

Визуализация деформаций волнового фронта, искаженного фазовым объектом, методом интерферометрии последовательного двойного бокового сдвига

А.М.Ляликов

Предложен метод муаровой визуализации деформаций волнового фронта светового пучка, прошедшего через исследуемый фазовый объект. Данный метод основан на получении интерферограмм двойного сдвига и позволяет получать в реальном времени с двукратным увеличением чувствительности муаровые картины исследуемого фазового объекта, в которых поведение полос идентично поведению полос в обычной двухлучевой интерферометрии с опорной волной. Приведены результаты апробации метода при исследовании зон термической обработки пластины из полиметилметакрилата.

Ключевые слова: фазовый объект, волновой фронт, интерферограмма, муаровая картина.

В некоторых практических случаях интерферометрия сдвига не только не уступает интерферометрии с опорной волной сравнения, но и является предпочтительней последней. Интерферометры сдвига имеют пониженную чувствительность к вибрациям и просты в юстировке оптической схемы. Из всего многообразия способов осуществления сдвига между одинаковыми волновыми фронтами наибольшее распространение получили те, в которых используются интерферометры бокового сдвига [1, 2], широко применяемые в настоящее время в различных областях науки и техники [3–7]. Однако отмеченные преимущества интерферометрии сдвига в некоторой степени компенсируются усложнением расшифровки интерференционной картины. Поведение полос в интерференционной картине, полученной методом интерферометрии бокового сдвига, зависит как от соотношения сдвига и размеров исследуемого объекта, так и от самого сдвига. Если исследуемый объект занимает только часть рабочего поля и его размеры меньше величины сдвига, то полосы на интерферограммах получаются такими же, как и в двухлучевой интерферометрии с опорной волной [8]. Этот частный случай интерферометрии заслуживает особого внимания, т. к. одновременно объединяет в себе все достоинства данных двух методов. В первую очередь это касается исключения сложности расшифровки интерференционной картины, свойственной интерферометрии сдвига. Для отмеченного частного случая интерферометрии бокового сдвига поведение интерференционных полос визуализирует непосредственно изменения фазы волны исследуемым объектом.

Применение принципов голографии при получении интерферограмм бокового сдвига и их оптической обработке значительно расширило возможности метода сдвиговой интерферометрии [9–14]. Здесь необходимо отметить как компенсацию aberrаций оптической системы

и произвольную настройку полос в восстановленных интерференционных картинах, так и возможность повышения чувствительности измерений.

В настоящей работе рассмотрен основанный на получении интерферограмм двойного сдвига метод визуализации деформаций волнового фронта, прошедшего через исследуемый фазовый объект. Данный метод применим для бокового сдвига, превышающего размеры исследуемого фазового объекта, при этом поперечные размеры самого исследуемого объекта в направлении сдвига не должны превышать $1/3$ диаметра зондирующего светового пучка. Метод позволяет получать в реальном времени с двукратным увеличением чувствительности муаровые картины для исследуемого фазового объекта, идентичные по характеру полос интерферограммам в обычной двухлучевой интерферометрии с опорной волной.

На рис.1 приведена схема, поясняющая реализацию предложенного муарового метода визуализации искажений волнового фронта исследуемым фазовым объектом с помощью интерферометрии последовательного двойного бокового сдвига.

Предположим, что исследуемый фазовый объект I (рис.1) расположен в центральной зоне зондирующего светового пучка и его поперечный размер вдоль направления сдвига между интерферирующими пучками не превышает $1/3$ диаметра светового пучка. В этом случае сдвиг s может быть равен $1/3$ диаметра светового пучка.

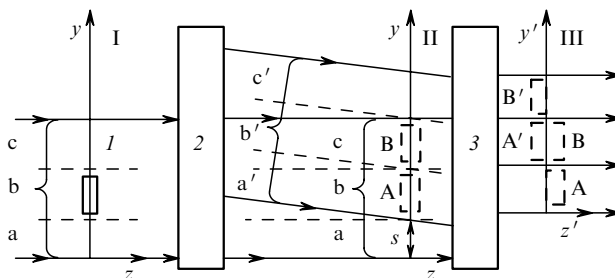


Рис.1. Схема реализации метода: I – исследуемый фазовый объект; 2, 3 – интерферометры бокового сдвига.

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

Система координат x, y в выходной плоскости I (рис.1), где находится исследуемый фазовый объект I , выбрана так, что ось y совпадает с направлением сдвига между интерферирующими пучками, который задается интерферометром сдвига 2. Ось z совпадает с направлением распространения зондирующего светового пучка. Для описания искажений фазы волны, зондирующей исследуемый фазовый объект I , волновую поверхность удобно разбить вдоль оси y на три зоны шириной s . На рис.1 границы зон отмечены штриховыми линиями, а сами зоны обозначены буквами a, b, c . В зонах a и c волновая поверхность является невозмущенной. Если зондирующий пучок распространяется строго вдоль оси z и имеет плоский волновой фронт, то выражение для искажений его фазы $\Phi(x, y)$ фазовым объектом записывается в виде

$$\Phi(x, y) = \begin{cases} \text{const} & \text{для зон } a, c, \\ \varphi(x, y) & \text{для зоны } b, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varphi(x, y)$ – искажения фазы, характеризующие деформацию плоского волнового фронта вследствие прохождения зондирующим пучком фазового объекта I .

Важной особенностью рассматриваемого метода является то, что при формировании интерферограммы бокового сдвига в плоскости II (рис.1) требуется, чтобы она была настроена на интерференционные полосы конечной ширины. Интерферограмма бокового сдвига образуется при наложении двух волн, прошедших через исследуемый фазовый объект. Искажения фазы $\Phi_1(x, y)$ для первой волны с точностью до постоянной фазы описываются выражением (1), а для второй (вследствие наклона светового пучка при настройке на полосы конечной ширины) – выражением

$$\Phi_2(x, y) = \begin{cases} 2\pi\eta y & \text{для зон } a', c', \\ 2\pi\eta y + \varphi(x, y - s) & \text{для зоны } b', \end{cases} \quad (2)$$

где a', b', c' – соответствующие зоны поверхности в сдвинутом пучке; $\eta = (\cos \beta)/\lambda$; β – угол между направлением распространения пучка и осью y ; λ – длина волны. Для упрощения описания методики предполагается, что интерферирующие пучки расположены в плоскости yz .

Из рис.1 видно, что интерференционная картина бокового сдвига в плоскости II образуется на участке А при наложении возмущенной зоны b первой волны с искажениями фазы $\Phi_1(x, y)$ и невозмущенной зоны a' второй волны с искажениями $\Phi_2(x, y)$, а для участка В – при наложении невозмущенной зоны первой волны и возмущенной зоны b' второй волны. Для исключения эффектов, связанных с рефракцией световых пучков на исследуемом объекте I , плоскость II интерферограммы бокового сдвига и плоскость I нахождения объекта оптически сопрягаются.

Вследствие этого поведение интерференционных полос как на участке А, так и на участке В будет визуализировать функцию $\varphi(x, y)$, определяющую деформацию плоского волнового фронта исследуемым фазовым объектом. Подтверждением этого является интерферограмма бокового сдвига (рис.2), полученная при настройке на бесконечно широкую полосу ($\eta = 0$ в формуле (2)). В качестве объекта использовалась пластина из полиметилметакрилата после локальной термической обработки.

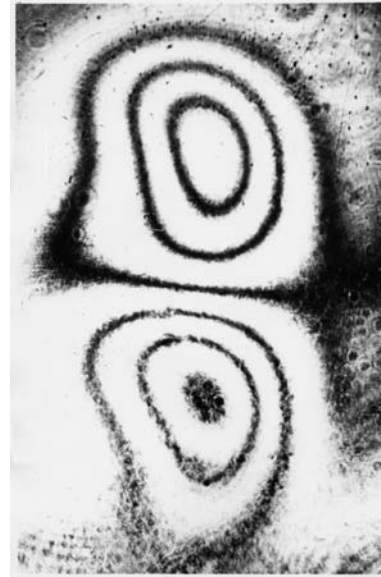


Рис.2. Интерферограмма бокового сдвига исследуемой пластины из полиметилметакрилата, полученная при настройке на бесконечно широкую полосу.

Размер зоны термической обработки (ширина участка А или В) не превышал бокового сдвига между интерферирующими пучками. Как видно из интерференционной картины, полосы на участках А и В практически идентичны (с точностью до нескомпенсированных аберраций).

В предложенном методе двойного последовательного сдвига в плоскости II реализуется описанная выше сдвиговая интерферограмма с настройкой на полосы конечной ширины. Распределение интенсивности в такой интерференционной картине бокового сдвига с учетом формул (1) и (2) можно представить для участков А и В соответственно в виде

$$I(x, y) \sim \begin{cases} \cos^2 \left[\pi\eta y - \frac{1}{2} \varphi(x, y) \right] & \text{для участка А,} \\ \cos^2 \left[\pi\eta y + \frac{1}{2} \varphi(x, y - s) \right] & \text{для участка В,} \end{cases} \quad (3)$$

Интерференционные полосы в данной интерферограмме ориентированы перпендикулярно оси y , а их период равен $1/\eta$.

Далее с помощью второго интерферометра бокового сдвига 3 (рис.1) в плоскости III, оптически сопряженной с плоскостью II, накладывают друг на друга два изображения интерференционных картин вида (3), смещенные относительно друг друга вдоль оси y' на величину s так, чтобы участок А' картины, полученной в результате сдвига во втором интерферометре, накладывался на участок В другой интерференционной картины. Для упрощения описания муаровой картины ось z' системы координат смещают относительно оси z на величину s , как это показано на рис.1.

При сложении интерференционных картин, настроенных на полосы конечной ширины, в плоскости III образуется муаровая картина. Для упрощения интерпретации полос в муаровой картине желательно нарушить когерентность между парами пучков, образующими смещенные интерференционные картины бокового сдвига в плоскости III. Для этого достаточно в плоскости II ус-

тановить диффузный рассеиватель (матовое стекло) и сформировать на нем изображение интерференционной картины бокового сдвига (3). Тогда, пренебрегая эффектами образования и интерференции спекл-структур [15], в плоскости III получаем распределение интенсивности в муаровой картине в виде

$$I(x, y) + I(x, y + s) \sim \cos^2 \left[\pi \eta y - \frac{1}{2} \varphi(x, y) \right] \quad (4)$$

$$\times \cos^2 \left[\pi \eta y + \frac{1}{2} \varphi(x, y) \right] \sim I_{\Sigma}(x, y) + \cos(2\pi \eta y) \cos \varphi(x, y),$$

где в $I_{\Sigma}(x, y)$ сгруппированы члены, не существенные для описания муаровой картины. Система полос муаровой картины представляет собой области изображения, в которых видность наложенных друг на друга интерференционных полос с периодом $1/\eta$ равна нулю. Видность интерференционных полос минимальна при условии обращения в нуль второго косинуса в выражении (4). Следовательно, уравнения семейства муаровых полос, наблюдаемых в плоскости III, можно представить в виде

$$\varphi(x, y) = \pi \left(N + \frac{1}{2} \right), \quad (5)$$

где $N = 0, 1, 2, \dots$ – номер муаровой полосы. Выражение (5) относится к центру муаровой полосы.

Из уравнений (5) видно, что муаровая картина непосредственно визуализирует функцию $\varphi(x, y)$, описывающую деформацию волнового фронта исследуемым фазовым объектом. При этом следует отметить, что расстояние между муаровыми полосами соответствует изменению искажений фазы $\varphi(x, y)$ на π , а не на 2π , как в случае двухлучевой интерферометрии с опорной волной сравнения. Это свидетельствует о том, что чувствительность муаровой картины в два раза выше, чем интерференционной, полученной двухлучевым методом интерферометрии с опорной волной сравнения.

На рис.3 приведена фотография муаровой картины исследуемой пластины из полиметилметакрилата, полученная по описанному выше методу. При реализации методики в качестве интерферометров сдвига 2 и 3 (рис.1) использовались четырехзеркальные интерферометры типа Маха – Цендера, позволяющие регулировать как боковой сдвиг, так и период полос в интерферограммах бокового сдвига. При регистрации интерферограмм сдвига



Рис.3. Муаровая картина, визуализирующая в реальном времени с двукратным увеличением чувствительности искажения фазы зондирующей волны при прохождении через исследуемую пластину из полиметилметакрилата.

в плоскости II период полос равнялся 0.25 мм. Из сравнения муаровой картины (рис.3) и интерферограммы бокового сдвига (рис.2) видно, что в первой вследствие двукратного увеличения чувствительности число полос также возросло в два раза.

1. Waetzmann E. *Annalen der Physik*, **39**, 1042 (1912).
2. *Оптический производственный контроль*. Под ред. Д.Малакары (М.: Машиностроение, 1985).
3. Шехтман В.Н., Родинов А.Ю., Пельменев А.Г. *Оптика и спектроскопия*, **76**, 988 (1994).
4. Башкин А.С., Коротков П.И., Максимов Ю.П. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 786 (1997).
5. Santhanakrishnan T., Palanisamy P.K., Sirohi R.S. *Appl. Opt.*, **37**, 3447 (1998).
6. Schwider J. *Optik*, **108**, 181 (1998).
7. Соколов В.И. *Квантовая электроника*, **31**, 891 (2001).
8. Комиссарук В.А. В сб.: *Исследования пространственных газодинамических течений на основе оптических методов. Труды ВИА им. Н.Е.Жуковского* (М., 1971, с. 121).
9. Kulkarni V.G. *Opt. and Laser Technol.*, **11**, 269 (1979).
10. Вест Ч. *Голографическая интерферометрия* (М.: Мир, 1982).
11. Гусев В.Г. *Оптический журн.*, **64**, 48 (1997).
12. Toker G., Levin D. *Appl. Opt.*, **37**, 5162 (1997).
13. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **93**, 517 (2002).
14. Ляликов А.М. *Оптика и спектроскопия*, **96**, 148 (2004).
15. Франсон М. *Оптика стекол* (М.: Мир, 1980).