значений  $T$ , при которых решетка разрушается. Для решеток, изготовленных на основе ФПК-488, разрушение начиналось при  $T = 218^\circ\text{C}$ ; для решеток, записанных на ФПК-488М, — при  $244^\circ\text{C}$ .

Полимерный слой без нейтральной компоненты не разрушался вплоть до максимальной температуры наблюдения  $T = 250^\circ\text{C}$ . Разрушение для всех решеток (с  $\nu = 2000 \text{ mm}^{-1}$ ) имело специфичный и неизменный характер: происходило образование трещин, параллельных направлению фазовых плоскостей решетки с коэффициентом деления пространственной частоты примерно 20 : 1. Расположение трещин периодически, что превращало толстую пропускающую решетку в тонкую (по критерию Клейна–Кука) и приводило к появлению картины многоволновой дифракции тестирующего пучка. Полимерные слои из данного регистрирующего фотополимерного материала без записи голограммы растрескиваются при тех же температурах неупорядоченно.

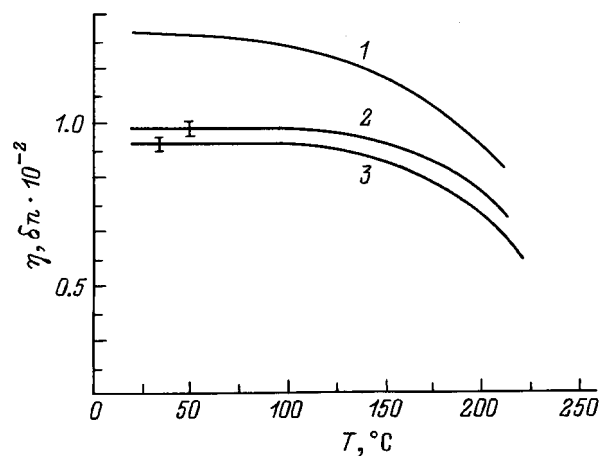


Рис. 1. Температурные изменения амплитуды модуляции показателя преломления решетки на ФПК-488 (1), ДЭ решеток на ФПК-488М (2) и ФПК-488 (3).

При охлаждении решетки до  $\sim -5^\circ\text{C}$  ее дифракционная эффективность практически не изменяется. Для диапазона низких температур ( $T < 0^\circ\text{C}$ ) также наблюдается обратимое уменьшение ДЭ (рис. 2). Для решеток на ФПК-488 при исходном значении ДЭ = 0.98 минимальное значение ДЭ стабилизировалось при  $\sim 0.81$ . Нагревание решетки со средней скоростью  $\sim 0.5 \text{ grad/min}$ , при которой успевает устанавливаться квазиравновесное распределение температуры по слою, сопровождалось увеличением ДЭ. Исходное значение восстанавливается при  $T = +8^\circ\text{C}$ . Для решеток на ФПК-488М в поведении ДЭ при охлаждении и нагревании образца имел место гистерезис. Так, при нагревании предварительно охлажденной до  $-60^\circ\text{C}$  решетки (с исходной ДЭ = 0.95) ее эффективность увеличивается, но, не доходя до первоначального значения, стабилизируется на уровне  $\sim 0.8$ . Однако первоначальная величина ДЭ восстанавливается при длительной (более часа) выдержке решетки при  $T = 20^\circ\text{C}$  либо при нагревании до  $+(30-40)^\circ\text{C}$ . Кроме того, для решеток на основе обеих модификаций ФПК при уменьшении температуры происходит возрастание светорассеяния.

Дифракционная эффективность пропускающей объемной фазовой решетки, считываемой под углом Брэгга ( $\beta$ ), определяется формулой Когельника [12] для заданной температуры

$$\eta(T) = \sin[\pi \delta n(T) d(T) / \lambda \cos \beta(T)], \quad (1)$$

где  $\delta n$  — амплитуда модуляции показателя преломления,  $d$  — толщина решетки.

Можно ожидать, что зависимость  $\eta(T)$  определяется температурными изменениями параметров решетки, входящих в (1).

Как показали измерения, в интервале температур  $0-100^\circ\text{C}$  ДЭ решетки практически не изменяется. Связано это, по всей видимости, со спецификой структуры ГОЭ и его термомеханикой: в результате адгезии полимера к подложке изменение размера полимерного слоя вдоль вектора решетки определяется главным образом температурным расширением (сжатием) стеклянной подложки. При  $T = 200^\circ\text{C}$  и коэффициенте термического линейного расширения стекла  $\alpha_c = 8 \cdot 10^{-6} \text{ grad}^{-1}$  изменение периода решетки составляет примерно 0.07% и ДЭ — 0.02%. В области  $T < 0$   $\alpha_c$  уменьшается и влиянием этого фактора на период решетки тем более можно пренебречь.

Изменение толщины решетки определяется уже коэффициентом линейного термического расширения полимера  $\alpha_p$ , а не подложки. Используемые ФПК представляют собой оригинальные системы типа полимер (чаще сополимер)–растворитель (ХНД). Данные об их температурных коэффициентах расширения в литературе отсутствуют. Приведенные ниже оценки основываются на  $\alpha_p$ , взятых для близких по свойствам полимеров. Так, по данным [13] для сходных с исследуемыми полимеров максимальное значение  $\alpha_p = 5 \cdot 10^{-4} \text{ grad}^{-1}$ . При этом значении  $\alpha_p$  при увеличении  $T$  до  $200^\circ\text{C}$  толщина решетки  $d$  увеличивается на  $\sim 10\%$ .

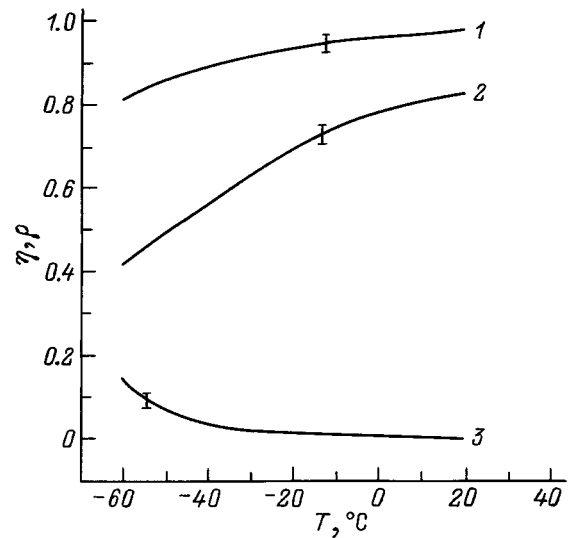


Рис. 2. Температурные зависимости ДЭ (1, 2) и потерь на светорассеяние (3) в решетках на ФПК-488 (1, 3) и ФПК-488М (2).

Наблюдаемое уменьшение ДЭ (вместо роста с толщиной решетки) свидетельствует о том, что ее температурное поведение определяется главным образом зависимостью  $\delta n(T)$ , уменьшение которой превышает рост толщины  $d$ .

Температурная зависимость  $\delta n(T)$ , вычисленная по формуле (1) на основании измеренных значений  $\eta(T)$  с учетом изменения  $d$  при  $\beta = \text{const}$ , показана на рис. 1 (кривая 1).

Рассмотрим, какие свойства регистрирующего материала определяют величину и температурное поведение  $\delta n(T)$ . По определению

$$\delta n = |(n_{\max} - n_{\min})|/2, \quad (2)$$

где  $n_{\max, \min}$  — показатели преломления полимера в фазовых плоскостях, формирующихся в пучностях и узлах интерференционного поля и отличающихся концентрацией ХНД.

Как показывают наши измерения (рис. 3), зависимость показателя преломления полимера от содержания диффузанта ХНД в рассматриваемом диапазоне концентраций ( $c$ ) достаточно хорошо описывается линейной зависимостью вида [14]

$$n = n_0 + c(dn/dc), \quad (3)$$

где  $dn/dc$  — инкремент показателя преломления;  $n_0$  — показатель преломления полимера без нейтральной компоненты.

При подстановке (3) в (2) следует, что

$$\delta n(T) = |dn(T)/dc| c_{1N}(T), \quad (4)$$

где  $c_{1N}$  — амплитуда модуляции концентрации нейтральной компоненты.

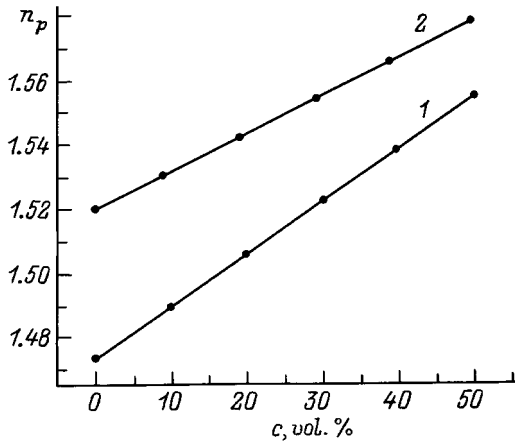


Рис. 3. Изменение показателя преломления ФПК-488 (1) и полимера на его основе (2) при изменении концентрации ХНД.

Известно [14], что модуль инкремента показателя преломления увеличивается пропорционально разности между показателями преломления полимера и растворителя. Величина  $\Delta c$  зависит от термодинамического сродства нейтральной компоненты к полимеру (подробнее остановимся ниже). Таким образом, величина  $\delta n(T)$  определяется термодинамическими свойствами системы полимер–ХНД и разностью их показателей преломления. По данным [13], для различных систем полимер–растворитель инкремент показателя преломления остается постоянным в широком диапазоне температур. Незначительное изменение  $\delta n$  в температурном интервале 20–100°C свидетельствует о малости изменений величины  $|dn(T)/dc|$  для исследуемых ФПК. На этом основании можно предполагать, что характер зависимости  $\delta n(T)$  определяется главным образом температурной зависимостью  $\Delta c(T)$ .

Температурное изменение  $\Delta c = f(T)$  объясняется изменением фазового равновесия в системе полимер–ХНД. Как известно, фазовое равновесие подобной системы описывается диаграммой состояния. Ниже рассмотрены две модели, которые позволяют качественно описать зависимость  $\Delta c = f(T)$  (рис. 4, *a, b*). Рассматриваются кривые фазового равновесия с верхней критической температурой смещения ( $T^*$ ) как наиболее распространенный тип диаграмм для систем, подобных исследуемым [13,15].

Из наших измерений следует, что для ФПК-488 и ФПК-488М  $T^*$  лежит выше температуры разрушения голограммы. До записи регистрирующие композиции представляют собой многокомпонентный однофазный раствор. Полимеризация в градиентном интерференционном поле нарушает равновесное состояние системы и переводит ее в точку А (рис. 4, *a*). Здесь система 1 распадается на две фазы. По достижении равновесия составы фаз соответствуют точкам  $C_1$  и  $C_2$ . Фазовые плоскости решетки в данном случае отличаются различным содержанием указанных фаз.

Диаграммы 2, 3 на рис. 4, *b* учитывают различие в растворимости полимера, формирующегося в пучностях

и узлах интерференционного поля. Последнее может обуславливаться зависимостью степени полимеризации (густоты полимерной сетки) и соответственно растворимости полимера от пространственного распределения интенсивности светового поля [16].

В процессе записи в пучностях поля система становится двухфазной и имеет место микросинерезис (вытеснение) избыточной нейтральной компоненты из полимерной массы. Для полимера, образующегося в узлах поля, концентрация нейтральной компоненты остается равновесной. В результате фазовые плоскости решетки состоят из полимерных фаз с различным равновесным содержанием ХНД ( $C_3$  и  $C_4$  на рис. 4, *b*).

Для системы, описываемой кривой 1, повышение температуры приводит к увеличению термодинамического сродства ХНД к полимеру и соответственно сближению составов фаз (точки  $C'_1$  и  $C'_2$ ). При этом  $\Delta c(T)$  и  $\delta n(T)$  уменьшаются, что приводит к уменьшению ДЭ. Во втором случае (рис. 4, *b*) равновесная концентрация нейтральной компоненты в обеих полимерных фазах возрастает, что сопровождается уменьшением градиента концентрации ХНД и, следовательно, уменьшением  $\delta n$ . В обоих случаях изменение  $\Delta c(T)$  обратимо, что приводит к восстановлению величины дифракционной эффективности при охлаждении решетки.

Выбор конкретной модели для описания процесса голографической записи на рассматриваемых ФПК требует дополнительных исследований термодинамических свойств композитов.

Иная ситуация имеет место при охлаждении решеток ниже 20°C. Монотонное уменьшение ДЭ может быть объяснено температурным уменьшением толщины решетки, так как величина  $c_{1N}$  в соответствии с фазовой диаграммой меняется незначительно. Кроме того, уменьшение ДЭ может быть связано с ростом светорассеяния в решетке (рис. 2, кривая 3). Последнее может обуславливаться кристаллизацией ХНД, температура замерзания которого –6°C. Дальнейшее уменьшение ДЭ при снижении температуры ниже точки замерзания ХНД и наличие гистерезиса, описанного выше, могут быть связаны с изменением диффузионных времен системы из-за высокой вязкости полимерной фазы и особенностями кинетики кристаллизации нейтральной компоненты в полимерной матрице.

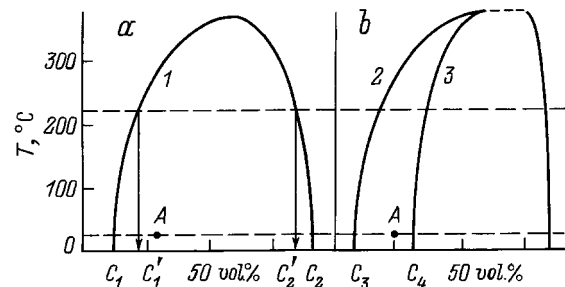


Рис. 4. Фазовые диаграммы состояний системы полимер–химически нейтральный диффузент для двух моделей, описанных в тексте (концентрация  $c$ ).

Таблица 2.

№	ХНД	$n_d$	$n_p - n_d$	$C_{opt}, vol. \%$	$I^*, MW/cm^2$	ДЭ $\lambda = 0.6328, \mu m$
1	Бромнафталин	1.66	-0.14	30	16.0	0.99
2	Хинолин	1.627	-0.107	35	12	0.85
3	Петахлор Дифенил	1.636	-0.116	30	15	0.9
4	Трифторэтанол	1.29	0.23	35	> 200	0.94
5	Ацетонитрил	1.344	0.176	40	> 200	0.04
6	Метанол	1.328	0.192	40	> 200	0.03
7	Гептан	1.387	0.133	12	> 200	0.98
8	Гексан	1.375	0.145	20	> 200	0.98

П р и м е ч а н и е. Порог многоимпульсного разрушения  $I^*$  измерялся с использованием излучения Nd лазера со следующими параметрами:  $\lambda = 1.06 \mu m$ , длительность импульса 10–15 ns, частота следования импульсов 12.5 Hz; ">" означает, что разрушения образца не наблюдалось при непрерывном воздействии в течение 6 h.

## Лучевая прочность голографических решеток на полимерах

Лучевая прочность решеток на ФПК исследовалась при воздействии на них излучением импульсных лазеров на  $Nd^{3+}$ :АИГ ( $\lambda = 1.064, 0.532 \mu m$ ) и красителей ( $\lambda = 0.630 \mu m$ ). Измерялись пропускание и дифракционная эффективность решеток, пороги их  $N$ -импульсного и многоимпульсного разрушений. Порог  $N$ -импульсного разрушения определяется как величина интенсивности ( $I_N$ ), при которой в результате воздействия  $N$  импульсов в заданную точку образца на поверхности и в объеме последнего возникает микроразрушение. Порог многоимпульсного разрушения определялся как интенсивность  $I^*$ , вызывающая разрушение при числе импульсов равном ( $N > 1000$ ).

Характер изменения ДЭ и пропускания  $T_0$  оставался подобным при облучениях лазерными импульсами с различными длиной волны, интенсивностью и частотой следования. Как правило, наблюдается уменьшение ДЭ и пропускания решетки в облучаемой области (последнее измеряется при отстройке от угла Брэгга) вплоть до разрушения решетки. Визуально наблюдается почернение решетки, где в дальнейшем образуется микротверждение, обусловленное испарением полимера. При этом пропускание полимерного слоя без нейтральной компоненты не изменяется вплоть до его разрушения при  $I^* \sim 1 GW/cm^2$ .

Полученные результаты свидетельствуют о том, что порог разрушения ГОЭ на разработанных ФПК в первую очередь определяется фотофизическими и термическими свойствами ХНД в составе полимера. Причем процессы, приводящие к разрушению решетки, имеют накопительный характер. Наблюдается уменьшение интенсивности при приближении частоты лазерного излучения к краю полосы собственного поглощения диффузанта.

Не претендуя на исчерпывающее описание механизма разрушения, можно предположить, что под воздействием интенсивного излучения в полимере развиваются фотохимические процессы, вызываемые многофотонным поглощением. Следствием таких процессов является обра-

зование продуктов фотодиссоциации компоненты (с наиболее низким порогом фотодиссоциации). Существенно важны продукты фотодиссоциации с собственным поглощением на длине волны мощного лазерного излучения, поскольку в этом случае возникает положительная обратная связь в цепи событий поглощение–фотолиз–поглощение–нагрев–термолиз– и т. д. Рост концентрации указанных продуктов приводит к локальному перегреву полимера и его испарению в области взаимодействия с пучком света. По-видимому, в случае бромнафталина (ХНД) имеет место фотодиссоциация брома от основной молекулы нафталина с последующей возможностью прямого поглощения излучения в видимой области спектра молекулярным бромом. Дальнейший ход процесса идет с постоянным автоускорением и поэтому носит накопительный характер. Образование сажи и испарения полимера как конечный этап разрушения происходит в результате термолиза при быстром локальном разогреве полимера в областях облучения.

С целью повышения лучевой прочности ГОЭ на основе разработанных фотополимеров проведены исследования по замене ХНД, входящего в состав базового компонента ФПК-488. Перечень исследуемых диффузантов и некоторые характеристики новых ФПК-488Н приведены в табл. 2.

Предварительный выбор соединений в качестве ХНД проводился по следующим соображениям. Исследовались ароматические 1–3 и алифатические 4–8 вещества. Так как ароматические соединения легче поддаются термолизу, чем алифатические [17,18], их использование в качестве диффузанта в фотополимерной регистрирующей среде приводит к снижению лучевой прочности ГОЭ. Для обеспечения высокоэффективной записи выбирались соединения, для которых модуль разности между показателями преломления полимеробразующей части ( $n_p$ ) и ХНД ( $n_d$ ) был не ниже 0.1.

Кроме того, рассматривались вещества с различной растворяющей способностью по отношению к полимеру, что позволило установить взаимосвязь между голографическими параметрами и термодинамическими свойствами ФПК. Параметры Хаггенса, характеризующие тер-

модинамическое сродство ХНД к полимеру, не определялось. Однако качественно оценить изменение сродства в ряду добавок возможно по величине оптимальной концентрации ( $c_{opt}$ ) ХНД, обеспечивающей максимальную эффективность записи. Ее уменьшение свидетельствует об уменьшении равновесной концентрации нейтральной компоненты в полимере и соответственно об уменьшении термодинамического сродства в системе. Как следует из табл. 2, группы соединений 1–4, 5, 6 и 7, 8 близки по величине сродства к полимеру, причем сродство уменьшается в ряду (5, 6)–(1–4)–(7, 8).

Диффузаны 2 и 3 обеспечивают высокоэффективную запись примерно при тех же оптимальных концентрациях, что и бромнафталин в базовом ФПК-488. Пороги многоимпульсного разрушения для них лежат в пределах 12–16 MW/cm<sup>2</sup> и примерно совпадают с его значением для базового ФПК-488. В обоих случаях разрушение решетки сопровождалось образованием поглощающих продуктов, что согласуется с результатами [17]. Напротив, ХНД 4–8 существенно повышали лучевую прочность решеток, однако ФПК на их основе различались по эффективности записи. Так, максимальная ДЭ для добавок 5, 6 не превышала 30–40%. ХНД 4 обеспечивал ДЭ до 96%, однако заметно снижал светочувствительность ФПК. Последнее являлось результатом химического взаимодействия указанного диффузанта с инициатором.

Наилучшие результаты по величине ДЭ и лучевой прочности одновременно были получены при использовании в качестве ХНД нормальных парафинов 7, 8. Помимо увеличения лучевой прочности переход к нормальным парафинам позволил повысить светочувствительность материала в 1.5–2 раза, что явилось результатом увеличения скорости полимеризации композиции при уменьшении концентрации ХНД. Последнее позволяет сделать вывод, что для материалов типа ФПК-488 снижение термодинамического сродства нейтральной компоненты приводит к улучшению такого параметра материала, как его светочувствительность.

## Заключение

Основываясь на полученных результатах, можно сделать следующие выводы.

1. Температурные изменения ДЭ решеток на фотополимерных материалах типа ФПК-488 характеризуются наличием двух температурных диапазонов. В границах  $+100 > T > -10^{\circ}\text{C}$  эффективность решеток практически не меняется. На участках  $T < -10^{\circ}\text{C}$  и  $T > 100^{\circ}\text{C}$  вплоть до разрушения решетки уменьшение ДЭ носит обратимый характер. Изменение ДЭ с температурой в последнем случае определяется температурным изменением условий фазового равновесия системы полимер–диффузанта.

2. Лучевая прочность решеток на полимерах ФПК-488 определяется свойствами химически нейтрального диффузанта. Выбор оптимального диффузанта из класса алифатических соединений позволил повысить пороги

лазерного разрушения решеток  $\approx 200 \text{ MW/cm}^2$ , что дает возможность использовать решетки на основе ФПК-488Н для управления излучением лазеров высокой мощности.

3. Выбор компонент ФПК с оптимальным сочетанием физических и термодинамических параметров позволяет минимизировать концентрацию диффузанта в среде без уменьшения эффективности записи и тем самым повысить светочувствительность данных материалов.

4. Запись голографических решеток может использоваться как метод определения относительного изменения сродства растворителей к полимеру по изменению оптимальной концентрации растворителя, обеспечивающей достижение максимальной для данной пары эффективности записи.

## Список литературы

- [1] *Caulfield H.J.* Handbook of Optical Holography. New York, 1979. 375 p.
- [2] *Tomlinson W.J., Chandross E.A.* // Advances in Photochemistry. 1980. Vol. 12. P. 202–281.
- [3] *Барачевский В.А.* // ЖНиПФ. 1993. Т. 38. № 1. С. 75–86.
- [4] *Smirnova T.N., Tikhonov E.A., Gulnazarov E.S.* // Proc. SPIE. 1988. Vol. 1017. P. 190–192.
- [5] *Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гюльнazarов Э.С.* // Квантовая электрон. 1991. Т. 40. С. 1–40.
- [6] *Weber A.M., Smothers W.K., Truot T.J., Mickish D.J.* // Proc. SPIE. 1990. Vol. 1212. P. 30–39.
- [7] *Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А., Гюльнazarов Э.С.* // Тез. VI Конф. по голографии. Витебск, 1990. С. 20.
- [8] *Сахно О.В., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А.* // ЖТФ. 1993. Т. 63. Вып. 12. С. 70–78.
- [9] *Смирнова Т.Н., Сарбаев Т.А., Тихонов Е.А.* // Квантовая электрон. 1994. Т. 21. № 1. С. 373–374.
- [10] *Гюльнazarов Э.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А.* // Опт. и спектр. 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 175–179.
- [11] *Гюльнazarов Э.С., Обуховский В.В., Смирнова Т.Н.* // Опт. и спектр. 1990. Т. 69. Вып. 1. С. 178–182.
- [12] *Кольер Р., Берхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М., 1973. 686 с.
- [13] *Нестеров А.Е.* Справочник по физической химии полимеров. Свойства растворов и смесей полимеров. Киев, 1984. 374 с.
- [14] *Иоффе Б.В.* Рефрактометрические методы химии. Л., 1974. 400 с.
- [15] *Нестеров А.Е., Липатов Ю.С.* Фазовые состояния растворов и смесей полимеров. Киев, 1987. 168 с.
- [16] *Jenney J.A.* // J. Opt. Soc. Amer. 1970. Vol. 6. N 9. P. 1155–1161.
- [17] *Буженин А.В., Коган Б.Я.* // Квантовая электрон. 1976. Т. 3. № 5. С. 1136–1137.
- [18] *Магарил Р.З.* Механизмы и кинетика гомогенных термических превращений углеводов. М., 1970. 175 с.