

扫描力显微镜

The Scanning Force Microscopy (SFM)

白春礼 田芳

(中国科学院化学研究所 北京 100080)

【摘要】 本文在讨论 SFM 基本原理和针尖-样品相互作用基础上,详细介绍了近期 SFM 成像模式和技术的发展以及它们在表面研究中的应用。

【Abstract】 The principles of scanning force microscopy(SFM) are introduced in this paper,with the emphasis on the various interaction origins between tip and sample. The new developments of operation modes and techniques of SFM,as well as their applications in surface researches are also discussed in detail.

关键词:扫描力显微镜 原子力显微镜 应用 相互作用

Key words:Scanning Force Microscopy Atomic Force Microscopy Application Interaction

早在 1982 年,Binnig 和 Rohrer 等^[1]发明了扫描隧道显微镜(STM)—扫描探针显微镜(SPM)家族的第一位成员。它可在原子级分辨率水平上测量材料的表面形貌,使得对材料表面的定域表征成为可能。由此,发明者被授予 1986 年的诺贝尔物理奖。随着 STM 在表面科学和生命科学等研究领域的广泛应用,相继出现了许多同 STM 技术相似的新型扫描探针显微镜(SPM)。主要有,扫描力显微镜(SFM),扫描隧道电位仪(STP),弹道电子发射显微镜(BEEM),扫描离子电导显微镜(SICM),扫描热显微镜,光子扫描隧道显微镜(PSTM)和扫描近场光学显微镜(SNOM)等^[2~4],它们弥补了 STM 只能

直接观察导体和半导体的不足,可以极高分辨率研究绝缘体表面。SPM 不采用物镜来成像,相反,利用尖锐的传感器探针在表面上方扫描来检测样品表面的一些性质。不同类型 SPM 间的主要区别在于针尖的特性及相应针尖-样品间相互作用的不同。其中,对 STM 最重要的发展就是,1986 年原子力显微镜(AFM)的出现^[5],其横向分辨率可达 2nm,纵向分辨率为 0.1 Å。这样的横向、纵向分辨率都超过了普通扫描电镜的分辨率,但 AFM 对工作环境和样品制备的要求比电镜的要求少得多。以 AFM 为代表的 SFM 是通过控制并检测针尖-样品间的相互作用力,例如,原子间斥力,摩擦力,弹力,范德华力,磁力和静电力等,来分

析研究表面性质的。相应的扫描力显微镜有原子力显微镜(AFM),摩擦力显微镜(LFM),磁力显微镜(MFM)和静电力显微镜(EFM)等,它们统称为 SFM。

本文在讨论 SFM 的基本原理和针尖-样品相互作用基础上,将详细介绍近期 SFM 成像模式和技术的发展以及它们在表面研究中的应用进展。

1 SFM 的工作原理和操作模式

SFM 是使用一个一端固定而另一端装有针尖的弹性微悬臂来检测样品表面形貌或其它表面性质的。当样品在针尖下面扫描时,同距离有关的针尖-样品

将是构成未来新时代的基础。

世界上一些发达国家已投巨资,并组织在该领域有影响的科学家进行纳米科技研究。美、英、日、德等国家对纳米科技予以高度重视。美国真空学会成立了纳米科学与技术部。美国国家基金委员会把纳米科技列为优先支持的项目,另外美国与纳米科技有关的资助项目一半以上来自军方。英国政府在财力困难的情况下也制定了纳米技术计划,在机械、光学、电子学等领域遴选了八个项目进行研究。日本制定的关于先进技术开发研究规划中有十二个项目与纳米科技有关。其投资多达几十亿日元。德国汉堡大学应用物理系结构研究中心已投资一千万马克,准备建造一台世界一流的超高真空低温 STM,期望在研究磁单极的存

在性这一重要科学问题上有重要突破。

纳米科技的产业应用直接根植于基础研究,这与传统的技术发展规律不同,从基础到应用的转化是直接的,其转化周期将会更短。事实上,纳米科技的发展速度比原先人们估计的要快,有的已经实用化。纳米科技在计算机、信息处理、通讯、制造、生物、医疗和空间领域,尤其在国防工业上有巨大的发展前景。

正如前面在关于纳米科技的概念所述,纳米科技是在纳米尺度上对物质特性进行研究的基础上,最终利用这种特性来制造具有特定功能的产品,实现生产方式的飞跃。因而就基础研究而言,纳米科学有着诱人的前景。因为在纳米尺度上物质将表现出新颖的现象、奇特的效应和性质。而作为一门技术、纳米技术

将为人类提供新颖并具有特定功能的产品和装置。

因此,纳米科学技术充满着机会与挑战。而 STM 及其相关仪器 SPM 在这机会与挑战中必将获得更加广泛的应用。

4 结束语

纳米科技是未来高科技的基础,而科学仪器是科学研究中必不可少的实验手段。STM 及其相关仪器(SPM)必将在这场向纳米科技进军中发挥无法估量的作用。当纳米科技时代真正到来之际,“扫描探针显微镜在纳米科技中的应用”一文才可能最后写上休止符。

间相互作用力(既可能是吸引的,也可能是排斥的),会引起微悬臂的形变,也就是说微悬臂的形变可作为样品-针尖相互作用力的直接度量。将一束激光照射到微悬臂的背面,微悬臂将激光束反射到一个光电检测器,检测器不同象限接收到的激光强度的差值同微悬臂的形变量形成一定比例,参见图1。如果微悬臂的形变小于0.01nm,激光束反射到光电检测器后,变成了3~10nm的位移,足够产生可测量的电压差。反馈系统根据检测器电压的变化不断调整针尖或样品Z轴方向的位置,以保持针尖-样品间作用力恒定不变^[6]。

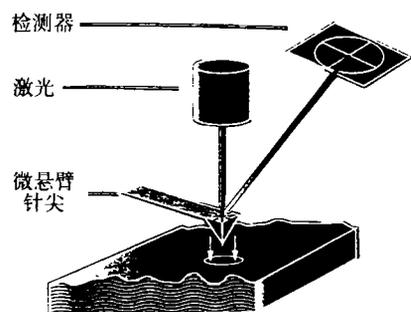


图1 SFM中微悬臂进行力检测的框图

SFM有三种不同的操作模式:接触式(Contact mode),非接触模式(Non-contact mode)和轻敲式(Tapping mode)。图2比较了SFM的不同操作模式。

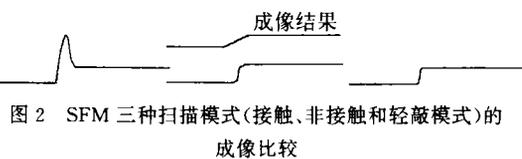
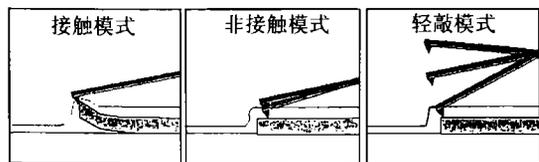


图2 SFM三种扫描模式(接触、非接触和轻敲模式)的成像比较

1.1 空气和液体中接触模式

在SFM常规接触模式中(图2),针尖始终同样品接触并简单地在表面上滑动。针尖-样品间的相互作用力是两者互相接触的原子中电子间存在的库仑排斥力^[7],其大小通常为 $10^{-8} \sim 10^{-11} \text{ N}$ 。AFM中,样品表面形貌图象通常是采用这种排斥力模式获得的。虽然接触模式通常可产生稳定、高分辨图象,但它在研究低弹性模量样品时也有一些严重缺

点。探针在样品表面上的移动以及针尖-表面间的粘附力有可能使样品产生相当大的变形并对针尖产生较大的损害,从而在图像数据中可能产生假象。

在大气条件下,大多数样品表面都吸附有一覆盖层(凝聚水蒸汽或其它污染物),一般有几纳米厚。当扫描探针接触这个吸附层时,毛细作用产生了一个凹面,表面张力使得微悬臂上的针尖向下进入这一吸附层。此外,针尖和样品上的静电荷也能引起额外粘附力,增加了作用在样品上的总力。同时,探针扫描移动时产生的压缩力和剪切力也有可能破坏样品,包括表面特征的移动或变形,严重影响AFM成像质量。将样品浸入液体中进行AFM操作可以克服与粘附力有关的问题(图3)。当探针在液体中以

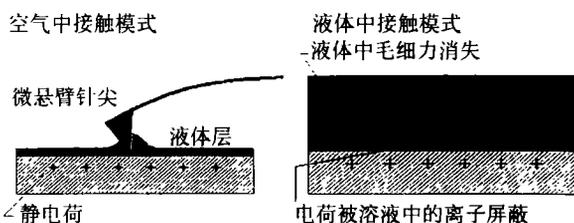


图3 空气和液体中SFM接触模式示意图

接触模式扫描,作用在样品上的力是低于在大气中操作的,这是因为液体中不存在了液体层或凹面,并且静电力也能被消散或屏蔽。但是,由于水合样品通常比干燥样品软,扫描探针仍然有可能引起样品的形变和移动,进而引起图像质量的降低和样品的损坏。另外,许多样品如半导体硅片,实际上是不能浸入液体的。

1.2 非接触模式

非接触模式是控制探针在样品表面上方5~20nm距离处扫描,探针始终不与样品表面接触,因而针尖不会对样品造成污染或产生破坏,避免了接触模式中遇到的一些问题。在非接触模式中,针尖-样品间相互作用力是很弱的长程力——范德华吸引力。由于吸引力要远小于排斥力,因此为了提高信噪比,必须在针尖上加一小的振荡信号,以便AC检测方式能够用来检测针尖-样品间较小的作用力。针尖和样品间距是通过保持微悬臂共振频率或振幅恒定来控制的。由于可以控制针尖完

全在表面吸附气体层上面或完全浸入吸附层内进行非接触扫描,因此接触模式中存在的毛细管力和静电力对作用在样品上力的影响是非常小的。这种非接触模式虽然增加了显微镜的灵敏度,但相对较长的针尖-样品间距使得分辨率要比接触模式的低。早期的激光力显微镜就是采用这种非接触操作模式。实际上,由于针尖很容易被表面吸附气体的表面压吸附到样品表面,造成图象数据不稳定和对样品的破坏。因此,非接触模式的操作实际上是比较困难的,而且非接触模式通常不适合在液体中成像。

1.3 轻敲模式成像技术的发展

轻敲模式是介于接触模式和非接触模式之间的成像技术。扫描过程中微悬臂也是振荡的并具有比非接触模式更大的振幅(大于20nm),针尖在振荡时间断地与样品接触。由于针尖同样品接触,分辨率通常几乎同接触模式一样好;但因为接触是非常短暂的,因此剪切力引起的对样品的破坏几乎完全消失,克服了常规扫描模式的局限性。轻敲模式在大气中成像,是利用压电晶体在微悬臂共振频率附近驱动微悬臂振荡。当针尖不与表面接触时,微悬臂是高振幅“自由”振荡的。当振荡的针尖向下移向表面直到它轻轻接触表面,由于微悬臂没有足够空间去振荡,其振幅将减少;然后,针尖反向向上振荡,微悬臂有更多空间去振荡,同时振幅增加(接近空气中自由振荡振幅),反馈

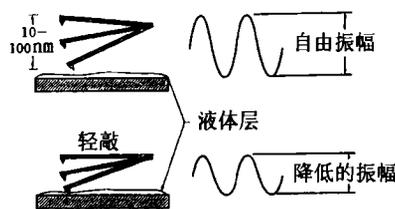


图4 SFM轻敲模式示意图

系统根据检测器测量的这个振幅,通过调整针尖-样品间距来控制微悬臂振幅,也即作用在样品上的力恒定,从而得到样品的表面形貌。图4给出了轻敲模式AFM示意图,针尖-样品间的作用力通常为 $10^{-9} \sim 10^{-12} \text{ N}$ 。它可以对柔软、易脆和粘附性较强的样品成像并对它们不

产生破坏。

轻敲模式避免了针尖粘附到样品上以及在扫描过程中对样品的损坏。不同于接触、非接触模式,轻敲模式的针尖在接触表面时,它有足够振幅来克服针尖-样品间的粘附力。同时,由于作用力是垂直的,表面材料受横向摩擦力、压缩力和剪切力的影响较小。轻敲模式同非接触模式相比较(图5)的另一优点是大而且线性的操作范围,使得垂直反馈系统高度稳定,可重复进行样品测量。轻敲模式所使用的微悬臂较长,一般为225 μm ,而接触模式所使用的微悬臂一般为125 μm 。

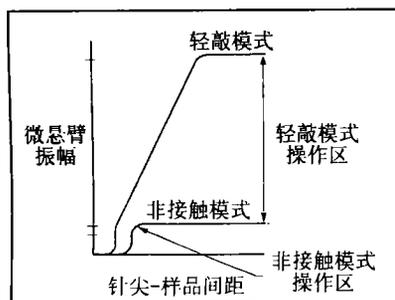


图5 轻敲模式和非接触模式工作区间的比较

在液体中进行轻敲模式操作同样具有类似的优点。由于液体介质能够减小微悬臂的垂直共振频率,同空气中轻敲模式不同,整个液体池被振荡来驱动微悬臂振荡。当针尖开始接触样品,微悬臂的振幅也将减少,类似于空气中轻敲模式操作。同空气中操作相比,振荡的微悬臂进一步减少了样品上的横向摩擦力和剪切力,避免了接触模式中经常引起的样品损伤^[8]。在液体轻敲模式操作中测量的稳定成像力已经达到小于200pN。它在接近生理条件下对生物分子的应用研究正在不断增多^[9-12]。

要获得高分辨、高质量图象,微针尖同样品表面接触又不破坏被扫描表面是关键因素。在AFM对软、粘性或易脆样品研究中,轻敲模式成像技术的发展是至关重要的。对那些易损伤而且与基底结合松散或者用其它AFM技术成像困难的样品,用轻敲模式可以进行高分辨表面形貌成像。尤其是,轻敲模式克服了与摩擦、粘附、静电力有关的问题,解决了困扰常规AFM扫描方法的困难。用这种方法也成功地获得了相当多样品的高分辨图象,包括:硅表面、薄膜、金属和绝缘体、感光树脂、高聚物和生物样品

等。轻敲模式在大气或液体中对这些样品表面的研究,极大地扩展了SFM技术在新材料表面的应用领域。

在液体介质中,利用AFM轻敲模式对由水合溶液转移到固体表面的小颗粒和生物分子进行成像,可分辨出表面上的单个颗粒。表面上侧向力的消失减少了探针对这些颗粒自然位置的改变;同时,存在的液体也保持了吸附颗粒的本质及水合状态,因此可以研究溶剂条件对吸附层结构的影响。常规AFM接触模式可用来成像那些同表面牢固接触的颗粒,例如颗粒与基底的结合是共价键的。然而,当胶体颗粒吸附到一个固体表面时,它们之间是通过静电力、范德华力、疏水相互作用等非共价联系的,因此,具有更高的横向流动性。接触模式AFM中,探针的滑动能在表面产生一个侧向力,它能推动任何接触到的吸附颗粒,影响了成像颗粒在表面上的自然排列。液体中采用轻敲模式成像,振荡的探针在成像过程中同表面间的不连续接触消除了样品表面上的任何侧向力,允许对吸附颗粒成像而不在表面上移动它们。图6所示图象是首先采用AFM接触模式在小范围内对吸附在云母上的正

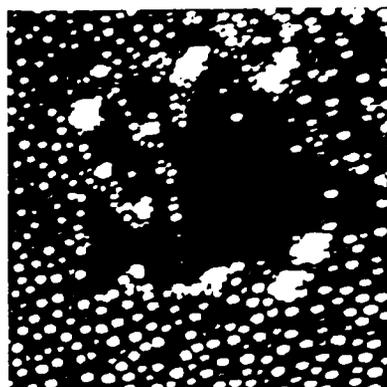


图6 在接触模式成像后,用液体轻敲模式对聚苯乙烯乳胶颗粒表面成像得到的AFM图象(扫描范围是7 μm ×7 μm)

电荷聚苯乙烯乳胶颗粒进行扫描,之后在水中同一区域利用轻敲式进行大范围成像。从中可清晰看到,接触模式扫描破坏了颗粒的吸附层,吸附颗粒在扫描区域边缘聚集,作为基底的云母暴露出来;而在采用轻敲模式长时间扫描过程中,没有观察到任何由于探针作用引起的吸附颗粒的移动或破坏。

既然吸附的颗粒不受振荡针尖的影响,这就有可能使用液体轻敲模式去观

察表面上的颗粒排列是如何受体系性质的影响,例如液体环境中的离子强度对颗粒的影响。这样的信息同胶体材料的制备和蛋白产物的纯化有直接关系。利用这个技术,也可以研究吸附层是如何随时间生长的,并观察液-固界面的吸附层是如何不同于干燥状态的。

对于一定的实验体系,即便是轻敲模式,吸附颗粒也可能粘附到探针上。例如,氮化硅探针在水中有轻微负电荷表面,它同正电荷的胶乳颗粒间有静电吸引作用,从而得到的是双针尖假象。如果用氨基硅烷修饰探针表面,硅烷上的氨基使修饰针尖带正表面电荷^[13],针尖上的正电荷抑制了与正电荷颗粒的吸附,能够极大地延长AFM在空气和流体中对吸附胶体颗粒的稳定成像时间。

2 摩擦力显微镜(LFM)和化学力显微镜(CFM)

LFM是在AFM表面形貌成像基础上发展的新技术之一。材料表面中的不同组份很难在形貌图象中区分开来,而且污染物也有可能覆盖样品的真实表面。LFM恰好可以研究那些形貌上相对较难区分,而又具有相对不同摩擦特性的多组份材料表面。

图7示出了LFM扫描及检测的示意图。一般接触模式AFM中,探针在样品表面以X、Y光栅模型扫描(或样品在

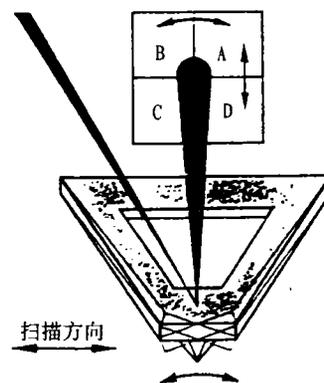


图7 摩擦力显微镜(LFM)原理示意图

探针下扫描)。聚焦在微悬臂上的激光反射到光检测器,由表面形貌引起的微悬臂形变量大小是通过计算激光束在检测器四个象限中的强度差值(A+B)-(C+D)得到的。反馈回路通过调整微悬臂高度来保持样品上力的恒定,也就是微悬臂形变量恒定,得到的结果是样品表

面上的三维图象。而在横向摩擦力技术中,探针在垂直于其长度方向扫描。检测器是根据激光束在四个象限中, $(A+C) - (B+D)$ 这个强度差值来检测微悬臂扭转弯曲程度的。而微悬臂的扭转弯曲程度是随着表面摩擦特性的变化而增减的(增加摩擦力导致更大的扭转)。激光检测器的四个象限可以实时分别测量并记录形貌和横向力数据。

LFM 是检测不同表面组成变化的 SFM 技术。它可以识别聚合混合物、复合物和其它混合物的不同组份间转变,鉴别表面有机和其它污染物以及研究表面修饰层和其它表面层覆盖程度。它在半导体、高聚物沉积膜、数据贮存器,以及对表面污染、化学组成和摩擦特性的应用观察研究是非常重要的。

LFM 一个新的应用是作为化学力显微镜(CFM),针尖用一种化学物质官能化并在样品上扫描,用来检测探针上物质同样品表面上那些物质间的粘附性质的不同。Frisbie 等^[14]利用一般的 SFM,改变针尖的化学修饰物质,对同一扫描区间进行扫描得到了反转的表面横向力图象。这一研究开拓了侧向力测量的新领域,可以研究聚合物和其它材料的官能团微结构以及生物体系中的结合、识别等相互作用。

3 磁力显微镜(MFM)和静电力显微镜(EFM)

作为由 AFM 发展起来的 MFM,对于研究磁性物质来源,是一种很有力的实验技术。它具有高分辨率、不破坏样品及样品无需特别制备等特点。近年来,在研究磁记录体系、磁性薄膜磁畴结构以及铁磁学基本现象等方面^[15],MFM 越来越显示出其重要性和优越性。

AFM 针尖在与样品表面接触时,相互作用力主要是短程的原子间斥力,而将针尖离开样品表面一段距离时,磁力和静电力等长程作用力就可能被检测出来。MFM 的工作原理同非接触模式的 AFM 相似,只是 MFM 采用的是磁性针尖;而且操作时,针尖与样品间距要比 AFM 非接触模式中的间距(5~20nm)大,一般为 10~200nm。磁针尖与样品所产生的漏磁场(或者说样品中的磁畴结构)相互作用而感受到磁力,改变了微悬臂的弯曲程度并使得微悬臂的共振频率发生变化,从而改变其振幅和相位。微悬

臂振荡的振幅或相位角同对应的微悬臂压电驱动器信号,同时被 EEM(Extender Electronics Module)记录,它们之间的差值变化用来表征样品的磁结构。实验过程中一般将针尖在其长度方向磁化,因为在这种条件下,样品与远离针尖尖端部分的相互作用力是小的,微悬臂只对样品与针尖尖端部位磁荷之间的相互作用作出单极响应,能获得分辨率较高的图象。

当振动的磁性针尖在样品表面扫描时,采用的是 Interleave 方法(图 8)。探针首先同样品表面接触进行第一次扫

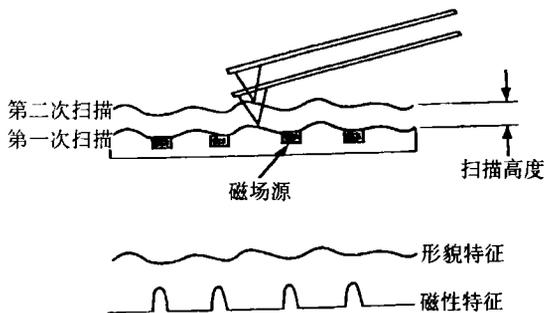


图 8 磁力显微镜(MFM)原理示意图

描。这时,力检测器检测的是针尖和样品间的短程原子间斥力。在这条表面 AFM 形貌扫描线被记录后,磁针尖在第一次扫描时的位置进行第二次扫描,此时针尖离开样品表面一定的距离,一般为 100nm 左右,并在第二次扫描时保持不变,力检测器检测的是作用在针尖上的长程磁力。因此,对应扫描样品的位置,就可同时获得样品表面的形貌图及其磁力图象。由于 MFM 可同时获得样品表面的 AFM 形貌图和磁力梯度图,因而可直接观察样品表面结构与磁畴结构的对应关系。同其它表征样品磁畴结构的方法相比,MFM 具有更高的分辨率,能够观察到样品表面的微磁结构。

EFM 同 MFM 类似,使用带有电荷的探针,也是采用 Interleave 方法扫描。由于样品上方电场梯度的存在,探针与表面电场间的静电力会引起受迫振动的探针的共振频率发展变化,反馈装置根据探针尖端振动情况的变化而改变加在 Z 轴压电控制装置上的电压,从而使微悬臂共振频率保持恒定,用 Z 驱动电压的变化来表征样品表面电场分布的信息。EFM 已应用到半导体器件的分析和

设计研究领域中。

4 检测材料不同组份的特殊 SFM 技术

随着 SFM 技术及其应用的不断发展,在 SFM 形貌成像的基础上发展起来多种特殊 SFM 技术。这些技术利用不同的表面性质,能够很好地区分开在形貌上差别很小或是不可检测的材料表面上的不同组份。

4.1 力调制(Force Modulation)技术

力调制成像研究表面上的不同硬度(刚性)和弹性区域的 SFM 技术^[16]。可以验证复合物、橡胶和聚合物混合物中不同组份间的转变,测定聚合物的均匀性,对硬基底上的有机材料的成像,检测集成电路上的剩余感光树脂以及验证不同材料的污染情况等。

图 9 给出了力调制成像示意图。使用力调制技术,探针在扫描时垂直方向有一小的振荡(调制),比扫描速度快很多。作用在样品上力的大小被调制在设置点附近,这样作用在样品上的平均力同简单

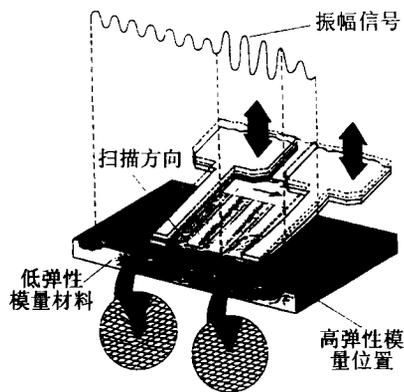


图 9 力调制技术原理示意图

接触模式是相等的。当探针与样品接触时,表面阻止了微悬臂的振荡并引起它的弯曲。在相同作用力条件下,样品上的刚性区域的形变要比柔性区域的小很多。也就是说,对于垂直振荡的探针,刚性表面对其产生更大的阻力,随之微悬臂的弯曲就较大。微悬臂形变幅度的变化就是对表面相对刚性程度的测量。形貌信息(直流或非振荡形变)与力调制数据(AC 或振荡形变)是同时采集的。

早期的力调制是在压电扫描器 Z 方向加一调制信号来诱导垂直振荡。这个技术虽然是成功的并且得到广泛应用,但它也有一些缺点。额外的高频调制信号加到压电扫描器上后,能激发扫描器的机械共振,这有可能减少形貌和力调制图象的质量。新发展的力调制系统包含一个额外的压电调制控制器来分别独立调制针尖位置,减少了扫描器共振的乱真激发。结合 Interleave 扫描,力调制技术对样品刚性的鉴别具有相当高的灵敏度,并且减少了调制和形貌中假象存在的可能性。

使用力调制技术在那些形貌特征差别不明显的表面上进行相对表面弹性的观察研究,是具有重要作用的。它在聚合物、半导体、材料组成和其它领域有着巨大的应用前景。

4.2 相位成像(Phase Imaging)技术

相位成像技术的发展极大地促进了 AFM 轻敲模式的应用,可提供其它 SFM 技术所不能揭示的,关于表面结构纳米尺度的信息。它是通过轻敲模式扫描过程中振动微悬臂的相位变化来检测表面组分、粘附性、摩擦、粘弹性和其它性质的变化。对于识别表面污染物、成像复合材料中的不同组分以及区分表面粘性或硬度不同的区域都是非常有效的。同使用轻敲模式的 AFM 成像技术一样快速、简便,并具有对柔软、粘附、易损伤或松散结合样品进行成像的优点。

轻敲模式 AFM 中,微悬臂被压电驱动器激发到共振振荡。振荡振幅用来作为反馈信号去测量样品的形貌变化。在相位成像中,微悬臂振荡的相角和微悬臂压电驱动器信号,同时被 EEM(Extender Electronics Module)记录,它们之间的差值用来测量表面性质的不同(如图 10 所示)。可同时观察到轻敲模式形貌象和相位图象,并且分辨率与轻敲

模式 AFM 的相当。相位图也能用来作为实时反差增强技术,可以更清晰观察表面结构并不受高度起伏的影响。

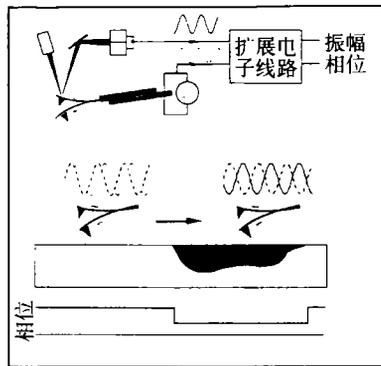


图 10 相位成像的原理示意图

大量结果表明,相位成像对于相对较强的表面摩擦和粘附性质变化是很灵敏的^[16]。目前,虽然还没有明确的相位反差与材料单一性质间的联系,但是实例证明,相位成像在较宽的应用范围内可给出很有价值的信息。它弥补了力调制和 LFM 方法中有可能引起样品破坏和产生较低分辨率的不足,可提供更高分辨率的图象细节,有时能够提供其它 SFM 技术所揭示不了的信息。相位成像技术在复合材料表征、表面摩擦和粘附性检测以及表面污染发生过程的观察研究中的广泛应用表明,相位成像定会在纳米尺度上研究材料性质起到重要作用。

5 结束语

以上对 SFM 成像模式和技术上的最新进展作了简要介绍。SFM 同其它分析技术相比较,有着许多优势。不仅可以进行高分辨的三维表面成像和测量,还可以对材料的各种不同性质进行研究。同时,轻敲模式的发展为在许多表面上进行弱相互作用力和更高分辨成像提供

了可能。随着 SFM 的不断发展和完善, SFM 在科学技术研究领域将发挥越来越大的作用。

6 参考文献

- 1 G. Binnig, H. Rohrer, Gerber, et al., *Appl. Phys. Lett.*, 40(1982), 178.
- 2 白春礼, 扫描隧道显微术及其应用, 上海科技出版社, 1992, p91.
- 3 白春礼, 商广义, *现代科学仪器*, 4(1994), 3.
- 4 白春礼, *物理通报*, 10(1995), 1.
- 5 G. Binnig, C. F. Quate and C. Gerber, *Phys. Rev. Lett.*, 56(1986), 930.
- 6 C. L. Bai, in *Scanning Tunneling Microscopy and Its Application*, Springer-Verlag, 1995.
- 7 J. Israelachvili, *Intermolecular and Surface Forces*, Academic Press, 1992.
- 8 E. Delain, et al., *Microscopy, Microanalysis, Microstructures*, 3(1992), 457.
- 9 M. Bezanilla, B. Drake, E. Nudler, et al., *Biophys. J.*, 67(1994), 2454.
- 10 M. Guthold, M. Bezanilla, D. A. Erie, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 91(1994), 12927.
- 11 C. Bustamante, D. A. Erie and D. Keller, *Curr. Opin. Struct. Biol.*, 4(1994), 750.
- 12 H. G. Hansma, I. Revenko, K. Kim, et al., *Nucl. Acids Res.*, 24(1996), 713.
- 13 C. A. Johnson, A. M. Lenhoff, *J. Colloids Interf. Sci.*, 1995.
- 14 C. D. Frisbie, A. Rozsnyai, A. Noy, M. S. Wrighton, C. M. Lieber, *Science*, 265(1994), 2071.
- 15 P. Grutter, *MSA Bulletin*, 24(1994), 416.
- 16 P. Maivald, H. J. Butt, S. A. C. Gould, et al., *Nanotechnology*, 2(1991), 103.
- 17 Y. Kim, C. M. Lieber, *Science*, 257(1992), 375.

(上接第 114 页)

B 尺寸 M 模块支架和 256 通道多路复用继电器

新型 HPE2250A 是 B 尺寸的 M 模块支架, HP 公司通过把工业标准的 M 模块技术移植到 B 尺寸 VXI 产品系列而降低了价格。工程师可把多至 4 个 M 模块通过 HPE2250A 放到一块 B 尺寸

VXI 插卡上。去年 6 月, HP 公司已推出了由 9 种 M 模块组成的产品线, 它们都带有 VXI 即插即用驱动程度。该支架也支持 150 种以上其它工业标准 M 模块。

新的 HPE8462A 256 通道多路复用继电器是使用非锁存衔铁继电器的单槽 C 尺寸 VXI 插卡, 电压可达到 250V, 功率可达到 125W。它创新的体系结构允

许用户以多种拓扑方式进行编程, 比如 256×1, 128×1, 64×1 和 32×1。在一块插卡上可以混合使用上述拓扑方式, 并以 2 线、3 线或 4 线方式进行配置。HP 公司开发的 HPQUIC 功能与可选的带弯角-插入连接器的终端块一起, 可在插卡上插拔终端块或在主机上插拔插卡时节省用户的时间和精力。