

## ЦВЕТНАЯ ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРФЕРОГРАММА

В. П. Чернов и Б. Б. Горбатенко

Рассмотрена возможность получения с помощью голографии сфокусированных изображений цветной интерференционной картины. Для этого предложено объектный пучок при первой и второй экспозициях линейно поляризовать во взаимно перпендикулярных направлениях. Вследствие этого в восстановленном белым светом изображении можно получить две одинаковые системы интерференционных полос, окрашенных в разный цвет и смещенных относительно друг друга на половину ширины полосы. При сложении систем образуются цветные интерференционные полосы. Результаты теории подтверждены экспериментально.

## Введение

Известно, что методами голографической интерферометрии можно фиксировать незначительные перемещения объекта, деформации и т. п. [1-4].

Однако в том случае, когда интерференционные полосы локализованы на объекте, теряется информация об элементах, расположенных в минимуме интенсивности интерференционной картины.

В данной работе рассматривается способ получения цветных голографических интерферограмм, не изменяющихся по интенсивности.

Таким образом, информация о сдвиге объекта выявляется за счет изменения цвета, что не препятствует наблюдению поверхности объекта.

## Анализ возможности получения цветной голографической интерферограммы

Пусть свет от лазера, линейно поляризованный вдоль вектора  $\vec{C}$  (см. рисунок), проходит через линзу 1, поляризатор 2, линзу 3 и освещает объект 4.

С помощью поляризатора 2 повернем плоскость поляризации объектного пучка на угол  $\xi_1$  так, чтобы падающий на объект пучок был поляризован вдоль оси  $x'$ .

Если объект характеризуется функцией пропускания  $T(x', y') \times \times \exp[i\varphi(x', y')]$  и не изменяет поляризацию проходящей через него волны, то поле непосредственно за ним можно представить в виде

$$E_x = a_x \cos \xi_1 T(x', y') \exp[i\varphi(x', y')].$$

Здесь  $a_x$  — единичный вектор вдоль оси  $x'$ ,  $\cos \xi_1$  — значение амплитуды плоской волны перед объектом.

Пусть линза 5 формирует изображение объекта в плоскости фотопластины 6 с единичным увеличением.

Направим на фотопластинку две опорные волны

$$E^{\parallel} = \mathbf{b}^{\parallel} \exp\left(-i \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1\right); \quad E^{\perp} = \mathbf{b}^{\perp} \exp\left(-i \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2\right)$$

под углами  $\theta_1$  и  $\theta_2$  к оптической оси линзы. Здесь  $\mathbf{b}^{\parallel}$  и  $\mathbf{b}^{\perp}$  — единичные векторы вдоль направлений поляризации опорных волн  $E^{\parallel}$  и  $E^{\perp}$  соответственно. Пусть эти волны поляризованы во взаимно перпендикулярных

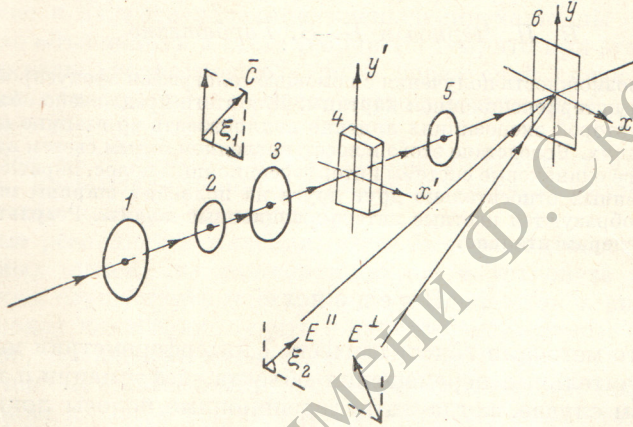
направлениях. Распределение интенсивности поля интерференции объектной волны с двумя опорными в плоскости фотопластины можно представить в виде

$$I_1 = A_1 + T(x, y) \cos \xi_1 \cos \xi_2 \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1 \right] \right\} + \\ + T(x, y) \cos \xi_1 \sin \xi_2 \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2 \right] \right\} + \text{к. с.},$$

где

$$A_1 = 2 + T^2 \cos^2 \xi_1,$$

$\xi_2$  — угол между вектором  $\mathbf{E}^1$  и плоскостью  $xz$ , к. с. — члены, комплексно сопряженные второму и третьему.



Зафиксируем это распределение интенсивности, используя линейный участок кривой почернения фотоэмульсии. Сместим объект и повернем поляризатор 2 так, чтобы на объект падала волна, линейно поляризованная вдоль оси  $y'$ . Если поляризатор при повороте не вносит дополнительного сдвига фаз в объектный пучок, то поле непосредственно за объектом может быть записано в виде

$$E_y = a_y \sin \xi_1 T(x', y') \exp \{ i [\varphi(x', y') + \delta(x', y')] \},$$

здесь  $\delta(x', y')$  — сдвиг фазы волны за счет смещения объекта.

Распределение интенсивности поля интерференции объектной волны  $\bar{E}_y$  с теми же двумя опорными волнами в плоскости фотопластины можно представить с помощью соотношения

$$I_2 = A_2 + T(x, y) \sin \xi_1 \sin \xi_2 \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \delta(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1 \right] \right\} - \\ - T(x, y) \sin \xi_1 \cos \xi_2 \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \delta(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2 \right] \right\} + \text{к. с.},$$

где

$$A_2 = 2 + T^2 \sin^2 \xi_1.$$

Зафиксируем и это распределение интенсивности. Функцию пропускания голограммы, полученной в результате двух экспозиций фотопластины, можно записать

$$\Pi = I_1 + I_2 = A_1 + A_2 + \{ \cos \xi_1 \cos \xi_2 + \sin \xi_1 \sin \xi_2 \exp [i\delta(x, y)] \} \times \\ \times T(x, y) \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_1 \right] \right\} + \{ \cos \xi_1 \sin \xi_2 - \sin \xi_1 \cos \xi_2 \exp [i\delta(x, y)] \} \times \\ \times T(x, y) \exp \left\{ i \left[ \varphi(x, y) + \frac{2\pi x}{\lambda} \sin \theta_2 \right] \right\} + \text{к. с.}$$

Расположив фотопластинку в том же месте, где она была при экспозиции, восстановим изображение объекта с полученной голограммы следующим методом.

Пусть восстанавливающий пучок белого света

$$E_B = \int_{k_m}^{k_n} \exp(-ik_i x \sin \theta_1) dk_i$$

падает на голограмму под углом  $\theta_1$ . Здесь  $k_{n,m} = 2\pi/\lambda_{n,m}$  — значения волновых чисел, соответствующие крайним значениям длин волн, составляющих этот пучок.

Распределение поля восстановленной волны в плоскости голограммы можно представить в виде

$$E_B = (A_1 + A_2) \int_{k_m}^{k_n} \exp(-ik_i x \sin \theta_1) dk_i + T(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \times \\ \times \{ \cos \xi_1 \cos \xi_2 + \sin \xi_1 \sin \xi_2 \exp[i\delta(x, y)] \} \int_{k_m}^{k_n} \exp \left[ i \frac{2\pi x}{\lambda_i} \left( \frac{\lambda_i}{\lambda} - 1 \right) \sin \theta_1 \right] dk_i + \\ + T(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \{ \cos \xi_1 \sin \xi_2 - \sin \xi_1 \cos \xi_2 \exp[i\delta(x, y)] \} \times \\ \times \int_{k_m}^{k_n} \exp \left[ i \frac{2\pi x}{\lambda_i} \left( \frac{\lambda_i}{\lambda} \sin \theta_2 - \sin \theta_1 \right) \right] + (\text{к. с.}) \int_{k_m}^{k_n} \exp(-ik_i x \sin \theta_1) dk_i \quad (1)$$

Второй член этого соотношения описывает изображение, которое наблюдатель в направлении оптической оси линзы 5 будет видеть окрашенным в цвет, соответствующий длине волны  $\lambda_1 = \lambda$ . Интенсивность этого изображения равна

$$I_{B1} = T^2(x, y) \left[ \cos^2(\xi_2 - \xi_1) - \sin 2\xi_1 \sin 2\xi_2 \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2} \right]. \quad (2)$$

Видно, что изображение объекта пересечено интерференционными полосами, характеризующими сдвиг объекта.

Третий член соотношения (1) описывает изображение объекта, которое наблюдатель будет видеть в цвете, соответствующем длине волны  $\lambda_2$ , определяемой из формулы

$$\lambda_2 = \frac{\lambda \sin \theta_1}{\sin \theta_2}.$$

Интенсивность этого изображения равна

$$I_{B2} = T^2(x, y) \left[ \sin^2(\xi_2 - \xi_1) + \sin 2\xi_1 \sin 2\xi_2 \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2} \right]. \quad (3)$$

И в этом случае изображение пересечено такими же интерференционными полосами, но смещенными относительно полос, описываемых соотношением (2), на половину ширины полосы.

При наложении этих изображений будут образовываться цветные интерференционные полосы.

Из соотношений (2) и (3) видно, что перепад яркости интерференционных полос будет максимальный при  $\xi_1 = \xi_2 = 45^\circ$ , т. е.

$$I_{B1} = T^2(x, y) \left[ 1 - \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2} \right], \quad I_{B2} = T^2(x, y) \sin^2 \frac{\delta(x, y)}{2}.$$

Следовательно, наблюдатель в направлении оптической оси линзы 5 будет видеть восстановленное изображение объекта, пересеченное цветными интерференционными полосами, цвет которых при углах  $\xi_1 = \xi_2 = 45^\circ$  соответствует длинам волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ . Действительно,

$$I_\Sigma = I_{B1} + I_{B2} = T^2(x, y).$$

В свою очередь при  $\xi_2 = 0$   $I_{B1} = T^2 \cos^2 \xi_1$ ,  $I_{B2} = T^2 \sin^2 \xi_1$ , т. е. интерференционных полос в восстановленном изображении нет.

Из соотношения (1) также видно, что если наблюдать восстановленное изображение не вдоль оси линзы 5, то цвет полос будет отличен от  $\lambda_1$

и  $\lambda_2$ ; так, например, если изображение наблюдать под углом  $\theta_3$ , то цвет полос можно будет определить из формул

$$\lambda_3 = \frac{\lambda (\sin \theta_1 + \sin \theta_3)}{\sin \theta_1}, \quad \lambda_4 = \frac{\lambda (\sin \theta_1 + \sin \theta_3)}{\sin \theta_2}.$$

Таким образом, если восстановленное изображение наблюдать последовательно под разными углами, то цвет полос будет меняться.

Цвет полос также изменится, если положение голограммы и наблюдателя фиксированы, а положение восстанавливающего источника меняется.

Для проверки предыдущих рассуждений был проведен эксперимент по схеме, изображенной на рисунке. Угол между опорными пучками был равен  $7^\circ$ . При этом угол  $\theta_1 = 40^\circ$ , а углы  $\xi_1 = \xi_2 = 45^\circ$ . В качестве объекта был использован фотошаблон и стеклянная пластинка. Перед второй экспозицией стеклянная пластинка убиралась. При восстановлении голограммы источником белого света изображение фотошаблона было пересечено цветными интерференционными полосами.

### З а к л ю ч е н и е

Изложенный метод позволяет получать одновременно с одной голограммы как информацию об изменении состояния объекта, так и о его деталях, и может быть использован при исследовании однократных быстропротекающих процессов.

Авторы благодарят Н. Г. Власова за полезную дискуссию.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Д. Габор. ТИИЭР, 60, 6, 1972.
- [2] Ю. И. Островский. Голография. Изд. «Наука», М., 1970.
- [3] И. С. Клименко, Е. Г. Матинян, Г. И. Рукман. Опт. и спектр., 160, 1970.
- [4] Дж. Гудмен. Введение в Фурье-оптику. Изд. «Мир», М., 1970.

Поступило в Редакцию 18 июля 1974 г.