

天津大学“211工程”丛书
TIANJINDAXUE “211 GONGCHENG” CONGSHU

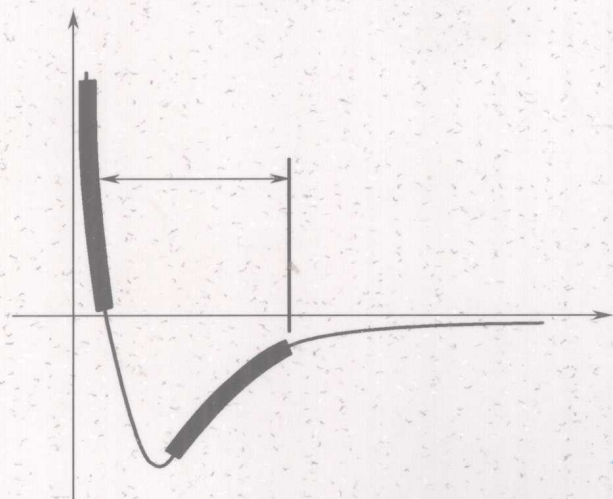
扫描隧道

Saomiao Suidao yu Saomiaoli Xianweijing Fenxi Yuanli

与

扫描力显微镜分析原理

主编 姚珩



天津大学“211 工程”丛书

扫描隧道与扫描力 显微镜分析原理

主编 姚 珩

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书介绍了各种扫描探针显微镜的工作原理和工作模式,用量子力学微扰理论阐明了电子隧道和纳米间距的针尖-样品的相互作用的起源,简单介绍了密度泛函第一性原理和分子动力学方法对针尖-样品相互作用的动态模拟方法,奠定了开展扫描探针微纳测试与加工技术研究的理论与实验基础。本书适合于从事扫描探针及扫描力显微镜微纳测试与加工技术研究的科技工作者参考,也可作为材料、物理、机械等相关专业研究生的选修教材。

图书在版编目(CIP)数据

扫描隧道与扫描力显微镜分析原理/姚珪主编. —天津:
天津大学出版社, 2009.3

(天津大学“211 工程”丛书)

ISBN 978-7-5618-2965-3

I. 扫… II. 姚… III. 扫描电子显微镜 IV. TN16

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 028406 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 昌黎太阳红彩色印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 230mm
印 张 7
字 数 162 千
版 次 2009 年 3 月第 1 版
印 次 2009 年 3 月第 1 次
印 数 1 - 2 000
定 价 15.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

前 言

材料研究不断对具有更高空间分辨力和灵敏度的分析技术提出新的需求,近年来以原子尺度对材料性质进行成像、测量和加工的研究工作不断地深入,同时促进了扫描隧道显微术 STM 和与其相关的扫描探针显微术 SPM 及扫描力显微术 SFM 的显著发展。由于所有 SPM 采用的近场扫描成像方式的特殊性,各种测试结果的正确分析显得尤为重要。

本书第 1 章简单介绍了各种扫描探针显微镜的工作原理和工作模式。第 2 章根据量子力学的微扰理论论述了电子隧道和纳米间距的针尖-样品相互作用的起源。第 3 章阐明了各种物理量随针尖-样品间距的变化和不同间距下针尖与样品相互作用的特点与结果。第 4、5、6 章建立了针尖和样品的多粒子体系模型,采用分子动力学和密度泛函方法模拟粒子分布随针尖-样品间隙变化的过程,讨论了材料的黏结性、表面张力,接触形变、表面形变,材料弹性、塑性响应特性,材料硬度、微米和纳米凹陷,摩擦力、润滑和剪切、断裂以及原子尺度的探针对材料表面的修改和加工等基础和应用问题。第 7 章讨论在非接触扫描力显微技术中涉及来自远程针尖-样品相互作用的范德瓦尔斯力,针尖-样品间隙中存在液体时的离子型的双层力,当针尖和样品非常接近时,间隙中液体的不连续结构导致的溶解(极化的)力和液体在表面以吸附薄膜形式存在的毛细作用力,阐明了这些作用力的典型幅度、作用范围和复杂的交互作用。

如果本书能为开展扫描探针及扫描力显微镜微纳测试与加工技术研究的科技工作者提供实验和理论上的一点点帮助,作者将感到无比欣慰。

在本书的编写过程中,笔者参考了 Springer 公司出版的表面科学系列读物第 20 卷、美国帕克科学仪器公司 Park Scientific Instruments 出版的《扫描探针显微镜实践指南》等书籍和大量的文献。天津大学材料学院 2005 级博士研究生吕振刚做了大量的针尖-样品相互作用的分子动力学模拟工作,为相关章节提供了实验依据。天津大学材料学院 2005 级硕士研究生薛涛、张长亮和 2006 级河南省委培研究生班的部分同学完成了本书部分插图的绘画编辑、文字录入和校对工作,在此一并表示由衷的感谢。

目 录

第 1 章 扫描探针及扫描力显微镜简介	(1)
1.1 扫描隧道显微镜	(1)
1.2 原子力显微镜	(3)
1.3 磁力显微镜	(7)
1.4 横向力显微镜	(8)
1.5 其他 SPM 技术	(9)
1.6 SPM 表面分析的手段	(13)
1.7 SPM 工作环境	(15)
第 2 章 STM 和 SFM 的统一微扰理论	(17)
2.1 统一微扰理论的产生原因	(17)
2.2 改进的 Bardeen 近似法	(19)
参考文献	(23)
第 3 章 针尖-样品相互作用理论	(25)
3.1 针尖-样品相互作用	(25)
3.2 长程力(范德瓦尔斯力)	(27)
3.3 相互作用能(黏结能)	(28)
3.4 短程力	(29)
3.5 形变	(30)
3.6 原子传输	(31)
3.7 由针尖引发的电子结构变化	(32)
3.8 挤压效应	(33)
3.9 隧穿向弹道传输的转变	(34)
参考文献	(35)
第 4 章 针尖-样品相互作用的分子动力学模拟	(37)
4.1 算法	(37)
4.2 研究特例	(39)
参考文献	(50)
第 5 章 弹性介质接触式扫描力显微技术	(54)
5.1 层状材料的连续弹性体理论	(54)
5.2 SFM 和弹性介质间的相互作用	(55)

5.3 局域抗弯刚度	(57)
参考文献	(58)
第6章 原子尺度的摩擦理论	(60)
6.1 摩擦力的微观起源	(60)
6.2 理想化的摩擦力学	(61)
6.3 摩擦力的模拟计算	(68)
6.4 扫描力显微镜无损针尖-基底相互作用的限制	(72)
参考文献	(75)
第7章 非接触力显微技术理论	(77)
7.1 分析方法简介	(77)
7.2 范德瓦尔斯力	(78)
7.3 离子力	(86)
7.4 少量分子的挤压、溶解力	(92)
7.5 毛细力	(97)
7.6 结论	(103)
参考文献	(103)

第1章 扫描探针及扫描力显微镜简介

20世纪80年代初期,扫描探针显微镜(SPM)因首次在实空间展现了硅表面的原子图像而震惊世界。从此,SPM在基础表面科学、表面粗糙度分析和从硅原子结构到活体细胞表面微米尺度的突出物的三维成像等学科中发挥着重要的作用。

扫描探针显微镜是一种具有宽广观察范围的成像工具,它延伸至光学和电子显微镜的领域。它也是一种具有空前高的3D分辨率的轮廓仪。在某些情况下,扫描探针显微镜可以测量诸如表面电导率、静电电荷分布、区域摩擦力、磁场和弹性模量等物理特性。

扫描探针显微镜是一类仪器的总称,它们以从原子到微米级别的分辨率研究材料的表面特性。所有的SPM都包含图1-1所示的基本部件。扫描力显微镜(SFM)是SPM中一个小的分类。

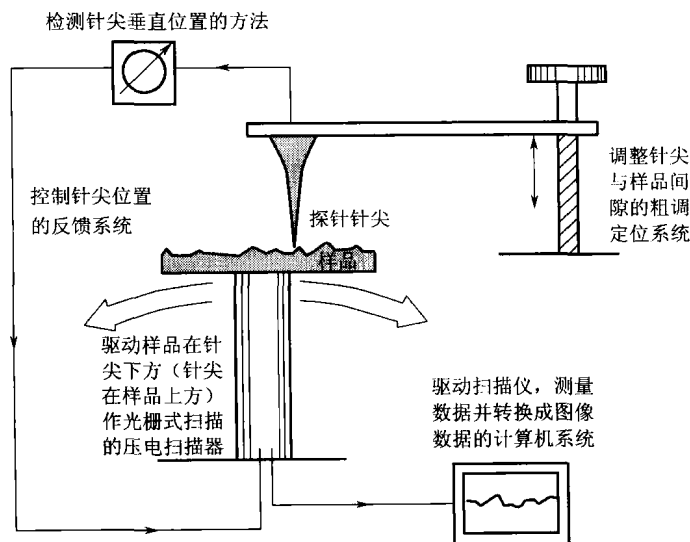


图 1-1 SPM 基本构成图

1.1 扫描隧道显微镜

扫描隧道显微镜(STM)是所有扫描探针显微镜的祖先,它是在1981年由Gerd Binnig和Heinrich Rohrer在苏伊士IBM实验室发明的。5年后,他们因此项发明被授予诺贝尔物理学

奖。STM 是第一种能够在实空间获得表面原子结构图像的仪器。

STM 使用一种非常锐化的导电针尖,而且在针尖和样品之间施加偏置电压。当针尖和样品接近至大约 $10 \text{ \AA}$ ^① 的间隙时,取决于偏置电压的极性,样品或针尖中的电子可以“隧穿”过间隙到达对方(见图 1-2)。由此产生的隧道电流随着针尖-样品间隙(以后简称针-样间隙)的变化而变化,故被用作得到 STM 图像的信号。上述“隧穿”效应产生的前提是样品应是导体或半导体,所以 STM 不能像原子力显微镜(AFM)那样对绝缘体样品成像。

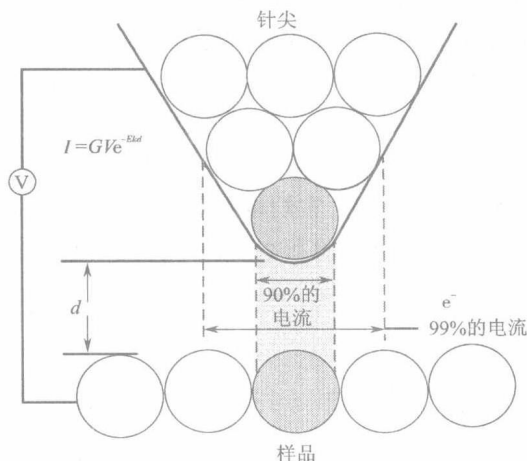


图 1-2 STM 的针尖-样品相互作用示意图

隧道电流是间距的指数函数。如果针尖与样品间隙($\text{\AA}$ 级尺度)变化 10%,隧道电流则变化一个数量级。这种指数关系给予 STM 很高的灵敏度,所得样品表面图像具有亚埃级的垂直精度和原子级的横向分辨率。

STM 可工作于两种扫描模式,即图 1-3 所示的恒定高度和恒定电流模式。

在恒高模式下,针尖在样品上方的一个水平面上运行,隧道电流随样品表面形貌和局域电子特性而变化。在样品表面每个局域检测到的隧道电流构成一数据组,进而转化成形貌图像。

在恒电流模式下,STM 的反馈控制系统通过调整扫描器在每个测量点的高度动态地保证隧道电流不变。比如,当系统检测到隧道电流增加时,就会调整加在压电扫描器上的电压来增加针-样间隙。如果系统把隧道电流恒定在百分之几的范围内,相应的针-样间隙的恒定范围是数百埃。

两种模式各有利弊。恒高模式扫描速率较高,因为控制系统不必上下移动扫描器,但这种模式仅适用于相对平滑的表面。恒电流模式可以较高的精度测量不规则表面,但比较耗

① 本书在编写过程中参考了大量外文资料,故沿用了其单位“埃”(Å)。

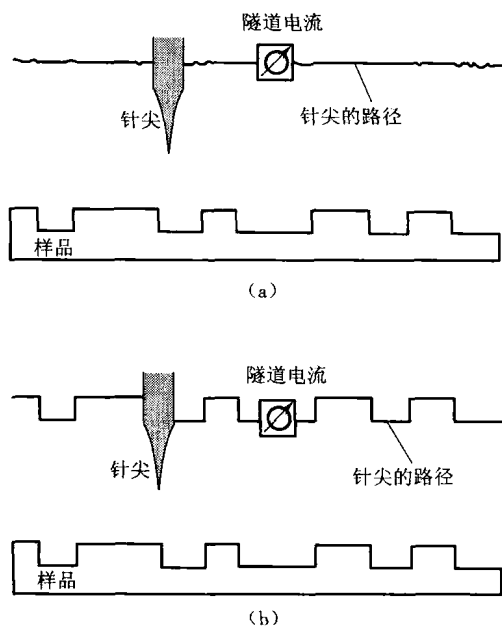


图 1-3 STM 恒高模式和恒电流模式的比较

(a)恒高模式 (b)恒电流模式

时。

近似地讲,隧道电流像表述样品的形貌,但更为精确地讲,隧道电流对应的是表面电子态密度。实际上,STM 检测的是在由偏压决定的能量范围之内,费米能级附近被充满和未充满的电子态的数量,或者说是具有恒定隧穿几率的曲面,而不是物理形貌。

当研究者的兴趣集中在形貌观察时,STM 对局域电子结构的敏感性会引出麻烦。比如,样品的一个区域被氧化,当针尖探测到此处,隧道电流会急剧下降。在恒电流模式下,STM 则驱使针尖移近样品以维持住预先设定的隧道电流值,这可能会导致针尖撞击样品表面。

然而对此可持乐观态度,因为 STM 对电子结构的敏感性可能有巨大的益处。其他获得样品电子特性的技术只能检测或综合分析来自几微米至几毫米区域的原始数据,而 STM 能够以原子分辨率探测电子特性。

1.2 原子力显微镜

原子力显微镜(AFM)针尖长为若干微米,直径通常小于 $100 \text{ \AA}$,被置于 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 长的悬臂的自由端。针尖和样品表面间的力导致悬臂弯曲或偏转。当针尖在样品上方扫描或样品在针尖下作光栅式运动时,探测器可实时地检测悬臂的状态,并将其对应的表面形貌像显示记录下来。原子力显微镜的研究对象除导体和半导体之外,还扩展至绝缘体。

下面讨论造成 AFM 悬臂偏转的几种力。在原子力显微术中,最常提到的是范德瓦尔斯

原子间作用力。范德瓦尔斯力与针-样间隙的关系如图 1-4 所示。

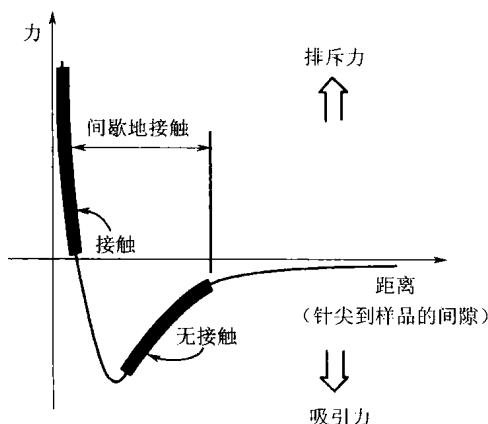


图 1-4 范德瓦尔斯力与针-样间隙关系曲线

图 1-4 中标出了两个区间:接触区间与非接触区间。在接触区间,悬臂距样品表面的距离保持在几个埃的范围,悬臂和样品间是排斥力。在非接触区间,上述间距保持在数十至数百埃的范围,相互间存在的是吸引力,这种吸引力来自长程范德瓦尔斯相互作用。

1.2.1 接触式 AFM

接触模式也被称为排斥力模式,AFM 针尖与样品有轻微的物理接触。针尖被固定在悬臂的端部,悬臂的弹性常数低于把样品表面原子约束在平衡位置的等效弹性常数。当扫描器驱动针尖在样品表面(或样品在针尖下方)移动时,接触力会使悬臂弯曲,从而适应形貌的变化。下面对照图 1-4 所示的范德瓦尔斯力曲线,较为详细地讨论接触式 AFM 的工作原理。

在曲线的右部,原子之间有很大的距离。随着原子逐渐接近,它们先是彼此吸引,这种吸引逐渐增加,直至产生原子电子云间的静电排斥。随着原子间的缝隙继续减小,静电斥力逐渐抵消掉一部分吸引力。当原子间缝隙达到约为化学键长时,原子间作用力变为零。若缝隙进一步变小,范德瓦尔斯力成为正值的排斥力,此时原子是接触的。

在排斥或接触区间,范德瓦尔斯力曲线的斜率非常大,所以,范德瓦尔斯斥力可以平衡掉任何试图强迫原子更为接近的力。在 AFM 中,这意味着当悬臂向样品推动针尖时,只能引起悬臂的弯曲,而不能使针尖原子更加靠近样品原子。即使是非常刚硬的悬臂在样品上施加强力,针尖与样品原子间的缝隙也不可能减少许多。但是,样品表面很可能变形(见 1.5.7 节纳米刻蚀技术)。

除上面谈到的范德瓦尔斯斥力,接触模式下的 AFM 还涉及两种力。由于通常环境下,在样品表面存在一层水膜,故而存在毛细力,另一种是悬臂自身存在的力。水膜延伸并包裹住针尖,就会产生毛细力,它具有很强的吸引作用(大约为 10^{-8} N),使针尖接触于样品表面,

毛细力的大小取决于针-样间隙。悬臂释放出的力很像是压缩弹簧产生的力,其大小和符号(排斥力或引力)取决于悬臂的偏转和弹性系数。1.6.2 节将详细讨论这些力。

针尖和样品一经接触,由于针-样间隙很难进一步压缩,并且假定水膜是均匀的,所以毛细力应该是恒定的。接触式 AFM 中变化的力是由悬臂释放出的力。由针尖施加在样品上的力是毛细力和悬臂力的合力,且必然与范德瓦尔斯斥力相平衡。施加在样品上的合力的大小从 10^{-8} N 到 10^{-7} N(此时悬臂脱离样品与水膜吸引针尖的作用近乎相等)。

大多数商品化的 AFM 利用光学技术检测悬臂的位置。图 1-5 是 AFM 激光束折射检测原理图。一束激光被悬臂折射到位置敏感探测器(PSPD),当悬臂弯曲时,投射在传感器上的激光光斑的位置发生偏移,PSPD 可以 $10\text{ \AA}$ 的精度测量出这种偏移。激光从悬臂到测量器的折射光程与悬臂臂长的比值是此种微位移测量方法的机械放大率,所以此系统可检测悬臂针尖的亚埃级垂直运动。

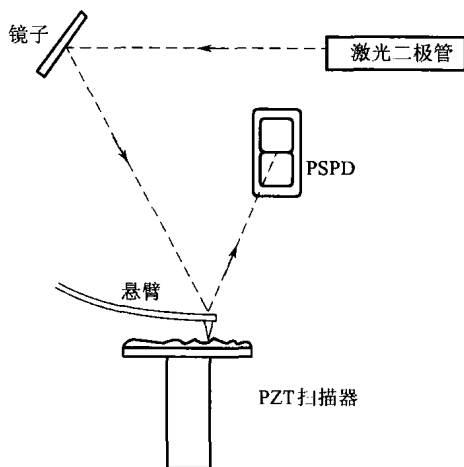


图 1-5 激光束折射检测原理图

检测悬臂偏转的方法还有干涉法和隧道电流法。一种特别巧妙的技术是采用压电材料来制作悬臂,这样可直接用电学法测量到悬臂偏转,故不必使用激光束和 PSPD。

AFM 检测到悬臂的偏转后,则可在恒高或恒力工作模式下获取形貌图像或图形文件。

在恒高模式下,扫描器的高度是固定的,悬臂的偏转变化直接转换成形貌数组。

在恒力模式下,悬臂偏转被输入到反馈电路,控制扫描器上下运动,以维持针尖和样品原子的相互作用力恒定。在此过程中,扫描器的运动被转换成图像或图形文件。

恒高模式常被用于获得原子级平整样品的原子分辨像。此时在所施加的力下,悬臂偏转和变化都比较小。在需要高扫描速率的变化表面实时观察时,恒高模式是必要的。

恒力工作模式的扫描速度受限于反馈回路的响应时间,但针尖施加在样品上的力得到很好的控制,故在大多数应用中被优先选用。

1.2.2 非接触式 AFM

非接触式 AFM (NC-AFM) 应用一种振动悬臂技术, 针尖与样品间距处于数十至数百埃的范围。此范围在图 1-4 所示的范德瓦尔斯力曲线中标注为非接触区间。

NC-AFM 是一种理想的方法, 因为在测量样品形貌过程中, 针尖和样品不接触或略有接触。如同接触式 AFM, NC-AFM 可以测量绝缘体、半导体和导体的形貌。在非接触区间, 针尖和样品之间的力很小, 一般只有 10^{-12} N。这对于研究软体或弹性样品是非常有利的。另一优点是像硅片这样的样品不会因为与针尖接触而引入污染。

另一方面, 由于作用力太弱, 与作用力大出几个数量级的接触工作模式相比, 力的测量是很困难的。此外, 用于 NC-AFM 的悬臂的硬度要大一些, 因为较软的悬臂会被吸引至样品而发生接触。上述较小的力值和较大的硬度共同导致 NC-AFM 的信号很弱, 故需要具有更高灵敏度的交流检测方法。

刚硬的悬臂在系统的驱动下以接近于共振点的频率 (典型值是 100 ~ 400 kHz) 振动, 振幅为数十至数百埃。这样在针尖接近样品表面时, 系统检测共振频率或振幅的变化。此方法具有亚埃级的垂直分辨本领, 与接触式 AFM 是一样的。

下面讨论悬臂的共振频率和样品形貌变化的关系。力的梯度可由图 1-4 所示的力与间隙的关系曲线的微分得到。共振频率随弹性系数的平方根变化, 而弹性系数又随悬臂所受的力的梯度变化。这样, 悬臂共振频率的变化反映力梯度的变化, 也反映针-样间隙或样品形貌的变化。

在 NC-AFM 中, 系统监测悬臂的共振频率或振幅并借助反馈控制器提升和降低扫描器, 同时保证共振频率或振幅不变, 与接触式 AFM 相同 (即恒力模式), 扫描器的运动转换成图像或图形文件。

NC-AFM 不会产生在接触式 AFM 多次扫描之后经常观察到的针尖和样品变质的现象。如前面所述, 测量软体样品时, NC-AFM 比接触式 AFM 更具优越性。对于刚性样品, 接触和非接触模式成像所得的图像看上去是一样的, 但在刚性样品表面存在若干层凝结水时, 图像则极不相同。工作在接触模式下的 AFM 会穿过液体层获得被液体淹没的样品表面图像。而非接触模式下的 AFM 只能对液体层的表面成像 (见图 1-6)。

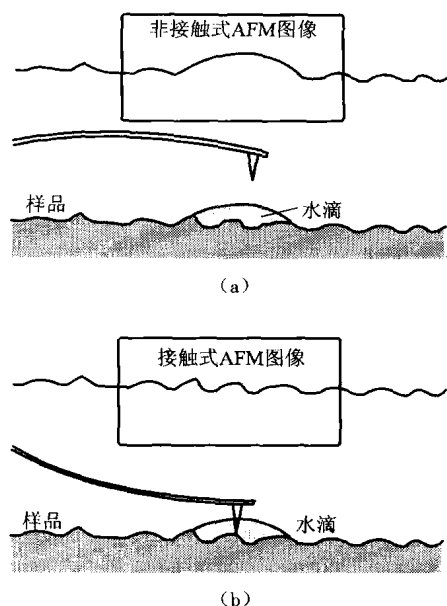


图 1-6 含水滴表面的接触和非接触 AFM 图像
(a)非接触式 (b)接触式

对于低弹性模量的样品, AFM 针尖在样品表

面的滑动会损伤样品。AFM 的另外一种工作方式——间断接触模式可克服此弊端。下面讨论有广泛用途的间断接触模式。

1.2.3 间断接触模式

间断接触式原子力显微镜(IC-AFM)与 NC-AFM 相类似,只是 IC-AFM 悬臂针尖更接近于样品,针尖的端部恰好触到或敲击到样品。IC-AFM 的工作区间也在图 1-4 中的范德瓦尔斯力曲线中标出。如同 NC-AFM, IC-AFM 悬臂振幅同样随针-样间隙变化,通过检测这种变化即可得到反映表面形貌的图像。

一些样品适合用 IC-AFM 而不是接触式 AFM 和 NC-AFM 来检测,因为 IC-AFM 限制了针尖和样品间的横向力(摩擦力或拖力),不大容易引起样品损伤。一般来说,对于大区域扫描,此时可能包含较大的形貌起伏,因此 IC-AFM 比 NC-AFM 更有效。总之,IC-AFM 克服了接触式 AFM 和 NC-AFM 的局限性,成为非常重要的分析方法。

1.3 磁力显微镜

磁力显微镜(MFM)可对样品表面磁力的空间变化成像。MFM 的针尖上镀有铁磁性薄膜,系统工作在非接触模式,检测针-样间变化的磁场力引起的悬臂共振频率的变化(见图 1-7),它可得到磁性材料中自发产生和受控写入的磁畴结构。

用磁力针尖获得的图像都包含着表面形貌和磁特性,哪一种效应起主要作用由针-样间隙决定,与范德瓦尔斯力相比,原子间磁力在较大的间隙时仍保留一定量值。如果针尖靠近表面,即处在标准的非接触模式工作区间,则图像主要含形貌信息。随着间隙增大,磁力效应变得显著。在不同的针尖高度下采集一系列图像是剥离两种效应的一种途径。

由 MFM 模式取得的硬盘磁记录结构图像如图 1-8 所示。

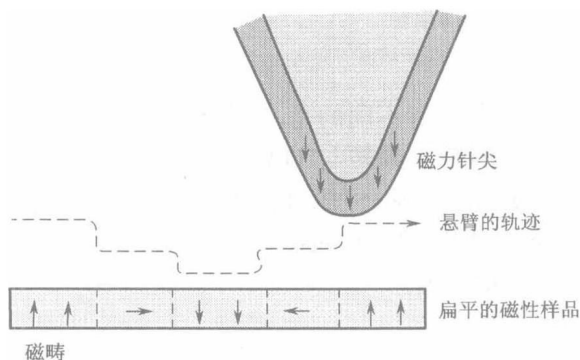


图 1-7 MFM 探测样品表面的磁畴

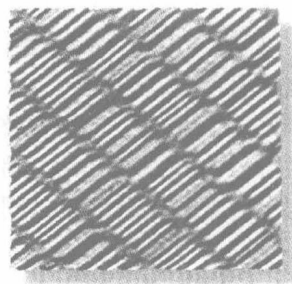


图 1-8 硬盘磁记录单元的 MFM 图像(视场尺度是 30 μm)

1.4 横向力显微镜

当 AFM 针尖扫描样品时,有一种作用于悬臂的平行于样品表面的横向力,它造成悬臂的横向偏移(或称之为扭转)。横向力显微镜(LFM)适用于研究非均质材料表面引起的摩擦力变化,还有助于得到边缘提升图像。

如图 1-9 所示,悬臂的横向偏转通常有两个原因:摩擦的变化和坡度的变化。在第一种情况下,针尖通过某些区域时受到较大的摩擦力,导致悬臂产生较大的扭转。在第二种情况下,悬臂遇到斜坡时也产生扭转。为了区分这两种原因,应该同时采集 LFM 和 AFM 图像。

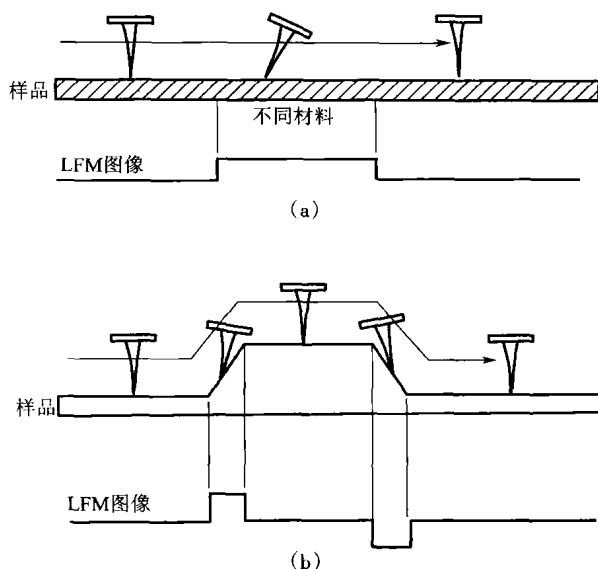


图 1-9 悬臂的横向偏转

(a)产生于摩擦力的变化 (b)产生于坡度的变化

如同 AFM, LFM 也使用 PSPD 检测悬臂的偏转。所不同的是, LFM 和 PSPD 同时检测悬臂的垂直偏转和扭转。图 1-10 说明了 AFM 检测垂直偏转与 LFM 检测横向偏转的差别。AFM 使用双象限 PSPD, 如图 1-10(a), 而 LFM 使用四象限 PSPD, 如图 1-10(b)。

将 AB 探测器信号之和与 CD 探测器信号之和相比较, 即可测量出悬臂的扭转程度。实际上, 四象限探测器可以同时给出 LFM 和 AFM 的数据。

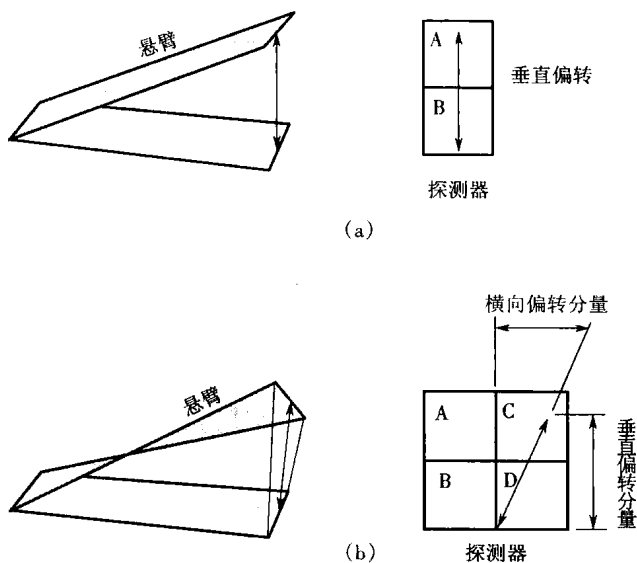


图 1-10 AFM 和 LFM 的 PSPD

(a)AFM 的 PSPD (b)LFM 的 PSPD

1.5 其他 SPM 技术

事实上,STM、接触式 AFM、NC-AFM、IC-AFM、MFM 和 LFM 是众多 SPM 技术中的一部分。大多数商品化的仪器均为模块化结构,只需在标配的镜体上更换或增添少量的硬件就可实现功能的增加或转换,有时也利用软件来改变工作模式。本节讨论一些其他的 SPM 技术。

1.5.1 力调制显微术

力调制显微术(FMM)是 AFM 成像技术的扩展,它可以确定样品的力学性能。像 LFM 和 MFM 一样,FMM 也可以同时采集形貌和材料性质的数据。

在 FMM 模式下,AFM 针尖以接触方式扫描样品,正向反馈控制回路保持悬臂的偏转处于恒定(如同恒定模式的 AFM)。此外,将一周期信号加在针尖或样品上,则由此信号驱动产生的悬臂调制振幅随样品弹性而变,如图 1-11 所示。

系统通过检测悬臂调制振幅的变化来形成力调制像,反映出样品弹性的分布。调制信号的频率设在数百赫兹,远高于反馈控制器设定的响应频率。因此可以区分开形貌和弹性信息,而且也可以同时采集到两种类型的图像。图 1-12 中左图是接触式 AFM 的碳纤维和高聚物复合材料的形貌像,右图是其 FMM 图像。

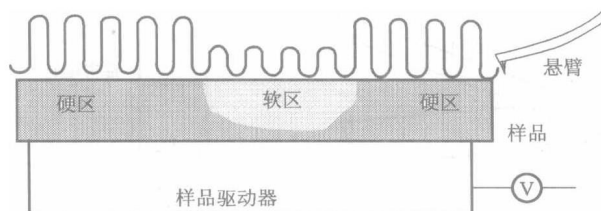


图 1-11 随样品表面力学性能改变的悬臂振幅

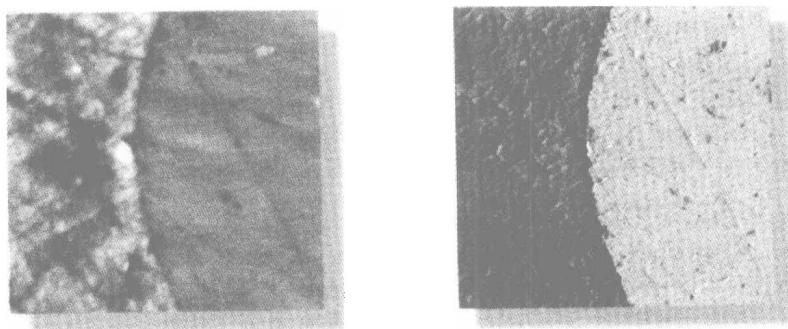


图 1-12 同时采集的碳纤维和高聚物复合材料的接触式 AFM(左)和 FMM(右)图像

1.5.2 位相检测显微技术

位相检测显微技术(PDM)也称为位相成像,是另外一种用于研究弹性、黏度和摩擦等表面特性面分布的技术。当仪器在振动悬臂模式下工作时,如非接触式 AFM、间断接触式 AFM 或 MFM 模式,都可以得到位相检测图像。在力调制工作模式,也可以采集位相检测信息。

位相检测就是测量悬臂振动驱动和振动输出信号之间的位相延迟(图 1-13),位相延迟的差别反映出样品表面力学性能的变化。

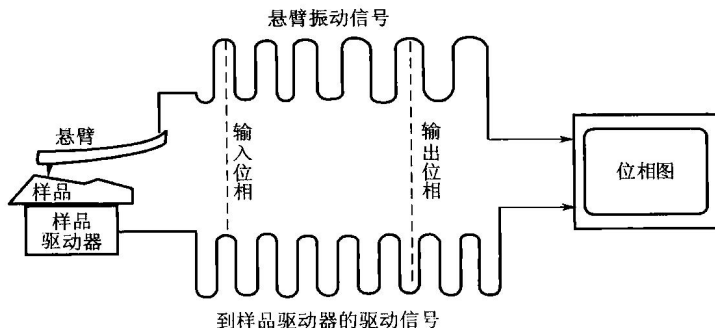


图 1-13 对应样品表面力学性能的位相延迟变化

系统的反馈回路工作在普通方式下,通过检测悬臂偏转或振幅的变化测量样品形貌。当采集形貌像时,位相延迟也被检测到,所以形貌像与材料特性被同时得到。位相检测的一项应用是利用 IC-AFM 在 NC-AFM 测量样品形貌的同时获得材料特性信息(详见 1.2.3 节)。对于这些样品,位相检测是除力调制显微技术外的另一种很有用的技术。

图 1-14 给出了胶带样品的非接触式 AFM 形貌像(左)和 PDM 图像(右)。PDM 图像提供了较形貌像更多的信息,揭示出胶带表面性能的变化。

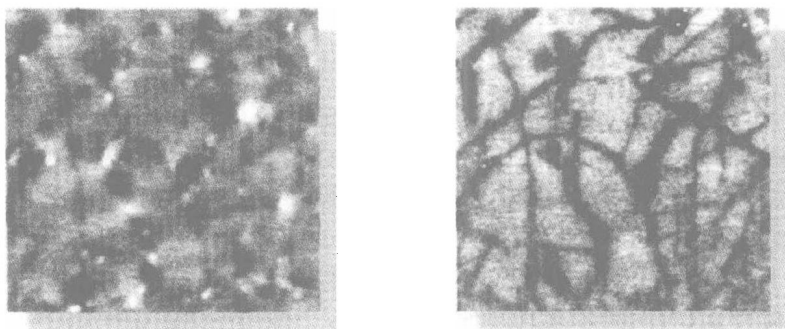


图 1-14 同时采集的胶带非接触式 AFM 形貌像(左)和 PDM 图像(右)

1.5.3 静电力显微技术

静电力显微技术(EFM)在针尖与样品之间施加电压,其悬臂在样品表面上方运动,不与样品相碰。当悬臂扫描至如图 1-15 所示的静电荷时,悬臂偏转。

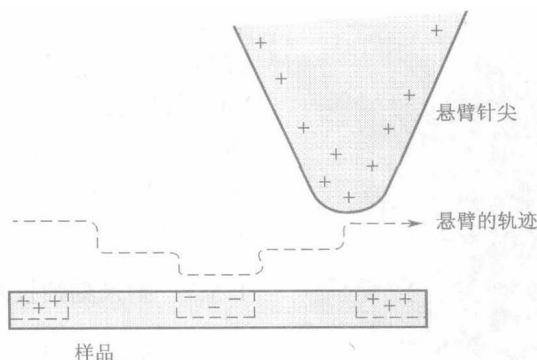


图 1-15 EFM 电荷畴结构的面分布像

EFM 可以显示出样品表面的局部电荷畴结构,与 MFM 显示样品表面的磁畴结构相似。正比于电荷密度的悬臂偏转幅度可以用标准的光束折射系统测量。EFM 用于研究表面电荷载流子密度的空间分布。例如,EFM 可以用于电子器件中电路静电场的分布测量,这种技术被称作电压探针,是以亚微米尺寸测量通电微处理芯片的有效工具。