

文章编号 1004-924X(2018)03-0662-10

X 轴分离式高速原子力显微镜系统设计

刘璐¹, 吴森^{1*}, 胡晓东¹, 庞海², 胡小唐¹

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津大学理学院, 天津 300072)

摘要: 为了提高原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 的成像速度, 本文提出了一种新的 AFM 结构设计方案并搭建了相应的实验系统。在该方案中, Y、Z 扫描器集成于测头内驱动探针进行慢轴扫描和形貌反馈; X 扫描器与测头分离, 驱动样品做快轴扫描。X 扫描器采用高刚性的独立一维纳米位移台, 能够承载尺寸和质量较大的样品高速往复运动而不易发生共振; 同时 Z 扫描器的载荷实现最小化, 固有频率得以显著提高。为了避免测头的扫描运动引起检测光束与探针相对位置的偏差, 设计了一种随动式光杠杆光路; 为了便于装卸探针以及精确调整激光在探针上的反射位置, 设计了基于磁力的探针固定装置和相应的光路调节方案。对所搭建的 AFM 系统的初步测试结果表明, 该系统在采用三角波驱动和简单 PID 控制算法的情况下, 可搭载尺寸达数厘米且质量超过 10 g 的较大样品实现 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ 范围 50 Hz 行频的高速成像。

关键词: 原子力显微镜; 高速; 快轴; 扫描器; 光杠杆

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182603.0662

Design of high-speed atomic force microscope with a separated X-scanner

LIU Lu¹, WU Sen^{1*}, HU Xiao-dong¹, PANG Hai², HU Xiao-tang¹

(1. State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instruments,
School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University,
Tianjin 300072, China;

2. School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: senwu@tju.edu.cn

Abstract: To increase the imaging rate of atomic force microscope (AFM), a new AFM structure design was presented. In this structure, the Y and Z scanners were integrated in the scanning head, which move the probe in the slow-axis and the Z-axis, respectively. The X scanner was separated from the head, which moved the sample in the fast-axis. An independent one-dimensional nanopositioning stage was used as the X scanner. Due to its high stiffness, the X scanner could carry relative large samples and scan at a high speed without inducing resonance vibration. Meanwhile, the load of the Z scanner was minimized, resulting in higher resonant frequency and hence faster response. A trackable optical lever was used to avoid the shift of the laser spot on the cantilever probe

收稿日期: 2017-06-23; 修订日期: 2017-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61204117); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2017YFF0105905)

during scanning. A magnetic based probe holder as well as a new adjustment setup were introduced to hold the probe and precisely position it relative to the laser. According to a preliminary test, the AFM system established in this work can realize high speed imaging for the sample with centimeters dimensions and mass above 10 g. The scanning speed (line frequency) achieves 50 Hz@13 μm with linear driving and simple PID control algorithm.

Key words: Atomic Force Microscope(AFM); high speed; fast-axis; scanner; optical lever

1 引言

原子力显微镜(Atomic Force Microscope, AFM)是微纳米研究及半导体工业领域的一种重要表征仪器^[1-3]。借助 AFM 不仅能够以亚纳米分辨力获得样品表面的三维形貌图像,还可以实现材料模量、电导等多种物理特性的原位测量,甚至进行纳米尺度的加工、组装等复杂操作^[4-6]。近年来随着生命科学、新材料等研究方向的快速发展,AFM 得到了越来越广泛地应用。与此同时,来自应用领域的特殊需求也推动着 AFM 仪器技术的不断革新。提高扫描速度实现高速成像即是当前 AFM 的重要发展方向之一。

工作在大气条件下的 AFM 一般包括悬臂梁探针、光学检测系统、压电陶瓷扫描器、数据处理及反馈控制电路等单元。扫描速度的上限由上述各单元的总时延决定。为了获得更短的响应时间,小尺寸悬臂梁探针和高速扫描器等技术相继出现^[7-13],关键元件的变化也使得 AFM 在整体结构上有所调整。

常见的 AFM 有上扫描和下扫描两种结构形式。上扫描式 AFM 的 XYZ 扫描器均位于测头内,工作时探针运动而样品保持静止;下扫描 AFM 则是探针静止,样品做三维扫描。前者的优势在于对样品大小几乎没有限制,但为保证测头运动时激光在探针上的反射位置不变,要求检测光路具备随动能力;后者的优势则在于光路固定易于实现,而缺点是样品台较小。使用小尺寸探针的高速 AFM 通常采用与显微镜集成的光杠杆检测光路以获得更小的光斑。考虑到光路的复杂性以及探针夹持装置的设计难度,大多数高速 AFM 都采用下扫描式结构。为避免高速往复运动引发机械共振,此类 AFM 多采用基于柔性铰链的高刚性压电陶瓷扫描器替代传统的管式扫描器,其扫描行频可达数百至数千赫兹,在亚微米范

围内能够实现视频成像^[14-15]。

由于 XYZ 扫描器集成在一起时,样品载荷同时作用于 3 个轴上,势必会导致各扫描器尤其是用于跟踪形貌的 Z 扫描器响应速度变慢。因此下扫描式高速 AFM 对样品大小的限制通常比较苛刻。例如领域内最为知名的两个团队——日本金泽大学 Ando 以及加州大学圣芭芭拉分校的 Hansma 课题组所设计的高速 AFM 样品台直径均不到 3 mm,样品质量远小于 1 g。其他研究机构以及部分公司所开发的下扫描式 AFM 尽管在样品台尺寸上有所改善,但样品质量受限的问题依然存在。Bruker 公司的 FastScan 是目前唯一采用上扫描结构的商业化高速 AFM。其扫描器设计方案来源于 Hansma 的专利。为实现光斑与探针的同步运动,XY 扫描器负载了一枚质量较大的物镜,所以行频一般只能达到几十赫兹。但得益于大样品台的优势,该 AFM 在使用上更为方便,适用面更广。Ando 等人近年也转而设计上扫描式视频 AFM^[16],但因光路随动能力的限制,扫描范围不超过 20 μm ^[17]。

国内在高速 AFM 领域也开展了一系列积极的探索。中科院电工所设计了一种以三维纳米位移台为扫描器的下扫描式高速 AFM^[18-19]。三维纳米位移台自身具有良好的负载能力,对制样的要求相对宽松,但不足在于固有频率较低(几百赫兹)。为避免行扫描信号的谐波引起位移台共振,该系统以正弦波取代传统的三角波进行驱动,同时采用非均匀采样、前馈控制等技术,实现了行频 50 Hz@100 μm 的大范围高速成像。北京航空航天大学以双压电片为快轴扫描器驱动样品或探针,先后构建了下扫描和上扫描式高速 AFM^[20-21]。由于双压电片的谐振频率远高于压电陶瓷扫描器,且相对容易实现相位补偿,这一方案的行频能够达到千赫兹。但因 Z 扫描器带宽较低,该系统尚不能实现实时反馈。此外,对于上扫描式结构,因缺少随动

光路,其扫描范围较小。

为兼顾扫描速度、扫描范围以及样品大小等方面的需求,本文根据前期获得授权的专利方案^[22-23]搭建了一套快轴分离式高速 AFM 系统。该系统以独立的一维纳米位移台驱动样品进行 X 轴(快轴)扫描,测头驱动探针做 YZ 轴扫描。这一设计旨在通过对仪器结构的改进,优化各扫描器的载荷分配策略,实现 AFM 动态性能与载物能力之间的平衡。

2 AFM 系统设计

2.1 总体结构

本文所搭建的高速 AFM 装置实物及其电气系统框图分别如图 1(a)、(b)所示。该 AFM 系统主体是一个由花岗石加工成的龙门结构,龙门底座和横梁上分别安装有 X 向和 Y 向电机位移台,其中 X 电机平台上搭载 Z 向电机升降台,升降台上搭载一个独立的 X 向压电陶瓷扫描器,Y 电机平台上搭载具有 Y、Z 向扫描功能的测头和一部辅助观察用的光学显微镜。待测样品固定在 X

扫描器上,通过 X、Y、Z 3 部电机位移台可实现样品与探针之间的粗定位与进退针操作;X 扫描器和测头相配合可实现样品表面三维形貌的扫描成像。

AFM3 个扫描器对响应速度的要求由高到低依次是 Z 扫描器,快轴扫描器(X 扫描器)和慢轴扫描器(Y 扫描器)。速度越高的扫描器,其负重应当越小。为了使本系统具备对较大样品的高速扫描能力,在设计上令 Z 扫描器与样品台分离,仅负载轻质的探针夹持装置。这里采用了一枚定制的叠堆式环形压电陶瓷作为 Z 扫描器。压电陶瓷自身质量为 1.2 g,开环行程约 5 μm ,标称谐振频率 486 kHz;加上探针负载后,实际谐振频率可由下式估算:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{M}{M+m}}, \quad (1)$$

其中: f_0 和 f 分别为压电陶瓷空载和带负载后的谐振频率, M 和 m 分别为压电陶瓷自身的有效质量和负载的质量。本系统设计的探针夹持机构总质量约为 0.5 g,根据上式可估算出安装探针夹持器后 Z 扫描器的谐振频率约为 324 kHz。

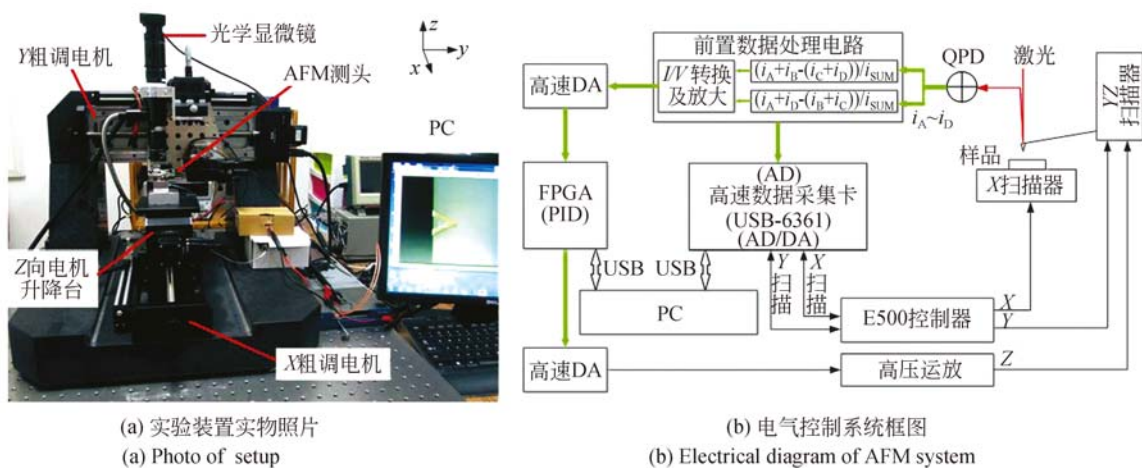


图 1 高速 AFM 系统

Fig. 1 High-speed AFM system

XY 扫描器在以三角波驱动时,三角波的谐波分量可能引发扫描器共振以致系统失稳。因此 XY 扫描器的固有谐振频率通常须在三角波频率的几十到一百倍以上。根据这一原则,选用了 PI 公司的两个高刚性一维纳米位移台(P753. 11C) 分别作为 X 和 Y 扫描器。该位移台最大闭环行

程超过 12 μm ,位移分辨力为 0.05 nm,标称空载固有频率为 5.6 kHz,负载 200 g 时共振频率仍可达到 2.5 kHz。考虑到 X 扫描器搭载的样品一般不超过 100 g,而 Y 扫描器须负载 Z 扫描器和部分光学元件,载荷相对较重,所以本系统以 X 轴为快轴,Y 轴为慢轴。在三角波驱动的情况下,

系统的最大扫描行频理论上可以达到 50 Hz 以上。

本系统的电控部分主要包括前置模拟信号放大调理电路、基于 FPGA 的 Z 轴反馈控制电路、Z 扫描器高压放大电路、XY 扫描器控制器 (PI, E500) 以及多通道数据采集卡 (NI, USB-6361)。其中数据采集卡产生两路扫描驱动信号, 经由 E500 闭环控制器驱动 XY 扫描器扫描, 同时 XY 扫描器的闭环位移信号通过采集卡传递至上位机。测头中的四象限光电探测器 (QPD) 输出信号经模拟电路调理后由高速 ADC 采样进入 FPGA, 再经数字滤波后用于 PID 反馈运算, 运算结果由 DAC 转换成模拟信号, 再经高压放大输入至 Z 扫描器。PID 的运算结果也同时上传至上位机用于成像。上述电路中 AD/DA 转换、数字滤波以及 PID 运算等环节的总延时约 300 ns。上位机图形用户界面 (GUI) 基于 Labview 平台开发, FPGA 和数据采集卡均通过 USB 2.0 端口与上位机通讯以完成指令发送和图像上传。

2.2 检测光路及探针夹持机构

本系统的 XY 扫描范围超过 10 μm , 为保证全行程内检测光束在悬臂梁探针上的反射位置不变, 设计了如图 2 所示的随动式光杠杆检测光路。

在该光路中, 激光器 (780 nm) 发出的准直光束首先通过极化分光镜形成线偏光, 经四分之一波片后, 沿 Y 轴进入非球面透镜, 出射的会聚光

束经倾斜 45° 安装的热反射镜反射至 Z 轴并聚焦在探针悬臂梁上。悬臂梁的反射光束再次经过热反射镜及非球面透镜成为平行光, 平行于 Y 轴反向穿过四分之一波片返回极化分光镜。两次通过四分之一波片后的激光束偏振方向旋转了 90°, 因此被全部反射至极化分光镜另一侧的 QPD 上。QPD 固定在一个二维位移台上, 通过二维位移台可调整其感光面与反射光斑的相对位置。针尖受力后悬臂梁的微小偏转会转换成光斑在 QPD 上的位移, 进而引起 QPD 输出信号的变化。光路中的非球面透镜和热反射镜与 Z 扫描器均固定在 Y 扫描器上随之一起运动, 而 Y 扫描器的运动方向与激光传播方向平行, 原则上无论 Y 扫描器的行程多大都不会改变光束与探针的相对位置。另一方面, Z 扫描器的位移方向与会聚光束的主轴平行, 且其行程在非球面透镜的景深范围以内, 因此测头的 Z 向运动也不会引起光斑反射位置的变化。系统中的 X 扫描器与测头分离, 同样对检测光路没有影响。由此可见, 本系统使用的光杠杆光路可在任意扫描范围内保持对悬臂梁探针的跟踪。

为便于观察探针和样品, 热反射镜上方设置了一部独立于测头之外的长工作距离光学显微镜。通过显微镜上的三维调整台可调节视场区域。测头部分的 Z 向总厚度为 18 mm, 光学显微镜可根据需要安装 W. D. = 33.5 mm 的 10 倍物镜或 W. D. = 20 mm 的 20 倍物镜。

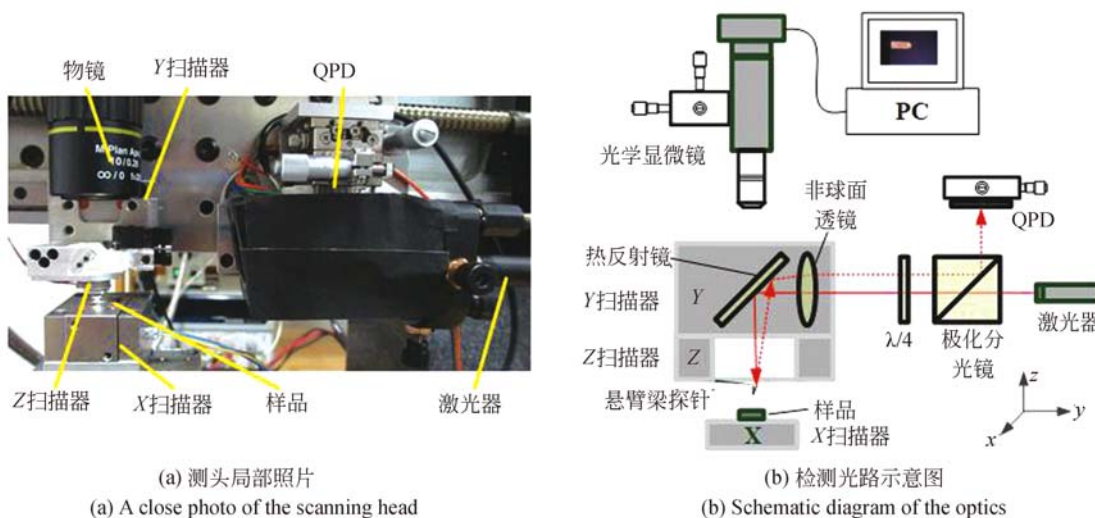


图 2 扫描测头

Fig. 2 Scanning head of AFM

对于 Z 扫描器上置式的 AFM, 探针夹持机构也是关键元件和设计难点之一。除了要求牢固、质轻以外, 还必须考虑光路与探针相对位置调节的便利性。图 3 给出了探针夹持器和调节装置的结构示意图。探针夹持器整体为铝质, 局部镶嵌磁铁, 借助磁力吸附在 Z 扫描器底部的铁片上。探针通过簧片固定在夹持器底部, 安装后悬臂梁与水平面成 11° 倾角。若保持测头光路不变, 则激光焦斑的空间位置固定, 移动探针夹持器即可调整探针相对于激光束的位置。对探针夹持器位置的调整须借助图中的调整支架以及系统中的 XYZ 电机实现。该支架固定在 Z 升降台上, 调整探针时首先令支架上的 4 个销柱插入探针夹持器底部对应的插孔内, 之后利用 XY 电机平台带动夹持器在 Z 扫描

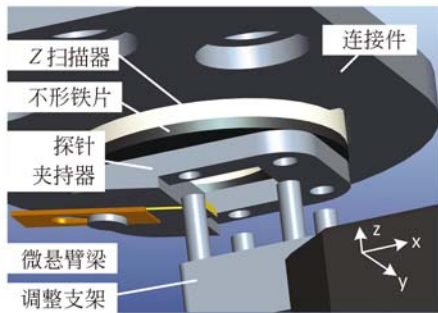


图 3 探针夹持器及位置调整机构设计示意图

Fig. 3 Mechanical design drawing of probe holder and position adjustment setup

器底部滑移, 借助热反射镜上方的光学显微镜观察探针悬臂梁与激光焦斑的相对位置, 当焦斑位于悬臂梁上靠近自由端且反光能量较强的区域时, 降低 Z 升降台使插销脱离夹持器, 再调整 QPD 的位置确保返回的光斑位于光敏面中心附近即完成了整个调整过程。

3 实验结果与讨论

3.1 扫描器的动态性能标定

为了验证扫描器的动态性能, 本文利用阻抗分析仪对各扫描器进行了测试, 阻抗极小处即对应谐振频率。图 4(a) (彩图见期刊电子版) 给出了 X 扫描器空载 (红色虚线) 和承载 100 g 铁块 (蓝色实线) 时的频响曲线。其中空载谐振频率约为 6.49 kHz, 加载铁块后的谐振频率约为 4.83 kHz。对于 AFM 样品而言, 100 g 已属较重的质量。这一测量结果表明本系统具备对较大样品进行高速扫描的潜力。图 4(b) 所示为 Y 扫描器空载和安装在测头内之后测得的频响曲线。Y 扫描器的空载谐振频率约 6.11 kHz, 与 X 扫描器空载时相近; 搭载 Z 扫描器 (包含探针夹持器) 以及非球面透镜、热反射镜等光学元件的情况下, 谐振频率降至 4.03 kHz。AFM 对慢轴动态性能的要求不高, 即便是视频级 AFM, 其慢轴扫描频率最高也只有 10 Hz 左右, 远低于上述实测指标。事

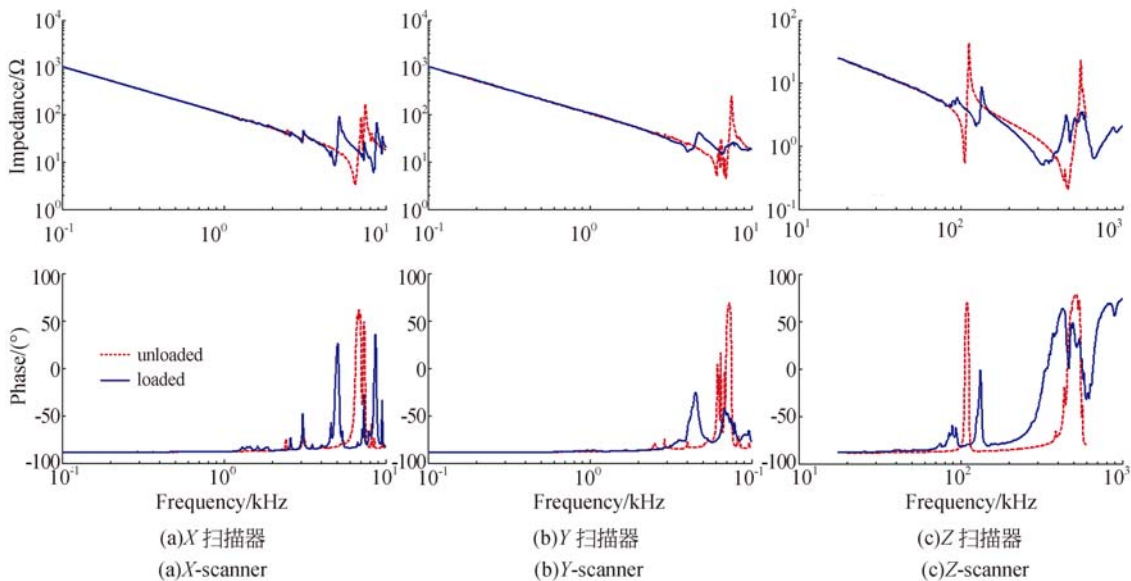


图 4 X, Y, Z 的幅频和相频响应曲线

Fig. 4 Dynamic response of the X-scanner, Y-scanner and Z-scanner

实上,本系统中的 Y 扫描器动态性能虽略逊于 X 扫描器,但在样品质量超过 Y 扫描器的总载荷时同样可以作为快轴扫描器使用。图 4(c)所示为 Z 扫描器空载和安装探针夹持器后的频响曲线。压电陶瓷空载时的频响曲线上可以看到 106.1 kHz 和 454.6 kHz 处各有一个明显的峰,安装铁片及探针夹持器后这两个峰分别移动至 125.2 kHz 和 324.2 kHz 附近。可以认为频率较低的峰对应环形压电陶瓷的径向谐振频率,频率较高的峰对应轴向(Z 向)谐振频率。粘贴铁片所用的环氧树脂胶对压电陶瓷的径向运动有较强的阻尼作用,因此安装铁片及探针夹持器后其径向谐振频率变大;而其轴向谐振频率则因负载质量的增加而减小,其变化量与公式(1)计算的结果相近。

3.2 Z 扫描器的位移特性标定

本系统中的 Z 扫描器自身不含位移传感器,样品表面起伏高度值由 Z 扫描器的驱动电压给出。为了得到定量的测量结果,须对 Z 扫描器的电压-位移特性进行标定。本文借助 PI 公司的纳米位移台 P-733.3CL(Z 向行程 10 μm,闭环位移分辨率 0.1 nm)标定 Z 扫描器,具体步骤如下。

首先在探针夹持器中装入一枚悬臂梁探针(Bruker SNL-A, $f=65\text{ kHz}$, $k=0.35\text{ N/m}$),完成相应的激光对准操作;之后将 X 扫描器替换为 P-733.3CL,并在其工作台面固定一片蓝宝石样品;开启 Z 向电机执行进针程序,此过程中 Z 扫描器保持零伸长状态,FPGA 的反馈输出信号接入 P-733.3CL 的 Z 轴,当样品远离针尖时,P-733.3CL 伸至最高,当探针接触蓝宝石并产生形变后,P-733.3CL 调整伸长量以维持悬臂梁的弯曲为设定值;进针完成后,针尖与蓝宝石样品轻微接触,在 0~190 V 范围内对 Z 扫描器施加频率为

0.2 Hz 的三角波,同时记录 P-733.3CL 的 Z 向位移变化,此位移即反映了 Z 扫描器的伸缩量。图 5 给出了一个周期内 Z 扫描器的电压-位移曲线。图中可见 Z 扫描器在 0~190 V 驱动范围内行程约 5.06 μm,在 0.2 Hz 三角波驱动下去程和回程的非线性误差分别为 9.45%和 3.77%。由于 Z 扫描器上未安装位移传感器,本文后续实验中仅以线性关系近似计算与驱动电压对应的位移量。

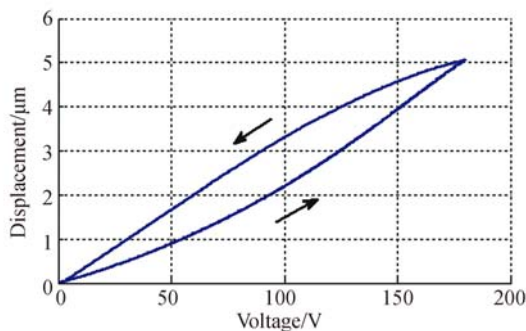


图 5 Z 扫描器的电压-位移曲线

Fig. 5 Voltage-displacement curves of Z-scanner

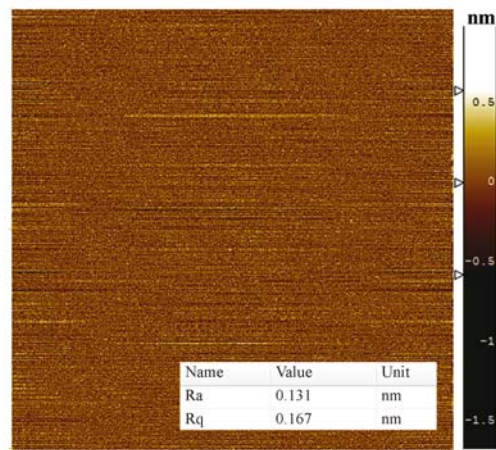


图 6 AFM 系统本底噪声图像 (1 Hz@0 nm)

Fig. 6 Noise image of AFM system (1 Hz@0 nm)

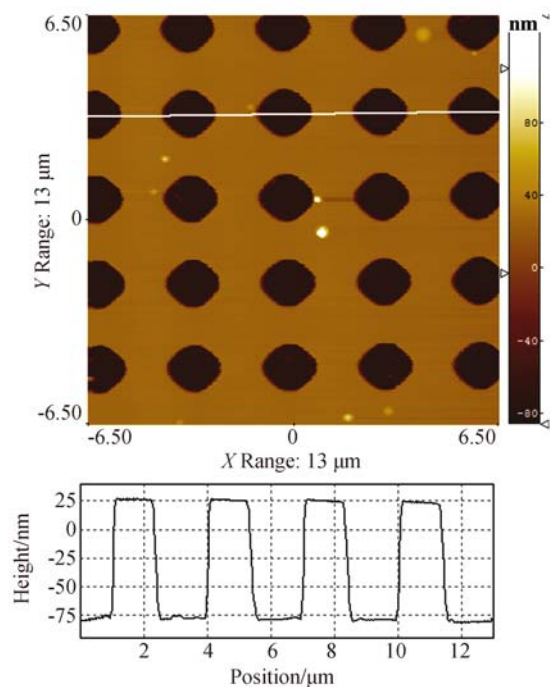


图 7 低速扫描效果(1 Hz@13 μm)

Fig. 7 Image obtained with a low scanning speed

(1 Hz@13 μm)

3.3 系统噪声

AFM 系统的测量分辨力由其噪声水平决定。噪声来源于环境机械振动、电路噪声、光学噪声等多个方面。限于篇幅,本文不对各噪声源单独展开讨论,仅给出系统整体表现出的综合噪声测试结果。

将各扫描器复位并在 X 扫描器上放置蓝宝石样品,将 FPGA 的反馈信号重新接入 Z 扫描器,令 AFM 系统在接触模式下进行扫描,针尖接触蓝宝石后悬臂梁偏转量在 PID 反馈控制下保持为预设值。设置扫描范围为 0 nm,像素点为 512×512 ,扫描频率为 1 Hz,开启图像扫描功能得到如图 6 所示的

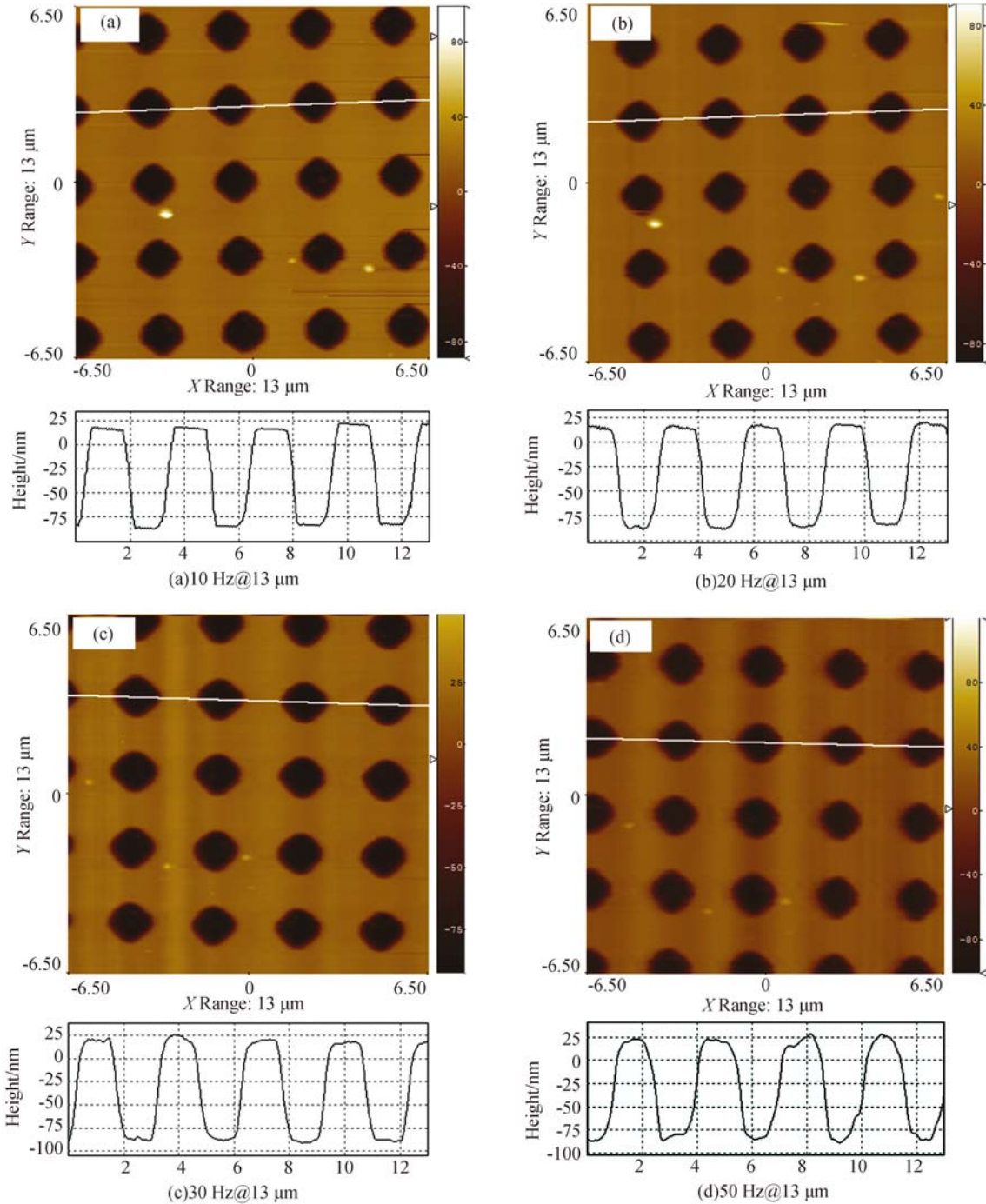


图 8 不同速度扫描结果

Fig. 8 Images obtained by different speed scanning

伪形貌数据。对该图进行调平处理后计算粗糙度得 $R_a=0.131\text{ nm}$ (算术平均值), $R_q=0.167\text{ nm}$ (均方根)。这里以 R_q 值作为本系统的本底噪声。考虑到目前整个实验装置只是开放式地放置在普通光学平台上,并未使用气浮隔振或主动式隔振措施,也未安装防风罩,上述噪声水平仍可进一步优化。

3.4 标准样品成像

在标定工作的基础上,利用本系统对标准栅格样品进行了一系列扫描实验以测试系统的高速成像能力。实验所用的栅格样品为 APPNANO 公司生产的 STEP-OX-0.1 型标样,栅格标称高度为 106.4 nm ,水平方向周期约为 $3\text{ }\mu\text{m}$,整个标样基片的尺寸为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 。为模拟大样品,将一块尺寸为 $40\text{ mm}\times 30\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 质量超过 10 g 的铝板同栅格标样一起固定在 X 扫描器上。

首先在低速状态下验证本系统测量结果的可靠性。仍采用 SNL-A 型探针,在接触模式下进针,扫描范围设为 XY 扫描器的最大行程($13\text{ }\mu\text{m}\times 13\text{ }\mu\text{m}$),扫描行频 1 Hz ,像素点 512×512 ,获得图 7 所示栅格图像。截面分析可见测量结果与栅格标称尺寸基本一致,表明本系统在 XY 全行程范围内能够得到可信的测量结果。

为验证系统的高速扫描性能,依次使用 10 Hz 、 20 Hz 、 30 Hz 、 50 Hz 行频对同一区域进行扫描成像,扫描范围仍为 $13\text{ }\mu\text{m}\times 13\text{ }\mu\text{m}$,图像像素为 256×256 ,XY 轴驱动信号均为拐点略微削平的三角波,PID 增益随扫描速度的提高适当增大,但扫描过程中增益值保持不变。从图 8 给出的成像结果中可以看出,扫描速度的提高

并未造成图像质量的显著下降,XY 驱动信号的高次谐波尚不足以引发扫描器共振,整个系统很好地保持了稳定工作状态,不同速度下测得的栅格尺寸仍与标称值相近,图像整体畸变较小。须指出的是,尽管在行频超过 30 Hz 时扫描器没有出现共振,但图像的清晰度有所下降,栅格结构本应陡峭的边界特征变得较为平滑。本次实验所用探针的响应速度较慢可能是造成这一现象的重要原因。在后续工作中,将改用速度更快的小尺寸探针在轻敲模式下进行实验。此外,如何抑制漂移也将是下一步工作中拟重点研究的问题。

4 结 论

本文针对高速扫描成像的需求,提出了一种快轴扫描器与测头分离的新型 AFM 设计方案并搭建了相应的实验系统。论文首先介绍了新方案的总体结构设计以及测头中的随动式光杠杆光路、探针夹持机构等关键单元设计,之后对所搭建的高速 AFM 系统进行了标定和扫描测试。实验结果表明,基于新方案设计的 AFM 系统在不使用特殊的非线性驱动方式和复杂控制算法的情况下,在 $13\text{ }\mu\text{m}\times 13\text{ }\mu\text{m}$ 范围内的扫描行频可达 50 Hz 且图像无明显畸变。本文提出的 AFM 结构较之现有的下扫描式高速 AFM 在载物能力方面有显著提升,较之上扫描式 AFM 则具有更好的动态性能。本文所设计的随动式光杠杆光路理论上可用于任意行程的 AFM,仅通过更换行程更长的 X、Y 扫描器而无需修改光路即可扩大扫描范围。

参考文献:

- [1] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930-933.
- [2] DANZEBRINK H U, KOENDERS L, WILKENING G, et al. Advances in scanning force microscopy for dimensional metrology[J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(2): 841-878.
- [3] MARINELLO F. Atomic force microscopy[M]. // *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*.

Berlin: Springer Heidelberg, 2016.

- [4] WANG Z L, SONG J J. Piezoelectric nanogenerators based on zinc oxide nanowire arrays[J]. *Science*, 2006, 312(5771): 242-246.
- [5] 吴森. 基于 AFM 的一维纳米材料操纵及力学特性测试技术[D]. 天津: 天津大学, 2011.
Wu S. *AFM based manipulation and mechanical properties measurement of one-dimensional nanomaterials*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011. (in Chinese)
- [6] ALSTEENS D, GAUB H E, NEWTON R, et al..

- Atomic force microscopy-based characterization and design of biointerfaces[J]. *Nature Reviews Materials*, 2017, 2(5): 17008.
- [7] FANTNER G E, SCHITTER G, KINDT J H, *et al.*. Components for high speed atomic force microscopy[J]. *Ultramicroscopy*, 2006, 106(8-9): 881-887.
- [8] ANDO T, UCHIHASHI T, KODERA N. High-speed atomic force microscopy[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(8S3): 08KA02.
- [9] 赵剑勇, 蔡微, 商广义. 高速原子力显微术研究进展[J]. *电子显微学报*, 2013, 32(1): 81-89.
ZHAO J Y, CAI W, SHANG G Y. Progress in high-speed atomic force microscopy[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2013, 32(1): 81-89. (in Chinese)
- [10] SCHITTER G, THURNER P J, HANSMA P K. Design and input-shaping control of a novel scanner for high-speed atomic force microscopy [J]. *Mechatronics*, 2008, 18(5-6): 282-288.
- [11] SHITTER G, ÅSTRÖM K J, DE MARTINI B E, *et al.*. Design and modeling of a high-speed AFM-scanner[J]. *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 2007, 15(5): 906-915.
- [12] BOZCHALOOI I S, HOUCK A C, ALGHAMDI J M, *et al.*. Design and control of multi-actuated atomic force microscope for large-range and high-speed imaging[J]. *Ultramicroscopy*, 2016, 160: 213-224.
- [13] YOUCEF-TOUMI K, BOZCHALOOI I S, HOUCK A C. Multi-actuator design and control for a high-speed/large-range nanopositioning system[P]. U. S. Patent 9397587. 2016-07-16.
- [14] UCHIHASHI T, KODERA N, ANDO T. Guide to video recording of structure dynamics and dynamic processes of proteins by high-speed atomic force microscopy[J]. *Nature Protocols*, 2012, 7(6): 1193-1206.
- [15] SCHITTER G, ROST M J. Scanning probe microscopy at video-rate [J]. *Materials Today*, 2008, 11(S1): 40-48.
- [16] FUKUDA S, UCHIHASHI T, ANDO T. Method of mechanical holding of cantilever chip for tip-scan high-speed atomic force microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(6): 063703.
- [17] FUKUDA S, UCHIHASHI T, IINO R, *et al.*. High-speed atomic force microscope combined with single-molecule fluorescence microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(7): 073706.
- [18] 殷伯华, 陈代谢, 林云生, 等. 高速大扫描范围原子力显微镜系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2651-2656.
YIN B H, CHEN D X, LIN Y SH, *et al.*. Design of AFM system with high speed and large scanning range[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2651-2656. (in Chinese)
- [19] 陈代谢, 殷伯华, 林云生, 等. 大范围高速原子力显微镜的前馈反馈混合控制方法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 836-843.
CHEN D X, YIN B H, LIN Y SH, *et al.*. Feed-forward and feed-back controller for large-range and high-speed AFM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 836-843. (in Chinese)
- [20] ZHAO J Y, GONG W T, CAI W, *et al.*. Piezoelectric bimorph-based scanner in the tip-scan mode for high speed atomic force microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(8): 083706.
- [21] CAI W, ZHAO J Y, GONG W T, *et al.*. Resonance-type bimorph-based high-speed atomic force microscopy: real-time imaging and distortion correction[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(12): 125404.
- [22] 吴森, 胡晓东, 胡小唐, 等. 一种光束跟踪式原子力显微镜扫描测头[P]. 中国: ZL201310514419.4, 2013-10-28.
WU S, HU X D, HU X T, *et al.*. A scanning head of atomic force microscope with a tracking optical beam lever[P]. China: ZL201310514419.4, 2013-10-28. (in Chinese)
- [23] 吴森, 胡晓东, 徐临燕, 等. 一种适用于高速扫描的原子力显微镜系统[P]. 中国: ZL201510089015.4, 2015-02-27.
WU S, HU X D, XU L Y, *et al.*. An atomic force microscope system for high speed scanning[P]. China: ZL201510089015.4, 2015-02-27. (in Chinese)

作者简介:



刘璐(1991—),女,山东菏泽人,博士研究生,2011年和2014年先后在兰州理工大学和天津大学获得学士、硕士学位,主要从事原子力显微镜的硬件开发工作。E-mail: dgliulu@tju.edu.cn



胡晓东(1974—),男,江西新余人,教授,分别于1995年和2000年在天津大学获得学士、博士学位,主要从事微纳测试技术研究及仪器化工作。E-mail: xdhu@tju.edu.cn

导师简介:



吴森(1982—),男,湖北武汉人,副教授,分别于2004年和2012年在天津大学获得学士、博士学位,主要研究领域包括新型原子力显微镜的设计开发以及基于原子力显微镜的表征和纳米操纵技术。E-mail: senwu@tju.edu.cn