

原子力显微镜的双扫描器系统的开发

赵复庆, 戴玉洁, 胡磊

(中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400714)

摘要: 原子力显微镜是可以实现纳米尺度表面三维形貌表征的重要技术手段, 但由于原子力显微镜的三轴耦合扫描器在进行较大范围扫描时客观存在耦合误差, 导致图像数据发生弓形效应, 目前只能通过数据的软件后处理来修正, 但处理过程会不可避免引起实测形貌和真实形貌发生一定的偏离。本研究通过新增一个大范围的 XY 方向平板扫描器, 控制系统原有扫描器只负责 Z 轴反馈, 从而实现耦合误差的消除, 并有效提高系统的扫描范围和扫描速度, 扩大原子力显微镜的可用场景。

关键词: 扫描器; 原子力显微镜; 耦合误差; 表面形貌

Development of dual scanner system for Atomic Force Microscope

Zhao Fuqing, Dai Yujie, Hu Lei

(Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714)

Abstract: Atomic Force Microscope is an important technology that can simultaneously achieve nanoscale topography characterization in the three directions of XYZ. However, due to the objective coupling error of the three-axis coupling scanner of the Atomic Force Microscope when scanning a large size, the bow effect occurs in the image data, which currently can only be corrected by software offline-processing of the data. However, the process will inevitably cause a certain deviation between the measured topography and the real topography. In this study, by adding an XY orientation flat panel scanner with a large scanning size, the original scanner of the system is only responsible for Z-axis feedback, thereby eliminating the coupling error, effectively improving the scan size and scan rate of the system, and expanding the available scenarios of the Atomic Force Microscope.

Keywords: scanner; atomic force microscope; coupling error; topography

1981 年, Binnig 和 Rohrer 等利用量子隧道效应研制出第一台扫描隧道显微镜(STM)^[1], 1986 年, Binnig 通过改进 STM 研制出第一台原子力显微镜(Atomic Force Microscopy, 以下

简称：AFM)^[2]，发展至今，AFM 已经成为一种十分重要的材料理化特性表征和测试设备。AFM 可以在大气或液体下环境进行实验测试，其制样方法简单、兼容不导电样品，可以用于材料的高分辨形貌、力学性能、电磁学性能等理化特性表征，目前已在微电子—半导体、先进材料、光通讯、生命科学/生物技术、制药等多个领域中得到了广泛应用^[3-6]。

1 原子力显微镜的组成及工作原理

AFM 主要构成有探针，扫描器，激光器，检测器，控制器等，结构示意图如图 1 所示。

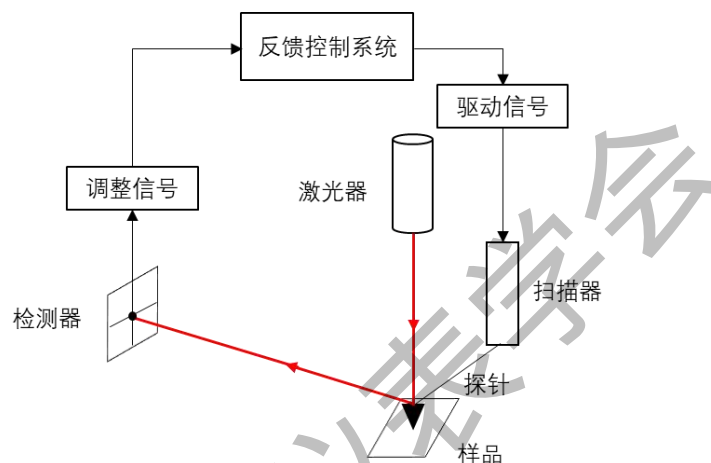


图 1 AFM 系统结构示意图

AFM 系统按功能分类可以分为检测系统和反馈系统两个部分。检测系统：在 AFM 以接触模式扫描时，使用探针来检测原子与原子之间的范德华力及其变化量。当针尖与样品之间有了交互作用之后，会使得探针悬臂（cantilever）摆动，有一束激光一直照射在微悬臂的末端时，其反射光的位置也会因为悬臂摆动而有所改变，这就造成偏移量的产生，依靠激光光斑位置检测器将偏移量记录下并转换成对应的电信号，以供控制器作信号处理。

反馈系统：激光检测器检测到信号，系统会将此信号当作内部的调整信号，并据此发出驱动信号驱使扫描器做适当的移动，使针尖与样品之间保持一定的作用力。

AFM 便是结合以上两个部分来表征样品的表面特性，扫描时，使用微小悬臂（cantilever）来检测针尖与样品之间的相互作用，作用力会使微悬臂摆动，再利用激光照射在悬臂的末端，当探针悬臂摆动时，会使反射光的位置改变而造成偏移量，此时激光检测器会记录此偏移量，也会把此时的信号给反馈系统，以利于系统做适当的调整，最后再将样品的表面三维形貌以图像的方式给呈现出来。

然而，在实际应用中，由于现有 AFM 系统采用的单个压电陶瓷管式扫描器客观存在耦合误差，大范围扫描效果差。例如，在进行扫描范围大于 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 的测试时，扫描器进

行横向扫描运动，由于 X 或 Y 向与 Z 向相互耦合，会附带产生额外的 Z 向运动，从而产生相应的 Z 向位移误差，使得图像存在“弓形效应”^[7]，形成中间高、两边低的现象，耦合误差目前可以通过软件后期处理消除，但处理过程也导致了图像与真实形貌存在一定的误差。针对上述问题，我们开发了一个原子力显微镜的双扫描器系统，通过新增大扫描范围的平板扫描器，使得系统原有扫描器只负责 Z 轴反馈，从而实现耦合误差的消除，并有效提高系统的扫描范围和扫描速度。

2 双扫描器系统的开发

2.1 双扫描器系统总体方案设计

AFM 原有扫描器负责 XYZ 三个方向的扫描，由于扫描器扫过的轨迹是圆弧而不是直线，扫描范围越大，这种非线性越明显。为此，本系统中采用将 X、Y 向的扫描和 Z 向反馈分离控制，引入一个 XY 方向平板扫描器，平板扫描器置于样品下方，样品扫描时 XY 方向的移动由新增扫描器控制，而设备原有扫描器只负责 Z 方向的反馈。根据 XY 方向平板扫描器的尺寸配套设计一个新样品台，从而形成双扫描器结构（见图 2 所示）；同时，编写一个软件来控制整体系统的扫描触发，扫描速率，扫描范围，采样率等参数。

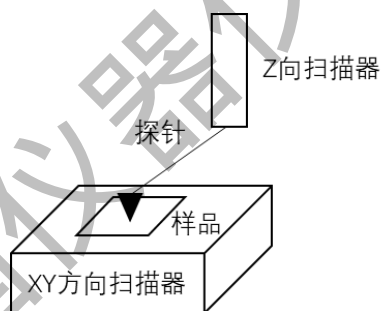


图 2 双扫描器结构设计示意图

2.2 双扫描器系统的研制

2.2.1 样品台部分

为了实现双扫描器同步工作，需要定制加工出一款兼容 2 个扫描器，并能搭载和固定样品的样品台。根据 AFM 原有样品台尺寸及新增 XY 方向平台扫描器尺寸，定制载物台及连接机构，并按如下步骤进行安装：（1）样品台外圈加装连接机构，（2）样品台上加装平板扫描器，（3）平板扫描器上加装载物台。样品台改造完成后实物图如图 3 所示。

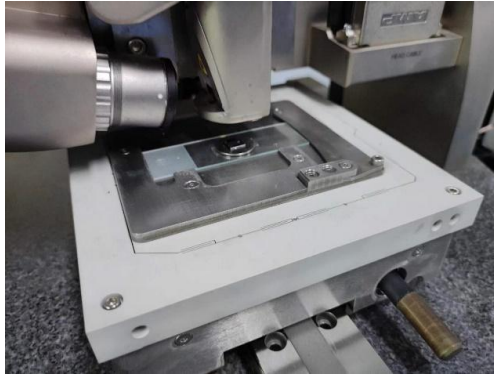


图3 样品台改造后实物图

2.2.2 控制系统部分

设计一套原子力显微镜的双扫描器控制系统，实现双扫描器协同运行，并兼容原有单扫描器运行模式。

在设计控制系统期间，先后尝试了不同的扫描方式和控制方式，如果通过软件方式控制同步触发，会导致扫描速度过慢，同时对搭载软件的计算机的算力要求过高，无法达到项目要求。为了解决这个问题，定制了一个具有硬件支持同步采集的数据采集卡，并从现有 AFM 控制器的 General I/O output1 接口引出 Z 轴的实时电压信号，通过 BNC 线缆接入到此数据采集卡中，数据采集卡再发出同步驱动信号输入到新增扫描器的控制器中使得 XY 开始扫描运动，并按设定好的采样率逐行扫描成像，从而得到高精度的三维形貌成像。控制系统示意图如下图 4 所示。

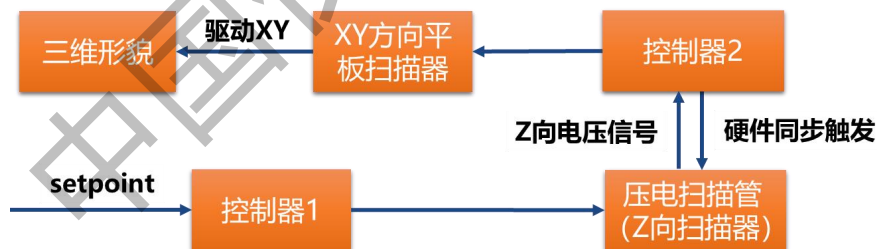


图4 双扫描器控制系统示意图

同时，根据上述同步扫描方式编写了控制软件“原子力显微镜扫描控制系统”，该软件可以设置扫描范围、扫描速度和采样率等参数，开始扫描后，可以在数据视图中实时观察到每一行扫描时的 Z 轴轮廓曲线，扫描完成后，图像会按照指定路径进行保存，并能在 2D 视图和 3D 视图进行显示，软件界面见图 5。



图5 控制软件界面

3 双扫描器系统的应用

3.1 双扫描器系统的扫描过程

以光栅样品为例，安装好样品后，首先在原有设备的软件“NanoScope”中打开 Z 轴信号输出，并且设定好 Z 轴的反馈参数，对样品表面进行聚焦和进针。再通过新设计的控制软件“原子力显微镜扫描控制系统”设定好扫描参数，即可开始扫描，该系统扫描过程如图 6 所示，扫描图像如图 7 所示。

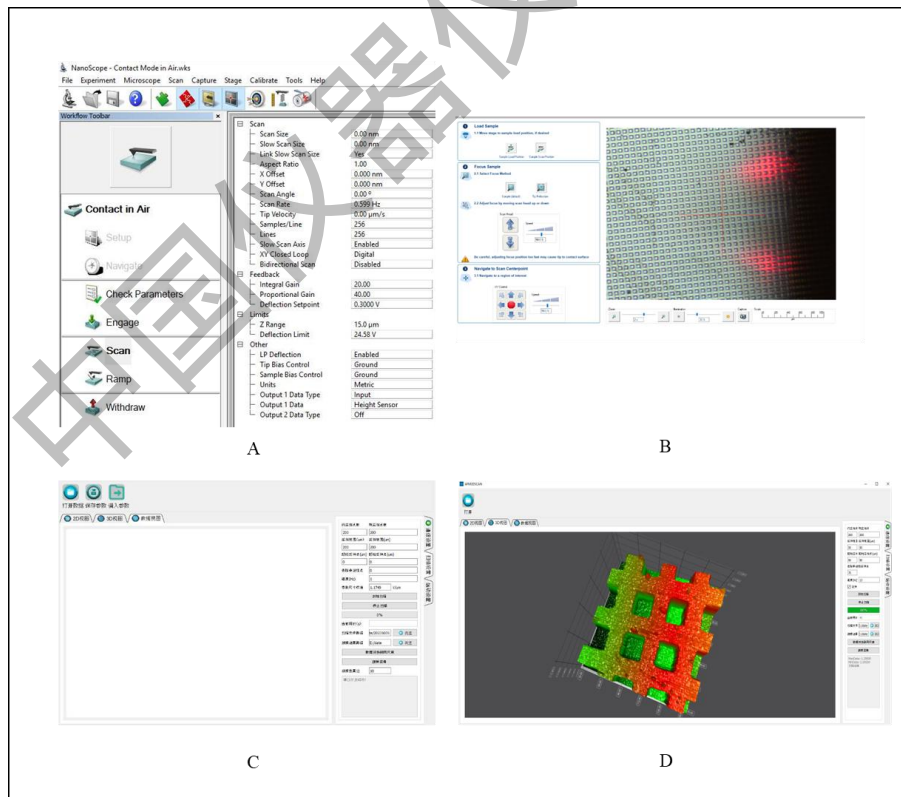


图6 样品扫描过程

A: 设置反馈参数；B: 聚焦样品表面，下针；C: 设置扫描参数；D: 扫描完成界面。

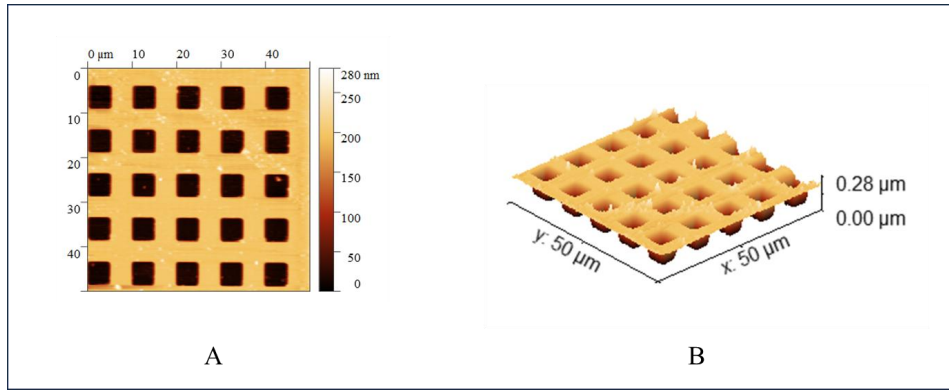


图7 光栅形貌图

A: 2D图; B: 3D图

本系统采用将 X、Y 向的扫描和 Z 向反馈控制分离开来的设计方案，引入一个行程为 $200\mu\text{m}$ 的 XY 方向平板扫描器，使得系统扫描范围从原有的 $90\mu\text{m}\times 90\mu\text{m}$ 提升到 $200\mu\text{m}\times 200\mu\text{m}$ ，新系统的扫描速度也不再受原有扫描器限制，最大扫描速度取决于新扫描器的固有性能和实际负载。通过上述方案，本研究实现了设备原有扫描系统耦合误差的消除，并提升了扫描范围和扫描速度。

3.2 双扫描器系统的应用

全息扩散片是液晶显示器中实现大角度、均匀背光的关键光学元件（见图 8）。全息扩散片中存在一种叫散斑的微结构^[8]，散斑是不完全规则，由于该样品表面的曲面轮廓较为复杂，若采用原有 AFM 系统扫描，无法通过简单后处理有效还原样品的真实形貌（扫描图像见图 9）；若采用本项目研制的 AFM 双扫描器系统，可以消除耦合误差，获取样品表面真实形貌，同时可以提升扫描范围，能得到扩散片上更多微结构的数据（扫描图像见图 10），从而分析结构和优化设计，最终实现让微结构尺寸更小，这样的全息扩散片作为成像接收屏，能有更细腻显示效果。

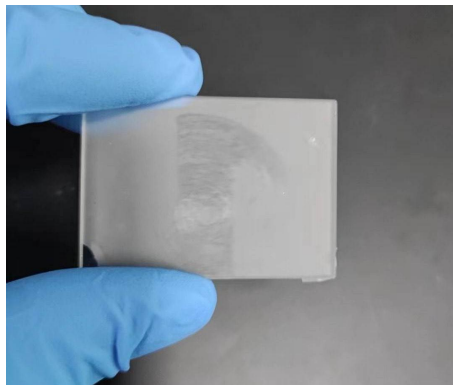


图8 全息扩散片实拍图

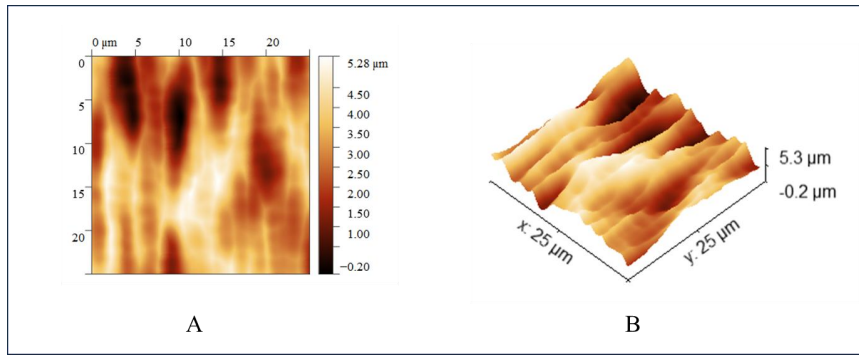


图9 原有 AFM 全息扩散片形貌图

A: 2D 图; B: 3D 图

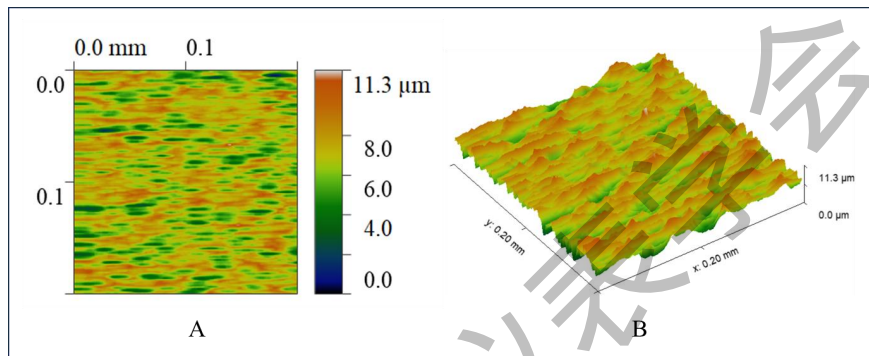


图10 双扫描器 AFM 全息扩散片形貌图

A: 2D 图; B: 3D 图

4 结论

原子力显微镜是一种可以实现纳米尺度材料表面三维形貌表征的通用型实验仪器,但现有设备扫描时客观存在耦合误差,影响了测试的准确性。研制的双扫描器系统将 XY 运动和 Z 轴信号反馈进行分离控制,避免了单个扫描器在三轴耦合扫描时带来的误差,并且提升了扫描范围和扫描速度,在系统设计上保证了扫描图像更贴近真实情况。本研究弥补了现有设备扫描方式的不足,同时也扩展了原子力显微镜的使用场景。

参考文献:

- [1]G. Binnig, H. Rohrer, Ch. Gerber, *et al.* 7x7 Reconstruction on Si(111) Resolved in Real Space[J]. Phys. Rev. Lett., 1983, 50(2): 120-123.
- [2]G. Binnig, C. F. Quate, Ch. Gerber. Atomic Force Microscope[J]. Phys. Rev. Lett., 1986, 56(9): 930-933

- [3]G. Binnig, H. Rorer. Scanning Tunneling Microscopy from Birth to Adolescence[J]. Rev. Mod. Phys., 1987, 59(3): 615-625
- [4]Ratcliff, G. Curtis. Advances in atomic force microscopy for the study of biological systems[D]. Chapel Hill : The University of North Carolina. 2002: 10-31.
- [5]R Aguilar, K. Ann. Atomic force microscopy for the study of nanometric particles and biological molecules[D]. Boulder: University of Colorado. 1999: 11-15.
- [6]J. H Hoh, P. K. Hansma. Atomic Force Microscopy for High-resolution Imaging in Cell Biology[J]. Trends Cell Biol., 1992, 2(7): 208-213.
- [7]李 鹏, 王朋伟, 刘竞, 等. 原子力显微镜形貌像的典型失真和伪迹[J]. 西安文理学院学报 (自然科学版), 2016, 19(1): 60-63.
- [8]H. G. Park, D. Y. Khang. High-performance light diffuser films by hierarchical buckling-based surface texturing combined with internal pores generated from physical gelation induced phase separation of binary polymer solution[J]. Polymer, 2016, 99: 1-6.