

07;12

Анализ измерительных возможностей интерферометрических способов при исследовании „слабой“ оптической неоднородности с малыми поперечными размерами

© И.А. Лявшук, А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
230023 Гродно, Белоруссия
E-mail: amlialikov@grsu.by

(Поступило в Редакцию 6 мая 2010 г.)

Проведен сравнительный анализ основных интерференционных способов, которые наиболее перспективны для исследования оптических неоднородностей с малыми поперечными размерами. На основе анализа формы интерференционных полос для двух наиболее распространенных способов интерферометрии: двулучевой с опорной волной и бокового сдвига — показано, что при боковом сдвиге, превышающем геометрические размеры, сдвиговая интерферометрия имеет удвоенную чувствительность по сравнению с двулучевой интерферометрией с опорной волной и наиболее перспективна для оценки величины „слабых“ оптических неоднородностей.

Интерферометрия относится к наиболее чувствительным способам исследования фазовых объектов [1,2]. Интерференционные исследования фазовых объектов с малыми поперечными размерами сводятся как к их визуализации, так и измерению их различных параметров. Такие объекты при определенных размерах называют микрообъектами [3–5]. В ряде задач при исследовании таких объектов измерения сводятся к определению величины набега фазы световой волны вследствие прохождения объекта или отражения от его поверхности. Примером является исследование и аттестация меры высоты ступени в нанометровом диапазоне [6]. При исследовании „слабых“ оптических неоднородностей особенно с малыми поперечными размерами всегда возникает проблема с высокой точностью измерений. Так как в современных интерферометрах обычно интерференционная картина, представляющая аналоговый сигнал, оцифровывается и с помощью компьютера обрабатывается, то, очевидно, для обеспечения минимальной погрешности измерений необходимо достичь максимальной чувствительности отображения измеряемого параметра в интерференционной картине [7,8].

В настоящей работе проведен сравнительный анализ основных интерференционных способов, которые наиболее перспективны для исследования оптических неоднородностей с малыми поперечными размерами. Проанализированы формы интерференционных полос, отображающих оптическую неоднородность малых поперечных размеров, для двух наиболее распространенных способов интерферометрии: двулучевой с опорной волной и бокового сдвига [1,2] с точки зрения их измерительных возможностей. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что при боковом сдвиге, превышающем геометрические размеры, сдвиговая интерферометрия имеет удвоенную чувствительность по сравнению с двулучевой интерферометрией с опорной

волной и наиболее перспективна для оценки величины „слабых“ оптических неоднородностей.

Если размеры исследуемой оптической неоднородности ограничены и меньше диаметра светового пучка, то при описании фазы $\Phi(x, y)$ световой волны, прошедшей такую оптическую неоднородность, волновой фронт можно разбить на зоны:

- 1) возмущенную оптической неоднородностью и определяемую функцией $\varphi(x, y)$,
- 2) невозмущенную, фаза в которой постоянна.

Предположим, что система координат xuz выбрана таким образом, что оптическая неоднородность расположена в I и IV квадрантах плоскости xu , а ось z совпадает с направлением распространения зондирующей световой волны. Предположим, что максимальное значение набега фазы, вызванное оптической неоднородностью, соответствует абсциссе x_0 , как это приведено на рис. 1, а. В этом случае распределение фазы зондирующей световой волны вдоль оси x можно представить в виде:

$$\Phi(x) = \begin{cases} \varphi(x) & \text{для } x > 0, \\ \text{const} & \text{для } x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

В двулучевой интерферометрии с опорной волной интерференционная картина образуется при наложении световой волны, прошедшей исследуемую оптическую неоднородность, и опорной волны. В этом случае распределение освещенности при настройке на полосы конечной ширины, ориентированные параллельно оси x , можно представить как

$$I(x, y) = \begin{cases} I_0 + V \cos\left(\frac{2\pi y}{P} + \varphi(x)\right) & \text{для } x > 0, \\ I_0 + V \cos\left(\frac{2\pi y}{P}\right) & \text{для } x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

где I_0 — освещенность фона, V — контрастность полос, P — период полос. Уравнения „темных“ интерференционных полос в картине (2) также можно записать для

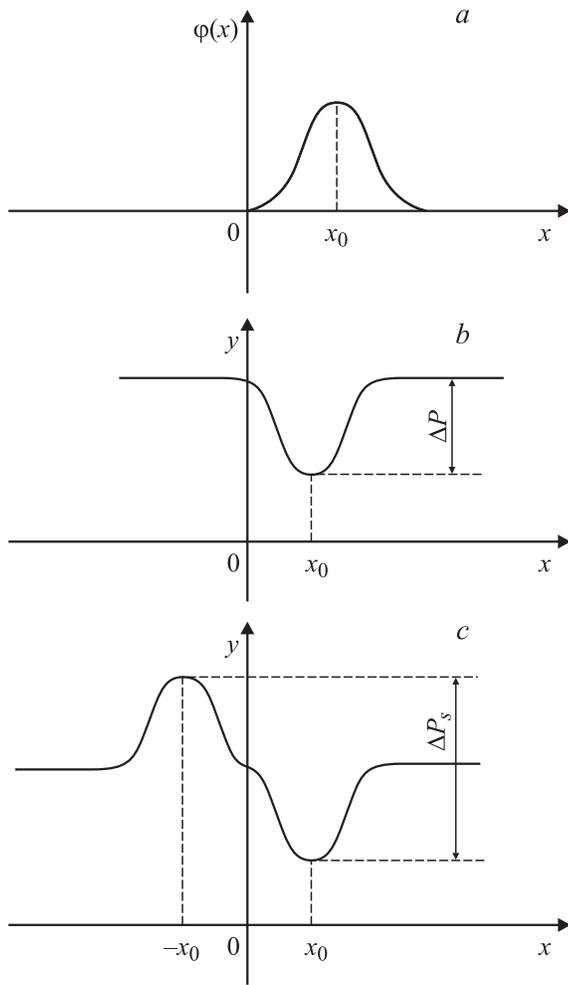


Рис. 1. Вид функции $\varphi(x)$, описывающей оптическую неоднородность (а), неоднородность и вызванное данной оптической неоднородностью поведение интерференционной полосы для двулучевой интерферометрии с опорной волной (b) и для интерферометрии бокового сдвига (c).

двух зон:

$$y = \begin{cases} P(2N + 1) - \frac{P}{2\pi} \varphi(x) & \text{для } x > 0, \\ P(2N + 1) & \text{для } x < 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $N = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Вид интерференционных полос в двулучевой интерферометрии, согласно (3), в области оптической неоднородности в определенном масштабе повторяет поведение функции $\varphi(x, y)$.

В интерферометрии бокового сдвига интерференционная картина образуется при наложении двух волн, полученных при делении по амплитуде световой волны, прошедшей исследуемую оптическую неоднородность. Для отображения оптической неоднородности эти волны смещаются в пространстве. Распределение освещенности при настройке на полосы конечной ширины, ориентированные параллельно оси x , при относительном сдвиге s вдоль оси x интерферирующих волн можно

представить как

$$I_s(x, y) = I_0 + V \cos \left(\frac{2\pi y}{P} + \varphi(x) - \varphi(x + s) \right). \quad (4)$$

Как это было показано ранее [9,10] в случае сдвига s , превышающего геометрические размеры оптической неоднородности, ход интерференционных полос в сдвиговой интерферограмме в области оптической неоднородности идентичен ходу полос в двулучевой интерферограмме с опорной волной, при этом уравнения „темных“ интерференционных полос в картине (3) также можно записать для двух зон

$$y = \begin{cases} P(2N + 1) - \frac{P}{2\pi} \varphi(x) & \text{для } x > 0, \\ P(2N + 1) + \frac{P}{2\pi} \varphi(x + s) & \text{для } x < 0. \end{cases} \quad (5)$$

На рис. 1, b представлен ход интерференционной полосы для двулучевой интерферометрии с опорной волной, на рис. 1, c — для интерферометрии бокового сдвига.

Измерение величины $\varphi(x_0)$ по изгибу полос в интерференционных картинах вида (2) или (4), интерференционные полосы которых описываются соответственно уравнениями (3) и (5), позволяет оценить значение оптической неоднородности. Для интерферограммы, полученной по методу двулучевой интерферометрии с опорной волной, изгиб полосы определяется расстоянием ΔP (рис. 1, b). Величина оптической неоднородности определяется по формуле

$$\varphi(x_0) = \frac{2\pi}{P} \Delta P. \quad (6)$$

Для интерферометрии бокового сдвига в случае сдвига s , превышающего геометрические размеры оптической неоднородности, при образовании интерференционной картины происходит наложение зоны волнового фронта, возмущенного оптической неоднородностью, с зоной — невозмущенной объектом. Для этого случая, согласно выражению (5), интерференционная полоса имеет максимум и минимум, разнесенные на величину s вдоль оси x , как это изображено на рис. 1, c. Такая форма интерференционной полосы может быть использована для повышения чувствительности измерения величины оптической неоднородности. Для такой интерферограммы величина $\varphi(x_0)$ может быть определена по расстоянию между максимумом и минимумом интерференционной полосы одного порядка. В этом случае определяется расстояние ΔP_s (рис. 1, c):

$$\Delta P_s = \frac{P}{2\pi} [\varphi(x_0) + \varphi(x_0 + s)]. \quad (7)$$

Ввиду того что функции $\varphi(x_0)$ и $\varphi(x_0 + s)$ смещены только вдоль оси x , а величина ΔP_s измеряется вдоль оси y , то справедливо соотношение $\varphi(x_0) = \varphi(x_0 + s)$.

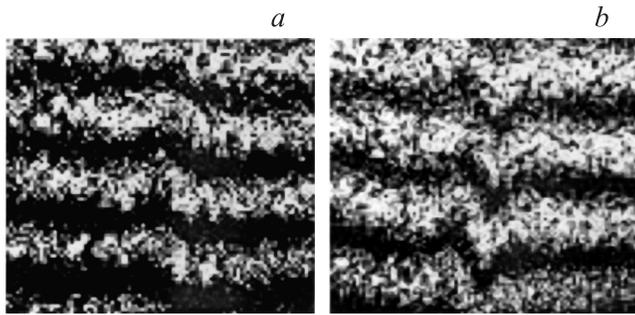


Рис. 2. Интерферограммы „слабой“ оптической неоднородности типа нитевидной свили, полученные методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной (*a*) и интерферометрии бокового сдвига (*b*).

В этом случае величина оптической неоднородности определяется по формуле

$$\varphi(x_0) = \frac{\pi}{P} \Delta P_s. \quad (8)$$

При сравнении выражений (8) и (6) видно, что чувствительность измерения оптической неоднородности методом сдвиговой интерферометрии в случае превышения величины бокового сдвига линейных размеров оптической неоднородности в два раза выше, чем для двухлучевой интерферометрии с опорной волной. Удвоение чувствительности измерений сдвиговой интерферометрии делает этот метод более перспективным по сравнению с двухлучевой интерферометрией с опорной волной, особенно при исследовании „слабых“ оптических неоднородностей с малыми поперечными размерами.

На рис. 2 приведены интерферограммы „слабой“ оптической неоднородности типа нитевидной свили шириной $600 \mu\text{m}$, расположенной в стеклянной пластине. Первая интерферограмма (рис. 2, *a*) получена методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной, а вторая — методом сдвиговой интерферометрии при величине бокового сдвига, равной ширине нитевидной свили (рис. 2, *b*). Приведенные интерферограммы подтверждают описанный характер поведения интерференционных полос при исследовании фазовых неоднородностей с малыми поперечными размерами методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной и сдвиговой интерферометрии.

Таким образом, при боковом сдвиге, превышающем геометрические размеры оптической неоднородности, сдвиговая интерферометрия имеет удвоенную чувствительность по сравнению с двухлучевой интерферометрией с опорной волной и наиболее перспективна для оценки величины „слабых“ оптических неоднородностей.

Список литературы

- [1] Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 297 с.
- [2] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [3] Захарьевский А.Н., Кузнецова А.Ф. // Цитология. 1961. Т. 3. № 2. С. 213–224.
- [4] Тычинский В.П. // УФН. 2001. Т. 171. № 6. С. 649–662.
- [5] Константинов В.Б., Бабенко В.А., Малый А.Ф. // ЖТФ. 2007. Вып. 12. С. 92–95.
- [6] Королев А.Н., Коротков В.И., Лукин А.Я. и др. // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 29–33.
- [7] Ahn J., Kim J.A., Kang C.S., Kim J.W. et al. // Optics Express. 2009. Vol. 17. N 23. P. 21 042–21 049.
- [8] Woffling S., Lanzmann E., Ben-Yosef N. et al. // Appl. Optics. 2006. Vol. 45. N 12. P. 2586–2596.
- [9] Ляликов А.М. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. № 3. С. 290–292.
- [10] Ляликов А.М. // Опт. и спектр. 2005. Т. 99. № 1. С. 151–155.