

基于 qPlus 技术的扫描探针显微学研究进展

陈鹏程, 仇君, 袁秉凯, 程志海, 裘晓辉*

国家纳米科学中心纳米表征研究室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: xhqi@nanoctr.cn

2012-11-20 收稿, 2013-01-25 接受, 2013-06-06 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2012CB933001)和国家自然科学基金(21173058)资助

摘要 不同于扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM), 原子力显微镜(atomic force microscope, AFM)主要通过探测针尖和样品间的相互作用力获得样品表面信息, 不需要导电的样品, 可以研究比 STM 更为广泛的样品体系, 自发明以来迅速成为基础科学和应用研究领域一种强有力的工具. 近几年发展起来的基于 qPlus 技术的非接触式原子力显微镜(qPlus-noncontact AFM, qPlus-NC-AFM), 通过关键部件原子力传感器的改进, 进一步拓展了原子力显微镜的探测能力, 从而在许多研究方向上取得了重要突破. 本文介绍了 qPlus-AFM 的基本工作原理及其在基础科学研究领域中的最新研究进展, 并对其进一步的发展进行了展望.

关键词

扫描探针显微镜
原子力显微镜
非接触原子力显微镜
qPlus 探针技术
音叉型原子力传感器

目前, 扫描探针显微镜技术, 尤其是扫描隧道显微镜(scanning tunneling microscope, STM)和原子力显微镜(atomic force microscope, AFM), 已经发展为基础科学及应用科学研究中获得原子尺度物质结构和信息的重要工具. 自 1982 年 STM 发明以来, 由于其具有实空间中原子级横向和纵向分辨率, 很快得到了广泛应用, 并在很多研究方向取得了丰硕成果. STM 通过检测电流信号获得样品的表面信息, 只能研究导电样品. AFM 通过检测样品原子与探针之间的相互作用力信号来获得样品表面信息, 可以研究更为广泛的体系. 1991 年, Albrecht 等人^[1]引入动态非接触式 AFM(noncontact dynamic AFM, NC-AFM 或 DFM)技术, 使得 AFM 技术得到了快速发展. 1995 年, Giessibl 研究组^[2]利用动态原子力显微镜获得了硅表面的原子分辨图像. 随后在众多研究小组的共同努力下, 仪器性能被不断改进, 现在利用 AFM 已经可以获得几乎所有材料表面的原子分辨图像^[3,4].

近几年, Giessibl 发明的 qPlus 技术得到了迅速发展, 使得非接触原子力显微镜 NC-AFM 空间分辨率

获得了很大的提升^[4]. qPlus 技术的核心是使用石英音叉型力传感器代替传统的硅悬臂传感器. 石英音叉的悬臂弹性系数很大(~ 1800 N/m), 使得石英音叉传感器的针尖可以在亚埃振幅下工作, 从而大幅提高了短程力的探测灵敏度, 进而获得分子内的原子分辨^[5]. 另外, qPlus 技术还具有以下几方面优势: (1) 石英音叉基于石英晶体的压电效应来检测信号, 不需要引入激光, 避免了激光产生的热效应, 适用于在极低温下工作; (2) 沿特定晶体方向切割的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) qPlus 使用导电针尖, 可同时获得 STM 电流信号和 AFM 力信号, 通过力信号和隧道电流信号对比能获取更多样品表面信息; (4) 石英音叉传感器体积远远大于传统的硅悬臂传感器, 容易粘上不同材料和性质的针尖或微器件, 使其具有更强的功能拓展性.

1 qPlus NC-AFM 原理及仪器

1.1 qPlus NC-AFM 工作原理

动态模式原子力显微镜主要有振幅调制原子力

引用格式: 陈鹏程, 仇君, 袁秉凯, 等. 基于 qPlus 技术的扫描探针显微学研究进展. 科学通报, 2013, 58: 2360-2366

Chen P C, Zhang J, Yuan B K, et al. Research progress of qPlus scanning probe technique (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 2360-2366, doi: 10.1360/972012-1511

显微镜(AM-AFM)和频率调制原子力显微镜(FM-AFM, NC-AFM)两种工作模式. 目前高分辨 AFM 图像一般是使用 FM-AFM 在超高真空环境下获得的. 这是因为对于 AM-AFM, 在超高真空下探针的高 Q 因子会大大降低仪器带宽^[1], 使得获得一副图像的时间太长, 热漂移等因素会显著降低仪器的分辨率. qPlus 型非接触原子力显微镜(qPlus-AFM)使用石英音叉制成的 qPlus 原子力传感器代替硅悬臂探针, 显微镜主体部分和传统非接触频率调制原子力显微镜基本相同, 其基本工作原理如图 1 所示.

qPlus 传感器的石英音叉的一条悬臂固定在基座上, 另一条自由悬臂和固定在其顶端的探针在压电陶瓷激励源的激励下以共振频率和设定的恒定振幅振动. 由于压电效应, 恒定振幅振动着的悬臂会输出一个简谐振动的电压信号. 当针尖靠近样品表面, 样品与针尖的相互作用会改变悬臂简谐振动的振动频率, 输出包含有样品信息的电压信号. 输出电压信号经放大器放大后, 和预设的参考信号经过乘法器运算后获得相对于参考信号频率 f_0 的频率改变量 Δf (对应于力梯度), 经低通滤波后通过 PI 控制模块运算输出 Δf 信号. 同时 Δf 也作为电压控制振荡器模块的输入量, 控制电压控制振荡器输出一个频率为 $(f_0 + \Delta f)$ 的正弦激励信号. 这个振动信号一方面作为下一个循环预设参考信号输入乘法器, 另一方面输入相位调节模块, 经 90° 相位偏转(激励简谐共振的相位条件)再由反馈 Gain 控制模块处理后作为激励信号激励传感器振动. 电路中第二个回路是通过提取出音叉信号振幅, 由反馈系统运算后通过增大或减小激励来维持音叉的振幅恒定. 电路中第三个回路是通过维持恒电流或恒频率偏移的 Z 方向高度控制反馈回路.

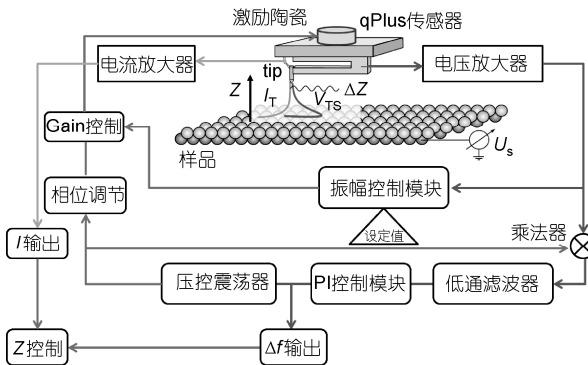


图 1 基于锁相环技术(PLL)频率调制的 qPlus 型原子力显微镜工作原理图

类似于 STM 的恒电流和恒高度模式, qPlus-AFM 也具有恒频率偏移和恒高度两种主要成像模式. 在恒频率偏移成像模式下, 通过振幅反馈回路保持音叉悬臂振幅 A 恒定, 通过频率反馈回路调整针尖和样品间的距离保持频率偏移恒定(力梯度恒定), 所获得图像为恒定力梯度下的样品表面形貌图. 在恒高度成像模式下, 断开频率偏移控制的 Z 反馈回路保持针尖高度恒定, 探测扫描过程中的频率偏移变化, 所获图像为恒定高度下的样品表面力梯度图.

1.2 qPlus 原子力传感器

除了高信噪比的信号采集处理电路、反馈控制电路外, 原子力传感器是决定原子力显微镜性能的另一个关键部分. 对于非磁性样品, 针尖和样品间相互作用力主要包括长程的静电力、中短程的范德华力以及短程的化学键力和泡利排斥力. 原子力显微镜针尖所探测的是以上所有类型的原子间相互作用力的总和. 图 2(a)为典型的原子力显微镜针尖和样品间相互作用力随针尖-样品间距离的变化曲线, 大致可以分为 3 个区域. 在针尖-样品相距无穷远时, 相互作用力为零, 在针尖靠近表面的过程中吸引力逐渐增大并达到极大值, 随后由于排斥力的出现, 总吸引力会迅速变小, 最后过渡到随距离减小急剧增加的排斥力区域.

传统原子力显微镜使用微加工手段制备的硅悬

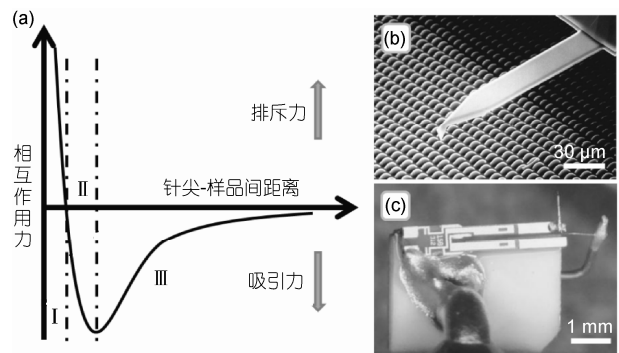


图 2 原子力显微镜针尖样品间相互作用力随距离变化曲线、硅悬臂以及 qPlus 型传感器

(a) 原子力传感器针尖和样品间相互作用力随针尖-样品间距离的变化曲线; (b) 扫描电子显微镜下观察到的硅悬臂 AFM 探针^[4]; (c) 光学显微镜下观察到的 qPlus 原子力传感器: 钟表工业中通用的石英音叉的尾部 and 一条悬臂用绝缘胶固定在 L 形陶瓷基底上, 金属或其他材料的针尖通过绝缘胶垂直粘到自由悬臂的顶端, 从针尖尾部用极细金丝($\sim 12.7 \mu\text{m}$)引出隧道电流信号

臂传感器如图 2(b))所示^[4], 其悬臂弹性常数 K 一般在 0.1~100 N/m 量级, 主要工作在 I 和 III 两个相互作用力区间. 这分别对应于针尖直接压到表面滑动(静态接触模式)和针尖远离表面(动态模式)两种极端情况. 这两个工作区间并不是原子力显微镜获得最高分辨的理想区间. 这主要是因为: 在区间 I 工作的针尖直接接触样品表面, 针尖和样品之间直接相互作用的原子太多, 其最小分辨率直接依赖于针尖的微观尺寸. 通常所获得的原子力显微镜针尖尖端尺寸在几到几十个纳米量级, 也就决定了不能通过在区间 I 工作获得很高的分辨率. 另外, 针尖直接接触样品表面也会造成针尖磨损和样品表面破坏. 而在区间 III 工作时, 需要针尖距离样品较远且大振幅(几十个纳米)振动, 以避免针尖被突然吸到样品表面, 不能正常工作. 频率调制原子力显微镜所探测的 Δf 信号反映的是针尖在整个正弦振动周期力感受的力梯度的平均^[1]:

$$\Delta f(z) = -\frac{f_0}{2k} \left\langle \frac{\partial F_{ts}(z)}{\partial Z} \right\rangle, \quad (1)$$

$$\left\langle \frac{\partial F_{ts}(z)}{\partial Z} \right\rangle = \frac{2}{\pi A^2} \int_{-A}^A \frac{\partial F_{ts}(z-q)}{\partial Z} (A^2 - q^2)^{1/2} dq, \quad (2)$$

式中 A 是针尖的振幅, Z 为针尖样品间距离. 而衰减长度在埃量级的短程力具有最高的空间局域性, 对原子尺度分辨起主要贡献^[5]. 大振幅远距离样品振动的针尖只能在很小的一个范围内能感受到短程力, 大大减小了短程力在测得的信号中所占的比例, 不能获得很高的分辨. 在区间 II 内工作的针尖既能保证短程力在测得的信号中占较大的比例, 又能保证针尖和样品间作用力主要是集中在单个原子间的相互作用. 因此, 减小振幅并使针尖能在区间 II 内稳定工作是提高原子力显微镜分辨率的关键.

qPlus 型原子力传感器如图 2(c)所示, 其使用钟表工业通用的石英音叉作为悬臂, 石英音叉悬臂弹性系数一般为 1800 N/m^[4]. 因此悬臂可以在亚埃量级的振幅下在力区间 II、甚至靠近区间 II 的区间 I 内稳定振动, 不会被突然吸到表面, 从而可以获得更高的分辨率. 在小振幅近似下, 所测得的频率偏移量和力梯度近似有以下正比关系:

$$\Delta f(z) = -\frac{f_0}{2k} \frac{\partial F_{ts}(z)}{\partial Z}. \quad (3)$$

2 qPlus-AFM 的应用和研究进展

2.1 高分辨成像

STM 所探测的是样品费米面附近的电子态信息^[6], 一般具有一定的离域性并不能提供分子中原子位置的准确信息. AFM 探测的是针尖与样品原子间的相互作用力信号, 是原子中所有轨道电子都可能参与的相互作用的叠加. 这使得 AFM 在理论上具有比 STM 更高的空间分辨能力. 2009 年, IBM 苏黎世实验室的研究人员 Gross 等人^[5]使用 qPlus 技术获得了吸附在 Cu(111)表面的并五苯分子的原子分辨图像. 图 3(a)和(b)分别为并五苯分子的球棒模型和 STM 图像. 由于分子中共轭电子的离域性, 在 STM 图像中观察不到分子的精确化学结构. 图 3(c)和(d)是通过在 qPlus 的铂铱针尖上修饰 CO 分子, 让针尖在亚埃振幅下进入短程排斥力范围成像, 获得了并五苯分子的高分辨原子结构图像. 从图 3(c)中, 可以清晰分辨出碳原子组成的 5 个六元环和伸展出的 C—H 键. 这个成果被 *Science* 杂志评为 2009 年十大科技进展之一. 结合理论计算, 作者认为 CO 针尖与并五苯分子组成原子之间的泡利排斥力是实现分子内原子分辨的主要原因. 最近, 他们采用同样的方法进一步区分出了不同碳-碳键的鲍林键级(Pauling bond order)^[7].

在随后的研究中, Gross 等人^[7]利用 qPlus-AFM 获得的分子化学结构图像确定了天然化合物分子 cephalandole 的化学结构. 图 4(a)列出了利用核磁、质谱等其他结构分析手段所推测的天然化合物的 4 种可能结构. 利用 qPlus-AFM 的分子内原子分辨能力, 通过修饰 CO 针尖获得的分子的化学结构图像如图 4(b)所示. 通过与 4 种可能化学结构式的对比并结合理论计算, 确定天然化合物的实际分子结构为 4 中可能结构中的第一种^[8]. 可以预见, 高分辨 AFM 图像的这种化学结构识别能力将会在未来的生物化学等研究领域发挥重要的作用. 最近, Pavliček 等人^[9]利用 qPlus-AFM 结合 STM 对二苯并噻蒎(dibenzo-thianthrene)分子的空间立体构型进行了研究. 在 NaCl 超薄绝缘层表面获得的分子两种吸附构型的高分辨 AFM 图像(图 5(a)), 分别对应于图 5(b)分子中两个硫原子向上翘(up)和向下翘(down)的两种空间立体构型. 另外, 研究人员还利用 qPlus-AFM 实现了金属原子和分子的表面化学反应过程中反应位点的确定^[10].

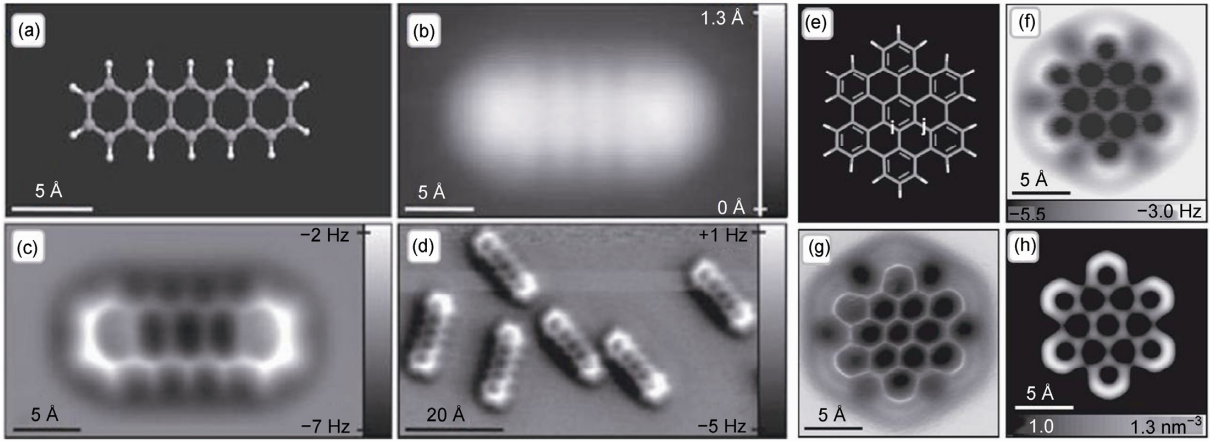


图3 qPlus 传感器获得的亚分子分辨

(a) 并五苯分子化学结构的球棒模型; (b) STM 获得的分子电子态图像; (c), (d) qPlus-AFM 获得的分子化学结构图像(恒高度模式下的频率偏移像); (e) 六苯并蔻分子的化学结构模型; (f), (g) 在不同针尖高度下, qPlus-AFM 获得的分子化学结构图像(恒高度模式下的频率偏移像); (h) 理论计算得到的分子电子态密度图像^[5,7]

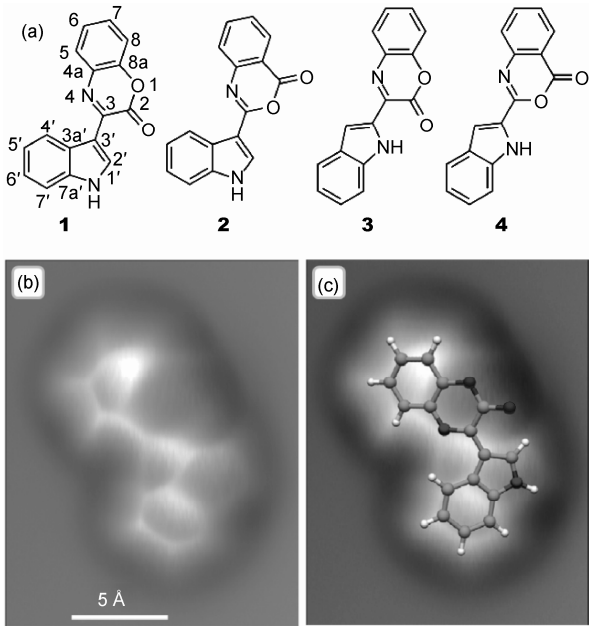


图4 分子识别

(a) 天然化合物 cephalandole 的 4 种可能的化学结构; (b) 化合物 A 的 qPlus-AFM 高分辨图像; (c) 与理论结构的对比图^[8]

2.2 基于 qPlus 原子力显微镜的谱技术

STM 中的扫描隧道谱(STS)能直接对应于费米面附近的电子态密度信息^[6]. AFM 以力作为探测信号, 可以类比于 STS 获得丰富的力谱(FS). qPlus 技术的引入使得悬臂上的针尖可以在距离表面更近的范围里以很小的振幅(小于 1 Å)振动, 使得测量局域的短

程力更加精准, 大大拓展了 AFM 力谱的测量精度和范围. 另一方面, qPlus 技术可以同时获得隧道电流和力信息, 通过对两种不同来源的样品信号的对比研究, 可以获得更加丰富的表面信息^[11].

图 6 是 Gross 等人^[12]使用 qPlus 技术, 通过测量不同电荷状态下金属原子与基底的接触势差, 亦即开尔文探针显微技术(Kelvin probe force microscopy, KPFM)中的局域功函数差, 实现了对单个原子不同带电状态的识别和测量. 研究人员通过针尖施加电压脉冲, 让吸附在 NaCl 薄层上的金属 Au 和 Ag 原子分别得到和失去一个电子, 得到 Au⁻和 Ag⁺离子. 通

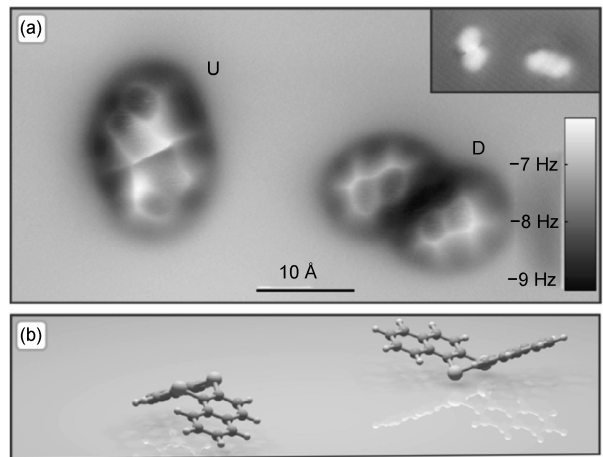


图5 分子构型识别

(a) 二苯并噻萘分子两种不同立体构型的 qPlus-AFM 图像, 插图为对应的 STM 图像; (b) 图(a)中两种分子空间立体构型的理论模型^[9]

过比较在中性原子和带电离子上获得的 $\Delta f(V)$ 谱(在保持针尖-样品间距离恒定下, 频率偏移随针尖和样品间偏压变化曲线), 发现中性原子与带电离子的局域功函数差有约 30 mV, 且正离子和负离子具有相反的局域功函数差, 实现了原子不同带电状态的识别和测量. 在随后的研究中, 他们采用 qPlus-AFM 的开尔文探针显微成像模式, 通过测量萘酞菁分子内部的局域功函数差, 获得了分子内的电荷分布的亚分子分辨图像^[13]. 图 7(a)为实验方法示意图, 将萘酞菁分子所在的区域分为 64×64 个像素点, 在恒高模式下, 在每个像素点处做 $\Delta f(V)$ 谱, 得到分子内不同位点的局域接触势差. 这对应于分子内不同位点的带电状态或电荷分布, 如图 7(b)所示. 当分子内两个氢原子位置被转变后, 分子内电荷也重新分布, 如图 7(c). 对比于图 7(e)的理论计算, 这种方法可以实现对由于氢原子位置改变引起的分子内电荷分布的识别. 通过利用 CO 分子修饰针尖, 可以进一步提高分辨率, 甚至可以分辨出不同原子周围的电荷分布等. 最近, 我们课题组利用 qPlus-AFM 的 $\Delta f(V)$ 谱学技术, 研究了具有立体构型的本征偶极分子-钛氧酞菁吸附在金属基底 Cu(111)表面的分子偶极. 如图 8 所示, 钛氧酞菁分子以氧原子朝上(upward)和朝下(downward)两种构型吸附在基底表面, 相对于 Cu(111)表面具有相反的局域功函数差. 在此基础上, 我们确定了分子在基底表面的偶极取向和大小, 并进一步分析了两

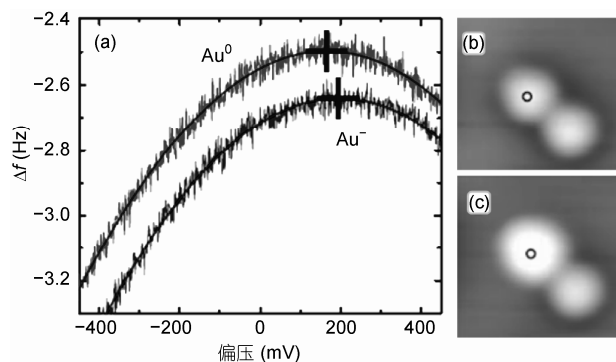


图 6 单原子不同带电态识别

(a) 中谱线分别对应于利用 qPlus-AFM 的谱功能在图(b)(图(c))中圆圈所指示的带一个负电荷(中性)金原子上所做的 $\Delta f(V)$ 谱线; (b) NaCl 超薄绝缘层表面两个 Au^- 离子的 STM 图像; (c) 通过针尖施加电压将图(b)中一个 Au^- 离子转变成中性 Au^0 原子后的 STM 图像^[12]

种吸附构型下的分子-基底间电荷转移. 这种局域功函数和表面电荷分布的测量方法可以推广到多种样品表面, 可以提供在单分子开关和化学键形成/断裂前后分子内以及分子间的电荷分布信息, 对单分子器件和表面异质催化研究有重要意义.

测量 Δf 与针尖-样品间距的关系可以得到 $\Delta f(z)$ 谱, 转化后可以得到针尖与样品间作用力随针尖-样品间距的变化关系, 即 $F(z)$ 谱. Ternes 等人^[14]利用 qPlus 技术同时得到了 $F(z)$ 谱和 $I(z)$ 谱, 研究了吸附在 Pt(111)基底上的单个 Pt 原子和吸附在 Cu(111)基底上

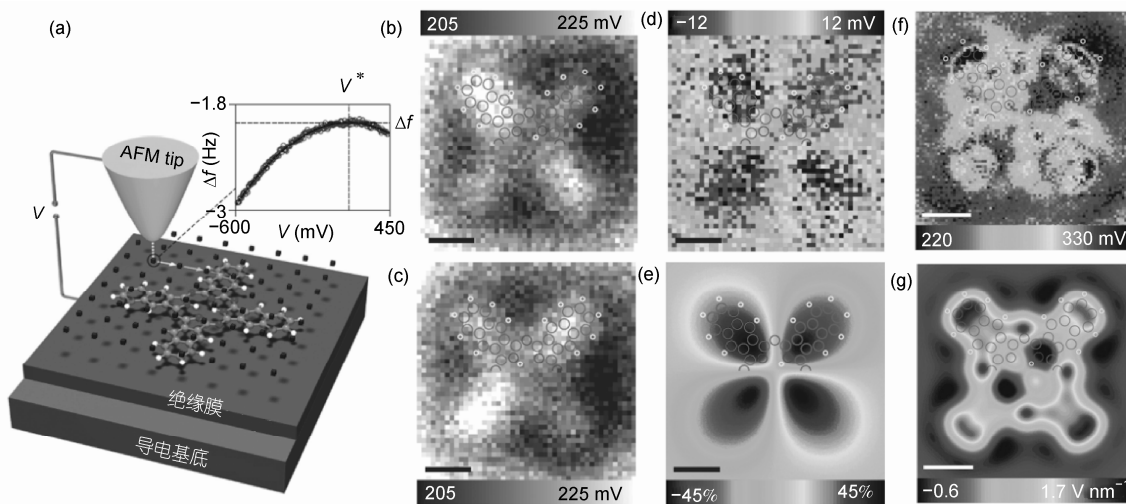


图 7 分子内电荷分布测量

(a) 利用 qPlus-AFM 谱技术测量萘酞菁分子内电荷分布的原理示意图; (b) 分子内电势分布图; (c) 同一分子内氢原子位置发生转变后的电势分布图; (d) (b)和(c)两图之差; (e) 理论模拟获得的由于氢原子位置不同导致的分子内电场分布图; (f) 利用 CO 分子修饰后的针尖获得的分子内电势分布图; (g) 理论模拟得到的分子内电场分布图^[13]

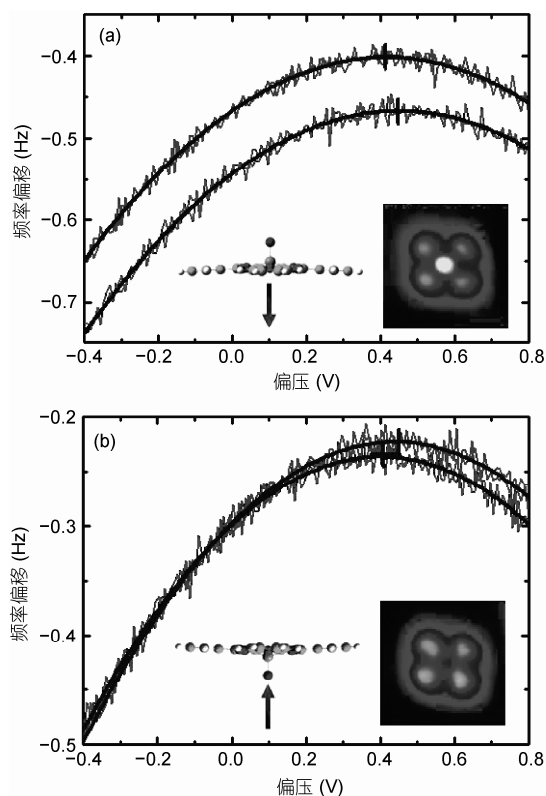


图8 利用 qPlus-AFM 技术获得的酞菁分子吸附在 Cu(111) 表面上的 $\Delta f(V)$ 谱
(a) 氧原子朝上的分子吸附构型; (b) 氧原子朝下的分子吸附构型

单个 Cu 原子和针尖的相互作用力及隧道电流随针尖距离变化的关系。在隧穿区，短程力和隧道电流都随针尖样品间距离的增大而指数减小，其衰减系数比值约为 1；在隧穿和点接触间的转变区间里，强的短程相互作用力会导致针尖尖端原子和吸附原子发生

弛豫和电子结构改变。Ternes 等人^[15]还利用 qPlus-AFM 的三维力谱技术，测量了在表面上移动一个原子所需要的横向和纵向力的大小。研究结果发现，移动单个原子和分子所需要的力主要取决于样品表面和吸附原子或分子本身的性质，通常在 0.1~1 nN 量级。清华大学的薛其坤研究组也利用 qPlus 技术在 Pb(111) 表面对操纵 H₂Pc 进行了系统的研究^[16]。

3 结束语

作为一种较为新兴的技术，基于 qPlus 技术的扫描探针显微技术已经被国外多个研究组用来研究日益广泛的样品体系，并获得了许多出色的研究成果，初步显示出 qPlus 技术强大的生命力。但是这些研究工作只能算是 qPlus 技术取得的初步结果，qPlus 技术无论是在理论上，还是在功能拓展上都有很多工作需要进一步完善。例如，力谱、电流信号、耗散信号等的解读还面临许多困难。对于复杂又具有重要应用前景的耗散信号，理论上，音叉的高对称结构使其具有微弱的内耗散，实验所测得的耗散信号 (damping) 直接对应于针尖和样品间非保守力相互作用。对于绝缘体、金属或分子参与测量的体系，非保守力来源非常复杂。除了包括半导体体系中的成键断键过程，还包含针尖样品间电荷转移、瞬时偶极作用等^[4]。qPlus 结构的独特性所提供的出色拓展性能也并没有得到良好的开发和利用。目前，国内开展 qPlus 方法与应用研究的实验室还很少，与世界先进水平存在较大差距。这需要我们付出更多努力，在 qPlus 相关理论完善以及仪器发展和改进中做出自己的贡献。

参考文献

- 1 Albrecht T R, Grütter P, Horne D, et al. Frequency modulation detection using high- Q cantilevers for enhanced force microscope sensitivity. *J Appl Phys*, 1991, 69: 668-673
- 2 Giessibl F J. Atomic resolution of the silicon (111)-(7 \times 7) surface by atomic force microscopy. *Science*, 1995, 267: 68-71
- 3 Binnig G, Rohrer H. In touch with atoms. *Rev Mod Phys*, 1999, 71: S324-S330
- 4 Giessibl F J. Advances in atomic force microscopy. *Rev Mod Phys*, 2003, 75: 949-983
- 5 Gross L, Mohn F, Moll N, et al. The chemical structure of a molecule resolved by atomic force microscopy. *Science*, 2009, 325: 1110-1114
- 6 Repp J, Meyer G. Molecules on insulating films-Scanning tunneling microscopy imaging of individual molecular orbitals. *Phys Rev Lett*, 2005, 94: 026803
- 7 Gross L, Mohn F, Moll N, et al. Bond-order discrimination by atomic force microscopy. *Science*, 2012, 337: 1326-1329
- 8 Gross L, Mohn F, Moll N, et al. Organic structure determination using atomic resolution scanning probe microscopy. *Nat Chem*, 2010, 2: 821-825

- 9 Pavliček N, Fleury B, Neu M, et al. Atomic force microscopy reveals bistable configurations of dibenzo[a,h]thianthrene and their inter-conversion pathway. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 086101
 - 10 Mohn F, Repp J, Gross L, et al. Reversible bond formation in a gold-atom-organic-molecule complex as a molecular switch. *Phys Rev Lett*, 2010, 105: 266102
 - 11 Weymouth A J, Wutscher T, Welker J, et al. Phantom force induced by tunneling current: A characterization on Si (111). *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 226801
 - 12 Gross L, Mohn F, Liljeroth P, et al. Measuring the charge state of an adatom with noncontact atomic force microscopy. *Science*, 2009, 324: 1428–1431
 - 13 Mohn F, Gross L, Moll N, et al. Imaging the charge distribution within a single molecule. *Nat Nanotech*, 2012, 7: 227–231
 - 14 Ternes M, González C, Lutz C P, et al. Interplay of conductance force and structural change in metallic point contacts. *Phys Rev Lett*, 2011, 106: 016802
 - 15 Ternes M, Lutz C P, Hirjibehedinet C F, et al. The force needed to move an atom on a surface. *Science*, 2008, 319: 1066–1069
 - 16 Mao H Q, Li N, Chen X, et al. Mechanical properties of H2Pc self-assembled monolayers at the single molecule level by noncontact atomic force microscopy. *J Phys Cond Matt*, 2012, 24: 084004
-

Research progress of qPlus scanning probe technique

CHEN PengCheng, ZHANG Jun, YUAN BingKai, CHENG ZhiHai & QIU XiaoHui

Laboratory for Nanocharacterization, National Center for Nanoscience and Technology, Beijing 100190, China

Compared with scanning tunneling microscopy (STM), atomic force microscopy (AFM) can be used to investigate both conductive and non-conductive samples through measuring the interaction forces between the atomic force sensor and the sample surface. In the past few years, the performance of AFM has been greatly improved after the invention of qPlus-AFM with the latest qPlus tuning fork based atomic force sensor. In this review, we give a brief introduction to the qPlus technique and the latest research progress of qPlus-AFM based AFM. Some comments on the future development of qPlus probe technique are also given.

scanning probe microscope, atomic force microscope, noncontact atomic force microscopy, qPlus probe technique, tuning fork based atomic force sensor

doi: 10.1360/972012-1511