

文章编号 1004-924X(2014)09-2399-07

双探针原子力显微镜视觉对准系统

张华坤¹, 高思田^{1,2*}, 卢明臻², 李 伟², 王龙龙³

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 中国计量科学研究院 纳米与新材料计量研究所, 北京 100013;

3. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:传统的原子力显微镜(AFM)受针尖形状和放置方式的影响很难测量线条的宽度和两个侧壁的形状,故本文提出采用双探针对顶测量方案来消除 AFM 针尖形状对测量结果的影响。介绍了一种基于机器视觉的双探针原子力显微镜对准系统,该系统将两个探针接触到一起,实现了双探针在三维方向上的对准。系统采用具有亚微米级分辨率的镜头,配合高分辨率的 CCD 来获得探针的清晰图像,用于在水平和垂直两个方向实时监控双探针的运动情况。采用基于石英音叉式的自传感自调节的原子力探针,无需外加光学探测系统,缩小了系统体积,避免了杂散光对视觉对准系统的干扰。最后对针尖进行了亚像素边缘提取,精确地获取了探针之间的相对位置,实现了亚微米级的双探针对准(1 μm 以内)。该结论由探针之间距离与幅度/相位曲线得到了验证。

关键词:原子力显微镜(AFM);双探针;尺寸测量;对准;视觉引导

中图分类号:TH742.9;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142209.2399

Vision alignment system for AFM with dual probes

ZHANG Hua-kun¹, GAO Si-tian^{1,2*}, LU Ming-zhen², LI Wei², WANG Long-long³

(1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Division of Nanoscale Measurement and Advanced Materials,
National Institute of Metrology, Beijing 102200, China;

3. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin 300192, China)

* Corresponding author, E-mail: gaost@nim.ac.cn

Abstract: When a traditional Atomic Force Microscope (AFM) is used to measure the critical dimension (CD) of a line, the line width and the shape of two side-walls are difficult to be measured due to the probe shape and positioning. Therefore, this paper proposes a AFM with dual probes to eliminate the effect of probe shapes on measuring results. A alignment system based on machine vision for the AFM with dual probes was introduced, the system contacted the two probes each other to implement the alignment of the two probes in 3D directions. A lens with sub-micron resolution was used in the system to match a high resolution CCD to obtain the clear images and to acquire the movement states of two probes in both horizontal and vertical directions. Furthermore, the novel self-

收稿日期:2013-12-20;修订日期:2014-02-04.

基金项目:国家科学支撑计划资助项目(No. 2011BAK15B02)

sensing and self-actuating probe based on a quartz tuning fork combined was used for dynamic mode AFM to simplify the system, by which it not needed the external optical detection system, and its dimension was shortened and the affect come from stray light was eliminated. Finally, by extracting sub pixel edge of the tips, the related position between two probes was obtained accurately and the alignment of two probes in sub micron (within $1 \mu\text{m}$) was implemented. The results were verified by the distance between two probes and amplitude/phase curves.

Key words: Atomic Force Microscope (AFM); dual-probe; dimension measurement; alignment; vision guidance

1 引言

原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 是扫描探针显微镜中的一种^[1], 它采用压电陶瓷驱动器作为位移驱动元件, 以近场力作为检测对象。AFM 由于可以测量导体和绝缘体表面, 突破了扫描隧道显微镜只能测量导体的限制而得到了广泛的应用。另外, 近场力的范围很广, 如离子排斥力、范德华力、静电力、磁力、摩擦力等, 通过测量不同的近场力可以构成不同的扫描力显微镜^[2]。一般来说, 在测量几何结构时, 通常选择的近场力为离子排斥力, 因此即使是敲击模式的原子力显微镜也应视为准接触测量。AFM 针尖的半径通常为 10 nm 左右, 满足微纳几何结构测量的需求, 但是针尖通常是圆锥体或三棱锥体, 即使是高长宽比的针尖, 其锥角也大于 10° ^[3]。同时, 由于原子力显微镜测量时, 针尖倾斜放置, 因此很难测量线条完整的两个侧壁的形状。

为此, 人们提出了众多的解决方案, 包括: 通过针尖形状重建的方法对测量曲线进行修正^[4]; 通过旋转被测物, 进行 2 次测量, 对 2 次测量图像进行组合处理获得真实图像; 通过使用极高长宽比的针尖甚至用碳纳米管来减少针尖对测量的影响^[5]; 使用特殊形状的探针等^[6]。这些方法依赖于对针尖的准确测量, 会导致不同程度的测量误差。例如针尖重建只能针对特定的测量对象; 旋转组合对测量条件要求严格, 旋转机构要求精度高; 碳纳米管容易弯曲且无法预知; 特殊形状的针尖的半径必须预先精确测出, 且要保证在测量中没有磨损等。针对这些情况, 本文提出了双探针顶测量方案, 用以消除针尖形状对测量结果的影响。该方法的关键在于 2 个探针在三维方向上的对准。目前关于双探针的报道仅有美国的 Xidex Caliper CD AFM^[7], 但其并未给出具体的对针方案

和最终结果, 因此双探针针尖对准尚无先例可循。鉴于此本文提出一种基于视觉引导的双探针对准方法, 该方法可实现亚微米级的对准精度。

2 对顶测量的原理

用传统的原子力显微镜测量线条的关键尺寸, 测量结果与针尖的形状有关。文献[6]提出一种特殊形状的探针(靴型探针)用于测量线宽形状(如图 1)。

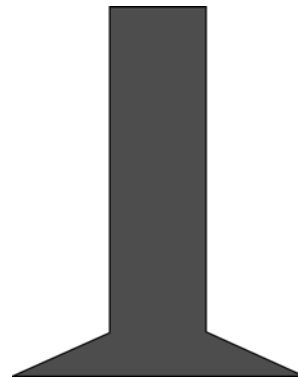


图 1 特殊形状探针(靴型)

Fig. 1 Special shape tip (boot-shaped tip)

以该探针为例, 针尖可被分为两个部分 p_{w_L} 和 p_{w_R} , 线条的宽度为 W_F 。探针随位移台移动, 相对原点的位置分别为 X_L 和 X_R , 探针测量线条侧壁时与侧壁的间距分别为 s_{f_L} 和 s_{f_R} , 如图 2 所示。则线宽的测量结果为:

$$W_F = X_R - X_L - (p_{w_L} + s_{f_L}) - (p_{w_R} + s_{f_R}) = X_R - X_L - (s_{f_R} + s_{f_L}) - (p_{w_R} + p_{w_L}), \quad (1)$$

其中: $(X_R - X_L)$ 是位移台的位移量, 可直接由激光干涉仪的读数得到, $(s_{f_L} + s_{f_R})$ 是测量过程中探针针尖与样品之间的距离之和, p_{w_L} 和 p_{w_R} 与探针的形状有关。然而, 一般原子力显微镜的探针针尖半径在 10 nm 左右, 现有的技术很难精确测量。

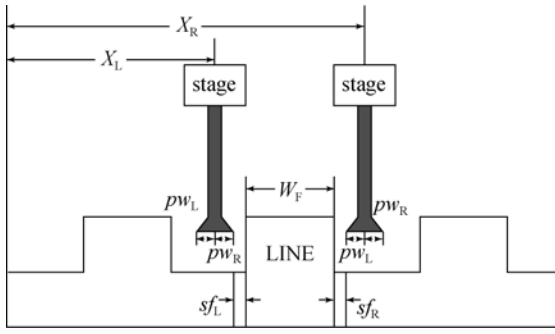


图 2 单个靴型探针测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of single boot-shaped tip measurement

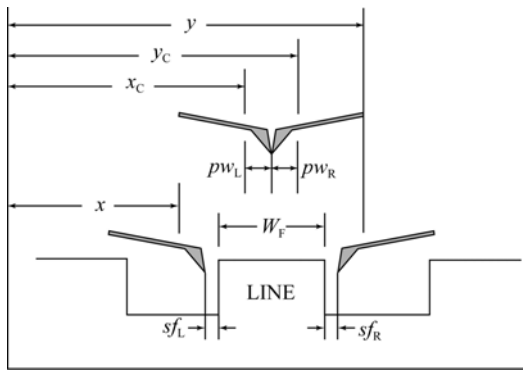


图 3 双探针对顶测量原理

Fig. 3 Schematic diagram of dual probe measurement

双探针对顶测量可以消除探针形状对测量结果的影响。测量之前先将两个探针在三维方向上对准,如图 3 所示, x_C 和 y_C 分别代表探针接触时相对参考点的位置,然后将两个探针分开,分别测量线条的两侧, x 和 y 表示测量时探针与参考点的距离。线宽的测量结果为:

$$W_F = y - x - (pw_L + pw_R) - sf_M, \quad (2)$$

其中: $sf_M = (sf_L + sf_R)$ 为测量线宽时探针与侧壁的间距,当 2 个探针对准时,两者尺寸之和 $(pw_L + pw_R)$ 等于 $(y_C - x_C - sf_A)$, 因此有:

$$W_F = y - x - (y_C - x_C - sf_A) - sf_M = y - y_C + (x_C - x) - (sf_M - sf_A), \quad (3)$$

其中 $sf_A = (sf_L + sf_R)$ 为双探针对准时两针的间距, $(y - y_C)$ 和 $(x_C - x)$ 分别为两个探针在测量中的位移,当采用接触模式测量时, $sf_M = sf_A = 0$, 式(3)可进一步简化为:

$$W_F = y - y_C + (x_C - x). \quad (4)$$

当采用非接触式测量时, $(sf_M - sf_A) \leq sf_M$ 。因此,双探针对顶测量消除了探针形状的影响,而且消除了部分测量误差,提高了测量结果的准确性。

3 双探针对准装置

双探针测量的关键在于 2 个探针能在三维方向上对准。鉴于光学镜头和电荷耦合元件(CCD)能达到亚微米级分辨率,提出了一种基于视觉引导的对针方法,对探针的位置进行实时控制,在亚微米级范围内实现了针尖对准。

双探针对准装置由 3 个部分组成,图 4 所示:(1)右侧为位置固定的探针;(2)运动机构夹持左侧探针执行步对准;(3)在探针的水平和垂直方向分别由高倍率镜头和 CCD 进行实时监控。前两部分安装在一块 50 mm 厚的铝底座上。

为减少位移台运动时非线性误差对实验结果的影响,采用一侧探针固定,另一侧探针运动的模式进行对针,运动过程由粗定位调节系统和纳米位移系统进行控制。4 mm 行程三轴位移台 MAX313D (Thorlabs)实现粗定位调节,配有差分式旋钮,可在 300 μm 内提供 50 nm 的控制精度。纳米位移系统则由 X、Y 方向的二维纳米定位台和 Z 向的一维纳米定位台组合而成。

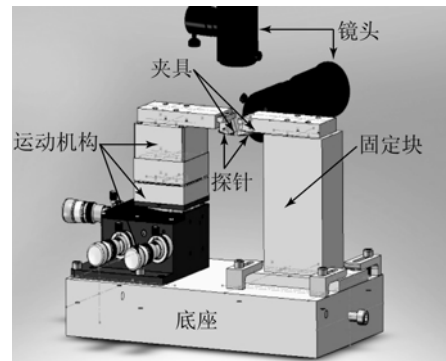
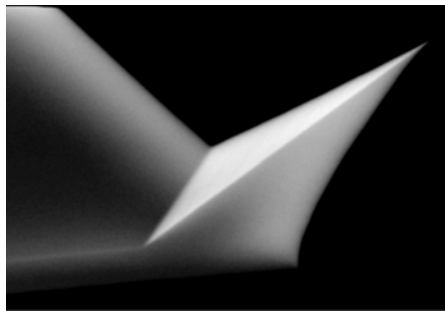


图 4 双探针对针装置示意图

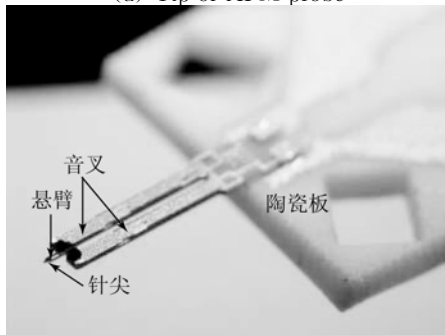
Fig. 4 Schematic diagram of dual probe alignment device

为感知探针在样品表面扫描测量时的变化,目前有多种检测探针悬臂偏转的方法,应用最广泛的是光偏转法。但该方法需要外加光学探测系统,对于双探针测量,系统将相当复杂,而且光路在测量过程中易受杂散光的干扰。本文选取基于石英音叉式自传感自调节的原子力探针 (Akiyama-Probe),如图 5 所示,通过电学方法感知探针上作用力的变化。探针的音叉由石英晶体制成,在交变电压的作用下,音叉做平面内的张合运动。



(a) 探针针尖

(a) Tip of AFM probe

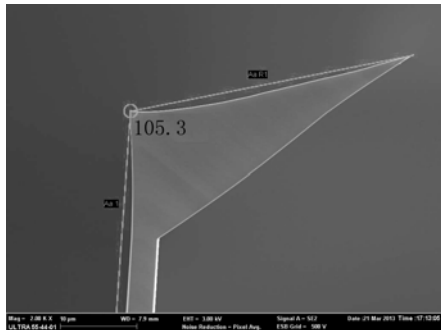


(b) Akiyama 探针

(b) Akiyama-probe

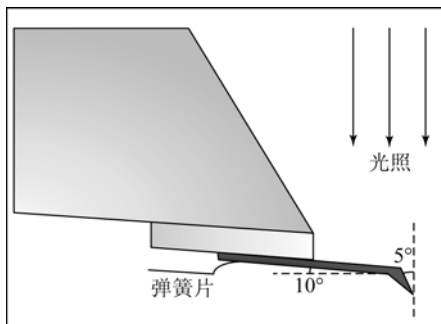
图 5 音叉式探针 (Akiyama-probe)

Fig. 5 Tuning fork probe (Akiyama-probe)



(a) SEM 探针图像

(a) SEM image of probe



(b) 装针夹具示意图

(b) Schematic diagram of probe holder

图 6 探针针尖和装针夹具

Fig. 6 Tip of probe and probe holder

所设计的探针夹具其探针由弹簧片压紧。由于弹簧片有一定厚度,为使探针在扫描过程中弹簧片不致触碰到样品,探针装卡位置与水平方向需要一个倾角。A-Probe 探针在扫描电镜 (SEM) 下成像,其尺寸如图 6(a) 所示,探针最前端的边缘与悬臂之间的夹角约为 105° ,当探针水平放置时,其最前端的边缘与垂直方向的夹角为 15° 。而该夹角随夹具倾角的增大而减小,若角度过小则不利于在垂直方向观测针尖。为此,将夹具倾角设计为 10° ,探针边缘与垂直方向夹角为 5° ,可同时满足以上两个条件。另外,夹具前侧做成向内倾斜以保证不会遮挡垂直方向 CCD 的照明光路,如图 6(b) 所示。

4 亚像素边缘检测算法

视觉引导系统由双高分辨率光学镜头和 CCD 组成,在垂直和水平方向分别观察针尖的位置。再通过亚像素级的边缘检测算法,测出两个针尖之间的距离,从而可实时监控对针过程。一般的边缘检测算法基于微分技术,如 Laplacian 算子、Sobel 算子和 Canny 算子等,其边缘检测和定位仅能达到 1 个像素的精度,且微分算子对于噪声非常敏感,常会产生一些伪边缘等。而矩是基于积分的运算,被认为是对噪声不敏感的稳定特征^[15]。采用 Zernike 矩的边缘检测算法,使定位精度可以达到亚像素级。

图像密度函数 $f(\rho, \theta)$ 的二维 Zernike 矩定义为:

$$A_{mn} = \frac{n+1}{\pi} \iint_{x^2+y^2 \leq 1} f(x, y) V_{mn}^*(\rho, \theta) dx dy, \quad (5)$$

离散 Zernike 矩定义为:

$$A_{mn} = \sum_x \sum_y f(x, y) V_{mn}^*(\rho, \theta) x^2 + y^2 \leq 1, \quad (6)$$

其中: n 为正整数或零, m 为整数,且满足 $n - |m|$ 为偶数和 $|m| \leq n$ 的条件限制, V_{mn} 在极坐标中可表示为:

$$V_{mn}(\rho, \theta) = R_{mn}(\rho) e^{jm\theta}, \quad (7)$$

$R_{mn}(\rho)$ 表示点 (x, y) 的径向多项式:

$$R_{mn}(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)! \rho^{n-2s}}{s! \left[\frac{n+|m|}{2} - s \right]! \left[\frac{n-|m|}{2} - s \right]!}, \quad (8)$$

Zernike 矩的一个重要特征是其旋转不变性。因此,如果一幅数字图像旋转角度为 θ , 旋转后图像的 Zernike 矩和原图像的 Zernike 矩关系为:

$$A'_{wv} = A_{wv} e^{-jv\theta}, \quad (9)$$

$$\theta = \arctan \left[\frac{\text{Im}[A_{11}]}{\text{Re}[A_{11}]} \right]. \quad (10)$$

利用旋转后的图像可以计算边缘检测需要的参数,从而实现对边缘的精确定位。主要参数为:

$$l = \frac{A_{20}}{A'_{11}} = \frac{A_{20}}{A_{11}} e^{-j\theta}, \quad (11)$$

$$k = \frac{3A'_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} = \frac{3A_{11}}{2(1-d^2)^{3/2}} e^{j\theta}, \quad (12)$$

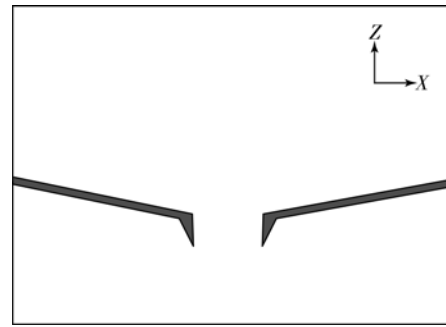
$$h = \frac{A_{00} - \frac{h\pi}{2} + \text{harc} \sin d + hd \sqrt{1-d^2}}{\pi}, \quad (13)$$

其中: l 为边缘与单位圆中心之间的距离, k 为边缘两侧的灰度差值, h 为背景灰度值。考虑到卷积模板的尺寸^[6], 亚像素边缘检测公式为:

$$\begin{pmatrix} x_s \\ y_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \frac{N}{2} l \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix}, \quad (14)$$

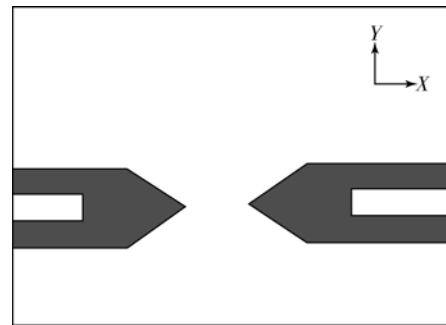
其中: x_s 和 y_s 为边缘的亚像素坐标, x 和 y 为像素级坐标, N 为卷积模板的大小(一般为 $N \times N$)。设置阶跃强度阈值 $k \geq k_t$ 和距离阈值 $l \leq l_t$, 两者同时满足即为边缘点。由于 l 的取值为 $[-1, 1]$ 之间, 所以边缘定位的精度为亚像素级。对于距离阈值的设置可参考文献[10], 取 $l_t = (1/\sqrt{2}) \times (2/N)$ 。至于阶跃强度阈值则与光照强度有关, 将处理结果(边缘检测后得到的探针尺寸)与扫描电镜的测量结果相比较, 得到该阈值的经验公式: $k_t > \max(f)/10$, f 为源图像的灰度值。最后根据图像形态学中连通域理论, 将 2 个探针分别标记为 2 个连通域, 其最外一点即为图像上针尖的位置, 图 7 显示了水平方向和垂直方向的双探针图像, 上图中水平方向定义为 X 轴, 垂直方向定义为 Z 轴, 下图中水平方向为 X 轴, 垂直方向定义为 Y 轴。图 8 所示为利用该算法测得的探针针尖的亚像素级坐标 ($k_t = 25$), 其中图 8(a) 中的坐标自上而下分别为 Z 向和 X 向, 图 8(b) 中的坐标分别为 Y 向和 X 向。

该算法的不足之处在于在边缘检测过程中需要对每个像素进行卷积运算, 运算量较大。为提高算法的实时性, 只截取探针附近区域进行运算, 而忽略悬臂, 使运算量大大减少。



(a) 水平方向探针图像

(a) Dual probe image in horizontal direction

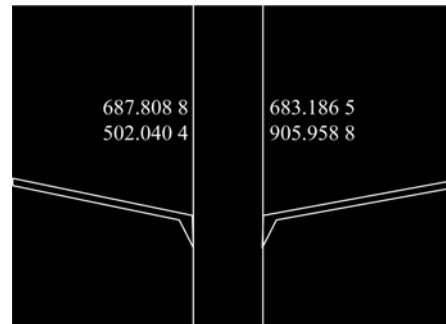


(b) 垂直方向探针图像

(b) Dual probe image in vertical direction

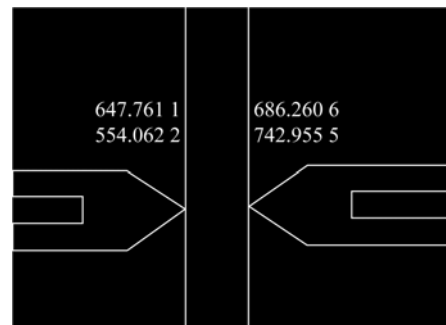
图 7 水平和垂直方向的探针图像

Fig. 7 Dual probes image, horizontal and vertical



(a) 水平方向边缘检测结果

(a) Result of edge detection in horizontal direction



(b) 垂直方向边缘检测结果

(b) Result of edge detection in vertical direction

图 8 亚像素边缘检测结果

Fig. 8 Results of sub-pixel edge detection

5 实验及结果

对针开始前先将水平方向和垂直方向的镜头对焦到固定一侧的探针针尖上,接着调节手动位移台使另一侧探针也出现在 CCD 图像中。开始对针时,首先在 Y 和 Z 方向上将两个探针的距离调节到 1 个像素左右,然后在 X 方向上调节到 50 个像素左右。第二步驱动纳米定位台,在 X 方向上让一侧探针接近另一侧探针,在此过程中判断 Y 和 Z 方向上两针的距离,使其保持在 1 个像素左右。为保证两个针尖不致触碰损坏,直到 X 方向上两针距离只有 2 个像素左右,对针停止。

标定后的 CCD 水平方向上分辨率为 $0.338 \mu\text{m}/\text{pixel}$,当两个探针在 X 方向上距离达到 2 个像素左右时,两者之间相距约为 $0.67 \mu\text{m}$ 。在 X 方向上继续移动 $0.4 \mu\text{m}$,经过计算判断图像上两个探针已接触,两个连通域合二为一,像素数量发生跳变,该跳变值的大小与选取的计算区域有关。图 10(a)给出位移与像素个数之间的关系。不过,由于光学衍射极限的限制,探针在 CCD 中无法完全成像,从提取出的亚像素边缘也可以看出,针尖部分并不尖锐。这说明真正的探针顶端并未成像。根据探针的倾角可知,左侧针尖应往图像的右下角延伸,如图 9 所示,实线区域为图像中可清晰成像的探针,前述算法计算的针尖为图中红色点所在位置。将探针两条边线进行延长,得到新的针尖位置(图中蓝色点)(彩图见期刊电子版)。测量该点到悬臂的垂直距离,悬臂与探针的夹角 α 和 β ,与 SEM 测量的探针尺寸均吻合。通过计算得出,新的针尖位置在 X 方向增加 1.44 个像素,在 Y 方向增加 16.48 个像素。重复该实验,当两针距离小于 3 个像素时,对针停止。图 10(b)给出针尖形状拟合后探针位移与像素个数的关系。

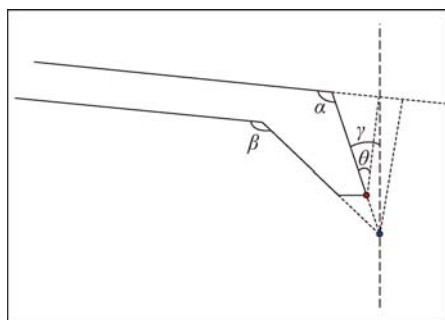
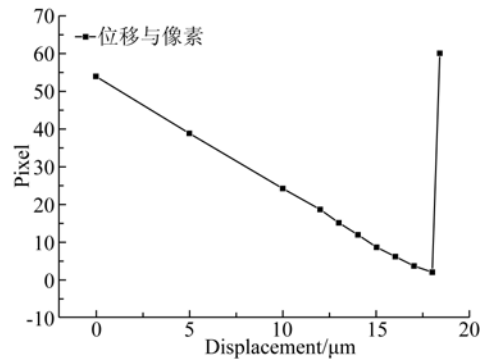


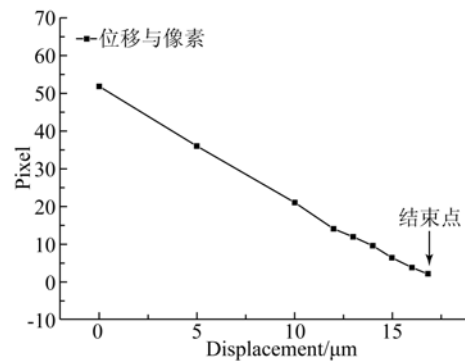
图 9 探针形状重建

Fig. 9 Probe shape reconstruction



(a)重建前

(a) Before reconstruction



(b)重建后

(b) After reconstruction

图 10 探针位移和像素个数关系曲线

Fig. 10 Curves of the relationship between pixel numbers and probe displacement

在视觉对针停止后,用正弦信号激励固定一侧探针,位移台则继续移动,以 10 nm 为步进,同时通过锁相环读取 A-Probe 的输出信号的幅度和相位,绘制幅度-距离和相位-距离曲线,如图 11 所示。

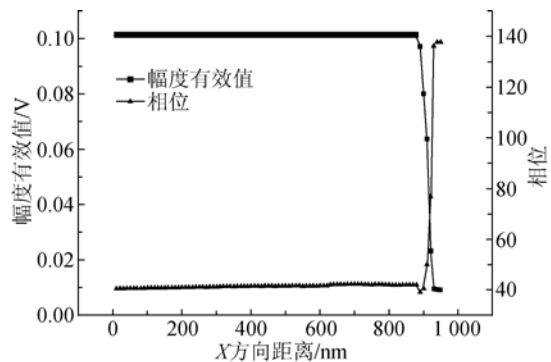


图 11 幅度/相位-距离曲线

Fig. 11 Curver of Amplitude/Phase-displacement

位移台移动 890 nm 后(图中横坐标为 17.66 μm),幅度和相位曲线出现较大变化,其中幅度减小,相位增大,说明已探测到两探针之间近场力的作用。位移台再移动 40 nm 后,幅度值明显减小,而相位值明显增大。继续移动位移台,幅度和相位值不再变化。传统的动态 AFM^[12]测量样品时,近场力随着探针与样品之间距离的变化而变化,用一个探针接触另一个探针虽然有别于传统的 AFM 测量方式,但近场力的变化仍然是相似的。实验证明:当 Akiyama 探针在一个振动周期均与样品接触时,幅度信号值降至最低点,此时相位则会发生反转,而且相位比幅度更加灵敏^[13]。因此图 11 中幅值达到最小值则表明两个探针已经接触。在非接触测量时 $sf_A < sf_{A_0}$,因此相对于单个探针,可以消除一部分测量误差。此时,距离视觉对准结束时,位移台行进了 930 nm ($< 1 \mu\text{m}$)。说明视觉对准已经将两个针尖对准到了 $1 \mu\text{m}$ 以内。

参考文献:

- [1] 陈代谢,殷博华,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 S, *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)
- [2] 高思田,叶孝佑,邵宏伟,等. 用于纳米级三维表面形貌及微小尺寸测量的原子力显微镜[J]. 制造技术与机床,2004,8:34-39.
GAO S T, YE X Y, SH H W, *et al.*. Atomic force microscope for nanometer 3D surface shape and micro size measuring [J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2004,8:34-39. (in Chinese)
- [3] FRANZ J, GIESSIBL. Advances in atomic force microscopy [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2003,7(75):949-978.
- [4] ADAM W, MAYER J R R. A robust method for probe tip radius correction in coordinate metrology [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23.
- [5] SANTIAGO D S. Characterization of deepnanoscale

6 结 论

本文介绍了一种基于机器视觉的双探针原子力显微镜对准系统,该系统采用一侧探针向另一侧探针移动的方式进行对针,从而有效地减少了位移机构的非线性误差对测量结果的影响。利用高分辨力镜头和 CCD 获得了探针的清晰图像,用于对针过程中的实时监控。亚像素边缘检测算法能使针尖精确定位,配合纳米定位台可以精确获取两个探针针尖的相对距离,最终达到亚微米级的双探针对准($1 \mu\text{m}$ 以内)。该结论由探针之间距离与幅度/相位曲线得到了验证,这对突破传统原子力显微镜的扫描盲区,实现真三维测量具有至关重要的作用。由于该系统受到光学衍射极限的限制,今后将主要对两个探针之间力与距离的关系做进一步的研究,以实现三维方向上纳米级的双探针对准。

surface trenches with AFM using thin carbon nanotube probes in amplitude-modulation and frequency-force-modulation modes[J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(1):015503-1-10.

- [6] NDUBUISI G O, THEODORE V V, JOSEPH F, *et al.*. Line edge roughness metrology using atomic force microscopes [J]. *Measurement Science and Technology*, 2005,16:2147-2154.
- [7] MANCEVSKI V, MCCLURE P F. Development of a dual-probe CaliperTM CD-AFM for near model independent nanometrology [C]. *Proc. SPIE*, 2003,4689, :83-91.
- [8] TERUNOBU A, NICOLAAS F, DE ROOIJ, *et al.*. Implementation and characterization of a quartz tuning fork based probe consisted of discrete resonators for dynamic mode atomic force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010,81,063706.
- [9] AKIYAMA T, STAUFER U, DE ROOIJ N F, *et al.*. Symmetrically arranged quartz tuning fork with soft cantilever for intermittent contact mode atomic force microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003,74(1):112-117.
- [10] 丁兴号,邓善熙,杨永跃,等. 基于空间矩和 Zernike 矩的亚像素边缘检测[J]. 应用科学学报,2004,22(2):191-194.

- DING X H, DENG SH X, YANG Y Y, *et al.*. Sub-pixel edge detection based on spatial moment and zernike moment [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2004, 22(2):191-194. (in Chinese)
- [11] 李金泉, 王建伟, 陈善本, 等. 一种改进的 Zernike 正交矩亚像素边缘检测算法[J]. *光学技术*, 2003, 29(4):500-503.
- LI J Q, WANG J W, CHEN SH B, *et al.*. Improved algorithm of subpixel edge detection using Zernike orthogonal moments [J]. *Optical Technique*, 2003, 29(4):500-503. (in Chinese)
- [12] ANCZYKOWSKI B, GOTSMANN B, FUCHS H, *et al.*. How to measure energy dissipation in dynamic mode atomic force microscopy [J]. *Applied Surface Science*, 1999, 140(3-4):376-382.
- [13] WANG L L, LU M ZH, GUO T, *et al.*. Simulation and signal analysis of Akiyama probe applied to atomic force microscope [C]. *Proc. SPIE 8916, Sixth International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, 2013.

作者简介:



张华坤(1986—),男,安徽合肥人,博士研究生,2008年在解放军电子工程学院获得学士学位,2011年在合肥工业大学获得硕士学位,主要从事精密测量和纳米计量方面的研究。E-mail: zhanghk@nim.ac.cn

导师简介:



高思田(1962—),男,天津武清人,博士,研究员,博士生导师,1984年于西安交通大学获得学士学位,2008年在天津大学获得博士学位,现为中国计量科学院研究院纳米新材料研究所所长,合肥工业大学、天津大学和北京理工大学客座教授,主要从事长度计量和纳米计量方面的研究。E-mail: gaost@nim.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)