

07;12

## Безабберационная голографическая интерферометрия бокового сдвига

© А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
230023 Гродно, Белоруссия  
e-mail: lyalikov@inbox.ru

(Поступило в Редакцию 10 сентября 2003 г. В окончательной редакции 27 декабря 2004 г.)

Рассмотрена возможность устранения оптических aberrаций при исследовании волновых фронтов, восстановленных с одно- двухэкспозиционной голограмм, методом интерферометрии бокового сдвига. Исключение оптических aberrаций происходит в муаровой картине при наложении двух интерферограмм бокового сдвига, полученных с использованием определенных волн, дифрагированных на исходных голограммах. Показано, что при использовании одноэкспозиционной голограммы исключаются только оптические неоднородности подложки, а двухэкспозиционной — дополнительно и aberrации системы регистрации голограмм. Приведены экспериментальные результаты, подтверждающие работоспособность методики при использовании низкокачественных подложек голограмм.

### Введение

Волновой фронт, восстановленный с голограммы, может быть исследован различными оптическими методами [1,2]. Это позволяет с одной голограммы исследуемого объекта получать двухлучевые интерферограммы и интерферограммы сдвига с любыми настройками опорных полос, а также различные теневые картины, что в конечном счете значительно увеличивает объем получаемой информации. Если при получении двухлучевых интерферограмм компенсация aberrаций системы регистрации голограмм и неоднородностей подложек голограмм не вызывает особых сложностей [1], то для метода интерферометрии сдвига и теневых способов приходится сталкиваться со значительными затруднениями. Это связано с тем, что обычно интерферограмма сдвига или теневая картина образуется при использовании только одной волны, восстановленной с голограммы. При получении теневых картин для компенсации aberrаций системы регистрации голограмм и их подложек ранее были предложены способы, позволяющие частично [3–5] или полностью [6,7] решить данную проблему. При получении интерферограмм сдвига для полной компенсации оптических искажений необходимо использовать как минимум пару голограмм и систему оптического сопряжения [6,8], что значительно усложняет эксперимент.

Интерферометрия сдвига в настоящее время находит довольно широкое распространение в различных областях науки и техники, причем используются как классические, так и голографические варианты интерферометров сдвига [9–13].

В настоящей работе предложены способы устранения оптических искажений подложек голограмм, а также aberrаций системы регистрации голограмм при получении интерферограмм бокового сдвига с использованием волновых фронтов, восстановленных с голограмм. Данные способы значительно расширяют возможности

голографической интерферометрии бокового сдвига при использовании низкокачественных подложек для регистрируемых голограмм, а также снижают требования к aberrационным характеристикам оптических систем.

Предположим, что волновой фронт, прошедший исследуемый фазовый объект, зарегистрирован голографическим способом. Рассмотрим случаи получения интерферограмм сдвига с исключением оптических искажений при использовании одно- и двухэкспозиционной голограмм.

### Схема эксперимента

На рис. 1 приведена оптическая схема получения безабберационных интерферограмм бокового сдвига, общая для случая одно- и двухэкспозиционной голограмм. Последние устанавливались в положение 1 и освещались коллимированным пучком света от гелий-неонового лазера. В задней фокальной плоскости объектива 2 диафрагмой 3 выделялась восстановленная волна. Объективом 4 восстановленная волна коллимировалась и направлялась в четырехзеркальный интерферометр бокового сдвига 5. Конструкция интерферометра позволяла регулировать частоту опорных полос и величину бокового сдвига в сдвиговых интерферограммах, регистрируемых в плоскости 6. Плоскость регистрации сдвиговых интерферограмм оптически сопрягалась объективами 2, 4 с голограммой 1.

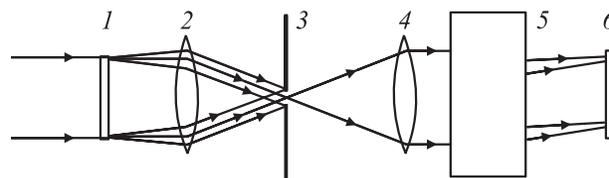


Рис. 1. Оптическая схема получения безабберационных интерферограмм бокового сдвига.

## Одноэкспозиционная голограмма

Амплитудное пропускание одноэкспозиционной голограммы, зарегистрированной в линейных условиях [2] для случая ориентации полос перпендикулярно оси  $x$ ,

$$\tau_1 \sim 1 + \cos[2\pi\xi_n x + \varepsilon + \varphi]. \quad (1)$$

Здесь  $\xi_n$  — несущая частота голографических полос, равная  $\xi_n = 1/T$ , где  $T$  — период голографических полос;  $\varepsilon$  — искажения фазы абберрациями системы регистрации;  $\varphi$  — изменения фазы, вызванные исследуемым объектом.

Предположим, что одноэкспозиционная голограмма (1) освещается коллимированным пучком света так, что по нормали к голограмме восстанавливается в первом порядке дифракции волна вида

$$A_1 = a_1 \exp[i(\chi + \varepsilon + \varphi)], \quad (2)$$

где  $\chi$  — искажения фазы оптическими неоднородностями подложки носителя голограммы.

Из (2) видно, что кроме полезного сигнала, описываемого функцией  $\varphi$ , волновой фронт имеет искажения фазы  $(\chi + \varepsilon)$  вследствие неоднородностей подложки носителя голограммы и абберраций системы регистрации. Волна вида (2) выделяется диафрагмой 3 (рис. 1) и вводится в интерферометр бокового сдвига 5. Для реализации рассматриваемого способа исключения оптических абберраций необходимо, чтобы регистрируемая интерферограмма в плоскости 6 была настроена на конечные опорные полосы. Это достигается тем, что кроме относительного сдвига между интерферирующими пучками еще задается и угол, который определяет несущую частоту опорных полос. В этом случае распределение интенсивности в интерферограмме бокового сдвига

$$I_1 \sim 1 + \cos[2\pi\xi_1 x + \Delta\chi + \Delta\varepsilon + \Delta\varphi], \quad (3)$$

где  $\xi_1$  — несущая частота опорных полос,  $\Delta\chi = \chi - \chi'$ ,  $\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon'$ ,  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi'$ .

Штрихом отмечены функции, описывающие изменения волнового фронта, одной волны, сдвинутой относительно другой при получении интерферограммы бокового сдвига. Измеряемый сигнал искажен неоднородностями подложки голограммы  $\Delta\chi$  и абберрациями системы регистрации голограммы  $\Delta\varepsilon$ .

Для случая одноэкспозиционной голограммы можно исключить только оптические искажения, вносимые подложкой голограммы. Для этого дополнительно к интерферограмме (3) регистрируется в том же интерферометре с такой же величиной сдвига и с настройкой на конечные опорные полосы еще одна интерферограмма сдвига, но с использованием прямопрошедшей (дифрагированной в нулевой порядок) голограмму (1) волны. Волновой фронт такой волны деформирован только неоднородностями подложки голограммы и его комплексная амплитуда

$$A_0 = a_0 \exp(i\chi), \quad (4)$$

где  $a_0$  — действительная амплитуда прямопрошедшей волны.

Распределение интенсивности в интерферограмме сдвига

$$I_0 \sim 1 + \cos[2\pi\xi_1 x + \Delta\chi]. \quad (5)$$

Исключение оптических искажений вследствие неоднородностей подложки голограммы (1) достигается двумя путями: при регистрации поочередно двух интерферограмм бокового сдвига (3) и (5) на один общий носитель или на два отдельных носителя. Во втором случае после химической обработки отдельные носители точно совмещаются.

Несмотря на то что в первом случае муаровая картина получается сложением, а во втором — умножением амплитудных пропусканий высокочастотных структур опорных полос интерферограмм сдвига, рисунок муаровой картины в двух случаях одинаков [14,15]. Для повышения видности муаровой картины может быть дополнительно использована фильтрация пространственных частот. Обычно при освещении совмещенных интерферограмм сдвига отверстием в диафрагме, установленной в задней фокальной плоскости объектива, выделяется первый порядок дифракции. Можно показать [14,15], что в двух возможных случаях муаровая картина будет описываться выражением

$$I_{10} \sim 1 + \cos[\Delta\varepsilon + \Delta\varphi]. \quad (6)$$

Искажения подложек голограммы (1) в муаровой картине (6) устранено. Как видно из (6), при использовании одноэкспозиционной голограммы исключить влияние абберраций системы регистрации голограмм не удается.

## Двухэкспозиционная голограмма

Для исключения оптических искажений, связанных с абберрациями системы регистрации голограммы на один общий носитель, голограмма экспонируется дважды: с исследуемым объектом и без объекта. При второй экспозиции изменяют несущую частоту голографических полос на величины  $\xi_m$ , отличающуюся от несущей частоты голографических полос первой экспозиции  $\xi_n$  настолько, чтобы при последующем восстановлении волновых фронтов было удобно отделять друг от друга световые пучки диафрагмой 3 (рис. 1). Амплитудное пропускание такой двухэкспозиционной голограммы при выполнении линейных условий регистрации

$$\tau_2 \sim 2 + \cos[2\pi\xi_n x + \varepsilon + \varphi] + \cos[2\pi\xi_m x + \varepsilon]. \quad (7)$$

При исключении оптических искажений вследствие неоднородностей подложки носителя двухэкспозиционной голограммы (7) и оптической системы регистрации голограмм в отличие от ранее рассмотренного случая одноэкспозиционной голограммы при регистрации второй интерферограммы сдвига используется волна, дифрагированная в первом порядке на второй голографической структуре двухэкспозиционной голограммы (7). Комплексная амплитуда этой волны

$$A_2 = a_2 \exp[i(\chi + \varepsilon)], \quad (8)$$

где  $a_2$  — действительная амплитуда.

Распределение интенсивности в интерферограмме бокового сдвига

$$I_2 \sim 1 + \cos[2\pi\xi_1x + \Delta\chi + \Delta\varepsilon]. \quad (9)$$

Исключение оптических aberrаций осуществляется аналогично случаю одноэкспозиционной голограммы при регистрации интерферограмм бокового сдвига на отдельные носители с последующим их совмещением или при регистрации двухэкспозиционного снимка. Однако в отличие от (6) муаровая картина будет описываться несколько другим выражением

$$I_{12} \sim 1 + \cos[\Delta\varphi], \quad (10)$$

где кроме неоднородностей подложки также исключены и aberrации системы регистрации голограмм.

Использование двухэкспозиционных голограмм позволяет получать интерферограммы бокового сдвига исследуемого объекта с полной компенсацией aberrаций как системы регистрации голограмм, так и неоднородностей подложки ее носителя. Однако этот вариант голографической интерферометрии бокового сдвига за счет использования двухэкспозиционной регистрации голограммы с изменением несущей частоты полос в общей сложности более трудоемок в реализации, чем с использованием одноэкспозиционной регистрации, и, следовательно, отдавать ему предпочтение следует в случаях aberrаций системы регистрации голограмм, соизмеримых с величиной полезного измеряемого сигнала.

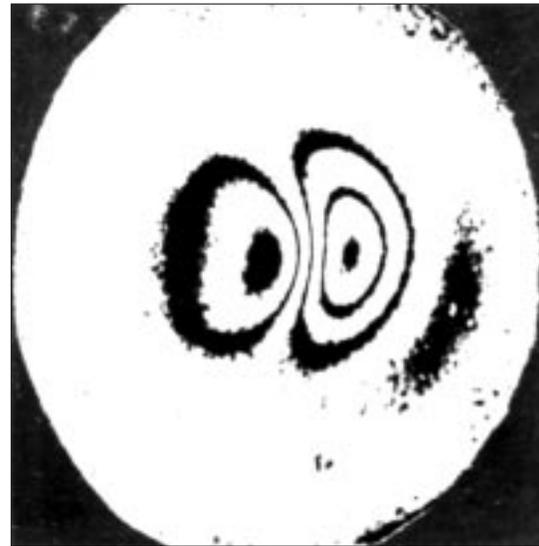
## Экспериментальные результаты

Рассмотренная методика исключения aberrаций была экспериментально апробирована при исследовании зон плавления плоских образцов полиметилметакрилата, подвергающихся термической обработке. Регистрировалась двухэкспозиционная голограмма (первая экспозиция до термической обработки, а вторая после) в интерферометре Маха–Цендера на голографическую пленку ФГ-690. Диаметр наблюдаемого поля составлял 26 мм. Волновые aberrации системы регистрации голограмм  $\sim 0.3\lambda$ . Для изменения несущей частоты полос при регистрации двухэкспозиционной голограммы между экспозициями опорный пучок разворачивался.

Интерферограмма бокового сдвига регистрировалась при восстановлении волновых фронтов с двухэкспозиционной голограммы и экспонировании интерферограмм бокового сдвига на общий носитель по вышерассмотренной методике. При регистрации интерферограмм бокового сдвига в четырехзеркальном сдвиговом интерферометре задавался боковой сдвиг интерферирующих волновых фронтов 3.0 мм. На рис. 2 приведена интерферограмма бокового сдвига с настройкой на бесконечно широкую полосу, визуализирующая оптические неоднородности подложки носителя исходной двухэкспозиционной голограммы (боковой сдвиг 3.0 мм). Данная интерферограмма подтверждает низкое качество



**Рис. 2.** Интерферограмма бокового сдвига с настройкой на бесконечно широкую полосу, визуализирующая оптические неоднородности подложки носителя исходной двухэкспозиционной голограммы.



**Рис. 3.** Муаровая картина интерферограммы бокового сдвига исследуемого образца полиметилметакрилата с исключением как неоднородностей подложки носителя голограммы, так и aberrаций оптической системы ее регистрации.

пленки. На рис. 3 приведена муаровая картина, полученная при освещении двухэкспозиционного снимка, с компенсацией оптических искажений как подложки носителя исходной двухэкспозиционной голограммы, так и системы ее регистрации. Для повышения видности полос муаровой картины использовалась фильтрация пространственных частот (выделялся первый порядок дифракции). Приведенная муаровая картина (рис. 3)

визуализирует поведение функции  $\Delta\varphi$  при исключении как неоднородностей подложки носителя голограммы, так и аберраций оптической системы ее регистрации.

## Заключение

Таким образом, применение рассмотренной безабберрационной голографической интерферометрии бокового сдвига может обеспечить более высокую точность измерений при исследовании фазовых объектов в случае использования низкокачественных подложек носителей голограмм и оптических систем их регистрации с дешевой оптикой.

## Список литературы

- [1] *Вьенто Ж.-Ш., Смиглинский П., Руайе А.* Оптическая голография. Развитие и применение. М.: Мир, 1073. 212 с.
- [2] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [3] *Гудмен Дж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
- [4] *Спорник Н.М.* // ОМП. 1976. № 1. С. 74–75.
- [5] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 1990. Т. 68. № 1. С. 197–199.
- [6] *Спорник Н.М., Белозеров А.Ф., Бывальцев А.И.* // А.с. СССР. № 39654. БИ. 1973. № 36.
- [7] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 1993. Т. 75. № 1. С. 161–165.
- [8] *Тувев А.Ф.* // Оптич. журнал. 1993. № 4. С. 75–77.
- [9] *Иванов П.В., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И.* // Квантовая электрон. 1999. Т. 27. № 1. С. 78–80.
- [10] *Schwider J.* // Optik. 1998. Vol. 108. N 4. P. 181–196.
- [11] *Соколов В.И.* // Квантовая электрон. 2001. Т. 31. № 10. С. 891–896.
- [12] *Гусев В.Г.* // Оптич. журнал. 1992. № 4. С. 3–7.
- [13] *Гусев В.Г.* // Оптич. журнал. 1997. Т. 64. № 11. С. 48–54.
- [14] Голографические неразрушающие исследования / Под ред. Р.К. Эрфа. М.: Машиностроение, 1979. 446 с.
- [15] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.