

扫描隧穿显微镜

王艺霖*

物理学院 学号:2200011456

摘要: 实验摘要本实验使用扫描隧道显微镜 (Scanning tunneling microscope, STM) 获得了高定向热解石墨 (HOPG) 样品表面的原子分辨图像, 从而直观地验证了量子隧穿效应. 同时, 利用所获得的图像对 STM 扫描系统的陶瓷杆的压电系数进行了估计.

关键词: 扫描隧穿显微镜, STM, 原子分辨图像, 压电系数

I. 引言

1928 年, 伽莫夫与 R.格尼和 E.康登各自独立地应用量子力学说明了 α 衰变, 形成了“隧道效应”这一概念. 然而这一概念提出之后并没有立刻被用于观测中, 直到 20 世纪 80 年代初, IBM 苏黎世实验室的 Binnig 和 Rohrer 发明了扫描隧道显微镜, STM 这个利用电子的隧道效应进行局域探测的技术从此诞生. 随后, 通称为扫描探针显微镜 (SPM) 的各种技术相继诞生, 如原子力显微镜、磁力显微镜、近场光学显微镜等, 并在科学研究和纳米加工技术中发挥出日益重要的作用. STM 与其他显微镜的区别主要在于它既不需要粒子源也不需要透镜系统来聚焦, 和常规的原子级分辨一起相比, 其优势在于它可以给出实空间的信息, 并且可以对各种局域结构或非周期结构进行研究. 这些优势使得 STM 在表面科学、纳米技术以及生物化学等领域都具有广泛的应用.

本实验的目的是学习和掌握 STM 的原理和结构, 观察和理解量子力学中的隧穿效应, 学习 STM 的操作和调节过程. 本实验使用 STM 对 HOPG 样品的表面形貌进行观察, 得到原子分辨图像, 并且计算 STM 扫描系统中陶瓷杆的压电系数.

* e-mail: wylin@stu.pku.edu.cn; mobile number: 15837187296

II. 原理

STM 利用隧穿效应的原理进行工作。在经典理论中由于动能非负，粒子不能穿过高于其总能量的势垒；而在量子理论中，在 $V(r) > E$ 的区域，薛定谔方程

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right] \varphi(r) = E\varphi(r)$$

的解不一定为零（ V 有限），因此一个入射粒子穿透一个 $V(r) > E$ 的有限宽势垒的几率是大于零的，这就是隧穿效应。

STM 的核心是一个能在表面上扫描并与样品间有一定偏置电压的针尖，当针尖与样品表面的距离足够小时，电子就有可能发生隧穿，在实验中就可以观察到隧穿电流，通过记录针尖和样品之间的隧穿电流就可以得到样品表面形貌相关的信息。

隧穿电流 I 的大小和两电极间的距离 s 的关系是：

$$I \propto B \exp(-KS) = B \exp\left(-\frac{\sqrt{2m\phi}}{\hbar} S\right)$$

其中 m 为自由电子的质量， ϕ 为有效平均势垒高度， B 为与偏压 V_b 有关的系数。STM 的针尖与样品之间构成的势垒的间隙 s 约为 1nm。

为了实现对针尖位置地精确控制，在 STM 中将针尖装在压电陶瓷构成地三维扫描架上，通过改变加在陶瓷上的电压来控制针尖位置。STM 最常用的工作模式是恒定电流模式，工作时在 x, y 方向是在陶瓷上施加扫描电压，在扫描过程中由于样品表面形貌有起伏，会造成隧穿电流的大小发生变化，这个变化会被反馈到 z 方向的陶瓷上，使得针尖可以跟踪样品表面的起伏，以保持隧穿电流的恒定。STM 的另外一种工作模式是恒定高度模式，在扫描中针尖的高度几乎保持不变，通过记录隧穿电流的大小来得到表面的信息；由于在遇到起伏大的表面时针尖容易被撞坏，因此这种模式只适合用于测量小范围、小起伏表面。

III. 实验

A. 实验装置

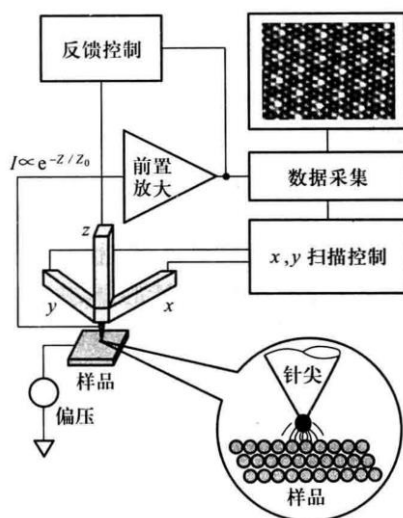


图 1 STM 工作原理示意图

STM 的工作原理示意图如图 1 所示，它由减震系统、粗逼近、扫描架和电子学控制单元组成。

1. 减震系统

隧穿电流 I 与针尖和样品间距离 s 成指数关系， s 每改变 0.1nm ， I 就会改变大约一个量级，因此 STM 的机械稳定性非常关键。本实验采用的 STM 装置使用由悬挂弹簧和底盘上的加氟橡胶条构成的多级减震系统。

2. 粗逼近

粗逼近的目标是把样品移动到扫描架的工作范围内，并且要求不工作的时候尽可能稳定地停在它的位置上，要求其具有精确的定位、较大的工作范围和牢固的结构。本实验使用的 STM 采用蜗轮蜗杆变速装置进行粗逼近，由高精度蜗轮蜗杆减速箱带动一根坚固的丝杆向前推动样品，同时有电流探测回路将电流信号传递给电脑，当检测到非零的隧穿电流时，粗逼近立即停止。之后将丝杆回退 10-20 步和样品脱离接触，同时由于回程差的存在样品也不会反向移动，这样就隔绝了粗逼近装置的振动对样品的影响。

3.扫描架

扫描单元的结构应该尽可能地牢固和稳定，以减小外界干扰的影响。扫描架由两两对陶瓷杆和一根陶瓷管支撑着的牢固结构组成，两对陶瓷杆控制 x,y 方向的移动，陶瓷管控制 z 方向的移动。

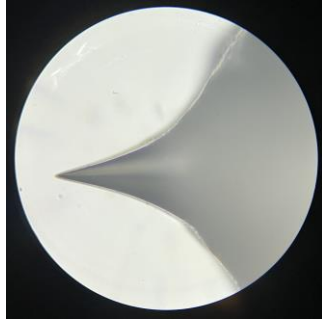


图 2 光学显微镜下的 STM 针尖

STM 的针尖由钨丝经电化学腐蚀制成，针尖在光学显微镜下如图 2 所示，其形状和稳定性直接影响到 STM 的分辨率和成像质量。

4.STM 的电子学控制单元

STM 由一台电脑和电子学控制单元控制，其框图如图 3 所示。

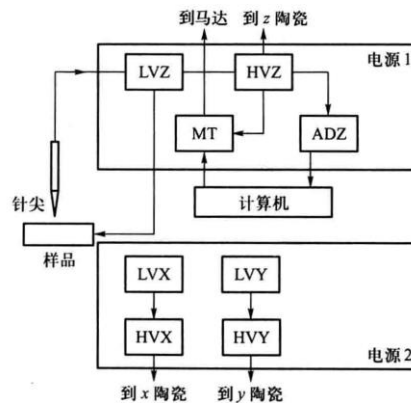


图 3 STM 系统的电子学控制单元框图

电子学控制单元分为工作电源和隧穿电流反馈控制与信号采集两大部分；前一部分提供 x,y 扫描电压和 z 高压，后一部分则包括样品偏压、马达驱动、隧穿电流的控制和信号采集的模数转换等。

B. 实验内容

对 STM 系统进行粗逼近直到检测到隧穿电流，之后调节参数对石墨样品进行 STM 成像.

IV. 结果与讨论

1. 实验结果

通过调整实验参数，我们获得了如下的原子分辨像，其对应的参数如表 1 所示.

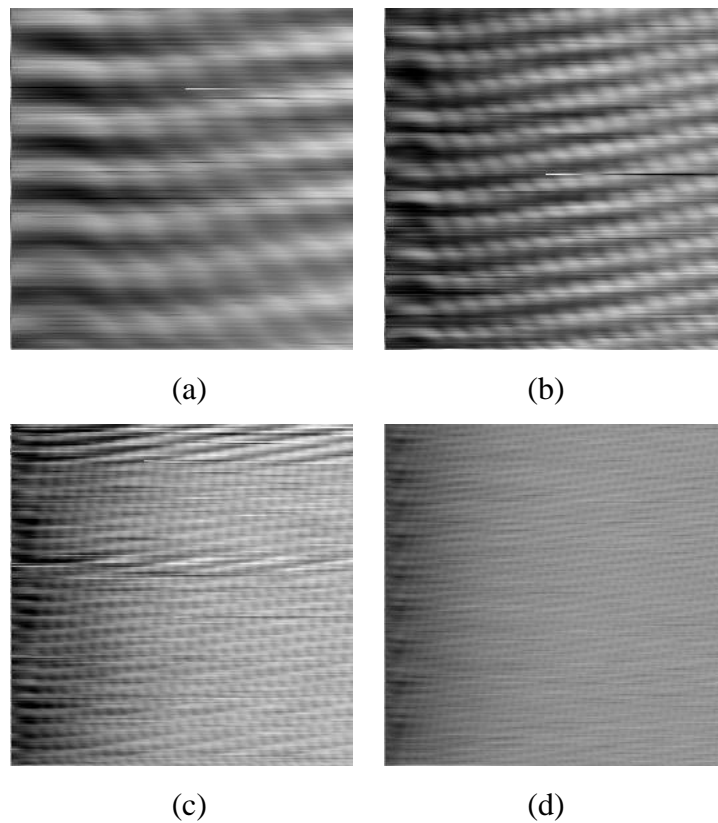


图 4 HOPG 的 STM 图像，参数如下表所示：

图像	X 轴范围 /V	Y 轴范围 /V	I / nA	V_b / mV	T / ms
(a)	1.00	1.00	1.68	760.00	50
(b)	2.00	2.00	1.68	760.00	100
(c)	4.00	4.00	2.10	750.00	160
(d)	6.00	6.00	2.10	800.00	199

HOPG 的原子排列是无心的六角密排，然而在图中可以看到白色斑点和黑色斑点间隔排列，各自呈现出有心六角密排。这是因为我们观察到的白色斑点并不是同一个晶格的六个顶点，事实上，石墨表层的原子可以根据与下一层原子的关系分为两类，如图 5

所示. A 类原子正对着下方的原子, 两层原子的电子云重合, 导致 A 类原子的电子云更靠近石墨内部, 因此在 STM 图中成黑色斑点; 而 B 类原子下方没有原子, 其电子云分布更广, 在 STM 图中成白色斑点. 如果我们单独观察 A 类或 B 类原子, 那么得到的图像确为有心的六角密排.

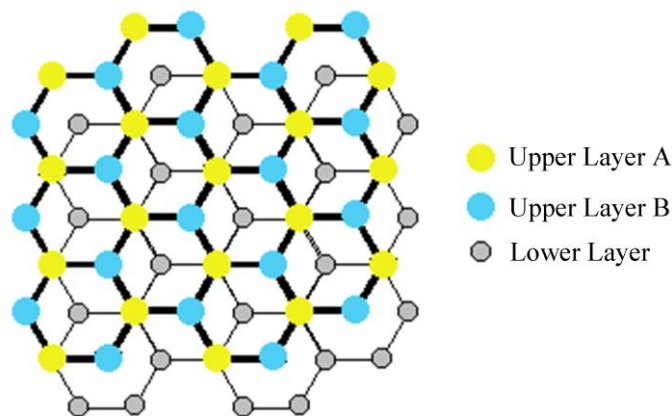


图 5 HOPG 的原子排列示意图, 改自[2]

由于 HOPG 的结构已知, X,Y 轴扫描电压的范围也已知, 我们因此可以求出 X,Y 方向上陶瓷杆的压电系数, 也就是利用 $L = cV$, 其中 L 是陶瓷杆的长度变化, V 是陶瓷杆两端电压, c 是压电系数. 通过对图 4 的测量, 我们可以得到压电系数的估计值:

$$c_x \approx c_y \approx 2.7\text{nm/V}$$

从图中可以看到, 六角结构与正六边形有着严重的偏离, 表明针尖和样品表面并不垂直, 因此上述压电系数的测量仅具有数量级上的意义.

V. 结论

本实验对 HOPG 样品表面进行了 STM 扫描和测量, 观察并得到了其在不同分辨率下的原子分辨图像, 并结合 HOPG 的结构对图像的特征进行了解释. 同时, 利用了所得到的 STM 图像对扫描系统中的陶瓷杆的压电系数进行了估计.

[1] 吴思诚, 荀坤. 近代物理实验[M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2015.

[2] <https://www.spmtips.com/uploads/gallery/HOPG-structure-20121016071004.gif>

附录一：思考题

1.HOPG的原子排列为六角密排（无心的），为什么我们在实验中看到的HOPG的原子分辨像是有心的六角密排？

分析过程见实验报告正文.

2.为什么在金膜样品的STM图中有时会出现形状相似的凸起（针尖像）？

这可能是由于针尖不够锐利或者不够洁净，导致在成像过程中针尖附近的部位也与样品间存在隧穿电流，对成像造成干扰，因此呈现出相似的针尖像一样的凸起. 石墨的晶格各向同性，具有非常均匀的电子密度，而金膜的电子密度相比于石墨来说没有那么均匀，所以在金膜上针尖的性质可能对成像造成更多的影响.

附录二：预习摘要

14

2024.
4.24

扫描隧穿显微镜 (STM) 预习

1. 基本原理：当针尖与样品之间有偏置电压且十分靠近时，可以观察隧穿电流，其大小 $I \propto B \exp(-kS)$ ，其 $k = \frac{\sqrt{2m\phi}}{\hbar}$ ， m 为自由电子质量， ϕ 为有效平均势垒高度， B 为与偏压 V_b 相关的系数。

2. 基本结构：

① 减震系统：保持 STM 的机械稳定性，避免外界扰动对针尖与样品距离从而对隧穿电流造成干扰。本实验所使用的 STM 采用弹簧和加气橡胶条多级减震。

② 粗逼近：把样品移动到扫描架的工作范围内，使用帽轮端杆变速装置。

③ 扫描架：移动针尖进行扫描，需要尽可能牢固稳定。

由 x, y 方向的两对陶瓷杆和 z 方向的一根陶瓷管组成。

④ 电子学控制单元：

工作电源：提供 x, y 扫描电压、 z 高压。

隧穿电流反馈控制与信号采集：样品偏压、马达驱动、隧道电流控制。

3. 工作模式：

① 恒定电流工作模式：利用隧穿电流对 z 向进行反馈，保持电流恒定，适用范围较广。

② 恒定高度：高度恒定，小范围、小起伏表面。

4. 针尖

制备：5mol/L NaOH 直流 浸入 1mm 制成铂铱

1mol/L NaOH 5V 交流 铂铱断开 → 脉冲电压。

重要性：针尖的形状直接影响到 STM 的最高分辨率，其稳定性也对观察有重要影响。