

文章编号 1004-924X(2011)11-2651-06

高速大扫描范围原子力显微镜系统的设计

殷伯华, 陈代谢, 林云生, 初明璋, 韩立*
(中国科学院 电工研究所微纳加工研究部, 北京 100190)

摘要: 针对目前高速扫描型原子力显微镜(AFM)主要是限于物检测且扫描速度和扫描范围均有待提高, 提出了一种高速原子力显微镜结构设计方案。在压电陶瓷致动器驱动的柔性铰链结构式位移台的基础上, 构建了 AFM 大范围扫描器, 使原子力显微镜在 x - y 扫描方向的运动范围达到了 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 。通过傅里叶频谱分析, 计算获得了 AFM 扫描器常用的三角波驱动信号和正弦波驱动信号的高次谐波特性及其对 AFM 高速扫描成像的影响程度。为了消除在扫描运动过程中的机械自激振荡, 提出了将正弦波信号作为高速扫描的驱动信号, 行扫速度达到 50 line/s。在正弦波驱动的基础上提出了一种基于位置采样的图像获取方法, 有效地减小了 AFM 扫描器的非线性误差造成的图像畸变现象。

关键词: 原子力显微镜; 高速扫描; 正弦波驱动; 大范围扫描; 图像畸变

中图分类号: TH742; TN16 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2651

Design of AFM system with high speed and large scanning range

YIN Bo-hua*, CHEN Dai-xie, LIN Yun-sheng, CHU Ming-zhang, HAN Li*

(*Department of Micro-nano Fabrication Technology, Institute of Electrical Engineering
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

* *Corresponding author, E-mail: lihan@mail.iee.ac.cn*

Abstract: As current high-speed scanning Atomic Force Microscope (AFM) is mainly designed for the biological imaging application and its scanning speed and scanning range should be improved, a novel high speed AFM was designed. Based on the flexure guide structure driven by piezo actuators, the AFM scanner with a large range was proposed, by which the AFM scanning range is expanded to $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ in the x - y directions. By the Fourier expansion, the high harmonic characteristics of the common triangle and sinusoidal driving signals were analyzed, and their effects on the high speed scanning image were discussed. To avoid the mechanical self-oscillation of the stage during scanning, the sinusoidal driving signal was taken to drive the high speed scanning and the line-scan speed was up to 50 line/s. Finally, a new method to eliminate AFM nonlinearity error based on positioning sampling was designed. This method effectively reduces the image distortion resulted from nonlinear errors of the AFM scanner.

Key words: Atomic Force Microscope(AFM); high speed scanning; sinusoidal driving; large range scanning; image distortion

收稿日期: 2011-01-22; 修订日期: 2011-02-20.

基金项目: 中国科学院仪器改造项目(No. YZ200831)

1 引言

原子力显微镜(AFM)^[1-2]因具有空间分辨率高的特点而在微观测量,成像和纳米加工^[3]等研究领域发挥着巨大的支撑作用。近年来,研究者开始致力于高速甚至视频级的扫描探针显微镜的研究工作。这些研究主要集中在生物学应用领域,如针对蛋白质大分子和 DNA^[4-5]解链的观察研究。这种高速 AFM 系统的局限性是扫描范围比较小,一般在几百纳米到数个微米的尺寸内,这是由过分强调获取图像,而采用高谐振频率,小尺度的扫描器导致的;当然也与生物学研究对图像的精确度和畸变的要求比样品形貌像质量要低有关。

半导体芯片制作领域的权威机构 ITRS 预测在未来原子力显微镜将逐渐成为半导体生产线上的在线测量工具。尽管现在关键尺寸扫描电子显微镜(CD-SEM)在半导体生产线上的检测领域占据着主导地位,但随着芯片检测从传统的二维检测逐渐过渡到真三维结构尺寸的测量以及高介电常数半导体材料的应用,CD-SEM 的技术性缺点暴露得越来越明显。而未来的 AFM 系统不仅能够实现高分辨,无损伤的三维表面形貌图^[6-7],而且还可以获得诸如表面导电性,载流子浓度,表面电荷分布,表面磁场分布^[8]等数据信息供研究分析,这些工作通过改变探针类型即可实现。实现半导体材料样品结构的测量需要百微米级大范围尺寸系统能够提供纳米级别的测量分辨率和测量精度,在实际使用中,由于在线检测和观察动态过程的需要,AFM 的扫描过程需要在数秒钟内完成。这就是半导体行业中所强调的高通量检测能力。

基于上述分析,本科研小组探索研制了新型的具有计量能力的高速原子力显微镜,该 AFM 可应用于样品的精确尺寸测量和无畸变成像过程。本文主要探讨 AFM 实现高速大范围扫描的结构设计思路,扫描器驱动信号分析和图像采样方法^[9]等。

2 大扫描范围的 AFM 扫描器机械结构设计

在半导体检测工艺中,被检测区域的尺寸一般从数百纳米到一百微米不等。由于压电陶瓷管的非线性引起的迟滞效应使得一般的 AFM 系统很难在 100 μm 范围提供无畸变的扫描图像。针对上述问题,设计了一种基于压电陶瓷致动器驱动的柔性铰链位移台的 AFM 扫描系统,具体结构如图 1 所示。柔性铰链位移结构依靠局部变形和连杆传动原理产生移动,它具有高刚性,无摩擦,无爬行等特点。同时柔性铰链位移台还具有比较好的动态响应能力,因此它适合作为高速 AFM 系统的样品台使用。本系统选用德国 PI 公司的高性能柔性铰链装置(P517)。柔性铰链位移台的内框相对外框可以实现 X 和 Y 方向的移动。AFM 扫描头被安装在内框的中心位置(在图 1 中未画出)。当高压扫描驱动信号传递给位移台的 X 和 Y 方向的压电陶瓷致动器时,内框带动扫描头进行光栅式扫描运动,扫描范围可以达到 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ 。

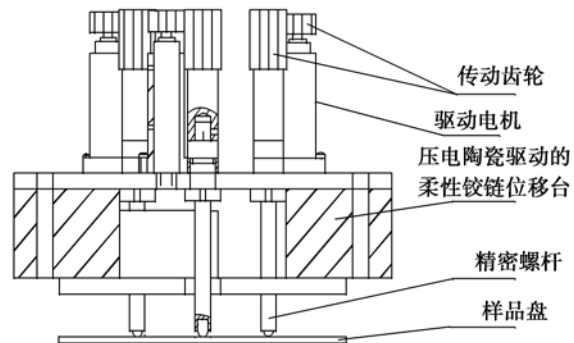


图 1 高速 AFM 扫描器的设计结构图

Fig. 1 Schematic of high speed AFM scanner

为了使 AFM 的探针在扫描开始前能安全可靠地接近样品表面,在设计中采用了 3 个精密滑动螺杆(型号为 FPSA-62555, SIGMA),成三角形布局,分别安装在位移台外框上表面的平板支架上。每个螺杆与 1 个相对应的直流电机通过 1 对小模数精密齿轮的连接,直流电机驱动螺杆实现上下运动。与 Georg Schitter^[10]等人采用 1 根同步皮带驱动 3 个螺杆完成探针的并行进针方式不同,该系统中每个直流电机都可以独立控制。

这种设计既可以实现 3 个螺杆的同步进针模式,也可以实现某 1 个或 2 个螺杆的单独进针。这样的独立控制方式使得倾斜样品自动调平成为可能。通过试验证明,为了在 50 μm 以上的扫描过程中保证保持针尖和样品有效安全地接触,样品调平环节变的很重要。在本设计中,每个电机的输出轴上连着 1 个减速比为 4 096 : 1 的减速齿轮箱。这在进针过程中,保证了针尖移动速度可以平稳地降到 10 μm/s 以下,有效地避免了针尖和样品表面的撞击损坏。

3 扫描驱动信号的选择和图像畸变校正

3.1 扫描驱动信号类型的选择与分析

因为三角波信号实现比较简易,通常的慢速 AFM 扫描系统都是利用三角波信号驱动压电陶瓷管实现 X 方向扫描运动。但是将三角波驱动信号应用于高速扫描 AFM 系统有很大的局限性。图 2 为 AFM 系统中驱动 X 方向扫描的三角波驱动信号。当 AFM 系统进行高速扫描时,扫描器和位移台本身容易发生自激震荡,这会造成扫描图像的畸变。通过傅立叶变换分析可以获得引起自激震荡的原因。

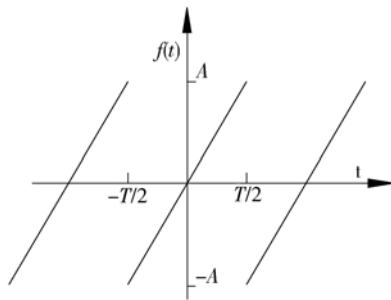


图 2 三角波驱动信号图

Fig. 2 Graph of triangle wave driving signal

常用的三角波驱动信号 $f(t)$ 可以表述为如公式 1 所示的周期函数形式:其中 T 为周期,即扫描一行图像所需要的时间, A 为信号的电压幅值,决定扫描范围大小。

$$f(t) = \frac{2A}{T}t, \quad -\frac{T}{2} \leq t \leq \frac{T}{2} \quad (1)$$

$$f(t+nT) = f(t)$$

经过傅里叶级数的推导计算,可以得出三角波的傅里叶展开级数的系数 a_n 和 b_n 的解析解如

公式 2 所示。

$$\begin{cases} a_n = 0 \\ b_n = \frac{2A}{n\pi}(-1)^{n+1} \end{cases} \quad (2)$$

把系数 a_n 和 b_n 带入三角形傅里叶展开的公式(3)中,得到三角波驱动信号中存在的高次谐波分量的幅值和相位。其中 ω_0 为基本频率,由扫描周期 T 决定。

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \sin n\omega_0 t) = \frac{2A}{\pi} \cdot \left\{ \sin(\omega_0 t) - \frac{1}{2} \sin(2\omega_0 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 t) + \dots \right\} \quad (3)$$

进一步分析三角波频域特征,如公式(4)所示,可以获得幅频特性的模表达式 $|X(n\omega_0)|$ 。

$$X(n\omega_0) = \frac{-jb_n}{2} = \frac{A}{n\pi}(-1)^{n+1}e^{-j\pi/2}$$

即 $|X(n\omega_0)| = \left| \frac{A}{n\pi} \right| \quad (4)$

对公式(4)中的 n 依次取 1, 2, 3, ...。绘制离散频率 $n\omega_0$ 与对应振幅 $|X(n\omega_0)|$ 的特征图,可以

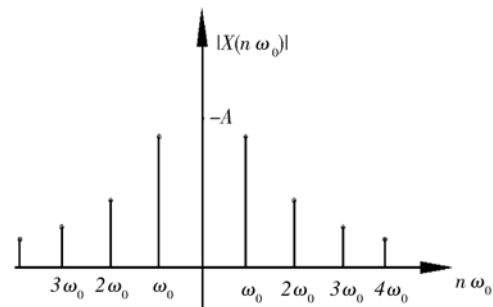


图 3 三角波的幅频特性

Fig. 3 Amplitude-frequency graph of triangle wave

得到三角波的幅频特性分布性质,如图 3 所示。从图中可以看到三角波驱动信号是由大量高次谐波信号组成的。在高速扫描过程中,这些高次谐波分量会造成扫描器的自激震荡,导致扫描图像的失真,甚至撞坏原子力针尖。根据三角函数的正交性特点,对正弦波信号做傅里叶分析可以确定正弦信号不含有高次谐波分量,因此正弦波信号非常适合作为高速 AFM 作为扫描驱动信号。从定性的角度看,由于正弦波信号的波峰和波谷都是圆弧过渡,可以有效地减小扫描器扫描方向改变时引起的冲击振荡。

为了验证三角波驱动信号和正弦波驱动信号

对高速扫描图像质量影响的差异,进行了大范围的高速扫描试验。扫描样品宽度周期间隔为 $3\ \mu\text{m}$ 的光栅。图 3(a)所示的光栅扫描图像是沿 X 方向,即快扫方向使用三角波驱动信号获得的图像,扫描范围是 $20\ \mu\text{m}$,行扫描频率为 28 Hz。由图 3(a)可见在该扫描图像的左侧出现了明显的图形畸变现象。图 3(b)所示的光栅扫描图像是在 X 方向使用正弦波信号扫描获得的光栅图像,扫描范围也是

$20\ \mu\text{m}$,行扫描频率为 30 Hz,由图 3(b)可见图像畸变情况得到显著改善。图 3(c)所示的光栅扫描图像同样是在 X 方向使用正弦波信号扫描获得的光栅图像,扫描范围增加到 $30\ \mu\text{m}$,行扫描频率提高到 50 Hz,可以看到在图像的右侧出现了线条变粗的图像畸变。这种畸变是由于扫描范围扩大后,每一行线扫描的结束端处于正弦波顶点附近的非线性区域而导致的。



(a) 三角波驱动方式的扫描图 (b) 正弦波驱动方式的扫描图 (c) 正弦波驱动方式的有畸变的扫描图
(a) Image by triangle signal (b) Image by sinusoidal signal (c) Distorting image by sinusoidal signal

图 3 三角波和正弦波驱动模式的扫描图像对比

Fig. 3 Scanning images by triangle and sinusoidal modes

3.2 大范围无畸变图像的获得

压电陶瓷致动器的迟滞效应和蠕变特点^[11]导致扫描器的驱动电压和位移的非线性,进而引起 AFM 扫描图像的非线性畸变。通常 AFM 系统采用在压电陶瓷管内外壁加偏压的方法使压电陶瓷管发生机械偏转变形,从而获得 X-Y 方向的扫描成像范围。因此很难在 X-Y 方向上添加位置闭环测量系统。很多研究人员都采用测量压电陶瓷迟滞曲线,然后利用拟和曲线法进行电压补偿来实现压电陶瓷非线性的校正。但是正如文献^[12]中所叙述的迟滞效应的大小和迟滞特性曲线的形状以及驱动电压的驱动过程、大小和频率等具体条件密切相关。因此普通 AFM 在进行各种参数条件的高速大范围扫描过程中,不可能逐一的做补偿曲线,导致很难避免较大的迟滞现象和图像失真。

即使如 2.1 节中采用正弦波驱动信号进行扫描,虽然能够消除扫描器的自激震荡,但是因为正弦波本身就具有非线性的,所以 AFM 扫描的图像还是会出现图 3(c)所示的畸变现象。所设计的扫描器的 X-Y 扫描运动不是靠压电陶瓷管偏

转实现的,而是由柔性铰链位移台的移动完成的。在位移台的 X 和 Y 方向安装了亚纳米级测量精度的电容位移传感器。它可以实现对扫描器位移的非接触测量。因为闭环控制会降低位移台高速扫描过程的动态响应能力,因此在扫描过程中位移台采用 XY 方向开环移动,但是对图像采样点的位置坐标值进行同步测量和获取。这实际上是一种基于位置的 AFM 扫描成像的控制策略。在扫描过程中可以设定每一行的起始位置和终止位置。在获取到一幅完整的样品表面相貌图像后,进行基于位置坐标的图像重整。通过这种方法可以获得无畸变的大范围扫描图像。图 4 中显示的两幅图的扫描范围是 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$,行扫描频率是 50 Hz。图 4(a)显示的是未经过位置重整的扫描图像,在其右侧出现了明显的光栅线条展宽的图形畸变,而图 4(b)显示的是经过位置校正的扫描图像,其图像中的光栅图形均匀,基本消除了非线性畸变误差。从图 4 也可以看出在大范围扫描过程中,基于位置的图像扫描方法比通常 AFM 的基于三角波的等时采样扫描成像方法有一定的优势。

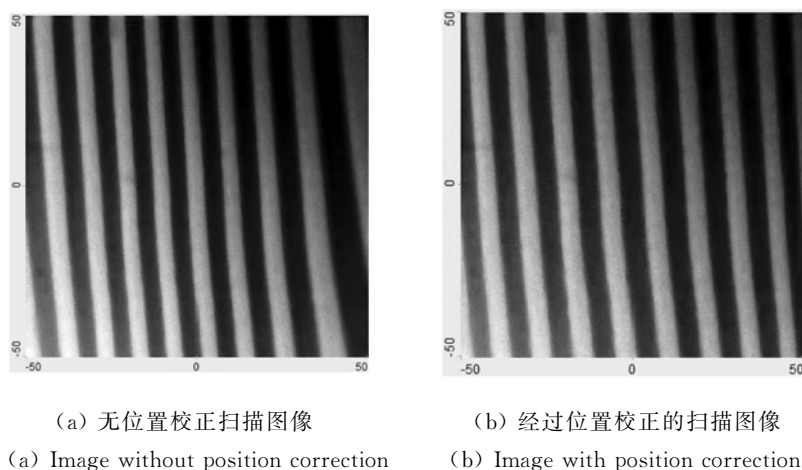


图 4 基于位置控制的高速大范围扫描成像

Fig. 4 High speed and large range grating scanning image based on positioning control

4 结 论

高速扫描 AFM 系统由于具有快速成像的特点,在分子生物学领域得到国内外研究者的关注。本文在前人的研究基础上,提出了大扫描范围和无畸变的高速扫描 AFM 系统的设计和实现方法。完成了基于压电陶瓷驱动的柔性铰链位移台结构扫描器的设计,扩大了高速扫描 AFM 的扫描成像范围,目前该系统可以实现 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 的大尺度扫描成像,线扫描频率达到 50 line/s。改进了三点式电机驱动进针设计,使得大范围扫描过程中样品的调平成为可能。利用谐波

分析方法,探讨了在高速大范围扫描场条件下的扫描驱动信号的选择问题。通过试验证明,在抑制扫描器自激震荡方面,正弦波驱动方式更适合 AFM 进行高速扫描成像。利用电容位移传感器的在线测量能力,提出了在 XY 开环移动过程中,基于扫描点位置坐标的采样扫描成像方法,有效地减小了由于压电陶瓷迟滞特性造成的图像畸变。

下一步的研究工作将主要集中在:(1)为了研究的大起伏表面细胞和其它高深宽比样品成像,探讨扫描器的 Z 向大范围高速响应问题。(2)高速扫描过程中的扫描器的 XYZ 3 个方向的振动耦合的抑止问题。

参考文献:

- [1] TOSHIO A, NORIYUKI K. A high-speed atomic force microscope for studying biological macromolecules[J]. *PNAS*, 2001, 98(22): 12468-12472.
- [2] BINNING G, ROHRER G. Atomic force microscope[J]. *Physical Review Letters*, 1986, 56: 930-933.
- [3] 闫永达,费维栋,胡振江,等. 基于单片机的 AFM 纳米机械性能测试系统[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1223-1229.
YAN Y D, FEI W D, HU ZH J, *et al.*. SCM-based nanomechanical property measurement system of AFM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1223-1229. (in Chinese)
- [4] KOBAYASHI M, SUMITOMO K, TORIMITSU K. Real-time imaging of DNA-streptavidin complex formation in solution using a high-speed atomic force microscope[J]. *Ultramicroscopy*, 2007, 107: 184-190.
- [5] CRAMPTON N, YOKOKAWA M, DRYDEN D T F, *et al.*. Fast-scan atomic force microscopy reveals that the type III restriction enzyme EcoP15I is capable of DNA translocation and looping[J]. *PNAS*, 2007, 104(31): 12755-12760.
- [6] UKRAINTSEV V A, BAUM C, ZHANG G, *et al.*. The role of AFM in semiconductor technology development[J]. *SPIE* 2005, 5752: 127-139.
- [7] LEE M. Applications of AFM in semiconductor R&D and manufacturing at 45 nm technology node

- and beyond[J]. *SPIE*, 2009, 7272: 736-741.
- [8] KURIHARA M. Gate CD control considering variation of gate and STI structure[J]. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 2007, 20(3): 232-238.
- [9] 袁帅, 董再励, 缪磊, 等. AFM 扫描图像重构算法的改进[J]. *纳米技术与精密工程*, 2009, 7(3): 259-264.
YUAN SH, DONG Z L, MIAO L, *et al.*. Improvement of reconstruction algorithm of AFM scanning images[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2009, 7(3): 259-264. (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: 282-288.
- [11] 张栋, 张承进, 魏强. 压电微动工作台的动态迟滞模型[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 549-556.
ZHANG D, ZHANG CH J, WEI Q. Dynamic hysteresis model of piezopositioning stage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 549-556. (in Chinese)
- [12] 党选举. 压电陶瓷执行器的神经网络实时自适应逆控制[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(7): 1266-1272.
DANG X J. Real-time adaptive inverse control based on neural networks for piezoceramic actuator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1266-1272. (in Chinese)

作者简介:



殷伯华(1973—),男,天津人,博士研究生,助理研究员,1996年于南京航空航天大学获得学士学位,2003于北京工业大学获得硕士学位,主要从事纳米加工技术、纳米图形发生器、原子力显微镜 AFM 等方面的研究。E-mail: yinbh@mail. iee. ac. cn



初明璋(1973—),女,黑龙江齐齐哈尔人,高级实验师,1997年于北京工业大学获得学士学位,主要从事电子显微镜及其附件的研究与开发。E-mail: mzhchu@mail. iee. ac. cn



陈代谢(1983—),男,湖南沅江人,博士研究生,助理研究员,2005年于长沙理工大学获得学士学位,主要从事原子力显微镜(AFM)和智能控制等方面的研究。E-mail: chendaixie@mail. iee. ac. cn



韩立(1970—),男,甘肃临洮人,研究员,博士生导师,2002年于清华大学获得博士学位,后进入博士后流动站工作,主要从事纳米检测与仪器制造等方面的研究。E-mail: lihan@mail. iee. ac. cn



林云生(1962—),男,北京人,高级工程师,1984年于北京工业学院获得学士学位,主要从事纳米检测技术与仪器制造等方面的研究。E-mail: lysh@mail. iee. ac. cn

导师简介: