

原子力显微镜

张亦奕 贺 节 商广义 姚骏恩

(中国科学院北京电子显微镜实验室, 北京 100080)

摘 要 研制成功了一台使用光学偏转法检测的原子力显微镜, 通过对云母、光栅、光盘等样品的观测证明仪器达到原子分辨率, 最大扫描范围可达 $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$ 。文中将对这台原子力显微镜的原理、结构及一些应用结果进行讨论。

关键词 原子力显微镜, 光学偏转法。

1 引 言

扫描隧道显微镜(简称 STM)^[1]发明之后最重要的进展便是 80 年代后期原子力显微镜(简称 AFM)的问世^[2], 它是观察表面形貌的一种新型扫描探针显微镜(简称 SPM)。它不但能象扫描隧道显微镜那样从原子尺度观察导体和半导体表面的原子形貌, 而且能获得诸如玻璃、陶瓷等一大类非导体表面的微观结构; 并可以在大气、水和油中无损伤地直接观察物体, 大大地拓展了扫描隧道显微镜在生物科学、导体、半导体材料和表面科学等域中具有广阔的应用前景和强大的生命力。

2 工作原理

原子力显微镜是依靠测量探针和样品表面的作用力来成像的。在两个和多个原子之间, 存在多种原子间作用力。按照其性质的不同可分为排斥力或吸引力; 长程力或短程力。平衡状态下典型的原子间距为 $0.2 \sim 0.3\ \text{nm}$, 小于这个间距时为排斥短程力, 大于这个间距时为吸引力。典型的原子间作用力有范德瓦尔斯力、排斥力、附着力、摩擦力和表面张力等。其中有些力由于样品表面的塑性及弹性变形很难测得。原子力显微镜根据不同工作模式可分别测得范德瓦尔斯力、摩擦力和排斥力。本仪器是工作在斥力模式下测得的是排斥力。当微悬臂探针接近样品时, 它首先受到吸引力, 当探针离样品越来越近, 样品和探针表面原子的电子轨道开始互相重叠, 并产生排斥, 排斥力增长很快, 迅速超过吸引力而处于支配地位。原子力显微镜是靠固定在富有弹性的微悬臂上的金字塔形尖端来感知这个力的。微悬臂在排斥力作用下会产生偏转, 当样品在其下面扫描时, 微悬臂的偏转大小反映了样品表面的形貌。有多种方法可测得微悬臂的偏转, 比如隧道电流^[2]、电容法^[3]、干涉法^[4]等, 虽然这些方法都可

获得原子分辨率，但大多工作不稳定。本仪器采用性能先进的光学偏转法^[5]，其原理如图 1 所示，半导体激光经透镜聚焦后照到悬臂尖端上反射后，经反射镜后被二象限光强探测器接收，压电陶瓷管固定在底座上，样品放在压电陶瓷管上面，显微镜内部的反馈装置根据控制器得到的光强变化来控制压电陶瓷管的 z 向电压，进而控制 z 向长度的伸缩，同时扫描发生器控制压电陶瓷管 xy 方向偏转，根据 xy 扫描电压和 z 方向电压变化或微悬臂偏转的大小可以在显示器上成像。

原子力显微镜根据模式的不同可以分为恒力和恒高两种工作模式。样品在微悬臂下扫描时，通过反馈电路控制使样品的尖端之间原子间作用力保持不变，记录样品在 z 向的运动成像的模式恒力模式；样品在 x, y 方向扫描时保持压电陶瓷管 z 向长度不变，通过记录微悬臂尖端和样品之间作用大小的变化称之为恒高模式。这两种模式都可以实现原子分辨率，恒力模式既可以观测原子级的分辨的表面细微结构，也可以测量起伏较大的表面；恒高模式比较适于表面相对平滑的样品成像，而且可以实现快速扫描。

3 仪器描述

本仪器是在中科院北京电子显微镜实验室已有的技术和设备^[6,7]基础上研制的。整台仪器由光电探测、电路控制和计算机采集等单元组成。

光电检测单元是整台仪器的核心部分(见图 2)。它主要由激光器、光学透镜、微悬臂、二象限光电探测器等组成。波长为 670 nm 功率为 3 mW 的半导体激光束经准直后聚焦在微悬臂背面上，通过 x, y 方向位置调节旋钮控制光聚焦点在 x, y 方向的运动，使其准确地聚在微悬臂的金字塔尖端的背面上，微悬臂背面镀金作为反射镜，经微悬臂反射的光照到二象限的两个光敏面上分别给出信号 A 和 B ，利用光电探测器 x, y 两个位置调节旋钮可以调节 A 和 B 的大小，当样品扫描时微悬臂在力的作用下将发生微小位移，激光偏转对微悬臂位移的放大作用为

$$\delta L = (2R/l) \times \delta z$$

式中 δL 为光斑在光电探测器上的位移， l 为微悬臂长度， δz 为微悬臂在 z 方向的微小位移， R 为微悬臂到光电探测器的距离。光斑在探测器上

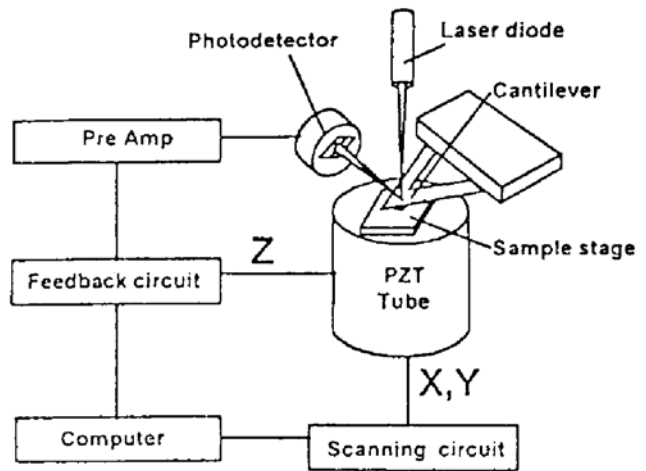


Fig. 1 Principle diagram of AFM

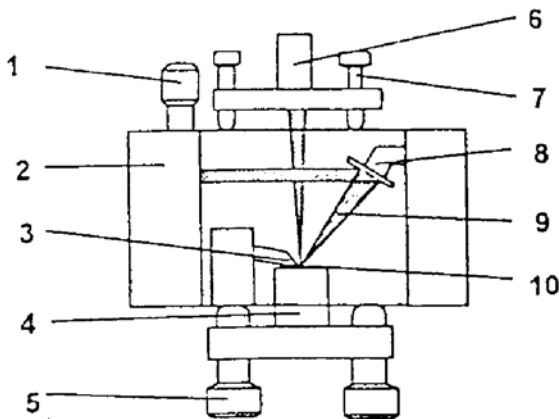


Fig. 2 Structure diagram of AFM

- 1: photodiode positioner; 2: photodiode; 3: cantilever;
- 4: PZT tube; 5: AFM head positioner; 6: laser diode;
- 7: laser diode positioner; 8: mirror; 9: laser; 10: sample stage

的移动将引起光电探测器上的光强度的变化,这个变化反映微悬臂的偏移。原子力显微镜的微悬臂是非常关键的部件。首先微悬臂尖端在样品扫描时应当以不损伤样品表面为前提,原子典型的谐振频率为 $\omega = 10^{13} \text{ rad/s}$, 质量为 $M = 10^{-25} \text{ kg}$, 原子等效弹性常量为 $k = \omega^2 M = 10 \text{ N/m}$ 。因此微悬臂的力常数应当小于 10 N/m 以免损伤表面。其次微悬臂的谐振频率应足够高以减低对外部噪声的敏感性(典型的外部噪声频率在 10^8 Hz 以下), 因弹簧的谐振频率为:

$$F_0(1/2)(k/m_0)^{1/2},$$

式中 k 为微悬臂的力常数, m_0 为微悬臂有效质量, 因此降低 k 使弹簧变软, m_0 就应当降低以保持 F_0 不变。如果要求比较满意的分辨率微悬臂应当必须具有尺寸小、力常数小、谐振频率高以及高的横向强度及硬度和非常尖的尖端。本仪器是一种“V”型 Si_3N_4 片上生长金字塔型尖端的微悬臂, 力常数为 $0.4 \text{ N/m} - 0.04 \text{ N/m}$, 金字塔型小尖端的曲率半径小于 40 nm , 比较好地满足了要求。

电路控制单元主要包括前置放大电路、反馈控制回路、xy 扫描电路、步进马达控制电路等。前置放大电路是将光电转换后的微弱电信号进行放大, 并以 $(A - B)/(A + B)$ 的形式表示出来, 这样不但反映了信号 A 和 B 的变化, 而且得高了信号的稳定性, 使之不受激光功率漂移的影响。其余部分使用 SSX-1 型扫描隧道显微镜的电路控制部分^[6,7]。

计算机系统硬件主要配置有: 80386 微机、高分辨图像处理板、图像显示器等。计算机软件具有图像采集、存储、显示、处理功能。

原子力显微镜对减震的要求非常苛刻。任何微小的震动、音频干扰、光干扰以及电磁干扰将使分辨率受到影响。采用弹簧悬挂的办法将仪器用四根弹簧吊起来减震, 并放入金属屏蔽箱内, 以达到防震、隔音、避光和抗电磁干扰的作用。

4 性 能

云母呈层状结构、易解理、化学性质稳定、不易污染, 而且具有良好的绝缘性及导热性, 常用来检测原子力显微镜的性能。其表面结构如图 3 所示, 是氧四面体底面排列, 硅位于氧四面体的中心, 整个结构呈六元环结构, 相邻六元环中心间距为 0.519 nm , 图 4 为云母表面的原子分辨率的原始图像, x 方向扫描速度为 30 Hz , 恒高模式。图 5 为经过傅里叶变换掩模处理后的图像, 这与云母的 x 射线晶体衍射结果一致, 证明本仪器已达到原子级分辨率。

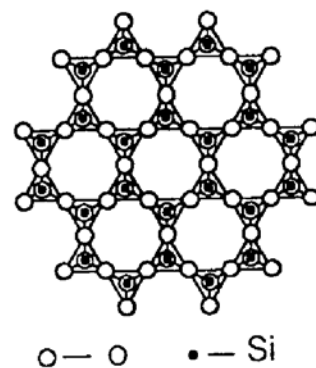


Fig. 3 Surface structure diagram of mica

图 6 是周期为 46 nm 的光栅的图像, x 方向扫描速度为 8 Hz , 恒力模式。图 7 为光栅的断面线扫图。图 8 为光盘的原子力显微像, x 方向扫描速度为 8 Hz , 恒力模式。图 8 是本仪器的最大扫描范围, 两排光盘的间距为 $0.8 \mu\text{m}$, 所以仪器的最大扫描范围大约为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$ 。图 9 为录音磁带表面的图像, 图中不仅可以清楚地看到磁头磨损过的痕迹, 而且可以获得表面的细节。图 10 为铜表面镀膜显微像, 可以清楚地看到镀膜缺损生成的小洞, 这个小洞在光学上有非常

重要的应用。图 11 为单点金刚石车刀车削加工的单晶锗表面，图中不仅可以看到车削加工的痕迹，而且能够得到单晶锗表面的一些结构。

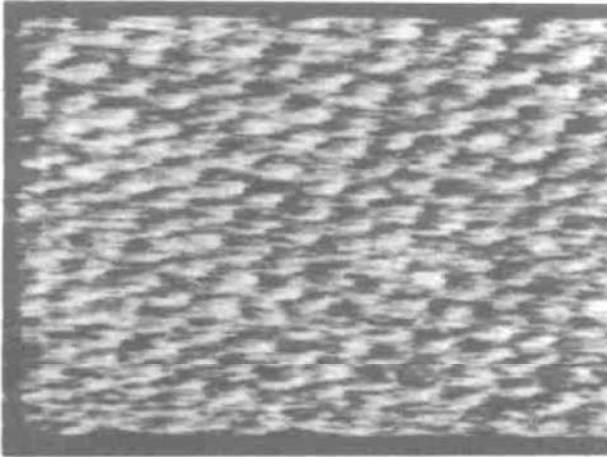


Fig. 4 The atomic resolution AFM image of mica obtained with raw data. scan range $5\text{ nm} \times 5\text{ nm}$. The scan rate in x direction is 30 Hz

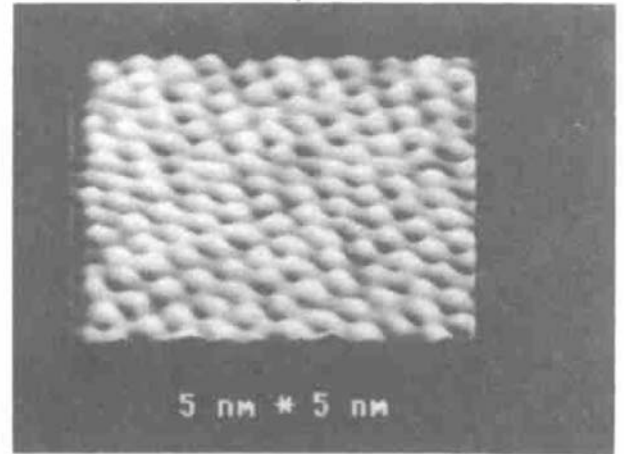


Fig. 5 The AFM image of mica obtained with FFT digital filtered data from Fig. 4

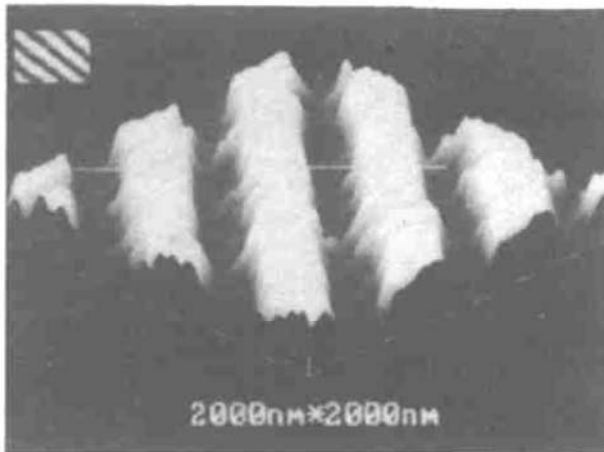


Fig. 6 The AFM image of optical grating with period 460 nm . The scan rate in x direction is 8 Hz

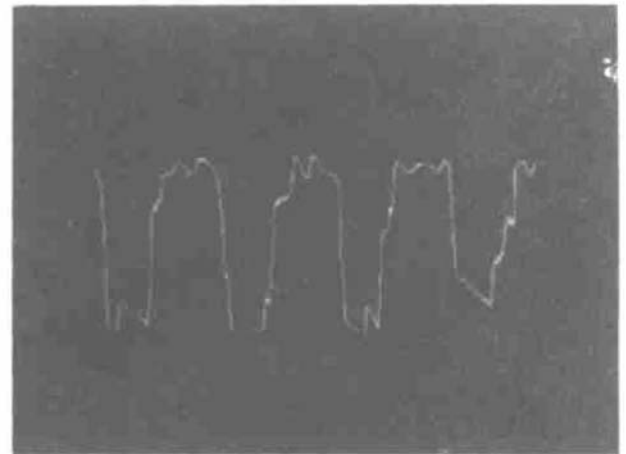


Fig. 7 The signal line scan image along the white line in Fig. 6

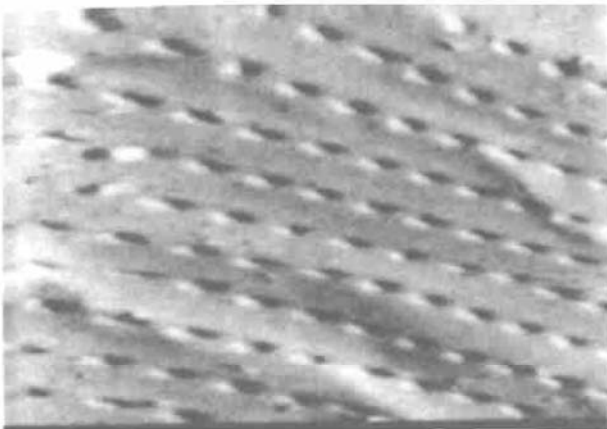


Fig. 8 The AFM image of compact disk stamper. This image proves that the maximum scan range of our AFM is $7\text{ }\mu\text{m} \times 7\text{ }\mu\text{m}$

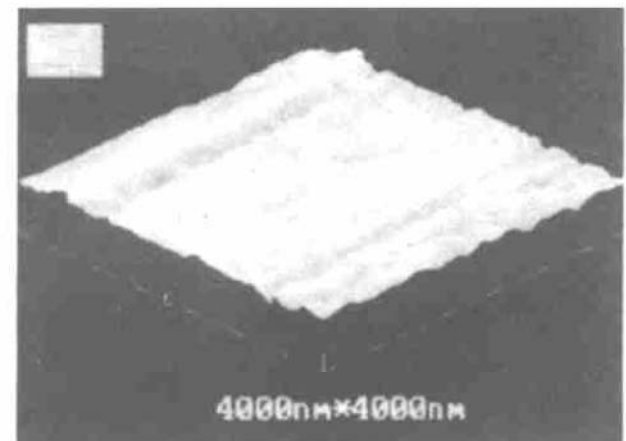


Fig. 9 The AFM image of magnetic tape. The scan range is $4\text{ }\mu\text{m} \times 4\text{ }\mu\text{m}$

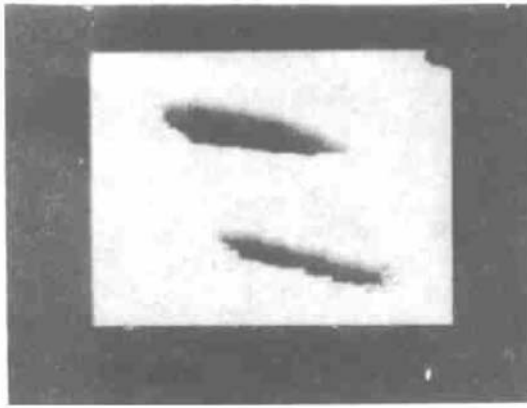


Fig. 10 The AFM image of Cu surface covered with the Cu film. The scan range is $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$

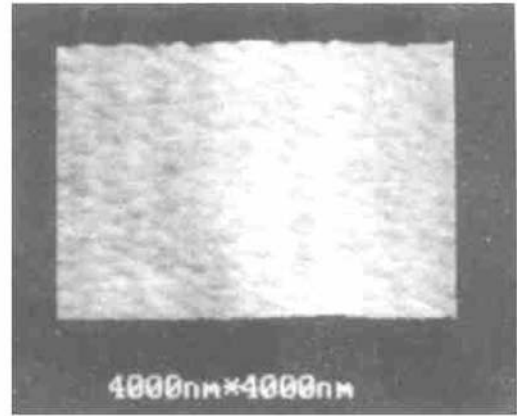


Fig. 11 The AFM image of Ge surface used signal point diamond turning, scan range $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$

本工作得到美国弗吉尼亚大学生物系杨颌教授的帮助。工作过程中得到中国科学院院士郭可信先生以及张泽研究员、褚一鸣研究员的大力支持。中国科学院上海光机所及中国科学院长春光机所提供了图 10 和图 11 的样品, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber *et al.*, Surface studies by scanning tunneling microscopy. *Phys. Rev. Lett.*, 1982, **49**(1): 57
- [2] G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber, Atomic force microscopy *Phys. Rev. Lett.*, 1986, **56**(9): 930
- [3] T. Goddenhenrich, H. Lemke, U. Hartmann *et al.*, Force microscopy with capacitive displacement detection. *J. Vacuum. Sci. & Technol.*, 1990, **A8**(1): 383
- [4] Y. Martin C. C. Williams, H. K. Wuickramasinghe, Atomic force microscopy: force mapping and profiling on a sub $100\ \text{\AA}$ scale. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **50**(20): 1455
- [5] S. Alexander, L. Hellemans, O. Marti *et al.*, An atomic-resolution atomic-force microscopy implemented using an optical level. *J. Appl. Phys.*, 1989, **65**(1): 164
- [6] 姚骏恩, 商广义, 焦越坎等, 电子显微学报, 1988, 7(1): 48
- [7] 姚骏恩, 贺节, 商广义等, SSX-1 型实用扫描隧道显微镜物理, 1989, 18(8): 486

An Atomic Force Microscope

Zhang Yiyi He Jie Shang Guangyi Yao Junen

(Beijing Laboratory of Electron Microscopy, Academia Sinica, Beijing 100080)

(Received 19 October 1993; revised 17 January 1994)

Abstract An atomic force microscope based on the optical level detection method has been developed and atomic resolution is achieved. The scanning range is $7\ \mu\text{m} \times 7\ \mu\text{m}$. Images of mica, optical grating and compact stamper are shown. In this paper the theory, construction and experiment results are described.

Key words atomic force microscope, optical level detection method.