

文章编号 1004 924X(2001)03 0226-04

# 微分相衬干涉显微镜定量测量表面形貌

许 谊<sup>1</sup>, 徐毓娴<sup>1</sup>, 惠 梅<sup>2</sup>, 蔡 昕<sup>1</sup>

(1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084; 2. 中国科学院西安光机所, 陕西 西安 710068)

摘要: 改进了用于定量测量样品表面形貌的微分相衬干涉显微镜系统, 对系统中由 Nomarski 棱镜引起的相位差  $\beta$  的消零工作提出了一种新的方法, 实验证明是有效可靠的, 并且对样品表面三维形貌重构、截面轮廓比对及系统的测量精度进行了实验研究。

关键词: 干涉显微镜; 相衬显微镜; 形貌测量术

中图分类号: TH742 文献标识码: A

## 1 引言

微分相衬干涉显微镜也称 Nomarski 显微镜, 1955 年由法国的 Nomarski 提出, 近年来已成为国内外普遍使用的一种观察表面的高灵敏度光学仪器。微分干涉显微镜不仅具有  $\text{nm}$  级的分辨率, 可看到一般光学显微镜难以观察到的微细结构, 而且还能使被观察样品的像具有很强的立体感和鲜艳的色彩。这种显微镜在金相、晶体、集成电路、光学、陶瓷工艺, 以至生物和医学等众多的领域发挥了重大的作用。

为实现定量测量, 本文进一步完善了微分干涉显微测量系统, 通过测量旋转检偏器在不同位置时的视场光强, 计算出被测样品的表面形貌。该方法不需要参考反射镜, 操作简便, 易于推广。

## 2 测量原理

### 2.1 干涉光路

本文采用微分相衬干涉显微镜, 作为测量系统的光机主体, 其光路如图 1 所示。

光源发出的光经聚光镜和起偏器后变成线偏振光, 经半透半反镜入射在 Nomarski 偏振分光棱镜上, 棱镜将其分成两束具有微小夹角且振动方向相互垂直的线偏振光, 通过显微物镜后, 产生剪切量为  $\Delta x$  的平行光入射到被测件表面。从被测表面反射回的两束正交偏振光再经原路返回, 由

Nomarski 棱镜重新复合共线, 然后通过  $1/4$  波片和检偏器后发生干涉, 被 CCD 摄像机接收或通过目镜观察。

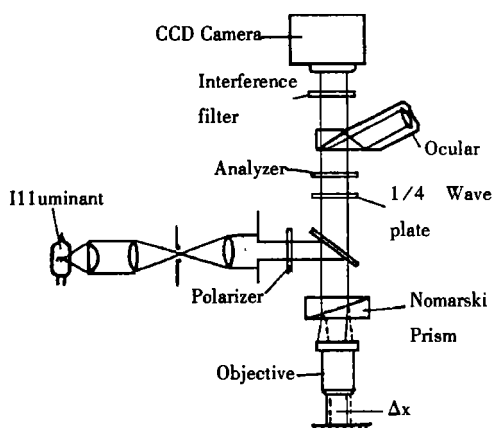


Fig. 1 Differential interference contrast microscope system

由于两束相干光的横向剪切量  $\Delta x$  小于显微物镜的分辨率极限, 使样品表面微观起伏的高度变化在相干背景上以强烈的光强和颜色变化表现出来, 使之具有明显的阴影效果, 具有很强的立体感和鲜艳的彩色感, 直观形象地反映出样品表面微观轮廓, 可以观察到表面微小的凹凸细节<sup>[1]</sup>。

在微分干涉显微镜中, 共光路使两路相干光经过相同的光路, 故外界环境干扰如机械振动、空气扰动等对它们的影响相同, 不会引起附加的光程差, 因此外界环境的变化对测量结果无影响, 而且不需要标准参考反射镜, 可以对超精加工表面轮廓进行精确测量。

## 2.2 光路相位计算方法

设 Nomarski 棱镜剪切方向为  $x$  轴,  $I_1$  和  $I_2$  分别为直流背景光强和交流背景光强,  $\theta$  为检偏器方位角与  $x$  轴的夹角,  $\varphi(x, y)$  为被测相位分布,  $\beta$  是由 Nomarski 棱镜引起的相位差, 则干涉场中的光强分布公式为:

$$I(x, y, \theta) = I_1 + I_2 \sin(2\theta + \varphi(x, y) + \beta) \quad (1)$$

系统采用相移干涉术进行相位提取。通过旋转检偏器, 实现相位调制。当检偏器转角  $\theta = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$ , 得到一组光强方程式, 解该方程组, 得到相位分布为<sup>[2]</sup>:

$$\varphi(x, y) + \beta = \tan^{-1} \frac{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y, \theta_i) \sin 2\theta_i}{\sum_{i=1}^4 I_i(x, y, \theta_i) \cos 2\theta_i} \quad (2)$$

在求出相位分布  $\varphi(x, y)$  后, 表面形貌沿  $x$  方向的偏微分便可由下式给出:

$$\frac{\partial H(x, y)}{\partial x} = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\varphi(x, y)}{\Delta x} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为光波波长,  $\Delta x$  为两束正交线偏振光间的横向剪切量。

利用同样方法求出表面形貌沿  $y$  方向的偏微分后, 对全微分进行积分, 便可以获得表面形貌  $H(x, y)$ <sup>[3]</sup>:

$$H(x, y) = \int_{(0,0)}^{(x,y)} \frac{\partial H(x, y)}{\partial x} dx + \frac{\partial H(x, y)}{\partial y} dy \quad (4)$$

从上式看出, 表面形貌是通过对斜率测量数据的积分运算获得的。因此, 微分干涉显微镜可以测量表面微观起伏大于半个光波波长的样品表面, 而且公式(2)的相除运算可以使得系统的随机误差对表面形貌测量结果的影响减小到最低限度<sup>[4]</sup>。

## 3 Nomarski 棱镜中附加相位差的调零

若以 Nomarski 棱镜上、下两个棱镜厚度相等

处作为棱镜中心轴, 并设棱镜中心轴偏离显微镜光轴的距离为  $a$ , 光线在第一直角棱镜中行进的距离为  $t_1$ , 在第二直角棱镜中行进的距离为  $t_2$ 。设棱镜材料对  $o$  光和  $e$  光的折射率分别为  $n_o$  和  $n_e$ , 棱镜楔角为  $\theta$ , 光波波长为  $\lambda$  则可以写出两束正交偏振光在 Nomarski 棱镜中的附加光程差为式(5), 由 Nomarski 棱镜引起的相位差为式(6)。

$$\Delta = 2(n_o - n_e)(t_1 - t_2) = 4(n_o - n_e)atan\theta \quad (5)$$

$$\beta = \frac{8\pi}{\lambda}(n_o - n_e)atan\theta \quad (6)$$

由上述公式可以看出, 相位差  $\beta$  是 Nomarski 棱镜位置  $a$  的线性函数, 它不仅与棱镜材料和棱镜形状有关, 而且还与照明波长有关。

为使提取的相位值为准确的被测物相位值, 在通过旋转检偏器进行微观形貌测量时, 光路调整中应该把  $\beta$  调整为零。

本文提出一种新的方法, 进行  $\beta$  调零的工作。首先将检偏器置于零位且和起偏器处于消光的位置, 然后移动 Nomarski 棱镜的位置, 在全程的范围内找出干涉场中光强的最大值和最小值, 计算出中值, 固定检偏器不动, 再次移动 Nomarski 棱镜, 找出干涉场光强的中值位置, 此位置即为 Nomarski 棱镜上、下两个棱镜厚度相等处, 即  $\beta = 0$  的位置。

为验证这种  $\beta$  调零的方法, 利用上述微分干涉显微系统测量二级平晶( $\varphi = \frac{4\pi\partial H}{\lambda\partial x} \cdot \Delta x \approx 0$ , 所以, 相位中只有  $\beta$  项)的微观三维形貌, 理论上测量出视场中各点的  $\varphi$  值均为零。实际  $\varphi$  值测量结果如表 1 所示。

Table 1 Measurement of  $\varphi$  (coordinate: pixel)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
329	0	0.1526	0.1974	0.0555	0.0713	0.0831	0.2268	0.1853	0.0768
330	0	0.1419	0.0624	0.2268	0	-0.0624	0.1326	0.2111	0.0666
331	0	0.0719	0.2450	0.1419	0.1974	0.2450	0.1244	0.1974	-0.1171
332	0	0	0	0.0666	0.2111	0.2606	0.0768	0	0.1326
333	0.0831	0.0666	0.2268	0.3948	0.1853	0.2111	-0.0666	0.1171	0.2187
334	-0.0624	0.1326	0.1526	-0.0666	0.0713	0.2268	0.1799	0.2788	0.1651
335	0.1974	0.2268	0	0.1419	0.2111	0.0768	0.2111	0.2268	-0.0666

Table 1 (continuous)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
336	0.1853	0.0666	0.1526	0.0768	0.2915	0.2268	0.0666	0	0.0588
337	0.0907	0	0.0768	0.1526	0.0768	0.0713	0.0624	0.0588	0
338	0.1244	0	0	0	0.0666	0	0.2268	0.3948	0.1419
339	0	0.0713	0.1419	0.0768	0.0666	0.0713	0.0666	0.1326	0.2861
340	0.1651	0.0768	0	0	0	0.0768	0.0768	0	0
341	0.0326	0.1526	0.2111	-0.0666	0.1853	0.1244	0	0.1747	0.0555
342	0.2783	0.0768	0.1799	0.1244	0.1107	0	0.0624	-0.0768	0
343	0.3029	0.0713	0.1244	0.1853	0.0713	0	0.0624	0	0
344	0.0768	0	0	0	0	0.1853	0	0.1326	0.0555
345	0.1419	0.0624	0	0	0	0.2626	0.1244	0.2268	0.3029
346	-0.1419	0.0666	0.1526	0	0	0.1853	0.2450	0.3488	0.3430

从以上数据可以看出,  $\varphi$  值和理论值相差很小, 而且无论使棱镜向哪个方向偏离此位置, 计算出的  $\varphi$  值都比上面的测量值大。所以, 本文提出的  $\beta$  调零方法是正确的。

#### 4 三维形貌重构的实验结果

系统结构框图如图 2 所示。系统主要由微分干涉显微镜、CCD 摄像机、图像采集卡及计算机等部分组成。图像采集卡采用北京中自技术集团出品的 CA-MPE1000 型黑白图像采集卡。

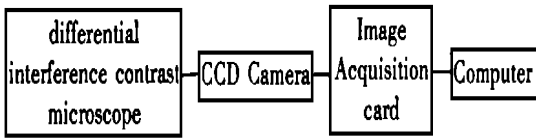


Fig. 2 System composing figure

微分干涉显微镜形成的干涉图像由 CCD 摄像机进行探测, CCD 摄像机输出的视频信号被图像采集电路数字化后送入计算机内存, 便完成一幅干涉图像的采样, 然后, 旋转检偏器的角度, 使参考相位变化  $\pi/4$ , 再完成一幅干涉图像的采样。如此依次进行, 完成 4 幅干涉图像的采样, 然后由计算机进行相位和形貌等一系列计算和处理, 在显示屏上显示被测表面的三维形貌图及粗糙度参数。

##### 4.1 三维形貌重构的实验

利用微分干涉显微系统测量标准样块, 如下图所示。

其中, 图 3 是用微分干涉显微镜系统获得的  $Ra = 0.35 \times 10^{-6}$  标准样块的截面轮廓图, 计算出来的  $Ra = 0.32383 \times 10^{-6}$ , 图 4 是用接触式探针轮廓仪获得的截面轮廓图, 图 5 是用微分干涉显微镜系统获得的  $Ra = 0.35 \times 10^{-6}$  标准样块的三

维形貌图。图 6 是用微分干涉显微镜系统获得的  $Ra = 0.09 \times 10^{-6}$  标准样块的三维形貌图。

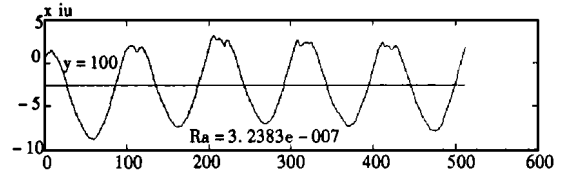


Fig. 3  $Ra = 0.35\mu$  profile curve (coordinate of x: pixel)

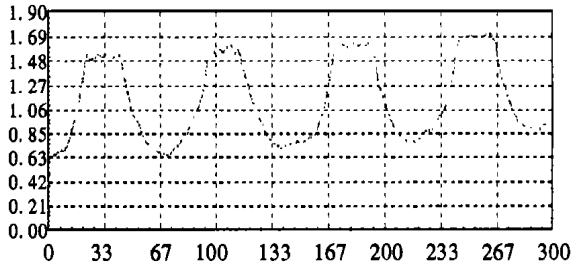


Fig. 4  $Ra = 0.35\mu$  profile curve by mechanical stylus profilometers (coordinate of x:  $\mu\text{m}$ )

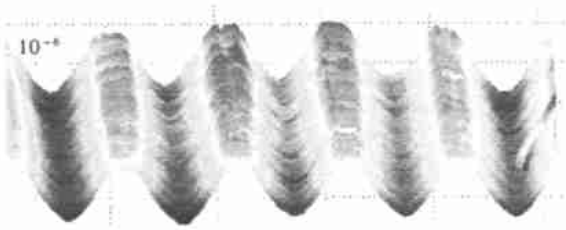


Fig. 5  $Ra = 0.35$  three dimensional surface topography

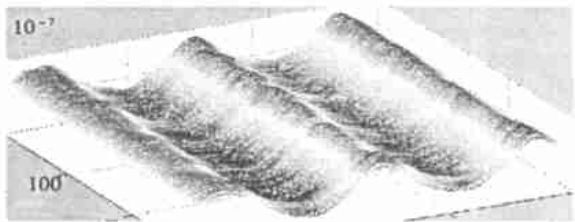


Fig. 6  $Ra = 0.09$  three dimensional surface topography

从上图看出, 图 3 与图 4 达到了较好的吻合性, 从而验证了我们这套系统的形貌测量数据是正确可靠的。

#### 4.2 $Ra$ 值重复精度实验

为获得微分干涉显微镜系统的重复测量精度, 以  $Ra = 0.35 \times 10^{-6}$  标准粗糙度样块作为被测件, 测量 7 组数据, 所得结果如表 2 所示。

**Table 2**  $Ra = 0.35 \times 10^{-6}$  precision of repeated measurement of standard sample (unit:  $1 \times 10^{-6}$ )

$Ra = 0.35$	
1	0.32869
2	0.32844
3	0.32816
4	0.32709
5	0.32673
6	0.32845
7	0.32773
Arithmetic mean	0.327898571
Standard deviation	0.000690723
Max. residual	0.00117

#### 4.3 验证 $Ra$ 值有效性实验

经过对三块样品的实验, 计算出来的  $Ra$  值如表 3 所示。

#### 参考文献:

- [1] 陈峻堂. 微分干涉相衬显微术[J]. 光学仪器, 1984, 6(1): 6-15.
- [2] 高宏, 薛实福, 等. 超光滑表面轮廓的绝对测量[J]. 计量学报, 1995, 16(2): 103-107.
- [3] Barty A, Nugent K A, Paganin D, et al. Quantitative optical phase microscopy[J]. Opt. Lett, 1998, 23(11): 817-819.
- [4] Van Munster E B, Van Vliet L J, Aten J A. Reconstruction of optical path length distributions from images obtained by a wide field differential interference contrast microscope[J]. Journal of Microscopy, 1997, 188(2): 149-157.

## Quantitative surface topography determination by differential interference contrast microscopy

XU Yi<sup>1</sup>, XU Yuxian<sup>1</sup>, CAI Xin<sup>1</sup>, HUI Mei<sup>2</sup>

(1. Precision Instrument Department, Tsinghua University, Beijing, 100084, China;

2. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Academia Sinica, Xi'an, 710068, China)

**Abstract:** Quantitative surface topography determination by differential interference contrast microscope system is partly exploited in this paper. A new method of minishing phase difference  $\beta$  to zero caused by Nomarski prism in the system is effective and reliable. The reconstruction of three-dimensional surface topography of the sample, comparison of profile curves, and the system measuring accuracy are investigated in detail.

**Key words:** interference microscopes; phase contrast microscopes; topography

作者简介: 许谊(1974-), 男, 四川省江邮县人, 硕士研究生, 专业方向: 精密仪器与机械。

E-mail: xuyi98@mails.tsinghua.edu.cn

**Table 3**  $Ra$  result of measurement of three samples (unit:  $1 \times 10^{-6}$ )

Sample	Theoretical value of $Ra$	Measured value of $Ra$
1	0.35	0.3283
2	0.32 0.63	0.44483
3	0.16 0.32	0.27317

表 3 中样品 1 的  $Ra$  实际测量值与  $Ra$  理论值的差异是: 由于  $\Delta x$  小于显微镜分辨率极限, 无法获得其具体数值。计算时, 以  $\Delta x$  设计值代入计算公式, 而非实际值, 从而使得测量结果与实际值有数值上的差, 这可以通过给测量系统定标来消除。

## 5 结 论

利用微分干涉显微镜系统, 不仅能够较为准确地重构出样品的微观三维形貌, 而且能够定量地测量出样品的表面高度及表面粗糙度系数  $Ra$ , 重复测量精度小于 1.5nm。

另外, 本文提出的对于微分干涉显微系统 Nomarski 棱镜位置偏移所引起的相位差  $\beta$  的调零方法, 经过实际验证也是行之有效的。