

07;12

## Муаровая дефектоскопия повышенной чувствительности при сравнении композитных периодических структур

© А.М. Ляликов

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

(Поступило в Редакцию 27 марта 2000 г. В окончательной редакции 25 июля 2000 г.)

Предлагается для муаровой визуализации макроскопических дефектов композитных периодических структур при сравнении исследуемой структуры с эталонной в качестве последней использовать перезаписанные снимки раздельно каждой структуры. Перезапись снимков при выделении комплексно-сопряженных порядков дифракции света позволяет на конечном этапе получения муаровой картины повышать чувствительность измерений.

### Введение

При визуализации макроскопических дефектов объектов с четко выраженной периодической структурой предпочтительными считаются муаровые методы [1,2], как наиболее простые в реализации, но не уступающие в точности интерференционным [3,4]. Если макродефект периодической структуры проявляется в отклонении периода структуры от некоего среднего значения, то визуализация таких областей объекта муаровыми или интерференционными способами имеют одинаковую чувствительность измерений, однако муаровые методы в отличие от интерференционных не требуют источников света с высокой степенью когерентности. При исследовании объектов, представляющих наложение нескольких периодических структур, практически всегда возникает задача раздельной визуализации макродефектов каждой структуры. В этом случае интерференционные методы при раздельной визуализации макродефектов композитных структур более предпочтительны муаровым, так как последние для получения качественных картин требуют дополнительных приемов пространственной фильтрации. Повышение чувствительности измерений при визуализации макродефектов периодических структур в интерференционных методах достигается использованием высших порядков дифракции света на исследуемой структуре [5,6], а в муаровых методах как фильтрацией высших порядков дифракции света на структурах, так и использованием эталонных периодических транспарантов более высокой несущей частоты [2,7,8].

### Описание методики

В настоящей работе для муаровой визуализации макроскопических дефектов композитных периодических структур при сравнении исследуемой композитной структуры с эталонной предлагается в качестве последней использовать перезаписанные снимки каждой структуры. Причем предлагается при перезаписи снимка посредством пространственной фильтрации выделять комплексно-сопряженные порядки дифракции света.

Если композитная структура состоит из  $N$  элементарных периодических структур, то в этом случае перезаписывается  $N$  раздельных снимков при выделении каждой структуры. Использование при перезаписи комплексно-сопряженных порядков позволяет уменьшить период перезаписанной структуры в  $2n$  раз, где  $n$  — номер выделяемых порядков дифракции.

Амплитудное пропускание композитной периодической структуры, состоящей из  $N$  элементарных структур, можно представить в виде произведения пропусканий отдельных элементарных структур

$$\tau = \tau_1 \cdot \tau_2 \times \dots \times \tau_N, \quad (1)$$

где амплитудные пропускания элементарной  $i$ -й структуры исследуемой и эталонной композитных структур в выражении (1) можно представить в виде разложения в ряд Фурье

$$\tau_1 = \tau_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} a_{im} \cos[m(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \varepsilon_i)], \quad (2)$$

$$\tau_2' = \tau_0' + \sum_{m=1}^{+\infty} a_{im}' \cos[m(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i)], \quad (3)$$

где  $\tau_0, \tau_0'$  — постоянные составляющие;  $a_{im}, a_{im}'$  — коэффициенты;  $\mathbf{K}_i$  — вектор  $i$ -й структуры, совпадающий с плоскостью структуры и направленный перпендикулярно штрихам структуры;  $\mathbf{r}$  — радиус-вектор точки;  $\varphi_i$  — функция, описывающая отклонение периода эталонной  $i$ -й структуры от среднего значения  $T_i = 2\pi/|\mathbf{K}_i|$ ;  $\varepsilon_i$  — функция, описывающая макродефект структуры. Перезапись эталонной композитной структуры на раздельные снимки может осуществляться в различных схемах перезаписи, хорошо известных в голографической интерферометрии повышенной чувствительности [9–11]. Как наиболее оптимальную для наших объектов следует отметить схему перезаписи одним пучком света, позволяющую осуществлять перезапись некогерентным светом [9]. При перезаписи композитной структуры на раздельные снимки увеличение оптической системы должно быть

равно единице. Если при перезаписи выделяются  $\pm n$ -е порядки дифракции, то амплитудное пропускание отдельного снимка с перезаписанной  $i$ -й структурой при выполнении линейных условий регистрации имеет вид

$$\tau_i'' \sim 1 + [2n(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i)]. \quad (4)$$

Сравнивая (4) и (3), можно видеть, что период полос структуры перезаписанного снимка в  $2n$  раз меньше периода исследуемой структуры.

Для муаровой визуализации макроскопических дефектов отдельной элементарной структуры соответствующий снимок точно совмещают с композитной структурой. Результирующее амплитудное пропускание совмещенных перезаписанного снимка с композитной структурой определится произведением  $\tau_i'' \tau_i$ . Предположим, что полосы всех элементарных структур кроме  $i$ -й имеют несколько иную ориентацию по отношению к полосам совмещенного снимка. В этом случае для рассмотрения характера полос муаровой картины можно ограничиться произведением  $\tau_i'' \tau_i$ . Преобразовав (4) для удобства в косинус половинного аргумента, получим

$$\tau_i'' \tau_i \sim \cos^2 [n(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i)] \times \left\{ \tau_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} a_{im} \cos [m(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \varepsilon_i)] \right\}. \quad (5)$$

Муаровые полосы, характеризующие низкочастотную модуляцию элементарной структуры, будут описываться произведением первого косинуса на  $m$ -ю компоненту ряда Фурье, для которой выполняется условие  $m = 2n$ , а все остальные члены в (5) влияния на характер муаровых полос не окажут. Преобразовав  $m$ -ю компоненту ряда Фурье в косинус половинного аргумента и оставив лишь необходимые члены, получим

$$2a_{im} \cos^2 [n(\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i)] \cos^2 \left[ \frac{m}{2} (\mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \varepsilon_i) \right] = \frac{a_{im}}{2} \left\{ \cos^2 \left[ 2n \left( \mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \frac{\varepsilon_i}{2} \right) \right] + \cos^2 (n\varepsilon_i) + 2 \cos \left[ 2n \left( \mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \frac{\varepsilon_i}{2} \right) \right] \cos (n\varepsilon_i) \right\}. \quad (6)$$

Картина муаровых полос, соответствующая областям низкочастотной модуляции элементарной структуры сравнительно высокой частоты, будет описываться только последним членом в (6), т. е.

$$a_{im} \cos \left[ 2n \left( \mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \frac{\varepsilon_i}{2} \right) \right] \cos (n\varepsilon_i). \quad (7)$$

Следует отметить, что в случае нарушения линейных условий регистрации снимка (4) его амплитудное пропускание не будет иметь вид косинусоидальной функции, что приведет к появлению высших гармоник и в конечном случае к усложнению характера муаровых полос при совмещении такого снимка с исследуемой структурой.

Средины муаровых полос будут определяться из условия обращения в нуль последнего косинусоидального члена в выражении (7)

$$\varepsilon_i = (2l + 1) \frac{\pi}{2n}; \quad l = 0, 1, 2, \dots \quad (8)$$

Картина муаровых полос будет наблюдаться как в отраженном, так и проходящем свете.

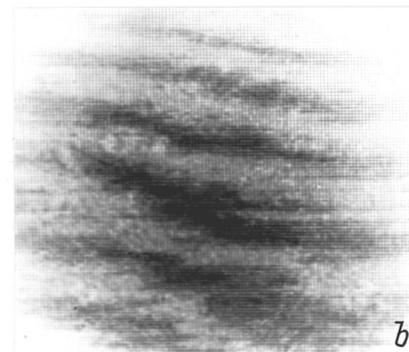
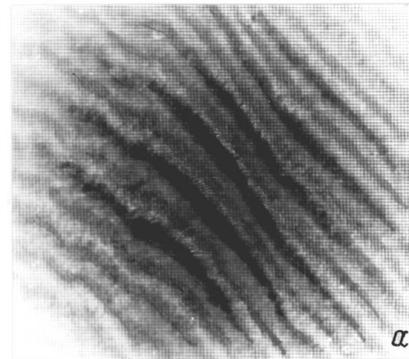
При точном совмещении перезаписанного снимка с исследуемой композитной структурой картина муаровых полос (7) имеет настройку на полосу бесконечной ширины. Для получения настройки на полосы конечной ширины достаточно развернуть перезаписанный снимок в своей плоскости на небольшой угол. В этом случае картина муаровых полос будет описываться произведением

$$a_{im} \cos \left[ 2n \left( \mathbf{K}_i \mathbf{r} + \varphi_i + \frac{\varepsilon_i}{2} \right) \right] \cos [\mathbf{K}_0 \mathbf{r} + n\varepsilon_i], \quad (9)$$

где  $\mathbf{K}_0 = n(\mathbf{K}_i - \mathbf{K}'_i)$ ,  $\mathbf{K}'_i$  — вектор структуры развернутого перезаписанного снимка.

Вектор  $\mathbf{K}_0$  перпендикулярен муаровым полосам, а его модуль определяет их ширину  $T_0 = 2\pi/|\mathbf{K}_0|$ . Очевидно, что при малых углах  $\alpha$  разворота перезаписанного снимка  $T_0 = T/(2n\alpha)$ .

Наличие коэффициента  $2n$  перед функцией  $\varepsilon_i/2$ , описывающей макроскопический дефект элементарной структуры, свидетельствует о повышении чувствительности измерений метода дефектоскопии в  $2n$  раз. Настройка



Картины муаровых полос, визуализирующие макроскопические дефекты решеток с вертикальной (а) и горизонтальной (б) ориентацией штрихов.

муаровой картины на полосы конечной ширины позволяет определять знак в визуализируемом распределении функции  $\varepsilon_i$  [12].

## Экспериментальная апробация

Предложенная методика была апробирована для визуализации макроскопических дефектов композитной структуры, представляющей собой две переплетенные амплитудные решетки со взаимно перпендикулярной ориентацией штрихов. Периоды штрихов решеток  $T_1 = T_2 = 0.2 \text{ mm}$ . Перезапись эталонной композитной структуры на отдельные снимки производилась при выделении первых порядков дифракции света. В качестве фотоэмульсии использовалась голографическая пленка ФГ-690. На рисунке приведены картины муаровых полос, наблюдаемые в отраженном свете на фоне рассеивающего экрана при наложении перезаписанных снимков на исследуемую композитную структуру. Муаровые картины визуализируют поведение функций  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  для решеток с вертикальной ( $a$ ) и горизонтальной ( $b$ ) ориентацией штрихов с двукратно повышенной чувствительностью измерений. Для настройки на конечные муаровые полосы в обоих случаях перезаписанные решетки разворачивались на одинаковый угол.

## Список литературы

- [1] *Havanessian I., Hung Y.Y.* // Appl. Optics. 1971. Vol. 10. N 12. P. 2734–2738.
- [2] *Сухарев И.П., Ушаков Б.Н.* Исследование деформаций и напряжений методом муаровых полос. М.: Машиностроение, 1969. 208 с.
- [3] *Wadworth N., Marchant M., Billing B.* // Opt. Laser Technol. 1973. Vol. 5. N 3. P. 119–123.
- [4] *Власов Н.Г., Штанько А.Е.* // Материалы IX Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1977. С. 256–266.
- [5] *Ляликов А.М.* // Опт. и спектр. 1999. Т. 86. № 3. С. 489–492.
- [6] *Ляликов А.М., Серенко М.Ю.* // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 10. С. 126–130.
- [7] *Буть А.И., Ляликов А.М.* // Квантовая электрон. 1996. Т. 23. № 4. С. 381–382.
- [8] *Ляликов А.М.* // Оптич. журнал. 1998. Т. 65. № 3. С. 54–57.
- [9] *Швидер Ж.* // Материалы III Всесоюз. школы по голографии. Л.: ЛИЯФ, 1972. С. 247–254.
- [10] *Зейликович И.С., Спорник Н.М.* Голографическая диагностика прозрачных сред. Минск: Университетское изд-во, 1988. 208 с.
- [11] *Зейликович И.С., Ляликов А.М.* // УФН. 1991. Т. 161. № 1. С. 143–164.
- [12] *Вест Ч.* Голографическая интерферометрия. М.: Мир, 1982. С. 504.