

文章编号 1004-924X(2011)04-0828-08

复合型超精密表面形貌测量仪

王淑珍^{1,2}, 谢铁邦¹, 常素萍¹

- (1. 华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;
2. 洛阳理工学院 机电工程系, 河南 洛阳 471023)

摘要:研制了基于同一显微镜基体实现原子力探针扫描测量与非接触光学测量两种功能的复合型超精密表面形貌测量仪。分析了基于白光显微干涉原子力探针的测量方法、探针微悬臂变形量与白光干涉条纹移动量的关系以及探针微悬臂测量非线性误差的修正方法,和通过融合垂直扫描系统的位移量和悬臂梁变形量得到了原子力探针的工作方式。研制了三维精密位移系统和基于白光显微干涉的原子力探针测头。采用原子力探针扫描测量对 NT-MDT 公司生产的扫描探针校准光栅 TGZ2_PT B进行了重复性实验,实验显示标准差为 0.96 nm,相对重复性误差为 3.08%。给出了原子力探针扫描测量、相移干涉测量及白光干涉垂直扫描测量的测量实例。实验结果表明,所研制的超精密表面形貌测量仪可用于超精密加工工程表面、光学表面以及微纳几何结构的测量。

关键词:超精密测量;表面形貌测量;原子力探针扫描;白光干涉

中图分类号:TH741.3;TH742.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0828

Combined profilometer for ultra-precision surface topography

WANG Shu-zhen^{1,2}, XIE Tie-bang¹, CHANG Su-ping¹

- (1. *School of Mechanical Engineering and Science, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*; 2. *Department of Electrical and Mechanical Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China*)

Abstract: A combined profilometer combined atomic force probe scanning measurement with non-contact optical measurement based on one interference microscope substrate was developed for ultra-precision surface topography. The white light interference microscope based atomic force probe scanning measurement, the relationship between the deflection of an atomic force probe cantilever and the movement amount of interference fringes and the nonlinearity error correction method of probe cantilever deflection measurement were given. Then, the contact operation mode combined the displacement of vertical scanning system and the deflection of the cantilever was analyzed. A 3D precision displacement system and a AFM head based on white light interference microscope were developed. Under the same condition, the calibration grating TGZ2_PT B(107±2nm) made by NT-MDT Co., was measured 10 times on the same region. The measurement results show that the standard deviation is 0.96 nm and the relative repeatability error is 3.08%. Several examples measured by atomic force probe

收稿日期:2010-06-02;**修订日期:**2010-08-06.

基金项目:国家自然科学基金(科学仪器专项基金)资助项目(No. 50927502);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA042409)

scanning method, phase-shifting interferometry and vertical scanning white light interference method were given, respectively. It concludes that the combined profilometer can be used to measure ultra-precision machining engineering surfaces, optical surfaces, and micro-nano geometric structures.

Key words: ultra-precision measurement; surface topographic measurement; atomic force probe scanning; white light interference

1 引言

超精密和超微细加工技术的日益进步使得机械、电子、光学、材料等工业均朝着微小化、精密化的方向迈进。机械组件的精度、半导体蚀刻的沟槽深度、曝光的线宽等都因技术的不断创新达到了更高的品质,并且出现了各种微/纳米级的微器件,如微齿轮、微型孔、微型台阶等。因此,超精密表面形貌检测除了检测高度方向参数和横向峰峰距或峰谷距均是纳米量级的加工零件和材料表面微观三维形貌外,还要检测由微电子、微光学元件、微机械等微观结构单元组成的三维复杂微观结构。这就要求超精表面形貌测量仪器必须具备垂直、水平方向上的高分辨率,和较大的测量纵深和测量范围。

触针式轮廓仪^[1]、光学轮廓仪^[2-3]和原子力显微镜^[4-6]等表面形貌测量仪器已在超精密表面测量中得到了广泛应用。由于受针尖半径和瑞利衍射极限的限制,传统触针式轮廓仪和光学轮廓仪无法对横向分辨率要求很高的集成电路、精密光学镜头、盘片或晶片表面等进行测量。而原子力显微镜在横向和垂直方向都有极高的分辨率,从而成为进行高分辨率超精密表面形貌或结构测量的必然选择,但是原子力显微镜的测量速度比较低,测量范围也比较小,为了兼顾测量速度和精度,可以将原子力显微镜和大视场测量系统相结合,这样就可以迅速定位感兴趣的区域并采用原子力显微镜进行高分辨率测量,同时还可以以较低的横向分辨率进行快速、大视场形貌测量。

本文以超精密表面形貌测量为目的,基于同一显微镜基体实现了原子力探针扫描测量与非接触光学测量两种功能,文中分析了基于白光显微干涉原子力探针的测量方法、探针微悬臂变形量与白光干涉条纹移动量的关系、探针微悬臂测量

非线性误差的修正以及通过融合垂直扫描系统的位移量和悬臂梁变形量得到被测表面形貌的原子力探针工作方式。自主研发了基于白光显微干涉的原子力探针测头和由大量程计量型纳米级垂直扫描系统和共运动面 X-Y 二维精密工作台组成的三维精密位移系统。

2 结构和测量原理

所研制的复合型超精密表面形貌测量仪的两种测量功能共用光路和硬件系统,针对不同的测量要求可以采用不同的测量方法。测量仪包括显微干涉系统、原子力探针组件、垂直扫描系统、共运动面 X-Y 二维精密工作台、图像采集系统和计算机处理系统等,实物照片如图 1 所示。被测样品放在二维工作台上,垂直扫描系统固定在立柱上可以带动显微干涉系统上下移动,机械机构安装在防震的大理石平台上,整个测量系统放置在气浮隔震平台上。

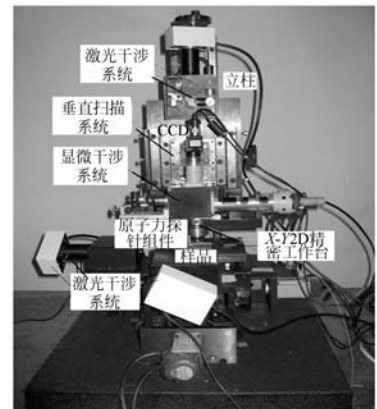


图1 复合型测量仪照片

Fig. 1 Photograph of combined profilometer

在进行原子力探针扫描测量时,被测样品由 X-Y 二维工作台带动进行水平扫描,在扫描过程中,显微干涉系统通过图像采集系统和计算机处

理系统测量原子力探针微悬臂的变形,垂直扫描系统带动原子力探针组件随显微干涉系统一起上下移动,使原子力探针和被测表面基本保持恒力,同时记录探针微悬臂的变形量和垂直扫描系统的移动量,根据探针微悬臂的变形量和垂直扫描系统的移动量计算出被测表面的形貌图。将原子力探针组件从测量显微物镜上旋下,可以进行显微干涉非接触测量。在进行白光干涉垂直扫描测量时,样品放置在二维工作台上,垂直扫描系统带动显微干涉系统上下移动,完成对被测件的垂直扫描。在进行相移干涉测量时,在图 2 所示的显微干涉系统光路结构中的照明光路中加入滤波片。如果被测表面超过显微镜的视场,移动二维工作台,可以进行多视场测量。

白光干涉垂直扫描测量和相移干涉测量已在许多文献中进行了讨论^[3,7-8],下面主要讨论基于白光显微干涉的原子力探针扫描测量原理。

2.1 显微干涉系统

本显微干涉系统采用 Linnik 型显微干涉仪,干涉仪的参考臂和测量臂使用两个相同的物镜,通过倾斜参考镜得到所需宽度的干涉条纹。如图 2 所示。白光经聚光镜投射到孔径光阑上,经孔径光阑、视场光阑、照明物镜后透射到分光棱镜上,分光棱镜把光线分成两束,一束光经补偿镜和参考显微物镜后射向参考镜,参考镜将光反射并沿原路返回;分光棱镜射出的另一束光经补偿镜和测量显微物镜聚焦于被测表面(或探针微悬臂端面背面),并沿原路返回,在分光棱镜的分光面与参考光束相遇,汇聚并产生干涉。由于白光光源的相干长度只有几微米,只有当两束光的光程接近相等时才有干涉条纹。干涉条纹经成像物镜后在 CCD 上成像。根据薄透镜成像理论^[9],如果

$$I_{w1}(x, y) = \frac{2A^2 \Delta k}{d_1^4 \lambda^4 M^2} \left\{ 1 + \sin c \left[\frac{\Delta k}{2\pi M} x (\sin(2\alpha) - \sin(2\theta)) + \frac{\Delta k}{\pi} \Delta z \right] \times \cos \left[\frac{k_0 x}{M} (\sin(2\alpha) - \sin(2\theta)) + 2k_0 \Delta z \right] \right\}. \quad (2)$$

干涉条纹是被 sinc 函数调制后的余弦函数,如果参考镜和原子力探针微悬臂反射面在物镜焦平面上静止不动,条纹是垂直于 x 方向的直条纹,并随着 x 远离坐标原点按 sinc 函数规律衰减。在测量过程中,由于样品表面高度变化将会使原子力探针微悬臂发生变形,参考光束和测量

采用单色光照明,可以推导出 CCD 接受的干涉光强分布为:

$$I(x, y) = \frac{2A^2}{d_1^4 \lambda^4 M^2} \cdot \left\{ 1 + \cos \left[\frac{k}{M} x (\sin(2\alpha) - \sin(2\theta)) + 2k \Delta z \right] \right\}, \quad (1)$$

式中, A 为振幅常量, M 为显微物镜的放大倍数, d_1 为透镜成像系统物平面到透镜平面的距离, λ 为光源波长, $k = 2\pi/\lambda$ 为光源波数, α 为参考镜绕物镜光轴的转角, θ 为探针微悬臂的偏转角, Δz 为探针微悬臂的变形量。

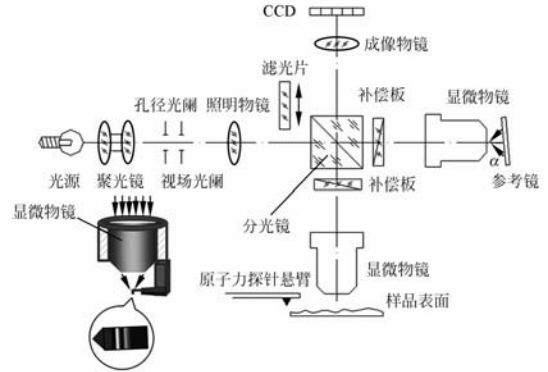


图 2 显微干涉系统光路结构

Fig. 2 Schematic diagram of optical layout of microscopic interference system

若光源采用有限带宽的白光,则 CCD 接受的干涉场光强的分布是白光光源中所含各种波长成份的强度分布的叠加。设白光光源的光谱带宽为 Δk , 中心谱线的波数为 k_0 ($k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 为中心波长), 光谱呈矩形分布, 并假设其它参数与波数 k 无关, 对所有谱线在干涉场中的光强进行积分, 可以得到干涉光强分布:

光束的光程差发生变化,干涉条纹将移动,干涉条纹的移动量与微悬臂变形量成正比。测量时通过测量白光零级条纹的移动量来检测探针微悬臂变形量。该方法通过调宽干涉条纹可以提高测量分辨率,并且在测量过程中光强整体变化不会影响测量精度。

2.2 白光干涉原子力探针测量工作原理

由前面分析知,探针微悬臂的变形量可以通过计算零级条纹移动量得到。为了得到零级条纹的移动量,每次计算都需要确定零级条纹中心线的位置。在测量过程中,求出每个测量位置的干涉图像零级条纹中心线相对探针初始零级条纹中心线移动的距离,从而得到探针微悬臂的变形量。可以采用白光干涉条纹处理算法中的极值法、质心法^[10]、拟合函数法^[11]先求得零级条纹一系列的点,然后用最小二乘拟合得到其中心线。考虑到测量速度和测量精度,本系统采用了质心算法。

利用零光程差条件,由公式(2)可以求得探针微悬臂变形量 Δz 与条纹移动量 x 的关系为:

$$\Delta z = \frac{\sin(2\alpha) - \sin(2\theta)}{-2M} x, \quad (3)$$

式中各参量含义参见公式(1)的说明。在测量过程中 α 和 M 为定值,而 θ 角会有微小变动,将导致探针微悬臂的变形量 Δz 与零级条纹移动量 x 之间为非线性关系。为了提高测量精度,必须对由 θ 角变化引起的非线性误差进行修正。根据小角度近似可得:

$$\sin(2\theta) \approx 2\theta = 2 \frac{\Delta z}{L}, \quad (4)$$

式中, Δz 为探针微悬臂的变形量; L 为微悬臂的长度。

将式(4)代入(3)可得:

$$\Delta z = \frac{\sin(2\alpha) - 2(\Delta z/L)}{-2M} x = Ax + B\Delta z x. \quad (5)$$

即:

$$\Delta z = \frac{Ax}{1 - Bx}, \quad (6)$$

式中, $A = \frac{\sin(2\alpha)}{-2M}$, $B = \frac{L}{M}$ 。

由于参考反射镜绕物镜光轴的转角 α 和探针微悬臂的长度很难精确测量,而且计算机最终处理的信息为图像采集卡输出的数字化图像信息,因此,在测量过程中根据公式(6)计算悬臂梁变形量时, M 包含了显微物镜、成像物镜和图像采集卡对条纹的综合放大作用,所以公式(6)中的系数 A 和 B 很难准确计算,本文采用实验结合最小二乘拟合方法对修正系数 A 和 B 进行识别。令:

$$\begin{cases} u = \frac{1}{x} \\ v = \frac{1}{\Delta z} \end{cases}, \quad (7)$$

则式(6)可以写为:

$$u = Av + B. \quad (8)$$

求得系数 A 和 B ,由公式(6)就可以根据测得的零级条纹移动量计算出探针微悬臂的变形量 Δz 。

为了得到系数 A, B ,首先使探针与样品表面处于接触状态,然后驱动垂直扫描系统并记录垂直扫描系统的位移作为 Δz_i 和白光干涉零级条纹的移动量 x_i ,根据公式(7)和(8)并用最小二乘法得到系数 A 和 B 。由于系数 A, B 受光学系统结构和探针微悬臂的影响,所以每隔一段时间或更换了探针都需要对参数 A 和 B 重新标定。另外,探针样品间的作用力除了受原子力探针影响外,还受被测样品的影响,为了保证测量精度,当被测样品材料改变时,也需要对参数 A 和 B 重新标定。

图3为原子力探针扫描反馈工作原理框图。如果使原子力探针工作在恒力模式,则悬臂梁输出信号 b 和垂直扫描器输出信号 d 满足下面的关系:

$$\begin{cases} b = b_0 \\ d = d_0 \end{cases}, \quad (9)$$

式中, b_0 为原子力探针预设工作点; d_0 为反馈控制中垂直扫描系统的输出,它代表了被测表面形貌。

为了提高跟踪速度,在测量过程中,利用垂直扫描系统粗略跟踪被测形貌,不要求 $b = b_0$,只需要满足:

$$b_0 - b_{\text{thod}} < b < b_0 + b_{\text{thod}}, \quad (10)$$

式中, b_{thod} 为跟踪阈值,可以根据被测表面设置。

在扫描过程中,为了保证探针与样品表面接触而不被损坏, $b_0 - b_{\text{thod}}$ 和 $b_0 + b_{\text{thod}}$ 应满足:

$$\begin{cases} b_0 - b_{\text{thod}} > 0 \\ b_0 + b_{\text{thod}} < b_{\text{max}} \end{cases}, \quad (11)$$

式中, b_{max} 为微臂允许的最大变形量。

b_{max} 主要受不损伤探针微悬臂的最大形变、能够满足胡克定律的工作范围及样品所能承受的最大接触力的限制。按上述方法进行扫描测量时,表面形貌的信息由垂直扫描系统的输出信号和探针微悬臂输出信号得到,该方法不要求垂直扫描系统跟踪误差为零,从而加快了跟踪速度。原子力预设值点 b_0 和跟踪阈值 b_{thod} 可以根据被测表面和探针悬臂允许的变形范围设定。

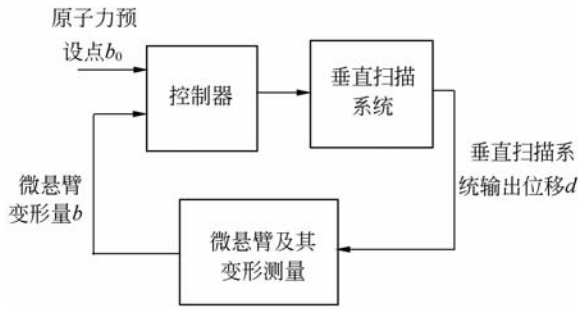


图 3 原子力探针扫描工作原理框图

Fig. 3 Block diagram of atomic force probe scanning measurement

2.3 三维精密位移系统

三维精密位移系统是保证超精密表面测量精度和测量范围的关键部件,本测量仪的三维精密位移系统参见图 1。该三维精密位移系统包括计量型纳米级垂直扫描系统和共运动平面 X - Y 二维精密工作台,两者均采用粗、精两级驱动并由激光干涉位移计量系统对其位移进行实时计量。垂直扫描系统粗驱动由斜面导轨副及伺服电机组成,伺服电机经联轴器带动精密滚珠丝杠,精密滚珠丝杠副的螺母驱动斜面导轨机构,斜面导轨机构和精驱动机构之间安装有精密滚动轴承,斜面的水平移动带动精密滚动轴承上下运动,精密滚动轴承推动精驱动机构整体在垂直方向上运动,精驱动则由压电陶瓷驱动叠层式平行平板柔性铰链结构来实现。垂直扫描系统粗驱动的行程为 3 mm,理论运动分辨率为 $0.02 \mu\text{m}$;精驱动行程为 $40 \mu\text{m}$,理论驱动分辨率为 0.6 nm 。粗、精运动的位移量由同一套激光干涉位移计量系统测量。

传统二维精密工作台一般利用两个一维精密工作台堆栈起来^[12],该方法在一个方向运动时会在另外一个方向上产生误差,引入较大的阿贝误差和转角误差。王选择等提出的共运动基面二维工作台^[13]的 X 、 Y 目标工作台始终贴在平面度很高的陶瓷精密平板上,具有运动平稳、运动平面度高的优点,但其运动的摩擦力较大并且运动的平面性受运动基面的影响。为了减小运动摩擦力和阿贝误差,本测量仪所设计的 X - Y 二维精密工作台采用共运动平面结构,即 X 、 Y 向直线导轨在同一个运动平面上,工作台几何机构完全对称,使工

作台受力、受热平衡。精定位工作台是采用内外两层叠层式平行平板柔性铰链结构。工作台的粗、精位移由激光干涉位移计量系统计量。激光干涉位移计量系统反射镜空间布置与工作台上放置工件的水平位置基本平行,交于运动中点,该空间布置方法可以减少运动耦合带来的测量误差和阿贝误差。 X 、 Y 方向粗驱动范围均为 $0 \sim 40 \text{ mm}$,理论驱动分辨率为 $0.2 \mu\text{m}$ 。精驱动范围为 $25 \mu\text{m}$,理论驱动分辨率为 0.38 nm 。

3 原子力测头的结构设计

现有商品化原子力测头在安装上不能满足本仪器的设计需求,故研制了基于白光显微干涉的原子力探针测头,测头结构如图 4 所示。探针固定在探针连接杆上。主支架可以通过紧固螺钉与连接套管锁紧。圆盘导槽座固定在主支架下端的横梁上,圆盘导槽带有导槽,探针连接杆置于圆盘导槽的导槽中,连接螺钉将探针连接杆和圆盘导槽连接到圆盘导槽座上。通过调整上、下螺母使主支架在测量物镜轴线方向上下移动,调整显微物镜与探针臂反射面的距离。转动圆盘导槽,可使探针在垂直于测量物镜轴线方向的平面上发生摆动。在圆盘导槽的导槽中滑动探针连接杆,可使探针在垂直于测量物镜轴线方向的平面上移动,从而调节探针针尖反射面与测量物镜焦点的位置关系。测量显微物镜安装在连接套管的内螺纹上。该原子力探针测头结构简单,探针位置调整方便。

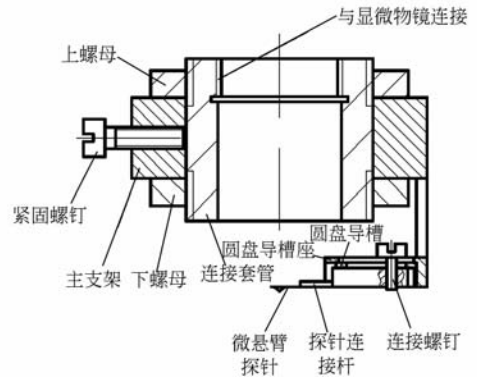


图 4 原子力测头结构图

Fig. 4 Structure diagram of AFM head

测量仪采用的原子力探针为 Budget Sensor 公司的带类金刚石碳膜的接触式原子力显微镜探针 (contDLC),该探针为旋转的单晶硅探针,探针微悬臂为矩形,悬臂长度为 $450\ \mu\text{m}$,宽度为 $50\ \mu\text{m}$,厚度为 $2\ \mu\text{m}$;悬臂的针尖部分上带类金刚石碳膜,针尖半径 $<15\ \text{nm}$,微悬臂检测器部分带铝覆盖层。

4 实验结果

4.1 原子力探针测量结果

为了测得所研制的基于白光干涉原子力探针测量的测量精度,对 NT-MDT 公司生产的扫描探针校准光栅 TGZ2_PTB($107\pm 2\text{nm}$)的相同区域进行了 10 次重复性测量,取 5 个栅的高度平均值作为每次测量的结果,10 次重复测量结果如表 1 所示,某次测量结果如图 5 所示,测量的相对重复性误差为 3.08% 。由于没有使用 SPM 方法测量台阶高度的国际标准,在对校准光栅的高度计算时参考了国际标准 ISO 5436^[14]给出的二维轮廓台阶高度计算方法:对台阶的顶部和底部的特定区域进行最小二乘拟合,得到两条平行线,台阶高度由平行线的距离得到。

表 1 校准光栅 TGZ2_PTB 10 次测量结果

Tab.1 10 measurement results of calibration grating TGZ2_PTB

测量序号	测量值 /nm	测量误差 /nm	平均值 /nm	标准偏差 /nm
1	105.3	-1.8	107.1	0.96
2	107.3	0.2		
3	107.6	0.5		
4	108.6	1.5		
5	106.9	-0.2		
6	106.7	-0.4		
7	107.1	0		
8	107.3	0.2		
9	105.9	-1.2		
10	108.0	0.9		

采用原子力探针测量方法对半导体硅片表面和硬盘盘片表面的测量结果分别如图 6,7 所示。根据表面粗糙度国家标准 GB/T3505-2000 对半导体硅片表面和硬盘盘片的测量数据进行参

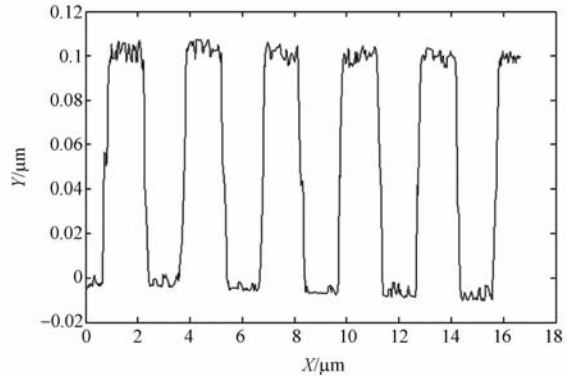


图 5 校准光栅 TGZ2_PTB 轮廓图

Fig.5 Profile of calibration grating TGZ2_PTB

数评估,计算出其粗糙度 R_a 分别为 $0.0008, 0.0051\ \mu\text{m}$; R_z 分别为 $0.0046, 0.0280\ \mu\text{m}$ 。

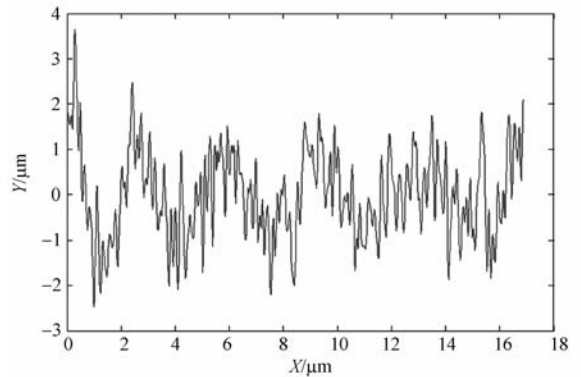


图 6 半导体硅片表面

Fig.6 Semiconductor wafer surface profile

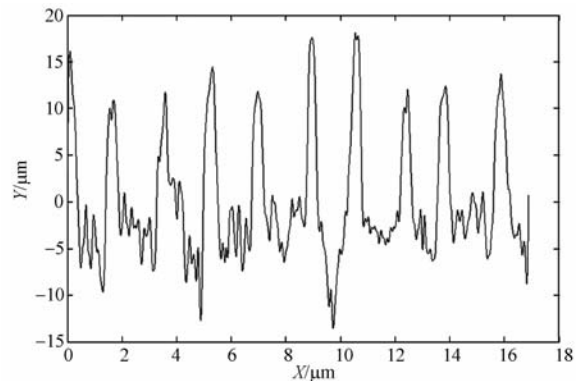


图 7 硬盘盘片表面

Fig.7 Hard disc surface profile

4.2 相移干涉及白光干涉垂直扫描测量实验结果

将自行研制的原子力测头从测量物镜上旋下(参见图 1,2)就可以进行白光干涉垂直扫描测量

或相移干涉测量。采用相移干涉测量方法对中国计量院检定的标准多刻线金属样板(编号:A-11-399, $R_a=0.090\ \mu\text{m}$)的测量结果如图 8 所示。对某一位置的 R_a 值进行了评定, 结果为 $0.0907\ \mu\text{m}$ 。采用白光干涉垂直扫描测量方法对 MEMS 电容的测量结果如图 9 所示。

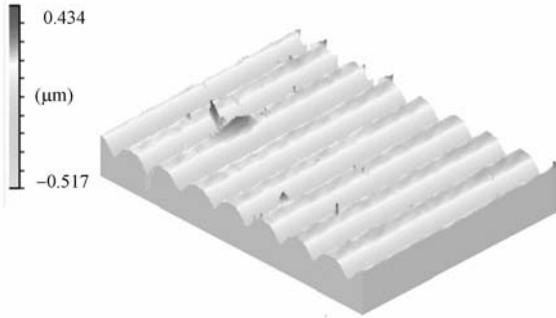


图 8 标准多刻线金属样板测量结果

Fig. 8 Measurement results of multi-reticle metal templet

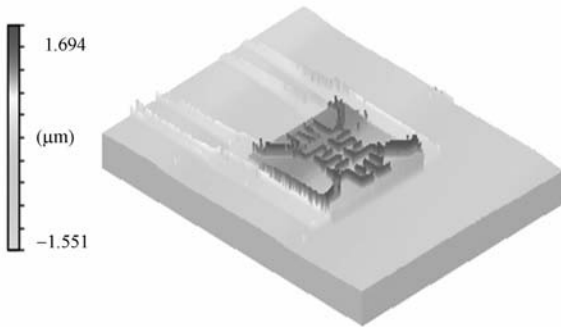


图 9 MEMS 电容的测量结果

Fig. 9 Measurement results of MEMS capacitor

5 结 论

随着超精密加工技术、半导体工业、MEMS 和 NEMS 技术的发展, 在纳米尺度内进行超精密表面形貌测量的需求越来越迫切。本文针对这一需求, 提出了以白光显微干涉为基础, 实现非接触光学测量和原子力探针扫描测量两种功能的复合型超精密表面形貌测量仪, 对于垂直分辨率和横向分辨率均要求较高的表面可以采用原子力探针测量, 垂直分辨率要求较高而横向分辨率要求不高的表面则可选用白光干涉垂直扫描测量或相移干涉测量。该复合型测量仪实现了光学系统和硬件系统的资源共享, 可以很容易地实现互补定量测量。采用原子力探针扫描测量对 NT-MDT 公司生产的扫描探针校准光栅 TGZ2_PT B 进行测量的标准差为 $0.96\ \text{nm}$, 相对重复性误差为 3.08% 。另外文中给出了原子力探针扫描、相移干涉及白光干涉垂直扫描测量的应用实例。实验结果表明, 所研制的超精密表面形貌测量仪可用于超精密加工工程表面、光学表面以及微纳几何结构的测量。

参考文献:

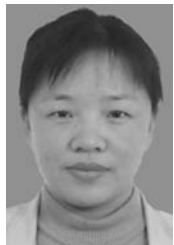
- [1] FAN K C, SU C D, JONG I. Error analysis for a diffraction grating interferometric stylus probing system[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, 12: 482-490.
- [2] JORDAN H J, WEGNER M, TIZIANI H J. Highly accurate non-contact characterization of engineering surfaces using confocal microscopy[J]. *Meas Sci Technol.* 1998, 9: 1142-1151.
- [3] 王生怀, 陈育荣, 谢铁邦. 一种新型垂直扫描白光显微干涉测量仪[J]. *工具技术*, 2010, 44(1): 81-84.
WANG SH H, CHEN Y R, XIE T B. A novel vertical scanning white light microscopy interference instrument[J]. *Tool Engineering*, 2010, 44(1): 81-84. (in Chinese)
- [4] JONG-AHN KIM, JAE WAN KIM, CHU-SHIK KANG, *et al.*. Metrological atomic force microscope using a large range scanning dual stage[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2009, 10(5): 11-7.
- [5] KORPELAINEN V, SEPPÄ J, LASSILA A. Design and characterization of MIKES metrological atomic force microscope[J]. *Precis. Eng.*, 2010, doi: 10.1016/j.precisioneng. 2010. 04. 002. (in press)
- [6] 赵学增, 李宁, 周法权, 等. 使用原子力显微镜测量刻线边缘粗糙度的影响因素[J]. *光学 精密工程*, 2009, 17(4): 839-848.
ZHAO X Z, LI N, ZHOU F Q, *et al.*. Influence

- factors of line edge roughness measured by AFM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4): 839-848. (in Chinese)
- [7] SINCLAIR M B, de BOER M P, CORWIN A D. Long-working-distance incoherent-light interference microscope [J]. *Appl. Opt.*, 2005, 44(36): 7715-7721.
- [8] HELEN H S, KOTHIYAL M P, SIROHI R S. Phase shifting by rotating polarizer in white-light interferometry for surface profiling [J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, 47(3): 1137-1145.
- [9] YUN J P, ZHANG L L, XIE T B, *et al.*. A contact stylus profilometer based on Linnik interference microscope [C]. *Key Engineering Materials*, 2008, 364-366 I: 371-376.
- [10] CHEN S, PALMER A W, GRATAN K T V, *et al.*. Digital signal-processing techniques for electronically scanned optical-fiber white-light interferometry [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(28): 6003-6010.
- [11] PARK M C, KIM S W. Direct quadratic polynomial fitting for fringe peak detection of white light scanning inteferograms [J]. *Opt. Eng.*, 2000, 39(4): 952-959.
- [12] 王生怀, 陈育荣, 王淑珍, 等. 三维精密位移系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 175-182.
WANG SH H, CHEN Y R, WANG SH ZH, *et al.*. Design of 3D precision displacement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 175-182. (in Chinese)
- [13] 王选择. 正交衍射光栅计量原理及在超精密工作台上的应用 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
WANG X Z. *Measurement Principle of Cross Diffraction Grating and Its Application to Ultra Precision Platform* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [14] ISO 5436-1 2000 Geometrical Product Specifications (GPS)—surface texture; profile method. Measurement standards—part 1: material measures [S]. ISO 5436-1: 9-2.

作者简介:



王淑珍(1971—),女,河南浚县人,博士研究生,副教授,2005年于西安建筑科技大学获得工学硕士学位,主要从事表面形貌测量技术及仪器方面的研究。E-mail: ly_wsz@163.com



常素萍(1975—),女,新疆石河子人,博士,讲师,2007年于华中科技大学获得博士学位,主要研究方向为测试技术及仪器。E-mail: changsp@mail.hust.edu.cn

导师简介:



谢铁邦(1944—),男,广东南海人,教授、博士生导师,1983年于华中理工大学获工学硕士学位,主要研究方向为精密测量、精密仪器、标准化及精密机械设计等。E-mail: xietb@mail.hust.edu.cn