

基于纳米运动平台的原子力显微镜开发

焦念东^{***} 王越超^{*} 席宁^{***} 董再励^{*}

(^{*}中国科学院沈阳自动化研究所 沈阳 110016)

(^{**}中国科学院研究生院 北京 110039)

(^{***}美国密西根州立大学电子与计算机工程系 兰辛 48824)

摘要 采用一种无耦合、三轴精确定位的纳米运动平台作为扫描器,研制了一种新型原子力显微镜(AFM)。该AFM有效消除了通常使用的单管式压电陶瓷扫描器扫描过程中运动耦合产生的两种结构误差——交叉耦合误差和扫描范围误差,极大提高了纳米测量及操作的精度。

关键词 原子力显微镜,运动耦合,纳米运动平台,AFM力曲线

0 引言

原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)作为一种纳米级观测及操作装置已取得了很大发展^[1-3]。然而目前AFM的扫描器主要用Binnig和Smith发明的单管式压电陶瓷驱动器带动扫描探针或样本进行扫描运动^[4-6],由于单管式压电陶瓷运动时的弯曲运动使得扫描运动中水平方向与垂直方向产生运动耦合,致使扫描器运动时产生两种结构误差:交叉耦合误差和扫描范围误差^[7-8]。前者指当扫描器进行水平方向扫描运动时在 z 方向产生的额外运动造成的 z 向位移误差;后者存在于采取样本扫描方式的AFM,是指当样本厚度发生大的变化时实际扫描范围发生变化造成的实际扫描范围同理论扫描范围的偏差。这两种误差影响了纳米观测及纳米操作的精度。为了消除单管式AFM的这两种误差,可采取误差补偿的方法或从扫描器结构上完全解耦的方法。本文即从扫描器的结构上入手,研制了一种具有非耦合扫描运动形式的新型AFM。该AFM采用具有三个压电陶瓷驱动器的纳米运动平台作为扫描器,可实现三维的精确定位及非耦合运动,避免了由单管式扫描器产生的弯曲效应,因而从根本上消除了交叉耦合误差和扫描范围误差。该AFM克服了单管式AFM扫描器结构上的不足,极大提高了纳米测量及操作的精度。

1 纳米运动平台的开发

我们所研制的AFM的主体部件是由纳米运动平台构成的扫描器,该扫描器的性能直接影响AFM整体的性能。为了实现AFM的纳米级观测功能,需要对纳米运动平台进行开发,实现其纳米定位及扫描运动功能。

1.1 纳米运动平台的原理

AFM扫描方式有两种:探针扫描方式和样本扫描方式。我们所研制的AFM采用样本扫描形式,即探针不动,纳米平台带动样本进行往复扫描运动,如图1所示。结构设计使激光可以照射到AFM扫描探针的悬臂梁,并反射到光电位置敏感检测器(position sensitive detector, PSD)上。当AFM进行扫描时,纳米运动平台带动样本进行扫描运动。探针针尖的原子与样品表面原子间的相互作用力使得探针悬臂梁随着样品表面的形貌发生上下弯曲及侧向的扭转形变,悬臂梁的这些形变使反射到PSD的激光位置发生偏移,通过检测PSD的输出电信号变化就可以检测出被测样品表面形貌的起伏变化,进而得到样品表面的微形貌。

本系统采用的纳米运动平台通过三个独立的压电陶瓷驱动器控制平台的运动部分产生三维运动,因而消除了运动中的耦合问题。其工作过程为:控制纳米平台运动的指令传输给纳米平台控制器,该

国家自然科学基金(60575060)及辽宁省优秀青年科研人才培养基金项目(3050002)资助。
男,1977年生,博士生;研究方向:纳米技术及纳米操作系统;通讯作者,E-mail: ndjiao@sia.cn
(收稿日期:2006-07-24)

控制器将运动指令转化为加在各驱动器的电压,控制其伸缩。各驱动器的运动位置由位置电容传感器返回给主控制器实现各驱动器的闭环控制以保证其运动精度。通过指令协调控制三个驱动器的运动即可实现纳米运动平台的不同运动形式,如直线运动、弧线运动及往复扫描运动等。该纳米运动平台保证了纳米级的运动及定位,使得基于此开发的 AFM 可以实现高精度的扫描运动及纳米操作。

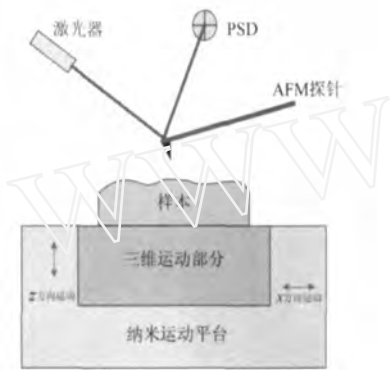


图1 基于纳米运动平台的 AFM

1.2 纳米平台扫描运动的实现

该 AFM 的扫描运动是通过协调控制纳米平台 X 和 Y 驱动器的运动实现的。图 2 为实现纳米平台

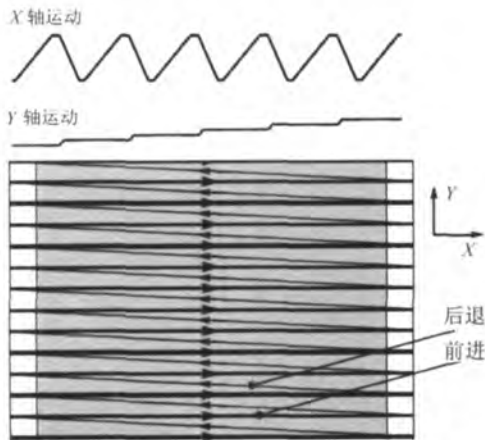
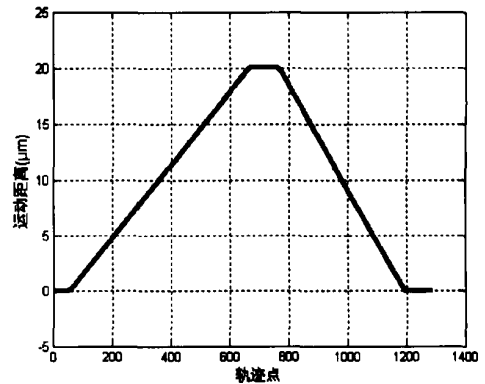


图2 纳米平台扫描运动的实现

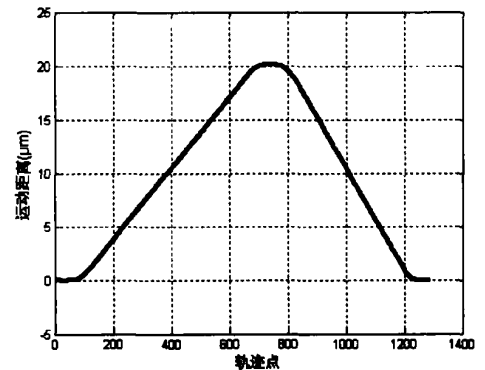
扫描运动的原理图。首先 X 驱动器匀速伸长,此时 Y 驱动器保持不动。当 X 驱动器伸长到预定的扫描距离时, Y 驱动器伸长一步距离并保持在这一位置,同时 X 驱动器缩回到原来的位置。此过程循环运行,即实现了纳米运动平台的往复扫描运动。平

台各驱动器在扫描运动中按一定轨迹运动,该运动轨迹为事先定义的运动波形,波形由一系列点组成,各点对应驱动器在某一时刻要运动到的位置。通过控制各驱动器按一定波形循环运动,即可实现纳米运动平台不同的运动形式。

另外,各驱动器的运动速度可以由指令设定。通过改变平台控制器对波形点的处理时间可以调整平台的扫描运动频率。不过当平台高速运动时,将会产生微小的残余误差(residual error)。图 3 为平台中 X 驱动器低速和高速运动时的运动轨迹。其中横坐标为轨迹上的点,纵坐标为驱动器的伸长距离。图 3 (a) 和图 3 (b) 中驱动器的运动速度分别为 $10\mu\text{m/s}$ 和 $80\mu\text{m/s}$ 。(a) 的运动轨迹与理论值一致,而 (b) 的运动轨迹没有完全跟上 (a) 的运动轨迹,这是由于压电陶瓷驱动器的非线性及平台控制器的有限动力学性能所致。此误差对驱动器高速运动时的运动精度会产生影响,因而需要消除。通过在平台初始运动的几个周期内记录各点的误差,并以此在后续的运动周期内进行误差补偿控制,可以使得修正后的运动残余误差基本为零。



(a) 驱动器低速扫描运动轨迹



(b) 驱动器高速扫描运动轨迹

图3 驱动器低速与高速运行轨迹对比

2 基于纳米运动平台的 AFM 研制

在纳米运动平台的基础上,结合其他硬件设备我们研制了一种具有非耦合运动形式的 AFM。通过不同的控制策略我们实现了该 AFM 的恒高与恒力扫描方式。研究了扫描中纳观力对 AFM 针尖的影响及针尖的合理定位位置。最终实现了该 AFM 高品质扫描成像功能。

2.1 AFM 的结构及扫描运动中的控制

我们所研制的 AFM 系统其结构主要包括半导体激光器、四象限位置敏感探测器 (PSD)、扫描探针、纳米运动平台、纳米运动平台控制器、微动机构、微动机构控制器、光学显微镜、CCD 相机及相应的控制电路,其结构如图 4 所示。其中微动机构可实现微米级运动精度,主要用于扫描探针的初始逼近。纳米运动平台实现探针的精确逼近及定位,并实现

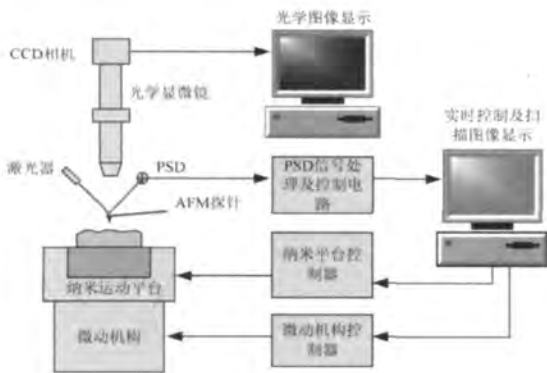


图 4 基于纳米运动平台的 AFM 系统结构框图

扫描运动。为保证纳米平台运动指令的实时性,控制平台运动的 PC 机采用 WinCE 实时操作系统。为获得 PSD 信号我们对 PSD 进行了信号处理的电路设计。设计后的 PSD 有两路信号输出,分别对应照射在其上的激光光斑上下和左右位置信号。其计算公式为:

$$S_n = \frac{(A+B) - (C+D)}{A+B+C+D} \quad (1)$$

$$S_l = \frac{(A+C) - (B+D)}{A+B+C+D} \quad (2)$$

其中 A, B, C, D 为 PSD 四象限信号。

目前,我们实现了 AFM 的恒高和恒力扫描方式。其中恒高方式是指探针在接触样本后保持 AFM 悬臂末端与样本的距离恒定不变进行扫描成

像;而恒力方式由检测 PSD 信号变化实时调整纳米运动平台的 z 向伸缩,从而使得针尖与样本间的作用力保持恒定进行扫描成像。恒高方式可实现高速扫描,但要求样本表面比较光滑,没有大的凸起;恒力方式下针尖与样本轻微接触,随着样本表面微形貌而起伏运动,可以获得较高分辨率的样本表面图像。

在用 AFM 进行恒高方式扫描成像时,纳米平台控制器根据预定好的运动波形发送运动指令使纳米平台进行扫描运动。扫描中 PSD 信号的变化反映的即为样本表面起伏情况,通过记录每一采样点的 PSD 信号,即可得到样本表面形貌图,其工作过程如图 5 所示。

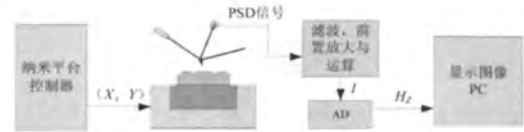


图 5 恒高扫描方式工作过程

在用 AFM 进行恒力方式扫描成像时,纳米平台控制器除了控制平台进行扫描运动外,还要不断检测 PSD 信号的变化进行反馈控制。该反馈控制是恒力扫描方式的核心环节,其作用是通过不断调整纳米平台 z 向伸缩,调节针尖-样本相互作用力的强度,使其保持恒定。恒力扫描方式的工作过程如图 6 所示,其具体过程为:扫描运动时,AFM 针尖首先轻微接触上样本,该预定位置可根据 AFM 力曲线

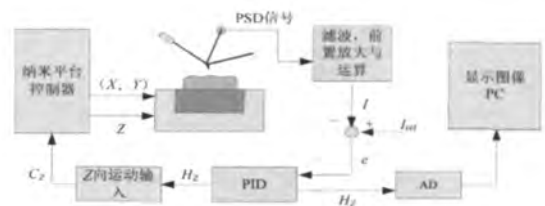


图 6 恒力扫描方式工作过程

的突跳信号确定(后面有介绍)。此时的 PSD 信号作为初始设定值 I_{ref} ,可以视为针尖与样本作用力强度的度量。PID 反馈控制的输入和输出信号分别为 PSD 的偏差信号 e 和控制纳米平台 z 向伸缩的信号 H_z 。扫描中通过该 PID 反馈控制不断调整 AFM 针尖与样本间距离,使变化的 PSD 信号回到参考值

I_{ref} ,进而使得针尖与样本间的纳观作用力保持不变。同时通过记录每个采样点的 I_z 信号即可构成恒力方式下样本表面形貌图。

在开发中,我们注意到有两个重要因素影响着扫描信号的质量:激光器和各种干扰(振动和电磁干扰)。首先,反射到 PSD 的激光光斑作为度量样本表面高度变化的唯一信号源,它的性能、形状和大小将直接影响 PSD 信号,进而影响扫描图像的质量。因而对激光器的选择是一个关键问题。另一方面干扰信号同样也会影响扫描信号的性能。由于 AFM 探针对弱信号极其敏感,因此外界任何微弱干扰如大声说话与人的走动等都将引起 PSD 信号产生很大的变化。因而我们将所搭建的 AFM 主体置于屏蔽罩内,并置于气浮平台之上以消除空气和地面振动对它的影响。另外电源和各种电路也会引入电干扰信号,通过将电路屏蔽接地可以有效减少电干扰信号。经过以上处理,所搭建的 AFM 达到了比较理想的检测效果,可以检测出样本表面纳米级高度的变化。

2.2 AFM 针尖预定位的研究

在 AFM 的恒力扫描模式中,探针针尖首先轻微接触上样本。该预定位置的 PSD 信号反应出针尖与样本作用力的强度,在后续的扫描中将通过反馈控制使得该力保持不变。若该力过大,则表示针尖紧压在样本上,扫描中会损伤针尖和样本;而该力过小,则表示针尖没有适当地压在样本上,使得针尖对样本表面形貌的变化不敏感。因而如何有效控制针尖的预定位置,使得针尖与样本间的力保持某个理想的值是恒力扫描模式的一个关键问题。

纳米环境下样本对探针针尖具有很强的黏附作用,这些力主要来源于范德华力,表面毛细力及静电力^[9]。为了更好地理解针尖与样本的相互作用力,探索恒力方式中针尖合理的预定位置,我们用该 AFM 测量了针尖在逼近样本及退回过程中的力曲线,如图 7 所示。图中 AFM 针尖逼近及退回的过程用数字 1-5 标记:1——纳米平台带动样本上升,使针尖接近样本;2——当针尖与样本间的间隙在几十纳米时,由于样本表面的强黏附力,针尖突然被吸附到样本表面上^[10],此时探针悬臂梁向下弯曲;当平台继续向上运动时由于样本的接触排斥力悬臂梁将逐渐被顶起向上弯曲;3——纳米平台下降使得针尖由样本退回,但此时针尖仍被样本表面黏附力所吸附,没有与样本分离;4——当针尖相对样本退回的距离超过黏附力的作用范围时,针尖从样本突然弹

回,与样本完全分离;5——纳米平台退回原处。通过力曲线及具体的实验,我们发现当探针针尖与样本刚刚接触时,针尖对样本表面形貌变化最敏感。这个位置可通过检测力曲线逼近过程中 PSD 信号的突跳信号检测出来,作为扫描前针尖的预定位置,进而在扫描中可实现高品质的扫描成像。

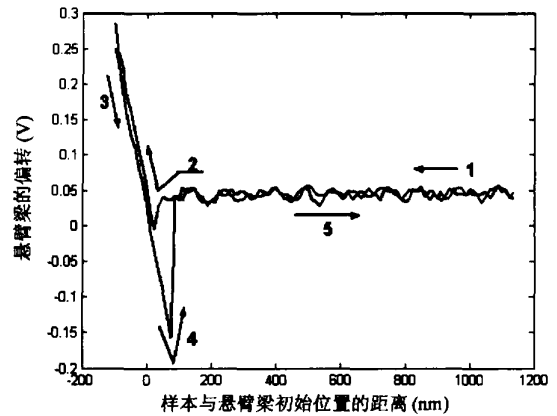


图 7 AFM 力曲线的测量

3 实验及性能测试

我们用研制的 AFM 系统进行了一系列扫描成像实验。系统中采用纳米运动平台作为扫描器(德国 PI 公司,型号 E-710.3CD)。该 AFM 的主要性能指标为:最大扫描运动范围 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$,精度为 1nm ;Z 向运动范围为 $20\mu\text{m}$,精度为 0.1nm 。最大扫描运动速度为 12.5mm/s ,Z 向最大运动速度为 10mm/s 。该 AFM 系统结构如图 8 所示。

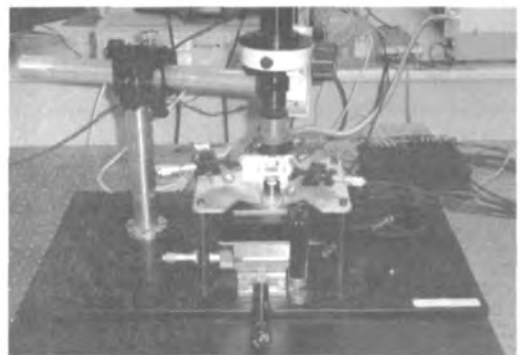


图 8 基于纳米运动平台的 AFM 系统结构

应用我们自行开发的 AFM,我们对 20nm 深,间距 $3\mu\text{m}$ 的标准栅格(美国 MikroMasch 公司,型号

TGZ01)进行了扫描实验。图9为栅格扫描中的PSD信号图,扫描范围为 $15\mu\text{m}$ 。从图中可以清楚地看出栅格表面的台阶的起伏变化,20nm高的台阶对应大致0.2V的PSD信号变化量,从而验证了系统中PSD信号及相应处理电路的性能,证明我们搭建的AFM在Z向可以达到纳米级分辨率。

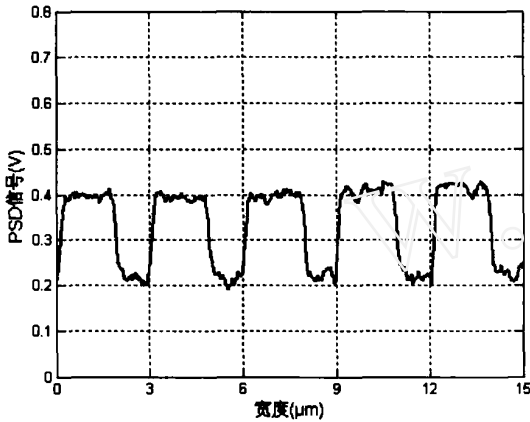


图9 扫描20nm深标准栅格时的PSD信号图

为了测试本系统是否有效消除了扫描器水平方向与垂直向的运动耦合,我们在不同样本厚度的情况下对标准栅格进行了扫描成像。若系统在水平与垂直运动方向存在运动耦合,则实际扫描范围会随着样本厚度的不同而变化^[7,8]。我们将实验的结果与单管式AFM(本原纳米仪器公司,型号CSPM2000)的测量结果进行了对比,如图10所示。图中(a)(b)为新型AFM扫描的图像,扫描范围为 $15\mu\text{m} \times 15\mu\text{m}$; (c)(d)为单管式AFM扫描的图像,扫描范围为 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ ^[7]。在图10(a)中样本厚度为2mm,将样本厚度增加至10mm的扫描图如图10(b)所示。以标准栅格为基准,栅格间距 $3\mu\text{m}$,由(b)可以测量出扫描范围仍为 $15\mu\text{m}$,没有因样本厚度的变化而变化;(c)(d)为单管式AFM的扫描图,其样本厚度也分别为2mm和10mm,从图中栅格数可以看出(d)中栅格数比(c)中多了1格多,经测量(d)的实际扫描范围比(c)大了 $4.1\mu\text{m}$,这是由于运动耦合所引起的扫描范围误差所致。而新研制的AFM没有发生这种情况,证实了该AFM在扫描运动中没有运动耦合。因而我们研制的新型AFM有效消除了传统单管式AFM扫描运动中的运动耦合,进而从根本上消除了由其引起的交叉耦合误差及扫描范围误差,使得扫描运动具有更精确、完善的形式。

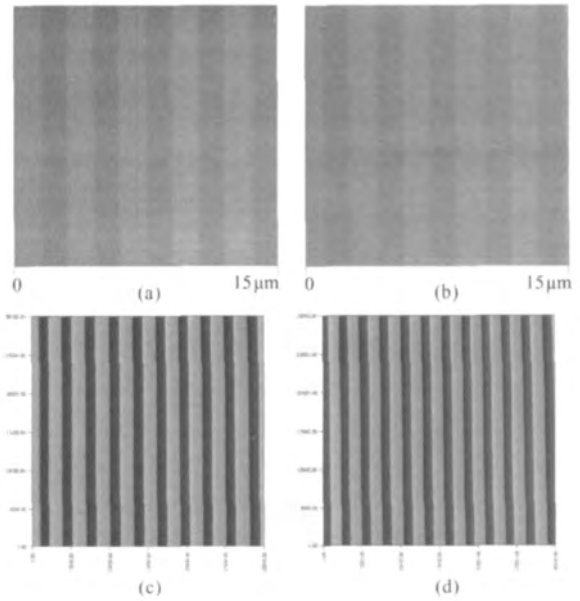


图10 新型AFM与单管式AFM的运动耦合性能对比

4 结论

本文实现了一种由纳米运动平台作为扫描器的新型AFM。该AFM的优点在于它以三轴驱动的纳米运动平台作为扫描器,避免了单管式压电陶瓷作为扫描器产生的运动耦合,进而消除了由运动耦合所产生的两种结构误差,极大提高了纳米测量及操作的精度。目前,基于纳米运动平台的AFM正在研发中,我们将在今后的工作中使其实现更多的扫描方式,并在现有平台基础上,完善纳米操作的功能模块。最终实现该AFM的多种扫描观测方式及高精度纳米操作的功能,为进一步探索纳米世界以及制备纳米器件提供优良的观测与操作平台。

参考文献

- [1] Binnig G, Quate C F, Gerber Ch. Atomic force microscope. *Physical Review Letters*, 1986, 56(9): 930-933
- [2] Falvo M R, Taylor II R M, Helsen A, et al. Nanometre scale rolling and sliding of carbon nanotubes. *Nature*, 1999, 397: 236-238
- [3] Li G Y, Xi N, Yu M M, et al. Development of augmented reality system for AFM based nanomanipulation. *IEEE/ASME Transaction on Mechatronics*, 2004, 9(2): 358-365
- [4] Binnig G, Smith D P E. Single-tube three-dimensional scanner for scanning tunneling microscopy. *Review of Scientific Instruments*, 1986, 57(8): 1688-1689
- [5] Schitter G, Stemmer A. Model-based signal conditioning for high-speed atomic force and friction force microscopy. *Microelectronic Engineering*, 2003, 67-68: 938-944

- [6] 焦念东, 刘连庆, 田孝军等. 具有力觉与视觉反馈的交互式纳米操作系统. 机器人, 2006, 28(3) : 279-284
- [7] Tian XJ, Xi N, Dong ZL, et al. System errors quantitative analysis of sample-scanning AFM. *Ultramicroscopy*, 2005, 105(1-4) : 336-342
- [8] 刘安伟, 胡小唐, 张国雄. 扫描探针显微镜单管式扫描器结构误差的研究. 仪器仪表学报, 1999, 20(1) : 45-48
- [9] Sitti M, Hashimoto H. Controlled pushing of nanoparticles: modeling and experiments. *IEEE/ASME Transactions on mechatronics*, 2000, 5(2) : 199-211
- [10] Ho H J. Studies of surface interactions at nanometer scale with atomic force microscopy combined with scanning electron microscopy: [Ph. D. Thesis]. Montana: Department of Physics, Montana State University, 1997

Development of atomic force microscope based on nano positioning stage

Jiao Niandong^{***}, Wang Yuechao^{*}, Xi Ning^{****}, Dong Zaili^{*}

(^{*} Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016)

(^{**} Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 110039)

(^{***} Department of Electrical and Computer Engineering, Michigan State University, Lanxin 48824)

Abstract

In this article, a new atomic force microscope (AFM) with a nano positioning stage as its scanner is described. The stage has three piezoelectric actuators and can move in three directions with high accuracy without kinematic coupling. Thus in the new AFM, two kinds of structure errors — vertical cross coupling error and scanning size error which affect the precision of nano-observation and nanomanipulation due to the kinematic coupling of single tube during its bending scan motion are removed effectively, and the precision of nano-observation and nanomanipulation is improved greatly.

Key words : AFM, kinematic coupling, nano positioning stage, AFM force curve