

通过数据处理实现微细台阶面的测量

周明宝¹ 林大键¹ 郭履容² 郭永康²

¹ 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;

² 四川联合大学物理系 成都 610041

提要 分析了微细台阶面表面形貌测量可能会出现平滑或失真现象的根源,提出一种基于测量数据分析和数据处理的解决方法。此方法已成功地应用于自行研制的衍射光学元件三维表面形貌测量系统中。

关键词 微结构, 表面形貌, 数据处理, 相移干涉

通过微细加工方法制作的微结构表面,例如在微电路制作过程中反复出现的掩模结构表面,通过多次套刻与刻蚀方法制作的二元光学元件表面以及通过微机械加工技术制作的微机械结构表面,都是台阶形的不连续表面。为了精确测量这种微细台阶面的表面形貌,要求采样点足够小,采样足够密。但是由于受实际条件的制约,采样点总是具有一定的尺寸,采样间距也不能足够小。我们发现台阶表面的测量会出现两种误差:一是台阶交接处被平滑,一是测量结果严重失真。为了解决这个问题,本文提出了一种数据处理方法,通过对测量数据的分析和处理,给出台阶表面精确的测量结果。在不需要改变测量系统的情况下,提高了系统的测量分辨率和测量精度。

1 相移干涉法测量微细台阶面的失真问题

图 1 是一种典型的基于相移干涉显微原理的微结构表面形貌测量系统^[1]。来自光学系统前端光路的光束经显微物镜后透过参考板,然后由分光板上的半反半透膜分成两束,一束透过分光板投射到被测面上,反射后经分光板和参考板回到显微镜。另一束被分光板反射到参考板上表面中心区域,反射后回到分光板并再次被反射,然后透过参考板回到显微镜。两束光在显微物镜视场中会合并发生干涉。

干涉光强的强弱与两束相干光的位相差有关,此位相差由两部分组成,一部分是由被测表面引起的,另一部分是由参考面的移动引起的。在理想情况下,干涉光强可表达成^[1]

$$I = a + b \cos(\varphi - \varphi_s) \quad (1)$$

式中, a , b 为与两束相干光光强有关的参量, φ_s 为被测表面引起的位相, φ 为参考面移动引起的位相差,即位相调制项。

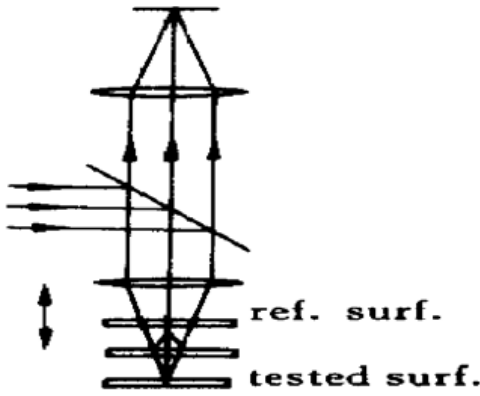


图 1 双光路 Mirau 型干涉显微表面形貌测量系统

Fig. 1 Measuring system of surface topography based on double beam Mirau interference microscope

相移干涉法就是使位相调制项 φ 取若干个离散的移相值 φ_i , 分别测出不同移相值时的干涉光强 I_i , 然后将 φ_i 和 I_i 代入(1) 式, 求解由它们联立的方程组, 便可求出被测位相。对于五步相移法情形, 位相调制项取 5 个不同的移相值, $\varphi_i = -\pi, -\pi/2, 0, \pi/2, \pi$, 干涉光强采样 5 次, 其位相计算公式为

$$\varphi_s = \arctan \frac{2(I_4 - I_2)}{2I_3 - I_5 - I_1} \tag{2}$$

根据被测表面引起的位相 φ_s , 便可计算出被测表面的形貌

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \cdot \varphi_s \tag{3}$$

在相移法表面形貌测量系统中, 干涉图像是由 CCD 图像采集系统测量的。由于 CCD 是由具有一定尺寸的像元呈列阵形式组成的, 因此 CCD 对干涉图像的测量是一种抽样的平滑的测量^[2,3]。考虑到这种情况, CCD 一个个像元上或一个个采样点上测得的干涉光强可表达成一个数学表达式

$$P(x, y) = [I(x, y) * * \text{rect}(x/a, y/b)] \text{comb}(x/x_s, y/y_s) \tag{4}$$

式中, $P(x, y)$ 为 CCD 一个个像元上总的干涉光强, $* *$ 是二维卷积符号, a, b 为 CCD 像元尺寸, x_s, y_s 为像元之间距离。

(4) 式中的 $\text{comb}(x/x_s, y/y_s)$ 说明了 CCD 对干涉图像的测量是一种抽样测量。抽样对位相测量的影响主要表现在空间频谱的混叠和渗漏上。为了尽可能减少混叠和渗漏, 应合理选择测量范围和抽样间距 x_s, y_s 。

(4) 式中的 $\text{rect}(x/a, y/b)$ 说明了 CCD 对干涉图像的测量是一种平滑测量。由此可知, 测量系统测量的不是被测量面上一个个点的位相, 而是与 CCD 像元共轭的那个面元上的位相, 即一个采样点实际上是一个采样面元。

如果考虑到 CCD 像元具有的大小, 则根据(1) 式, (2) 式和(4) 式, 五步相移干涉测量得到的位相为

$$\varphi_m = \tan^{-1} \frac{\sin \varphi_s * * \text{rect}(x/a, y/b)}{\cos \varphi_s * * \text{rect}(x/a, y/b)} \tag{5}$$

如果被测表面是连续平滑的, 可以认为在一个采样面元这样微小的区域内 φ_s 基本不变, 那么由上式计算得到的 φ_m 近似等于 φ_s ; 但如果被测表面是不连续的或相当复杂, 由上式计算得到的 φ_m 显然不能认为近似等于 φ_s 。

对于表面呈台阶分布的微细结构, 当采样点位于两个台阶交界处或附近时(如图 2 所示), (5) 式可简化为

$$\varphi_M = \arctan \frac{2(P_4 - P_2)}{2P_3 - P_5 - P_1} = \arctan \frac{\sin \varphi_H \cdot S_H + \sin \varphi_h \cdot S_h}{\cos \varphi_H \cdot S_H + \cos \varphi_h \cdot S_h} \tag{6}$$

式中, φ_H 和 φ_h 为两个台阶引起的位相, S_h 和 S_H 为采样点在两个台阶上的面积。

在上式中, 若 $S_h = 0$, 这种情况实际上就是采样面元位于连续表面上的情形, 那么位相可以精确地测出且 $\varphi_M = \varphi_H$; 若 S_h 或 S_H 都不等于 0, 这种情况对应于采样点位于不连续处或附近的情形, 此时 φ_M 不等于 φ_H 也不等于 φ_h 。在这种情况下, 为了更精确地反映采样面元 $\&$ 上被

测表面的形貌, 一种办法是缩小采样面元的面积, 缩短采样间距, 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 δ_s 上被测表面的形貌。按直觉, φ_M 似乎是采样面元上的平均位相并满足 $\varphi_H < \varphi_M < \varphi_h$ 。然而实际上, $\varphi_H < \varphi < \varphi_h$ 并不总是成立的, 相反地, φ_M 常常会溢出 (φ_h, φ_H) 范围, 从而出现失真。图 3 是模拟计算结果。从图中可以看出, 当 φ_h 为 -0.45π , φ_H 大于 0.55π 时, 或当 φ_h 为 0.25π , φ_H 小于 -0.7π 时, φ_M 就会溢出 (φ_h, φ_H) 范围, 测量出现了失真。

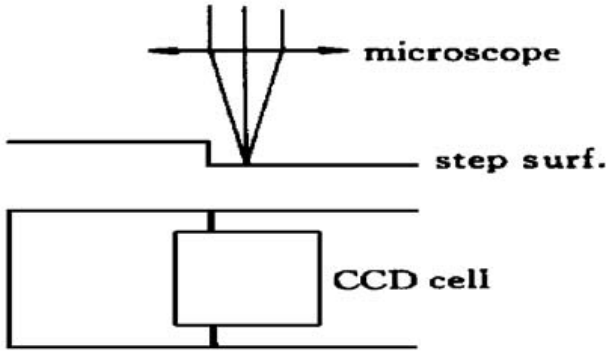


图 2 台阶表面的测量

Fig. 2 Measurement of stair-like surface

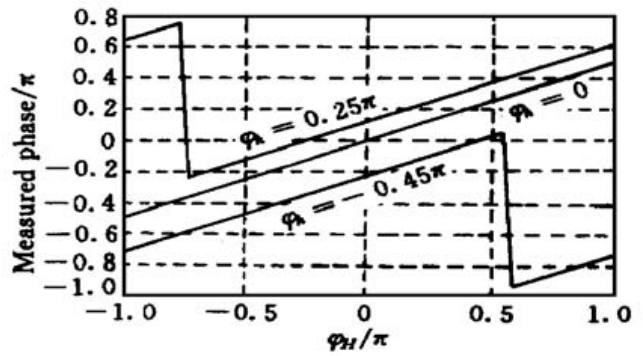


图 3 φ_M 常常会溢出 (φ_h, φ_H) 范围

Fig. 3 φ_M often exceeds (φ_h, φ_H)

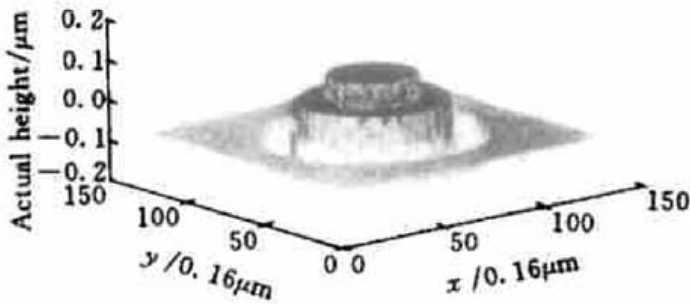


图 4 一种台阶状的微结构

从中心到边缘各台阶的高度分别为 0.09375, 0.03125, -0.1125, -0.05625 μm; 各台阶的半径分别为 3.0, 5.0, 7.5 μm

Fig. 4 A stair-like microstructure

Height of each stair from central to edge: 0.09375, 0.03125, -0.1125, -0.05625 μm; Radius of each stair: 3.0, 5.0, 7.5 μm

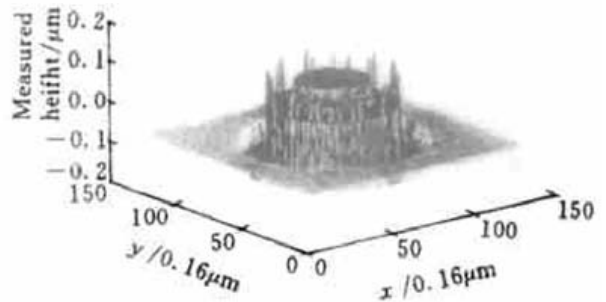


图 5 对图 4 所示的微结构的测量结果

Fig. 5 Measuring result of the microstructure shown as Fig. 4

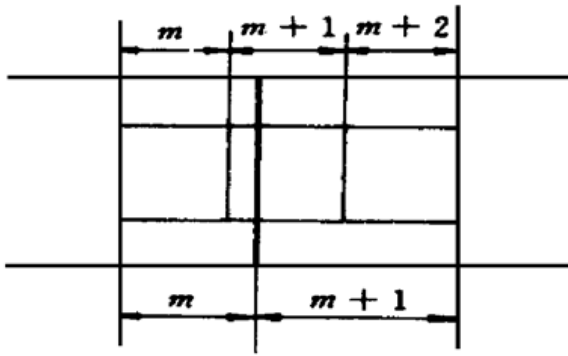
对于图 4 所示的一种台阶状的微结构, 如果用 φ_M 作为平均位相, 测量结果如图 5 所示, 可以看出在第二与第三台阶的连接处出现了虚假的尖峰。

由此可见, 对于台阶状的表面, 当采样点位于不连续处或附近时, 测量系统测得的结果不能总是如实反映采样面元 δ_s 上被测表面的形貌。在这种情况下, 必须对测量结果进行修正, 消除平滑或失真对测量结果的影响。

2 通过数据解决失真问题

通过对微细台阶面测量过程的分析, 我们已经知道, 对于微细台阶面的测量, 若采样点完全位于一个台阶上, 测量数据不会出现失真; 若采样点位于两个台阶交界处或附近, 如果 φ_M 在两个台阶的位相范围 (φ_h, φ_H) 内, 测出的台阶面被平滑了, 但不会出现严重失真, 但如果 φ_M 溢出 (φ_h, φ_H) , 则测量结果将会出现严重失真。据此可判断测量数据中哪些是失真的; 找出失

真的数据后, 将失真数据 φ_M 以及 φ_h, φ_H 和采样面元尺寸 $S (= S_h + S_H)$ 代入(4) 式计算出采样面元在两个台阶上的面积, 即



$$\begin{cases} S_h = \frac{S}{1 - \frac{\sin \varphi_h - \cos \varphi_h \cdot \tan \varphi_M}{\sin \varphi_H - \cos \varphi_H \cdot \tan \varphi_M}} \\ S_H = S - S_h \end{cases} \quad (7)$$

利用 $\varphi_M, \varphi_h, \varphi_H$ 和算出的 S_h, S_H , 就可以对结果进行修正. 修正有两种方法, 一是用平均位相作为测量值, 计算公式为

$$\varphi_m = \frac{\varphi_h \cdot S_h + \varphi_H \cdot S_H}{S} \quad (8)$$

图6 将位于台阶上的采样点并入邻近采样点

另一种方法是将 S_h 归入邻近的采样点 φ_h , 将 S_H 归入邻近的另一个采样点 φ_H , 去掉失真的采样点. 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, 如图6所示.

我们已将这种数据处理方法成功地用于自行研制的衍射光学元件(DOE) 三维表面形貌测量系统^[2]中. 这套测量系统在干涉显微原理基础上采用相移干涉方法通过测量由被测表面引起的位相变化进而得到被测表面的三维表面形貌. 为了解决台阶形 DOE 表面不连续给测量带来的失真问题, 便采用了本文提出的这种数据处理方法. 图7和图8便是采用这套测量系统得到的几个测量实例. 图7测量的是一个实际的二元光学元件(BOE), 其中图7(a)是测量系统测得的三维表面形貌, 图7(b)是图7(a)在某一直径方向上的横切面轮廓曲线, 而图7(c)是 ALPHA-STEP 500 型台阶仪测得的在差不多相同的直径方向上的横切面轮廓曲线.

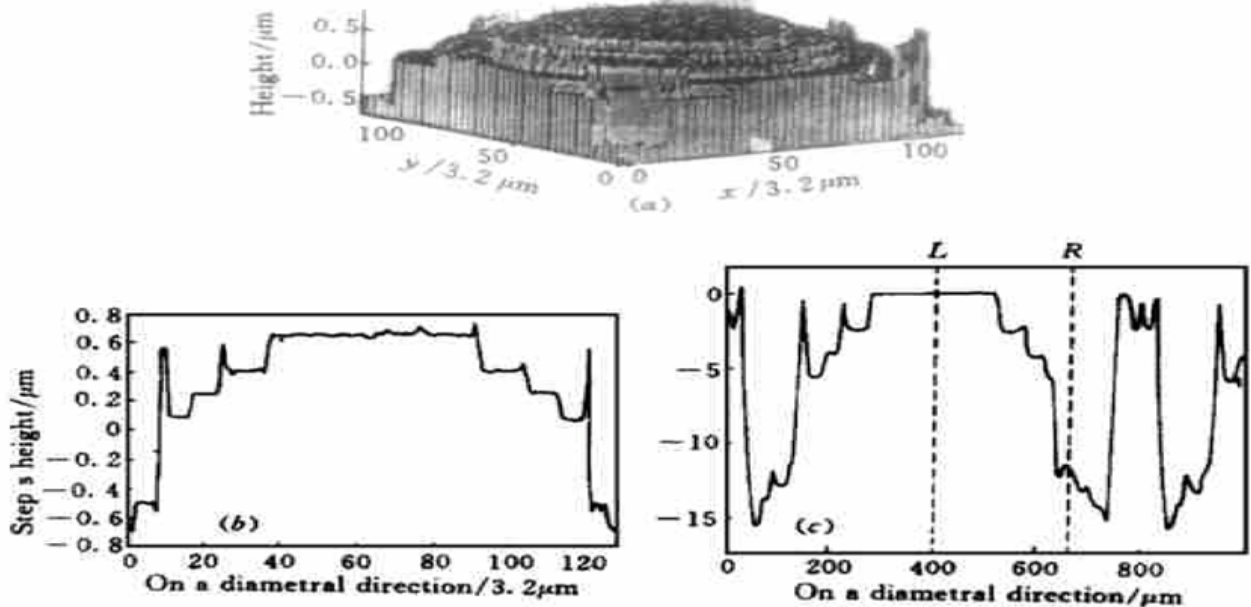


图7 一个实际的BOE的测量结果

- (a) 测量系统测出的BOE的三维表面形貌; (b) 从图(a)中得到的某一直径位置上的一个横切面;
- (c) 台阶仪测出的在差不多相同的一个直径位置上的一个横切面

Fig. 7 Measuring results of BOE

- (a) 3-D surface topography obtained by the measuring system;
- (b) Cross section profile curve in a diametral direction of Fig. 7 (a); (c) Cross section profile curve given by the profiler

将图 7(b) 与图 7(c) 中一段相同范围(近似在 100~ 600 μm 范围)内的曲线进行比较可以看出测量系统测得的结果与台阶仪测出的结果基本一致, 它们之间的一些差异是由于测量位置有些不一致。从测量结果可以看到在 BOE 加工过程中普遍存在的由套刻误差引起的台阶偏移以及尖峰。

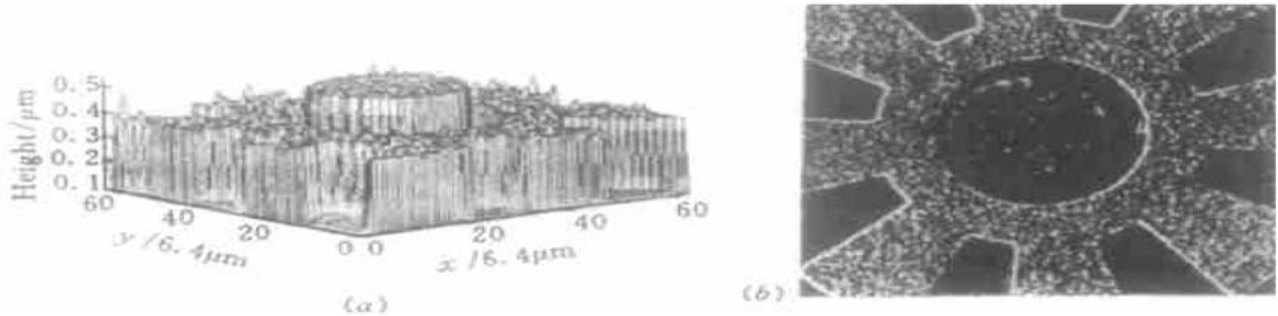


图 8 一个实际的微电机的测量结果

(a) 测量系统测出的微电机的三维表面形貌; (b) 微电机的干涉显微图

Fig. 8 Measuring result of the micromotor

(a) 3-D profile of an electrostatic micromotor; (b) SEM view of the micromotor

图 8 是对一个用微机械加工技术制作的一种静电型微电机的测量结果。可以明显地看出中心轴的表面比较平坦, 转子的表面比较粗糙。这与 Hitachi S4000 型电子扫描显微镜测出的显微图 8(b) 显示的结果是一致的。利用测量数据可以求出中心轴的平均高度为 0.5100 μm (标准差 $\sigma = 1.3 \text{ nm}$), 转子的平均高度为 0.3903 μm (标准差 $\sigma = 1.3 \text{ nm}$)。测量数据是用 ALPHA-STEP 500 型台阶仪和 MASK P/N 7300-2095 标准板定标后测得的结果。

参 考 文 献

- 1 J. C. Wyant. Optical testers refine interferometry. *Laser Focus World*, 1991, 27(1): 139~ 147
- 2 K. N. Prettyjohns. Charge coupled device image acquisition for digital phase measurement interferometry. *Opt. Eng.*, 1984, 23(4): 371~ 378
- 3 J. E. Greivenkamp. Sub-Nyquist interferometry. *Appl. Opt.*, 1987, 26(24): 5245~ 5258

Measurement of Stair-like Surfaces' Topography by Data-processing

Zhou Mingbao Lin Dajian

(State Lab of Optical Technologies on Microfabrication, Institute of Optics & Electronics, Chengdu 610209)

Guo Lürong Guo Yongkang

(Physics Department, Sichuan University, Chengdu 610041)

Abstract The reason why the measuring results are probably wrong when measuring the topography of stair-like surfaces is analyzed, and the new data processing method is presented, which can be applied to correct the measuring results of stair-like surfaces' topography. The method has been successfully used in the system for measuring the 3-D surface topography of diffractive optical elements.

Key words microstructure, topography, data processing, phase-shifting interferometry