

УДК 535.4

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДЕФЕКТОВ ОТДЕЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ СОСТАВНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

Н.Т. Авласевич, А.М. Ляликов

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы

VISUALIZATION OF THE DEFECTS OF A SEPARATE COMPONENT OF A COMPOSITE DIFFRACTIVE OPTICAL ELEMENT

N.T. Avlasevich, A.M. Lyalikov

Y. Kupala Grodno State University

Показана возможность визуализации дефектов отдельной компоненты тонкого составного дифракционного оптического элемента, представляющего композицию тонкой подложки и пары совмещенных элементарных решеток. Рассмотрены возможные варианты визуализации дефектов как подложки, так и отдельных элементарных решеток дифракционного оптического элемента с использованием различных интерференционных способов, хорошо развитых в голографической интерферометрии фазовых объектов. Приведены экспериментальные результаты.

Ключевые слова: дифракционный оптический элемент, дифракционная решетка, световая волна, визуализация дефекта, интерференционная картина.

The possibility of the visualization of the defects of a separate component of the thin composite diffractive optical element has been demonstrated. This element represents a thin substrate composition and a pair of combined elementary gratings. Possible variants of the defects visualization as the substrate and of the separate elementary gratings of the diffraction optical element have been considered. Interference methods well developed in holographic interferometry of phase objects have been used. Experimental results have been presented.

Keywords: diffractive optical element, diffraction grating, light wave, visualization of the defect, interference pattern.

Введение

К дифракционным оптическим элементам относится достаточно широкий класс оптических элементов, нашедших широкое применение в оптических и оптико-электронных устройствах. Практически любой элемент оптики, принцип работы которого основан на дифракции оптического излучения, можно считать элементом дифракционной оптики. Ими являются дифракционные решетки, используемые в спектральных приборах, волоконные решетки, нашедшие применение в различных элементах и устройствах интегральной и волоконной оптики, в системах волоконно-оптической связи и оптико-электронных системах измерения физических величин, фокусаторы и т. п. [1]–[5].

Основой любого дифракционного оптического элемента, определяющей амплитудно-фазовые параметры формируемого им оптического излучения, является пространственная периодическая или квазипериодическая структура его поверхности или показателя преломления среды. Классифицируют дифракционные оптические элементы по типу дифракционной структуры, по форме поверхности, на которой она выполнена, а также по виду осуществляемого преобразования фронта волны [1]. Для дифракционных решеток, характеризующихся дифракционной структурой в виде композиции совмещенных в пространстве элементарных периодических

структур, при измерительном контроле их качества требуется выявление дефектов отдельной элементарной структуры. В этом случае при измерительном контроле отдельной элементарной периодической структуры необходимо исключить влияние на результат контроля других элементарных структур. Ранее было показано, что для дифракционных оптических элементов, представляющих собой набор оптических компонент в виде тонких прозрачных пластин, имеющих кривизну поверхности, и одномерных периодических структур возможна раздельная визуализация дефектов как подложек, так и самой структуры [6]. Данная методика контроля основана на оптической обработке исследуемого и эталонного дифракционных оптических элементов и включает фильтрацию дифракционных порядков отверстиями в непрозрачном экране, установленном в задней фокальной плоскости объектива. Однако было отмечено [7], что, в случае наличия более высоких (выше ± 1 -х) порядков дифракции света на исследуемой периодической структуре, возникают значительные затруднения при сравнительном анализе периодической структуры с эталонной структурой. Наличие многомерной периодической структуры в виде композиции совмещенных в пространстве элементарных периодических структур сильно усложняет дифракционный спектр такого оптического элемента и, соответственно, затрудняет

процедуру контроля. Аналогичная проблема возникает и для голограммных дифракционных оптических элементов в виде наложенных голографических решеток [8].

В данной работе показана возможность визуализации дефектов отдельной компоненты тонкого дифракционного оптического элемента, представляющего собой композицию подложки и нескольких совмещенных элементарных дифракционных решеток. Такого рода дифракционные оптические элементы нашли широкое распространение в различных областях техники: в датчиках линейных перемещений, в устройствах изучения формы поверхности методом муаровых полос, в дифракционных интерферометрах сдвига и датчиках формы волнового фронта и т. п. [1], [4], [9]. В большинстве вышеописанных случаев дифракционный оптический элемент выполняет функцию измерительной шкалы или меры, к которым предъявляются определенные метрологические требования [10].

1 Тонкий дифракционный оптический элемент с двумерной дифракционной решеткой

Рассмотрим распространенный случай составного дифракционного оптического элемента, представляющего собой тонкую прозрачную подложку определенной формы с выполненной в ней двумерной дифракционной решеткой. Коэффициент амплитудного пропускания такого дифракционного элемента можно представить в виде произведения трех комплексных пропусканий: подложки, первой и второй элементарной решеток. Предположим, что данный оптический элемент выполнен в виде тонкой прозрачной подложки и пары скрещенных элементарных амплитудных решеток с периодами T_1 и T_2 . Для упрощения математических записей предположим, что штрихи первой и второй решеток ориентированы соответственно параллельно осям y и x системы координат, совмещенной с плоскостью дифракционного оптического элемента. Ось z нормальна к поверхности составного дифракционного элемента. Воспользовавшись аналогией [11] представим коэффициент амплитудного пропускания такого дифракционного оптического элемента в виде:

$$\begin{aligned} \tau(x, y) = & \exp i[\psi(x, y) + \Delta\psi(x, y)] \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tau_{nm} \exp i \left\{ \frac{2\pi n x}{T_1} + n[\varphi_1(x, y) + \Delta\varphi_1(x, y)] \right\} \times \\ & \times \exp i \left\{ \frac{2\pi m y}{T_2} + m[\varphi_2(x, y) + \Delta\varphi_2(x, y)] \right\} \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $\psi(x, y)$ – функция, пропорциональная толщине $\Delta z(x, y)$ подложки, $\Delta\psi(x, y)$ – функция, описывающая дефект подложки, связанный с отклонением ее толщины от нормы, τ_{nm} – коэффициенты

(n и m принимают целые значения $0, 1, 2, \dots$), $\varphi_1(x, y)$, $\varphi_2(x, y)$ – функции, описывающие изменение периодов T_1 и T_2 штрихов первой и второй решеток, $\Delta\varphi_1(x, y)$ и $\Delta\varphi_2(x, y)$ – функции, описывающие дефекты первой и второй решеток, связанные с отклонением периодов структур от нормы. Амплитудное пропускание эталонного дифракционного оптического элемента:

$$\begin{aligned} \tau_b(x, y) = & \exp i[\psi(x, y)] \times \\ & \times \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \tau_{nm} \exp i \left\{ \frac{2\pi n x}{T_1} + n\varphi_1(x, y) \right\} \times \\ & \times \exp i \left\{ \frac{2\pi m y}{T_2} + m\varphi_2(x, y) \right\}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

При измерительном контроле соответствия формы подложки, а также периодов штрихов первой и второй дифракционных решеток норме, допускается наличие дефектов при выполнении следующих условий

$$\begin{aligned} |\Delta\psi(x, y)| & < |\Delta\psi_{\max}(x, y)| \\ |\Delta\varphi_1(x, y)| & < |\Delta\varphi'_{\max}(x, y)|, \\ |\Delta\varphi_2(x, y)| & < \Delta\varphi''_{\max}(x, y), \end{aligned} \quad (1.3)$$

где $\Delta\psi_{\max}(x, y)$ и $\Delta\varphi'_{\max}(x, y)$, $\Delta\varphi''_{\max}(x, y)$ – предельно допустимые значения дефектов подложки, а также первой и второй элементарных решеток.

При освещении дифракционного оптического элемента вида (1.1) коллимированным пучком когерентного света с действительной амплитудой a распределение освещенности $A_2(x, y)$ на выходе дифракционного элемента определится из выражения $A_2(x, y) = a\tau(x, y)$. В этом случае дифракционная картина, наблюдаемая в задней фокальной плоскости объектива, в соответствии с выражением (1.1), будет формироваться набором волн

$$A_2(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_{nm}(x, y). \quad (1.4)$$

На рисунке 1.1 представлены фотографии характерных дифракционных спектров такого дифракционного оптического элемента для случаев различных ориентаций штрихов элементарных решеток. Первая картина (рисунок 1.1, а) соответствует случаю взаимно перпендикулярной ориентации штрихов элементарных решеток и соответствует дифракционному спектру дифракционного оптического элемента вида (1.1) или (1.2). Стрелка «1» указывает на систему дифракционных максимумов, расположенных на прямой, и сформированных световыми волнами:

$$A_{1\Sigma}(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} A_{n0}(x, y), \quad (1.5)$$

где

$$A_{n0}(x, y) = a_{n0} \exp i \{ 2\pi n \xi x + \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y) + n [\varphi_1(x, y) + \Delta\varphi_1(x, y)] \},$$

$\xi = 1/T_1$ – пространственная частота световой волны, дифрагированной на структуре первой решетки в первый порядок ($n=1$). Соответственно, стрелка «2» указывает на систему дифракционных максимумов, сформированных световыми волнами:

$$A_{2\Sigma}(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} A_{0m}(x, y), \quad (1.6)$$

где

$$A_{0m}(x, y) = a_{0m} \exp i \{ 2\pi m \eta y + \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y) + m [\varphi_2(x, y) + \Delta\varphi_2(x, y)] \},$$

$\eta = 1/T_2$ – пространственная частота световой волны, дифрагированной на структуре второй решетки в первый порядок ($m=1$).

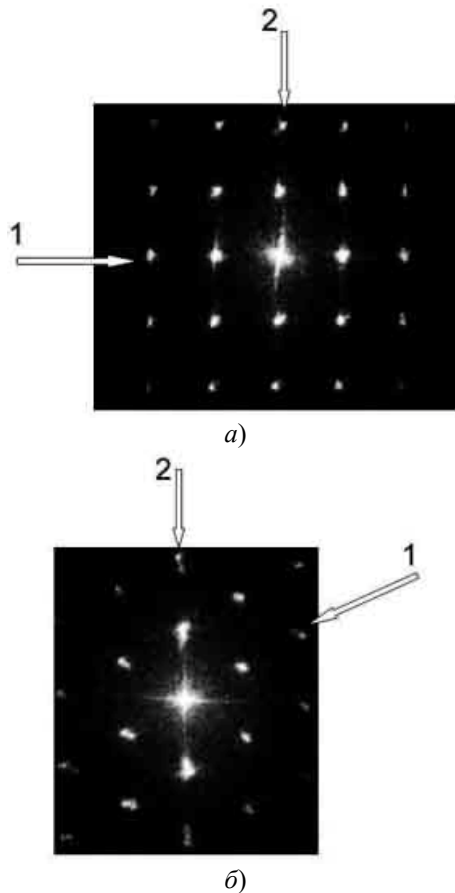


Рисунок 1.1 – Фотографии дифракционных спектров дифракционного оптического элемента для различных ориентаций штрихов элементарных решеток

Вне отмеченных прямых расположены дифракционные максимумы, сформированные световыми волнами, испытавшими дифракцию одновременно на структурах первой и второй решеток. На фотографии (рисунок 1.1, б) приведена

картина дифракционного спектра дифракционного оптического элемента с ориентацией штрихов скрещенных решеток, отличающихся от $\pi/2$. Фотографии свидетельствуют, что независимо от ориентации штрихов отдельных элементарных решеток, идентификация световых волн, испытавших дифракцию только на структурах первой или второй решеток, не вызывает затруднений. Стрелками «1» и «2» отмечены соответствующие порядки дифракции волн на первой и второй структурах решеток.

Рассмотрим возможные варианты визуализации дефектов как подложки, так и отдельных элементарных решеток дифракционного оптического элемента вида (1.1) с использованием различных интерференционных способов, хорошо развитых в голографической интерферометрии фазовых объектов [12].

2 Визуализация дефектов отдельных компонент с использованием эталонного дифракционного оптического элемента

В работе [6] был предложен метод визуализации дефектов различных компонент тонкого композитного дифракционного оптического элемента с одномерной дифракционной структурой. Рассмотренные оптические схемы и способы визуализации дефектов отдельных компонент предполагали применение эталонного дифракционного оптического элемента и заключались в использовании волн, дифрагированных на разнесенных или совмещенных с исследуемым и эталонным дифракционных оптических элементах. Однако для случая двумерных дифракционных решеток применима лишь схема визуализации дефектов, основанная на раздельном освещении эталонного и исследуемого дифракционных элементов когерентными световыми пучками. На рисунке 2.1 приведена такая оптическая схема. Для визуализации дефектов подложки, аналогично, как и в работе [6], эталонный и исследуемый дифракционные оптические элементы O_1, O_2 устанавливаются на одинаковых расстояниях до светоделительного кубика BS. Дифракционные оптические элементы O_1, O_2 освещаются когерентными световыми волнами таким образом, чтобы в плоскости экрана SF, установленного в задней фокальной плоскости объектива L, произошло совмещение их дифракционных спектров.

Интерференционная картина, отображающая дефекты подложки, регистрируется цифровой камерой CCD при выделении отверстием в экране SF волн, распространяющихся в нулевые порядки дифракции. Распределение освещенности в данной картине

$$I_1(x, y) = a_{0,0}^2 + b_{0,0}^2 + 2a_{0,0}b_{0,0} \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{P_x} + \frac{y}{P_y} \right) + \Delta\psi(x, y) \right], \quad (2.1)$$

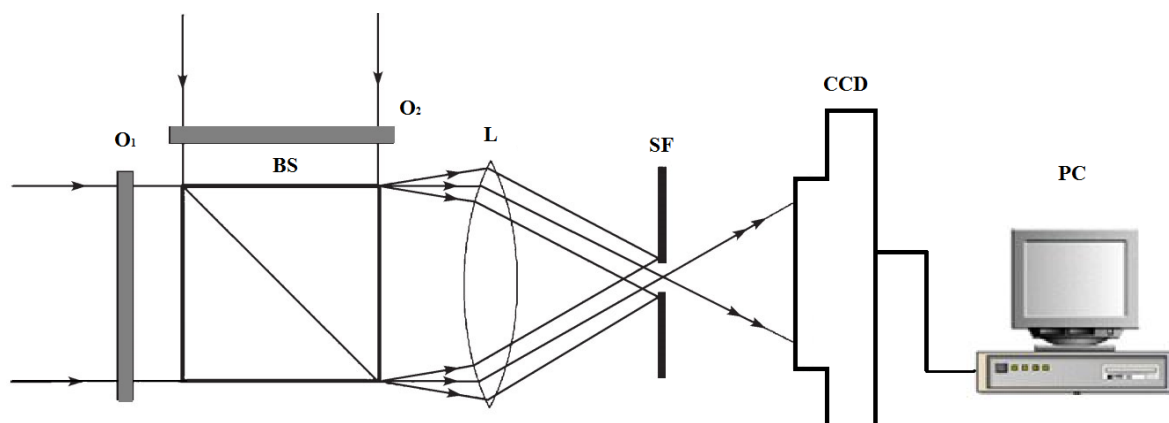


Рисунок 2.1 – Оптическая схема реализации способа раздельного отображения дефектов подложки и элементарных структур дифракционного оптического элемента с использованием эталонного элемента: \$O_1, O_2\$ – эталонный и исследуемый дифракционные оптические элементы; BS – светоделительный кубик, L – объектив; SF – непрозрачный экран с отверстием; CCD – цифровая камера, PC – персональный компьютер

где \$b_{0,0}\$ – действительная амплитуда волны, дифрагированной на эталонном дифракционном оптическом элементе в нулевой порядок, \$P_x\$ и \$P_y\$ – длины отрезков отсекаемых парой соседних интерференционных полос соответственно на осях \$x\$ и \$y\$ [6].

Для визуализации дефектов первой или второй решеток отверстием в экране SF выделяются дифракционные максимумы, соответствующие волнам, испытавшим дифракцию на первой или второй решетках. Например, при визуализации дефектов первой дифракционной решетки, штрихи которой ориентированы параллельно оси \$y\$, выделяется один из максимумов в дифракционном спектре (рисунок 1.1, а) расположенный на прямой, отмеченной стрелкой «1», кроме центрального максимума. Интерференционная картина образуется при наложении первой световой волны \$A_{n0}(x, y)\$, дифрагированной на первой элементарной решетке исследуемого дифракционного оптического элемента, и второй волны \$B_{n0}(x, y)\$, дифрагированной на аналогичной элементарной решетке эталонного дифракционного оптического элемента в \$n\$-й порядок. Комплексные амплитуды определяются из (1.1), (1.5) для первой и (1.2) для второй волн:

$$A_{n0}(x, y) = a_{n0} \exp i \{ 2\pi n \xi x + \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y) + n[\varphi_1(x, y) + \Delta\varphi_1(x, y)] \}, \quad (2.2)$$

$$B_{n0}(x, y) = b_{n0} \exp i \{ 2\pi n \xi x + \psi(x, y) + n\varphi_1(x, y) \}, \quad (2.3)$$

где \$b_{n0}\$ – действительная амплитуда волны, дифрагированной на первой элементарной решетке эталонного дифракционного оптического элемента в \$n\$-й порядок.

Распределение освещенности в интерференционной картине

$$I_2(x, y) = a_{n,0}^2 + b_{n,0}^2 + 2a_{n,0}b_{n,0} \times \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{P_x} + \frac{y}{P_y} \right) + \Delta\psi(x, y) + n\Delta\varphi_1(x, y) \right]. \quad (2.4)$$

Из выражения (2.4) следует, что результат расшифровки данной интерферограммы содержит систематическую составляющую погрешности измерений, обусловленную дефектом подложки исследуемого дифракционного оптического элемента. Если выполняется условие

$$|\Delta\psi(x, y)| \ll |n\Delta\varphi_1(x, y)|, \quad (2.5)$$

то данной погрешностью пренебрегают. Очевидно, что с увеличением \$n\$ влияние систематической погрешности на результат расшифровки интерферограммы (2.4) уменьшается. Если нельзя пренебречь данной погрешностью, то ее можно исключить на этапе расшифровки интерферограммы, используя результат измерений, полученный при расшифровке интерферограммы (2.1).

3 Визуализация дефектов элементарных решеток

Если в качестве какой-либо элементарной дифракционной решетки дифракционного оптического элемента использована решетка с постоянством периода, например, первая решетка, то в выражении (1.1) для коэффициента амплитудного пропуска дифракционного оптического элемента принимается \$\varphi_1(x, y) = 0\$. В этом случае визуализация дефекта данной элементарной решетки, определяемого функцией \$\Delta\varphi_1(x, y)\$, возможна в схеме оптической обработки пропускающих голограмм двумя когерентными пучками

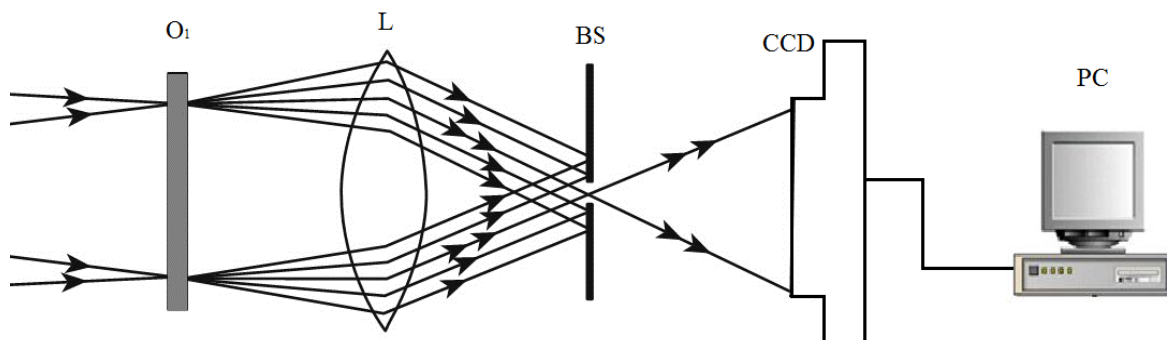


Рисунок 3.1 – Оптическая схема устройства реализации способа раздельного отображения дефектов элементарных решеток дифракционного оптического элемента с использованием двух когерентных пучков: \$O_1\$ – исследуемый дифракционный оптический элемент; \$L\$ – объектив; \$BS\$ – непрозрачный экран с отверстием; \$CCD\$ – цифровая камера, \$PC\$ – персональный компьютер

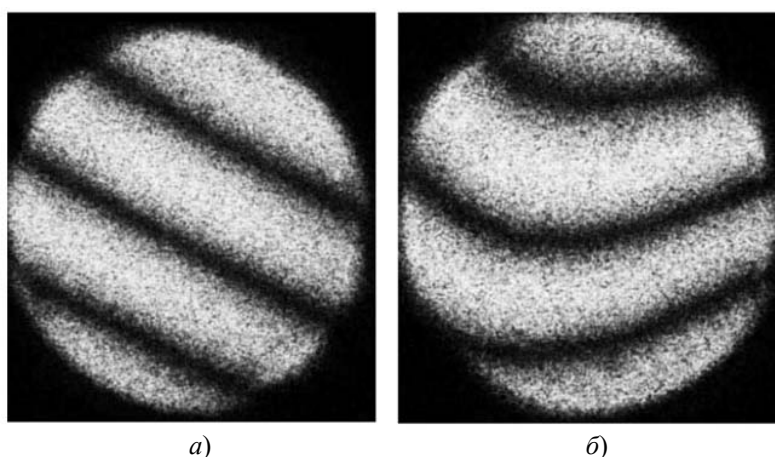


Рисунок 3.2 – Интерференционные картины, подтверждающие высокое качество первой элементарной решетки (а) и наличие дефекта для второй элементарной решетки (б)

света [12]. На рисунке 3.1 представлена такая оптическая схема. Исследуемый дифракционный оптический элемент \$O_1\$ освещается парой когерентных световых волн. На выходе исследуемого элемента формируется две системы дифрагированных световых волн, описываемых выражением (1.4).

Если пространственные частоты световых волн, освещающих оптический дифракционный элемент, равны \$\xi_1 = n\xi\$ и \$\xi_2 = -n\xi\$, а действительные амплитуды их равны, то можно показать [12], что по нормали к дифракционному элементу \$O_1\$ будут распространяться пара световых волн, дифрагированных на первой элементарной решетке в \$\pm n\$-е порядки:

$$A_{n0}(x, y) = a_{n0} \exp i \{ \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y) - n\Delta\varphi_1(x, y) \}, \quad (3.1)$$

$$A'_{n0}(x, y) = a_{n0} \exp i \{ \psi(x, y) + \Delta\psi(x, y) + n\Delta\varphi_1(x, y) \}. \quad (3.2)$$

Данные волны объективом \$L\$ фокусируются на непрозрачный экран \$BS\$ и выделяются отверстием. Цифровой камерой \$CCD\$ регистрируется интерференционная картина

$$I_3(x, y) = 4a_{0,0}^2 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{P_x} + \frac{y}{P_y} \right) + 2n\Delta\varphi_1(x, y) \right] \right\}, \quad (3.3)$$

Из выражения (3.3) видно, что влияние как формы подложки (функция \$\psi(x, y)\$), так и дефекта подложки (функция \$\Delta\psi(x, y)\$) на ход интерференционных полос данной интерферограммы полностью исключено.

Вышеописанная методика визуализации дефектов элементарных дифракционных решеток, входящих в состав дифракционного оптического элемента, была экспериментально опробована. Исследуемый дифракционный оптический элемент представлял собой подложку в виде тонкой стеклянной пластины, у которой одна из поверхностей имела кривизну 25 м. На противоположную плоскую поверхность был нанесен тонкий слой светочувствительного полимера и оптическим способом была записана крестообразная дифракционная решетка. Дифракционная структура данного дифракционного оптического элемента представляла собой пару совмещенных

элементарных дифракционных решеток с взаимно перпендикулярной ориентацией штрихов постоянного периода $T_1 = T_2$.

Визуализация дефектов первой и второй решеток была произведена в устройстве (рисунок 3.1), установленном на выходе интерферометра Маха – Цендера [13]. При получении всех интерференционных картин использовались вторые порядки дифракции ($n = 2$). На рисунке 3.2, *a* представлена интерференционная картина, визуализирующая качество первой решетки, штрихи которой были ориентированы параллельно оси y . Интерферограмма соответствует случаю настройки картины на полосы конечной ширины. Данная интерферограмма подтверждает постоянство периода T_1 по всему полю дифракционного оптического элемента и свидетельствует о высоком качестве первой элементарной решетки.

На рисунке 3.2, *б* представлены интерференционная картина, визуализирующая качество второй элементарной решетки, штрихи которой были ориентированы параллельно оси x . Искажение полос в интерферограмме свидетельствует о наличии дефекта данной элементарной решетки.

Заключение

Таким образом, разработанная методика реализации измерительного контроля качества составного дифракционного элемента, основанная на использовании интерференционных способов хорошо развитых в голографической интерферометрии фазовых объектов, позволяет визуализировать дефекты отдельной компоненты. Для расшифровки интерферограмм и получения количественной информации о величине дефектов можно использовать способы цифровой обработки интерферограмм с соответствующим программным обеспечением [14].

ЛИТЕРАТУРА

1. Шредер, Г. Техническая оптика / Г. Шредер, Х. Трайбер. – М.: Техносфера, 2006. – 424 с.
2. Dong, X. Intensity-Modulated Optical Fiber Sensors Based on Chirped-Fiber Bragg Gratings / X. Dong // Photonic Sensors. – 2011. – Vol. 1, № 3. – P. 251–259.
3. Комоцкий, В.А. Исследование датчика малых линейных перемещений на основе двух фазовых дифракционных решеток / В.А. Комоцкий, В.А. Корольков, Ю.М. Соколов // Автотриметрия. – 2006. – Т. 42, № 6. – С. 105–112.
4. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников; под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
5. Методы компьютерной оптики: учебник для вузов / А.В. Волков [и др.]; под ред. В.А. Соифера. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2003. – 688 с.
6. Ляликов, А.М. Контроль качества композитных дифракционных элементов с возможностью визуализации дефектов отдельных компонент / А.М. Ляликов // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, вып. 13. – С. 56–63.
7. Ляликов, А.М. Визуализация дефектов отдельных компонент тонких композитных элементов с одномерной дифракционной структурой / А.М. Ляликов // ЖТФ. – 2015. – Т. 85, вып. 12. – С. 114–119.
8. Орлов, В.В. О решетках, возникающих при нелинейной записи наложенных голограмм / В.В. Орлов // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, вып. 24. – С. 77–81.
9. Оптический производственный контроль; под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение. – 1985. – 400 с.
10. ГОСТ 8.528-85 ГСИ. Меры длины штриховые образцовые 2-го разряда и рабочие классы точности 5. Методика поверки // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-8-528-85-gsi>. – Дата доступа: 16.02.2017.
11. Акаев, А.А. Оптические методы обработки информации / А.А. Акаев, С.А. Майоров. – М.: Высшая школа, 1988. – 237 с.
12. Голографическая интерферометрия фазовых объектов / А.К. Бекетова [и др.]. – Л.: Наука. – 1979. – 232 с.
13. Авласевич, Н.Т. Интерферометр для измерительного контроля периодических микроструктур / Н.Т. Авласевич, А.И. Буть, А.М. Ляликов // VI Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр. / НИЯУ «МИФИ»; редкол.: Ю.В. Гуляев [и др.]. – М. – 2017. – С. 622–623.
14. Malacara, D. Interferogram Analysis for Optical Testing / D. Malacara, M. Servin, Z. Malacara // Taylor & Francis Group. – 2005. – 568 p.

Поступила в редакцию 04.04.17.