

# Повышение чувствительности измерений в голографической интерферометрии малого бокового сдвига

А.М.Лялик

*Для повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии бокового сдвига предложено без использования нелинейных эффектов регистрировать пару интерферограмм с настройкой на частые полосы и задавать малые боковые сдвиги между интерферирующими пучками, равными по модулю, но противоположными по направлению. Повышение чувствительности измерений достигается на стадии оптической обработки такой пары голографических интерферограмм при их точном совмещении или размещении в оптически сопряженных плоскостях. Согласно результатам экспериментальной апробации метода чувствительность интерференционных картин повысилась в два и четыре раза.*

**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, малый боковой сдвиг, повышение чувствительности измерений, оптическая обработка.

## 1. Введение

Изучение формы волновых фронтов световых пучков или фазовых объектов, а также качества различных оптических систем показало, что в ряде случаев интерферометрия бокового сдвига не только не уступает двухлучевой интерферометрии с опорной волной сравнения, но и имеет ряд неоспоримых преимуществ, таких как простота оптической схемы и низкая чувствительность к вибрациям [1, 2]. В настоящее время интерферометрия сдвига применяется и для измерения малых искажений волнового фронта [3, 4].

Голографический вариант интерферометрии бокового сдвига позволил значительно расширить области применения метода за счет возможности компенсации аберраций и произвольной настройки полос в интерференционных картинах, а также возможности повышения чувствительности измерений [5–8]. Повышение чувствительности измерений в голографической интерферометрии малого бокового сдвига ( $\Delta s \ll r_0$ , где  $\Delta s$  – величина бокового сдвига,  $r_0$  – средние размеры неоднородности исследуемого фазового объекта) достигалось за счет использования нелинейной регистрации голографической интерферограммы без изменения  $\Delta s$  [7] или перезаписи исходных интерферограмм линейного вида на вторичные голограммы, но уже в нелинейных условиях [8].

В настоящей работе показана возможность повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии малого бокового сдвига без нелинейной регистрации голографических интерферограмм. Предложено регистрировать пару голографических интерферограмм с равными по модулю, но противоположными по знаку величинами малого бокового сдвига. После их оп-

тической обработки возможны варианты получения интерференционных картин, чувствительность которых увеличена в два и четыре раза.

Ранее трехлучевая интерференция с использованием взаимно противоположного сдвига волновых фронтов была применена для исследования аберрационных характеристик оптических систем [9].

## 2. Регистрация голографических интерферограмм бокового сдвига

На рис.1 приведена оптическая схема получения пары голографических интерферограмм малого бокового сдвига. Исследуемый световой пучок светоделительным зеркалом 1 разделяется по амплитуде и по двум каналам

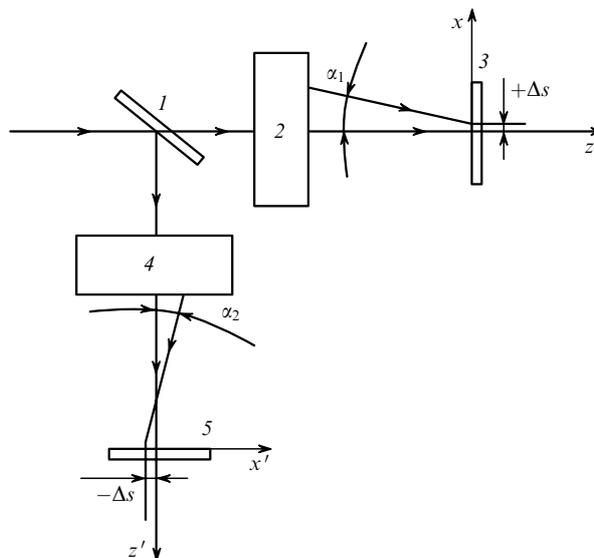


Рис.1. Оптическая схема регистрации голографических интерферограмм малого бокового сдвига:

1 – светоделительное зеркало; 2, 4 – интерферометры бокового сдвига; 3, 5 – плоскости регистрации голографических интерферограмм.

А.М.Лялик. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Белоруссия, 230023 Гродно, ул. Ожешко, 22; e-mail: lyalikov@inbox.ru

Поступила в редакцию 28 февраля 2005 г., после доработки – 28 апреля 2005 г.

направляется в интерферометры бокового сдвига 2, 4. В плоскостях 3, 5 регистрируются голографические интерферограммы с малыми боковыми сдвигами  $+\Delta s$  и  $-\Delta s$ . На рис.1 показаны также положения систем координат  $x, y, z$  и  $x', y', z'$ , направления сдвигов  $+\Delta s$  и  $-\Delta s$  и углы  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  между интерферирующими пучками в каждом канале. Важной особенностью рассматриваемого метода является то, что при формировании голографических интерферограмм бокового сдвига в плоскостях 3, 5 требуется, чтобы они были настроены на интерференционные полосы конечной ширины [10] с ориентацией, например, параллельно осям  $y$  и  $y'$ .

Следует отметить, что для обеспечения пространственной фильтрации соответствующих порядков дифракции при оптической обработке голографических интерферограмм малого бокового сдвига пространственные частоты  $\xi_1$  и  $\xi_2$ , определяемые углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , должны составлять не менее  $5 \text{ мм}^{-1}$  [11].

Разность пространственных частот  $\xi_1$  и  $\xi_2$  выбирается из условия настройки полос в интерференционной картине, наблюдаемой при оптической обработке совмещенных голографических интерферограмм бокового сдвига. При равенстве пространственных частот ( $\xi_1 = \xi_2$ ) в интерференционной картине будет наблюдаться настройка на бесконечно широкую полосу, а при их незначительном отличии ( $|\xi_1 - \xi_2| \ll \xi_1$ ) – на полосы конечной ширины. Период полос настройки полос будет определяться величиной  $|\xi_1 - \xi_2|^{-1}$  [11].

Для обеспечения требуемой настройки интерференционных полос, получаемых при оптической обработке совмещенных или оптически сопряженных голографических интерферограмм бокового сдвига, частоту полос этих интерферограмм можно контролировать с помощью эталонных дифракционных решеток, устанавливаемых в плоскостях 3, 5. Равенство пространственных частот голографической интерферограммы бокового сдвига и эталонной дифракционной решетки имеет место при наблюдении в плоскости решетки муаровой картины с настройкой на бесконечно широкую полосу. Таким образом, требуемая настройка частот  $\xi_1$  и  $\xi_2$  голографических интерферограмм бокового сдвига может быть осуществлена при использовании набора эталонных дифракционных решеток.

После регистрации голографических интерферограмм бокового сдвига на фотоэмульсии и перехода к общей системе координат  $x, y$  амплитудные пропускания голографических интерферограмм можно представить в виде

$$\tau_1(x, y) \sim 1 + \cos \left[ 2\pi\xi_1 x + \Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right], \quad (1)$$

$$\tau_2(x, y) \sim 1 + \cos \left[ 2\pi\xi_2 x - \Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right], \quad (2)$$

где  $\Phi(x, y)$  – фаза, определяющая форму волнового фронта исследуемого светового пучка.

### 3. Получение интерференционных картин повышенной чувствительности

При освещении точно совмещенных голографических интерферограмм бокового сдвига (1), (2) и выделения первого порядка дифракции по известной методике [11,

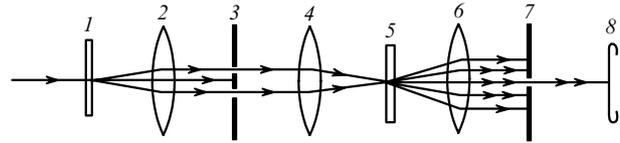


Рис.2. Схема оптической обработки сопряженных голографических интерферограмм бокового сдвига:

1, 5 – голографические интерферограммы; 2, 4, 6 – объективы; 3, 7 – фильтрующие диафрагмы; 8 – плоскость наблюдения интерференционной картины.

12] распределение освещенности в интерференционной картине

$$I'(x, y) \sim 1 + \cos \left[ 2\pi(\xi_1 - \xi_2)x + 2\Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right]. \quad (3)$$

При  $\xi_1 = \xi_2$  интерференционная картина настроена на полосу бесконечной ширины, а при  $\xi_1 \neq \xi_2$  – на полосы конечной ширины. В последнем случае период полос будет определяться величиной  $|\xi_1 - \xi_2|^{-1}$ . Из (3) видно, что ход полос в интерференционной картине отображает поведение производной от фазы  $\partial \Phi(x, y) / \partial u$  с чувствительностью измерений в два раза большей, чем для интерферограмм бокового сдвига (1) или (2).

Для достижения большей чувствительности измерений пара голографических интерферограмм бокового сдвига (1), (2) может быть оптически обработана с помощью схемы, приведенной на рис.2, которая используется для оптической обработки голограмм фазовых объектов [11]. В этом случае голографические интерферограммы бокового сдвига устанавливаются в оптически сопряженных плоскостях 1, 5. При освещении коллимированным пучком когерентного света первой голографической интерферограммы, например вида (1), на ней дифрагируют в  $\pm 1$ -е порядки волны вида

$$A(x, y) = a \exp \left\{ i \left[ 2\pi\xi_1 x + \Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right] \right\}, \quad (4)$$

$$A^*(x, y) = a \exp \left\{ -i \left[ 2\pi\xi_1 x + \Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right] \right\}, \quad (5)$$

где  $a$  – действительная амплитуда.

Волны вида (4), (5) в задней фокальной плоскости объектива 2 выделяются двумя отверстиями в диафрагме 3 и посредством объектива 4 освещают вторую голографическую интерферограмму бокового сдвига 5. На выходе второй голографической интерферограммы распределение комплексных амплитуд имеет вид  $[A(x, y) + A^*(x, y)]\tau_2(x, y)$ .

Можно показать, что вблизи нормали к голографической интерферограмме 5 будут распространяться две волны вида

$$B(x, y) = b \exp \left\{ i \left[ 2\pi(\xi_1 - \xi_2)x + 2\Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$B^*(x, y) = b \exp \left\{ -i \left[ 2\pi(\xi_1 - \xi_2)x + 2\Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right] \right\}, \quad (7)$$

где  $b$  – действительная амплитуда. Волны вида (6), (7) в задней фокальной плоскости объектива 6 выделяются отверстием в диафрагме 7 и в плоскости 8 образуют интерференционную картину

$$I''(x, y) \sim 1 + \cos \left[ 4\pi(\xi_1 - \xi_2)x + 4\Delta s \frac{\partial \Phi(x, y)}{\partial x} \right], \quad (8)$$

период полос в которой определится параметром  $|2(\xi_1 - \xi_2)|^{-1}$ . Чувствительность измерений при нахождении производной фазы  $(\partial \Phi(x, y)/\partial x)$  в этом случае возрастает в четыре раза по сравнению с чувствительностью схемы, описываемой (1) или (2), в два раза – формулой (3).

#### 4. Экспериментальные результаты

Методика повышения чувствительности измерений в голографической интерферометрии малого бокового сдвига была экспериментально апробирована при визуализации зон плавления образцов полиметилметакрилата при их термической обработке.

Расширенный световой пучок от гелий-неонового лазера проходил через исследуемый образец и направлялся в экспериментальную установку, собранную по схеме, приведенной на рис.1. В качестве интерферометров 2, 4 использовались четырехзеркальные интерферометры бокового сдвига, позволяющие произвольным образом регулировать боковой сдвиг и частоты полос сдвиговых интерферограмм. Выравнивание частот полос  $\xi_1$  и  $\xi_2$  на исходных голографических интерферограммах осуществлялось с помощью эталонной амплитудной дифракционной решетки с частотой полос  $10 \text{ мм}^{-1}$ . Такая решетка была изготовлена фотографическим способом на фотопластинке Микрат ЛОИ-2 при проецировании на нее высококачественной интерференционной картины, полученной в интерферометре Маха – Цендера. При регистрации голографических интерферограмм боковой сдвиг составлял  $0.5 \text{ мм}$  при характерном размере зоны неоднородности исследуемого образца  $\sim 10 \text{ мм}$ . При настройке частоты полос в исходной паре голографических интерферограмм бокового сдвига эталонная дифракционная решетка устанавливалась в обоих случаях так, чтобы ее штрихи были ориентированы одинаковым образом. Особенности эксперимента были таковы, что требовалось определить первую производную фазы  $\partial \Phi(x, y)/\partial u$ . Для этого относительные боковые сдвиги задавались между интерферирующими пучками относительно оси  $y$ . Голографические интерферограммы малого бокового сдвига регистрировались на фотопленке ФГ-690 с соблюдением «линейных условий». В их дифракционном спектре высшие порядки дифракции визуально не наблюдались.

На рис.3 приведены интерференционные картины, полученные при оптической обработке пары совмещенных голографических интерферограмм бокового сдвига с одинаковыми ( $\xi_1 = \xi_2$ ) (рис.3,а) и различающимися ( $\xi_1 \neq \xi_2$ , причем  $|\xi_1 - \xi_2| \ll \xi_1$ ) (рис.3,б) частотами. Интерференционная картина на рис.3,в получена при оптической обработке пары оптически сопряженных голографических интерферограмм бокового сдвига, которые использовались для получения интерференционной картины, приведенной на рис.3,б. Отношение изгиба интерференционной полосы к периоду для интерферограммы,

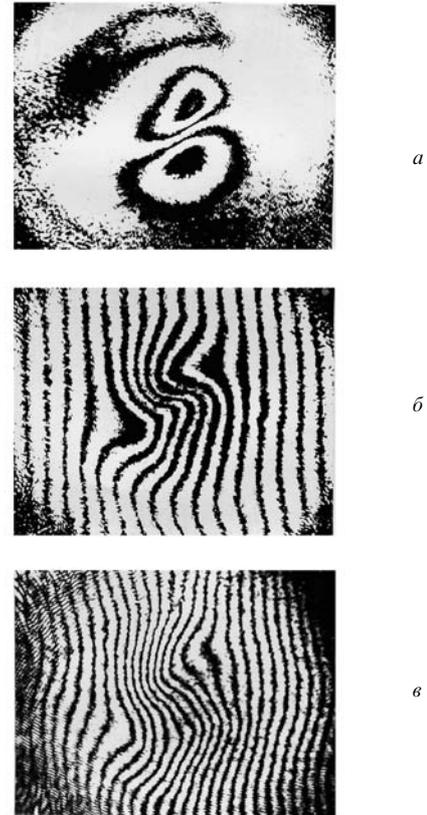


Рис.3. Интерференционные картины, полученные при оптической обработке совмещенных (а, б) и оптически сопряженных (в) голографических интерферограмм бокового сдвига.

приведенной на рис.3,в, в два раза больше, чем для предыдущей интерферограммы (рис.3,б).

В заключение хотелось бы отметить, что в случае недостаточного сдвига интерференционных полос для дальнейшего повышения чувствительности можно использовать перезапись исходных голографических интерферограмм бокового сдвига по методике, описанной в работе [13].

1. Waetzmann E. *Annalen der Physik*, **39**, 1042 (1912).
2. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д. Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
3. Нугуманов А.М., Смирнов Р.В., Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **30**, 435 (2000).
4. Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 891 (2001).
5. Туев А.Ф. *Оптич. ж.*, **4**, 75 (1993).
6. Гусев В.Г. *Оптический ж.*, **64**, 48 (1997).
7. Toker G.R., Levin D. *Appl. Opt.*, **37**, 5162 (1998).
8. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 517 (2002).
9. Комиссарук В.А. *Оптика и спектроскопия*, **16**, 1055 (1964).
10. Ляликов А.М. *Квантовая электроника*, **35**, 290 (2005).
11. Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов* (Л.: Наука, 1979).
12. Белозеров А.Ф. В сб.: *Матер. второй Всес. школы по голографии* (Л., 1971, с. 109).
13. Швидер Ж. В сб.: *Матер. третьей Всес. школы по голографии* (Л., 1972, с. 247).