



实验报告

姓名:黄德勇 学号:222023319210132 专业班级:材料物理3班 成绩:

实验课程	材料学科基础实验 C		
实验名称	原子力显微镜的原理与实践		
实验时间	2025 年 9 月 23 日	实验地点	25-108

一、实验预习

1. 实验目的

- ① 学习原子力显微镜的基本原理;
- ② 了解原子力显微镜的基本构造;
- ③ 学习使用原子力显微镜完成材料表面形貌探测;
- ④ 了解原子力显微镜的形貌图中所蕴含的讯息。

2. 实验原理

一、核心原理: 探针与样品间的相互作用力

AFM 的最基本原理是测量一个极尖锐的探针 (悬臂梁末端) 与样品表面原子之间的极其微弱的相互作用力。这种力的性质随距离变化, 通常可以用 Lennard-Jones 势 来描述。Lennard-Jones 势能 $U(r)$ 描述了两个中性原子间的势能与它们之间距离 r 的关系:

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

其中, 第一项是表示泡利不相容原理的强排斥力 (短程力), 第二项是表示范

德华力的吸引力（长程力）。

力是势能对距离的负梯度，因此探针与样品间的力 $F(r)$ 为：

$$F(r) = -\frac{dU(r)}{dr}$$

对 $U(r)$ 求导，我们得到力的具体表达式：

$$F(r) = 4\epsilon \left[\frac{12\sigma^{12}}{r^{13}} - \frac{6\sigma^6}{r^7} \right]$$

在实际操作中，当探针离样品很远时， $F(r)$ 几乎为零；当靠近时，首先表现为吸引力（范德华力）；当进一步靠近以至于原子轨道重叠时，迅速转变为巨大的排斥力。AFM 就是通过精确测量并利用这种力的变化来实现成像的。

1. Tip-Sample Interaction: Lennard-Jones Model

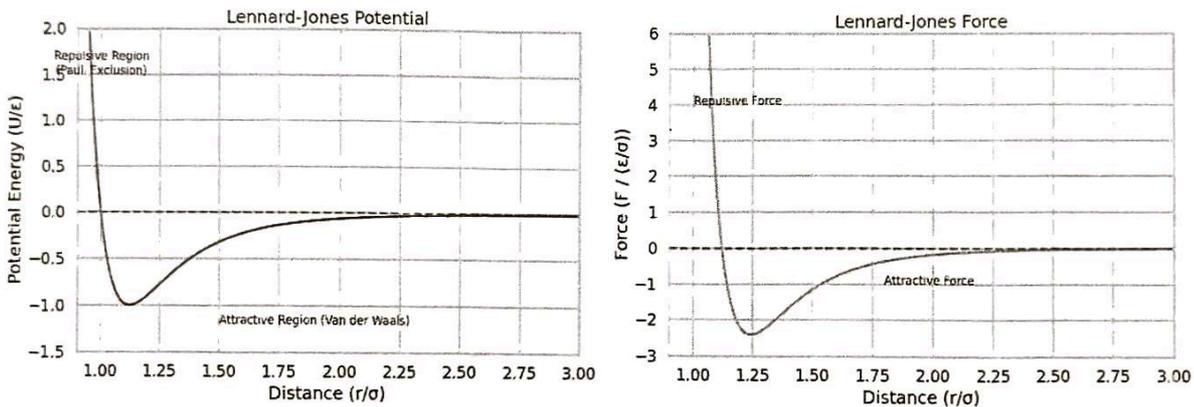


Fig 1 **潜在图（左）**：显示针尖与样品原子之间的势能。当针尖从远处靠近时，它会被拉入一个低能“势阱”（范德华力）。如果针尖推得太近，它会遇到一个陡峭的能量墙（泡利排斥力）。

力图（右）：表示力，它是势能的导数。势阱的负斜率产生吸引力（负值），而陡壁则产生强大的排斥力（正值）。原子力显微镜 (AFM) 就是通过测量这些力来工作的。

二、核心部件：悬臂梁与光杠杆系统

如此微弱的力无法直接测量，因此 AFM 使用了一个微小的悬臂梁 (Cantilever) 作为力传感器。

1. 悬臂梁的力学响应

悬臂梁可以被简化为一个弹性弹簧，其行为遵循胡克定律。当垂直方向的力 F_z 作用于探针上时，悬臂梁会产生一个微小的垂直偏转 Δz 。

$$F_z = -k_z \Delta z$$

其中 k_z 是悬臂梁在垂直方向的弹性系数。通过测量 Δz ，就可以计算出 F_z 。

2. 光杠杆放大系统

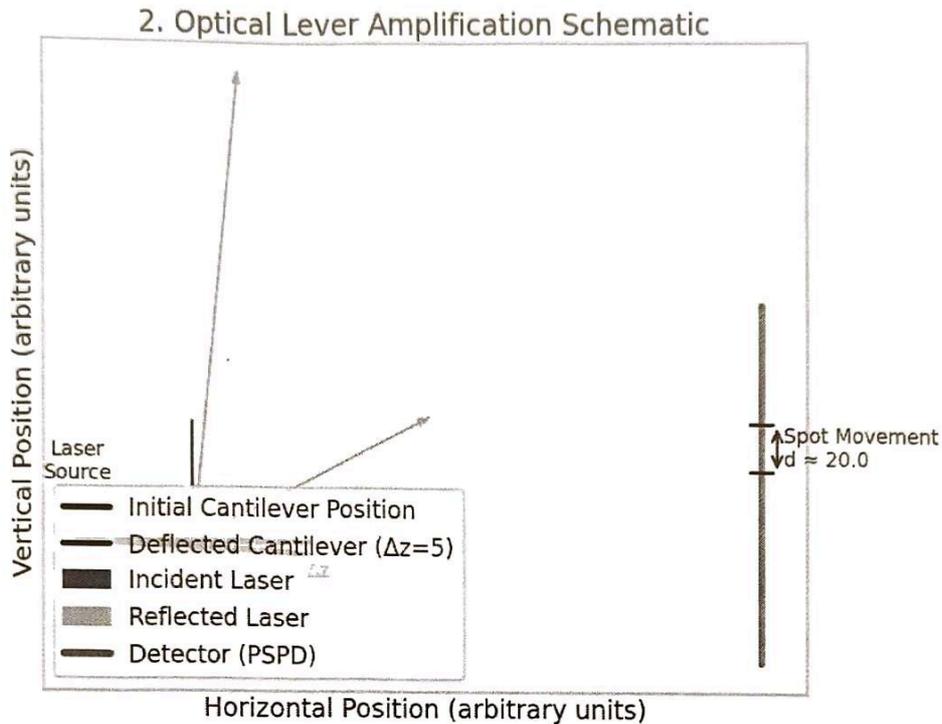


Fig 2 该示意图直观地展示了 AFM 如何实现其惊人的灵敏度。悬臂的微小物理偏转 (Δz) 会导致其角度发生变化。这种角度变化会使反射的激光束以两倍的角度重新定向，从而产生更大、更容易测量的移动 (d) 光电探测器上激光点的偏转。该图显示 $\Delta z=5$ 被放大成一个点运动 $d=20.0$ 在这个夸张的例子中，任意单位。

悬臂梁的偏转 Δz 非常微小（可达纳米甚至皮米级别），需要一个放大系统来检测。最常用的就是光杠杆（Optical Lever）系统。一束激光照射到悬臂梁的背面，然后反射到一个位置敏感光电探测器（PSPD）上。

悬臂梁的微小偏转角度 θ 与偏转量 Δz 和悬臂梁长度 L 相关：

$$\theta \approx \tan \theta = \frac{\Delta z}{L}$$

根据光的反射定律，反射光束的偏转角度是悬臂梁偏转角度的两倍，即 2θ 。激光光斑在探测器上的位移 d 为：

$$d = D \tan 2\theta$$

将 θ 代入, 我们得到探测器上的光斑位移 d 与悬臂梁的物理偏转 Δz 之间的关系, 这是一个巨大的放大倍数:

$$d \approx \frac{2D}{L} \Delta z$$

三、主要工作模式推导

1. 接触模式 (Contact Mode) 与摩擦力测量

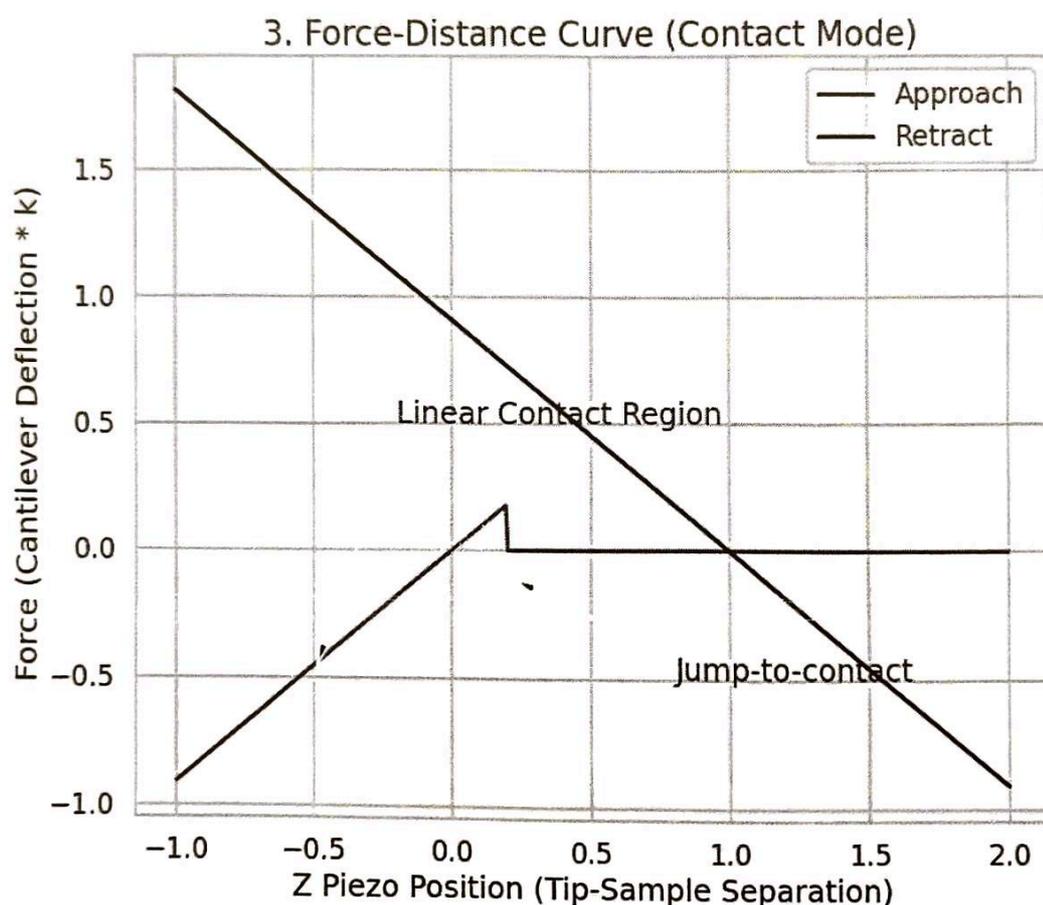


Fig 3 进场 (红线): 当探针靠近表面时, 由于吸引力的作用, 探针会“跳跃接触”。一旦接触, 随着压电元件将探针推向表面, 力会线性增加, 这符合胡克定律。

收回 (蓝线): 当尖端被拉开时, 表面黏附力会将其固定原位, 从而产生一个向下的负力。打破这种黏附力所需的力称为“拉脱力”, 之后悬臂会弹回至中立位置。接近曲线和回缩曲线之间的差异称为滞后现象。

在接触模式下, 探针尖端与样品表面保持持续的“轻微”接触, 此时探针处于原子间作用力的排斥力区域。

→ 表面形貌扫描:

反馈系统会维持悬臂梁的偏转量 Δz 恒定 (即法向力 F_z 恒定)。当探针在样品表面扫描时, 如果遇到凸起, Δz 会增大; 如果遇到凹陷, Δz 会减小。为了保持 Δz 不变, Z 轴压电陶瓷会相应地后退或前进。记录 Z 轴压电陶瓷在每个 (x, y) 位置的高度变化, 就构成了样品的三维表面形貌图。

→ 摩擦力 (横向力) 采集 (Lateral Force Microscopy, LFM):

当悬臂梁在样品表面左右扫描时, 除了垂直方向的力, 还会受到来自表面的摩擦力 F_f 。这个力是横向的, 它不会使悬臂梁上下偏转, 而是使其发生扭转。

这个扭转力矩 τ 等于摩擦力 F_f 乘以探针的有效高度 h :

$$\tau = F_f \cdot h$$

悬臂梁对扭转也有一个恢复力矩, 其大小与扭转角度 ϕ 成正比, 类似扭转弹簧:

$$\tau_{restore} = -k_t \phi$$

其中 k_t 是悬臂梁的扭转弹性系数。在平衡状态下, $\tau + \tau_{restore} = 0$, 因此:

$$F_f = \frac{k_t \phi}{h}$$

这个扭转 ϕ 会导致反射的激光光斑在探测器上产生 横向位移。PSPD 探测器通常是四象限的, 垂直偏转信号由 $(A + B) - (C + D)$ 计算, 而横向扭转信号则由 $(A + C) - (B + D)$ 计算。通过标定横向信号, 就可以得到与摩擦力成正比的信号, 从而获得表面的摩擦力分布图。

2. 非接触模式 (或轻敲模式, Non-Contact Mode)

在非接触模式下, 探针在样品表面上方几到几十纳米的距离处振动, 不与样品发生物理接触, 主要探测的是长程的 吸引力 (如范德华力)。基本原理:

悬臂梁被驱动在其共振频率 ω_0 附近振动。其运动可以近似看作一个受驱动的 阻尼谐振子。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + \gamma \frac{dz}{dt} + k_z = F_{drive} \cos(\omega t)$$

其无阻尼、无驱动下的固有（共振）角频率 ω_0 为：

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_z}{m}}$$

当探针靠近样品表面时，它会受到来自样品的作用力 F_{tip} 。这个力的存在相当于改变了振动系统的势能，从而改变了其有效弹性系数 k_{eff} 。有效弹性系数的变化量等于力的梯度：

$$k_{eff} = k_z - \frac{\partial F_{tip}}{\partial z}$$

注意，在吸引力区，力的梯度 $\frac{\partial F_{tip}}{\partial z}$ 是正的，所以 k_{eff} 减小；在排斥力区，力的梯度是负的，所以 k_{eff} 增大。

有效弹性系数的改变导致了悬臂梁共振频率的漂移。新的共振频率 ω'_0 为：

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k_{eff}}{m}} = \sqrt{\frac{k_z - \frac{\partial F_{tip}}{\partial z}}{m}}$$

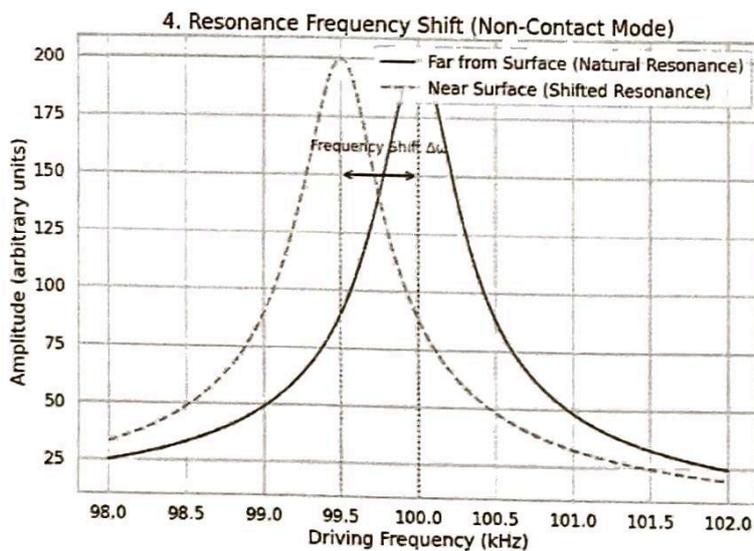


Fig 4 该图解释了非接触式 AFM 的原理。悬臂以其固有共振频率 (ω_0)，其中其振动幅度最大 (蓝色曲线)。

探针靠近样品时，它会感受到一股吸引力。这种力梯度就像一根弱的附加弹簧，改变了悬臂的有效弹簧常数。

这种变化将共振峰转移到一个新的、更低的频率 (哦)。AFM 中的反馈回路的作用是保持此频率偏移 (给) 常数，通过调整尖端与样品之间的距离来绘制表面形貌。

二、实验过程

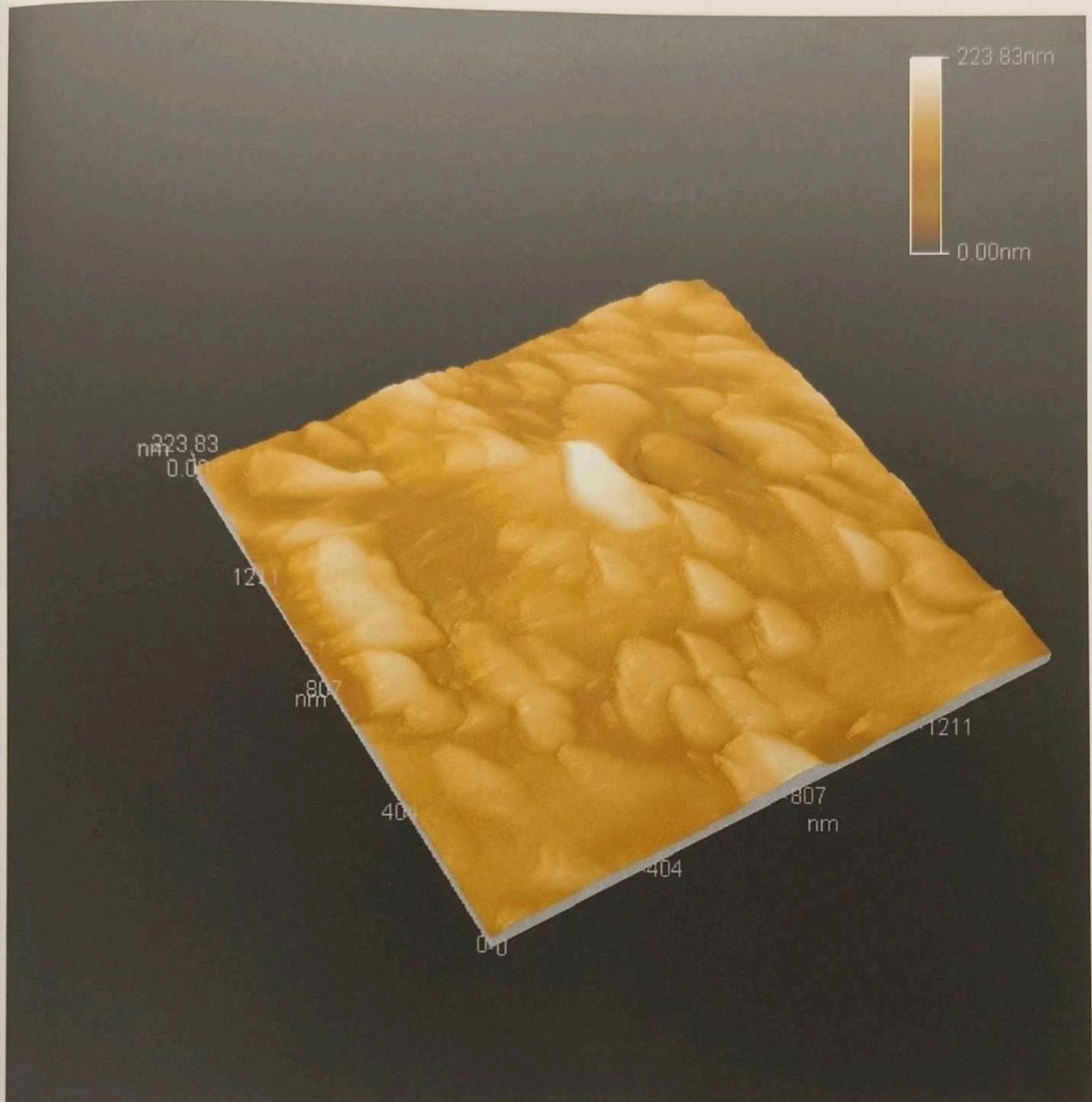
1. 实验装置

本源 CSPM5500 扫描探针显微镜（标准版本，不含加热元件及气稳定装置）

2. 实验装置示意图



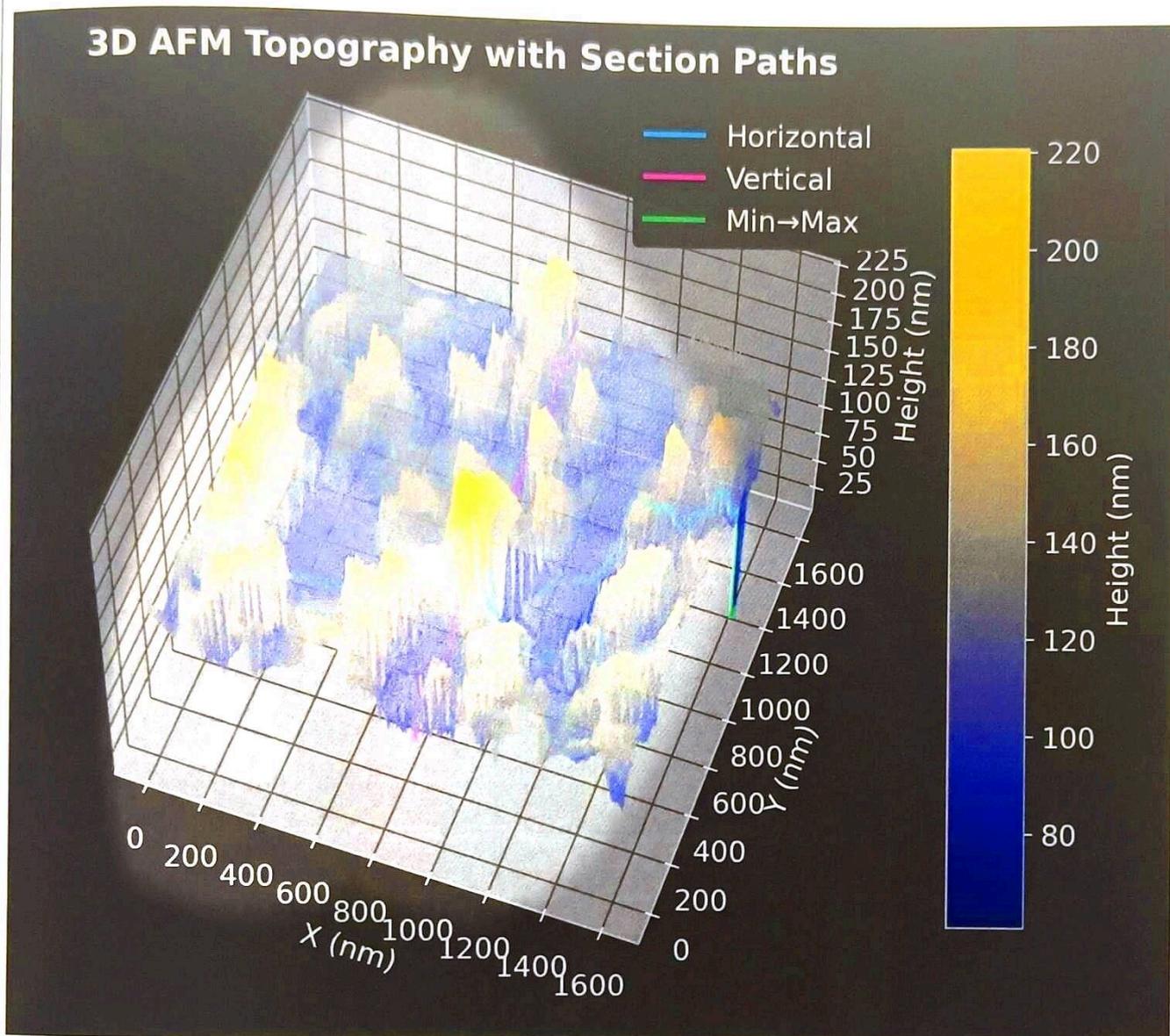
4. 实验现象记录和数据记录



三、分析讨论

1. 实验结果与分析

概述与核心指标

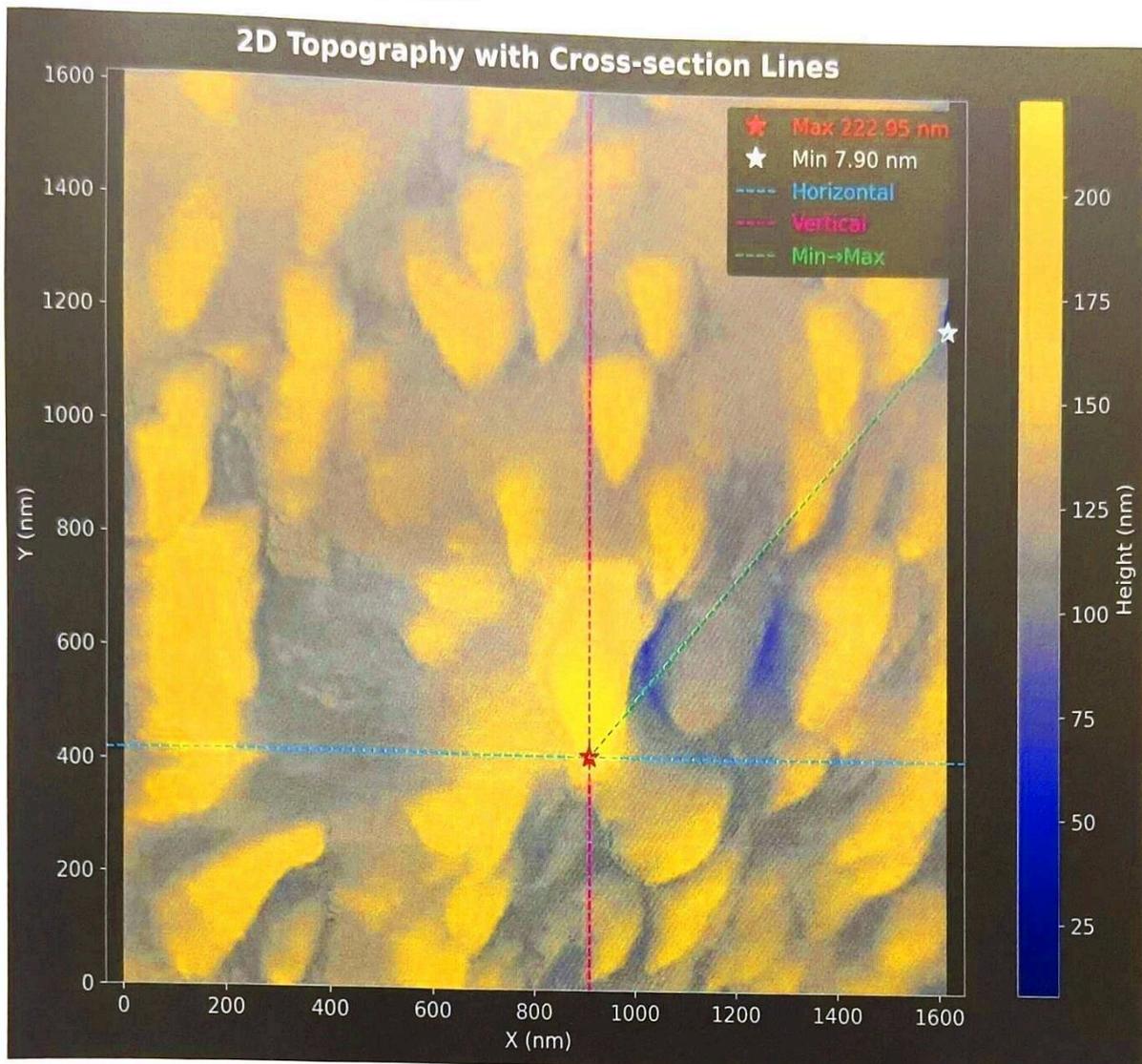


我们分析的样本是在 $1614 \text{ nm} \times 1614 \text{ nm}$ 的扫描区域内获取的。从整体来看，该样本表面并非平坦，而是由大量紧密堆积的颗粒状或岛状结构组成，呈现出显著的地形起伏。

最大峰谷差 (R_t): $222.95 - 7.90 = 215.05 \text{ nm}$

这个高达 215.05 nm 的峰谷差表明，表面的垂直起伏非常剧烈，几乎与一些颗粒的横向尺寸相当。

表面形貌特征 (3D & 2D 图解读)

**颗粒结构:**

表面主要由大小不一的圆顶状颗粒构成。从 3D 图中可以清晰地看到, 这些颗粒并非尖锐的针状, 而是更像连绵起伏的“小山丘”。

分布规律:

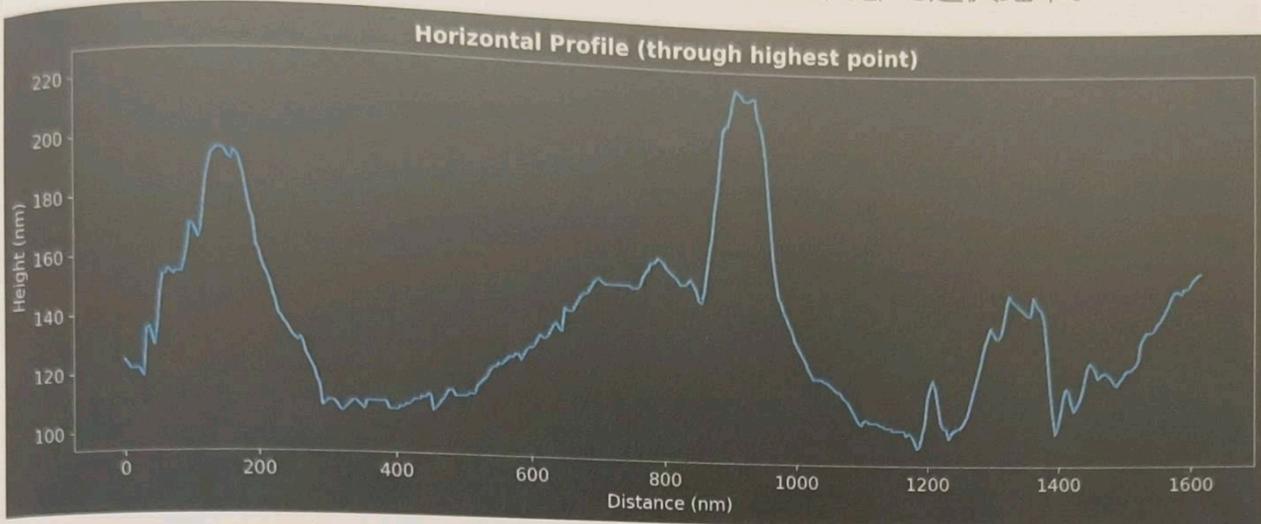
颗粒的分布相对密集, 但并非完全均匀。存在一些尺寸较大、高度较高的颗粒 (如图中的黄色区域), 同时也有大量较小的颗粒簇拥在一起。

“山谷”区域:

颗粒之间被地势较低的“沟壑”或“山谷”网络隔开 (如图中的深蓝色区域)。这些区域构成了表面的基底。

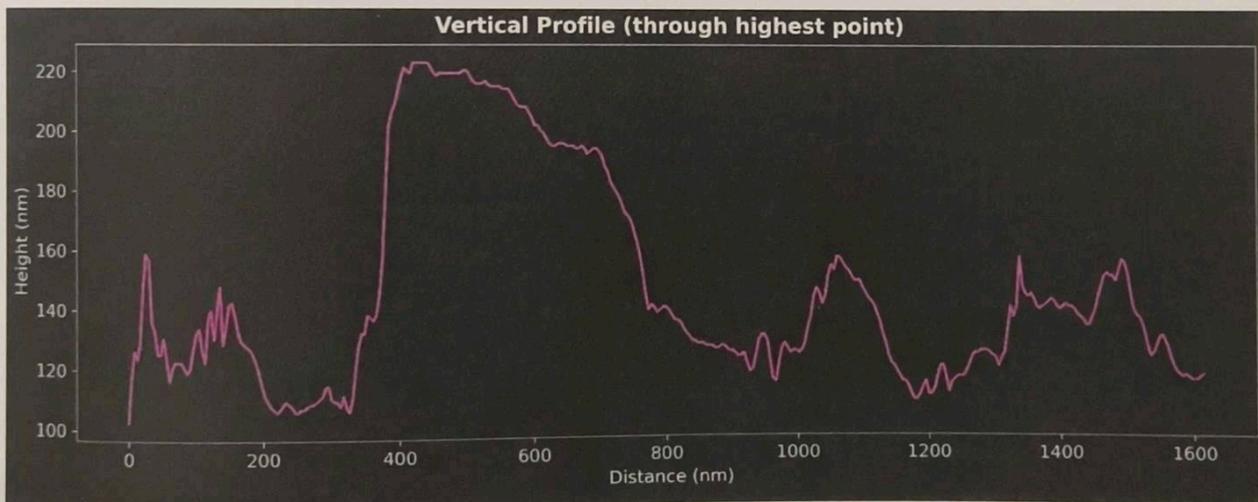
断面分析 (Cross-sectional Profiles 解读)

这是分析的核心，它让我们能“切开”表面，观察其内部的起伏细节。



水平剖面 (穿过最高点):

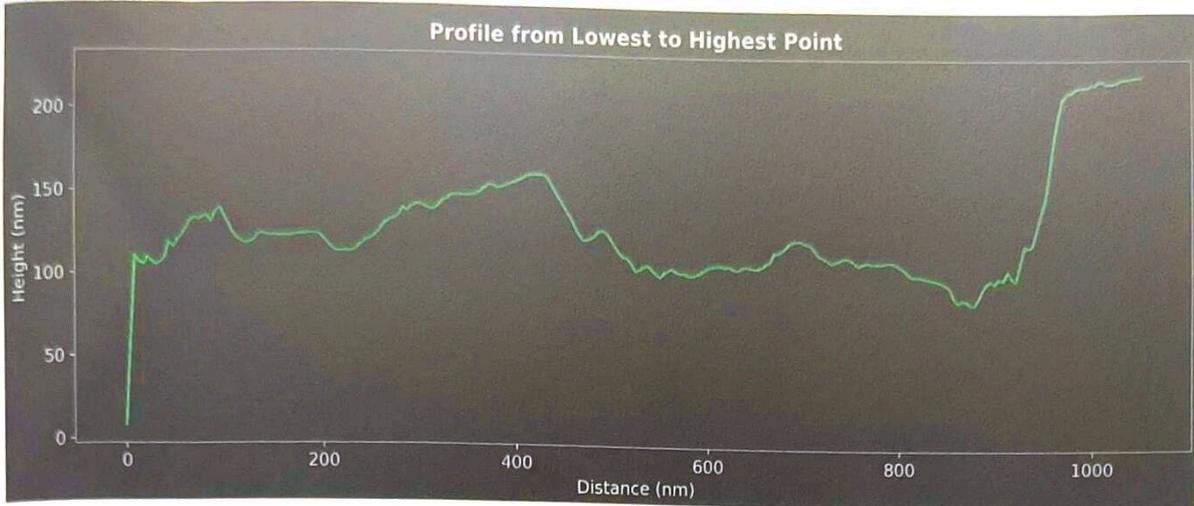
这条线清晰地揭示了最高峰的形状。在 $X \approx 908 \text{ nm}$ 处，我们看到了一个尖锐但顶部略带圆润的主峰。在主峰的左侧 ($X \approx 200 \text{ nm}$ 处)，还存在一个次高峰，高度约为 190 nm 。在 $X \approx 400 - 800 \text{ nm}$ 之间，地形进入了一个相对平缓的“谷底”，但仍然有小范围的波动，说明谷底也非绝对平滑。



垂直剖面 (穿过最高点):

这条剖面显示，最高峰的形状是不对称的。它的左侧 ($Y \approx 400 - 800 \text{ nm}$) 是一个相对宽阔的“高原”或“肩部”结构，而右侧 ($Y > 900 \text{ nm}$) 则下降得更为陡

峭。这说明形成最高峰的这个大颗粒，其一侧是缓缓并入周围结构，另一侧则可能是个更独立的陡坡。



最低点到最高点剖面：

这条线展示了表面的最大高度差。从最低点出发后，地形在长达约800 nm的距离内，都处于一个相对较低（100 – 150 nm）但不断起伏的平台区。在剖面的最后约200 nm的距离里，地形发生了急剧的、近乎垂直的爬升，从约100 nm迅速攀升至222.95 nm的顶峰。这表明，最高峰是一个非常局部化的、陡峭的突起，它从一个相对平坦的高原上拔地而起。

表面粗糙度分析 (Ra/Rq 解读)

为了更科学地量化表面的“粗糙”程度，我们计算两个标准参数：平均粗糙度 (Ra) 和均方根粗糙度 (Rq)。

	R_a (nm)	R_q (nm)
水平剖面	22.110	27.617
垂直剖面	27.904	34.707
对角剖面	23.842	33.348

➔ R_a (Average Roughness):

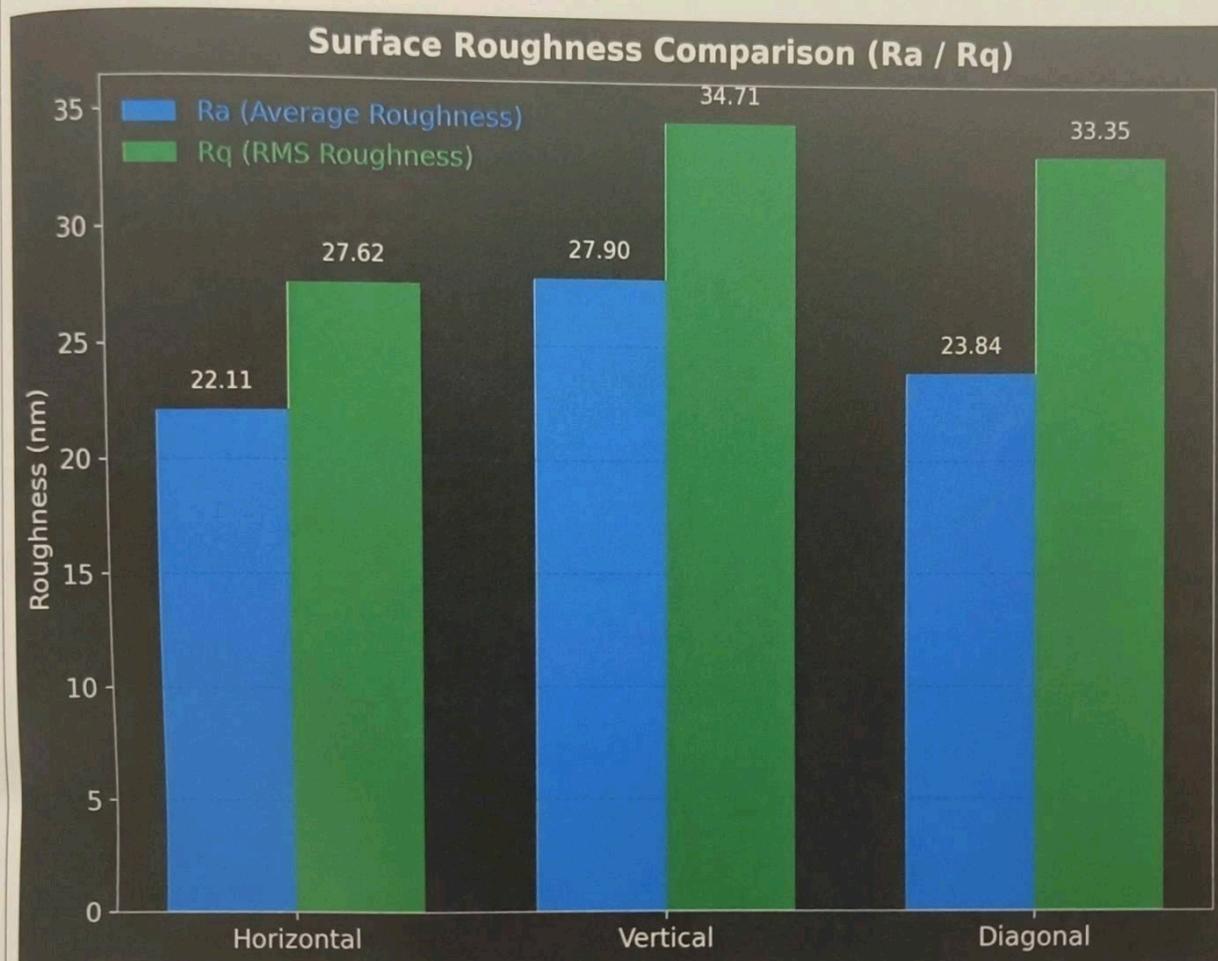
所有点高度相对于平均高度的绝对值的平均值。它代表了整体的、平均的粗糙

程度。

→ Rq (Root Mean Square Roughness):

高度偏差的平方的平均值的平方根。它对极端的峰和谷更为敏感。

Rq 值显著大于 Ra 值，是本次分析的一个关键点。这有力地证明了表面的粗糙度主要是由少数几个非常高（或低）的异常点贡献的，而不是由大量均匀的小锯齿贡献的。这与我们观察到的那个突出的主峰完全吻合。



各向异性分析 (不同方向的对比)

- 垂直方向最粗糙 (Ra=27.90 nm, Rq=34.71 nm): 这个方向的粗糙度值最高，是因为它穿过了最高峰旁边的宽阔高原区和陡坡，经历了最丰富的地形变化，因此整体起伏最大。
- 水平方向相对最平滑 (Ra=22.11 nm, Rq=27.62 nm): 虽然它也穿过了最高点，但

大部分路径位于相对平坦的“谷底”，拉低了平均值。

- 对角线方向 Rq 值高: 这个方向的 Rq 值 (33.35 nm) 也非常高, 几乎与垂直方向相当。这是因为它捕捉到了从最低点到最高点的极端跳变, Rq 对这种“飞跃”非常敏感。

这种在不同方向上粗糙度值的差异, 表明该样本表面具有各向异性 (Anisotropy), 即在不同方向上, 其表面特性是不同的。

最终结论与综合见解

宏观形貌:

该样本表面由密集的、大小不一的颗粒组成, 整体非常粗糙, 最大高度差超过 200 nm。

关键特征:

整个表面形貌由一个或几个非常突出的、陡峭的峰所主导。这个主峰结构是不对称的, 其一侧伴有宽阔的平台。

量化评估:

表面的粗糙度具有显著的各向异性, 其中垂直于主峰“山脊”的方向(我们分析中的垂直方向)粗糙度最大。

深层含义:

这种“孤峰”式的形貌和各向异性特征, 可能暗示了材料的生长或沉积过程。例如, 这可能是某种晶体在特定方向上优先外延生长, 或者是在沉积过程中形成的“柱状”结构的结果。

2. 问题提出与讨论

→ 如何判断原子力显微镜的激光已经完成校准，现代化原子力显微镜的自动化校准环境是如何实现的？



如在图所示，当完成校准后，激光会打中探针尖端位置，且在条件中反射光身冲光板中心位置时完成校准。

自动化校准过程的实现本质上是由在最佳位置处的探测器以及由反射接收板上的反向信号完成。

在长期使用的磨损下，自动化校准有自动补偿等控制。

→ 对于质软材料的表面摩擦力以及应力等的测量不能使用原子力显微镜的原因是什么？如果我们需要获知这样的数据应当使用什么检测方法？

质软材料一般只能使用非接触模式，并且注意探针与样品高处的位置，以免撞针或由于样品破坏，沾附到探针上，以免损坏。故不能使用接触模式。

指导教师签名：

日期：