

文章编号 1004-924X(2011)11-2636-08

快速大面积测量用原子力显微镜扫描速度对 测量结果的影响

崔玉国^{1*}, 何高法², 荒井義和³, 高 伟³

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 重庆科技学院 机械与动力工程学院, 重庆 401331; 3. 东北大学 工学院, 日本 官城 仙台 980-8579)

摘要:构建了一种可快速大面积测量光栅表面微结构的原子力显微镜(AFM)系统,研究了不同扫描模式下扫描速度对测量结果的影响。分别测量了微悬臂探针在恒高模式与恒力模式下的频谱,获得了这两种模式下微悬臂探针的有效带宽。基于恒高模式与恒力模式,在不同扫描速度下分别测量了光栅微结构表面上的一条直线与一个圆周,进而分析了扫描速度对测量结果的影响。基于该 AFM 系统,采用恒高模式下不失真扫描速度对光栅微结构表面进行了快速、大面积三维形貌测量实验。实验结果表明:测量光栅微结构表面上直径为 4.0 mm 的圆形区域所用时间仅为 40 s。当扫描速度不超过微悬臂探针有效带宽所对应的速度时,所构建的 AFM 系统可无失真地实现微结构表面的快速、大面积测量。

关键词:原子力显微镜(AFM);快速测量;大面积测量;恒高模式;恒力模式;扫描速度

中图分类号:TH742 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111911.2636

Effects of scanning speed on measurement results for high-speed and large-area measurement AFM

CUI Yu-guo^{1*}, HE Gao-fa², ARAI Yoshikazu³, GAO Wei³

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China; 2. College of Mechanical and Dynamic Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China; 3. School of Engineering, Tohoku University, Sendai 980-8579, Japan)

* Corresponding author, E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn

Abstract: An Atomic Force Microscope (AFM) system with high-speed and large-area was constructed to measure the micro-structure surface of an optical grating. The effects of scanning speed on measuring results under different scanning modes were researched. First, the spectra of the micro-probe under constant-height and constant-force modes were measured, respectively, and the effective bandwidths of the probe were obtained under the two modes. Then, based on the constant-height and constant-force modes, the effects of scanning speed on measuring results were analyzed via measuring

收稿日期:2011-02-28;修订日期:2011-03-23.

基金项目:日本学术振兴基金资助项目(No. 18206016)

a line and a circle on the surface of the optical grating at different scanning speeds. By employing this AFM system, the 3-dimensional profile of the large-area micro-structure surface on the optical grating was measured at a distortionless scanning-speed in a constant-height mode. The results show that it takes only 40 s to measure a circle area with a diameter of 4.0 mm on the grating surface. When the scanning speed is no more than the speed that is corresponding to the effective bandwidth of the micro-probe, the AFM system can achieve the high-speed, large-area and distortionless measurement for micro-structure surfaces.

Key words: Atomic Force Microscope (AFM); high-speed measurement; large-area measurement; constant-height mode; constant-force mode; scanning speed

1 引言

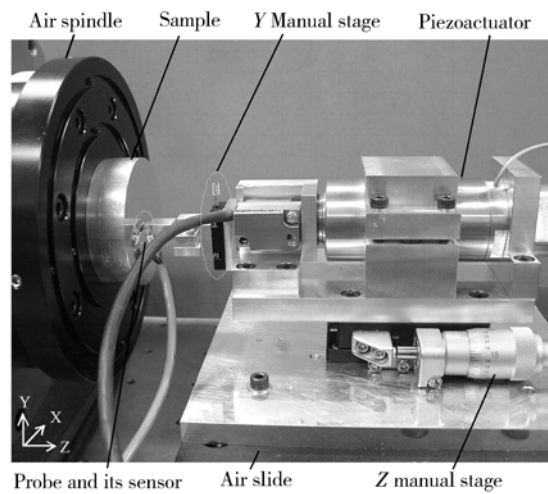
近年来,随着信息技术、超精密加工技术的迅速发展,用于大型、高精度成像装置中的光学零部件(如微透镜阵列^[1-2])以及超精密加工机械中的光学检测元件(如正弦波光栅^[3-4])的需求不断增加。这些光学零部件的表面为具有周期性微结构形貌的大型表面,往往波长为数微米至数百微米,振幅为亚微米至数十微米,表面面积超过数平方毫米。目前,上述大面积微结构表面形貌的快速测量已成为非常重要的课题。原子力显微镜(AFM)往往被用于微结构表面的三维形貌测量^[5-12]。然而,在目前的商用 AFM 中,大都以压电陶瓷驱动器作为其 X、Y 方向的扫描器^[13-20],由于压电陶瓷扫描器的扫描范围较小,多在 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 范围内,所以无法满足微结构表面的大面积测量的要求。

为实现光学零部件微结构表面的快速、大面积精密测量,本文构建了一种新的 AFM 系统。在测量微悬臂探针带宽的基础上,在不同扫描速度下分别测量光栅微结构表面上的一条直线与一个圆周,进而分析了扫描速度对测量结果的影响。实验结果表明,当扫描速度不超过微悬臂探针的有效带宽时,所构建的 AFM 系统可无失真地实现微结构表面的快速、大面积测量。

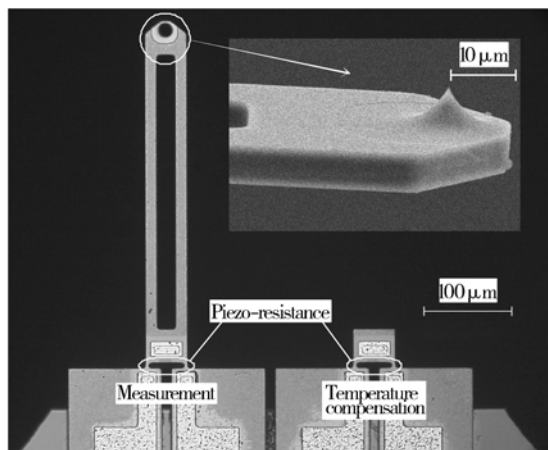
2 AFM 系统的构成及其工作原理

2.1 AFM 系统的构成

如图 1(a)所示,本文的 AFM 系统由沿 X 轴移动的空气导轨式平台、绕 Z 轴旋转的空气转



(a) AFM 系统照片
(a) Photo of AFM system



(b) 微悬臂探针及其传感器
(b) Probe and its sensor

图 1 AFM 系统构成
Fig.1 Setup of AFM system

轴、用于测量形貌的探针单元构成。其中,探针单元是专门设计的,主要包括探针及其传感器、Y 向调节器、Z 向调节台。空气导轨式平台的移动范围与最高移动速度分别为 300 mm 和 400 mm/s;空气转轴通过空气卡盘可以安装最大直径为 130 mm 的试件,其最高转速可达 300 r/min。由于空气导轨式平台与空气转轴分别安装了位置分辨率为 0.28 nm 的直线光栅与 0.008 57"的圆光栅,从而可使直径为 130 mm 试件最外周上的最小采样间隔达到 6 nm。图 1(b)所示为微悬臂探针及其传感器,微悬臂探针的材料为硅,通过硅微工艺制作而成。传感器为固态压阻式,位于微悬臂探针的根部。该传感由两个扩散型半导体应变片构成,其中一个用于测量,另一个用于温度补偿,它们同另外两个精密电阻构成惠斯顿电桥,用来检测探针针尖和被测表面之间的原子力,以获得被测表面的微结构形貌。Y 向调节器用来微细调节探针在 Y 方向的位置,Z 向调节台由粗调(由分辨率为 0.5 μm 的手动调节台实现)和精调(由分辨率可达纳米级的压电陶瓷驱动器实现)两部分组成,用来调节探针在 Z 方向的位置,以使探针处于原子力的排斥力区。

2.2 AFM 系统的工作原理

如图 2 所示,所构建的 AFM 系统通过螺旋扫描方式来实现对微结构表面的快速、大面积测

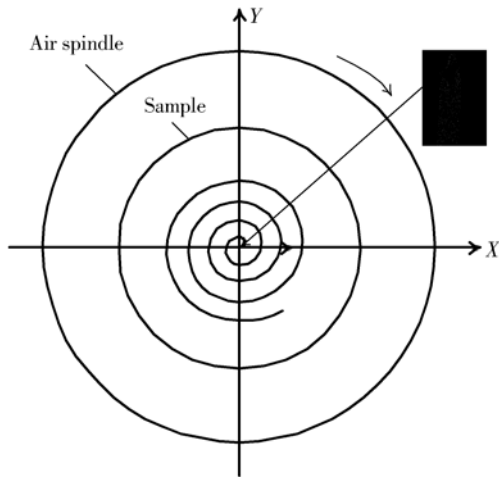


图 2 AFM 系统的工作原理
Fig. 2 Measuring principle of AFM system

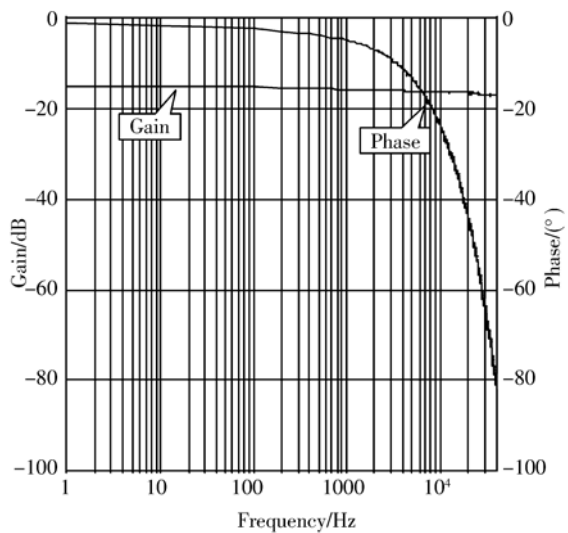
量,其过程如下:首先对微探针针尖进行对中,即通过调节 Y 向调节器和空气导轨式平台使针尖位于空气转轴的回转中心,然后按规定的运动速

度和规定的采样间隔,使空气导轨式平台沿 X 轴的直线运动和空气转轴绕 Z 轴的旋转运动同步,据此形成螺旋线来完成对被测微结构表面的测量。在对微探针针尖进行对中时,通过专门制作的对中试件与放大倍数为 3 000 的光学显微镜实现。这种方法可使对中误差为 2 μm 左右,而对中误差在 5 μm 范围内时可实现无失真测量^[21]。

该 AFM 系统有两种扫描方式,即恒高模式与恒力模式。恒高模式是一种无反馈控制的扫描方式,扫描速度较快,但只能对平坦的或倾斜量未超过微悬臂探针弹性弯曲变形极限的微观表面进行扫描;恒力模式因采用反馈控制,可对微观形貌起伏较大的表面进行扫描,但扫描速度较慢,尤其进行大范围扫描时,花费时间较多。

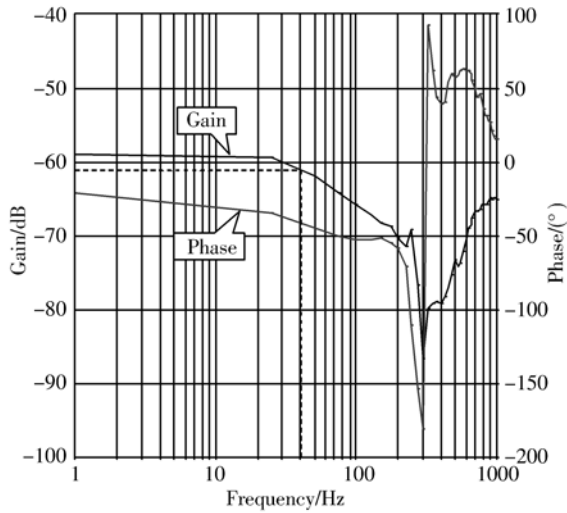
3 微悬臂探针的频谱

为实现微结构表面的无失真快速测量,必须知道微悬臂探针的频谱。图 3(a)和图 3(b)分别为恒高模式与恒力模式下所测得的微悬臂探针的频谱。由图 3(a)可知,在所测量的 40 kHz 的频率范围内(所使用的 FFT 动态分析仪所能处理的最高频率为 40 kHz),微悬臂探针的幅频特性较平坦,衰减小于 3 dB,可见恒高模式下微悬臂探针在其幅频特性衰减 3 dB 时所对应的频率应为 40 kHz 以上。由图 3(b)可知,微悬臂探针在其幅频特性衰减 3 dB 时所对应的频率约为 40 Hz



(a) 恒高模式

(a) Constant-height mode



(b) 恒力模式

(b) Constant-force mode

图 3 微悬臂探针的频谱

Fig. 3 Spectra of probe

(如图中粗虚线所示)。恒力模式下微悬臂探针的有效带宽较低,这是由于恒力模式采用了反馈控制。

4 扫描速度对测量结果的影响

扫描时,当信号变化的频率低于微悬臂探针的不失真测量频率(即衰减 3 dB 所对应的频率)时,扫描结果可真实反映微结构表面的形貌;否则,扫描结果便会失真。当其他条件确定时,信号变化的频率仅取决于扫描速度,即空气导轨式平台的移动速度和空气转轴的旋转速度。因此,为了分析扫描速度对测量结果的影响,需要确定信号变化的频率同扫描速度之间的关系。

当用所构建的 AFM 系统扫描一条直线时,信号变化的频率为:

$$f = v/\lambda, \quad (1)$$

式中, v 为空气导轨式平台的移动速度, λ 为试件表面空间正弦波的波长。

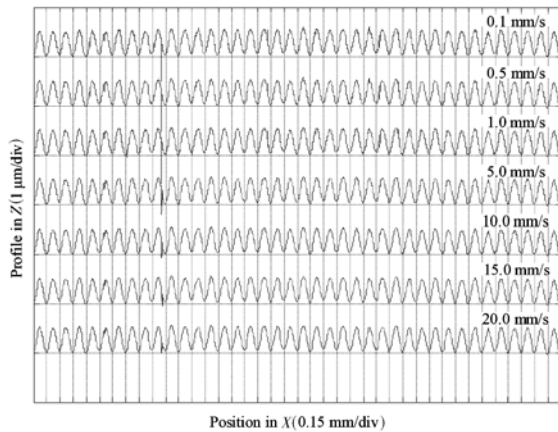
为确定扫描一条直线时扫描速度对测量结果的影响,给出了不同扫描速度及相应的信号频率,如表 1 所示。实验所用试件为铝合金制光栅,其微结构表面为空间正弦波曲面,设计值为振幅 $0.5 \mu\text{m}$ 、波长 $150 \mu\text{m}$ 。

表 1 扫描一条直线时的扫描速度与信号频率

Tab. 1 Scanning speeds and signal frequencies in scanning a line

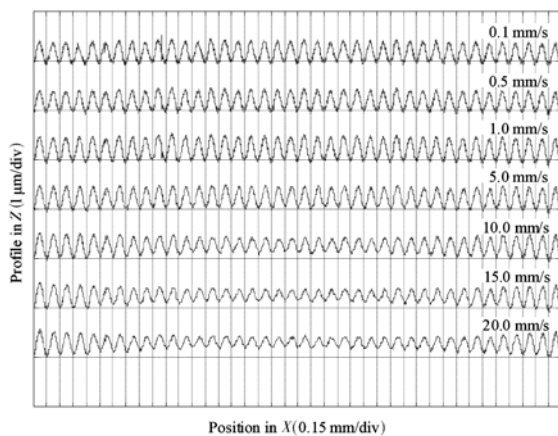
空气导轨式平台速度 /mm · s ⁻¹	信号频率 /Hz
0.1	0.67
0.5	3.33
1.0	6.67
5.0	33.33
10.0	66.67
15.0	100.00
20.0	133.33

在上述不同扫描速度下,扫描一条直线的结果如图 4 所示。其中,图 4(a)为恒高模式下的扫



(a) 恒高模式扫描

(a) Constant-height scanning mode



(b) 恒力模式扫描

(b) Constant-force scanning mode

图 4 扫描一条直线的结果

Fig. 4 Results of scanning a line

描结果,图 4(b)为恒力模式下的扫描结果。由图 4(a)可知,在所给定的扫描速度下,扫描结果均无失真。这是由于即使在所给定的最高扫描速度(20.0 mm/s)下,信号的最高变化频率(133.33 Hz)也远小于微悬臂探针在恒高模式扫描下的不失真测量频率。由图 4(b)可知,在所给定的扫描速度中,当扫描速度超过 10.0 mm/s 时,扫描结果产生失真,不能真实反映被测表面的微结构形貌,这是由于当扫描速度超过 10.0 mm/s 时,信号变化的频率为 66.67 Hz 以上,已超过微悬臂探针在恒力模式扫描下的不失真测量频率(40 Hz)。由图 4(b)还可知,当扫描速度超过 10.0 mm/s 时,在扫描的开始和结束阶段,扫描结果并不产生失真,失真产生在扫描过程的中间阶段。如图 5 所示,这是由于在整个扫描过程中,空气导轨式平台的移动速度并非是均匀的,而是存在加速运行、恒速运行、减速运行等 3 个阶段,在加速和减速运行阶段,信号变化的频率低于微悬臂探针在恒力模式扫描下的不失真测量频率,而恒速运行阶段信号变化的频率则高于微悬臂探针在恒力模式扫描下的不失真测量频率。

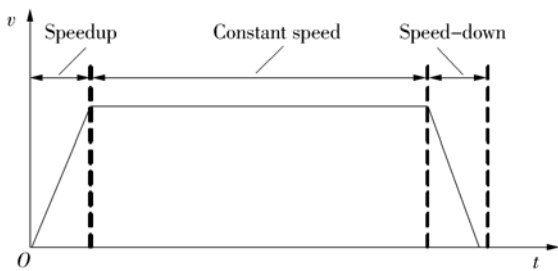


图 5 扫描时空气导轨式平台的速度变化

Fig. 5 Speed change of stage with air slide during scanning

当用所构建的 AFM 系统扫描一个圆周时,信号变化的频率为:

$$f = \frac{\pi nr}{180\lambda}, \quad (2)$$

式中, n 为空气转轴的旋转速度, r 为试件上所扫描圆周的半径, λ 为试件表面空间正弦波的波长。

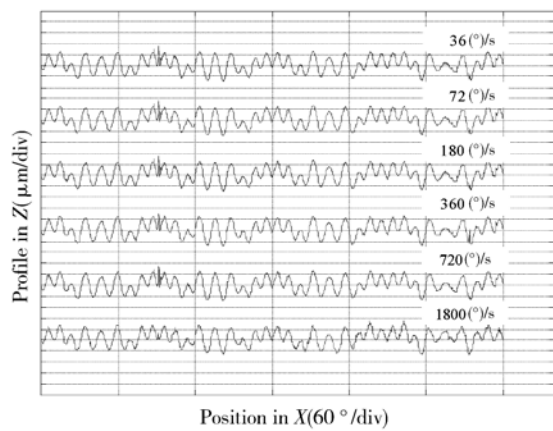
为确定扫描一个圆周时扫描速度对测量结果的影响,给出了不同的扫描速度及相应的信号频率,如表 2 所示。实验所用试件同上,所扫描圆周的半径为 1 mm。

表 2 扫描一个圆周时的扫描速度与信号频率

Tab. 2 Scanning speeds and signal frequencies for scanning a circle

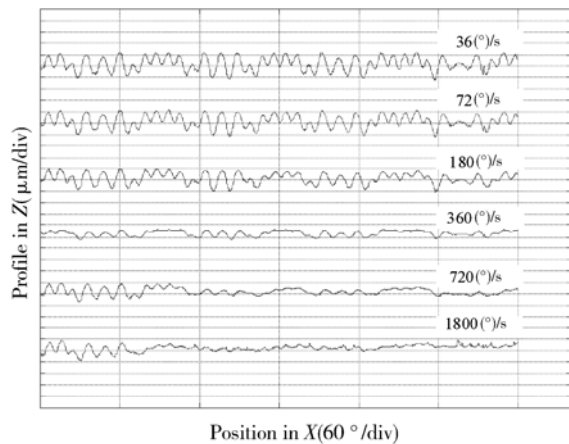
空气转轴的旋转速度 /($^{\circ}$) \cdot s $^{-1}$	信号频率 /Hz
36	4.19
72	8.38
180	20.94
360	41.89
720	83.78
1 800	209.44

在上述不同扫描速度下,扫描一个圆周的结果如图 6 所示。其中,图 6(a)为恒高模式下的扫



(a) 恒高模式扫描

(a) Constant-height scanning mode



(b) Constant-force scanning mode

(b) 恒力模式扫描

图 6 扫描一个圆周的结果

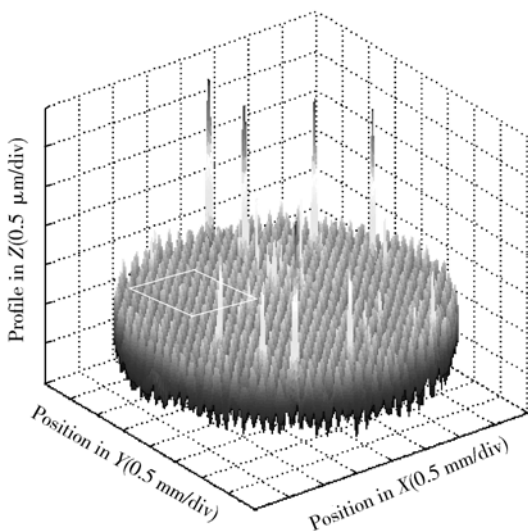
Fig. 6 Results of scanning a circle

描结果,图 6(b)为恒力模式下的扫描结果。由图 6(a)可知,在所给定的扫描速度下,扫描结果均无失真。而由图 6(b)可知,在所给定的扫描速度中,当扫描速度超过 $360 (^{\circ})/s$ 时,扫描结果产生失真,不能真实反映被测表面的微结构形貌。上述扫描结果有无失真的原因分别同扫描一条直线时的情况一致。

由上述分析可知,为使扫描结果真实反映微结构表面的形貌,必须使由扫描速度决定的信号频率低于微悬臂探针的不失真测量频率,而恒高级模式扫描时微悬臂探针的不失真测量频率远远高于恒力模式扫描时微悬臂探针的不失真测量频率。换言之,为实现微结构表面的快速、大面积无失真测量,应采用恒高扫描模式。

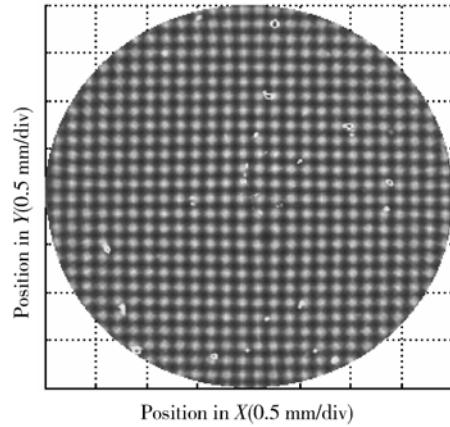
5 快速、大面积测量实验

为进一步验证所构建的 AFM 系统对光栅表面微结构进行快速、大面积测量的效果,对上述光栅微结构表面进行了恒高级模式不失真扫描速度下的快速、大面积三维形貌测量实验,实验所用试件同上。测量条件为:探针的移动范围为从空气转轴的回转中心(即坐标原点)到 X 轴正向 2.0 mm ,即 $0\sim 2.0\text{ mm}$;空气导轨式平台和空气转轴的运动速度分别为 0.05 mm/s 和 $562.5 (^{\circ})/s$;直线和圆周方向的采样间隔分别为 125 nm 和 $1.406\ 25^{\circ}$ 。



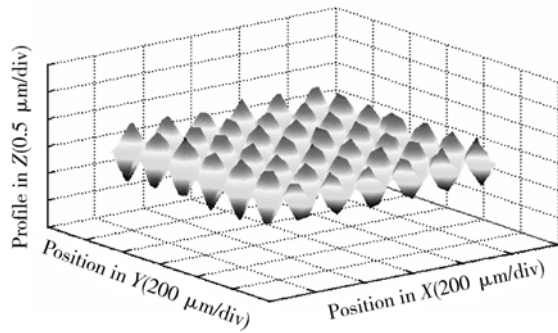
(a) 三维形貌

(a) Three-dimensional profile



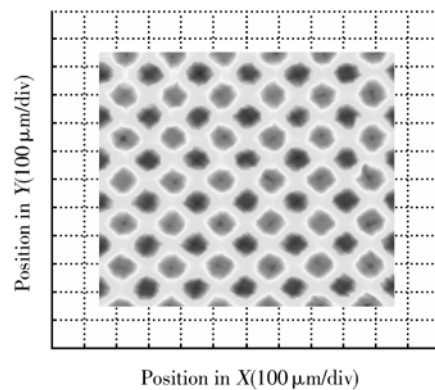
(b) 三维形貌的投影

(b) Projection of three-dimensional profile



(c) 图(a)中白线所框区域的三维形貌

(c) Three-dimensional profile of measurement area surrounded by white line in (a)



(d) 图(a)中白线所框区域三维形貌的投影

(d) Projection of three-dimensional profile of measurement area surrounded by white line in (a)

图 7 测量直径为 4.0 mm 的圆形区域的结果

Fig. 7 Measurement results of a circular area with a diameter of 4.0 mm

在上述恒高模式扫描速度下,信号频率远远低于微悬臂探针的不失真测量频率,即扫描速度为不失真扫描速度。在上述条件下,测量所用时间仅为 40 s。图 7 示出了上述条件下的测量结果。由图 7 可知,在恒高模式不失真扫描速度下,所构建的螺旋扫描式 AFM 系统可以很好地实现微结构表面的快速、大面积测量。

6 结 论

采用沿 X 轴移动的空气导轨式平台、绕 Z 轴旋转的空气转轴以及用于 Z 向形貌测量的探针

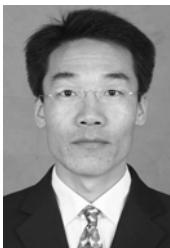
单元构建了一种可实现光栅微结构表面快速、大面积测量的螺旋扫描式 AFM 系统。在不同扫描速度下,通过分别测量光栅微结构表面上的一条直线与一个圆周,并根据所获得的恒高模式与恒力模式下微悬臂探针的带宽,分析了扫描速度对测量结果的影响。采用恒高模式下的不失真扫描速度,对光栅微结构表面进行了快速、大面积三维形貌测量实验,结果表明:测量光栅微结构表面上直径为 4.0 mm 的圆形区域所用时间仅为 40 s。可见,当扫描速度不超过微悬臂探针的有效带宽时,所构建的 AFM 系统可无失真地实现微结构表面的快速、大面积测量。

参考文献:

- [1] YAMASAKI F, DEGUCHI M, KAKUDA T, *et al.*. High efficiency optical system design for a liquid crystal projector[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2000, 46: 851-856.
- [2] CHOU M C, PAN C T, SHEN S C, *et al.*. A novel method to fabricate gapless hexagonal micro-lens array[J]. *Sensor and Actuator A: Physical*, 2005, 118(2): 298-306.
- [3] GAO W, ARAKI T, KIYONO S Y, *et al.*. Precision Nano-fabrication and evaluation of a large area sinusoidal grid surface for a surface encoder[J]. *Precision Engineering*, 2003, 27(3): 289-298.
- [4] GAO W, DEJIMA S, YANAI H, *et al.*. A surface motor-driven planar motion stage integrated with an XY(z) Surface Encoder for Precision Positioning[J]. *Precision Engineering*, 2004, 28(3): 329-337.
- [5] BOUSSU K, BRUGGEN B V, VOLODIN A, *et al.*. Roughness and hydrophobicity studies of nanofiltration membranes using different modes of AFM[J]. *Journal of Colloid Interface Science*, 2005, 286(2): 632-638.
- [6] CHECCO A, CAI Y G, GANG O, *et al.*. High resolution non-contact AFM imaging of liquids condensed onto chemically nanopatterned surfaces[J]. *Ultramicroscopy*, 2006, 106(8-9): 703-708.
- [7] LEI S B, TERO R, MISAWA N, *et al.*. AFM characterization of gramicidin-A in tethered lipid membrane on silicon surface[J]. *Chemical Physics Letters*, 2006, 429(1-3): 244-249.
- [8] 彭光含,杨学恒,刘济春,等. 一种高精度多功能双用原子力显微镜技术及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1): 179-184.
- [9] PENG G H, YANG X H, LIU J CH, *et al.*. Technology and application of a new-style high-resolution capability multifunctional amphibious atomic force microscope[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(1): 179-184. (in Chinese)
- [10] KAROUSSI O, SKOVBJERG L L, HASSENKAM T, *et al.*. AFM study of calcite surface exposed to stearic and heptanoic acids[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2008, 325(3): 107-114.
- [11] MULLER D J, ENGEL A. Strategies to prepare and characterize native membrane proteins and protein membranes by AFM[J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2008, 13(3): 338-350.
- [12] LYUBCHENKO Y L, SHLYAKHTENKO L S. AFM for analysis of structure and dynamics of DNA and protein-DNA complexes[J]. *Methods*, 2009, 47(3): 206-213.
- [13] 王昭,吴世法,刘琨. 使用自激振荡法提高原子力光子扫描隧道组合显微镜的扫描速度[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 906-912.
- [14] WANG ZH, WU SH F, LIU K. Self-oscillating electronics for improving scanning speed in AF/PSTM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 906-912. (in Chinese)
- [15] EGAWA A, CHIBA N, HOMMA K, *et al.*. High speed scanning by dual feedback control in SNOM/AFM[J]. *Journal of Microscopy*, 1999, 194(2-3): 325-328.

- [14] 景蔚莹, 蒋庄德. 原子力显微镜(AFM)在光盘检测及其质量控制中的应用[J]. 光学精密工程, 2003, 11(4): 368-373.
JING W F, JIANG ZH D. Measurement and quality control of optical discs with atomic force microscope (AFM)[J]. *Opt. Precision Eng.* 2003, 11(4): 368-373. (in Chinese)
- [15] KIM Y S, NAM H J, CHO S M, *et al.*. PZT cantilever array integrated with piezoresistor sensor for high speed parallel operation of AFM[J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, 103(1-2): 122-129.
- [16] 霍德鸿, 梁迎春, 程凯, 等. 基于原子力显微镜和分子动力学的纳米压痕技术研究[J]. 机械工程学报, 2004, 40(6): 39-44.
HUO D H, LIANG Y CH, CHENG K, *et al.*. Study on the nanoindentation via atomic force microscope and molecular dynamics simulation [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(6): 39-44. (in Chinese)
- [17] SCHITTER G, STEMMER A. Identification and open loop tracking control of a piezoelectric tube scanner for high-speed scanning-probe microscopy [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2004, 12(3): 449-454.
- [18] ROGERS B, MANNING L, SULCHEK T, *et al.*. Improving tapping mode atomic force microscopy with piezoelectric cantilevers[J]. *Ultramicroscopy*, 2004, 100(3-4): 267-276.
- [19] BARTH C, PAKARINEN O H, FOSTER A S, *et al.*. Imaging nanoclusters in the constant height mode of the dynamic SFM[J]. *Nanotechnology*, 2006, 17(S7): 128-136.
- [20] 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)
- [21] AOKI J. *High-precision measurement of large area 3-dimensional micro-structured surfaces using atomic force microscope systems* [D]. Sendai: Tohoku University in Japan, 2006. (in Japanese)

作者简介:



崔玉国(1971—),男,吉林农安人,博士,副教授,1999年于吉林工业大学(现吉林大学)获得硕士学位,2004年于大连理工大学获得博士学位,主要从事压电驱动技术、微/纳米测量技术等方面的研究。E-mail: cuiyuguo@nbu.edu.cn



荒井義和(1978—),男,日本栃木县人,助教,2002年、2005年于日本东北大学获得硕士、博士学位,主要从事微/纳米测量、微/纳米加工技术等方面的研究。E-mail: ari@nano.mech.tohoku.ac.jp



何高法(1972—),男,安徽舒城人,博士,副教授,2005年、2010年于重庆大学分别获得硕士、博士学位,主要从事MEMS方面的研究。E-mail: hegaofa@163.com



高伟(1964—),男,重庆人,教授,1988年、1991年于日本东北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微/纳米测量、微/纳米加工技术等方面的研究。E-mail: gaowei@cc.mech.tohoku.ac.jp