

С учетом (1.6), (1.7) и (1.8) выражение (1.4) приводится к требуемому виду

$$E_{FR}(\theta) = \pi\delta(k\theta) + \frac{\tilde{Y}(\theta d - c)}{jk\theta} + \frac{e^{-jk\theta c} e^{\frac{jk\theta^2 d}{2}}}{jk\theta} \tilde{Y}(c). \quad (1.9)$$

В заключение авторы приносят свою благодарность В. П. Юношеву и С. П. Юношеву за помощь в автоматизации экспериментального стенда, В. В. Вертопрахову, М. А. Гофману и Е. С. Нежевенко за полезные обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении.— Л.: Машиностроение, 1978.
2. Богомолов Е. Н., Вертопрахов В. В., Чугуй Ю. В., Юношев В. П. Быстродействующее оптическое контрольно-измерительное устройство // Измер. техника.— 1985.— № 11.
3. Kochsiek M., Kunzmann H., Tantau J. Anwendung Beugungsoptischer Methoden zur Messung der Durchmesser von Kleinen Wellen // PTB-Mitt.— 1977.— Bd 87, N 4.— S. 279.
4. Schmidt S. Ein Beitrag zur Erklärung der Lichtbeugung am Metallischen Kreiszyliner // PTB-Mitt.— 1976.— Bd 86, N 4.— S. 239.
5. Хенл Х., Мауэр М., Вестпфаль К. Теория дифракции.— М.: Мир, 1964.
6. Коронкевич В. П., Кривенков Б. Е., Михляев С. В., Чугуй Ю. В. Оптико-геометрический метод расчета дифракции Фраунгофера на объемных телах // Автометрия.— 1980.— № 2.
7. Захарьев Л. Н., Деманский А. А. Рассеяние волн «черными» телами.— М.: Сов. радио, 1972.
8. Папулис А. Теория системы и преобразований в оптике.— М.: Мир, 1974.
9. Справочник по специальным функциям/Под ред. М. Абрамова, И. Стишна.— М.: Наука, 1979.

Поступила в редакцию 8 сентября 1986 г.

УДК 778.38

Д. И. МИРОВИЦКИЙ, Н. В. РОСТОВЦЕВА, О. Б. СЕРОВ

(Москва)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ЗАПИСИ ТОНКИХ ФАЗОВЫХ ГОЛОГРАММ

Большое достоинство тонких голограмм состоит в относительной простоте их изготовления и эксплуатации. В то же время им свойственна невысокая дифракционная эффективность (ДЭ) [1, 2], что ограничивает область их применения. Возможности, предоставляемые голограммой, записанной на двух тонких пространственно разделенных светочувствительных слоях, впервые были теоретически и экспериментально исследованы в работах [3—5]. Показано, что с помощью двухслойных голограмм можно значительно повысить ДЭ. Кроме того, в отличие от тонких однослойных голограмм они обладают высокой спектрально-угловой селективностью. Для фазовой двухслойной голограммы плоских волн экспериментально получено значение ДЭ, равное 50%, что намного превышает теоретический предел ДЭ тонкой однослойной фазовой голограммы. Таким образом, переход от однослойной к двухслойной голограмме целесообразен и практически оправдан. В связи с этим представляет интерес изучение свойств неоднородных голограмм [6, 7], в том числе периодических структур, состоящих из трех и более тонких светочувствительных слоев.

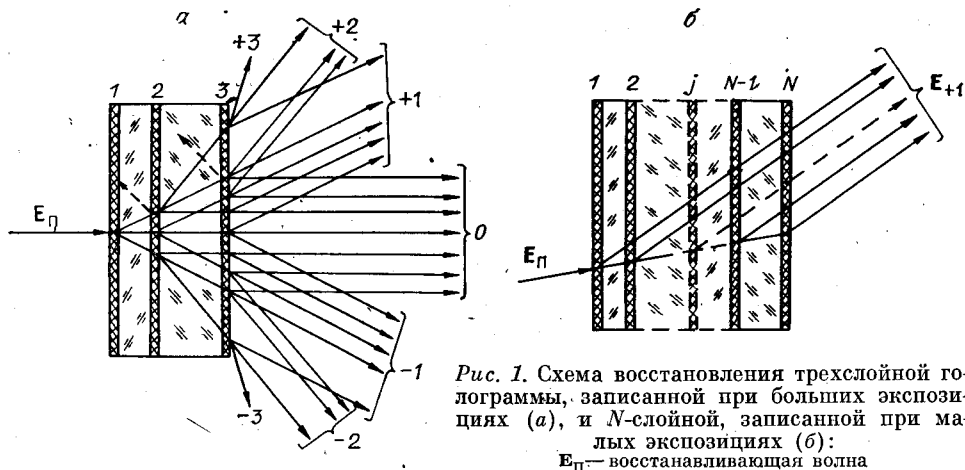


Рис. 1. Схема восстановления трехслойной голограммы, записанной при больших экспозициях (а), и N -слойной, записанной при малых экспозициях (б):
 E_0 — восстанавливающая волна

В настоящей работе теоретически и экспериментально исследована фазовая многослойная голограмма и проведен сравнительный анализ такой голограммы с двух- и однослойными структурами.

Теоретический анализ многослойных тонких голограмм. Рассмотрим процесс дифракции плоской волны с постоянной амплитудой $E_0 = E_0 \exp(i\mathbf{K}_0 \mathbf{R})$ на тонкой голограмме, состоящей из N светочувствительных слоев, отстоящих друг от друга на расстоянии l_1, l_2, \dots, l_{N-1} соответственно. Запись осуществлялась двумя плоскими волнами, сходящимися под небольшим углом δ . В результате на каждом слое образована тонкая голографическая дифракционная решетка. Восстанавливающая плоская волна дифрагирует на первой решетке, затем каждая из образованных волн снова дифрагирует последовательно на втором, третьем и последующих слоях (рис. 1, а), причем каждый определенный порядок получается в результате когерентного сложения волн, распространяющихся в одном направлении [3, 4].

Ограничимся голограммами, в которых показатели преломления светочувствительных слоев и промежуточной оптически прозрачной среды приблизительно одинаковы, что позволяет пренебречь отражением записывающих и восстанавливающей волн внутри голограммы (показаны штрихом на рис. 1, а). Процесс записи осуществляется двумя плоскими S -поляризованными волнами E_A и E_B . В этом случае функция пропускания t_j каждого j -го слоя N -слойной голограммы может быть разложена в ряд Фурье по параметру $u = \Delta \mathbf{q} \mathbf{r}$ [3], где $\Delta \mathbf{q} = \mathbf{q}_A - \mathbf{q}_B$, \mathbf{q}_A и \mathbf{q}_B — проекции волновых векторов объектной и опорной волн на плоскость голограммы; \mathbf{r} — радиус-вектор в плоскости голограммы, $j = 1, 2, \dots, N$.

При падении на голограмму плоской волны $E_0 = E_0 \exp(i\mathbf{K}_0 \mathbf{R})$ восстанавливается поле $E_+ = E_+ t \exp(i\psi)$, где $t = t_1 t_2 \dots t_N$ — функция пропускания N -слойной голограммы; ψ — набег фазы, который приобретает восстанавливающая волна при прохождении голограммы толщиной $L = l_1 + l_2 + \dots + l_{N-1}$. Каждый K -й порядок на выходе голограммы образуется в результате когерентного сложения волн, полученных при дифракции падающей волны в пучки p_1, p_2, \dots, p_N порядка на каждом слое, причем $p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_N = K$ (см. рис. 1, а, б). Интерференция волн приводит к увеличению либо к уменьшению интенсивности поля этого порядка. Этот интерференционный процесс является причиной высоких селективных свойств многослойных голограмм как по углу, так и по частоте.

Объектное поле соответствует волне $+1$ -го порядка, т. е. восстанавливается при условии $p_1 + p_2 + \dots + p_N = 1$. Дифракционная эффективность многослойной фазовой голограммы η , определяемая как отношение интенсивности восстановленного объектного поля к интенсивности

падающей волны, равна

$$\eta = \left| \sum_{p_1=-\infty}^{\infty} \sum_{p_2=-\infty}^{\infty} \sum_{p_{N-1}=-\infty}^{\infty} J_{p_1}(v_1) J_{p_2}(v_2) \dots \dots J_{p_N}(v_N) e^{i(\varphi_{p_1 p_2} + \varphi_{p_2 p_3} + \dots + \varphi_{p_{N-1} p_N})} \right|_x^2 \quad (1)$$

где $J_{p_j}(v_j)$ — функция Бесселя первого рода p_j -го порядка; v_j — параметр, характеризуемый степенью модуляции j -й дифракционной решетки, экспозицией, толщиной слоя и длиной волны; $\varphi_{p_j p_{j+1}}$ — фазовый набег, который приобретает восстанавливающая волна при прохождении расстояния l_j между j -й и $(j+1)$ -й решетками:

$$\varphi_{p_j p_{j+1}} = p_{j+1} (l_1 + l_2 + \dots + l_j) \left(\sqrt{k^2 - q_A^2} - \sqrt{k^2 - q_B^2} \right) + + l_j \sqrt{k_1^2 - (q_{п_j} + p_j \Delta q)^2} \quad (2)$$

Здесь k и k_1 — волновые числа при записи и восстановлении голограммы; $q_{п_j} = q_{п_{j-1}} + p_{j-1} \Delta q$ — проекция на плоскость голограммы волнового вектора волны, падающей на j -й слой.

Полученные выражения (1) и (2) служат основой для изучения свойств многослойных голограмм. Они определяют зависимость ДЭ от различных параметров систем записи и восстановления голограмм.

Зависимость ДЭ многослойной голограммы от экспозиции при совпадении восстанавливающей волны с опорной. В случае полного совпадения восстанавливающей волны с опорной как по частоте, так и по направлению проекция вектора падающей волны на j -й слой может быть записана как $q_{п_j} = q_B + \Delta q (p_1 + p_2 + \dots + p_j)$. При расчете ДЭ количество членов, которое необходимо учитывать в формуле (1), зависит от экспозиции, определяющей величину v_j ; так, при $v_j \leq 0,3$ существенную роль в образовании поля на выходе голограммы будут играть только волны, дифрагирующие в 0-й и +1-й порядки, как показано на рис. 1, б. Тогда ДЭ N -слойной голограммы равна

$$\eta = |J_0(v_1) J_0(v_2) \dots J_0(v_{N-1}) J_1(v_N) + J_0(v_1) J_0(v_2) \dots \dots J_1(v_{N-1}) J_0(v_N) + \dots + J_1(v_1) J_0(v_2) \dots J_0(v_N)|^2 \quad (3)$$

Видно, что ДЭ не будет зависеть от расстояний между слоями l_j . Это можно объяснить следующим образом: при восстановлении голограммы после каждого слоя образуются волны только двух типов — волны, совпадающие по направлению с опорной или с объектной волной (см. рис. 1, б). Каждая записанная дифракционная решетка содержит информацию о фазе, которую приобретают те же волны при прохождении голограммы при записи. При падении на голограмму опорной волны набег фазы, который приобретает волна при восстановлении, компенсируется набегом фазы при записи. В результате остается только набег фазы, приобретенный объектной волной при записи, т. е. для всех волн, образующих первый порядок, набег фазы является постоянной величиной $\varphi_j = L \sqrt{k^2 - q_A^2}$.

Были получены значения ДЭ для двух-, трех-, четырех- и пятислойных голограмм: $\eta_2 = 7$, $\eta_3 = 13,8$, $\eta_4 = 18,6$ и $\eta_5 = 24,1\%$. При тех же значениях экспозиции ($v_1 = 0,3$) ДЭ однослойной фазовой голограммы равна 2,24%. При расчете учитывалось поглощение слоями записывающих волн в предположении, что $v_j = 0,8v_{j-1}$ (это следует из экспериментальных данных [4]).

Независимость ДЭ от величины l_j при совпадении восстанавливающей волны с опорной облегчает изготовление многослойных голограмм, так как при этом не требуется строго выдерживать определенные расстояния между слоями и может быть допущена непараллельность и относительная кривизна последних.

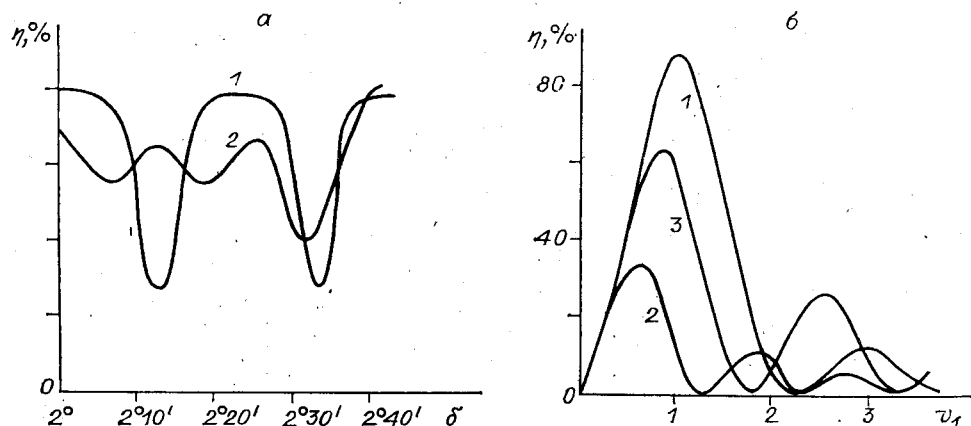


Рис. 2. Зависимость ДЭ четырехслойной голограммы при совпадении восстанавливающей и опорной волн от угла между записывающими волнами δ (а) при $l_1 = l_2 = l_3 = l = 1,34$ мм (1) и $l_1 = 2l_2 = 3l_3 = 1,34$ мм (2) и от параметра v_1 (б) при $l_1 = l_2 = l_3 = 1,34$ мм и $\delta = 2^\circ 24'$ (1), $\delta = 2^\circ 13'$ (2), а также при $l_1 = 2l_2 = 3l_3 = 1,34$ мм и $\delta = 2^\circ 13'$ (3)

С увеличением экспозиции восстановленная волна формируется в результате дифракции падающей волны, совпадающей с опорной, как в 0-й и +1-й, так и в высшие порядки. В этом случае фазовые набеги φ_j отличаются друг от друга и ДЭ будет зависеть от угла между записывающими волнами δ и от расстояния между слоями l_j . На рис. 2, а показана кривая зависимости ДЭ от δ для четырехслойной голограммы с $l_1 = l_2 = l_3 = 1,34$ мм (кривая 1), рассчитанная для значений $v_1 = 0,8$; $v_2 = 0,64$; $v_3 = 0,512$; $v_4 = 0,496$. Период кривой 1 зависит от величины l_j и k и совпадает с периодом для двухслойной голограммы с теми же значениями $l = l_j$ и k [4]. Однако если для двухслойной голограммы зависимость ДЭ от δ имеет косинусоидальный характер, то с возрастанием числа слоев область углов δ , при которых ДЭ максимальна, расширяется. При этом увеличивается амплитуда колебаний ДЭ. В общем случае фазовые набеги по-разному определяются этими параметрами, что приводит к расширению области углов δ , где ДЭ слабо колеблется при изменении δ . В качестве примера рассчитан случай асимметричного падения записывающих волн на четырехслойную голограмму с $l_1 = 2l_2 = 3l_3 = 1,34$ мм (рис. 2, а, кривая 2). Видно, что при незначительных колебаниях ($\sim 10\%$) достигнуто высокое значение ДЭ, равное $\sim 60\%$, при изменении δ от 2° до $2^\circ 20'$.

Таким образом, многослойные голограммы с равными расстояниями между слоями обладают аналогично двухслойным [5] свойством пространственной фильтрации. В общем случае N -слойные структуры имеют более гладкий угловой спектр и могут быть использованы для передачи изображений с высокой эффективностью.

Зависимости ДЭ многослойных голограмм от величины экспозиции, определяемой аргументом функции Бесселя v_j , рассчитаны на ЭВМ для случая четырехслойной голограммы по формулам (1) и (2) (рис. 2, б). Углы между записывающими волнами равны $\delta = 2^\circ 24'$ (кривая 1) и $\delta = 2^\circ 13'$ (кривые 2 и 3), что соответствует максимальной и минимальной ДЭ (см. рис. 2, а).

При сравнении кривых 1—3 на рис. 2, б видно, что пренебрегать дифракцией в высшие порядки на четырехслойной голограмме можно только при экспозициях, соответствующих $v_1 \leq 0,3$. Для двухслойной голограммы аналогичная величина v_1 не превышает 0,5 [4, 5]. Иными словами, чем больше слоев, тем меньше экспозиция, при которой пучки высших порядков не будут влиять на свойства многослойных голограмм.

Из проведенных расчетов следует, что многослойные тонкие голограммы имеют высокую ДЭ, приближающуюся к ДЭ объемных голограмм

(к 100%) [6, 7]. Необходимо отметить, что максимальная ДЭ может быть достигнута при меньших экспозициях, чем у тонких однослойных голограмм. Так, если для однослойной голограммы $\eta_1^{\max} = 33,97\%$ при $v_1 = 1,8$, то для трехслойной голограммы $\eta_3^{\max} = 84,2\%$ при $v_1 = 1,2$, а для четырехслойной — $\eta_4^{\max} = 89,1\%$ при $v_1 = 1,0$. Следовательно, многослойные голограммы могут работать более эффективно в области с низкими шумами.

Селективные свойства многослойных голограмм. Одними из важнейших характеристик, определяющих область применения голограмм, являются селективные свойства последних.

Для изучения селективности многослойных голограмм рассмотрим процесс восстановления последних при малых экспозициях. При расчете ДЭ по формуле (1) вынесем за скобку $e^{i\varphi_1}$. Тогда

$$\eta \approx \frac{1}{4} |v_N + v_{N-1} e^{i\mu l_1} + \dots + v_j e^{i\mu(l_1+l_2+\dots+l_{N-j})} + \dots + v_1 e^{i\mu L}|^2, \quad (4)$$

где

$$\mu = (\varphi_j - \varphi_1) / (l_{N-j+1} + l_{N-j+2} + \dots + l_{N-1}) = \sqrt{k_1^2 - (q_{II} + \Delta q)^2} - \sqrt{k_1^2 - q_{II}^2} - \left(\sqrt{k^2 - q_A^2} - \sqrt{k^2 - q_B^2} \right). \quad (5)$$

Назовем по аналогии с двухслойной голограммой μ фазовой расстройкой, так как она определяет тот фазовый набег, который дополнительно приобретают волны, образующие 1-й порядок в случае различия восстанавливающей и опорной волн как по частоте, так и по направлению. В этом случае, когда $l_1 = l_2 = \dots = l_{N-1} = l$ и $v_1 = v_2 = \dots = v_N = v$, ДЭ трех-, четырех- и пятислойной голограмм может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} \eta_3 &\approx (1/4) v^2 (1 + 2 \cos \mu l)^2; \\ \eta_4 &\approx 4v^2 \cos^2(\mu l/2) \cos^2 \mu l; \\ \eta_5 &\approx (1/4) v^2 [2 \cos 2\mu l + 2 \cos \mu l + 1]^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Как следует из формул (6), зависимость ДЭ от μl периодична, причем периоды всех кривых одинаковы и равны периоду аналогичной кривой для двухслойной голограммы с таким же расстоянием между слоями. С увеличением числа слоев растет крутизна характеристик, центральный максимум также возрастает.

При больших экспозициях необходимо учитывать дифракцию падающей волны в — 1-й и высшие порядки. Для этого случая расчет проводился по общей формуле (1) на ЭВМ. Показано, что с увеличением экспозиции центральный и боковые максимумы сначала растут, затем центральный максимум начинает уменьшаться, а боковые продолжают расти, причем появляются новые максимумы. При большой экспозиции зависимость представляет собой ряд небольших пиков приблизительно одной величины.

Экспериментальное изучение угловой селективности четырехслойных голограмм. Наиболее простой способ создания многослойных голограмм — метод зеркального отображения, заключающийся в получении из N -слойной $2N$ -или $(2N - 1)$ -слойной голограммы. Схемы получения и восстановления многослойных голограмм с помощью зеркала показаны на рис. 3, *a—в*. Здесь между последним слоем и зеркалом может быть установлена стеклянная пластинка (или пластинка из любого другого прозрачного материала, аналогичного материалу подложки) для того, чтобы сделать голограмму однородной. При получении многослойной голограммы с помощью зеркала на каждом слое записываются по две дифракционные решетки. Если углы падения записывающих волн на голограмму большие, то решетки, записанные до и после отражения от зеркала, не будут перекрываться (см. рис. 3, *a*). При восстановлении пада-

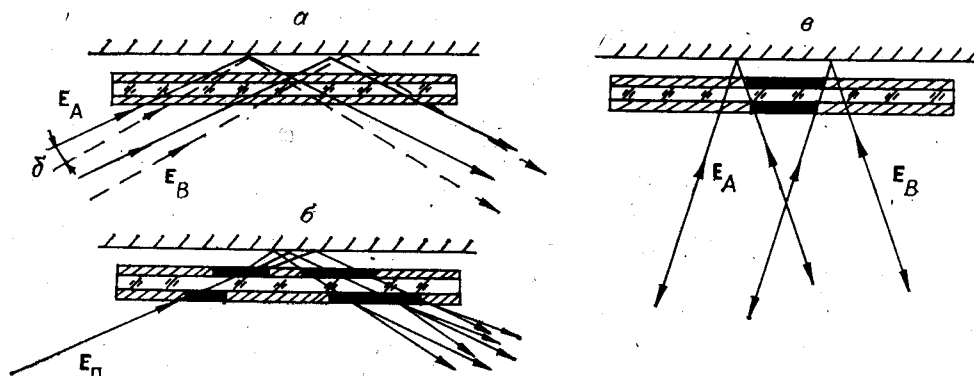


Рис. 3. Получение четырехслойной голограммы (а) и ее восстановление (б) методом зеркального отображения; симметричная схема получения голограммы методом зеркального отображения (в)

ющая волна должна быть направлена так, чтобы пройти через две дифракционные решетки в каждом слое, т. е. близко к опорной или к объектной волне (см. рис. 3, б). Особо следует выделить случай, когда запись многослойной голограммы осуществляют по симметричной схеме, причем волновые векторы объектной и опорной волн находятся в одной плоскости, перпендикулярной слоям и зеркалу (см. рис. 3, в). Видно, что в этом случае фазовый набег, который приобретают записывающие волны, проходя через голограмму, одинаков для обеих волн. Поэтому на всех слоях будут записаны идентичные дифракционные решетки, не сдвинутые одна относительно другой. Кроме того, как видно из рис. 3, в, дифракционные решетки, зафиксированные до и после отражения от зеркала, будут накладываться друг на друга. Это означает, что на каждом слое последовательно запишутся две одинаковые решетки и, следовательно, потребуется меньшая экспозиция для получения определенной величины ДЭ многослойной голограммы, чем в случае несимметричной записи. При симметричном падении записывающих волн на голограмму восстанавливающая волна последовательно дифрагирует на первой голографической решетке, затем на второй и т. д., а после отражения от зеркала проходит через эти же решетки, только в обратном порядке. Эту же схему восстановления можно получить, если без зеркала записать сначала N -слойную голограмму по симметричной схеме, затем позади голограммы установить зеркало так, чтобы при восстановлении иметь $2N$ -слойную голограмму. Действительно, падающая волна дифрагирует сначала на записанной N -слойной голограмме, а затем, отразившись от зеркала, на голографических решетках в обратном порядке.

Для получения $(2N-1)$ -слойной голограммы необходимо частично удалить светочувствительный слой с одного края N -слойной голограммы так, чтобы после отражения восстанавливающая волна дифрагировала на $(N-1)$ голографических решетках.

Изготовление двухслойных голограмм [4, 5] сводится к покрытию стеклянной пластинки с двух сторон светочувствительными слоями, что легко осуществимо. Поэтому предлагаемый способ создания двух-, трех-, четырехслойных голограмм из одно- и двухслойных методом зеркального отображения технически прост, что позволит найти ему широкое применение.

Экспериментальные исследования угловой селективности четырехслойной голограммы, записанной по симметричной схеме, проводились на установке, схематически показанной на рис. 4. Для восстановления голограммы использовался He-Cd-лазер. Восстанавливающий пучок формировался коллимирующей оптической системой и диафрагмой. На вращающемся столике устанавливалась двухслойная голограмма, прижатая через стеклянную пластинку к зеркалу; на том же столике перпендикулярно зеркалу закреплялось зеркало так, что зеркала образовывали

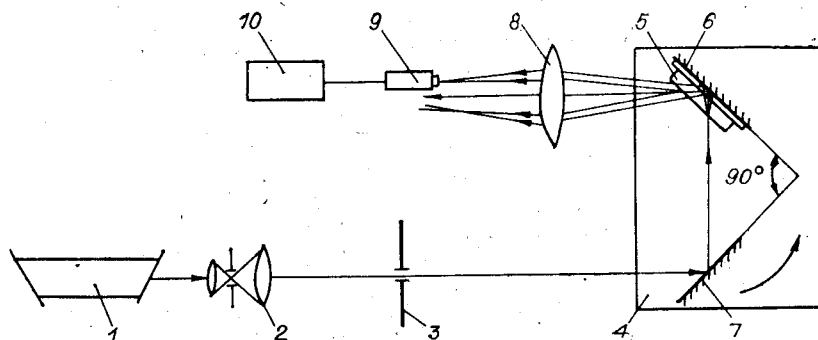


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для исследования угловой селективности многослойных голограмм:

1 — He-Cd-лазер, 2 — коллиматор, 3 — диафрагма, 4 — поворотный столик, 5 — двухслойная голограмма, 6 и 7 — зеркала, 8 — линза, 9 — фотодетектор, 10 — измерительный прибор

90-градусную отражательную призму. Как известно, при повороте такой призмы отраженный от нее пучок не поворачивается, а смещается параллельно своему первоначальному направлению. Восстанавливающая волна падала сначала на зеркало, затем, отразившись от него, дифрагировала на четырехслойной голограмме, образованной двухслойной голограммой и зеркалом. Образовавшиеся волны были сфокусированы линзой на фотодетекторе, измеряющем интенсивность волн. Следует отметить, что результаты эксперимента не изменятся, если зеркало и голограмму с зеркалом поменять местами: в этом случае лазерный пучок сначала продифрагирует на голограмме, а потом сформировавшиеся пучки отразятся от зеркала и, пройдя через линзу, попадут на фотодетектор. При повороте столика дифракционные пучки смещаются параллельно своему первоначальному направлению, а их сфокусированные линзой изображения остаются неподвижными.

Экспериментально исследовалась четырехслойная голограмма, полученная с помощью двухслойной, записанной по симметричной схеме на слоях бихромированной желатины (БХЖ) с углом между записывающими волнами $\delta = 2^\circ 22'$. Расстояние между слоями l равнялось 1,34 мм. Пластина заливалась эпоксидной смолой и покрывалась с двух сторон покровными стеклами (для предотвращения разрушения голограмм). Таким образом исследовали четырехслойную голограмму с $l_1 = l_3 = l = 1,34$ мм и с $l_2 = 3,0$ мм.

Для сопоставления экспериментальных результатов с теоретическими проведен расчет ДЭ четырехслойной голограммы, записанной при малых экспозициях, по формуле

$$\eta_4 \approx 4v^2 \cos^2(\mu l/2) \cos^2[(\mu l + \mu l_2)/2]. \quad (7)$$

Результаты эксперимента и расчета показаны на рис. 5, а. Несовпадение величин максимумов можно объяснить тем, что при некратном соотношении l и l_2 вид кривых зависит от начала отсчета, который был различным для расчетной и экспериментальных кривых (нуль на оси абсцисс не совпадает с $\delta_n = 0$ для экспериментальных точек, а равен некоторому углу $\sim 45^\circ$). Кроме того, величина экспозиции, по-видимому, меньше, чем экспозиция, принятая в расчете для величины v_1 . Для сравнения на этом же графике приведены экспериментальные точки зависимости ДЭ от δ_n двухслойной голограммы, записанной при тех же условиях. Как теоретически предсказывалось, «большой период», определяемый из уравнения $\mu l = 2\pi$, для четырехслойной голограммы совпадает с периодом двухслойной и равен $42'$, а ДЭ последней меньше, чем ДЭ четырехслойной голограммы. Была получена экспериментальная зависимость ДЭ от δ_n для $\tau = 3$ с (рис. 5, б). Видно, что с увеличением экспозиции ДЭ растет, причем появляются новые максимумы.

С изменением расстояния l_2 согласно выражению (7) меняется вид кривой угловой селективности. Была исследована голограмма, образован-

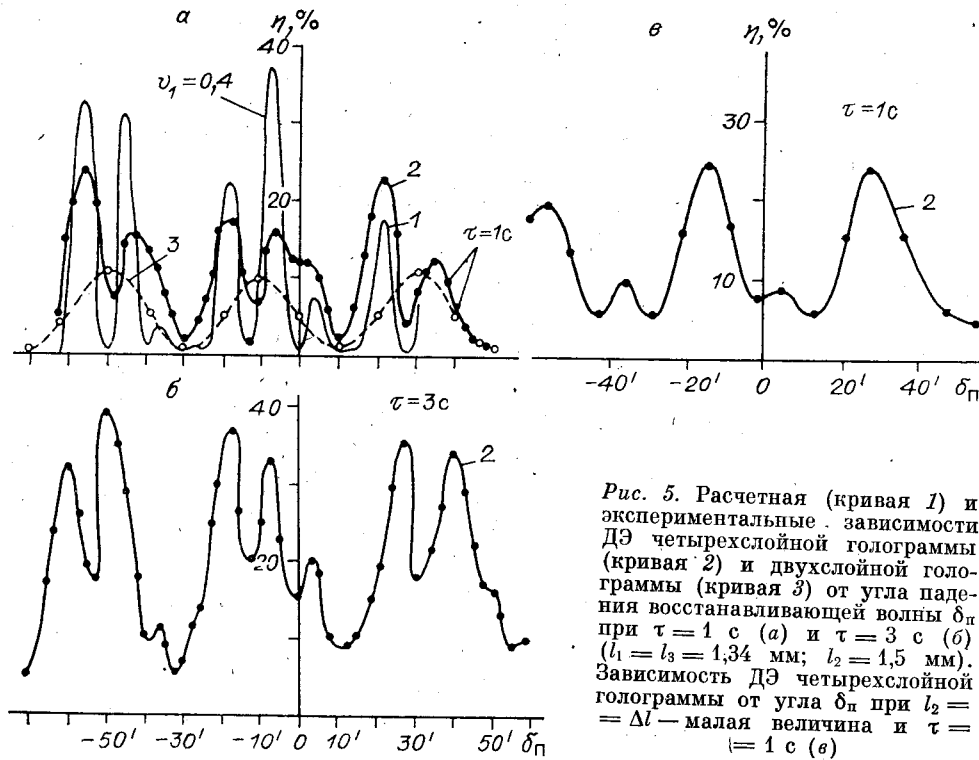
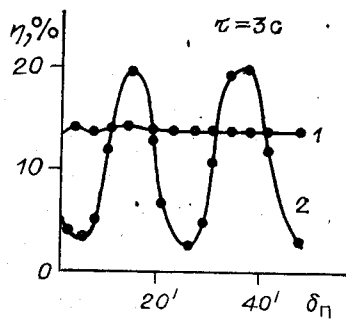


Рис. 5. Расчетная (кривая 1) и экспериментальные зависимости ДЭ четырехслойной голограммы (кривая 2) и двухслойной голограммы (кривая 3) от угла падения восстанавливающей волны δ_{π} при $\tau = 1$ с (а) и $\tau = 3$ с (б) ($l_1 = l_3 = 1,34$ мм; $l_2 = 1,5$ мм). Зависимость ДЭ четырехслойной голограммы от угла δ_{π} при $l_2 = \Delta l$ — малая величина и $\tau = 1$ с (в)

ная с помощью двухслойной голограммы и зеркала, прижатого прямо к светочувствительному слою с записанной дифракционной решеткой (рис. 5, в). Этот случай соответствует $l_2 = \Delta l$, где Δl — малая величина. Зависимость ДЭ от δ_{π} представляет собой произведение двух косинусов, период одной из которых незначительно больше периода другой. Характерным для такой зависимости является участок, где в одном «большом периоде» наблюдается один большой максимум и один малый. На рис. 5, в показана экспериментальная кривая, характеризующая угловую селективность четырехслойной голограммы с l_2 — малой величиной. Показан участок, где сначала боковой максимум не заметен, затем он появляется и растет.

Рассмотренный в настоящей работе метод зеркального отображения может быть использован для изготовления двухслойных голограмм из однослойных. На рис. 6 показаны экспериментальные кривые зависимости ДЭ от δ_{π} однослойной (кривая 1) и полученной из нее двухслойной (кривая 2) голограмм. Зеркало в данном случае прижималось к обратной стороне стеклянной подложки толщиной 1,34 мм. Период селективности такой двухслойной голограммы совпадает с периодом, рассчитанным по формуле $\Delta\delta_{\pi} = \lambda n / 2l \sin(\delta/2)$ [4]. Однослойная тонкая голограмма ($\delta \sim 2^\circ$), как известно [7, 8], угловой селективностью не об-

Рис. 6. Экспериментальные зависимости ДЭ однослойной (1) и двухслойной (2) голограмм от угла δ_{π} . Двухслойная голограмма получена методом зеркального отображения из однослойной



ладает. Таким образом, применяя метод зеркального отображения, можно значительно увеличить ДЭ при малых экспозициях, превратив однослойную голограмму в двухслойную. Важно отметить, что этот метод дает возможность получать двухслойные голограммы, используя серийно выпускаемые однослойные голографические фотопластинки.

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование голограмм, записанных на тонких пространственно разделенных светочувствительных слоях, показало, что такие структуры обладают высокой спектрально-угловой селективностью, а их ДЭ приближается к ДЭ объемных голограмм. Однако использование голограмм с числом слоев более четырех нецелесообразно, так как повышение ДЭ будет компенсироваться возрастающим поглощением и многократными отражениями слоев. Необходимая спектрально-угловая селективность может быть получена выбором определенных расстояний между фотослоями и (или) угла между опорной и объектной волнами для трех- и четырехслойных голограмм. Следует отметить, что предложенное управление отличается от известных способов изменения угловой селективности у объемных голограмм.

Многослойные голограммы дают возможность получать высокую ДЭ при небольших экспозициях. Иными словами, они могут работать более эффективно в области с низкими шумами. Высокая ДЭ, а также ее зависимость от различных параметров схем записи и восстановления делают перспективной разработку многослойных голограмм с целью использования их в качестве оптических элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Озолс А. О. Дифракционная эффективность тонких амплитудно-фазовых голограмм // *Опт. и спектр.*— 1977.— Т. 42, № 1.
2. Shankoff T. A. Phase holograms in dichromated gelatin // *Appl. Opt.*— 1968.— V. 7, N 10.— P. 2101—2105.
3. Зельдович Б. Я., Яковлева Т. В. Теория двухслойной голограммы // *Квантовая электрон.*— 1984.— Т. 11, № 3.
4. Зельдович Б. Я., Мировицкий Д. И., Ростовцева Н. В., Серов О. Б. Особенности двухслойных фазовых голограмм // *Квантовая электрон.*— 1984.— Т. 11, № 3.
5. Ростовцева Н. В., Серов О. Б., Мировицкий Д. И. и др. Теоретическое и экспериментальное исследование фазовой двухслойной голограммы // *Труды НИКФИ.*— 1982.— Вып. 110.
6. Мировицкий Д. И., Будагян И. Ф., Белов С. Н. К теории неоднородных голографических сред // *Проблемы голографии.*— М.: МИРЭА, 1976, вып. 7.
7. Kogelnic H. Coupled wave theory of thick hologram gratings // *Bell. Syst. Techn. J.*— 1969.— V. 48, N 9.— P. 2909—2947.
8. Кольер Р., Беркхарт К., Линн Л. *Оптическая голография.*— М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 8 июля 1985 г.

УДК 535.241.13 : 537.228

О. А. ГУДАЕВ, В. А. ГУСЕВ, С. И. ДЕМЕНКО

(Новосибирск)

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ СИЛЛЕНИТОВ

Пространственно-временные модуляторы света типа ПРОМ просты и технологичны в изготовлении, надежны в эксплуатации, обладают чувствительностью $\sim 0,5-2,5 \cdot 10^{-6}$ Дж/см² ($\lambda_{\text{зап}} = 0,4-0,5$ мкм), хорошим разрешением $\sim 15-200$ 1/мм, контрастом в считываемом изображении —