

07;12

## Интерференционная дефектоскопия периодических объектов в реальном времени с регулированием чувствительности измерений

© А.М. Ляликов, М.Ю. Серенко

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,  
230023 Гродно, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 4 июня 1998 г.)

Предложена методика интерферометрических исследований макроскопических дефектов периодического объекта в реальном времени с регулированием чувствительности измерений. Показана возможность компенсации аберраций интерферометра при использовании эталонной голограммы. Приведены интерференционные картины с различной чувствительностью измерений, визуализирующие дефекты металлического экрана, составленного из двух совмещенных решеток.

### Введение

Дефекты объектов с периодической структурой могут быть исследованы муаровыми и голографическими методами [1–3]. На поверхность эталонного и контролируемого объекта может быть спроецировано изображение решетки. В этом случае, применяя двойную экспозицию и пространственную фильтрацию, получают контурно-разностные муаровые полосы, визуализирующие дефекты поверхности [1]. Используется также метод нанесения на поверхность исследуемого образца светочувствительного покрытия и последующей регистрации на нем изображений решеток [2,4]. Для получения контурных линий рельефа поверхности в реальном времени применяется одновременное проецирование на исследуемую поверхность двух решеток, расположенных симметрично линии визирования [4]. Исследована возможность в этой схеме быстро регулировать расстояние между контурами рельефа в муаровой картине за счет выбора фильтруемых порядков дифракции используемых для проекции дифракционных решеток [5].

Существует класс объектов с четко выраженной периодичностью пропускания или текстуры поверхности. Пространственное положение поверхности с периодической текстурой визуализируется в реальном времени в виде картины муаровых полос, образующихся при совмещении изображения объекта с амплитудной решеткой [6]. Макроскопические дефекты поверхности щелевой маски телевизионного кинескопа визуализируются в реальном времени муаровым методом при совмещении изображения контролируемой маски с негативом изображения эталонной [3]. В последней работе для визуализации дефектов поверхности с повышением чувствительности измерений применяется также голографический метод, в котором негативы эталонной и контролируемой маски, расположенные в оптически сопряженных плоскостях в оптическом анализаторе, используются для получения интерференционной картины при выделении симметричных порядков дифракции на негативах. Возможно также применение других голографических методик. Отклонения формы контролируемой поверхности маски кинеско-

па от эталонной визуализируются при перезаписи негативов изображений этих поверхностей с фильтрацией комплексно-сопряженных порядков дифракции [7]. В обеих работах для визуализации с увеличением чувствительности измерений дефектов объекта с периодическим пропусканием использовали предварительно полученные негативы эталонного и контролируемого объекта. Для произвольной регулировки ширины и ориентации опорных полос также используется предварительная перезапись одного из негативов в специальной схеме, что усложняет процесс визуализации.

В работе рассмотрена возможность визуализации в реальном времени дефектов объекта со сложной периодической структурой пропускания при непосредственном получении двухлучевой интерферограммы одной из составляющих сложного объекта в одном из боковых порядков дифракции.

### Экспериментальная установка

На рис. 1, а приведена оптическая схема экспериментальной установки, собранной на базе теневого прибора ИАБ-451. За основу взята схема лазерного интерферометра с совмещенными широким объектным и узким опорным пучками [8]. Установка позволяет сформировать интерференционную картину объекта с периодическим пропусканием при использовании одного из боковых порядков дифракции света на объекте и регулярного опорного пучка, а также сформировать изображение объекта и его спектра. Узкий пучок от лазера 1 делится в осветительной приставке 2 на два, которые направляются после отражения от зеркала 3 в коллиматорный объектив 4, 5 теневого прибора. Один из пучков, нерасширенный, проходит рабочую зону по краю, минуя объект 6, и направляется приемным объективом 7, 8 и зеркалом 9 в приемную приставку 10. Второй пучок преобразуется в широкий параллельный пучок и просвечивает объект 6. Объект представляет собой транспарант, выполненный в виде наложенных друг на друга линейных решеток. Оптическая схема приемной приставки 10 приведена на

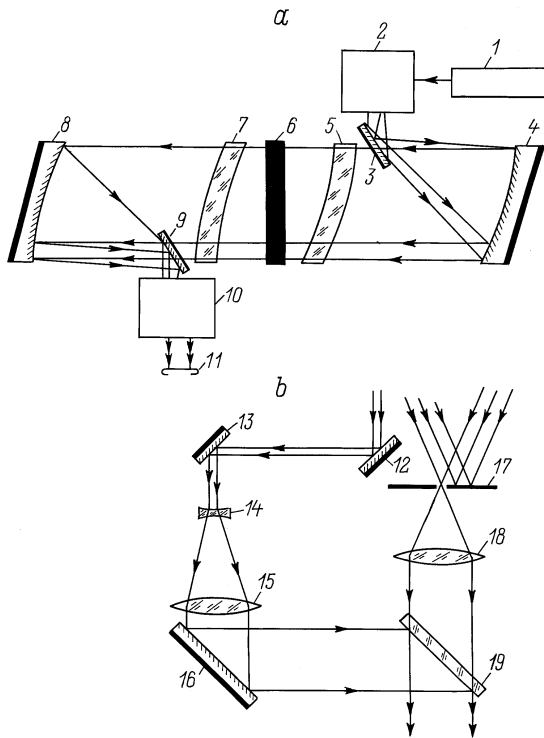


Рис. 1. Оптическая схема экспериментальной установки (а) и приемной приставки (б).

рис 1, б. В приемной приставке узкий опорный пучок после отражения от зеркал 12 и 13 расширяется телескопической системой 14, 15 и направляется зеркалом 16 на светоделитель 19. Диафрагма 17 выделяет один из пучков, дифрагированных на объекте. Выделенный на диафрагме объектный пучок соединяется с опорным пучком на светоделитель 19. Объектив 18 имеет регулирующую подвижку и служит для выравнивания кривизны опорной и объектной волны. Интерференционная картина наблюдается в реальном времени в плоскости 11 или регистрируется на фотопленке, установленной в плоскости, оптически сопряженной с исследуемым объектом.

Исследуемый объект б с периодическим пропусканием состоит в общем случае из большого числа наложенных друг на друга линейных решеток. При освещении объекта параллельным пучком из всего сложного пространственного спектра объекта выделяется в плоскости фильтрации 17 составляющая, соответствующая одному из боковых порядков дифракции на одной из решеток. Выделенная световая волна, искаженная дефектами решетки, используется для образования в плоскости регистрации 11 двухлучевой интерференционной картины, визуализирующей дефекты объекта. Регулировка чувствительности измерений осуществляется выбором соответствующего порядка дифракции, выделяемого в плоскости фильтрации. Ширина и ориентация интерференционных полос регулируется за счет наклонов зеркал 16 и 19 в приемной приставке.

## Описание методики

Рассмотрим теперь процесс образования интерференционной картины, а также особенности и некоторые возможности метода.

Амплитудное пропускание композитного транспаранта, составленного из  $N$  наложенных друг на друга амплитудных решеток, можно представить

$$\tau(x, y) = \tau_1(x, y)\tau_2(x, y) \times \dots \times \tau_N(x, y). \quad (1)$$

Система координат  $xu$  совмещена с плоскостью транспаранта, а пропускание отдельной решетки в общем случае описывается в виде разложения в ряд Фурье [9]

$$\tau_k(x, y) = \sum_{-\infty}^{+\infty} a_{kn} \exp\{i[2\pi n(\xi_k x + \eta_k y) + n\varphi_k(x, y)]\}. \quad (2)$$

Здесь  $a_{kn}$  — коэффициенты разложения;  $\xi_k$  и  $\eta_k$  — пространственные частоты решетки;  $\varphi_k(x, y)$  — искажение периодической решетки, связанное с дефектами объекта. На вид функции  $\varphi_k(x, y)$  влияют локальные отклонения формы поверхности объекта от плоскости и искажения регулярности пространственной частоты решетки.

При освещении транспаранта (1) по нормали плоской волной с комплексной амплитудой  $a_0$  распределение комплексных амплитуд дифрагированных волн имеет вид

$$A(x, y) = a_0 \tau_1(x, y)\tau_2(x, y) \times \dots \times \tau_N(x, y). \quad (3)$$

Выражение (3) описывает набор волн, дифрагированных в  $n$ -е порядки на различные углы  $\alpha_k$  и  $\beta_k$  на каждой отдельной решетке, причем направляющие косинусы волн равны  $\cos \alpha_{kn} = n\lambda\xi_k$ ,  $\cos \beta_{kn} = n\lambda\eta_k$ ,  $\lambda$  — длина освещающей волны. Ввиду нелинейности (2) кроме волн, дифрагированных на отдельных решетках, будет наблюдаться и перекрестная дифракция [10].

Рассмотрим волну, дифрагированную в  $n$ -порядке на  $k$ -й решетке,

$$A_{kn}(x, y) \sim a_{kn} \exp\left\{i\left[2\pi\left(\frac{\cos \alpha_{kn}}{\lambda}x + \frac{\cos \beta_{kn}}{\lambda}y\right) + n\varphi_k(x, y)\right]\right\}. \quad (4)$$

Здесь  $a_{kn}$  — действительная амплитуда волны. Предположим, что эта волна выделяется и интерферирует с эталонной волной вида

$$A_0(x, y) = a_0 \exp\left[i2\pi\left(\frac{\cos \alpha_0}{\lambda}x + \frac{\cos \beta_0}{\lambda}y\right)\right], \quad (5)$$

где  $\cos \alpha_0 = \cos \alpha_{kn}$  и  $\cos \beta_0 = \cos \beta_{kn}$ .

Распределение освещенности в интерференционной картине описывается выражением

$$I(x, y) \sim 1 + \frac{2a_{kn}a_0}{a_{kn}^2 + a_0^2} \cos[n\varphi_k(x', y')], \quad (6)$$

где  $x'y'$  — система координат в плоскости регистрации.

Число полос на изображении объекта при настройке интерференционной картины на бесконечно широкую полосу, согласно выражению (6), равно

$$C = \frac{n[\varphi_k(x', y')]_{\max}}{2\pi}, \quad (7)$$

где  $[\varphi_k(x', y')]_{\max}$  — максимальное значение на площади транспаранта величины  $\varphi_k(x, y)$ , описывающей отличие реальной  $k$ -й решетки от идеальной.

Из формул (6) и (7) видно, что чувствительность измерений пропорциональна  $n$ . Это позволяет регулировать чувствительность измерений непосредственно при получении интерференционной картины выбором номера порядка дифракции, выделяемого диафрагмой  $I7$ . При определении знака  $\varphi_k(x', y')$  по интерференционной картине вида (6) возникает неопределенность, которая может быть устранена при получении интерференционной картины с настройкой на конечные полосы. При такой настройке направление искривления опорных полос в обе стороны визуализируется однозначно.

Для настройки интерференционной картины на конечные полосы при получении интерференционной картины изменяют наклон эталонной волны. Пусть наклон эталонной волны по отношению к (5) определится малыми углами  $\Delta\alpha$  и  $\delta\beta$

$$A_0(x, y) = a_0 \exp \left\{ i2\pi \left[ \frac{\cos(\alpha_0 + \Delta\alpha)}{\lambda} x + \frac{\cos(\beta_0 + \Delta\beta)}{\lambda} y \right] \right\}. \quad (8)$$

При этом распределение освещенности в интерференционной картине будет описываться выражением

$$I(x', y') \sim 1 + \frac{2aa_0}{a^2 + a_0^2} \cos \left[ 2\pi \left( \frac{\Delta\alpha \sin \alpha_0}{\lambda} x' + \frac{\Delta\beta \sin \beta_0}{\lambda} y' \right) + n\varphi_k(x', y') \right]. \quad (9)$$

Направление опорных полос определяется соотношением величин  $\Delta\alpha \sin \alpha_0$  и  $\Delta\beta \sin \beta_0$ , а период полос

$$T = \frac{\lambda}{\sqrt{(\Delta\alpha)^2 \sin^2 \alpha_0 + (\Delta\beta)^2 \sin^2 \beta_0}}. \quad (10)$$

## Аберрации интерферометра и их компенсация

Оценим меру влияния аберраций интерферометра на визуализацию дефектов периодических объектов. Критерием оценки может служить подход, применяемый в голографической интерферометрии [11].

С учетом аберраций объектной ветви интерферометра волна, дифрагированная в  $n$ -й порядок на  $k$ -й решетке

объекта  $b$ , запишется в виде

$$A_{kn}(x, y) \sim a_{kn} \exp \left\{ i \left[ \left( \frac{\cos \alpha_{kn}}{\lambda} x + \frac{\cos \beta_{kn}}{\lambda} y \right) + n\varphi_k(x, y) + \psi(x, y) \right] \right\}, \quad (11)$$

где  $\psi(x, y)$  — фазовые искажения волны, вызванные наличием аберраций.

Распределение освещенности в интерференционной картине вместо (6) теперь будет

$$I(x', y') \sim 1 + \frac{a_{kn}a_0}{a_{kn}^2 + a_0^2} \cos[n\varphi_k(x', y') + \psi(x', y')]. \quad (12)$$

Как следует из (12), в предложенном методе визуализации дефектов периодических объектов отношение полезного сигнала  $n\varphi_k(x', y')$  к искажениям  $\psi(x', y')$  пропорционально номеру  $n$  используемого порядка дифракции. При увеличении номера  $n$  выделяемого порядка с целью повышения чувствительности измерений влияние аберраций интерферометра будет уменьшаться. В интерферометрии считается, что смещения интерференционной полосы меньше 0.1 периода лежат в пределах погрешности измерений [12,13]. Следовательно, будем считать, что в предложенном методе аберрациями объектной ветви интерферометра, не превышающими  $0.2\lambda$ , при визуализации дефектов периодических объектов можно пренебречь. Аберрации большей величины необходимо компенсировать.

В голографической интерферометрии (фазовых объектов) компенсацию аберраций интерферометра осуществляют методами эталонных голограмм [11]. Сущность методов в следующем. Наряду с объектной голограммой, на которой записаны объектные искажения и аберрации интерферометра, получают эталонную голограмму, содержащую только аберрации интерферометра. При последующей совместной оптической обработке объектной и эталонной голограмм получают свободную от аберраций интерферограмму объекта.

Рассмотрим возможность компенсации аберраций интерферометра в предложенном методе интерференционной дефектоскопии периодических объектов при использовании эталонной голограммы. Предположим, что эталонная голограмма регистрируется в плоскости  $I1$  при интерференции эталонной волны вида (5) и объектной волны, распространяющейся вдоль оптической оси объектной ветки при отсутствии в ней транспаранта  $b$ ,

$$A'(x, y) = a_0 \exp[i\psi(x, y)].$$

При условии регистрации голограммы в линейных условиях пропускание голограммы после химической обработки

$$\tau_0(x', y') = 1 + \cos[2\pi n(\xi_k x' + \eta_k y') + \psi(x', y')]. \quad (13)$$

Предположим, что эталонная голограмма (13) устанавливается точно на прежнее место в плоскости  $I1$

и освещается объектной волной (11) и плоской волной  $A''(x', y') = a_0$ . В пространстве за голограммой вдоль нормали к ней будут распространяться две волны

$$B_1 = b_1, \quad B_2 = b_2 \exp[in\varphi_k(x', y')],$$

где  $b_1$  и  $b_2$  — амплитуды волн.

При фильтрации этих волн они создают интерференционную картину

$$I(x'', y'') \sim 1 + \cos[in\varphi_k(x'', y'')], \quad (14)$$

где  $x''y''$  — система координат, выбранная в плоскости наблюдения интерферограммы.

Как видно из выражения (14), в формировании интерференционной картины при использовании эталонной голограммы (13) абберационные искажения отсутствуют. Коэффициент увеличения чувствительности измерений, так же как и в (6), равен номеру выделяемого порядка дифракции  $n$ .

Рассмотрим теперь получение интерферограммы периодического объекта с компенсацией аббераций по методу оптически сопряженных голограмм без эталонного пучка с эталонной голограммой [11]. Предположим, что, как и ранее, эталонная голограмма (13) устанавливается в плоскости регистрации  $II$ , где она оптически сопряжена с объектом  $б$ . Предположим также, что в плоскости фильтрации  $I7$  выделяются волны, дифрагированные на объекте в комплексно-сопряженные порядки,

$$A_{kn} = a_{kn} \exp \left\{ i \left[ 2\pi n \left( \frac{\cos \alpha_k}{\lambda} x + \frac{\cos \beta_k}{\lambda} y \right) + \psi(x, y) + n\varphi_k(x, y) \right] \right\}, \quad (15)$$

$$A_{kn}^* \sim a_{kn} \exp \left\{ i \left[ 2\pi n \left( \frac{\cos \alpha_k}{\lambda} x + \frac{\cos \beta_k}{\lambda} y \right) + \psi(x, y) + n\varphi_k(x, y) \right] \right\}. \quad (16)$$

При освещении эталонной голограммы (13) волнами (15) и (16) вдоль нормали к голограмме будут распространяться волны, дифрагированные в  $\pm 1$ -е порядки, имеющие вид

$$B'_1 = \frac{1}{2} a_{kn} \exp[in\varphi_k(x', y')], \quad (17)$$

$$B'_2 = \frac{1}{2} a_{kn} \exp[-in\varphi(x', y')]. \quad (18)$$

Все остальные волны, образующиеся при этом, отличаются от волн (17) и (18) направлением распространения и могут быть удалены из пучка с помощью фильтрующей диафрагмы. Волны (17) и (18) образуют интерференционную картину

$$I \sim 1 + \cos[2n\varphi_k(x'', y'')]. \quad (19)$$

Как видно из выражения (19), этим методом можно компенсировать абберации интерферометра. При этом коэффициент увеличения чувствительности измерений вырос в 2 раза по сравнению с интерферограммой (14).

## Экспериментальная апробация

Вышеописанная методика была апробирована при исследовании металлического экрана, выполненного в виде наложенных друг на друга двух проволочных решеток. Период решеток  $T_1 = T_2 \approx 1$  mm, диаметр экрана 125 mm. При получении изображения экрана, его пространственного спектра, а также интерференционных картин в различных выделяемых порядках спектра экран устанавливается в положение  $б$ . На рис. 2,  $a$  приведен дифракционный спектр экрана, зарегистрированный в плоскости  $I7$ . Рабочие порядки спектра, соответствующие однократной дифракции на каждой решетке, расположены на снимке вдоль вертикальной и горизонтальной линий, пересекающихся в месте расположения центрального, самого яркого пучка нулевого порядка. Остальные порядки спектра появились в дифракционном спектре вследствие перекрестной дифракции. На рис. 2,  $b$  приведено увеличенное изображение участка экрана, зарегистрированное в плоскости  $II$  в отсутствие диафрагмы  $I7$ . Поскольку две решетки, из которых состоит экран, совмещены друг с другом, то волна, дифрагированная на любой из этих решеток в любой порядок дифракции  $n \neq 0$ , содержит информацию о форме поверхности экрана и дефектах поверхности. Волна, соответствующая нулевому порядку, не несет фазовых искажений, связанных с экраном, и может быть использована для оценки величины аббераций интерферометра. На рис. 3

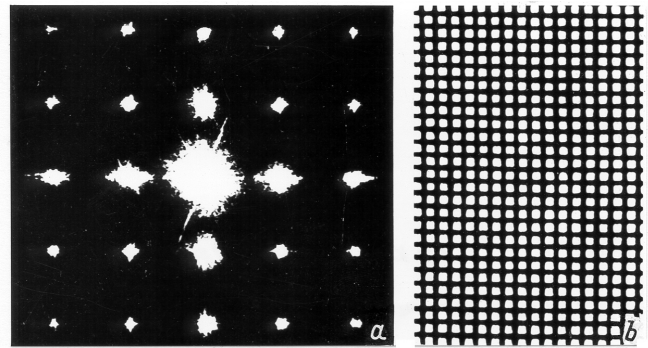


Рис. 2. Картины изображения дифракционного спектра экрана ( $a$ ) и увеличенного изображения участка экрана ( $b$ ).

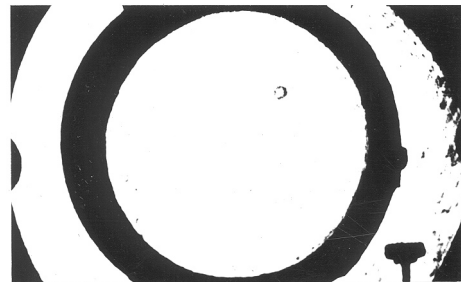
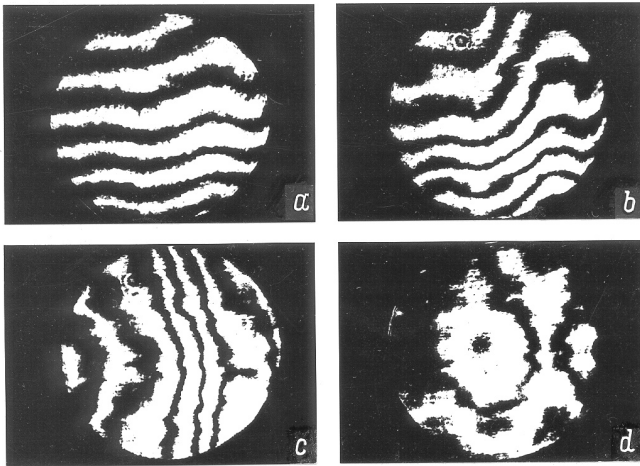


Рис. 3. Интерферограмма, визуализирующая абберации интерферометра, полученная при выделении волны нулевого порядка.



**Рис. 4.** Интерферограммы, визуализирующие дефект металлического экрана при выделении волны 1-го порядка (*a*), при выделении волны 2-го порядка с настройкой на горизонтальные полосы (*b*), вертикальные полосы (*c*) и полосу бесконечной ширины (*d*).

приведено распределение освещенности в интерференционной картине, зарегистрированной в плоскости *II* с настройкой на бесконечно широкую полосу при выделении нулевого порядка на диафрагме *I7*. Величина aberrации интерферометра  $0.2\lambda$ . На рис. 4, *a* приведено распределение освещенности в интерференционной картине при выделении волны 1-го порядка, дифрагированной на вертикальных штрихах решетки. На рис. 4, *b* приведены интерференционные полосы, полученные при выделении волны 2-го порядка, дифрагированной на вертикальных штрихах решетки. Увеличение чувствительности равно двум. Как видно из рис. 4, *b*, увеличенное при этом смещение полос настройки в зоне дефекта позволяет точнее измерить величину и форму дефекта поверхности. На рис. 4, *c, d* приведены интерференционные картины, полученные при выделении волны 2-го порядка с настройкой соответственно на вертикальные полосы и на полосу бесконечной ширины.

Таким образом, разработанная методика визуализации дефектов периодических пропускающих объектов позволяет повысить чувствительность и точность измерений при регистрации интерферограмм объекта в реальном времени.

Работа поддержана Министерством народного образования Республики Беларусь.

## Список литературы

- [1] *Havanesian I., Hung Y.Y.* // *Appl. Optics*. 1971. Vol. 10. N 12. P. 2734–2738.
- [2] *Wadsworth N., Marchant M., Billing B.* // *Optics and Laser Technology*. 1973. Vol. N 3. P. 119–123.
- [3] *Ляликов А.М.* // *Оптический журнал*. 1995. № 1. С. 28–31.

- [4] *Голографические неразрушающие исследования* / Под ред. Роберта К. Эрфа. М.: Машиностроение, 1979. 446 с.
- [5] *Губаревич И.К., Ляликов А.М.* // *Опт и спектр*. 1996. Т. 80. № 6. С. 948–952.
- [6] *Ляликов А.М.* // *Оптический журнал*. 1997. Т. 64. № 1. С. 82–83.
- [7] *Ляликов А.М.* // *Оптический журнал*. 1996. № 5. С. 73–77.
- [8] *Спорник Н.М.* // *Опт.-мех. пром-сть*. 1973. № 2. С. 77–78.
- [9] *Кальер Р., Беркхарт К., Лин Л.* *Оптическая голография*. М.: Мир, 1973. 686 с.
- [10] *Оптическая голография* / Под ред. Г. Колфилда. М.: Мир, 1982. Т. 2. 735 с.
- [11] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. *Голографическая интерферометрия фазовых объектов*. Л.: Наука, 1979. 232 с.
- [12] *Зайдель А.Н., Островская Г.В.* *Лазерные методы исследования плазмы*. Л.: Наука, 1977. 221 с.
- [13] *Tanner L.H.* // *Optics and Laser Technology*. 1972. Vol. 4. N 6. P. 281–287.