

УДК 681.787

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

С.С. Ануфрик, И.А. Лявшук, А.М. Ляликов

*Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки  
Купалы», Беларусь*

*230023, Гродно, Ожешко ул., 22, E-mail: amlialikov@grsu.by*

## **СРАВНЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ДЛЯ СЛУЧАЯ «СЛАБОЙ» ОПТИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАЛЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ**

### **АННОТАЦИЯ**

На основе анализа формы интерференционных полос для двух наиболее распространенных способов интерферометрии: двухлучевой с опорной волной и бокового сдвига показано, что при боковом сдвиге, превышающем геометрические размеры, сдвиговая интерферометрия имеет удвоенную чувствительность по сравнению с двухлучевой интерферометрией с опорной волной и наиболее перспективна для оценки величины «слабых» оптических неоднородностей.

**ИНТЕРФЕРОМЕТР, ОПОРНАЯ ВОЛНА. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ, БОКОВОЙ СДВИГ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

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 их размерах называют микрообъектами [3-5]. В ряде встречающихся задач при исследовании таких объектов измерения сводятся лишь к определению величины набега фазы световой волны, вследствие прохождения объекта или отражением 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 недостаточной 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 данной 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: двухлучевой 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

двухлучевой интерферометрии с опорной волной и наиболее перспективна для оценки величины «слабых» оптических неоднородностей.

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ФОРМИРОВАНИЯ ИНТЕРФЕРОГРАММ

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: возмущенную оптической неоднородностью и определяемую функцией  $\varphi(x, y)$  и 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 набег 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

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

В двухлучевой интерферометрии с опорной волной интерференционная картина образуется при наложении световой волны, прошедшей исследуемую оптическую неоднородность, и опорной волны.

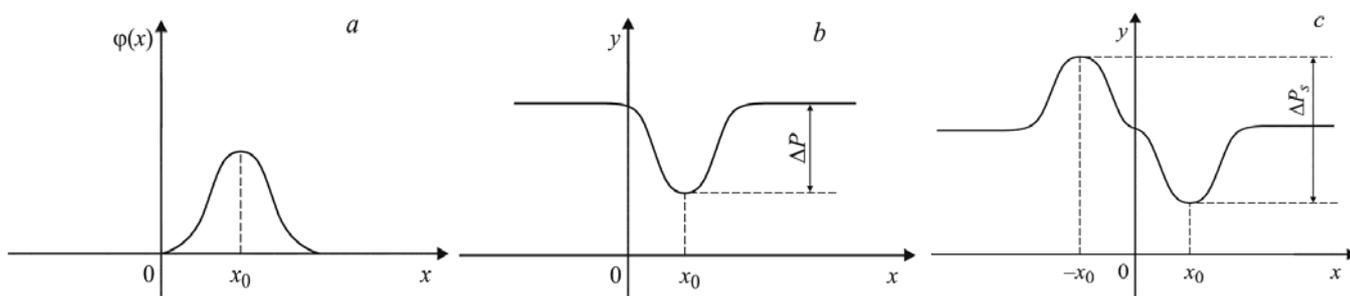


Рис. 1. Вид функции  $\varphi(x)$ , описывающей оптическую неоднородность (а), неоднородность и вызванное данной оптической неоднородностью поведение интерференционной полосы для двухлучевой интерферометрии с опорной волной (б) и для интерферометрии бокового сдвига (с).

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 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 двухлучевой 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 двухлучевой 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 двухлучевой интерферометрии с опорной волной, на рис.1,b – 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 величину оптической неоднородности. Для интерферограммы, полученной по методу двухлучевой интерферометрии с опорной волной, изгиб полосы определяется расстоянием  $\Delta P$  (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  $\Delta P_s$  (рис.1,с).

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

Ввиду того, что функции  $\varphi(x_0)$  и  $\varphi(x_0 + s)$  смещены только вдоль оси  $x$ , а величина  $\Delta P_s$  измеряется вдоль оси  $y$ , то справедливо  $\varphi(x_0) = \varphi(x_0 + s)$ . В этом случае величина оптической неоднородности определяется по формуле

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

Сравнивая выражения (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.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

На рис.2 приведены интерферограммы «слабой» оптической неоднородности типа нитевидной свили шириной 600 мкм, расположенной в стеклянной пластине. Первая интерферограмма (рис.2,а) получена методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной, а вторая – методом сдвиговой интерферометрии при величине бокового сдвига, равного ширине нитевидной свили (рис.2,б).

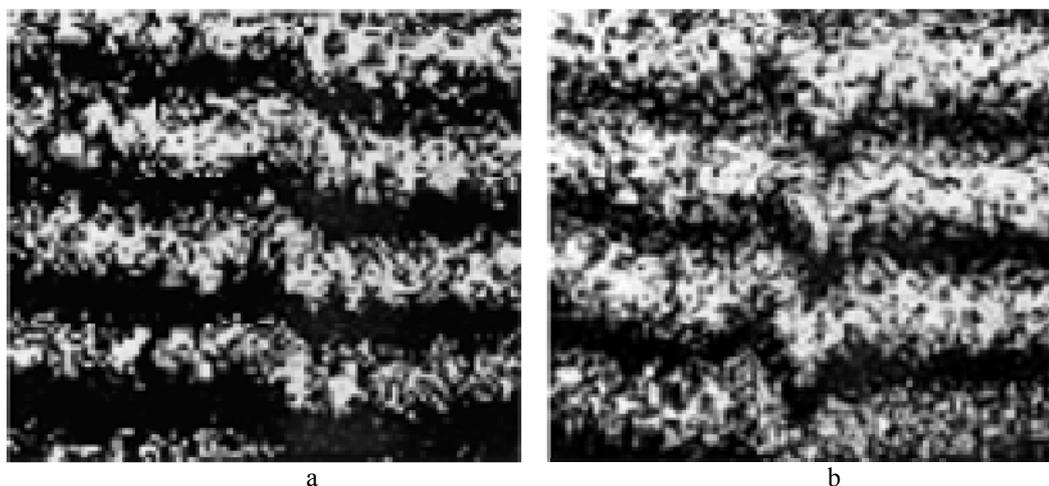


Рис. 2. Интерферограммы „слабой“ оптической неоднородности типа нитевидной свили, полученные методом двухлучевой интерферометрии с опорной волной (а) и интерферометрии бокового сдвига (б).

Приведенные интерферограммы подтверждают вышеописанный 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. Малакары Д. 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. Т.77. 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. № 23. P. 21042-21049.
8. Wolfing S., Lanzmann E., Ben-Yosef N. [et al] // Applied Optics. 2006. Vol. 45. № 12. P. 2586-2596.
9. Лялик А.М. // Квант. электрон. 2005. Т. 35. №.3. С.290 -292.
10. Лялик А.М. // Опт. и спектр. 2005. Т. 99. №.1 С. 151-155.

S.S. Anufrik, I.A. Lyavshuk, A.M. Lyalikov

*Yanka Kupala State University, Belarus*  
230023, Grodno, Ozheshko str., 22, E-mail: amlialikov@grsu.by

## ANALYSIS OF INTERFEROMETRIC METHODS FOR THE CASE OF “WEAK” OPTICAL INHOMOGENEITY WITH SMALL TRANSVERSE DIMENSIONS

*It is shown based on analysis of interference fringes for the two most widely used interferometric methods (two-beam interferometry with a reference wave and lateral-shear interferometry) that in the case of a lateral shift exceeding the geometrical size, lateral-shear interferometry shows twice as high sensitivity as that of double-beam interferometry with a reference wave and is more promising for estimating the size of “weak” optical inhomogeneities.*

INTERFEROMETRY, REFERENCE WAVE, SENSITIVITY, LATERAL SHIFT