

# 扫描探针显微镜的基础知识

胡 晓 明

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

本世纪 80 年代初,扫描探针显微镜 (SPM)对硅表面第一次的实空间成像使整个世界为之震惊,现在扫描探针显微镜已在各行各业获得了广泛的应用,包括表面科学,常规表面粗糙度的分析及表面从原子级到微米级凸起的三维成像。

扫描探针显微镜泛指一个家族,用以从原子到微米水平研究物体表面的性质,所有的 SPM 均由图 1 所示部分组成,包括悬臂及探针,压电扫描器及计算机控制系统。

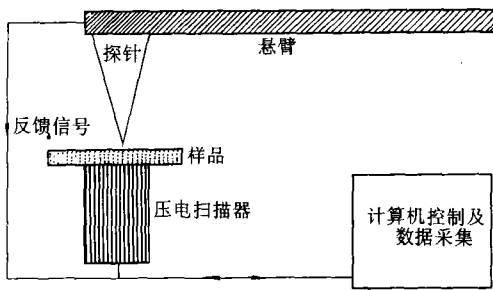


图 1 扫描探针显微镜工作原理

## 一、原子力显微镜

原子力显微镜 (AFM)采用一个长几个微米、直径通常小于 100 埃的针尖来探测表面形貌。原子力探针置于一个长为 100 至 200 微米悬臂的自由端,探针与样品表面间的作用力使悬臂弯曲,当探针在样品表面扫描(或样品相对于探针扫描)时,悬臂的弯曲由一个探测器监测,从而产生表面形貌的图象。原子力显微镜可用于研究绝缘体,半导体及导体。对于原子力显微镜,通常有几种力同时作用于悬臂,其中最主要的是范德瓦尔斯 (Van der Waals) 力,它与针尖至样品间的距离关系曲线可由图 2 描述,图中横轴为针尖至样品距离,纵轴为范德瓦尔斯作用力,向上为排斥力,向下为吸引力,接触作用区适用于做接触式 AFM(见下文),非

接触作用区适用于做非接触式 AFM(见下文)。

**1. 接触模式** 接触模式也称为排斥力模式,操作时原子力探针与样品表面有轻微的物理接触。针尖置于一个弹性系数很小的悬臂前沿,悬臂的弹性系数小于样品表面原子结合的有效弹性系数,当针尖在样品表面扫描时,针尖与样品表面的接触力将使悬臂弯曲,这一现象可用来反映表面的形貌。

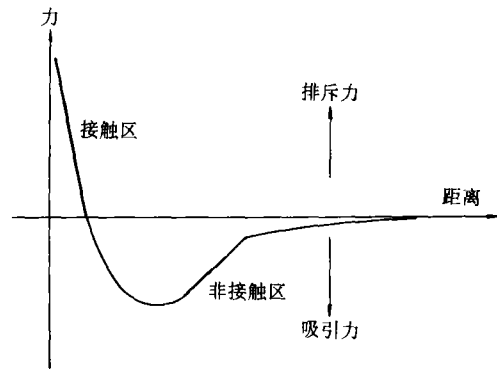


图 2 原子力针尖与样品表面范德瓦尔斯力曲线

为了进一步阐明这一工作原理,我们首先来看一下原子间范德瓦尔斯力曲线(图 2),曲线最右边表示原子间距较大,当两个原子相互靠近时,它们将首先相互吸引,这一引力将一直增加直至两个原子的电子云开始相互排斥。随着原子间距继续减小,电子排斥力将抵消开始时的引力,直至原子间距为几个埃(约为分子键长)时两个力达到平衡。当范德瓦尔斯力由负变正(排斥力)时,我们称两个原子处于接触状态。

在排斥力区(接触模式),范德瓦尔斯力曲线斜率很大,结果导致排斥力将平衡几乎所有可能使两个原子接近的外来力。在 AFM 中,这表示当悬臂使针尖接近样品表面时,悬臂将弯曲而不可能使针尖原子与表面原子靠得更近,即使用非常硬的悬臂,原子间距也不会再减小,而是可能导致样品表面的变形。

除上述的范德瓦尔斯力外,在接触式 AFM 中,另外有两种力可能会同时出现:一种是表面水膜引起的毛细张力,这通常在大气下的实验中出现,另一种是悬臂形变力.毛细张力的出现是由于水会包围针尖从而施加一个强的引力(约  $10^{-8}$  牛顿),这个力使针尖紧贴样品表面,毛细张力的大小取决于针尖与样品的间距.悬臂施加于针尖的力类似于一个被压缩的弹簧所释放的应力,它的大小及符号(排斥还是吸引)取决于悬臂弯曲的方向及弹性系数.只要针尖与样品表面处于接触状态,毛细张力应该不变,这是由于针尖与样品间距不可能被进一步压缩,在这里我们还假设表面水层是均匀的.而另一种力即悬臂应力是可变的,针尖对样品施加的总力为毛细张力与悬臂应力之和,这一总力需要排斥的范德瓦尔斯力来平衡,总力的量级在  $10^{-8}$  牛顿(此时悬臂的上提力与毛细张力平衡)至通常的工作范围  $10^{-7}$  至  $10^{-6}$  牛顿.到此为止,我们讨论了使悬臂弯曲的力,现在我们看看如何从悬臂弯曲导出表面形貌,首先我们需要测量悬臂的弯曲.

大多数的 AFM 用光学方法测量悬臂的位置.一种常用的方法如图 3 所示:一束激光经悬臂背部反射至一位置灵敏探测器 (PSPD),当悬臂弯曲时激光束在探测器上的位置将发生移动;PSPD 本身可测量光点小至 10 埃的位移,悬臂位移的放大倍数为悬臂至探测器的距离与悬臂长度之比.通常这一比例可以做得很大,这使得系统可探测针尖在垂直方向上小于一个埃的位移.其他悬臂位移的探测方法有光学干涉法,及用扫描隧道显微镜探针等.另外一种精巧的方法是:用具有压阻效应(对压阻材料,机械形变可导致电导率变化)的材料做探针,这样探针本身即可用电学的方法检测位移.压阻探测法的优越性在于它不需要调准光路,缺点是灵敏度不如前述 PSPD 光学法.一旦 AFM 检测出悬臂位移,便可用两种方法产生所探测的表面形貌:一种是直接用悬臂在不同探测点的位移,另一种是用悬臂位移做为反馈信号控制扫描器 Z 方向的移动.在保持悬臂位

移衡定时,扫描器在 Z 方向的移动反映了所探测表面的形貌.前一种方法称为等高模式,因为扫描器相对于样品的高度是不变的;后一种方法则称为衡力模式,因为在悬臂位移衡定时,针尖施加于样品表面的总力是不变的.在衡力模式中,扫描速度受到反馈电路响应时间的限制,但加于样品表面的总力可以很好地控制.实验中通常使用衡力模式.等高模式可被用于测量原子级平坦表面的原子分辨象,这时悬臂位移即力的变化总是很小的.等高模式还可用来测量实时变化的表面,这时高速扫描是必需的条件.在 STM 中,类似的模式为等高模式及衡流模式(见图 7).

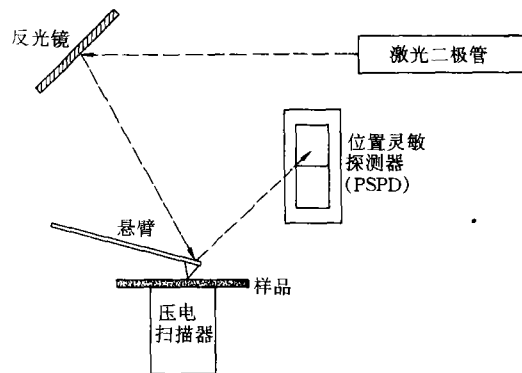


图 3 用光学方法探测悬臂位移示意图

**2. 非接触模式** 非接触模式也称吸引力模式.这时 AFM 监测针尖与样品间吸引区的范德瓦尔斯力,针尖与样品间距通常在 50 至 100 埃之间.在这一距离范围内,针尖原子的电子轨道将与样品表面原子的电子云产生相互作用.由于在任一时刻两类原子的电子云产生同向极化,结果导致原子间的相互吸引.在自由空间中,两类原子将不断靠近直至排斥力开始占优势.

由图 2 可见非接触式 AFM 作用区的范德瓦尔斯力曲线较接触式的平缓,这表示悬臂弯曲对针尖与样品间距的敏感度减弱;另外非接触式 AFM 所需悬臂也要求较硬,否则针尖将被吸缚在样品表面;另一方面硬的悬臂在同等力的作用下位移将更小,因此非接触式 AFM 要求更为灵敏的探测方式.在非接触式测量

中,控制单元迫使一个硬的悬臂在其共振频率(约 200 至 300kHz)振荡,振幅约为几十埃;当针尖接近样品时,针尖与样品相互作用将引起的振动频率或振幅的变化,这种变化可由 AFM 探测,其所能达到的纵向分辨与接触式 AFM 类似,即小于一个埃。

为什么悬臂的振动频率会随针尖至样品的距离而变化呢?由图 2 我们知道吸引力会随这种距离变化,而悬臂振动频率的变化正是由于作用在它上面的力在振动的峰时和谷时是不同的。

在非接触式测量中,AFM 监测悬臂的共振频率,并通过反馈电路移动扫描器保持其共振频率不变。在这种情况下,针尖至样品的距离也是不变的,类似于接触式 AFM(衡力模式),这时扫描器的位移用来产生表面形貌。非接触模式中针尖与样品间的作用力是很小的,通常只有  $10^{-12}$  牛顿,这对研究柔软的或有弹性的表面很合适。非接触模式的另外一个优点是样品不会被针尖污染。对于较硬的样品,接触式与非接触式的结果很像,但如果表面有水膜,两种模式测出的图象会很不相同:接触式 AFM 的探针将穿透水膜直接测量下面的样品,而非接触式 AFM 将只能对水膜成象(见图 4)。

用非接触式 AFM 所得到的图象的质量取决于悬臂与针尖的好坏。非接触式 AFM 的悬臂必需比接触式的硬得多,这样它在振动时才不会偶然地与样品接触。另外在非接触式 AFM 中,使用尖锐的探针比在接触式 AFM 中更为重要,因为非接触式区的范德瓦尔斯力曲线较接触式区平缓,因而针尖与样品表面的作用区也来得大。

**3. 轻敲模式** 轻敲模式 AFM 是用类似于非接触式工作原理的接触式 AFM。在轻敲模式 AFM 中,悬臂以共振频率振荡,但振幅较大,约为 1000 埃,针尖在每次振动中均与样品接触(轻敲式由此得名)。比起接触式 AFM,轻敲式不易损坏样品表面,因为此时针尖与样品间没有横向力(摩擦及牵引力)。但轻敲式 AFM 中垂直力应比水的毛细张力( $10^{-8}$  牛顿)

大得多,使得针尖可以在表面水层中进出自如。这一垂直力也会使柔软的或有弹性的样品表面变形,所以轻敲式 AFM 图象经常反映的是样品表面形貌与弹性特性的混合。

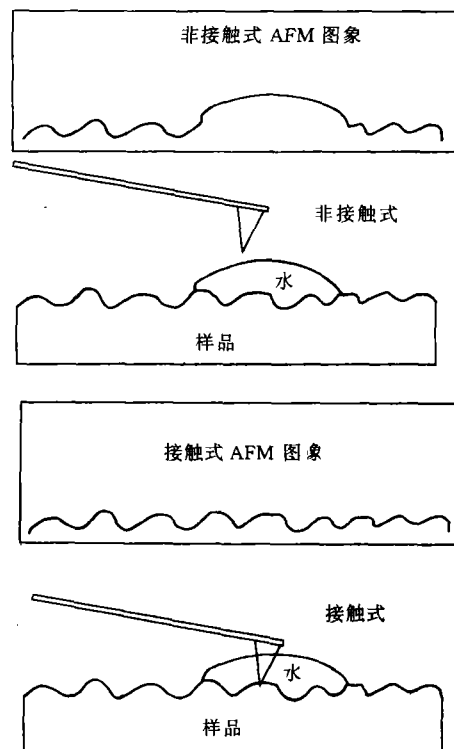


图 4 接触及非接触式 AFM 在有水表面成象比较

## 二、横向力显微镜

横向力显微镜(LFM)是指接触式 AFM 在对悬臂的横向位移(扭曲)成象时的工作方式,信号的来源是悬臂所受到的平行于样品表面的切向力。横向力显微镜对研究诸如由不同材料引起的表面摩擦力的变化十分有用,它还可被用来获得边界增强的表面形貌图象。

如图 5 所示,悬臂的横向扭曲通常由两个原因造成:表面摩擦力的变化及表面形貌的变化。对第一种情况,针尖在表面某些区域可能会遇到较大的摩擦力,使得悬臂扭曲;对第二种情况,当针尖遇到表面陡坡时,悬臂也会扭曲。为了区分这两种情况,横向力显微镜应当与同时获得的表面形貌象比较。

横向力显微镜,如传统的 AFM 一样,使用

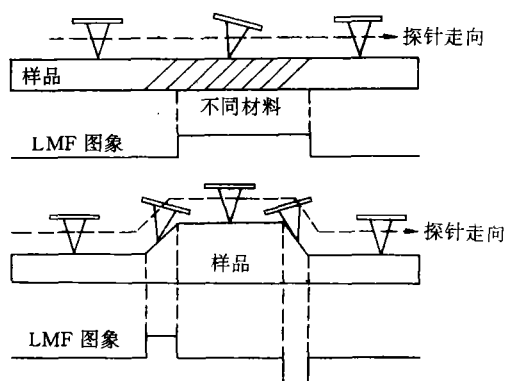


图5 造成悬臂扭曲的两种情况. 上图表示不同样品材料导致摩擦力变化; 下图表示表面坡度变化. 图中探针走向的虚线同时表示了表面形貌

位置灵敏光探测器 (PSPD) 来探测悬臂的变化, 它们的区别在于 LFM 可同时测量悬臂的横向位移. 图 6 显示了只能测量悬臂的纵向位移的 AFM 及可同时测量悬臂横向位移的 LFM 的工作原理. AFM 使用的是分成 A、B 两部分的双单元 PSPD; 而 LFM 使用的是分成 A、B、C、D 四部分的四元 PSPD. 将 A 与 C 的信号相加, 并与 B、D 信号之和比较, 可以得出悬臂的纵向位移, 用以产生表面形貌; 另一方面, 将 A+B 与 C+D 比较可以得出悬臂的横向位移. 一个适当设置的系统可以同时获得 AFM 及 LFM 图象.

### 三、磁力显微镜

磁力显微镜 (MFM) 可对样品表面的磁畴分布成象. 在 MFM 中, 针尖上镀有磁性薄膜, 运行时采用非接触模式, 探测由针尖与样品间磁力作用引起的悬臂振动频率变化. MFM 可以对样品表面自然的或人工制作的磁畴成象.

但是, 利用磁性探针所产生的图象将同时含有表面形貌及磁学特性的信息. 哪一种信号强将取决于针尖至样品的距离, 这是由于原子间的磁力比范德瓦尔斯力作用距离更长. 如果针尖距样品很近, 系统将以标准的非接触式 AFM 运行, 所得到的图象将主要为表面形貌; 如果增加针尖至样品间距, 形貌效应将消失, 磁力作用成为主要; 测量时在不同针尖至样品间

距条件下成象是将表面形貌与磁学特性分开的有效方法.

### 四、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鼻祖. 它是由 IBM 苏黎世实验室的宾尼格 (Gerd Binnig) 与罗雷尔 (Heinrich Rohrer) 在 1981 年共同发明的, 五年后他们得到了诺贝尔物理学奖. STM 是可在实空间对表面原子直接成象的第一台仪器.

STM 使用一个导电的尖锐探针, 并在针尖与样品间加一偏压, 当针尖距样品在 10 埃以内时, 样品中的电子会由于量子隧穿效应穿越 10 埃的势垒到达针尖 (或相反, 这取决于偏压的正反方向), 这一隧穿电流即可用来对表面进行成象. 产生隧穿电流的先决条件是: 针尖与样品必须是导体或半导体, 与 AFM 不同, STM 不能对绝缘体成象.

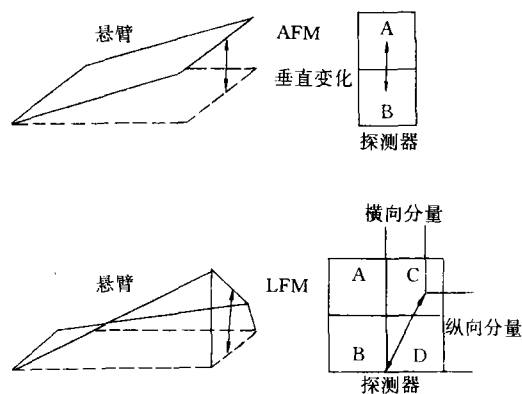


图6 AFM 与 LFM 比较, LFM 可同时测量垂直及横向两个分量

**1. 表面形貌的测量** 隧穿电流与针尖至样品间距成指数关系: 如果间距改变 10% (约 1 埃), 则隧穿电流将变化一个量级; 这一指数关系使得 STM 具有很高的灵敏度, STM 的分辨在纵向可小于 1 埃, 横向可达到原子分辨.

与 AFM 类似, STM 可以有两种运行模式 (见图 7): 在等高模式中, 针尖在样品上方一个等高的平面内运动而隧穿电流将变化, 这时在样品表面不同位置测得的隧穿电流构成表面形貌; 在衡流模式中, STM 利用一个反馈装置改

变扫描器的高度使得在每个测量点的隧穿电流不变. 例如: 当系统探测到一个电流增加时, 它可以调整加在压电扫描器上的电压使针尖远离样品. 在衡流模式中, 扫描器的高度变化构成表面形貌数据, 如果系统可保持隧穿电流变化小于几个百分点, 则针尖至样品间距的测量精度可达百分之几埃.

每一种运行模式都有它的优缺点: 等高模式数据采集较快, 这是由于它不需要上下移动扫描器的缘故, 但是这种模式只适合于测量原子级平坦的表面; 衡流模式可对凹凸不平的表面作精确测量, 但它的数据采集较慢.

**2. 扫描隧道谱** 作为一个近似, 隧穿电流象可做为表面的物理形貌象, 但是精确地讲, 隧穿电流只表示了表面的电子态密度, STM 实际上测量了费米面附近的满态或空态的电子密度, 这些电子的能量范围取决于所加的偏压大小. 因此, STM 测量的是表面产生恒定隧穿电流的几率, 而不是实际的物理形貌象.

从悲观的角度看, 如果我们只对表面物理形貌象感兴趣, STM 对局域电子结构的灵敏性会造成麻烦. 例如: 如果表面局部有氧化, 当探针到达此处时, 隧穿电流会急剧下降. 在衡流模式中, STM 会指示探针接近表面以维持恒定电流, 结果可能导致针尖在表面扎一个洞.

另一方面, 从乐观的角度看, STM 对局域电子结构的灵敏性是一个很大的优点. 经典的谱学方法如: X 射线光电子能谱(XPS), 紫外光电子能谱(UPS), 及反光电子能谱(IPES), 它们只能探测并平均一个较大区域(从几个微米到几个毫米)发出的信号, 而 STM 则可以对更小的区域甚至一个原子采谱.

一个原子的电子结构取决于它的种类(如: 是镓还是砷)及所处的局部化学环境(如: 它有几个原子近邻, 它们是何种元素及它们在空间分布的对称性如何等), 扫描隧道谱(STS)研究的就是 STM 信号与表面局域电子结构的关系.

STS 的测量有多种方法如: ① 比较在不同偏压下获得的表面形貌象(衡流模式); ② 在不同高度获取电流象(等高模式); ③ 将针尖置于

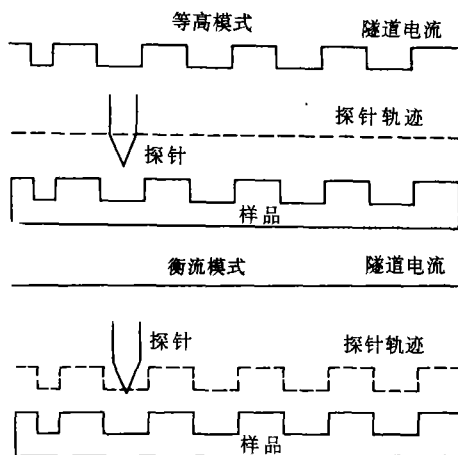


图7 STM 等高模式(上图)与衡流模式(下图)比较  
样品表面所感兴趣的点上, 然后改变偏压同时测量隧穿电流, 这种方法给出的是表示该点电子结构特征的电流-电压曲线  $I-V$  曲线. STM 还可在表面的每一点采集  $I-V$  曲线, 从而给出一个三维的电子结构图象. 使用锁相放大器、电导及功函数与偏压的关系也可直接测量. 所有这些都是用 STM 探测表面局域电子结构的方法.

## 五、其他 SPM 方法

接触式与非接触式 AFM, LFM, MFM 及 STM 是迄今为止最常用的 SPM 方法. 大多数商业化的仪器只需在基本单元上添加一些小部件即可实现 SPM 的各种功能, 有些功能甚至只需在软件中选择. 由于 SPM 技术发展很快, 这就要求新的探针技术较容易地结合至现有的系统中. 下面我们将简单介绍几种已在实验室中成功使用的新的探针技术.

**1. 扫描近场光学显微镜** 扫描近场光学显微镜(NSOM)是一种特殊的、使用可见光的 SPM. 传统的光学显微镜由于光波长的限制, 分辨率通常在半个微米左右, 而 NSOM 可使原有分辨率提高一个量级.

NSOM 中的探针是一个“光漏斗”, 直径约为几百埃的可见光从漏斗的尖端发出, 光束经样品反射或穿透样品后由探测器接收, 表面上每一测量点的光信号强度则构成 NSOM 图象.

如果光源与样品间距很小(约 50 埃),则 NSOM 用可见光即可达到约 150 埃的分辨率。

NSOM 的难点在于光漏斗的制做及保持光源与样品间距不变。或许制造光漏斗最常用的方法是加热一个光纤,将它拉长至其直径很小,然后切断制成光漏斗,光纤外还可镀上金属反光膜使光束更有效地在光纤内传播。另一种制造光漏斗的方法是在中空的 AFM 针尖顶端打一个小孔,然后在上方加一光源使光从小孔漏出。目前,设计制造有效的光漏斗是一个很活跃的研究领域。

另一方面,为了获得可简单解释的表面光学图象,NSOM 必须保持光源与样品间距不变,这时可使用传统的 AFM 中保持悬臂弯曲不变的技术。

**2. 静电力显微镜** 静电力显微镜(EFM)在针尖与样品间加一偏压,此时探针与悬臂均接近样品但不与样品接触,当针尖接近表面静电荷时,悬臂会发生弯曲,弯曲的大小与电荷密度成正比,且这一弯曲可用光反射方法探测。EFM 可用来研究表面电荷载体密度的空间分布。

**3. 扫描电容显微镜** 扫描电容显微镜(SCM)可对表面电容的空间分布成象,类似于 EFM,SCM 在针尖与样品间加一偏压,悬臂在非接触、等高模式下工作,一个特殊的电路用于测量针尖与样品间的电容;由于电容的大小同针尖与样品间物质的介电常数有关,因此 SCM 可以对半导体基片上介电材料厚度的空间分布成象;SCM 还可对近表层电荷载体的分布成象,如可以测量离子注入半导体中的掺杂分布。

**4. 纳米印刷术** 通常 SPM 对表面成象不会造成损伤,但 AFM 或 STM 也可被用来对表面作有意的修饰,方法是在 AFM 中加一个较大的力,或在 STM 中施加一个高场强电脉冲。在科学杂志中,甚至在报纸上,我们已见过表面被一个原子一个原子移动的结果,这一技术称为纳米印刷术。大多数商业化的 SPM 可作纳米印刷,只要系统可产生高场强电脉冲,及

引导针尖在设定的路线行走。

## 六、作用力对距离曲线

在 AFM 中,一个与 STM 中 I-V 曲线类似的方法是采集悬臂所受到的作用力对针尖至样品的距离曲线。这一曲线可用来研究表面污染物的粘滞度、润滑剂的厚度及表面弹性的局部变化。

严格地讲,作用力-距离曲线是由探测器(PSPD)所得到的悬臂位移对压电扫描器伸缩的关系曲线。图 2 中的范德瓦尔斯力曲线只表示了作用于悬臂力的一种,我们将看到作用力-距离曲线的变化反映了表面局部的弹性性质,而表面污染物或润滑剂层,像大气下 AFM 实验中表面会有水层一样,也会影响实验的结果。

作用力-距离曲线是比较复杂的,它与特定的研究对象有关,这里讨论的是简化的情况,其中形状、大小及距离的定义并不十分严格。基于上述假定,我们首先考虑 AFM 在真空中的情况(见图 8 上);图的左半边为作用力-距离曲线,右半边为针尖与样品接近示意图;在曲线的左端,扫描器处于收缩状态,这时针尖与样品没有接触,因而悬臂没有位移;当扫描器伸长时,针尖将与样品接近而受到范德瓦尔斯力,这时悬臂将产生位移,在图中 a 点(小圆圈所示),针尖将咬住样品而处于接触状态,同时悬臂会突然向样品弯曲;如果扫描器继续伸长,由于排斥力的作用,悬臂将向远离样品方向近似成线性弯曲(图中 b 段);当这一伸长达到极大(曲线最右端)后,扫描器开始收缩,这时如果不考虑扫描器的滞后效应,悬臂将随着针尖远离样品表面沿同一条曲线返回(图中曲线右侧)。

在空气中悬臂受力的返回曲线将有所不同,这是由于表面会有单层或多层水存在(见图 8 中),表面水层会对针尖施加一个强的毛细引力。当针尖试图离开表面时,水层会吸住针尖使之与样品保持接触状态,而悬臂将向样品方向强烈弯曲(图中 c 区)。这取决于水层的厚度,当悬臂弯曲到一定极限时,针尖会突然离开表面(图中 d 点),这一转折点称为反咬合点。随

着扫描器继续收缩,悬臂将进入不受外力作用的自由空间。

如果表面同时存在水层与污染层或润滑层(如图8下,右侧粗黑线所示),作用力-距离曲线会出现多个反咬合点( $d_1, d_2$ ),这些点的位置及作用区的大小( $c_1, c_2$ )将取决于表面阻挡层的厚度及粘滞度。

接触式 AFM 可在作用力-距离曲线上任何线性区工作(如 b, c 两区),c 区适用于柔软的样品,这样可减小针尖与样品间的总力。另一方面,系统在悬臂向样品方向弯曲状态下工作是不稳定的,这时扫描速率需要降低。注意在 c 区工作仍称为接触模式,因为这时针尖与样品仍处于接触状态。非接触式 AFM 将在作用力-距离曲线中 a 点左端工作,这一点处于针尖被样品表面吸住前的临界状态。

在作用力-距离曲线上的线性 b 区,直线

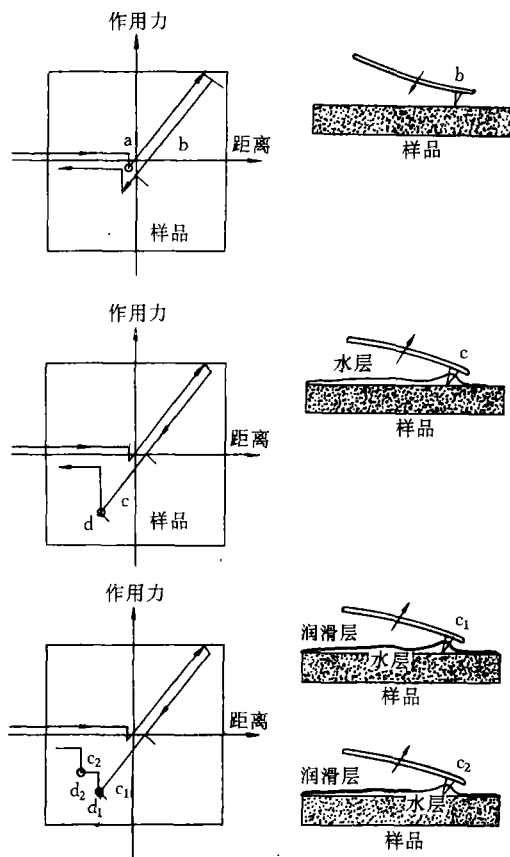


图8 在真空中(上图)、湿润空气中(中图)及有污染物(下图)情况下的作用力-距离曲线

的斜率与系统的弹性模量有关。当悬臂比样品表面软时(非破坏性测量),直线斜率主要反映了悬臂的弹性系数大小;当悬臂比样品表面硬时,作用力-距离曲线的斜率使得我们可以研究表面的弹性性质。

## 七、表面元素的判定

在观察 AFM 图象时经常会遇到这种情况:人们指着一个奇特的表面区域问它的元素组成。迄今为止,还没有那一种 SPM 可以在没有其他方法的帮助下确定表面的原子或分子种类,但是 SPM 可对部分不同材料加以区别。

前面我们讨论了用 STM 根据电子结构区别不同材料,对非导体,LFM 可根据探针与不同材料的摩擦系数不同加以区分。例如:聚合物表面与针尖的摩擦力同聚合物内填充物与针尖的摩擦力是不同的。人们还可以对 AFM 图象中感兴趣的部位采集作用力-距离曲线,这样可根据材料的弹性性质不同加以区分。还有,在非接触 AFM 中,范德瓦尔斯力的大小与表面原子种类是有关的,当然,这一方法的灵敏性有待进一步研究。

## 八、扫描探针显微镜的工作环境

扫描探针显微镜可在不同环境下工作,下面我们讨论三种环境:超高真空(UHV),普通环境及电化学环境。

**1. 超高真空 SPM** 世界上首台研究表面原子结构的 STM 是在超高真空条件下进行的。硅是研究得最多的样品, Si(111)的(7x7)再构表面经常被用来做为检验 UHV-STM 性能的标志, UHV-STM 的一个重要应用是扫描隧道谱(STS)。对于原子级清洁的表面, STS 既可研究表面形貌,又可研究表面电子态,在 UHV 条件下不必担心大气的表面污染。另一个应用是原位研究表面过程:即在同一真空室内观察材料生长等,同理在材料生长过程中不必担心表面被污染。

虽然 SPM 家族中第一台是 UHV-STM,但过了许久才出现 UHV 下的 AFM。在 UHV

# 光纤传感器及其研究现状

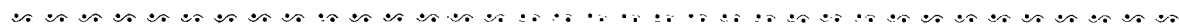
王立新

(山东聊城师范学院 252059)

随着现代科学技术的发展,信息的获得显得越来越重要.传感器正是感知、检测、监控和转换信息的重要手段.光纤传感器是继光纤通信技术之后在本世纪70年代出现的集光学、电子学为一体的新型传感器,与以往的传感器不同,它将被测信号的状态以光信号的形式取出.光信号不仅能被人所直接感知,利用半导体二极管如光电二极管等小型简单元件还可进行光电、电光转换,极易与一些电子装置相匹配,这是光纤传感器的优点之一;另外光纤不仅是一种敏感元件,而且是一种优良的低损耗传输线;因此,光纤传感器还可用于传统的传感器所不适用的远距离测量.近年来光纤传感器得到了越来越广泛的应用.

## 1. 光纤传感器的基本构成及原理

光纤传感器由光源、入射光纤、出射光纤、光调制器、光探测器及解调器组成.其基本原理是将光源的光经入射光纤送入调制区,光在调制区内与外界被测参数相互作用,使光的光学性质(如强度、波长、频率、相位、偏振态等)发生变化而成为被调制的信号光,再经出射光纤送入光探测器、解调器而获得被测参数.光纤传感器按传感原理可分为两类,一类是传光型(或称非功能型)传感器,另一类是传感型(或称功能型)传感器.在传光型光纤传感器中,光纤仅作为光的传输媒质,对被测信号的感觉是靠其它敏感元件来完成的,这种传感器中出射光纤和入射光纤是不连续的,两者之间的调制器



条件下更换 AFM 悬臂及调整光路是 UHV-AFM 发展的主要障碍,虽然这些工作在大气中并不困难.近年来 STM 与 AFM 已可安装在同一个法兰盘上,使得我们可以在 UHV 下研究导体与绝缘体.

**2. 普通环境下的 SPM** 最简单的、最经济的因而也是最普及的是普通环境下的 SPM,包括大气中及溶液中的.在大气下做 STM 是困难的,这是由于几乎所有的表面在大气中都会发生氧化或被污染,而表面氧化层或污染物会影响隧穿电流.一类在普通环境下 STM 中工作很好的材料是层状化合物,如:石墨、 $\text{MoS}_2$ 、 $\text{Nb}_3\text{Se}$  等.对这些材料只要将旧的表层揭开即可获得新鲜的清洁表面.由于 AFM 对

表面电导不敏感,因此可在大气下对任何固体(包括污染物)成象.

SPM 中的液体盒使针尖与样品全部浸在液体中,这样便可对水化物成象;由于在液体中毛细张力是各向同性的,针尖对样品施加的压力在液体中会减小.

**3. 电化学环境下的 SPM** 类似于 UHV,电化学盒为 SPM 提供了一个可控的工作环境.通常作为普通环境下 SPM 的一个备件,电化学(EC)SPM 包括一个电化学盒、恒电势器及软件. EC-SPM 的应用包括对电极的电子态及结构实空间成象、由化学及电化学反应引起的表面变化、新相的形成、吸附、腐蚀及有机或生物分子在电解液中的沉积等.