

探针对原子力显微镜成像的影响

李丽丽^{1,2}, 宋正勋^{1,2}, 刘晓刚^{1,2}, 王作斌^{1,2}

(1.长春理工大学 电子信息工程学院, 长春 130022;

2.吉林省纳米操纵、装配与制造国际科技合作基地, 长春 130022)

摘要: 原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 的一个重要应用就是对样品表面的微纳米级尺寸特征进行成像, 但在扫描成像的过程中, 由于针尖的影响作用, 使得扫描所获图像是原子力探针和样品共同作用的结果, 而不是样品形貌的真实描述。本文通过用具有不同形状、尺寸针尖的探针对同一样品进行成像, 将所得图像进行分析、对比, 模拟和实验结果表明, 为获得更准确的特征尺寸成像, 对有不同特征尺寸的样品, 需要选择适合的探针对其实施成像。

关键词: 原子力显微镜; 特征尺寸; 成像; 针尖形状

中图分类号: TP14

文献标识码: A

文章编号: 1672-9870(2014)01-0072-04

The Probe Impact on Imaging of Atomic Force Microscope

LI Lili^{1,2}, SONG Zhengxun^{1,2}, LIU Xiaogang^{1,2}, WANG Zuobin^{1,2}

(1.School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022;

2.Jilin Provincial International Science and Technology Cooperation Base for Nano Handling,

Assembly and Manufacturing, Changchun 130022)

Abstract: AFM plays an important role in imaging feature size of samples with micro/ nano-scale. But as the interaction between the probe and sample, the image is usually a combination of them, and it is just an approximate description of the sample. This paper the images of a fixed sample with probe of different shapes and sizes are presented, the data is compared and the results are concluded. Simulations and experiments demonstrate that the probe should be chosen properly to image based on the scale of different samples.

Key words: AFM; characteristic size; imaging; tip shape

原子力显微镜 (Atomic Force Microscope, AFM) 是一种纳米级高分辨的扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscope, SPM)^[1-3], 它自问世以来就成为纳米科技研究中观测与操纵的主要工具。在对样品的特征观测中, 它主要是基于样品表面和探针之间的微观力—范德华力、摩擦力等, 通过对这个力的检测获得力分布信息, 从而获得纳米级分辨率的表面结构信息^[4,5]。

但是由于探针针尖形貌尺度因素的影响, AFM 系统在纳米尺度的扫描观测成像过程中, 会致使扫描成像失真, 使基于探针扫描的纳观尺度成像很难

真实反映样品表面形貌^[6-10]。它只是被测样品实际形貌的近似描述。当样品特征尺寸大于针尖尺寸时, 可以近似地认为扫描图像是样品形貌的体现; 当样品特征尺寸与针尖尺寸相当时, 扫描图像会带有针尖的形貌特征, 它不能真实地反应样品本身特征; 当样品特征尺寸小于针尖尺寸时, 特别是在极端情况下, 比如样品中存在窄而深的凹槽或尖锐的凸起时, 扫描得到的图像就可以完全认为是探针的形貌, 这样就使得研究样品特征结构遇到了瓶颈。

因此, 在利用 AFM 对样品进行扫描成像时, 针尖的形状选择成为一个至关重要的问题。

收稿日期: 2013-09-29

基金项目: 国家重大基础研究计划(973, 2012CB326406); 欧盟第七研究框架计划(LaserNaMi(247644); ECNANOMAN(269219)); 国家国际科技合作计划(2012DFA11070); 国家自然科学基金(61176002); 教育部博士点基金(20112216110002); 吉林省科技发展计划(201115157, 20110704); 广东省科技发展计划(2011B010700101); 长春市科技创新平台(11KP04)

作者简介: 李丽丽 (1988-), 女, 硕士生, E-mail: lilicust@126.com

通信作者: 宋正勋 (1967-), 男, 教授, E-mail: zhxsong@cust.edu.cn

1 原子力显微镜及探针

1.1 原子力显微镜成像原理

通常, AFM由四个部分组成: 机械运动部分、悬臂偏转信号光学检测系统、控制信号反馈系统、成像和信息处理软件系统。AFM基本工作原理是: 将一个对微弱力极敏感的微悬臂一端固定在探针架上, 另一端带有纳米级的探针, 针尖与样品表面轻轻“接触”, 由于针尖尖端原子与样品表面原子间范德华力的作用, 通过在扫描时控制力的恒定, 微悬臂将对应于针尖与样品表面原子间作用力的等位面而在垂直于样品的表面方向起伏运动, 通过反馈和成像系统控制探针和样品表面间距, 然后利用四象限探测器(一般采用位置敏感器件 PSD)可测得微悬臂对应于扫描各点的位置变化, 从而获得样品表面形貌的信息^[11-14]。AFM成像过程的原理如图1所示。

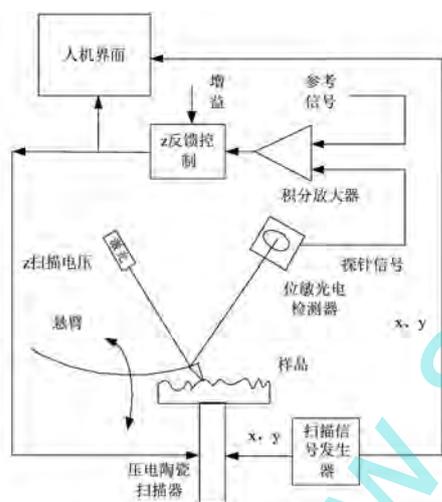


图1 AFM成像原理

1.2 探针技术

原子力显微镜的各种工作模式和应用要求性能各异的探针, 而探针的性能指标是决定显微镜分辨率的最关键因素。

AFM探针基本都是由MEMS技术加工 Si 或者 Si_3N_4 来制备。探针针尖半径(一般指曲率半径)一般为十到几十纳米。微悬臂通常由一个 $100\sim 500\mu\text{m}$ 长、 $500\text{nm}\sim 5\mu\text{m}$ 厚的硅片或氮化硅片制成。典型的接触式探针几何参数如图2所示。

不同参数的针尖对同一样品扫描后会得到不同的结果。正如前面所述, 要获得样品准确的形貌图像, 应充分考虑样品的特征尺寸和针尖尺寸的大小关系与适合的形状、尺寸等。下面分别讨论圆锥形、抛物形针尖对扫描结果的影响。

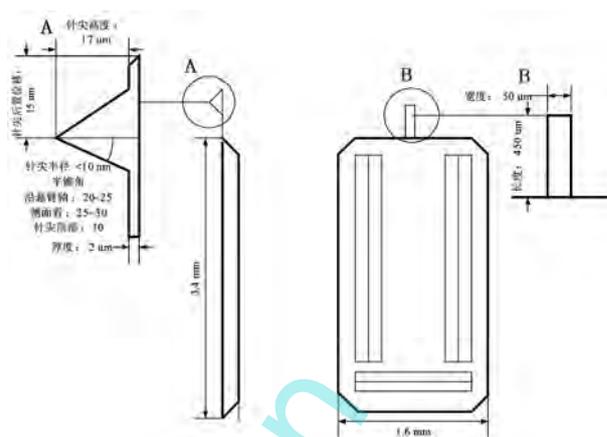


图2 探针几何参数

2 探针针尖对成像的影响

2.1 圆锥形针尖扫描成像情况

对于圆锥形的针尖, 要考虑圆锥的半锥角大小。

(1) 扫描90度台阶形样品。锥角过大(正切值大于台阶的半宽与高度比)会使针尖不能达到台阶深处, 测得的形貌会有较大的误差; 锥角较小时, 可以反应台阶深度, 但边沿会衍生出与探针同一斜率的斜线, 不能产生90度的台阶形貌。

(2) 扫描一定坡度台阶样品。当锥角较大(针尖侧边斜率小于台阶侧边斜率)时, 测得台阶形貌为针尖形貌; 当锥角较小(针尖侧边斜率大于台阶侧边斜率)时, 测得台阶形貌为真实形貌。

2.2 球形针尖扫描成像情况

对于球形针尖, 值得注意的是球半径的大小。

(1) 当用球形针尖(半径为 R) 扫描具有台阶形貌的样品(台阶宽度相对于针尖半径足够大)时, 在台阶直角拐角处的测量形貌会变成与球半径同等大小的过渡圆弧段; 当扫描具有一定圆弧(半径为 r) 的台阶样品时, 在台阶拐角处测得的圆弧半径为 $R+r$ 。

(2) 当球形针尖的半径大于台阶的宽度时, 测得的形貌就会产生很大的误差, 甚至于不能反应样品的结构特性。当球形针尖在样品表面扫描滚动时, 由于半径大于台阶的宽度, 针尖不能达到台阶深处, 在台阶处扫描得到的图像为两个圆弧, 此时扫描获得的图像就不能反应样品台阶特征, 造成形貌图像失真严重。

2.3 磨损针尖扫描成像情况

除了针尖本身形貌对样品特征结构有影响外, 由于外来因素或者使用过程的磨损, 针尖会被污染

或变钝,用这样的针尖对样品扫描成像时,得到的形貌图像不完全是样品本身的结构特征,针尖的形貌会映射到样品结构中,这样也造成形貌图像失真,影响对样品结构特征的研究。

3 模拟实验

根据上述所说,利用 Matlab 仿真软件进行模拟,实验中样品形貌采用正弦波信号形成,周期为 2π ,分别采用了圆锥形针尖和球形针尖对样品进行模拟扫描成像。

采用圆锥形针尖时,设定半锥角不同,则扫描成像结果不同,如图3所示。

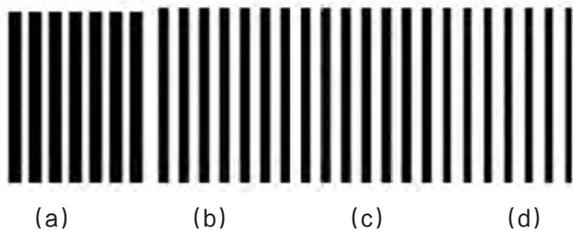


图3 样品形貌及圆锥形针尖模拟扫描成像

图中(a)是样品表面形貌图,(b)是用半径为0.364、半锥角为 20° 的针尖扫描模拟成像,(c)是用半径为1、半锥角为 45° 的针尖扫描模拟成像,(d)是用半径为1.732、半锥角为 60° 的针尖扫描模拟成像。明显看出形貌的凸起部分被拓宽了,半锥角越大,拓宽程度越明显,剖面线对比如图4所示。

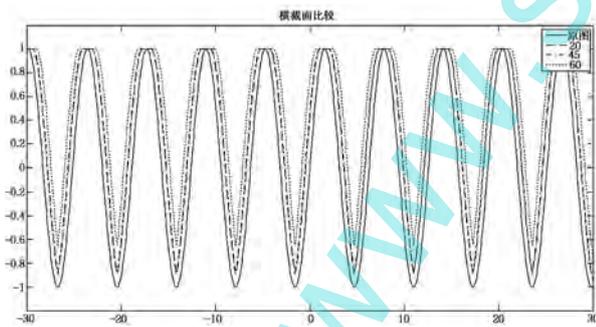


图4 样品及各扫描模拟成像剖面线图

采用球形针尖时,设定的半径不同,则扫描成像

结果不同,如图5所示。

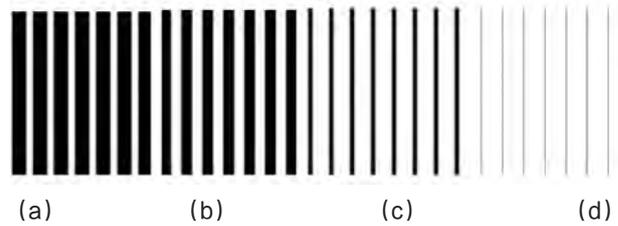


图5 样品形貌及球形针尖模拟扫描成像

图中(a)是样品表面形貌图,(b)是用半径为1的针尖扫描模拟成像,(c)是用半径为3的针尖扫描模拟成像,(d)是用半径为5的针尖扫描模拟成像。剖面线如图6所示。

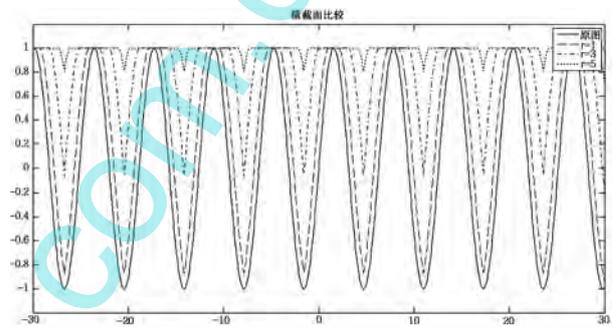


图6 样品及各扫描成像剖面线图

4 实验分析

实验采用Nd-YAG型号的固体激光器,激光波长266nm,四光束入射,入射角 60° ,单脉冲,脉冲宽度7ns,实验材料采用涂抹Future正性光刻胶的抛光硅。根据理论周期公式 $T = \lambda / 2 \sin \theta$,计算得周期值为153.57nm。图7为用原子力显微镜在本实验条件下测得的结构特性。

实验所用仪器为本原原子力显微镜,采用接触模式扫描,所用探针为轻敲探针,且探针并非全新探针,使用时间约一个月。实验中采用的轻敲探针的针尖尺寸与上述接触探针相同,其区别主要体现在悬臂上:悬臂长度为 $125\mu\text{m}$,宽度为 $30\mu\text{m}$,厚度为 $4\mu\text{m}$ 。

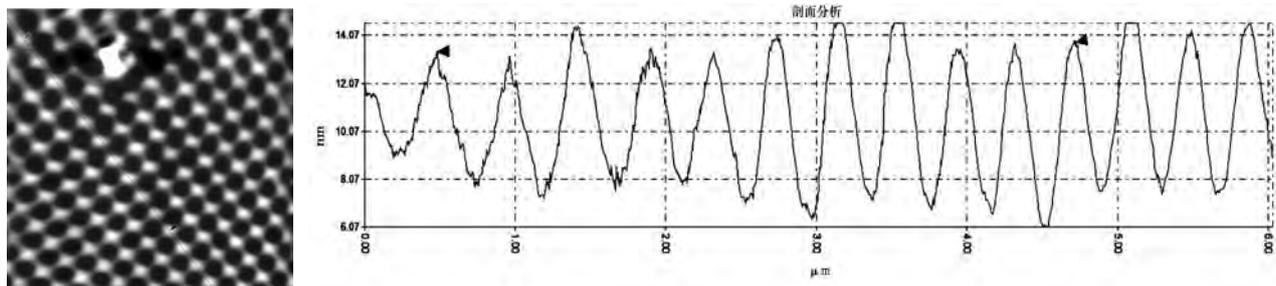


图7 实验结果及分析

对扫描图像进剖面线处理,红色和蓝色两个游标之间的距离为4232.65nm,一共10个周期,则平均周期长度为423.2nm。实验中对样品进行了重复扫描,同一位置重复扫描10次,对不同位置进行了10次扫描,这样得出它的近似统计周期为450nm,它和理论计算值对比存在很大的偏差。

通过实验值与理论值的对比分析,AFM对形貌测量的展宽效应非常显著,这样结构的特征尺寸就很难准确标定,而对于结构的特性研究就难以进行。因此,探针对成像的影响就成为一个亟待解决的难题。

5 结论

上述实验所体现的“展宽效应”除探针因素引起外,还与实验平台搭建过程中的激光入射角度、激光器的稳定性等有关。入射角不可避免的带有人为误差,但可控制在允许范围内;激光器因使用时间会有功率下降问题,但一般来说是缓慢变化的。本文重点考虑了探针针尖对样品成像的影响作用,通过理论分析、模拟和实验,证实了AFM针尖形状、尺寸等是对样品成像质量的重要影响因素。不同形貌、不同尺寸的针尖、磨损针尖以及受污染的针尖都将使扫描图像失真,因此在对样品扫描时,要充分考虑样品的结构特性和针尖形状,选择适合的针尖进行成像。

参考文献

- [1] Binning, G Quate C F, Gerber C. Atomic force microscopy [J]. *Physics Review Letters*, 1986, 56 (9) : 930-934.
- [2] 何光宏, 张志津, 彭光含, 等. 基于STM的原子力显微镜的设计及应用[J]. *电子显微学报*, 2006, 25(1): 26-29.
- [3] 李敏, 韩立, 林云生, 等. 基于DSP的高速原子力显微镜系统[J]. *电子显微学报*, 2007, 26(1): 40-43.
- [4] 隋娟玲, 孙珊. 扫描电子显微镜和原子力显微镜-表面观察的互补技术[J]. *矿冶*, 2004, 13(3): 95-97.
- [5] 王景明, 王轲, 郑咏梅, 等. 荷叶表面纳米结构与浸润性的关系[J]. *高等学校化学学报*, 2010, 31(8): 1596-1599.
- [6] Villarrubia J S. Morphological estimation of tip geometry for scanned probe microscopy [J]. *Surface Science*, 1994, 321(3): 287-300.
- [7] Villarrubia J S. Algorithms for scanned probe microscope image simulation surface reconstruction and tip estimation [J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1997, 102(4): 425-454.
- [8] Keller D J, Franke F S. Envelope reconstruction of probe microscope images [J]. *Surface Science*, 1993, 294(3): 409-419.
- [9] Wilson D L, Dalal P, Kump K S, et al. Morphological modeling of atomic force microscopy imaging including nanostructure probes and fibrinogen molecules [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1996, 14(4): 2407-2416.
- [10] Williams P M, Shakesheff K M, Davies M C, et al. Blind reconstruction of scanning probe image data [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology B*, 1996, 14(2): 1557-1562.
- [11] 张天彪, 党国全, 关一夫. 原子力显微镜在液相条件下的成像分析[J]. *电子显微学报*, 2008, 27(5): 395-399.
- [12] 陈代谢, 殷伯华, 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.
- [13] 李艳宁, 赵倩云, 王忠顺, 等. 压电探针应用于原子力显微镜液体成像的研究[J]. *西安交通大学学报*, 2006, 40(3): 341-343.
- [14] 李博, 高艺, 王红平, 等. 高精度PSD线性化方法与实验研究[J]. *长春理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 36(1-2): 36-39.