

09

## **Контроль качества композитных дифракционных элементов с возможностью визуализации дефектов отдельных компонент**

© А.М. Ляликов

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

Поступило в Редакцию 10 февраля 2015 г.

Обоснована возможность разделения информации о дефектах подложки и периодической микроструктуры при их визуализации для композитного дифракционного элемента. Впервые показано, что с использованием двухлучевого интерферометра, дополненного оптической системой пространственной фильтрации, для такого дифракционного элемента возможно раздельное отображение в интерференционных картинах как макроскопических дефектов подложки, так и самой дифракционной микроструктуры.

К композитным дифракционным элементам относятся голограммные и волоконные решетки, нашедшие применение в элементах интегральной и волоконной оптики, в системах волоконно-оптической связи и в различных типах волоконных и жидкостных лазеров с распределенной обратной связью, в системах измерения физических величин [1–3], а также прозрачный метаматериал, представляющий собой искусственно структурированную систему элементов [4]. В электрически управляемых жидкокристаллических дифракционных элементах процедуре контроля подвергается периодическая структура, стеклянные подложки, прозрачные электроды, слои фоточувствительного полимера и т.д. [5]. До стадии сборки такого оптического элемента процедуру контроля качества отдельных компонент достаточно просто реализовать, используя известные методы оптического контроля [6]. Однако после сборки элемента контроль качества отдельных компонент значительно затруднен. Возможна процедура контроля композитного дифракционного элемента в целом на основании соответствия качества

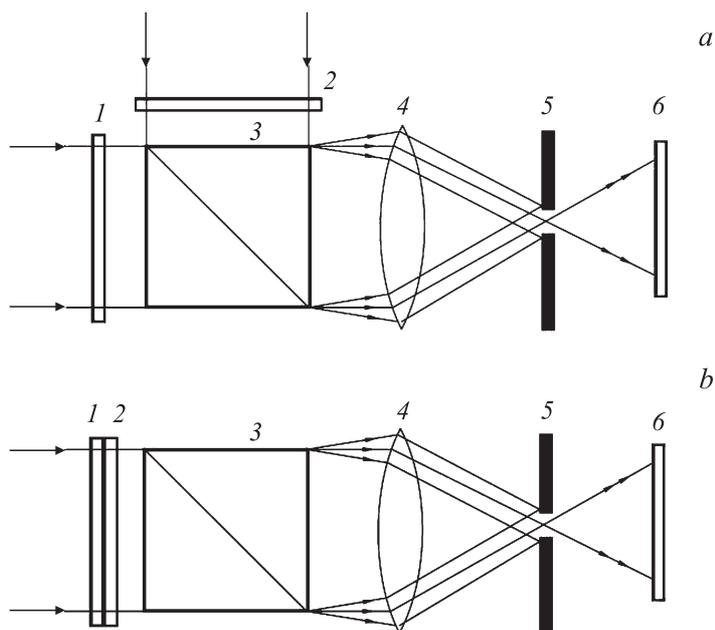
формируемого им светового пучка [7], однако определение дефектной компоненты элемента при этом затруднено.

В данной работе рассмотрена возможность разделения информации о дефектах подложки и периодической микроструктуры при их визуализации для композитного дифракционного элемента. Впервые показано, что посредством двухлучевого интерферометра, дополненного системой пространственной фильтрации, для такого дифракционного элемента возможно раздельное отображение в интерференционных картинах как макроскопических дефектов подложки, так и самой дифракционной микроструктуры.

Рассмотрим распространенный случай композитного дифракционного элемента, представляющего собой набор оптических компонент, в виде тонкой прозрачной пластины с поверхностями, имеющими определенную кривизну, и периодической микроструктуры. Коэффициент пропускания такого элемента имеет полное сходство с пропусканием амплитудной или фазовой голограммы. Комплексное пропускание такого элемента можно выразить в виде произведения пропускания подложки, осуществляющей фазовую модуляцию, и пропускания периодической структуры, осуществляющей амплитудную или фазовую модуляцию световой волны [8]. Для случая периодической структуры в виде амплитудной решетки комплексное пропускание композитного дифракционного элемента будет иметь вид

$$\tau(x, y) = \tau_0 \exp i [\psi(x, y) + \Delta\psi(x, y)] \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \tau_n \exp i \left\{ \frac{2\pi nx}{T} + n[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)] \right\}, \quad (1)$$

где  $\tau_0, \tau_n$  — коэффициенты;  $\Psi(x, y)$  — функция, пропорциональная толщине подложки,  $\Delta\Psi(x, y)$  — функция, описывающая дефект подложки, связанный с отклонением ее толщины от нормы;  $T$  — период штрихов опорной периодической структуры (система координат  $x, y$  совмещена с плоскостью элемента, а направление оси  $x$  выбрано перпендикулярно штрихам структуры);  $n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $\varphi(x, y)$  — функция, описывающая изменение периода структуры, а  $\Delta\varphi(x, y)$  — дефект микроструктуры, связанный с отклонением периода структуры от нормы. При описании пропускания эталонного композитного дифракционного элемента в выражении (1) принимается  $\Delta\Psi(x, y) = 0$  и  $\Delta\varphi(x, y) = 0$ . Для контро-



**Рис. 1.** Оптические схемы реализации способа раздельного отображения информации о дефектах подложки (*a*) и периодической микроструктуры (*b*) композитного дифракционного элемента: 1, 2 — эталонный и контролируемый элементы; 3 — светоделительный кубик, 4 — объектив; 5 — непрозрачный экран с отверстием; 6 — плоскость наблюдения интерференционной картины.

лируемого композитного элемента, соответствующего норме, должно выполняться условие

$$\begin{aligned} |\Delta\Psi(x, y)| &< |\Delta\Psi_{\max}(x, y)|, \\ |\Delta\varphi(x, y)| &< |\Delta\varphi_{\max}(x, y)|, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $|\Delta\Psi_{\max}(x, y)|$  и  $|\Delta\varphi_{\max}(x, y)|$  — предельно допустимые отклонения от нормы.

На рис. 1, *a, b* представлены оптические схемы реализации способа раздельного отображения информации о дефектах подложки (рис. 1, *a*) и периодической микроструктуры (рис. 1, *b*) композитного

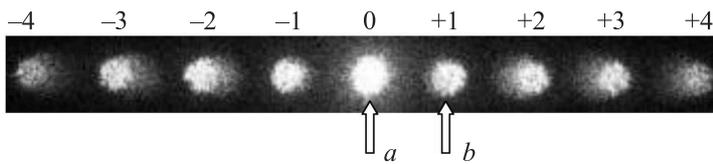
дифракционного элемента. Для отображения информации о дефектах подложки в качестве устройства реализации может быть использован двухлучевой интерферометр, например Маха–Цендера, дополненный оптической системой пространственной фильтрации. Эталонный 1 и контролируемый 2 композитные дифракционные элементы освещаются когерентными световыми пучками. С учетом (1) на выходе дифракционных элементов 1 и 2 вследствие дифракции комплексная амплитуда световых волн для эталонного  $A_{m,n}(x, y)$  и контролируемого  $A_{c,n}(x, y)$  элементов будет иметь вид

$$A_{m,n}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{m,n} \exp i [2\pi n \xi x + n\varphi(x, y) + \psi(x, y)], \quad (3)$$

$A_{c,n}(x, y)$

$$= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_{c,n} \exp i [2\pi n \xi x + n\varphi(x, y) + n\Delta\varphi(x, y) + \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y)], \quad (4)$$

где  $a_{m,n}$ ,  $a_{c,n}$  — действительные амплитуды волн, индексом „ $m$ “ отмечены параметры волны, дифрагированной на эталонном, а индексом „ $c$ “ — на контролируемом элементе;  $\xi = \cos \alpha / \lambda$ ,  $\cos \alpha$  — направляющий косинус световой волны, распространяющейся в первом порядке дифракции,  $\lambda$  — длина волны. Посредством светоделительного кубика 3 регулируется направление распространения световых волн, дифрагированных на контролируемом дифракционном элементе 2. В задней фокальной плоскости 5 объектива 4 будет формироваться пара картин дифракционных максимумов, сформированных волнами, дифрагированными на элементах 1 и 2. Дифракционные максимумы в первой и второй картинах расположены на прямых, параллельных оси  $x$ . Вид одной из таких картин представлен на рис. 2. В верхней части фотографии указаны номера дифракционных порядков. Прямо прошедшие световые волны, соответствующие 0-му порядку дифракции (на рис. 2 отмечены стрелкой  $a$ ), согласно выражениям (3) и (4) описываются первыми членами суммы при  $n = 0$ . Прямо прошедшие дифракционные элементы волны содержат информацию только об изменении толщины (функция  $\Psi(x, y)$ ) и о дефекте (функция  $\Delta\Psi(x, y)$ ) их подложек. Волны, дифрагированные в  $\pm 1$ -е и более высокие порядки



**Рис. 2.** Картина дифракционных максимумов, сфотографированная в фокальной плоскости объектива при освещении исследуемого композитного дифракционного элемента.

дифракции, обозначенные цифрами  $\pm 2, \pm 3, \pm 4 \dots$ , содержат информацию как о дефекте подложки элемента, так и о дефекте микроструктуры структуры, описываемой функцией  $\Delta\varphi(x, y)$ . Если картины дифракционных максимумов совместить и отверстием в непрозрачном экране 5, установленном строго в задней фокальной плоскости объектива 4, выделить только волны, распространяющиеся в 0-х порядках дифракции, то в плоскости регистрации *b* образуется интерференционная картина при наложении волн  $a_{m,0} \exp i[\psi(x, y)]$  и  $a_{c,0} \exp i[\psi(x, y) + \Delta\psi(x, y)]$ . Распределение освещенности в интерференционной картине в полосах конечной ширины можно представить в виде

$$I_1(x, y) = a_{m,0}^2 + a_{c,0}^2 + 2a_{m,0}a_{c,0} \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{P_x} + \frac{y}{P_y} \right) + \Delta\Psi(x, y) \right], \quad (5)$$

где  $P_x$  и  $P_y$  — длины отрезков, отсекаемых парой соседних интерференционных полос соответственно на осях  $x$  и  $y$ . Как видно из выражения (5), искривление интерференционных полос определяется только функцией  $\Delta\Psi(x, y)$ , описывающей дефект подложки контролируемого композитного дифракционного элемента. Ориентация и ширина интерференционных полос в картине (5) определяется углом между направлениями распространения интерферирующих волн и регулируется вращением светоделительного кубика 3.

При выделении волн, дифрагированных в первом порядке, образуется интерференционная картина, искривление полос в которой определяется суммарным действием дефектов подложки и структуры контролируемого элемента. В этом случае визуализация дефекта микроструктуры в схеме (рис. 1, *a*) возможна при условии  $\Delta\varphi(x, y) \gg \Delta\Psi(x, y)$ . Если данное условие не выполняется, то необходимо влияние дефекта под-

ложки контролируемого элемента исключить. Для этого контролируемый дифракционный элемент 2 совмещается с эталонным элементом 1, как это показано на рис. 1, *b*. Для формирования интерференционной картины используется только один световой пучок. Точное совмещение эталонного 1 и контролируемого 2 элементов уже обеспечивает совмещение в плоскости 5 дифракционных максимумов. Для формирования интерференционной картины, визуализирующей дефект микроструктуры, отверстием в непрозрачном экране 5 выделяется дифракционный максимум, например +1-й (на рис. 2 отмечен стрелкой *b*). В этом случае интерференционная картина в плоскости 6 образуется при наложении волн вида

$$A_{m,1}(x, y) = a_{m,1} \exp i [2\pi\xi x + \varphi(x, y) + 2\psi(x, y) + \Delta\Psi(x, y)], \quad (6)$$

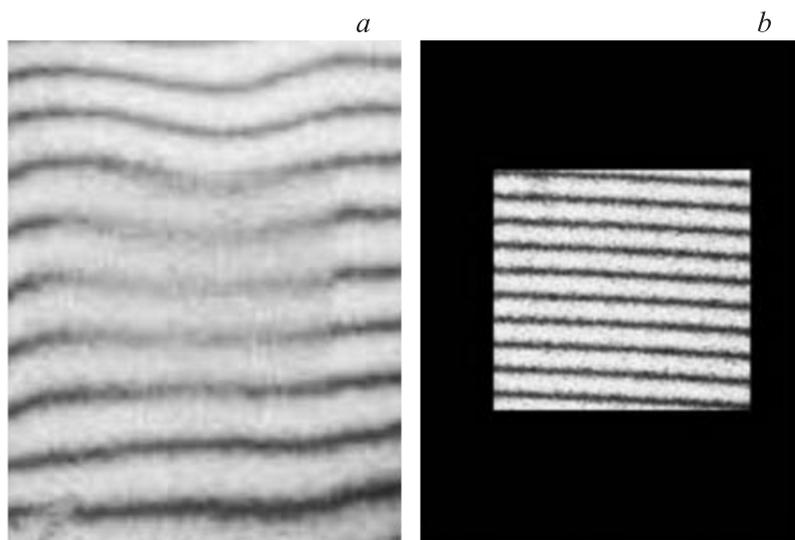
$$A_{c,1}(x, y) = a_{c,1} \exp i [2\pi\xi x + \varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y) + 2\psi(x, y) + \Delta\Psi(x, y)]. \quad (7)$$

Так как направления волн (6) и (7) строго совпадают, то образуется интерференционная картина в полосах бесконечной ширины. Для получения полос конечной ширины можно использовать приемы, хорошо развитые в голографической интерферометрии фазовых объектов [9]. Для получения полос требуемой ширины достаточно один из элементов развернуть вокруг нормали к поверхности на небольшой угол. В этом случае распределение освещенности в интерференционной картине

$$I_2(x, y) = a_{m,1}^2 + a_{c,1}^2 + 2a_{m,1}a_{c,1} \cos \left[ 2\pi \left( \frac{x}{p_x} + \frac{y}{p_y} \right) + \Delta\varphi(x, y) \right]. \quad (8)$$

Из выражения (8) следует, что искривление полос в интерференционной картине будет происходить только из-за дефекта микроструктуры.

На рис. 3 приведены результаты контроля качества подложек (рис. 3, *a*) и микроструктуры (рис. 3, *b*) композитного дифракционного элемента. Данный элемент представлял собой фазовую решетку (размеры  $25 \times 25 \text{ mm}$ ,  $\xi = 30 \text{ mm}^{-1}$ ), записанную в тонком светочувствительном слое, расположенном между двумя подложками (длиннофокусными стеклянными линзами, поверхности которых, обращенные к светочувствительному слою, были плоскими). Для апробации методики была выбрана пара таких композитных элементов. Первая фотография (рис. 3, *a*) визуализирует неоднородности стеклянных подложек и светочувствительного слоя по всему композитному элементу, а вторая



**Рис. 3.** Интерференционные картины, визуализирующие неоднородности стеклянных подложек и светочувствительного слоя по всему композитному элементу (*a*) и отсутствие дефектов структуры фазовой решетки (*b*).

(рис. 3, *b*) — дефекты структуры фазовой решетки. Из фотографий видно, что, несмотря на наличие дефектов в подложках и слое, дефекты в структуре решетки отсутствуют, что и подтверждается неискаженными полосами интерферограммы (рис. 3, *b*).

Таким образом, данная методика позволяет реализовать контроль качества композитного дифракционного элемента и при этом отдельно визуализировать дефекты как подложки, так и его микроструктуры.

## Список литературы

- [1] Денисюк И.Ю., Бурункова Ю.Э., Тиболов А.С., Семьина С.А., Булгаков В.Г. // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 3. С. 97–91.
- [2] Viegas D, Carvalho J. P., Coelho L, Santos J. L, Araujo F.M., Frazao O. // IEEE Photonics Technology Letters. 2010. V. 22. N 20. P. 1533–1535.
- [3] Liao C.R., Wang D.N. // Photonic Sensors. 2013. V. 3. N 2. P. 97–101.

- [4] *Liu N., Guo H., Fu L., Kaiser S., Schweizer H., Giessen H.* // Nature Materials. 2008. V. 7. P. 31–37.
- [5] *Кабанова О.С., Мельникова Е.А., Оленская И.И., Толстик А.Л.* // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 14. С. 30–35.
- [6] *Оптический производственный контроль* / Под ред. Д. Малакары. М.: Машиностроение, 1985. 400 с.
- [7] *Ляликов А.М.* // Квантовая электроника. 2010. Т. 40. № 12. С. 1141–1145.
- [8] *Кольер Р., Беркхарт К., Лин. Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
- [9] *Бекетова А.К., Белозеров А.Ф., Березкин А.Н.* и др. Голографическая интерферометрия фазовых объектов. Л.: Наука, 1979. 232 с.