

07;12

## Получение оптимальной настройки интерференционных полос при повышении чувствительности измерений высоты фазовой ступени

© А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 23 октября 2007 г. В окончательной редакции 28 февраля 2008 г.)

Рассмотрены условия получения оптимальной настройки интерференционных полос, соответствующие перпендикулярному их направлению к границе раздела фазовой ступени, при повышении чувствительности измерений за счет совмещения пары голографических интерферограмм. Отмечено, что наиболее простым вариантом в реализации метода является использование в качестве второй интерферограммы, копии первой, но развернутой относительно границы раздела фазового скачка ступени.

PACS: 42.40.Kw

Методы голографической интерферометрии относятся к группе наиболее чувствительных способов регистрации изменений параметров исследуемого объекта [1–4]. Применение различных способов повышения чувствительности измерений позволяет с высокой точностью измерять малые разности хода световых пучков, включительно до сотых и тысячных долей длины волны [5–7].

В ряде случаев интерференционные измерения сводятся к определению высоты фазовой ступени. Такого рода задачи встречаются при измерении толщины тонкой пленки [8,9], профиля показателя преломления среза оптических волокон [10,11], длин плоскопараллельных концевых мер [12], при исследовании элементов микроструктуры, например, мер высоты ступени в нанометровом диапазоне [13] и т.д. Для всех вышеотмеченных случаев оптимальной настройкой интерференционной картины при ее количественной обработке являются полосы равной толщины, перпендикулярные границе скачка фазы зондирующей объектной волны, т.е. перпендикулярные границе раздела фазовой ступени.

На рис. 1 приведена типичная интерференционная картина такой настройки интерференционных полос, где

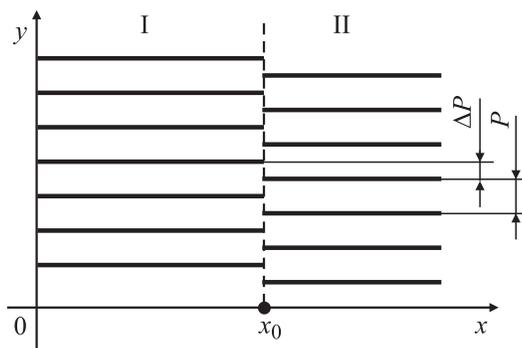


Рис. 1. Интерференционная картина фазовой ступени с ориентацией полос перпендикулярно границе фазового скачка.

изображение края фазовой ступени ориентировано параллельно оси  $y$ . Высота фазовой ступени определяется по относительному смещению  $\Delta P/P$  ( $\Delta P$  — абсолютное смещение полосы,  $P$  — период полос интерференционной картины) при переходе через границу скачка фазы, т.е. из области I в область II (рис. 1).

Для повышения чувствительности измерений высоты фазовой ступени за счет увеличения относительного смещения  $\Delta P/P$  полос можно использовать метод совмещенных интерферограмм. Последние представляют собой интерферограммы одной и той же фазовой ступени, но с противоположными смещениями полос при переходе через границу скачка фазы. Пара таких интерферограмм может быть получена за счет регистрации второй интерферограммы после зеркального разворота опорного пучка относительно объектного [3,4]. Следует отметить, что методы повышения чувствительности измерений обычно имеет смысл использовать при условии  $\Delta P < P$ .

Если специфика исследуемой фазовой ступени такова, что отсутствует изменение фазы в направлении оси  $y$ , т.е. величина  $\Delta P$  постоянна для всех порядков полос наблюдаемой интерференционной картины, то может быть использован более простой в реализации подход для получения второй интерферограммы. При развороте интерферограммы фазовой ступени на  $180^\circ$  относительно границы скачка фазы она преобразуется в интерферограмму со взаимно противоположным смещением полос в зоне перехода границы фазового скачка, чем в интерферограмме до разворота. Ранее такой подход был предложен для удвоения чувствительности измерений при исследовании аномальной дисперсии интерференционным методом Пуччианти [14].

В данной работе рассмотрен простой способ получения оптимальной настройки интерференционных полос при повышении чувствительности измерений высоты фазовой ступени за счет совмещения пары голографи-

ческих интерферограмм со взаимно противоположными смещениями полос в зоне фазового скачка исследуемой фазовой ступени. Амплитудное пропускание интерферограммы фазовой ступени для случая настройки полос произвольным образом можно представить в виде

$$\tau_1 \sim \cos[\mathbf{K}_1 \mathbf{r} + \varphi], \quad (1)$$

где  $\mathbf{r} = x\mathbf{i} + y\mathbf{j}$  — радиус-вектор произвольной точки интерферограммы,  $\mathbf{K}_1$  — вектор интерференционных полос, ориентированный в плоскости интерферограммы перпендикулярно полосам, модуль которого  $|\mathbf{K}_1| = 2\pi/P_1$ ;  $P_1$  — период интерференционных полос,  $\varphi$  — изменение фазы исследуемой фазовой ступени. Последняя функция определяет изменение оптического пути  $\Delta l$  при переходе из области I в II (рис. 1). Для случая, приведенного на рис. 1, эту функцию можно представить

$$\varphi = \begin{cases} 0, & \text{для } x < x_0, \\ \frac{2\pi A \Delta l}{\lambda}, & \text{при } x \geq x_0, \end{cases} \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент пропорциональности, который зависит от вида фазовой ступени (отражательная, пропускающая) и типа интерферометра (количества проходов объектного пучка),  $\lambda$  — длина волны источника света. Искомую величину  $\Delta l$  определяют по относительному смещению интерференционных полос при переходе из области I в II (рис. 1).

$$\Delta l = \frac{\lambda \Delta P}{AP}. \quad (3)$$

Для повышения чувствительности измерений величины  $\Delta l$  за счет увеличения относительного смещения интерференционных полос  $\Delta P/P$  будем использовать совмещение интерферограммы  $\tau_1$  вида (1) с интерферограммой этой же фазовой ступени, но со взаимно противоположным смещением полос в зоне фазового скачка исследуемой фазовой ступени. Амплитудное пропускание такой интерферограммы должно иметь вид

$$\tau_2 \sim \cos[\mathbf{K}_2 \mathbf{r} - \varphi], \quad (4)$$

$\mathbf{K}_2$  — вектор интерференционных полос.

После совмещения интерферограмм (1), (4) их освещают коллимированным пучком света и фильтрующей диафрагмой в задней фокальной плоскости объектива выделяют первые порядки дифракции одного знака по ранее описанной голографической методике [4]. В этом случае наблюдается интерференционная картина с распределением освещенности

$$I_{12} \sim 1 + \cos[(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2) \mathbf{r} + 2\varphi]. \quad (5)$$

Следует отметить, что для осуществления фильтрации дифракционных порядков, наблюдаемых в задней

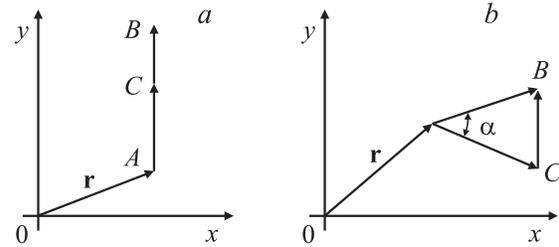


Рис. 2. Схемы взаимного расположения векторов  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  пары совмещенных интерферограмм.

фокальной плоскости объектива, периоды полос совмещенных интерферограмм  $P_1$  и  $P_2$  не должны превышать 0.2 mm.

Относительное смещение интерференционных полос  $\Delta P/P$  в картине (5) увеличено в два раза, о чем свидетельствует коэффициент перед функцией  $\varphi$ , по сравнению со смещением полос в исходных интерферограммах (1) или (4). Настройка интерференционных полос в картине (5) определяется вектором  $\mathbf{K}_{12} = \mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2$ . Для ориентации интерференционных полос перпендикулярно границе фазового скачка, т.е. параллельно оси  $x$  для случая, приведенного на рис. 1, необходимо, чтобы вектор  $\mathbf{K}_{12}$  был параллелен оси  $y$ .

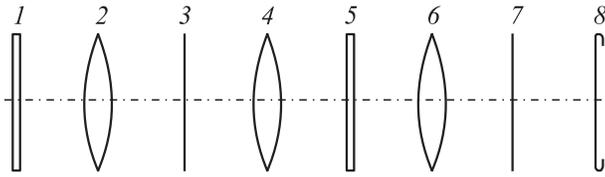
Для получения такой ориентации интерференционных полос возможны два наиболее простых варианта взаимного расположения векторов  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$ , приведенные на рис. 2.

В первом случае векторы  $\mathbf{K}_1 = \overline{AB}$  первой (1) и  $\mathbf{K}_2 = \overline{AC}$  второй (4) интерферограмм (рис. 2, а) должны быть коллинеарными и параллельными оси  $y$ , но при этом различаться по модулю. Период полос в интерференционной картине повышенной чувствительности (5) определяется модулем вектора  $|\mathbf{K}_{12}| = |\overline{CB}|$ :

$$P = \left| \frac{P_1 P_2}{P_2 - P_1} \right|. \quad (6)$$

Во втором случае (рис. 2, б) векторы  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  могут быть расположены под некоторым углом друг к другу. Наибольший интерес с практической точки реализации представляет случай, когда векторы  $\mathbf{K}_1 = \overline{AB}$  и  $\mathbf{K}_2 = \overline{AC}$  равны по модулю ( $P_1 = P_2$ ). В этом случае они должны составлять с осью  $ox$  одинаковые по величине, но противоположные по знаку углы — соответственно  $\alpha/2$  и  $-\alpha/2$ .

Такую реализацию взаимного расположения векторов  $\mathbf{K}_1$  и  $\mathbf{K}_2$  можно обеспечить, если с первой интерферограммой использовать такую же (копию), но развернутую относительно границы раздела зон I и II фазовой ступени на  $180^\circ$ . В этом случае используются две идентичные интерферограммы фазовой ступени. Вторая интерферограмма может быть получена обычным копированием или за счет регистрации интерференционной картины фазовой ступени с использованием пары совмещенных регистраторов. После разворота одной



**Рис. 3.** Схема оптической обработки оптически сопряженных интерферограмм: 1,5 — интерферограммы; 2,4,6 — объективы; 3,7 — диафрагмы; 8 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

из интерферограмм пара совмещается так, чтобы зоны фазового скачка на первой и второй интерферограммах совпали. В этом случае распределение освещенности в интерференционной картине двукратно повышенной чувствительности определяется выражением (5), а период полос модулем вектора  $|\mathbf{K}_{12}| = |\overline{CB}|$ :

$$P_{12} = \frac{P_1}{2 \sin(\alpha/2)}. \quad (7)$$

Для достижения большей чувствительности измерений такая пара интерферограмм может быть оптически обработана в оптическом анализаторе совмещенных голограмм [4], схема которого приведена на рис. 3. Для этого первая интерферограмма и вторая, копия первой, но развернутая, как это было отмечено выше, устанавливаются в оптически сопряженных объективами 2, 4 плоскостях 1, 5. Изображение первой интерферограммы совмещается со второй интерферограммой до совпадения зон фазового скачка. После освещения первой интерферограммы 1 коллимированным пучком света в задней фокальной плоскости объектива 2 фильтрующей диафрагмой 3 выделяются комплексно сопряженные  $\pm 1$ -е порядки дифракции. Выделенные волны коллимируются объективом 4 и освещают вторую интерферограмму 5. Дифрагированные волны в комплексно сопряженные  $\pm 1$ -е порядки дифракции на второй интерферограмме 5 выделяются в задней фокальной плоскости объектива 6 второй фильтрующей диафрагмой 7 и в плоскости 8 формируют интерференционную картину вида

$$I'_{12} \sim 1 + \cos[2(\mathbf{K}_1 - \mathbf{K}_2)\mathbf{r} + 4\varphi].$$

Чувствительность измерений у такой интерферограммы повышена уже в четыре раза по сравнению с исходными интерферограммами вида (1) или (4). Период интерференционных полос, ориентированных перпендикулярно границе фазового скачка ступени, определяется выражением

$$P'_{12} = \frac{P_1}{4 \sin \alpha/2}.$$

Таким образом, оптимальным вариантом в реализации метода повышения чувствительности измерений высоты фазовой ступени за счет совмещения пары интерферограмм является использование в качестве второй интерферограммы, копии первой, но развернутой, по

отношению к первой интерферограмме, относительно границы раздела фазовой ступени. При использовании такой пары интерферограмм настройка интерференционных полос всегда имеет оптимальную ориентацию, перпендикулярную границе фазового скачка.

## Список литературы

- [1] *Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В.* Голографическая интерферометрия. М.: Наука, 1977. 339 с.
- [2] Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1958. 400 с.
- [3] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. 504 с.
- [4] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н. и др.* Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [5] *Карташев А.И., Эцин И.Ш.* // УФН. 1972. Т. 106. № 4. С. 687–721.
- [6] *Скоков И.В.* Многолучевые интерферометры в измерительной технике. М.: Машиностроение, 1989. 256 с.
- [7] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // УФН. 1991. Т. 161. № 1. С. 143–164.
- [8] *Кацнельсон Л.Б.* // ОМП. 1969. № 4. С. 50–58.
- [9] *Герасимова Л.А.* // Оптич. журн. 1997. Т. 64. № 11. С. 104–106.
- [10] *Костюк А.Ф., Курчатова Ю.А., Майборода Ю.П. и др.* Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем. М.: Радио и связь, 1987. 225 с.
- [11] *Лазарев Л.П., Мировицкая С.Д.* Контроль геометрических и оптических параметров волокон. М.: Радио и связь, 1988. 280 с.
- [12] *Афанасьев В.А.* Оптические измерения. М.: Высш. шк., 1981. 229 с.
- [13] *Королев А.Н., Коротков В.И., Лукин А.Я. и др.* // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 29–33.
- [14] *Островский Ю.И.* // ОМП. 1962. № 11. С. 35–39.