

# 双光路双波长相移干涉显微法测量 衍射光学元件形貌

周明宝 林大键 白临波

(中国科学院光电技术研究所, 微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

**摘 要** 衍射光学元件(DOE)表面形貌的测量需要解决因表面结构深度较大和表面不连续给测量带来的困难。本文将双波长测量法的思想推广应用到不连续深结构表面的测量, 并提出了一种新型数据处理方法, 有效地克服了这些困难。理论分析和测量结果表明, 基于这些方法的三维表面形貌测量系统纵向分辨率为 0.5 nm, 横向分辨率约为 0.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{NA} = 0.4$ ), 在整个纵向测量范围内重复测量精度优于 1.3 nm, 满足了衍射光学元件表面形貌测量的需要。

**关键词** 衍射光学元件, 三维表面形貌, 干涉显微镜, 相移干涉。

衍射光学元件是一种用微细加工技术制作的表面由微细结构组成的特殊光学元件。衍射光学元件表面形貌的测量<sup>[1, 2]</sup>需要解决由于表面结构深度较大和表面不连续给测量带来的困难。

传统的单色光干涉测量方法由于  $2\pi$  相位不确定性, 不能直接用于测量结构较深的表面。为克服  $2\pi$  相位的不确定性, 扩大深度测量范围, 采用了双波长测量方法<sup>[3]</sup>。双波长测量法最初是用于测量连续表面, 它的表面形貌计算公式并不能直接用于不连续深结构表面的测量。为了将双波长测量法的思想推广应用到不连续深结构表面的测量, 作者对此法进行了研究, 从干涉理论出发推导了双波长法测量不连续深结构表面形貌  $h$  的计算公式。其表达式为<sup>[4]</sup>

$$h = \begin{cases} \frac{\lambda_{\text{eq}}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} + \frac{\lambda_{\text{eq}}}{2} & \varphi_2 - \varphi_1 \in (-2\pi, -\pi], \\ \frac{\lambda_{\text{eq}}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} & \varphi_2 - \varphi_1 \in (-\pi, \pi), \\ \frac{\lambda_{\text{eq}}}{2} \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2\pi} - \frac{\lambda_{\text{eq}}}{2} & \varphi_2 - \varphi_1 \in [\pi, 2\pi), \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\lambda_{\text{eq}} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ ,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别为用波长  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  测量时得到的相位。

对于不连续的表面, 特别是对于衍射光学元件中大量出现的台阶状表面, 当测量点位于不连续处或附近时, 测量结果可能会出现失真<sup>[5]</sup>。在这种情况下, 系统实际测得的相位  $\varphi_m$  为<sup>[4]</sup>

$$\varphi_m = \arctan \frac{(\sin \varphi_H) S_H + (\sin \varphi_h) S_h}{(\cos \varphi_H) S_H + (\cos \varphi_h) S_h}, \quad (2)$$

式中,  $\varphi_h$  和  $\varphi_H$  是两个台阶引起的相位,  $S_h$  和  $S_H$  是两个台阶占据的面积, 如图 1 所示。

测量值  $\varphi_m$  与邻近的台阶相位  $\varphi_h$ 、 $\varphi_H$  和两个台阶在采样面元  $\delta S$  中所占据的面积有关。为了精确地反映采样面元  $\delta S$  上被测表面的形貌, 一种办法是缩小采样面元的面积, 然而这要受到显微物镜和 CCD 的限制; 另一种办法是用平均值来反映采样面元  $\delta S$  上被测表面的形貌。按直觉,  $\varphi_m$  似乎是平均相位, 并满足  $\varphi_h < \varphi_m < \varphi_H$ 。然而  $\varphi_h < \varphi_m < \varphi_H$  并不总是成立, 相反地,  $\varphi_m$  常常会溢出  $(\varphi_h, \varphi_H)$  范围。由此可见, 用测量系统测得的  $\varphi_m$  是不能作为采样面元  $\delta s$  上被测表面形貌的测量结果。在这种情况下, 必须对测量结果进行修正。方法首先是计算出相位  $\varphi_h$ 、 $\varphi_H$  占据的面积, 计算公式为<sup>[4]</sup>

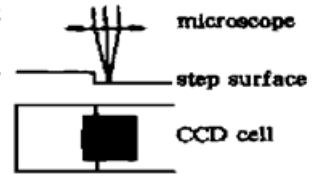


Fig. 1 Measurement of the stair-like surface

$$\left. \begin{aligned} S_h &= S \left( 1 - \frac{\sin \varphi_h - \cos \varphi_h \tan \varphi_m}{\sin \varphi_H - \cos \varphi_H \tan \varphi_m} \right)^{-1}, \\ S_H &= S - S_h, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

然后对结果进行修正。修正有两种方法: 一种方法是用平均相位作为测量值, 另一种方法是将  $S_h$  归入邻近的一个采样点  $\varphi_h$ , 将  $S_H$  归入邻近的另一个采样点  $\varphi_H$ 。这样由于丢失了一个采样点及邻近两个采样点的采样面元变大, 形成了一种不等距采样测量的效果。

将上面介绍的两种方法与相移干涉相位测量技术结合起来, 可有效地解决衍射光学元件表面形貌测量的难题。其测量系统<sup>[4]</sup>如图 2 所示。在测量光路中, 来自白光光源的光束经过

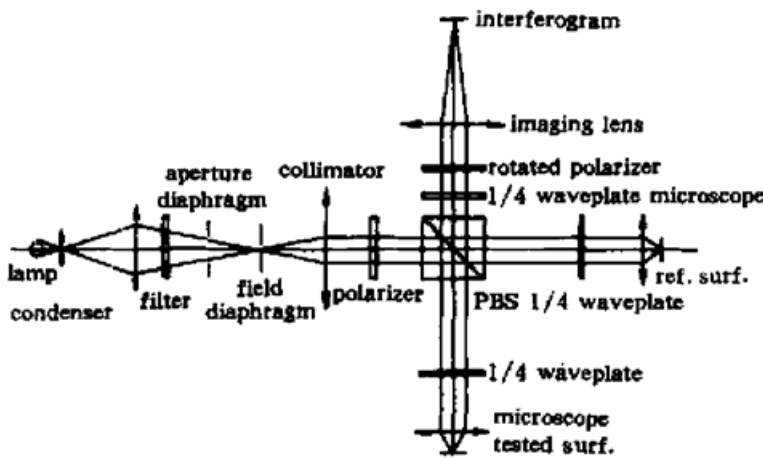


Fig. 2 System for measuring the 3-D surface topography of DOE

照明系统并被滤光后均匀照明视场光阑, 再经过准直镜形成平行光。平行光通过起偏器后变成线偏振光。线偏振光经过偏振分束棱镜 PBS 后分成两束: 一束是 P 光, P 光经过 1/4 波片后被显微物镜聚焦在参考面上, 反射后返回 1/4 波片并被转换成 S 光, 被 PBS 反射; 一束是 S 光, S 光经过另一套 1/4 波片后被显微物镜聚焦在被测面上, 反射后返回 1/4 波片并被转换成 P 光透过 PBS。两束光经过 PBS 后会合在一起, 然后通过

1/4 波片和检偏器发生干涉。测量时从 PBS 到参考面的光程与从 PBS 到被测面中一假想基准面的光程调节到等光程。此时, 如果被测面上某一测量点偏离基准面  $h$ , 则在两束干涉光中引入了  $\varphi = h4\pi/\lambda$  的相位差, 干涉光强受到相位  $\varphi$  及被测表面形貌的调制。

从结构上看, 测量系统主要由照明系统、干涉显微系统、CCD 摄像头、采集卡以及微型计算机系统部分组成。干涉显微系统形成的干涉图像由 CCD 摄像头接收, 采集卡将接收到的图像数字化后存入计算机, 这样就完成了一幅干涉图像的采样。将检偏器旋转一定的角度以改变两束干涉光的相位差, 使干涉图像发生变化, 再重新对干涉图像进行采样。如此依次进行, 直到完成要求数量的干涉图像的采样。干涉图像采样结束后, 计算机对采集的数据进行一系列的计算和处理, 最后将被测面的三维表面形貌显示在计算机的屏幕上。

测量系统能测量各种连续的或不连续的形状相对复杂的样品表面, 其纵向分辨率为 0.5 nm, 横向分辨率约为 0.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{NA} = 0.4$ ), 在整个纵向测量范围内重复测量精度优于

1.3 nm(即标准差  $\sigma = 1.3$  nm), 在不同时间内多次开机测量的稳定性为标准差  $\sigma = 3.0$  nm。

图 3(a) 是测量系统测出的一个实际衍射透镜在中心区域上的三维表面形貌, 图 3(c) 是图 3(a) 在某一直径方向上的横切面轮廓曲线。从测出的三维表面形貌可以看到在二元光学元件加工过程中由套刻误差引起的台阶偏移以及出现的尖峰。这与图 3(b) 和图 3(d) 所示的实际情况是一致的。图 3(b) 是这片衍射光学元件中心区域的干涉显微图。图 3(d) 是用 ALPHA-STEP 500 轮廓仪测出的一个剖面上的轮廓, 这个剖面的位置与图 3(c) 所示的位置接近重合。比较图 3(c) 和图 3(d) 可以看出, 图 3(c) 所示的轮廓曲线与图 3(d) 所示的在相同区域(从  $100 \mu\text{m}$  到  $600 \mu\text{m}$ ) 内的轮廓曲线是基本一致的。

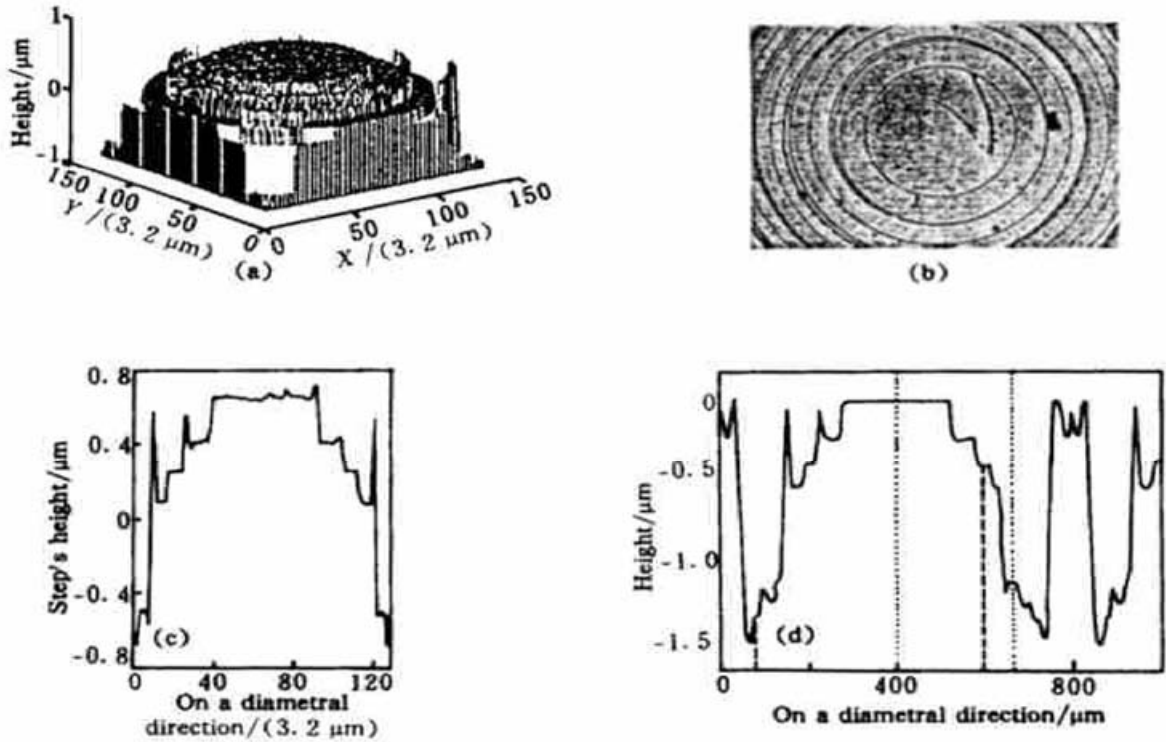


Fig. 3 Measuring result of the actual BOE. (a) The result given by the measuring system, (b) Interferogram obtained by an interference microscope, (c) Surface profile of a cross-section on a direction, (d) Topography curve given by the profiler of the cross-section at the similarly same position

**结 论** 上面介绍了一种基于双波长相移干涉和数据处理的衍射光学元件三维表面形貌测量方法, 结果表明:

1) 基于连续表面的双波长表面形貌计算公式并不能直接用于不连续深结构表面的测量。但是如果对公式进行修正后, 可应用到不连续深结构表面的测量。

2) 对于不连续表面, 当测量点位于不连续处或附近时, 测量结果可能会出现失真。利用本文提出的数据处理方法, 通过对数据进行分析和修正, 可以改善测量结果。

3) 将本文介绍的经过修正的双波长测量方法和数据处理方法与相移干涉位相测量技术结合起来, 可有效地解决衍射光学元件表面形貌测量的难题, 所建立的测量系统除具有快速、精密、分辨率高等一般共有的优越性外, 还具有测量是在三维空间进行的、纵向测量范围可扩展、可测量深台阶结构等一些技术特点。

## 参 考 文 献

- [1] Korner T, Sheridan J T, Schwider J. Interferometric inspection of fine deep surface relief gratings. *Optik*, Annual Report 1993, 104
- [2] Schwider J, Falkenstorfer O. Twyman-Green interferometer for testing micro-spheres. *Optik*, Annual Report 1994, 60~ 64
- [3] Wyant J C. Testing aspheric using two-wavelength holography. *Appl. Opt.*, 1971, **10**(9) : 2113~ 2118
- [4] 周明宝. 衍射光学元件三维表面形貌测量方法研究. 四川联合大学博士学位论文, 1998
- [5] Greivenkamp J E. Sub-Nyquist interferometry. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24) : 5245~ 5258

## Measuring Method for Topography of DOE Based on Dual-Path Two-Wavelength Phase Shifting Interferometric Microscopy

Zhou Mingbao    Lin Dajian    Bai Linbo

(State Laboratory of Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,  
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 19 October 1998; revised 22 March 1999)

**Abstract** The surfaces of diffraction optical element (DOE) are often deep and discontinuous, which lead to some difficulties for measurement of the 3-D surface topography of DOE. The generalized two-wavelength interferometry and a new data processing method are proposed, which effectively overcome the difficulties. Based on these techniques, a new measuring system has been set up with existing conditions. The system's longitudinal resolution is 0.5 nm, the transversal resolution about 0.5  $\mu\text{m}$  ( $\text{NA} = 0.4$ ), the measuring accuracy within the whole longitudinal measuring range is better than 1.3 nm.

**Key words** diffraction optical element, 3-D surface topography, interference microscope, phase-shifting interferometry.