

# 原子力显微镜 实验报告

Zhang Chuheng  
zhangchuheng123@live.com

2015年10月14日

## 1 引言

在当今的科学技术中，如何观察、测量、分析尺寸小于可见光波长的物体，是一个重要的研究方向。1982年，G. Binnig 和 H. Rohrer 在IBM公司苏黎世实验室共同研制成功了第一台扫描隧道显微镜（STM），使人们首次能够真正实时观察到单个原子在物体表面的排列方式和与表面电子行为有关的物理、化学性质。1986年，他们被授予诺贝尔物理学奖。但STM要求样品表面能够导电，从而使得STM只能直接观察导体和半导体的表面结构。为了克服STM的不足之处，Binnig、Quate和Gerber决定用微悬臂作为力信号的传播媒介，把微悬臂放在样品和STM的针尖之间，于1968年推出了原子力显微镜（AFM），AFM是通过探针与被测样品之间微弱的相互作用力来获得物质表面形貌的信息，因此，AFM除了导电样品外，还能够观察非导电样品的表面结构，其应用领域更为广泛。除了物理、化学、生物等领域之外，AFM还在微电子学、微机械学、新型材料、医学领域都有着广泛的应用。以STM和AFM为基础，衍生出了一系列的扫描探针显微镜（SPM）、有激光力显微镜（LFM）、磁力显微镜（MFM）等。扫描探针显微镜主要用于对物质表面在纳米级上进行成像和分析。

## 2 实验目的

1. 了解原子力显微镜的工作原理。
2. 初步掌握用原子力显微镜进行表面观测的方法。

## 3 实验原理

### 3.1 AFM的工作原理和工作模式

#### 3.1.1 AFM的工作原理

在AFM中用一个安装在对微弱力极敏感的微悬臂上的极细探针代替STM中的金属极细探针，当探针与样品接触的时候，由于它们原子之间存在微弱的作用力（吸引力或者排斥

力)，引起微悬臂偏转。扫面时控制这种作用力恒定，带针尖的微悬臂将对应于原子间作用力的等位面，在垂直于样品表面方向上起伏运动，通过光电检测系统对微悬臂的偏转进行扫描，测得微悬臂对应于扫描各点的位置变化，将信号放大与转换从而得到样品表面原子级的三维立体形貌图像，AFM的核心部件是力传感器，包括微悬臂（Cantilever）和固定于其一端的针尖。

根据物理原理，施加到微悬臂末端力的表达式为

$$F = K\Delta Z \quad (1)$$

式中， $\Delta Z$ 表示针尖相对于试样间的距离， $K$ 是微悬臂的弹性系数。力的变化均可以通过微悬臂被检测。

### 3.1.2 AFM的关键部分

AFM的关键部分是力敏感元件和力敏感元件检测装置。为了能准确反映出样品的表面形貌，力传感器要满足以下几个要求

1. 在针尖与样品的接触过程中，为了不使针尖损坏样品，要求微悬臂有相对较低的力弹性常数，即受到很小的力就能产生可检测的位移。
2. 为了降低一起对于噪声的敏感性，并使其有较高的扫描速度，要求微悬臂有尽可能高的固有共振频率（一般为200kHz ~ 300kHz）。
3. 因为微悬臂上的针尖与样品的摩擦力会引起微悬臂的横向弯曲，从而导致图像失真，这就要求微悬臂要有高的横向刚性，实际应用中将微悬臂制成V字形就可提高其横向刚性。
4. 如果采用隧道电流方式来检测微悬臂的位移，微悬臂的背面必须要有金属电极，若采用光学方法检测，则要求微悬臂背面有尽可能光滑的反射面
5. 如果采用光学反射方法检测微悬臂位移时，如果微悬臂一端的线性平移量是一定的，那么臂长越短，微悬臂的弯曲度就越大，检测的灵敏度就越好。
6. 带有一个尽可能尖锐的针尖。AFM仪器的发展，也可以说是微悬臂和针尖不断改进的过程。一般AFM采用微机械加工技术制作的硅、氧化硅以及氮化硅（ $Si_3N_4$ ）微悬臂。力传感器如图1所示（实验中用到的微探针底宽 $5\mu m$ ，针尖直径 $5nm$ ）。

微悬臂运动的检测方法有多种，主要可以分成两大类：一类是电学方法；一类是光学方法。

电学方法主要包括隧道电流检测法和电容检测法两种。隧道电流检测法是第一台AFM所采用的方法，它根据隧道电流对电极间距离非常敏感的原理，将STM用的针尖置于微悬臂的背面作为探测器。如图2(a)所示，通过该针尖与微悬臂间产生的隧道电流变化就可以检测由于原子间相互作用力令微悬臂产生的形变。电容法则是通过测量微悬臂与一参考电极间的电容变化来检测微弱力的。如果2(b)所示，当微悬臂发生形变时，使它与参考电极间

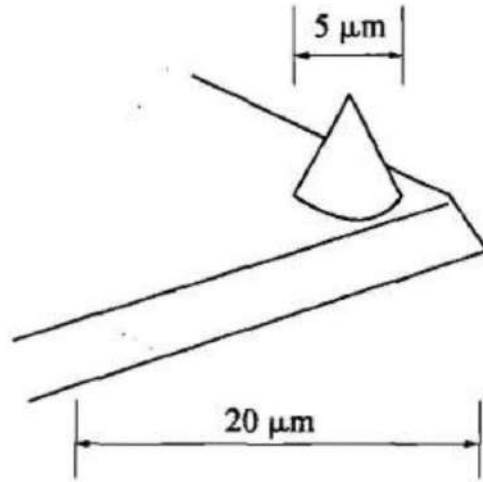


图 1: 力传感器

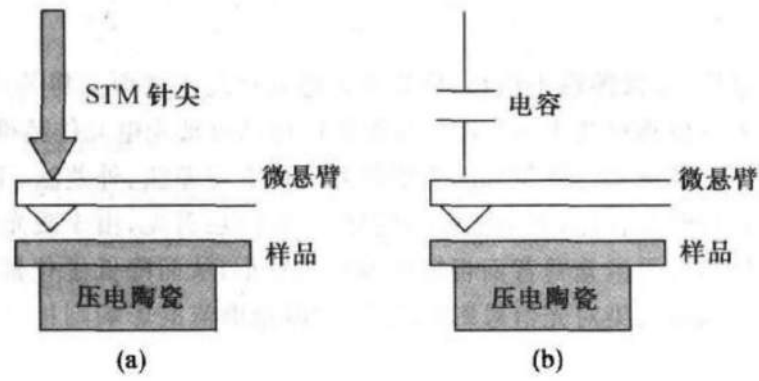


图 2: 微悬臂的电学检测法

的空间大小发生变化，即电容发生变化，通过测量该电容的变化量就可以测量微悬臂的位移。这个方法对于微悬臂针尖与样品的间距无特殊要求。

光学方法是通过测量激光束在微悬臂背面的反射来测量探针运动的。一种常用的方法如图3所示，一束激光经过微悬臂背面反射到一个位置灵敏探测器（PSD）上，当微悬臂弯曲时激光束在探测器上的位置将发生移动，PSD本身可测量光电小至1nm的位移，微悬臂位移的放大倍数为微悬臂至探测器的距离与悬臂长度之比的两倍。通常认为这一比例可以做的很大，使得系统可以探测针尖在垂直方向上小于0.1nm的位移。这种方法叫做偏转测量法。针尖与样品原子之间的作用力十分微弱，数量级小于 $10^{-6}N$ ，它推动悬臂产生的偏转量也非常小，不能用常规方法直接测量。光点偏转法利用了光杠杆原理将微悬臂的微位移放大。如图4当激光束聚焦入射到悬臂外端时，大部分将被反射到QPSD的光敏面上，在起始状态时，反射光点位于A，而在原子力状态，样品原子通过针尖推动悬臂移动 $\Delta h$ ，偏转 $\Delta\alpha$ 。显然，反射光束将偏转 $2\Delta\alpha$ 角，光点移动到B，位移量 $\Delta s$ 。设悬臂长 $\lambda$ ，光电接收元件到悬臂的距离为 $L$ ，则有

$$\Delta s = L \cdot (2\Delta\alpha) = L \cdot 2\left(\frac{\Delta h}{l}\right) = \frac{2L}{l} \cdot \Delta h \quad (2)$$

上式表明通过光杠杆作用，可将针尖的微小位移放大 $\frac{2L}{\lambda}$ 倍，在本仪器中取 $L = 10cm$ ，悬臂长 $\lambda = 200\mu m$ ，得到

$$\Delta s = \frac{2 \times 10 \times 10^4}{200} \cdot \Delta h = 1000 \cdot \Delta h \quad (3)$$

这样，悬臂的微小位移，反映到光电元件的光敏面上将被放大1000倍。如果悬臂偏转1nm，光电位移可达1 $\mu m$ ，这一量级的位移已经可以被光电元件精确分辨出来。

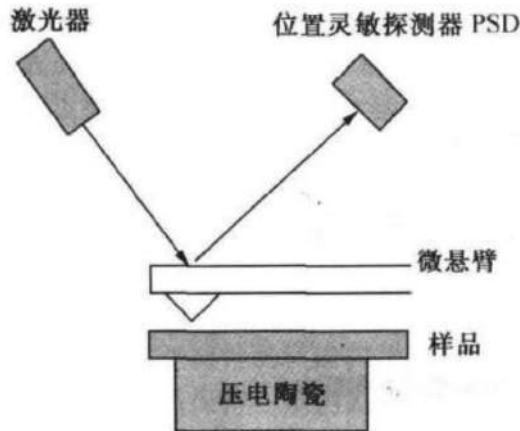


图 3：微悬臂运动的光学检测方法

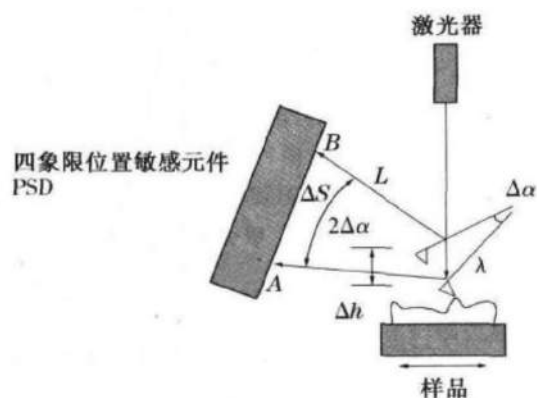


图 4: 光杠杆的位移放大原理

其他微悬臂位移的光学测量法还有自差法、外差法、干涉法等。与电学方法特别是隧道电流检测法相比，光学法有一些独特的优点：首先，由于激光束束斑的直径为几个微米，这使其反射信号受微悬臂背面粗糙度的影响较小，从而降低了一起对于热漂移的敏感程度；其次，微悬臂背面的污染程度对光信号影响较小，对隧道电流的影响相当严重；另外，激光束对微悬臂产生的作用力很小，从而使一起更加稳定可靠，而且光学法对于微悬臂的导电性无要求。

### 3.1.3 AFM的工作模式

当AFM的微悬臂与样品表面原子相互作用时，通常有几种同时作用于微悬臂，其中最主要的是范德瓦尔斯力。原子力与针尖至样品表面原子间距离关系曲线如图5所示。当两个原子相互靠近时，它们先相互吸引，随着原子间距继续减小，两个原子的电子排斥力将开始抵消吸引力直到原子的间距为几个埃时，两个力达到平衡，间距更小时，原子力由负变正（排斥力），利用原子力的性质，我们可以让针尖与样品处于不同的间距，使得微悬臂与针尖的工作模式有所不同。AFM有三种不同的工作模式：接触模式（contact mode）、非接触模式（non-contact mode）和共振模式/轻敲模式（tapping mode）。

当针尖与样品间的原子力处在排斥区的时候，两者的间距小于 $0.3nm$ ，基本上是紧密接触的，这种模式叫做接触模式。由于这时针尖端原子与样品表面原子的电子云发生重叠，排斥力将平衡几乎所有可能使两个原子接近的力，微悬臂将弯曲而不可能使针尖与表面原子靠的更近，悬臂的弯曲较方便地被检测，使得一起的分辨率极高，可达原子水平。运用这种模式可以测量原子间的近程相互斥力、针尖与样品间的摩擦力。

### 3.1.4 AFM中针尖与样品间的作用力

样品与探针之间的相互作用力主要是针尖最后一个原子核样品表面附近最后一个原子之间的作用力。当探针与样品之间的距离 $d$ 较大（大于 $5nm$ ）时，它们之间的相互作用力表现为范德瓦尔斯力。可假设针尖是球状的，样品表面是平面，则范德瓦尔斯力随 $1/d^2$ 变

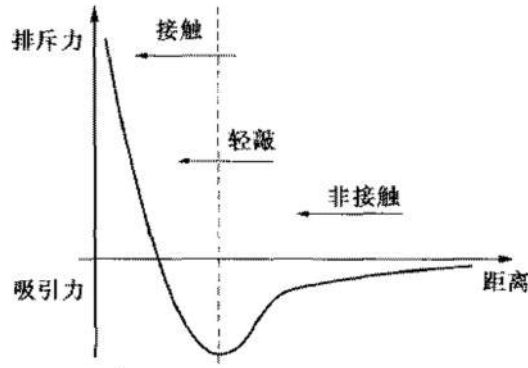


图 5: 针尖至样品表面原子间的范德瓦尔斯力

化。如果探针与样品表面相接触或它们之间的间距 $d$ 小于 $0.3nm$ ，则探针与样品之间的力表现为排斥力。这种排斥力与 $d^{13}$ 成反比变化，比范德瓦耳斯力随 $d$ 的变化大得多。探针与样品之间的相互作用力约为 $10^{-6} \sim 10^{-9}N$ ，在如此小的力作用下，探针可以探测原子，而不损坏样品表面的结构细节。样品与探针的作用力还有其他形式，如当样品与探针在液体介质中相接触时，往往在它们的表面有电荷，从而产生静电力；样品与针尖都有可能发生形变，这样样品与针尖之间有形变力；特定磁性材料的样品和探针可产生磁力作用；对一些特定样品和探针，可能样品原子与探针原子之间存在相互的化学作用，而产生化学作用力，但在研究样品与探针之间的作用力的大小时，往往假设样品与探针特定的形状（如平面样品、球状探针），可对样品和探针精心设计与预处理，避免或忽略静电力、形变力、磁力、化学作用力等的影响，而只考虑范德瓦耳斯力和排斥力。

### 3.2 AFM的针尖技术

目前，一般的探针式表面形貌垂直分辨率已经达到 $0.1nm$ ，而STM更高，达到 $0.01nm$ ，因此足以检测出物质表面的微观形貌。但是，探针针尖曲率半径的大小将直接影响到探测的水平分辨率。针尖技术的发展在AFM中非常重要。

其一是发展制得更尖锐的探针，如用电子沉积法制得的探针，其针尖曲率半径在 $5nm \sim 10nm$ 之间。

其二是对探针进行修饰，从而发展起针尖修饰技术。目前，用于AFM针尖修饰的技术主要有

1. 自组单分子膜修饰AFM针尖。这种化学修饰过的AFM针尖可用来定量测定基底与针尖自组膜的尾部基团之间的粘附力和摩擦力。
2. 碳纳米管修饰AFM针尖。碳纳米管材料的研究是目前热门课题之一。碳纳米管具有非常适合与作为AFM针尖材料的物理、化学性质：良好的外形比例、尖端极小、良好的弹性、碳原子的反应多种多样（易于制备功能化AFM针尖）等。Wong等人用单层碳纳

米管和多层碳纳米管修饰AFM针尖，它具有很高的空间分辨率，通过化学反应进行自组装膜可使针尖具有高度的化学敏感性。

这些针尖修饰技术在传统探测的物理量（力场、电场、磁场等）的基础上，引入了“化学场”，从而大大地提高和改善了AFM的空间分辨率和物质识别能力。

### 3.3 AFM的应用

AFM可以在真空、超高真空、气体、溶液、电化学环境、常温和低温等环境下工作，在研究时可以选择适当的环境。在物理学中，AFM可以用于研究金属和半导体的表面形貌、表面重构、表面电子态及其动态过程、超导体表面结构和电子态层状材料中的电荷密度等。从理论上讲，金属的表面结构可由晶体结构推断出，但实际上金属表面很复杂。衍射分析方法已经表明，在许多情况下，表面形成超晶体结构（称为表面重构），可使表面自由能达到最小值。而借助AFM可以方便得到某些金属、半导体的重构图像，AFM可以实现纳米尺寸和纳米级（ $10^{-9}N$ ）微弱力的测量。

## 4 实验仪器

样品相对于探针的横向扫描，由计算机通过D/A接口控制扫描电路实现，在扫描过程中，为使探针与样品保持一定的纵向间距，引入了反馈控制电路系统。XYZ扫描控制器由三根互相垂直的管状压电陶瓷与样品台构成，其十字架结构的稳定性和强度使之适合对不同大小和重量的样品在较大范围内扫描成像，但样品不能过重。

在恒力模式下：光电与计算机软件硬件系统，将扫描得到与样品形貌对应的反射光点的位置信号，转变成电流信号，再经电流-电压转换、前置放大、加减、除法器相除等模拟运算，通过A/D接口输入计算机。计算机根据取得的信号大小，通过D/A结构输出相应的反馈电压控制压电陶瓷管z向的伸缩，从而控制样品与针尖之间的间距，使之保持恒定，即保持原子力大小不变。根据z向压电陶瓷的控制电压的变化情况，可以最终获得样品表面的三维微观形貌。高压控制电路系统所能提供的最高扫描电压为350V，约对应于 $4\mu m \times 4\mu m$ 的最大扫描范围。

系统软件分为两个部分：图像扫描部分和图像处理部分。图像扫描部分，软件可对扫描范围、扫描速度、扫描偏移量等进行实时调整，并选择图像像素和图像亮度大小。扫描获得的图像可在显示框内实时地重复显示。扫描过程中可根据需要捕获图像并存储到计算机中，图像的捕获操作可连续进行，以便对样品做实时的在线检测。在图像处理部分，可将待测样品的AFM图像（每幅图像有 $400 \times 400$ 或者 $180 \times 180$ 个信息点）后，用鼠标在图像中拾取一块区域，计算机将读取该区域内所有信息点并根据面粗糙度计算公式计算该区域内的 $R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$ 值，从而获得相应区域的微观几何尺寸。

## 5 实验装置

原子力显微镜的实验装置如图6所示。本装置分为如下几个部分：

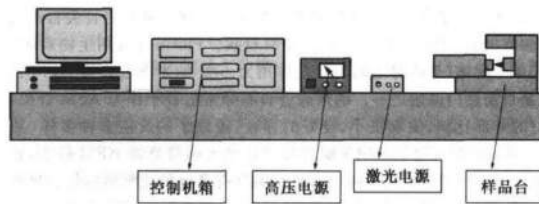


图 6: 实验装置示意图

1. 样品台：包括压电陶瓷xy扫描单元与z向反馈系统，样品与针尖之间的x向粗调、细调机构，可选用表面较为光滑的样品，做成小片状，背面适于粘贴在样品架上。
2. 光源系统：半导体激光器（650nm红光，功率10mW）、电源盒
3. 测量控制系统：PSD（position-sensitive detector, 3mm × 3mm）光电信号处理电路、反馈控制电路、高压电源、扫面与图像处理软件。

仪器特点：

1. 扫描时间较短，如果得到一幅图像需要十多分钟，在此过程中，周围环境的电干扰、光干扰，以及振动、温度变化等因素，都将直接影响到图像的准确性和完整性。
2. 卧式设计：主要是为了消除微悬臂自身的重力对纵向原子力的干扰。卧式AFM中重力方向与用于成像的原子力相互垂直，从而提高了仪器的灵敏度。

## 6 实验内容

实验所用的AFM系统示意图如图7所示。

1. 用CCD光学显微镜观察标准光栅（周期为100 $\mu\text{m}$ ）和探针，估算微悬臂的有效长度。
2. 安装样品。
3. 进入软件的扫描界面，单击“开始扫描”按钮连续扫描若干次，得到满意图像后单击“捕获图像”按钮以保存图像。
4. 如果要用鼠标选区扫描，必须先按“停止扫描”按钮，再用鼠标选区，否则可能破坏探针。
5. 先按“停止扫描”按钮，再退出扫描界面。
6. 退出样品。



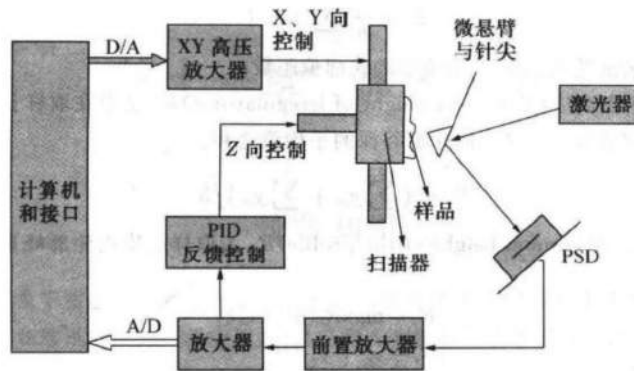


图 7: AFM-IIa 的系统框图

7. 数据处理：在软件的图像处理界面完善图像，标注尺寸、记录相应的粗糙度统计结果、做出三维图。
8. 打印图像

## 7 实验过程与实验结果

实验中我们分别利用原子力显微镜观察了铜、ITO导电玻璃、A4打印纸以及硅的表面形态。

### 7.1 实验过程

具体实验过程如下

1. 在准备工作完成之后，我们依次打开电脑、控制箱电源、高压电源以及激光电源；
2. 接着检查光斑的状态，此时反射光斑应该在激光接收器（PSD）的左方（远离激光接收器的方向）；
3. 先用粗调旋钮调整，将样品逼近距离探针约为1mm的地方，应该注意，使用粗准旋钮调节的时候，不可调节过快，以免损伤探针；
4. 接着使用细准螺旋调节，调节的时候观察光斑的移动，使得光斑落在激光接受器附近。之后继续调节，观察控制机箱上面的参数，使得参数稳定在合适的区间内（第一个参数z向反馈落在1.6左右，第二个参数PSD信号由正变负，稳定在-250左右）；
5. 读数基本稳定后，打开扫描软件，开始扫描，其中需要注意的是，必须点击软件中“停止扫描”之后才能退出样品。具体的软件操作流程见上一节“实验内容”中的介绍。

6. 实验完毕之后，退出试验样品的时候，先逆时针将细调旋钮旋转到底，再逆时针旋转粗调旋钮，以便于下一次实验的使用。
7. 得到实验数据，处理实验图像，并且得到粗糙度。其中，粗糙度的计算方法如下一个小节所示。

### 7.1.1 粗糙度计算方法

表面粗糙度是反映微观几何形状误差的一个重要的指标。表面粗糙度评定的参数很多，我们这里选用轮廓算术平均偏差 $R_a$ 、微观不平度 $R_z$ 、轮廓最大高度 $R_y$ 作为系统纳米粗糙度测量的三个轮廓高度评定参数。

轮廓算术平均偏差 (Arithmetical mean deviation of the profile)  $R_a$ 为取样长度内轮廓偏距的算术平均值，如图8所示。

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4)$$

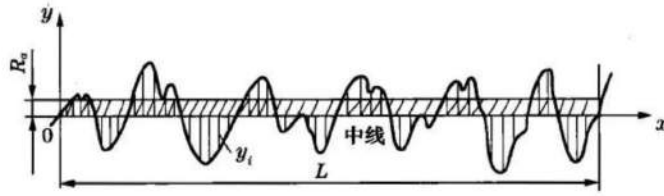


图 8: 表面粗糙度 $R_a$ 示意图

其中， $y_i$ 为基于中线的表面轮廓高度， $n$ 为所取的轮廓偏距数。

观测不平度十点高度 (Ten point height of irregularities)  $R_z$ 是指在取样长度内5个最大的轮廓峰高的平均值和5个最大的轮廓谷深的平均值之和：

$$R_z = (\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi})/5 \quad (5)$$

轮廓最大高度 (Maximum height of the profile)  $R_y$ 为取样长度内轮廓峰顶线与轮廓谷底线之间的距离：

$$\begin{cases} R_y = \max R_i (0 \leq i \leq k) \\ R_i = y_{pi} + y_{vi} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $y_{pi}$ ， $y_{vi}$ 分别为第 $i$ 个轮廓峰高和第 $i$ 个轮廓谷深， $k$ 为取样长度内的峰谷个数。

面粗糙度中与微观不平度高度特征有关的三个表面粗糙度评定参数 $R_a$ 、 $R_z$ 、 $R_y$ 公式与线粗糙度类似，所不同的是面粗糙度公式包含 $x$ ， $y$ 两个方向。

## 7.2 实验结果

### 7.2.1 对于铜表面的测量

铜表面的原子力显微2D灰度图像如图9所示，其3D的形态图如图10所示，

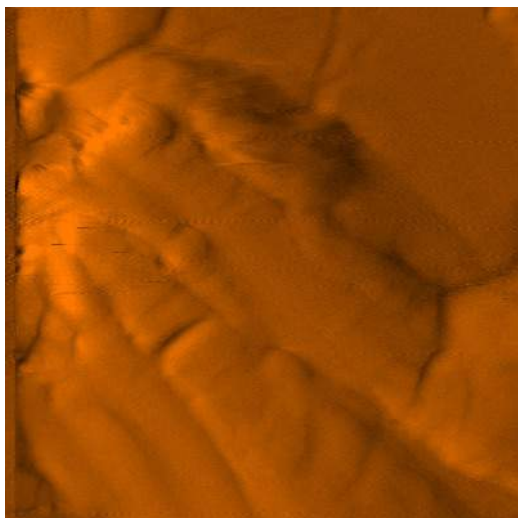


图 9：铜的表面形态2D灰度图

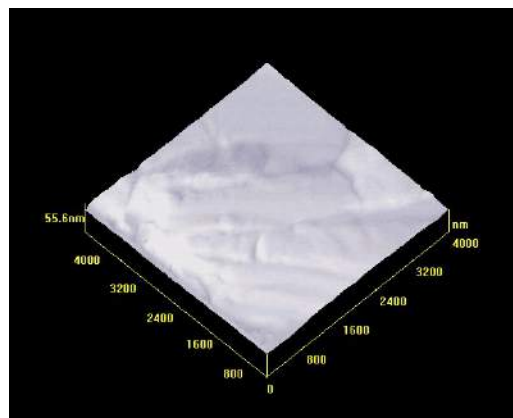


图 10：铜的表面形态3D还原图

通过计算可以得到三个面粗糙度分别为

$$\begin{cases} R_a = 11.4nm \\ R_y = 123.0nm \\ R_z = 123.0nm \end{cases}$$

### 7.2.2 对于ITO导电玻璃表面的测量

ITO导电玻璃表面的原子力显微2D灰度图像如图11所示，其3D的形态图如图12所示，通过计算可以得到三个面粗糙度分别为

$$\begin{cases} R_a = 0.8nm \\ R_y = 11.4nm \\ R_z = 11.4nm \end{cases}$$

### 7.2.3 对于A4打印纸表面的测量

A4打印纸表面的原子力显微2D灰度图像如图13所示，其3D的形态图如图14所示，通过计算可以得到三个面粗糙度分别为

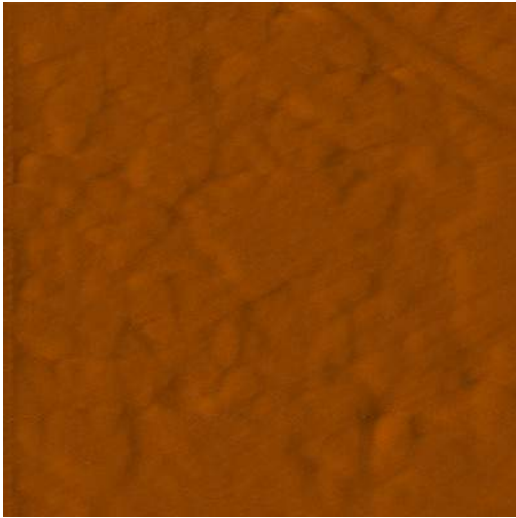


图 11: ITO导电玻璃的表面形态2D灰度图

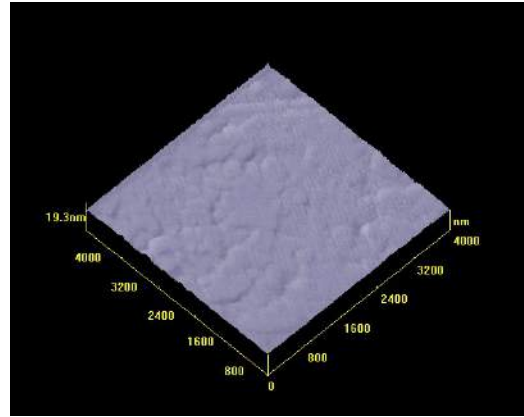


图 12: ITO导电玻璃的表面形态3D还原图

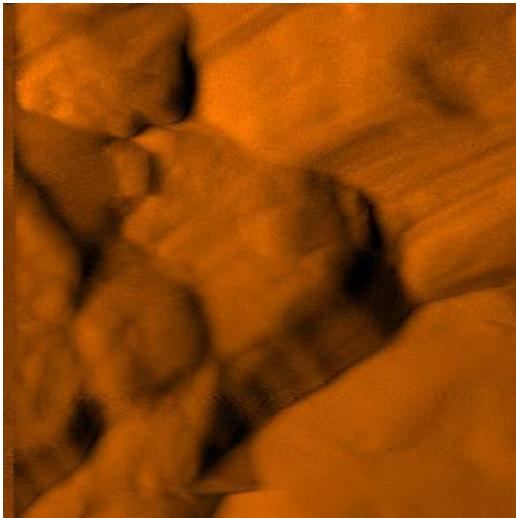


图 13: A4打印纸的表面形态2D灰度图

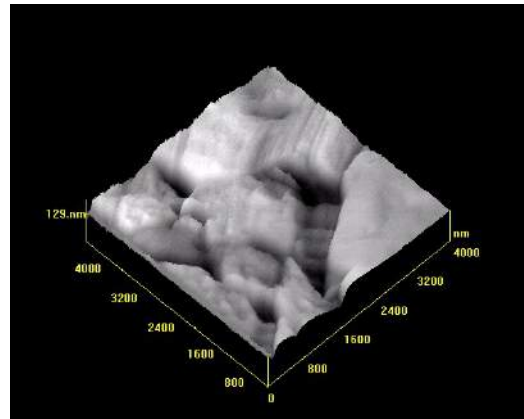


图 14: A4打印纸的表面形态3D还原图

$$\begin{cases} R_a = 17.5nm \\ R_y = 129.5nm \\ R_z = 129.5nm \end{cases}$$

#### 7.2.4 对于硅表面的测量

硅表面的原子力显微2D灰度图像如图15所示，其3D的形态图如图16所示，

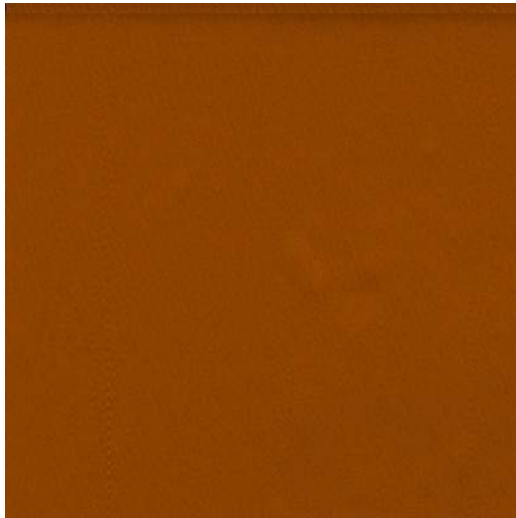


图 15: 硅的表面形态2D灰度图

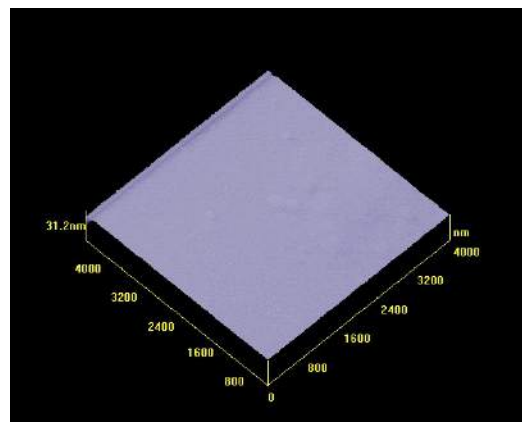


图 16: 硅的表面形态3D还原图

通过计算可以得到三个面粗糙度分别为

$$\begin{cases} R_a = 0.9nm \\ R_y = 30.2nm \\ R_z = 30.2nm \end{cases}$$

## 8 实验误差分析与思考

1. 本实验采用压电陶瓷，利用激光反馈以及反馈电路控制样品表面的扫描，具有较高的精度。
2. 较慢的扫描速度对于提高扫描精度有一定的正相关作用。由于实验中采用的是反馈电路进行控制，因此，扫描速度越慢，反馈迟滞对于系统的影响越小。换句话说，系统就更又充分的时间通过“激光反馈-电路反馈-压电陶瓷调整”使得样品与探针之间的距离保持恒定，从而获得较高的扫描精度。

3. 扫描的方向对于接触模式下的扫描结果具有一定的影响。在实验中我们观察到，在x方向扫描的时候，扫描结果的图像中会出现x方向上类似“擦挂”出来的印迹，在y方向扫描时，同样也会出现y方向上类似的印迹。我认为，这样的印迹是由于探针在沿其扫描方向的时候，探针晃动而产生的误差，而非探针经过对于样品造成的永久损伤。

理由如下：这样的误差在探测铜和硅表面的时候被我们观察到，这一类材料硬度较大，被探针“刮伤”的可能性较小。对于同一块样品，我们先进行x方向上的扫描，观察到x方向上的“擦挂印迹”；紧接着对于同一块样品的同一块区域进行y方向的扫描，我们在刚刚出现x方向上“擦挂印迹”的地方未观察到相似的印迹。当我们控制环境，减少平台在扫描的时候的扰动，类似的“擦挂印迹”减弱。

因此，可以得出结论，当出现与扫描方向上的某些印迹的时候，应当尽量控制扫描工作台的稳定性，以提高测量精度。

4. 对于某些硬度较低的样本（如本次实验中的A4打印纸样本），我们观察到了探针对于样本的损伤。

断定探针确实损伤样本的理由如下：在对于A4打印纸同一样本的同区域进行反复测量的时候，前一次测量中观察到的纸表面的一个凸起的“鼓包”，在后续多次测量中消失。

因此，可以得出结论，探针确实会对某些样品的表面产生损伤，对于这些容易产生损伤样品的测量，可以尝试使用非接触模式进行测量，以提高测量精度。

## 9 思考题

### 9.1 AFM探测到的原子力由哪两种主要成分组成？

AFM探针与样品表面原子之间存在多种作用力，其中包括范德瓦耳斯力、排斥力、静电力、形变力、磁力、化学作用力等。然而在实验中，我们会尽量控制实验条件，消除出来范德瓦耳斯力以及排斥力之外作用力的影响；再加上，除了以上两种力之外，其他力本身也相对较小。因此，AFM探测到的原子力主要由范德瓦耳斯力以及排斥力组成。其中范德瓦耳斯力为吸引力，排斥力的本质为原子电子云之间的相互作用，其本质为一种量子效应。其力的作用规律曲线如图5所示。详细信息参见前3.1.4。

### 9.2 怎样使用AFM-IIa和CCD光学显微镜，才能较好的保护探针？

本实验中，探针价格较为昂贵，操作可能损坏探针的时候应该缓慢、小心。

在将样品靠近探针的过程中，先顺时针旋转粗调旋钮，在样品距离探针约为1mm的地方改用细调旋钮。调整细调旋钮的时候，观察控制机箱上的读数，当z向反馈到达1.6左右以及PSD信号由正变负，并且稳定再-250的时候停止向右移动样品台。在这个过程中，始终注意观察，以免使得样品过于靠近探针，压坏探针。

在测量过程中，注意扫描频率不要太快，以免损伤探针。（摘自AFM-IIa使用手册）

在实验结束后，必须先逆时针旋转细调旋钮，再逆时针旋转粗调旋钮，以取出样品，以避免对于探针的损伤。

### 9.3 原子力显微镜有哪些应用？

AFM可以在真空、超高真空、气体、溶液、电化学环境、常温和低温等环境下工作，因此具有较广的应用范围。在物理学中，AFM可以用于研究金属和半导体的表面形貌、表面重构、表面电子态及其动态过程、超导体表面结构和电子态层状材料中的电荷密度等。在生物学中，AFM可以应用于生物大分子的结构以及其他性质的研究，例如对于蛋白质、RNA、DNA，甚至细胞以及病毒的观察中。

另外，由于AFM具有可以间接测得力与间距关系的特性，因此，除了将它用于形貌观测方面，它还可以被用于测量原子间作用力上。在Borisov A G, et al. [1]的研究中，他们就利用了AFM对于相互靠近的纳米金颗粒之间的量子隧穿效应进行了测量。

### 9.4 传统的光学显微镜、电子显微镜相比，扫描探针的分辨本领主要受到什么因素的限制？

传统的光学显微镜的分辨本领受到光衍射极限的限制，其最小分辨距离为其光波长的一半。电子显微镜的分辨本领同样受到衍射极限的限制，其最小分辨本领为电子德布罗意波长的一半，因此电子显微镜可以达到比传统光学显微镜更高的分辨本领。

扫描探针显微镜的分辨本领主要取决于探针本身的线度以及我们能够观察到探针位移的本领。探针本身的线度一定程度上取决于探针的制造工艺水平，好的探针可以达到针尖仅仅只有一个原子。我们观察探针位移的本领取决于我们测量探针位移的方法，以本实验中使用的光杠杆方法为例，限制因素取决于光杠杆的放大倍数、探测器PSD对于光斑位置的敏感程度，以及光杠杆的弹性系数（光杠杆弹性系数越低，探针的位移越容易被反映到光杠杆上，从而获得较高的探测精度）。

### 9.5 要对悬臂的弯曲进行精确测量，除了在AFM中使用光杠杆这个方法外，还有哪些方法可以达到相同数量级的测量精度？

对于悬臂弯曲的测量还可以采取电学方法，包括隧道电流法以及电容法。其中隧道电流法利用了隧道电流对于原子间距离敏感的原理，通过测量隧道电流来测量样品与探针之间的距离。电容法利用了微悬臂与一参考电极间的电容变化来检测微悬臂产生的形变。详细信息请参见3.1.2中相关的介绍。

## 参考文献

- [1] Borisov A G, Baumberg J J, Savage K J, et al. Revealing the quantum regime in tunnelling plasmonics. [J]. Nature, 2012, 491(7425):574-577.
- [2] 黄润生, 沙振舜, 唐涛. 近代物理实验[M]. 南京大学出版社, 2008.