

07;12
©1993 г.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ЗАПИСИ ПРИ ПРЕДЕЛЬНО ДОСТИЖИМЫХ ТОЛЩИНАХ РЕГИСТРИРУЮЩЕГО ФОТОПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА

О.В.Сазно, Т.Н.Смирнова, Е.А.Тихонов

Изучены оптические параметры голографических решеток пропускающего типа на полимеризуемом композите с различной толщиной слоя. Показано, что основной причиной ограничения толщины слоя и соответственно селективности и эффективности решетки при записи в реальном времени является динамическое усиление шумов. Наибольшие селективность и эффективность решеток при минимуме шумов достигаются при совместном использовании предполимеризации регистрирующих слоев и постполимеризационного самоусиления голограмм. Сочетание указанных приемов позволяет изготавливать решетки с толщиной до 1 мм и угловой селективностью не хуже 6 угл.мин. Предельная толщина регистрирующего слоя при мини-мизации шумов ограничивается соизмеримостью по величине глубины модуляции показателя преломления решетки с пространственными флуктуациями показателя преломления полимера.

Введение

Разработка нового фотополимерного регистрирующего материала для голографической записи в реальном времени, возможные режимы записи и оптические параметры некоторых ГОЭ на его основе представлены в обзоре [1]. При этом за рамками рассмотрения остался вопрос о предельно достижимой и целесообразной для практического применения толщине регистрирующего материала. Указанный вопрос важен потому, что толщина голограммы является одним из основных параметров, определяющих ее селективные свойства. Для элементарных голограмм-решеток, записанных плоскими волнами, угловая селективность $\Delta\theta$ в соответствии с теорией Когельника [2] пропорциональна периоду Λ и обратно пропорциональна толщине T решетки.

В общем случае селективность решеток зависит как от условий записи (расходимости и спектральной ширины пучков), так и от свойств регистрирующего материала. Причем фотофизические свойства и особенности технологии изготовления последнего могут ограничивать предельно достижимую селективность решеток.

Влияние параметров записывающих пучков на селективные свойства решеток в данном случае не рассматривалось. В наших экспериментах

для записи использовались пучки монохроматического излучения с плоскими фронтами (расходимость не более $1'$, $\Delta\lambda/\lambda < 10^{-6}$). В работе изучались возможность повышения селективности решеток на фотополимерном материале за счет увеличения его толщины и физические причины, ограничивающие эффективность этого приема.

Разработанная технология изготовления регистрирующих слоев на основе фотополимерных композитов не накладывает ограничений на толщину, поэтому основными факторами, ограничивающими толщину и селективность решеток, могут являться: 1) снижение глубины модуляции показателя преломления по толщине слоя в результате поглощения энергии записывающих пучков инициатором [3,4]; 2) усиление шумовых голограмм за счет динамической перекачки энергии [5].

Влияние динамических эффектов на формирование голограмм является характерной особенностью сред с откликом в реальном времени. Предложенные нами в [5] способы подавления шумовых голограмм в силу нелинейного их усиления с ростом толщины слоя могут оказаться эффективными лишь до некоторых значений толщины. Поэтому изучалась также возможность усовершенствования указанных способов для увеличения толщины и эффективности решеток.

Методика эксперимента

Исследования проводились для регистрирующих слоев на основе фотополимеризуемого композита ФПК-488 [6]. Характеристики материала следующие: светочувствительность в спектральном диапазоне 300–500 нм 250 мДж/см^2 при интенсивности записывающих пучков $I \approx 0.5 \text{ Вт/см}^2$; разрешающая способность до 6000 мм^{-1} ; область прозрачности материала 0.45–2.2 мкм; стабильность голограмм, закрытых от доступа атмосферы, не менее 7 лет.

Запись голографических решеток осуществлялась в схеме интерференции попутных пучков Аг лазера ($\lambda_3 = 488 \text{ нм}$) с вектором E , перпендикулярным плоскости падения (s -волны). Считывание проводилось пучком He-Ne лазера ($\lambda_c = 632.8 \text{ нм}$, s -волна). Мощности падающего P_0 , дифрагирующего P_d и прошедшего $P_{пр}$ пучков измерялись с помощью фотодиодов ФД-24К и самописцев Н3012 (либо цифровых вольтметров В7-16А). Относительная погрешность измерения $P_{0,д,пр} \approx 3\%$, определения дифракционной эффективности (ДЭ) не более 5%.

Изучались кинетика голографической записи, т.е. зависимость ДЭ от времени экспозиции $\eta(t)$, угловая селективность $\eta(\theta)$ (θ — угол падения считывающего пучка) для решеток с различной толщиной T . Предполимеризация регистрирующих слоев некогерентным излучением, улучшающая отношение сигнал/шум для записываемых решеток, в данном случае не проводилась. Последнее связано со сложностью обеспечения одинаковых начальных условий по исходной глубине превращения композита для слоев различной толщины.

Толщина слоя задавалась калиброванными прокладками и контролировалась с помощью микроскопа. Измерение T в различных точках слоя и для разных слоев показало, что для используемых тефлоновых прокладок среднеквадратичное отклонение от заданной толщины составляет 2 мкм в диапазоне $10 \leq T \leq 100 \text{ мкм}$ и 5 мкм в диапазоне $100 \leq T \leq 500 \text{ мкм}$.

Для измерения $\eta(\theta)$ использовались поворотные столики с точностью отсчета угла поворота 0.05° и $0.5'$ и одноимовый считывающий лазер с расходимостью не хуже $2'$. Среднеквадратичная ошибка в определении полуширины кривой угловой селективности не превышала соответственно 0.07° и $1'$.

Результаты и их обсуждение

Измеренные зависимости $\eta(t) = P_d(t)/P_0(t)$ представлены на рис. 1. Видно, что кинетика формирования решетки имеет сходный характер для слоев различной толщины: начальный рост $\eta(t)$ сменяется спадом до некоторого стационарного значения $\eta_{ст}$. Причем величины η_{max} и $\eta_{ст}$ уменьшаются с увеличением T . Увеличение толщины решетки сопровождается увеличением потерь на светорассеяние в ней.

Пространственная картина рассеяния считывющего пучка включает когерентную и диффузную составляющие [5,7,8]. Первая возникает в результате брэгговского считывания основной и шумовых решеток, а также за счет многоволновой дифракции на тонких решетках, вторая — за счет некогерентного рассеяния прошедшего и дифрагировавших пучков на фазовых неоднородностях среды, сформировавшихся в слое при записи шумовых голограмм.

Наблюдаемое (рис. 1.) уменьшение $\eta(T)$ в данном случае может определяться двумя факторами: уменьшение силы основной решетки и увеличением эффективности шумовых решеток.

Вклад указанных факторов можно оценить, измеряя зависимости $P_{пр}(t)$ и $P_d(t)$. Указанные зависимости для решетки с $T = 80$ мкм приведены на рис. 2. Здесь же показаны рассчитанные кривые относительных потерь на светорассеяние $R^*(t) = P_p/P_0 = (1 - P_\phi/P_0)^2 - P_{пр}/P_0 - P_d/P_0$ ($P_{\phi,p}$ — мощности отраженного и рассеянного света) и $\eta^0(t) = P_d/(P_d + P_{пр})$.

Для относительно невысоких уровней потерь и угле между прошедшим и дифрагировавшим пучками $> 10^\circ$ кинетика $\eta^0(t)$ отражает изменение параметров решетки, а именно величины $n_1 T$ (n_1 — амплитуда модуляции показателя преломления основной решетки). На начальном

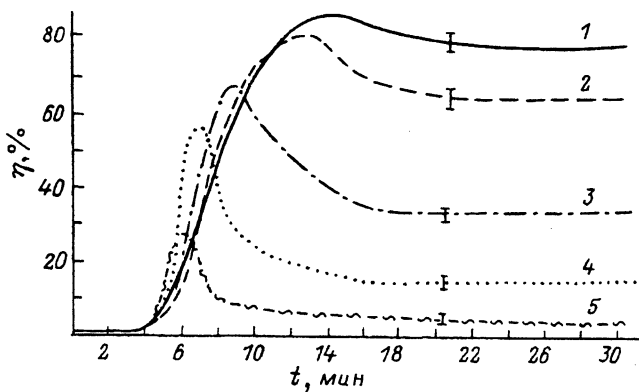


Рис. 1. Кинетика голографической записи решеток с $N = 1500 \text{ мм}^{-1}$ и толщиной 20 (1), 40 (2), 80 (3), 120 (4) и 240 мкм (5).

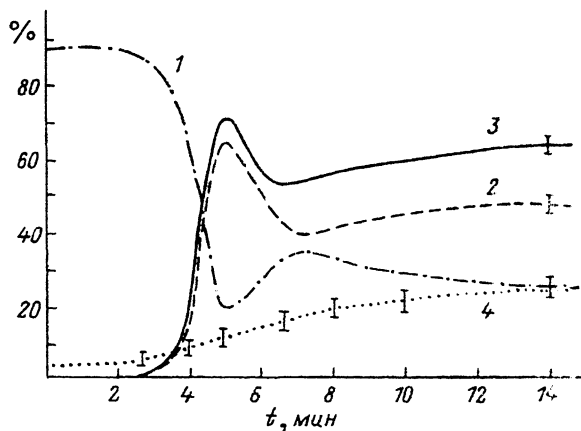


Рис. 2. Зависимости относительной мощности пучка в нулевом порядке дифракции (1), η (2), η^0 (3) и относительных потерь на светорассеяние (4) от времени экспонирования ($I \approx 3 \text{ мВт/см}^2$, $N = 1500 \text{ мм}^{-1}$, $T \approx 80 \text{ мкм}$).

этапе записи кривые $\eta^0(t)$ и $\eta(t)$ практически совпадают, в дальнейшем расхождение между ними возрастает в результате роста рассеяния дифрагирующего пучка на шумовой структуре. Следует отметить, что с увеличением T возрастает вклад диффузно рассеянной компоненты прошедшего пучка в направлении дифрагирующего, что увеличивает ошибку в определении η_0 .

В соответствии с [2] ДЭ для фазовых решеток

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi n_1 T}{\lambda_c \cos \theta_B} \right) \quad (1)$$

имеет осциллирующий характер с $\eta_{\max} = 1$ при силе решетки $\nu = (2n + 1)(\pi/2)$ и $\eta_{\min} = 0$ при $\nu = (n + 1)\pi$ (θ_B — угол Брэгга). Из (1) для решетки с $T = 20 \text{ мкм}$ и $\eta_{\text{ст}}^0 \approx 92\%$ $n_1 \approx 0.012$. Увеличение T решетки при сохранении n_1 должно приводить к перемодуляции решетки. Например, для $T = 60 \text{ мкм}$ $\pi < \nu \leq (3/2)\pi$, $T = 120 \text{ мкм}$ $2\pi < \nu < (5/2)\pi$. В первом случае зависимость $\eta(\nu)$ должна пройти через максимум, уменьшиться до 0 и вновь возрасти до уровня $\eta_{\text{ст}} \approx 33\%$. Во втором число осцилляций увеличивается до двух. Однако измеренные зависимости $\eta^0(t)$ указывают на то, что $\nu < \pi/2$ для всех исследуемых толщин. Незначительные колебания величины $\eta^0(t)$ не связаны с перемодуляцией решетки и могут обуславливаться особенностями полимеризации и взаимодиффузии ингредиентов в процессе записи [9].

Таким образом, увеличение толщины слоя ФПК сопровождается усилением шумовых голограмм и уменьшением ν записываемой решетки. Как известно [10], запись дополнительной фазовой структуры на регистрирующем материале с определенным диапазоном модуляции показателя преломления n приводит к уменьшению глубины модуляции n_i всех составляющих. Следовательно, уменьшение n_1 является результатом записи и динамического усиления шумовых голограмм. Справедливость последнего подтверждается синхронностью уменьшения $\eta_{\text{ст}}^0(T)$ и роста потерь на светорассеяние $R_{\text{ст}}^*(T)$ на рис. 3. Здесь $R_{\text{ст}}^* = (1 - P_\Phi/P_0)^2 - P_{\text{пр}}/P_0$ — потери в решетке, измеренные при $\theta \neq \theta_B$. Насыщение $R_{\text{ст}}^*$ и стабилизация $\eta_{\text{ст}}^0$, по-видимому, можно объяснить потерей когерентности

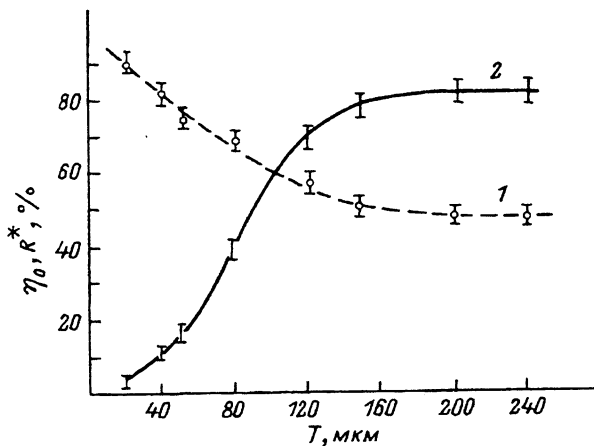


Рис. 3. Зависимости $\eta_{ст}^0$ (1) и $R_{ст}$ (2) от толщины регистрирующего слоя.

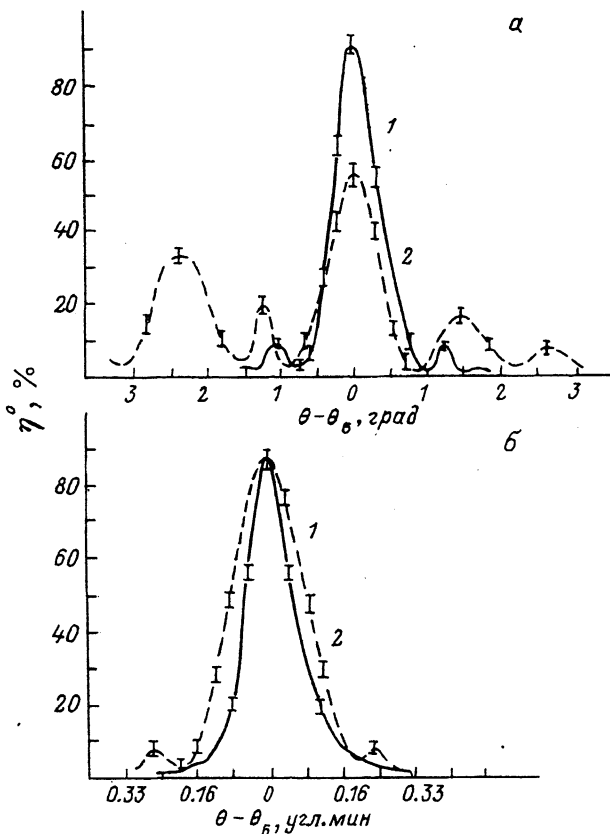


Рис. 4.

a — кривые угловой селективности решеток с $N = 1500 \text{ мм}^{-1}$ и $T \approx 50 \text{ мкм}$, записанных с предполимеризацией (1) и без нее (2);

б — кривые угловой селективности решеток с $N = 1500 \text{ мм}^{-1}$, $T \approx 360 \text{ мкм}$ (1), записанной в непрерывном режиме с предполимеризацией слоя, и $T \approx 500 \text{ мкм}$ (2), записанной в режиме ПСУ.

Таблица 1.

Порядковый номер	T , мкм	η^0 , %	$\Delta\theta$, град	$\Delta\lambda$, нм	$n_1 \cdot 10^3$
1	20 ± 2	97 ± 5	1.8 ± 0.07	85 ± 4	15 ± 1
2	50 ± 2	97 ± 5	0.7 ± 0.07	33 ± 2	6 ± 0.4
3	120 ± 2	98 ± 5	0.5 ± 0.07	13 ± 1	1.7 ± 0.2
4	240 ± 5	95 ± 5	0.4 ± 0.07	6.5 ± 0.5	0.75 ± 0.07
5	360 ± 5	90 ± 5	0.2 ± 0.02	4.5 ± 0.18	0.50 ± 0.05
6	450 ± 5	87 ± 4	0.15 ± 0.02	4 ± 0.16	0.30 ± 0.03
7	500 ± 7	53 ± 3	0.12 ± 0.02	3.3 ± 0.11	0.14 ± 0.015

записывающих пучков в результате многократного рассеяния, что приводит к отсутствию записи в глубоких слоях среды. При этом толщина голограммы $T_{эф} = \text{const} < T_0$ становится меньшей толщины регистрирующего слоя.

Угловой спектр решеток с высоким уровнем шумов искажается за счет наложения углового спектра шумовой голограммы (рис. 4,а).

Представленные результаты показывают, что при записи в реальном времени на слоях ФПК усиление шумов существенно ограничивает предельно достижимую толщину изготавливаемых решеток.

Уменьшение потерь на светорассеяние в толстых ГОЭ

Различные способы уменьшения потерь на светорассеяние в ГОЭ на основе ФПК рассматривались в [5] на примере решеток с $T \leq 50$ мкм. В данной работе исследована возможность применения предложенных методов и их усовершенствования для голограмм с $T > 100$ мкм. Исследовались два основных способа: 1) предполимеризация регистрирующего слоя [5,11]; 2) постполимеризационное самоусиление (ПСУ) голограмм [5,12].

Уменьшение потерь на светорассеяние при предполимеризации слоя некогерентным излучением обуславливается следующим. Предполимеризация исключает из процесса записи стадию гелеобразования, которая сопровождается усилением рэлеевского светорассеяния в слое и соответственно мощности и контраста шумового интерференционного поля [5]. Кроме того, как видно из рис. 2, скорости записи основной и шумовой голограмм существенно различны. Причем увеличение исходной глубины превращения полимера в слое приводит к увеличению указанного различия.

Выбор оптимального времени предполимеризации позволил записать решетки с T до 400 мкм, $\eta_{ст}^0 \approx 96\%$ и $R_{ст}^* \approx 2\%$ (табл. 1).

Для обеспечения одинаковой глубины превращения полимера по толщине слоя предполимеризация осуществлялась областью спектра > 400 нм лампы накаливания, соответствующей полосе поглощения инициатора (300–520 нм) (мощность лампы 100 Вт, расстояние до слоя 20 см). В слое с $T \leq 100$ мкм и коэффициентом поглощения $k_{\max} \approx 7 \text{ см}^{-1}$ мощность полимеризующего излучения по глубине слоя остается практически постоянной. С увеличением $T \leq 1$ мм для получения однородной

предполимеризации необходимо облучать слой одновременно с двух сторон.

На рис. 4,б приведена кривая угловой селективности решетки с $T = 360$ мкм. В табл. 1 указаны измеренные значения $\Delta\theta$ и вычисленные по формуле $\Delta\lambda = (\Lambda/T)\lambda_c \text{ctg } \theta_B$ значения полуширин кривых спектральной селективности для разных T .

Для $T \leq 150$ мкм измеренная величина $\Delta\theta$ уменьшается с ростом T в соответствии с зависимостью $\sim \Lambda/T$. При дальнейшем увеличении T измеренная величина $\Delta\theta$ уменьшается медленнее, чем рассчитанная. Причиной несовпадения характера измеренной зависимости $\Delta\theta(T)$ с предсказанной теоретически могут быть уменьшение η решеток с $T > 300$ мкм (использованная для вычисления $\Delta\theta$ формула справедлива при $\eta \approx 1$) и увеличение $\Delta\theta$ из-за неоднородности n по глубине слоя.

Уменьшение η с увеличением T является результатом уменьшения диапазона модуляции n с ростом степени превращения ФПК в полимер при предполимеризации регистрирующего слоя. Таким образом, предполимеризация слоя как способ уменьшения уровня потерь на светорассеяние без уменьшения ДЭ решетки применима в ограниченном интервале толщин.

Другим недостатком этого способа является уменьшение светочувствительности слоя в результате расходования инициатора в процессе фотопредполимеризации. Указанный недостаток можно устранить введением в состав композита термоинициатора, позволяющего осуществлять предполимеризацию слоя, выдерживая его при определенной температуре в течение заданного времени. Нами использовался коммерческий инициатор 2,2¹-азо-бис-изобутиронитрил в концентрации 1 вес.%. Выбор оптимальных условий термической предполимеризации позволил изготовить решетки, параметры которых практически совпадали с приведенными в табл. 1. Время голографической записи при этом для решеток с $T > 200$ мкм уменьшалась в 1,5–2 раза.

Осуществление термической предполимеризации, однако, не приводит к увеличению предельно достижимых толщин решеток. Дело в том, что при термо- и фотополимеризации образование полимерных молекул идет с использованием одних и тех же двойных связей. В результате в обоих случаях с ростом исходной степени превращения полимера уменьшается предельно достижимая величина n_1 .

Второй способ подавления шумов и соответственно увеличения толщины регистрирующего слоя основан на обнаруженном нами явлении ПСУ голограмм [12]. Эффект ПСУ состоит в многократном возрастании η голограммы с низкой исходной η_0 в результате темнового протекания процессов полимеризации и взаимодиффузии ингредиентов. Указанное свойство материала сближает его с регистрирующими средами, у которых при экспонировании формируется слабое скрытое изображение, усиливаемое при последующем проявлении. В подобных средах динамическое усиление шумов отсутствует, отношение сигнал/шум заметно возрастает.

Величина η_{\max} , достигаемая в процессе ПСУ, определяется величиной η_0 и исходной глубиной превращения полимера [12]. Выбор оптимального времени предполимеризации позволяет достигать требуемой величины η_{\max} при минимальной для данной пространственной частоты N величине η_0 и соответственно времени записи. Это позволяет уменьшить уровень шумов и время предполимеризации, требуемое для их подавления.

Таблица 2.

Номер решеток	Режим записи	Время предполиме- ризации, мин	η^0 , %	$n_1 \cdot 10^4$	$R_{с.т.}$ %
1	Непрерывная запись	3.5	55 ± 4	4 ± 0.15	22 ± 2
2		4.5	53 ± 4	3.9 ± 0.15	12 ± 1
3		6.5	43 ± 4	3.4 ± 0.15	2 ± 0.5
4	ПСУ	2.5	51 ± 4	19 ± 1.5	12 ± 1
5		3.5	76 ± 4	9.9 ± 0.3	7 ± 1
6		4	90 ± 5	5.8 ± 0.2	3 ± 0.5
7		4.5	48 ± 4	3.7 ± 0.15	2 ± 0.5

Соответственно возрастает предельно достижимая величина n_1 . Справедливость сказанного подтверждается результатами, приведенными в табл. 2. Измерения выполнены для решеток с $N = 1500 \text{ мм}^{-1}$. Запись велась пучками с $I \approx 3 \text{ мВт/см}^2$. В режиме ПСУ $\eta_0 \approx 10\%$.

Кинетика самоусиления и анализ кривых угловой селективности указывают, что для решеток $4,5 \nu \approx 1.26$ и 0.84 соответственно, а для решеток 6 и 7 $\nu < \pi/2$. Хотя достигнутые значения n_1 на порядок меньше, чем в решетках с $T \leq 50 \text{ мкм}$, ПСУ в данном случае приводит к перемодуляции.

Кривая угловой селективности решетки *b* приведена на рис. 4, *b*. Ее полуширина $\Delta\theta = 0.11 \pm 0.02$ практически совпадает с приведенной в табл. 1 для решетки той же толщины, полученной при непрерывной записи.

Увеличение глубины модуляции n_1 позволяет изготавливать решетки с $\eta \approx 1$ для $\lambda \gtrsim 1 \text{ мкм}$. Возможно также увеличить предельную толщину решетки, не уменьшая ее ДЭ и не ухудшая оптического качества. Однако, как показали наши измерения, увеличение $T \gtrsim 500 \text{ мкм}$ практически не изменяет угловую селективность решетки.

Таким образом, для изготовления решеток на основе ФПҚ с $T > > 100 \text{ мкм}$ режим ПСУ является более перспективным, чем предполимеризация слоя. Ограничением способа является требование на увеличение η_0 с ростом N для получения $\eta_{\text{max}} = 1$. Причины этого в настоящее время недостаточно ясны, в силу чего эффект ПСУ требует дальнейшего изучения.

Дифракционные светофильтры на основе голографических решеток пропускающего типа

Голографические решетки пропускающего типа могут использоваться в качестве светофильтров. Недостатком подобного фильтра является наличие кривой $\eta(\theta)$ боковых лепестков, ДЭ в которых достигает 10%. Задачу подавления боковых лепестков можно решить путем использования двойной брэгговской дифракции на двух решетках, расположенных таким образом, чтобы дифрагировавший на первой решетке пучок падал на вторую под углом Брэгга (рис. 5). Расстояние между решетками должно превышать область перекрытия прошедшего и дифрагировавшего на первой решетке пучков. Это позволяет исключить интерференционные эффекты, определяющие вид $\eta(\theta)$ для многослойных структур. Угловая селективность такого фильтра определяется произведением $\eta(\theta)$

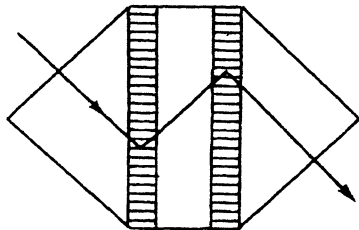


Рис. 5. Составной дифракционный светофильтр.

обеих решеток, что приводит к уменьшению $\Delta\theta$ фильтра и практически полному подавлению боковых лепестков на кривой угловой селективности фильтра. На основе решеток с $N = 2080 \text{ мм}^{-1}$, $T = 110 \text{ мкм}$, $\Delta\theta \approx 0.3^\circ$, $\Delta\lambda \approx 0.55 \text{ нм}$ и $\eta = 94\%$ был изготовлен сложный фильтр со следующими параметрами: $\eta_{\text{max}} \approx 80\%$, $\Delta\theta \approx 0.2^\circ$, $\Delta\lambda \approx 0.45 \text{ нм}$, ДЭ в боковых лепестках $\leq 1\%$.

Заключение

На основе полученных в работе результатов можно сделать следующие выводы.

Основной причиной ограничения толщины и глубины модуляции показателя преломления решеток на ФПК является динамическое усиление шумовых голограмм, сопровождающее процесс голографической записи в средах с откликом в реальном масштабе времени. Для исследованного ФПК при $T \approx 300 \text{ мкм}$ глубины модуляции показателя преломления основной и шумовых решеток становятся соизмеримыми, что приводит к преобладанию некогерентного рассеяния восстанавливающей волны.

Из рассмотренных способов снижения шумов — предполимеризации регистрирующего слоя и режима ПСУ голограмм более результативным является последний, так как при его использовании сокращается время записи, в процессе которой происходит усиление шумовых структур.

При подавлении шумов предполимеризацией для $T > 300 \text{ мкм}$ наблюдается уменьшение n_1 за счет сужения динамического диапазона отклика среды, определяемого исходной и конечной глубиной превращения полимера в слое.

Наибольшие диапазон модуляции n и толщину решетки при минимальном уровне шумов удалось получить, сочетая режим ПСУ с предполимеризацией слоя. Использование указанных подходов позволяет изготавливать решетки с толщиной до 1 мм , ДЭ $\approx 90\%$ и угловой (спектральной) селективностью не более 6 угл. мин (3.3 нм).

Поскольку оба способа подавления шумов сопровождаются уменьшением n_1 решеток, то предел их применимости определяется соизмеримостью n_1 с пространственными флуктуациями показателя преломления полимера, обусловленными флуктуациями плотности в нем. Так как флуктуации n в полимерах составляют величину $\sim 10^{-4}$, то указанный предел достигается при $T \approx 1 \text{ мм}$.

Практическим итогом проведенных исследований является разработка технологии изготовления голографических решеток на ФПК с $T > > 100 \text{ мкм}$, сохраняющей преимущества записи в реальном времени и обеспечивающей приемлемое отношение сигнал/шум.

Показана возможность использования полученных решеток в качестве светофильтров, превосходящих по спектральной селективности коммерческие интерференционные фильтры.

Список литературы

- [1] *Тихонов Е.А., Гюльназаров Э.С., Смирнова Т.Н.* // Квантовая электроника. Киев: Наукова думка, 1991. № 40. С. 1-25.
- [2] *Kogelnik H.* // Bell Syst. Tech. J. 1969. Vol. 48. N 9. P. 2909-2947.
- [3] *Якимович А.П.* // Опт. и спектр. 1982. Т. 53. Вып. 6. С. 1066-1069.
- [4] *Booth V.L.* // Appl. Opt. 1975. Vol. 14. N 3. P. 593-601.
- [5] *Гюльназаров Э.С., Смирнова Т.Н., Суворовцев Д.В., Тихонов Е.А.* // ЖПС. 1981. Т. 51. № 1. С. 111-117.
- [6] *Тихонов Е.А., Смирнова Т.Н., Гюльназаров Э.С., Бойко Ю.Б.* Высокоэффективные среды для записи голограмм / Под ред. Г.А.Соболева. Л.: Наука, 1988. С. 137-144.
- [7] *Magnusson R., Gaylord T.K.* // Appl. Opt. 1974. Vol. 13. N 7. P. 1545-1548.
- [8] *Ragnarsson S.J.* // Appl. Opt. 1978. Vol. 17. N 1. P. 116-127.
- [9] *Гюльназаров Э.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А.* // Опт. и спектр. 1989. Т. 67. Вып. 1. С. 175-179.
- [10] *Гейлорд Т.* Оптическая голография / Под ред. Г.Колфилда. М.: Мир, 1982. Т. 2. С. 414-451.
- [11] *Гвоздовский В.Т., Козенков В.М., Барачевский В.А., Передерева С.И.* Новые регистрирующие среды для голографии. Л.: Наука, 1983. С. 101-109.
- [12] *Гюльназаров Э.С., Смирнова Т.Н., Тихонов Е.А.* // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 1. С. 111-117.
- [13] *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.

Институт физики
Киев

Поступило в Редакцию
8 апреля 1992 г.
В окончательной редакции
15 марта 1993 г.