

原子力显微术研究进展*

程志海[†] 郑志月 裘晓辉^{††}

(国家纳米科学中心 中国科学院纳米标准与检测重点实验室 北京 100190)

2015-03-18收到

[†] email: chengzh@nanoctr.cn

^{††} email: xhqu@nanoctr.cn

DOI: 10.7693/wl20160307

Recent progress of atomic force microscopy

CHENG Zhi-Hai[†] ZHENG Zhi-Yue QIU Xiao-Hui^{††}

(Key Laboratory of Standardization and Measurement for Nanotechnology, Chinese Academy of Sciences, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China)

摘要 原子力显微术是微纳米尺度实空间形貌成像与结构表征的关键技术之一。近年来,原子力显微术衍生发展出了一系列令人瞩目的功能化探测模式和新技术。文章从以下两个方面论述了原子力显微术的前沿进展:(1)原子力显微术的功能化探测模式及其在微纳米尺度物性研究与测量以及微纳加工等领域的应用;(2)原子力显微术自身在更高精度、更高分辨率、更快速度、更多功能等方面的进展及在基础和应用研究领域中的应用。文章还展望了原子力显微术的下一步发展方向和正在不断扩展的研究领域。

关键词 先进原子力显微术, 功能化微悬臂, 纳米尺度表征与测量

Abstract Atomic force microscopy (AFM) is one of the key techniques for real-space imaging and structure characterization at the micro- and nanometer scale, and many remarkable new functions and techniques have been developed in recent years. Two special areas will be presented here: the various detection modes of AFM and their applications in the nanoscale research and measurement of physical properties, and the development of AFM techniques and their applications in basic and applied science. A brief comment will also be given on the further development of AFM probe techniques and their expanding application areas.

Keywords advanced atomic force microscopy, functional cantilever, nanoscale characterization and measurement

1 引言

原子力显微术(atomic force microscopy, AFM)是从20世纪80年代发展起来的一种表面探测技术,其基本原理是利用带针尖的微悬臂探测针尖与样品间相互作用的大小和性质会随着针尖与样品间距离的变化而变化,从而可以获得样品

的不同信息,实现检测目的。AFM凭借其检测对象广泛,不受导电性能的限制,适用性强(在大气、真空、液体等环境下均可操作)以及超高的分辨率等优势,目前已发展成为基础科学及工业应用研究中获得微纳米尺度物质结构和信息的重要工具,在物理、化学、材料、生命以及工程等诸多领域都有重要的应用^[1]。本文重点论述AFM的先进功能化探测模式及其在相关研究领域中的应用,并讨论其最新技术发展和应用等。

* 国家自然科学基金(批准号:21173058/B030506)资助项目;中国科学院“引进杰出技术人才”(技术百人计划)项目,中国科学院“卓越青年科学家”项目,中国科学院科研装备研制项目

2 原子力显微术功能化探测模式

传统AFM的基本工作模式主要包括接触模式(contact mode)、振幅调制模式(又称轻敲模式, amplitude modulation 或 tapping mode)、频率调制模式(又称非接触模式, frequency modulation 或 noncontact mode)。当今, AFM基于三种基本工作模式并结合特殊微悬臂已衍生发展出了一系列先进功能化探测模式, 用于研究微纳米尺度下样品的各种物理性质等。下面从力学、电学、磁学、热学、光学等物性研究以及微纳加工等领域, 对AFM技术与方法的最新进展做一简要介绍。

2.1 力学测量

在纳米材料和器件的诸多性质中, 力学性质不仅面广而且也是评价纳米材料和器件的主要指标, 是纳米材料和器件得以真正应用的关键。目前关于AFM的微纳米力学研究, 已在纳米材料力学性质、纳米摩擦等领域取得了较大进展。在AFM接触模式下, 研究样品材料微纳尺度内的形貌和力学性质(包括杨氏模量、硬度、粘弹性、粘附力等)时, 其探测精度可达皮牛顿量级, 为避免该模式操作导致的针尖尖端和样品的磨损问题, 实验中通常采用弹性常数较小、尖端比较硬的金刚石探针^[2]。对于大分子力学性质的研究, 采用尖端较钝或平面型(采用化学或生物修饰)的探针, 可同时进行横向摩擦力的测量, 并可实现针尖样品在微纳米尺度下材料摩擦学性质的研究。最新发展起来的接触共振(contact resonance)等模式, 为样品微区力学性质的研究提供了一个更加方便直接、准确的方法, 具体将在多频AFM技术部分进行介绍。

2.2 电学测量

如果微悬臂是用导电材料制成或外层镀有导电金属层, 则探针可作为一个移动电极来施加电压和探测电流, 从而来研究材料的微区电学性质, 该技术通常称为导电原子力显微术(conduc-

tive-AFM, C-AFM)。利用导电原子力显微术可以探测样品的表面电荷、表面电势、表面电阻、微区导电性、微区介电特性、非线性特性等, 这对材料与器件的失效分析, 探测材料和器件中的局域积累电荷, 定量分析器件中界面的静电势分布等有重要的意义。

在接触模式下, 随着光电材料、热电材料等新兴材料的成熟与电子技术的发展, 导电原子力显微术可以采用这些新兴材料来提供激励, 替代传统的直接在针尖上施加一个交流电压的激励方式, 去探测样品的微区电学信号, 或者对样品进行可控电荷注入等方式去实现探测功能, 大大扩展了原子力显微术的功能性。

在动态非接触模式下, 最具发展潜力的电学测量模式是扫描开尔文探针显微术(scanning Kelvin probe microscopy, SKPM), 其工作原理是当导电针尖接近样品表面时, 由于两者功函数的不同, 针尖一样品间会产生静电相互作用, 即接触电势差(contact potential difference, CPD), 从而实现样品探测, 主要有电压调制SKPM和 $F(V)$ 曲线两种工作模式。一般而言, 静电相互作用力与偏压的平方成正比, $F(V)$ 曲线的抛物线顶点对应的偏压即为样品与导电探针间的接触电势差, 而对应的力 F 则为补偿静电力后的针尖一样品间相互作用力。电压调制的SKPM的核心技术是在样品与针尖之间同时施加交流和直流偏压, 通过反馈回路调节直流偏压, 使得交流偏压引起的微悬臂振动的振幅达到最小, 此时的直流偏压就是接触电势差, 因此该模式可以结合多频AFM新技术进行单次扫描, 实现样品形貌、表面功函数等信号的探测。基于多频AFM技术的SKPM, 通常是结合轻敲模式和非接触模式实现的, 此时除存在测量样品形貌的微悬臂振动外, 还存在交流偏压引起的微悬臂振动。在实际应用中, 要仔细考虑两个振动间的相对频率和振幅等参量, 避免相互串扰。目前SKPM的空间分辨率和能量分辨率得到了显著提高, 可以在原子尺度上以几个meV的能量分辨率对材料表面的接触电势差进行成像测量, 具有单电子灵敏度, 可以检测量子点的单电

子充放电等。原子尺度的空间分辨率和单电子灵敏度使得 SKPM 成为了物理、化学和材料等研究领域的重要工具。在动态模式下，还可以通过导电原子力探针将微波或射频信号加载在探针与样品之间，进一步实现对包括电容、阻抗以及微分电容和微分电阻等在内的样品微区电学性质进行研究，这就是最近发展起来的一种功能化 AFM 技术。

2.3 磁学测量

磁性纳米结构和材料在高密度磁存储、自旋电子学等领域有着广泛的应用前景，高空间分辨率的磁成像和磁测量技术将有利于推动磁性纳米结构和材料的研究。基于扫描探针及其相关技术，发展出一系列纳米磁性成像与测量的技术和方法，包括磁力显微术、磁交换力显微术、扫描霍尔显微术、扫描超导量子干涉器件显微术、扫描磁共振显微术以及自旋极化扫描隧道显微术等。

磁力显微术(magnetic force microscopy, MFM)，是实现磁性材料表面微区磁结构测量的重要技术，但在测量中由于磁场势的矢量性以及样品和针尖的磁结构状态会相互影响，因此 MFM 测量结果的清晰解读是非常困难的。为解决这一问题，将磁场测量微器件，如超导量子干涉器件(SQUID)及霍尔型器件等，集成在微悬臂探针上，即扫描 SQUID 显微术和扫描霍尔显微术(scanning Hall probe microscopy, SHPM)，可用于

样品表面微区磁场分布的定量化图像分析，空间分辨率可达几十纳米，并可进行微区磁化性能曲线测量，实时磁现象的动态测量等。这几种磁探测技术获得的图像分辨率一般为几十纳米，可以用来研究铁磁样品的磁畴结构等。如果想进一步研究磁畴结构内部的原子自旋排列，就需要能够在原子尺度下实现畴结构和单个原子的磁成像，可通过自旋极化扫描隧道显微术(spin polarized-STM, SP-STM)、磁交换力显微术(magnetic exchange force microscopy, MExFM)、以及磁共振力显微术(magnetic resonance force microscopy, MRFM)等来实现。2013 年，基于 qPlus 型原子力传感器的 MExFM，利用强磁各向异性的金属 SmCo 针尖，实现了反铁磁绝缘体 NiO(001)表面镍原子的自旋有序结构成像，测量得到的针尖-样品原子间交换相互作用强度为 ~ 1 meV，衰减常数为 ~ 18 pm^[3]。磁共振力显微术是具有三维空间分辨能力的磁共振技术与 AFM 的结合，基本原理如图 1(a)所示，可在原子尺度上实现三维样品(如蛋白质等生物大分子)的空间成像，具有单自旋的探测精度^[4]，还可以作为量子比特的读出器件，用于量子计算、存储等量子工程学中，但通常需要比较苛刻的低温和真空环境等。

近几年来，基于金刚石氮空位色心(NV center)的光探测磁共振技术(optically detected magnetic resonance, ODMR)发展迅速(基本原理如图 1(b)所示)，并通过与 AFM 技术结合，可以实现纳米

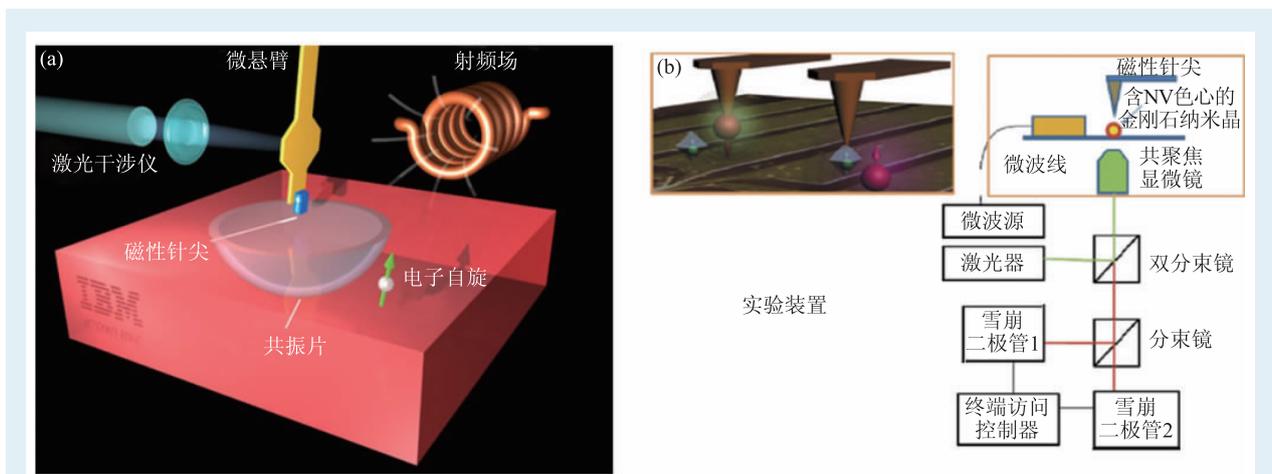


图1 (a)MRFM原理图；(b)基于金刚石NV色心的AFM光探测磁共振技术原理图

级的高空间分辨以及单电子自旋甚至是单个核自旋的超高探测灵敏度^[5]。光探测磁共振技术是基于光学检测的电子自旋共振技术，其原理是利用共聚焦显微镜来检测NV色心自旋依赖的荧光强度。在AFM探针尖端嵌入含有NV色心的金刚石纳米晶粒，当探针尖端逼近样品表面时，NV色心的能级会受样品

磁场的影响而发生塞曼劈裂。当探针的激励微波频率与NV色心的电子自旋共振(ESR)频率相一致时，NV色心的荧光强度会显著下降。通过监测NV色心荧光强度，并利用锁相环技术控制微波频率，使得其随针尖扫描时始终处于ESR状态，记录下针尖位置与相应的ESR频率，再利用ESR频率和磁场的相互关系，得到磁场的位置像。基于金刚石NV色心的AFM技术，是发展和研究高密度磁存储、自旋电子学、量子技术应用等的新技术，将在量子工程学，化学与材料科学，以及生物和医疗科学等研究领域有着广泛的应用前景。

2.4 热学测量

目前，微纳米尺度下的热物性研究受到了极大的挑战：一方面，许多热物性的基础概念性问题不清楚，如微观尺度下非平衡态的温度如何定义等；另一方面，传统测试系统由于自身精度限制，很多热物性参数都无法直接测量，因此，无论是微纳尺度下热传导等的理论机制研究，还是微纳电子学和能源器件中的热传导、热耗散、热转换以及新型纳米结构热电材料等应用领域的研究，都迫切需要发展出一种能够在微纳米尺度上测量与表征材料热物性的实验手段。

将原子力显微术与热学功能化(测温、加热等)微悬臂探针技术结合的扫描热显微术(scanning thermal microscopy, SThM)，可以实现微纳米尺度下的热物性测量(包括局域温度、热导、原子尺度热耗散等)。SThM的技术核心是将温度测量元件如热电偶或电阻型温度传感器(如铂电阻)

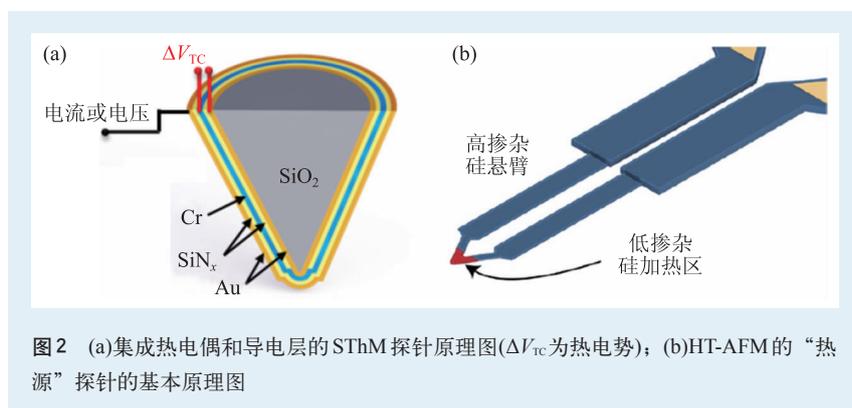


图2 (a)集成热电偶和导电层的SThM探针原理图(ΔV_{TC} 为热电势); (b)HT-AFM的“热源”探针的基本原理图

等，通过复杂的微加工技术集成到AFM微悬臂探针上并通过外部电子学部分实现温度测量。通过将加热元件集成在微悬臂探针上，则可制成纳米级的“热源”探针，实现局域加热控温功能，即高温加热型AFM(high temperature AFM, HT-AFM)，如图2所示。目前，HT-AFM通常利用的是微悬臂尖端的局域低掺杂技术，其加热升温速率最高可达600000 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，最高温度可达1000 $^{\circ}\text{C}$ ，为了确定高温热源探针的温度，每个探针都需要仔细校准。HT-AFM技术还可以用于研究非均匀样品的局域物化性质，例如共聚物或纳米复合材料的局域相变(玻璃化、结晶化等)温度等。进一步将导电探针技术与热学探针技术相结合，可以实现与温度依赖的电学性质研究，如纳米结构材料的热电性质，原子/分子尺度的电热转换等^[6]。对微纳米尺度的热效应进行利用，可以为微纳米尺度研究提供新的维度和平台，如利用HT-AFM能够将样品局域加热升华脱附的特点，进一步与质谱(mass spectroscopy, MS)技术相结合，将可以在大气环境下实现微纳米尺度的样品成分分析，非常值得关注^[7]。

2.5 光学测量

突破光学衍射极限实现纳米级的光学成像与探测，一直是光学技术发展的前沿。2014年诺贝尔化学奖授予了突破光学衍射极限的超分辨光学显微成像技术，包括受激发射损耗显微术、光敏定位显微术、随机光学重建显微术、饱和结构照明显微技术等。将AFM与光学技术结合起来，可

以研究微纳米尺度下的光学现象和进行光谱探测，其中最常见的是扫描近场光学显微术(scanning near-field optical microscopy, SNOM)。

最近发展起来一些基于AFM的超高分辨光学技术，如散射型近场光学显微术(scattering- SNOM, s-SNOM)、纳米红外光谱技术(nanoIR 或 AFM-IR)在纳米光学、等离子体光学等方面有重要作用^[8]。如图3所示，s-SNOM技术是将入射光聚焦到外层镀有光滑金属层的AFM探针尖端，由于探针与样品之间的近场相互作用，在针尖尖端出现纳米聚焦效应，从而影响并改变了背散射光，通过在AFM扫描样品形貌的同时，收集并分析背散射光可以得到超高分辨率的光学图像。AFM-IR是利用光热诱导共振(photothermal-induced resonance, PTIR)将具有高空间分辨率、纳米级定位和成像功能的AFM与红外光谱技术结合，使红外光谱的空间分辨率提高至100 nm以下，从而突破了光学衍射极限，能够给出样品纳米尺度下的样品化学与结构信息，使得纳米尺度红外光谱测试成为可能^[9]。在AFM-IR中，使用连续可调脉冲红外光源照射样品，样品分子吸收特定波长的红外

辐射产生热量，从而引发样品快速热膨胀，使接触样品的AFM微悬臂探针产生共振振荡，振荡波以铃流的形式衰减，采用傅里叶变换法对铃流进行分析，即可获得振动的振幅和频率，通过建立微悬臂的振幅与红外光源波长的关系，可得到局部吸收光谱。将红外光源调整为单波长，可以实现特定波长下同步的样品表面形貌和红外光谱吸收成像，提供超高分辨率的样品组分分布。AFM-IR可以广泛用于软物质研究中，如聚合物共混物、电纺纤维、细胞、细菌、淀粉样聚集体等。

2.6 微纳加工技术

随着器件小型化和高集成度的快速发展，微电子工业的芯片制造工艺逐渐向10 nm甚至单纳米尺度逼近时，传统的电子束曝光(electron beam lithography, EBL)技术和极紫外光刻(extreme ultraviolet lithography, EUV)技术已难以满足未来技术的发展需求，亟需发展一种能在纳米尺度实现高分辨率、高稳定性、高重复性和大吞吐量且价格适宜的曝光技术。

原子力显微术作为一种具有纳米级甚至原子级空间分辨率的表面探测表征技术，其在微纳加工领域的应用为单纳米尺度的器件制备提供了新的思路和契机，具有广阔的应用前景^[10]。在过去的几十年中，基于AFM平台发展出的微纳加工技术得到更广泛的应用，尤其是局域热蒸发刻蚀技术和低能场发射电子的刻蚀技术(如图4所示)，可以在大气环境下成功实现纳米尺度的图案加工，并可及时对图案进行原位形貌表征，设备简单且使用方便。AFM局域热蒸发刻蚀技术已经在高聚物(PPA)分子表面成功实现了线宽达8 nm的三维图形刻蚀，且硅基上的转移图案线宽可达20 nm以下^[11]。在真空环境下，利用模板在表面直接沉积材料实现微纳米图案加工的模板加工技术，避免了涂胶、除胶以及暴露大气等污染过程。通过将模板集成到AFM微悬臂上，可以实现基于AFM的纳米刻蚀技术，可以在特定样品区域进行

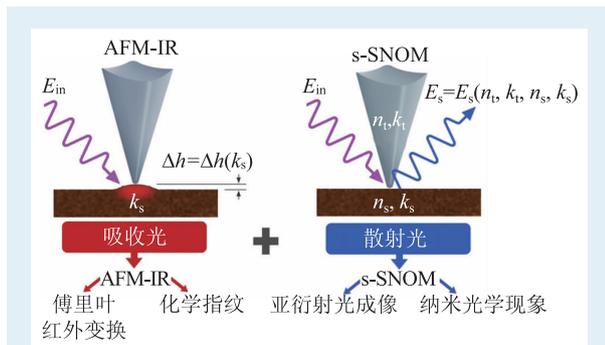


图3 AFM-IR和s-SNOM的基本工作原理

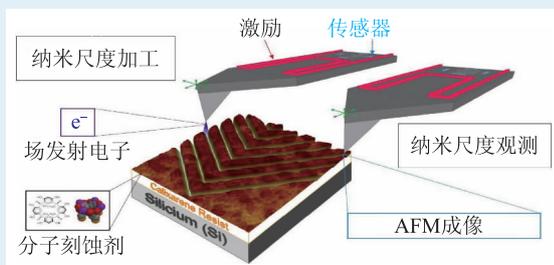


图4 低能场发射电子的刻蚀技术

微纳加工图案化，如制备电极等，这将在环境敏感材料的物性研究等领域具有重要应用前景。

在微纳米尺度上对微悬臂的激励和检测方式是多种多样的，可利用如压电效应、电容效应、热双金属片效应、压阻效应等。目前，利用微纳加工手段将微悬臂的激励装置和形变检测装置都直接集成一体，成为自激励、自检测式阵列化探针，它们的应用大大提高了SPL技术的通量，使得实现高效率大面积的纳米级高分辨率刻蚀成为了可能。

3 先进AFM技术发展

原子力显微术不仅在功能化以及相关技术结合方面的研究有了许多进展，而且AFM本身也在朝着更高精度、更高分辨、更快速度、更多功能等多个方面不断发展。

3.1 qPlus型AFM技术

qPlus型AFM技术是使用石英音叉型力传感器代替传统的硅悬臂传感器，其中石英音叉的一个臂固定在基座上，而另一个自由悬臂和固定在其顶端的探针在压电陶瓷激励下以设定的恒定振幅振动，通过压电效应检测悬臂振动信号，具有恒频率偏移和恒针尖高度两种扫描成像模式。qPlus型AFM技术具有很多传统原子力显微术不可比拟的优势，例如：(1)石英音叉悬臂的高弹性系数使得探针可以在亚埃振幅下工作，从而大幅提高了扫描成像时起主要贡献的化学短程力的探测灵敏度，可获得极高分辨的AFM图像；(2)石英音叉共振频率随温度变化很小，大大降低了热漂移问题；(3)石英音叉传感器体积较大，容易粘上不同材料和性质的针尖或功能微纳器件，使其具有更强的功能拓展性；(4)此AFM技术是基于压电效应来检测信号，不需要引入激光，避免了

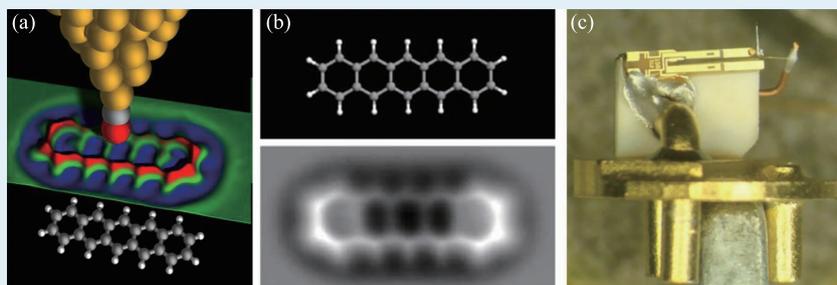


图5 (a)基于qPlus型AFM技术的探针实现分子化学结构成像的原理图；(b)并五苯分子的化学结构模型与对应的AFM图像；(c)国家纳米科学中心研制的qPlus型原子力传感器的光学显微镜照片

激光产生的热效应，适用于在极低温下工作。目前已有多个研究组在此技术上取得了成果，如基于qPlus型AFM技术的SKPM，可以区分单个原子的不同带电状态以及对单个分子内的电荷分布进行成像等^[12]。如图5所示，基于恒针尖高度的qPlus型AFM技术，利用一氧化碳分子修饰的针尖实现了分子化学结构的超高分辨以及分子内共价键和分子间相互作用的成像等^[13]。

3.2 光热激励技术

在AFM轻敲模式中，通常采用压电陶瓷的机械激励方法，使微悬臂探针在其共振频率或其附近振动。此方式简单易行，但并不能提供一个干净、稳定且不依赖于频率的激励，而是依赖于压电陶瓷与微悬臂探针的机械耦合以及整个AFM探头部分的复杂机械共振行为，尤其对于液体环境下的AFM影响更为严重，很容易产生假象等。因此，引入了光热激励技术，利用另一束聚焦激光束的热形变效应来激励微悬臂，并通过调节激光功率(大小和频率)来控制微悬臂探针的振幅和频率，很好地克服了传统压电陶瓷激励的困扰，探测振幅可以降到几个埃的量级，从而能够探测短程力，实现原子分辨，具有重要而广泛的应用^[14]。

3.3 快速AFM技术

通常的AFM扫描速度较慢，不能满足许多动态现象的研究需求，快速AFM技术(high speed AFM, HS-AFM)的核心限制因素是微悬臂探针的

自然带宽，其在真空、大气及液体环境下分别是几赫兹，几千赫兹和几万赫兹。因此，在液体环境下更容易实现 HS-AFM，但还需要具有高带宽(兆赫兹级)的低噪音、跨阻型放大器，需要更快的锁相解调时间来降低单个扫描中单个像素点的停留时间，需要光热激励技术和快速扫描器以及信号处理系统等。目前，HS-AFM 的扫描速度已达到视频速度，Kodera 等人利用 HS-AFM 以前所未有的时间分辨率对沿肌动蛋白细丝运动的肌浆球蛋白-V 直接进行了观察^[15]。

3.4 多频 AFM 技术

多频 AFM (multifrequency AFM, MF-AFM) 技术，简单来说就是微悬臂在多个频率下振动，并用来探测样品性质的一大类 AFM 技术，包括频带激励 (band excitation)、双频追踪 (dual resonance frequency tracking, DRFT)、边频带探测 (sideband detection)、双模式 (bimodal) 以及微分法 (dip-df method) 等^[16]。下面以研究样品力学性质中用到的接触共振技术为具体例子，对多频 AFM 技术进行简单介绍。

接触共振 (contact resonance) 技术的基本原理，是当微悬臂探针与样品接触时，微悬臂探针的共振频率会发生变化，在接触模式下进行样品形貌扫描的同时，通过压电陶瓷激励微悬臂探针或样品实现小振幅高频共振，采用锁相环共振频

率追踪 (PLL frequency tracking)、扫频 (frequency sweep) 以及频带激励和双频追踪技术，测量其共振频率和品质因子，与传统的接触模式相比，可以减小扫描过程中的针尖和样品磨损，增加导电原子力探针与样品的电学接触等。针尖—样品接触可以用 Kelvin—Voigt 力学模型来描述，如图 6 所示，其中弹簧和阻尼器分别代表样品的硬度(弹性)和能量耗散(粘性)，样品硬度越高则接触共振的频率越高，样品粘性越大则能量耗散越大，对应的品质因子则越小，并可以进一步根据标准力学模型计算出样品的弹性模量 (elastic modulus) 和损耗模量 (loss modulus)。在调幅-调频模式 (AM-FM mode) 下，也可以研究样品的粘弹性等性质，利用两个不同频率的激励信号来激励微悬臂振动，其中低频的振动信号采用振幅调制模式来获得样品形貌，而高频的振动信号采用频率调制模式来获得共振频率和振幅，分别反映了样品的硬度(弹性)和能量耗散(粘性)。此外，DRFT 技术还可以解决由于多铁材料中存在反平行畴区，使得 PFM 的锁相环回路不稳定的问题等。MF-AFM 技术是 AFM 技术发展的前沿核心，在材料、生物、纳米力学等许多领域具有重大应用前景，如实现材料亚表面甚至是细胞内部纳米颗粒的成像等^[17]。

4 结束语

原子力显微技术作为微纳米尺度下的“眼和

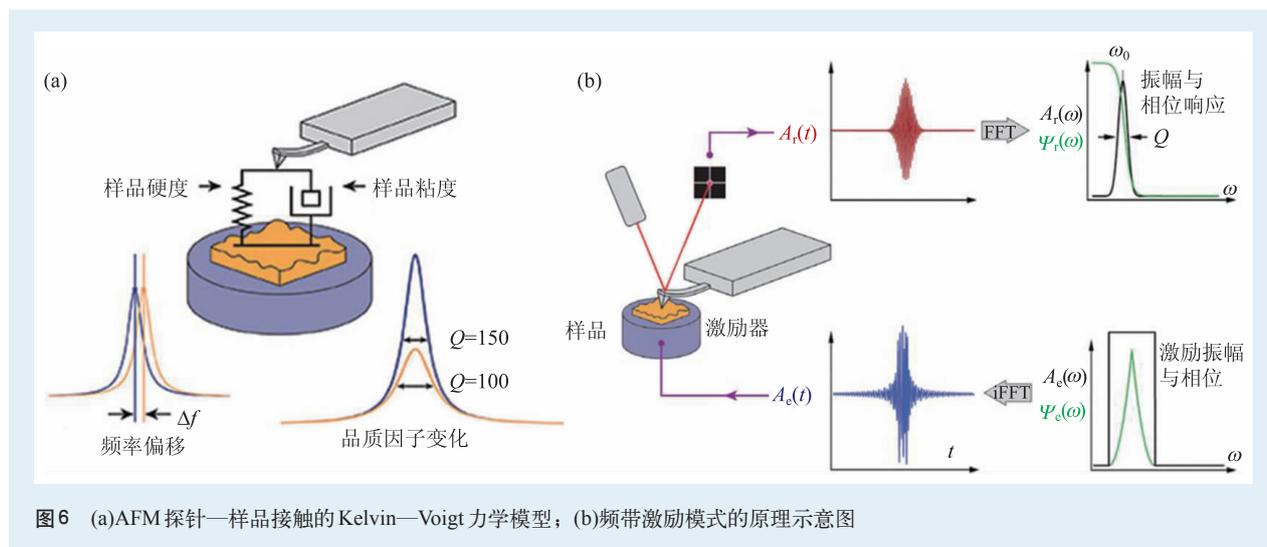


图6 (a)AFM 探针—样品接触的 Kelvin—Voigt 力学模型；(b)频带激励模式的原理示意图

手”，原则上说任何宏观表征与测量手段都可以与之相结合，实现微纳米级的空间分辨率。因此，原子力显微术在物理学、化学、材料科学、生命科学以及工程技术等许多领域都具有非常广阔的发展和应用空间。国内在先进原子力显微技术及其应用方面的研究还相对比较薄弱，这需要

我们付出更多努力，在相关技术方法探索、仪器发展以及理论完善等方面做出自己的贡献。通过本文介绍的原子力显微术最新技术及其在功能化探测方面的新进展，也可以为相关领域的研究者基于先进原子力显微技术开展前沿研究工作提供线索和思路。

参考文献

- [1] Bhushan B. Springer Handbook of Nanotechnology: Scanning Probe Microscopy. Third edition, 2010
- [2] López-polín G, Gómez-Navarro C, Parente V *et al.* Nature Physics, 2015, 11: 26
- [3] Pielmeier F, Giessibl F J. Phys. Rev. Lett., 2013, 110: 266101
- [4] Rugar D, Budakian R, Mamin H J *et al.* Nature, 2004, 430: 329
- [5] Balasubramanian G, Chan I Y, Kolesov R *et al.* Nature, 2008, 455: 648
- [6] Lee W, Kim K, Jeong W *et al.* Nature, 2013, 498: 209
- [7] Ovchinnikova O S, Kjoller K, Hurst G B *et al.* Analytical Chemistry, 2014, 86: 1083
- [8] Chen J N, Badioli M, González P A *et al.* Nature, 2012, 487: 77
- [9] Katzenmeyer A M, Chae J, Kasica R *et al.* Advanced Optical Materials, 2014, 2: 718
- [10] Pires D, Hedrick J L, Silva A D *et al.* Science, 2010, 238: 732
- [11] Garcia R, Knoll A W, Riedo E. Nature Nanotechnology, 2014, 9: 577
- [12] Mohn F, Gross L, Moll N *et al.* Nature Nanotechnology, 2012, 7: 227
- [13] Gross L, Mohn F, Moll N *et al.* Science, 2009, 325: 1110
- [14] Labuda A, Cleveland J, Geisse N A *et al.* Microscopy and Analysis, 2014, 28(3): 21
- [15] Kodera N, Yamamoto D, Ishikawa R *et al.* Nature, 2010, 468: 72
- [16] Garcia R, Elena T, Herruzo E T. Nature Nanotechnology, 2012, 7: 217
- [17] Tetard L, Passian A, Venmar K T *et al.* Nature Nanotechnology, 2008, 3: 501

读者和编者

订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》
——<物理>四十年集萃

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所
帐号：112 501 010 400 056 99
(请注明《物理》编辑部)
咨询电话：010-82649266；82649277
Email: physics@iphy.ac.cn

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠《岁月留痕——<物理>四十年集萃》一本(该书收录了从1972年到2012年在《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏)。

希望读者们爱上《物理》!

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

(1) 邮局汇款

收款人地址：北京603信箱，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

(2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

