

原子力显微术轻敲模式中探针样品 接触过程及相位衬度研究^{*}

王晓平¹⁾²⁾ 刘 磊²⁾ 胡海龙²⁾ 张 琨²⁾

¹⁾中国科学技术大学物理系,合肥 230026)

²⁾中国科学技术大学结构分析实验室,合肥 230026)

(2003 年 4 月 25 日收到,2003 年 11 月 3 日收到修改稿)

借助简单的有阻尼受迫振子模型,研究了原子力显微术轻敲模式中探针与样品接触时间 t_c 、样品的表面形变 D_z 和相位衬度对探针设置高度 z_c 及样品杨氏模量 E_s 的依赖关系. 结果发现, t_c 与 D_z 均随 E_s 及 z_c 的增大而减小, 同时探针与样品作用过程伴随很小的能量耗散. 对轻敲过程中相移量 φ 的研究表明, E_s 较大的样品有较小的 φ , 且 φ 随 z_c 的变化比 E_s 较小的样品明显. 实验观察表明本模型及其计算结果可以较好地解释相位像中的相位衬度.

关键词: 原子力显微术, 轻敲模式, 相位衬度

PACC: 0779, 6116P, 6120J

1. 引 言

原子力显微术 (AFM) 在材料结构与性能表征方面具有十分广泛的应用^[1-8]. AFM 最常见的工作模式有接触和轻敲两种. 前者是指探针在扫描过程中始终保持与样品的接触. 后者则是以大约几十千赫兹的频率(接近探针悬臂的本征振动频率)驱动悬臂, 使探针间歇地接触样品表面, 从而可以明显减少接触模式中横向力对样品表面的损伤, 同时保证轻敲模式仍具有很高的分辨率^[9].

轻敲模式采集的图像主要有形貌像和相位像. 轻敲模式在扫描时通过反馈系统保持探针微悬臂的振幅一定, 因此可以探测样品表面的起伏如台阶等特征, 这就是形貌(衬度)像的来源. 微悬臂作为一个有阻尼的受迫振子, 其相位相对驱动信号的相位有一移动(相移), 当探针受到不同的作用力时, 其相移将发生变化, 形成相位(衬度)像. 由上可见, 形貌像的衬度主要来源于样品表面的高低起伏, 而相位像的衬度不但依赖样品表面的高低起伏, 还依赖样品表面不同组分物理性质(如黏附性等)的差异^[10]. 相位像在样品表面不同组分畴区边界附近的衬度有时可以明显优于形貌像, 因此它不但可以为形貌像中

有关形貌特征的确认提供根据, 而且还包含了形貌像所不能提供的更多信息^[11, 12]. 由于相位像起源的复杂性, 对实验中获取的相位像的解释就略显困难, 所以对相位像的起源及其衬度的研究是十分重要的.

事实上, 相位衬度的来源涉及 AFM 探针与样品相互作用及作用过程中的能量耗散. 近年来, 国际上已有许多对于 AFM 轻敲模式中相关基础问题的探索. 例如, Gotsmann 等^[13, 14]研究了探针样品作用体系中保守力和耗散力的力谱, 并从理论上计算了频率移动和平均功率; Gauthier 等^[15]提出了一个比较简化的样品探针接触模型, 并在此基础上对体系的能量变化进行了讨论; Hölischer^[16]等提出了一种通过测量共振频率随振幅的变化研究探针与样品相互作用的方法; Cleveland 等^[17]研究了相位移动和能量损耗的关系, 其结果与实验观察较好地相符; Marcus 等^[18]研究了各向异性导致的相位衬度并做了相应的理论解释; Whangbo 等^[19]也从实验和理论上讨论了设置振幅比与相位之间的关系; Tamayo 等^[20-22]着重就轻敲模式中的一些重要的物理量进行了理论上的初步探讨, 并给出了一些实验对照结果.

虽然上述研究对理解轻敲模式中探针样品相互作用及相位衬度具有积极的意义, 但大多与实验观

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10274076)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 50132030)资助的课题.

察的结合仍显不够紧密,因此还需要更多针对上述问题的研究工作.已有研究表明,简单的有阻尼受迫振子模型可以很好地描述 AFM 轻敲模式中探针的振动及其与样品的相互作用,且与实际符合得较好^[20-22].因此,本文将仍借助这一模型,并利用数值方法,着重研究实验中常遇到的探针和样品表面间设定距离 z_c 、样品的弹性模量 E_s .这两个量对 AFM 轻敲模式中探针样品相互作用过程及相移量 φ 的影响,以期有助于更好地理解轻敲模式的原理及过程,并能对实验中所取得的相位像进行较好地定性说明和分析.我们的研究表明:在 E_s 相同的条件下, φ 将随 z_c 呈现比较复杂的变化;而在固定 z_c 的情况下, φ 将随 E_s 的增大而减小.此外,对照实验表明我们的计算结果可以较好地解释实验观察中得到的相位像衬度.

2. 模型及计算方法

用于描述 AFM 轻敲模式中探针悬臂体系振动的有阻尼受迫振子模型如图 1 所示.图 1 中用方框代表策动的压电晶片,用一弹性系数为 k_c 的弹簧代替悬臂,用一有效质量为 M_{eff} 的小球代表探针和悬臂的总有效质量.轻敲过程中,样品与探针的接触,可看成是一弹性系数为 k_s 弹簧与小球的作用.在大多数实验中,当样品受到较小的作用力时,其产生的形变可认为是弹性的,因此可利用 Hertz 理论描述探针与样品间的作用^[9].Hertz 理论给出样品的弹性系数为 $k_s = \frac{4}{3} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$,其中 E_s 与 ν_s 分别为样品的杨氏模量与泊松比.显然,该模型比较简单,容易进行数学处理.

根据图 1 的模型,探针的运动微分方程可表示为

$$M_{\text{eff}} \frac{d^2 z}{dt^2} = -k_c z - \frac{M_{\text{eff}} \omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + F_0 \sin(\omega t) + F(z, z_c), \quad (1)$$

其中 z 为探针的坐标, z_c 为探针平衡位置与样品表面的间距(探针设置高度), $\omega_0 = \sqrt{\frac{k_c}{M_{\text{eff}}}}$ 是悬臂体系的固有振动频率, ω 是策动频率,发生共振时,满足 $\omega = \omega_0$, Q 是体系的品质因数, $F_0 \sin(\omega t)$ 代表策动力, $F(z, z_c)$ 代表探针与样品的相互作用,当探针与样品无接触和有接触时, $F(z, z_c)$ 的表达式分别为^[21]

$$F(z, z_c) = -\frac{AR}{(z + z_c)^2}, \quad (2)$$

$$F(z, z_c) = -\frac{AR}{6a_0^2} + \frac{4E_s \sqrt{R}}{3 - 3\nu_s^2} \times (a_0 - z - z_c)^{3/2}, \quad (3)$$

其中 A 是 Hamker 量, R 为探针尖端半径, a_0 为样品的原子间距.

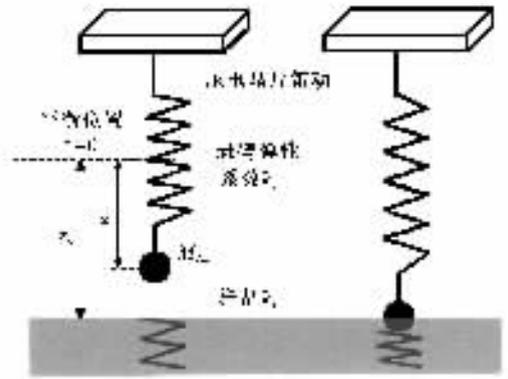


图 1 原子力显微术轻敲模式中探针悬臂体系振动的有阻尼受迫振子模型

非线性微分方程(1)包含了关于探针振动的很多信息,如振幅、探针样品接触时间、探针振动与策动间的相移量等.一般很难用解析的办法求出方程(1)的精确解,为此我们采用数值解的办法.因为探针与样品间存在相互作用,故悬臂振动包括瞬态(刚策动时)与稳态振动过程.本文研究的是待悬臂振动稳定后的稳态振动过程.计算中最大策动力取为 $F_0 = (k_c \times A_0)Q$,其余各参数的选取见表 1.

表 1 本文计算中采用的各参数取值

参数	取值
悬臂弹性系数 $k_c/\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$	20
体系固有频率 f_0/kHz	200
品质因数 Q	≈ 200
自由振幅 A_0/nm	100
原子间距 a_0/nm	0.1
Hamker 量 A/J	10^{-19}
探针曲率半径 R/nm	20
样品泊松比 ν_s	0.3
杨氏模量 E_s/GPa	0.1—100

3. 结果及讨论

3.1. 探针与样品的接触过程研究

轻敲模式最大的优点是探针对样品表面的损伤

很小,这是因为在该模式中,探针与样品的接触是间歇的,总的作用时间很短.但具有一定动能的探针与样品间歇接触时,仍然会使样品表面发生不同程度的形变,因此可利用探针与样品的接触时间和样品的表面形变来表征轻敲模式中探针与样品的相互作用.

定义探针与样品的接触时间 t_c 是在一个振动周期内探针从刚开始与样品接触到离开样品所经历的时间间隔,样品表面形变 D_z 是当探针速度为零时样品在 z 方向的最大形变.

图 2 是计算得到的不同设置高度 z_c 时,接触时间 t_c (图 2(a)) 和样品表面形变 D_z (图 2(b)) 随样品杨氏模量 E_s 的变化.由图 2,可将不同设置条件对 t_c 和 D_z 的影响归纳如下 (1) 当 E_s 保持不变时, t_c 和 D_z 均随 z_c 的增大而减小,当 z_c 大于或等于悬臂的自由振幅 A_0 (本文中为 100nm) 时, $t_c = 0, D_z = 0$;

此外, t_c 和 D_z 随 z_c 的变化幅度随样品 E_s 的增加而减弱 (2) 当 z_c 保持不变时, t_c 和 D_z 随 E_s 的增大而减小,当 $E_s \geq 100$ GPa 时, t_c 和 D_z 均趋于零 (3) 在较小的 z_c 条件下, t_c 和 D_z 随 E_s 的变化比较明显,表现为曲线的显著下降.

计算中悬臂自由振动对应的周期为 $5 \mu s$. 图 2 显示: 当 E_s 从 0.1 GPa 增加到 100 GPa 时,若 $z_c = 5$ nm, 则 t_c 从 2120 ns 减小到 409 ns, 分别占整个振动周期的 42.4% 和 8.2%; 而当 $z_c = 95$ nm 时, 对应的 t_c 分别仅占振动周期的 5.46% 和 0.011%. 由此可见, 轻敲模式中探针与样品的作用时间比接触模式有大幅度的缩短. 由图 2 还可见, z_c 和 E_s 均可对 t_c 产生影响. 一方面, 对于相同 E_s 的样品, z_c 越大, 探针到达样品表面时的速度越小, 样品阻尼作用使探针速度减小到零所需的时间也越短. 当 z_c 等于或大于自由振幅时, 探针刚接触或未接触样品, 因此接触时间为零. 另一方面, 当 z_c 一定时, 由方程 (3) 可知, 样品模量 E_s 越大, 探针与样品间的斥力越大, 即样品对探针的阻尼作用越强. 因此在探针接触样品表面的初速度相同的情况下, E_s 较大的样品比 E_s 较小的样品可使探针更快地减速, 导致 t_c 减小.

样品产生形变的过程在忽略能耗的近似下可理解为: 具有一定动能的探针, 通过与样品相互作用, 将体系的动能转变为样品的形变势能 $\frac{1}{2} k_s D_z^2$. 因为当 z_c 较大时, 探针接触样品时的动能较低 (速度较小), 导致在 E_s 相同的情况下, 产生的形变也较小. 另一方面, 当 z_c 相同 (即探针接触样品时有相同的动能) 时, 由于大的 E_s 对应大的 k_s , 所以表现为 D_z 随 E_s 的增加而下降. 按照上述解释并考虑到 $k_s = \frac{4}{3} \frac{E_s}{1 - \nu_s^2}$, 可推出 $E_s D_z^2$ 仅为 z_c 的函数, 即在相同 z_c 条件下得到的 $1/D_z^2 - E_s$ 曲线应为一一直线. 图 2(b) 中的插图显示了 z_c 分别为 95, 40 和 5 nm 时 $1/D_z^2$ 随 E_s 的变化. 从中可见, 上述曲线略微偏离了直线. 我们认为这一偏离源于探针与样品作用过程中的能量耗散^[17], 正是由于这种能量耗散的存在, 使探针的动能并不完全转化为样品表面的形变势能. 因此通过考察 $1/D_z^2 - E_s$ 对直线的偏离程度, 可研究探针与不同样品间的能量耗散特性. 一般地, 由于 AFM 中的振动体系有很高的 Q 值, 所以即使轻敲模式中有一定的能量耗散, 这一能量耗散仍然是很小的^[17].

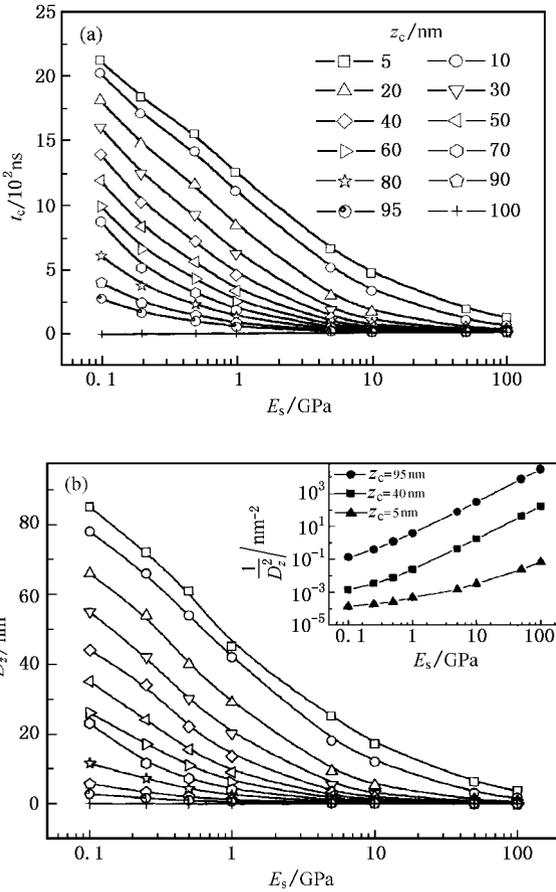


图 2 不同设置高度 z_c 下, 接触时间 t_c (a) 和样品表面形变 D_z (b) 随样品杨氏模量 E_s 的变化 (b) 图中的插图是不同 z_c 时, $1/D_z^2$ 随 E_s 的变化曲线

图 3 给出了不同 E_s 条件下 t_c/D_z 随 z_c 的变化. 从图 3 可见, t_c/D_z 与 E_s 基本无关, 而主要依赖于 z_c . 当 z_c 较小时, t_c/D_z 变化较为缓慢, 当 z_c 较大时, t_c/D_z 的变化则较为快速. 这一结果表明, t_c 与 D_z 是正相关的, 即 t_c 越大则 D_z 也越大.

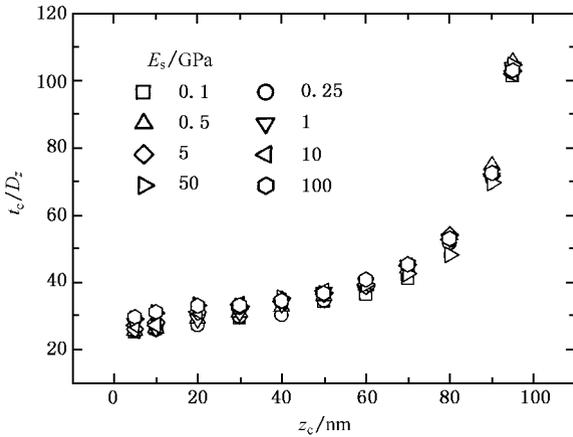


图 3 不同 E_s 条件下 t_c/D_z 随 z_c 的变化

3.2. E_s 及 z_c 对相移量的影响

图 4 是不同的 E_s 条件下, 悬臂振动的相位相对策动信号的相移量 φ 随 z_c 的变化. 由图 4 可见, 当 $z_c > 100$ nm 时, φ 恒为 90° . 这是因为探针与样品未接触时, 探针与样品间的作用力非常小, 可认为悬臂处于自由振动, 所以 φ 为 90° , 这和解析分析结果一致^[9]. 当 z_c 从 100 nm 开始逐渐减小时, φ 先减小后增大, 出现一个最小值, 对于 E_s 较小的样品, 这个特征较为明显. 从图 4 还可发现: φ 的最小值随 E_s 的增加向 z_c 减小的方向移动. 随着 E_s 的增加, φ 减少, 最后稳定在一个与 z_c 有关的数值上. 此外, 与 E_s 较大的样品相比, E_s 较小样品的 φ 对 z_c 的依赖

性较弱. 例如, 随着 z_c 从 5 nm 增加到 95 nm, 若 $E_s = 0.1$ GPa, 对应的 φ 变化仅约 20° , 而当 $E_s = 100$ GPa 时, φ 的变化可达 130° . 由此我们得出结论, 轻敲模式对较硬的样品由形貌高度差异引起的相位像可以获得较好的衬度.

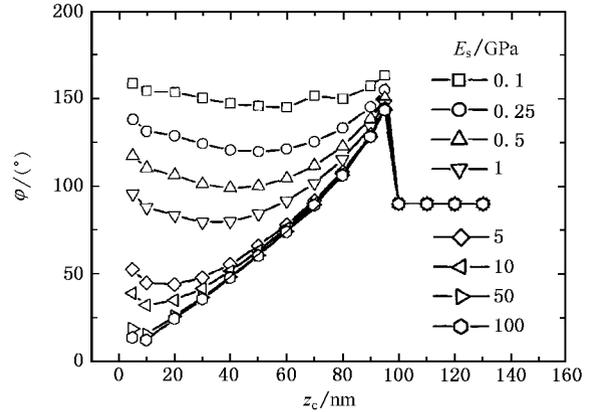


图 4 不同的 E_s 时, 探针振动相位相对策动信号的相移量 φ 随 z_c 的变化

样品的 φ 大小与悬臂所受的作用力类型及其大小有关. 这可根据图 5 示意的悬臂振动时 φ 和 Q 值的频率响应曲线作出定性的解释. 当悬臂受到一作用力 $F(z)$ 时, 悬臂的有效弹性系数可描述为 $k_{\text{eff}} = k_c + F'(z)$ (其中 $F'(z) = -\frac{\partial F(z)}{\partial z}$)^[19]. 当作用力为引力时, $F'(z) < 0$, 导致 $k_{\text{eff}} < k_c$, 从而

$$\omega_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{M_{\text{eff}}}} < \sqrt{\frac{k_c}{M_{\text{eff}}}} = \omega_0.$$

从图 5(a) 可以看出, 这种情况下振动频率向低频方向移动, 伴随有较大的 φ . 同理, 当样品探针间为斥力时, $F'(z) > 0$, 导致振动频率向高频方向移动, 伴随有较小的 φ .

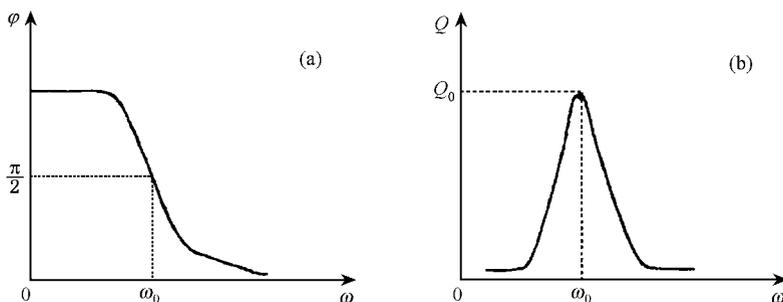


图 5 悬臂振动时 φ 的频率响应(a)和 Q 值的频率响应(b)示意曲线

方程(3)中探针与样品的相互作用包括引力(等号右边第一项)和斥力(等号右边第二项).根据表1中的参数估算得到引力约为33 nN,而斥力则依赖于样品模量 E_s .当 E_s 较小时,总的作用力以引力为主,导致 $\varphi > 90^\circ$,如图4中 $E_s < 0.5$ GPa时的情况.随着 E_s 的增加,当 z_c 较小时,总作用力将逐渐变成以斥力为主,导致 $\varphi < 90^\circ$.由于探针与样品间的平均斥力随 z_c 的减小而增大,故 φ 随 z_c 的减小而减小,如图4所示.对于 z_c 进一步减小时 φ 又缓慢增加的现象,Tamayo等^[20]将之归因为样品的黏附力作用的结果.但本模型未涉及黏附力,考虑到黏附作用与本模型中的阻尼作用 $\frac{M_{\text{eff}}\omega_0}{Q}\frac{dz}{dt}$ 有类似的效果,且随着振动频率偏离悬臂的共振频率, Q 因子将明显减小(见图5(b)),导致阻尼作用进一步增强,因此我们将上述现象归结为阻尼作用的影响.

3.3. 相移量的实验观察

相位衬度本质上来源于探针与样品间作用力的变化.在本文中则反映在两个方面:探针的设置高度 z_c 和样品的杨氏模量 E_s .为从实验上研究 E_s 和 z_c 对 φ 的影响,我们将表面用硫醇分子包裹的金团簇(尺寸约为5 nm)分散到金薄膜衬底上,并在大气条件下利用精工SPA300型原子力显微镜对上述样品进行轻敲模式的观察.图(a)和(b)分别对应样品表面的形貌像和相位像,其中扫描范围为550 nm,扫描频率为1 Hz,扫描方向为从左至右.

由图(a)可见,扫描区域的右边有一明显的金台面,其边界线附近的高度差约为 5.33 ± 0.1 nm(见图(a)下方的剖面线).图(a)左边中下部有两个分离的金属团簇(亮点),高度约为 4.36 ± 0.1 nm.针对上述形貌特点,图(b)的相位像显示出对应的相位衬度,即在金台面的边界有一明显的亮线(注意 φ 越小,相位像越亮), φ 的变化约为 $-4.47^\circ \pm 0.18^\circ$,两个金团簇的边界呈现较亮的衬度,而内部则呈现暗的衬度, φ 的变化约为 $4.3^\circ \pm 0.18^\circ$.

相位像中衬度的产生可解释如下:假设开始扫描时探针的设置高度为 z_c ,当探针在扫描中未遇到高度变化时,则 z_c 和 E_s (同一金薄膜材料)均保持不变,因此产生基本相同的相移量 φ_0 .当探针由左向右遇到图(a)中较高的平台时,由于反馈电路需要一定的时间来调整压电陶瓷的响应,所以探针瞬时设置高度将变为 $z_c - \Delta z_c$ (其中 $\Delta z_c = 5.33$ nm,对

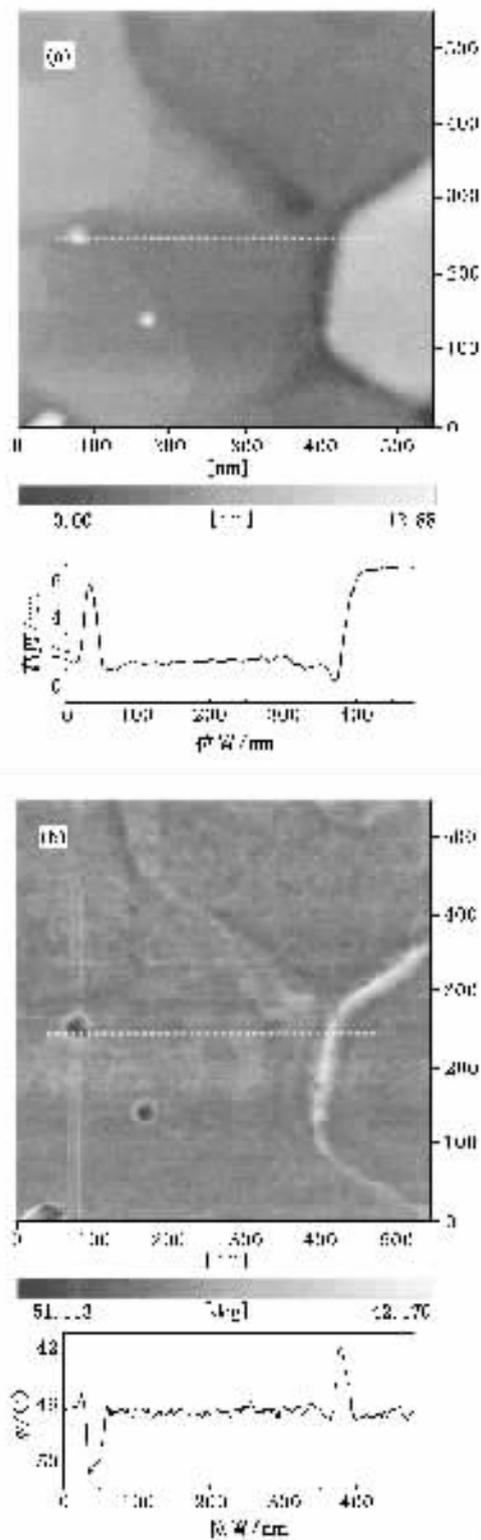


图6 金薄膜上分散金团簇后轻敲模式的观察结果 (a)为形貌像 (b)为相位像.下方为对应的剖面线结果.扫描范围为550 nm,扫描频率为1 Hz

应金台面的高度).根据图4的结果,此时相移量将减小到 $\varphi_0 - \Delta\varphi$,随后反馈电路将设置高度重新调整

为 z_c , 使相移量又恢复到 φ_0 , 这一过程将导致相位像在金台面边界线附近呈现亮的衬度. 考虑到金的杨氏模量约为 $81 \text{ GPa}^{[23]}$, 根据图 4 的结果, 当 z_c 变化 5.33 nm 时, $\Delta\varphi$ 约为 6.4° , 同实验观察到的 4.47° 基本相符(实验得到偏小的结果可能是由于金薄膜的杨氏模量比体材料的小). 值得指出的是, 若系统的反馈能力提高, 对应上述台阶处相位像亮线的宽度将会有所变窄, 但 $\Delta\varphi$ 的大小不会变化.

对金属团簇的情况, 一方面, 相位像中可观察到团簇周围均有小亮环, 这源于 z_c 的变化(同前面金台面的讨论类似). 另一方面, 在每一个小亮环的中部都呈现暗点, 表明 φ 增大了. 这是因为经过硫醇分子包裹的金团簇, 其杨氏模量比金薄膜的小, 根据图 4, 当 z_c 相同时, 较小 E_s 的区域将有较大的 φ 值, 即在相位像中呈现较暗的衬度. 上述实验观察说明, 本模型及其计算结果可以较好地定性解释表面形貌高低差异和材料弹性性能差异造成的相位衬度.

4. 结 论

本文利用简化的弹性振子模型研究了 AFM 轻敲模式中探针设置高度 z_c 及样品杨氏模量 E_s 对探针与样品接触过程和相位衬度的影响, 得到结论如下:

(1) z_c 一定时, 探针与样品的接触时间 t_c 和样品的表面形变 D_z 均随 E_s 的增加而减小; E_s 一定时, t_c 和 D_z 均随 z_c 的增大而减小. t_c/D_z 基本不依赖于 E_s , 而只随 z_c 的增大而增加. 此外, 探针样品作用过程中伴随很小的能量耗散.

(2) 相移量 φ 明显受 E_s 和 z_c 的影响. 当 z_c 一定时, 与 E_s 较小的样品相比, E_s 较大的样品给出较小的 φ 值, 且 φ 随 z_c 的变化也比较明显. 此外, φ 随 z_c 的减小呈现先减小后增大的特征.

(3) 实验观察表明, 本模型及其计算结果可以较好地定性解释相位像中的相位衬度.

- [1] Enders O, Martinoia E, Zeilinger C *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** S100
- [2] Shi D X, Song Y L, Zhang H X *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 361 (in Chinese) [时东霞、宋延林、张昊旭等 2001 物理学报 **50** 361]
- [3] Shen D H, Luo G M, Kang N *et al* 2001 *Chin. Phys.* **10** S163
- [4] Hou S M, Tao C G, Liu H W *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 223 (in Chinese) [侯士敏、陶成钢、刘虹雯等 2001 物理学报 **50** 223]
- [5] Lü R B, Xu K S, Zhang S Y *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2289 (in Chinese) [吕瑞波、徐克寿、张舒雁等 1999 物理学报 **48** 2289]
- [6] Wang X P, Xiao X D, Tsui O K C 2001 *Macromolecules* **34** 4180
- [7] Wang X P, Tsui O K C, Xiao X D 2002 *Langmuir* **18** 7066
- [8] Wang X P, Loy M M T, Xiao X D 2002 *Nanotechnology* **13** 478
- [9] Bai C L, Tian F, Luo K 2000 *Scanning Force Microscopy* (Beijing: Science Press) [in Chinese] [白春礼、田芳、罗克 2000 扫描力显微镜(北京:科学出版社)]
- [10] Sarid D, Hunt J P, Workman R K *et al* 1998 *Appl. Phys. A* **66** S283
- [11] Bar G, Thomann Y, Whangbo M H 1998 *Langmuir* **14** 1219
- [12] Schmitz I, Schreiner M, Friedbacher G *et al* 1997 *Appl. Surf. Sci.* **115** 190
- [13] Gotsmann B, Fuchs H 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 2597
- [14] Gotsmann B, Seidel C, Anczykowski B *et al* 1999 *Phys. Rev. B* **60** 11051
- [15] Gauthier M, Tsukada M 1999 *Phys. Rev. B* **60** 11716
- [16] Hölscher H, Allers W, Schwarz U D *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4780
- [17] Cleveland J P, Anczykowski B, Schmid A E *et al* 1998 *Appl. Phys. Lett.* **72** 2613
- [18] Marcus M S, Carpick R W, Sasaki D Y *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 226103
- [19] Whangbo M H, Magonov S N, Elings V 1997 *Surf. Sci.* **375** L385
- [20] Tamayo J, Garcia R 1996 *Langmuir* **12** 4430
- [21] Tamayo J, Garcia R 1997 *Appl. Phys. Lett.* **71** 2394
- [22] Garcia R, Tamayo J, Calleja M *et al* 1998 *Appl. Phys. A* **66** S309
- [23] Fan T *et al* 1987 *Handbook of Physics* 2nd ed (Beijing: Science Press) [in Chinese] [饭田修一等 1987 物理学常用数表 第二版(中译本)北京:科学出版社]

Study of tip-sample contact process and phase contrast in tapping mode atomic force microscopy^{*}

Wang Xiao-Ping^{1,2)} Liu Lei²⁾ Hu Hai-Long²⁾ Zhang Kun²⁾

¹⁾*Department of Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

²⁾*Structure Research Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

(Received 25 April 2003; revised manuscript received 3 November 2003)

Abstract

The tapping-mode atomic force microscope (TM-AFM) is a very useful tool to investigate the morphology and the physical properties of sample surface. The tip-sample contact process and phase contrast of TM-AFM is studied by numerical simulation. The cantilever-tip ensemble is simply modeled as a damped harmonic oscillator driven by an actuator. The effects of tip-sample distance z_c and the Young modulus of sample E_s on the contact time between the tip and sample t_c , the deformation of the sample surface D_z and the contrast of phase image have been investigated. The results show that both t_c and D_z decrease with increasing E_s or z_c . A little amount of energy dissipation can occur when the tip is tapping on the sample. Moreover, when z_c is fixed, the phase shift of the sample with large E_s is found more remarkable than that with small E_s . The experimental observation of phase image performed on Au film dispersed with Au clusters supports the simulation results.

Keywords : atomic force microscope, tapping mode, phase contrast

PACC : 0779, 6116P, 6120J

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10274076, 50132030).