

扫描隧穿显微镜

西瓜^{*}, 卢老师[†]

北京大学 物理学院, 北京 100871

【摘要】 本实验利用扫描隧道显微镜对 HOPG 表面进行了原子分辨成像, 观察到了典型的石墨三角晶格结构, 并验证了量子隧穿效应。结合 Python 图像处理程序, 对 STM 图像进行了尺度分析, 并估算了压电扫描系统的压电系数, 加深了对 STM 工作原理与实验方法的理解。

【关键词】 扫描隧道显微镜; 量子隧穿效应; HOPG; 原子分辨成像; 压电陶瓷; 图像处理

Scanning tunneling microscope

Xisense, Prof. Lu

Physics Institute, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract: This experiment utilized scanning tunneling microscopy (STM) to perform atomic-resolution imaging of the HOPG surface, observing a typical graphite triangular lattice structure and verifying the quantum tunneling effect. Scale analysis of the STM images was performed using a Python image processing program, and the piezoelectric coefficient of the piezoelectric scanning system was estimated, deepening the understanding of the working principle and experimental methods of STM.

Key Words: Scanning tunneling microscopy; quantum tunneling effect; HOPG; atomic resolution imaging; piezoelectric ceramics; image processing

1 引言

20 世纪初量子力学建立之后, 人们逐渐认识到微观粒子具有经典理论所无法解释的波动性质。其中一个重要现象便是量子隧穿效应 (quantum tunneling effect): 粒子即使在能量低于势垒高度的情况下, 仍有一定概率穿透势垒区域。1928 年, Gamow 以及 Gurney 与 Condon 分别利用量子力学成功解释了 α 衰变过程, 首次明确提出了隧穿效应的物理图像^[1-2]。此后, 量子隧穿逐渐成为现代凝聚态物理与量子器件中的重要基础理论。

基于量子隧穿效应, 1981 年, IBM 苏黎世实验室的 G. Binnig 与 H. Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM)^[3]。STM 利用金属针尖与样品表面之间极小距离下产生的隧穿电流, 对样品表面进行逐点扫描, 从而获得表面的局域电子态与原子尺度形貌信息。由于隧穿电流对针尖与样品间距呈指数依赖关系, 因此 STM 具有极高的空间分辨能力, 可以实现原子级分辨成像。1986 年, Binnig 与 Rohrer 因 STM 的发明获得诺贝尔物理学奖, STM 也由此成为表面科学与纳米科学发展的重要里程碑。

STM 的出现推动了扫描探针显微技术 (Scanning Probe Microscopy, SPM) 的迅速发展, 并进一步衍生出原子力显微镜 (AFM)、磁力显微镜 (MFM) 等多种表面探测技术^[4]。相比于传统电子显微镜, STM 不需要复杂的电子透镜系统, 而是直接利用局域隧穿电流实现实空间成像, 因此特别适用于研究表面原子结

*email: xisense_wyx@stu.pku.edu.cn
tel: (+86)15003246977 ID: 2200011302

构、缺陷、吸附过程以及低维材料中的局域电子性质。目前，STM 已广泛应用于凝聚态物理、纳米材料、半导体器件以及表面化学等研究领域。

在 STM 的实际工作过程中，针尖与样品之间通常施加一定偏压，当二者距离减小至纳米量级时，电子将通过真空势垒发生隧穿。隧穿电流不仅与针尖和样品之间的距离密切相关，还受到局域态密度 (local density of states) 的影响，因此 STM 所获得的图像本质上反映的是样品表面电子结构与形貌的综合信息。为了实现精确扫描，STM 系统通常利用压电陶瓷对针尖位置进行亚埃尺度调节，从而实现对样品表面的高精度扫描。

本实验利用扫描隧道显微镜对高定向热解石墨 (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG) 样品表面进行扫描测量，观察石墨表面的原子分辨图像，直观验证量子隧穿效应与 STM 的工作原理。同时，通过分析扫描图像中的晶格结构与扫描参数，对 STM 扫描系统中压电陶瓷的压电系数进行估算，从而进一步理解 STM 的扫描机制与实验原理。

2 实验原理

扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM) 的基本工作原理建立在量子力学中的隧穿效应基础之上。在经典力学中，当粒子的能量低于势垒高度时，粒子无法穿过势垒区域；然而在量子力学中，粒子具有波动性，其波函数在势垒内部并不会严格为零，因此粒子存在一定概率穿透有限宽度势垒，这一现象即为量子隧穿效应。

对于一维势垒问题，电子的运动满足定态薛定谔方程

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x), \quad (2.1)$$

其中 m 为电子质量， $V(x)$ 为势垒势能， E 为电子能量。当电子处于势垒区域内且满足 $V(x) > E$ 时，波函数满足指数衰减形式

$$\psi(x) \propto e^{-\kappa x}, \quad (2.2)$$

其中

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V-E)}}{\hbar}. \quad (2.3)$$

因此，电子穿透宽度为 s 的势垒时，其透射概率近似满足

$$T \propto e^{-2\kappa s}. \quad (2.4)$$

这一结果说明隧穿概率会随着势垒宽度的增加而呈指数衰减。

STM 正是利用了这一性质进行工作的。在 STM 中，一个极其尖锐的金属针尖被移动到导电样品表面附近，并在针尖与样品之间施加偏置电压 V_b 。当针尖与样品之间的距离减小到纳米量级时，电子可以通过二者之间的真空势垒发生量子隧穿，从而形成隧穿电流。根据量子隧穿理论，隧穿电流与针尖和样品之间距离 s 的关系可近似表示为

$$I \propto e^{-2\kappa s}, \quad (2.5)$$

进一步写成常用形式可得

$$I \propto \exp\left(-\frac{2\sqrt{2m\phi}}{\hbar}s\right), \quad (2.6)$$

其中 ϕ 为针尖与样品之间的平均势垒高度，通常与材料功函数有关。

由上述关系可以看出，隧穿电流对针尖与样品间距具有极强的敏感性。当距离变化仅为 0.1 nm 时，隧穿电流往往就会发生一个数量级的变化。因此，通过精确测量隧穿电流的变化，可以实现对样品表面原子尺度形貌的探测，这也是 STM 能够达到原子分辨率的重要原因。

为了实现针尖位置的高精度控制, STM 通常采用压电陶瓷作为扫描驱动元件。压电陶瓷在施加电压后会发生微小形变, 其长度变化与外加电压近似满足线性关系

$$\Delta L = cV, \quad (2.7)$$

其中 ΔL 为压电陶瓷的伸长量, V 为施加电压, c 为压电系数。通过对不同方向上的压电陶瓷施加扫描电压, 可以实现针尖在样品表面的二维扫描以及垂直方向上的位置调节。

STM 最常用的工作模式为恒电流模式 (constant current mode)。在扫描过程中, 系统保持针尖与样品之间的隧穿电流恒定。当样品表面存在起伏时, 针尖与样品间距会发生变化, 从而导致隧穿电流改变。反馈系统会根据电流变化实时调节 z 方向压电陶瓷的伸缩, 使针尖高度随表面形貌变化而变化, 以维持隧穿电流恒定。记录扫描过程中 z 方向位移随横向位置的变化, 即可获得样品表面的形貌图像。

另一种常见模式为恒高度模式 (constant height mode)。在该模式下, 针尖高度在扫描过程中基本保持不变, 通过记录隧穿电流的变化来反映表面形貌信息。由于该模式不需要实时调节反馈系统, 因此扫描速度较快, 但对于表面起伏较大的样品容易造成针尖与样品接触, 因此通常只适用于较平整表面的测量。

本实验中所使用的样品为高定向热解石墨 (Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG)。HOPG 表面具有规则的六角晶格结构, 并且层状结构容易解理得到洁净表面, 因此是 STM 实验中常用的标准样品。通过 STM 对 HOPG 表面进行扫描, 可以观察到石墨表面的原子级周期结构, 从而验证 STM 的原子分辨能力以及量子隧穿效应的存在。同时, 结合已知的石墨晶格常数与扫描参数, 还可以进一步估算 STM 扫描系统中压电陶瓷的压电系数。

3 实验装置

本实验所使用的扫描隧道显微镜系统主要由扫描探针部分、压电扫描系统、粗逼近机构、反馈控制系统、信号放大与数据采集系统以及减震系统等组成, 其整体结构与电子学控制框图如图 1 所示。

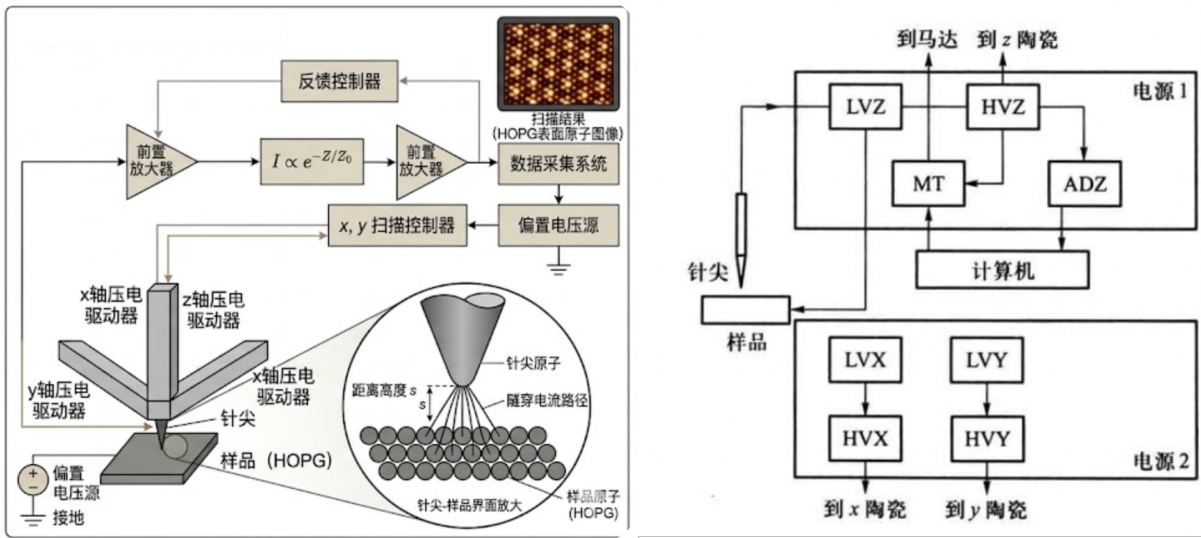


图 1 STM 系统结构与电子学控制示意图

STM 的核心部分为针尖与样品之间形成的隧穿结。实验中采用经过电化学腐蚀制备的金属针尖, 并将其移动至高定向热解石墨 (HOPG) 样品表面附近。在针尖与样品之间施加偏置电压后, 当二者距离减小至纳米量级时, 电子将通过真空势垒发生量子隧穿, 从而形成隧穿电流。由于隧穿电流对针尖与样品间距极其敏感, 因此 STM 能够利用电流变化反映样品表面的原子级形貌。

为了实现针尖位置的高精度控制, STM 系统采用压电陶瓷作为扫描驱动元件。图中所示的 x 、 y 与 z

方向压电驱动器分别负责针尖在横向与垂直方向上的运动。压电陶瓷在施加电压后会产生微小形变，其位移量通常可达到亚纳米量级，从而满足 STM 对空间分辨率的要求。在实验中，通过对 x 、 y 方向施加扫描电压，可以实现针尖在样品表面的逐点扫描；而 z 方向压电陶瓷则用于调节针尖与样品之间的距离。

STM 系统采用恒电流反馈工作模式。针尖与样品之间产生的隧穿电流首先经过前置放大器进行放大，再送入反馈控制器。反馈系统会实时比较实际隧穿电流与设定值之间的偏差，并自动调节 z 方向压电陶瓷的驱动电压，使针尖与样品间距发生改变，从而保持隧穿电流恒定。当针尖扫描经过样品表面的凸起区域时，反馈系统会自动提高针尖位置；而当扫描至凹陷区域时，则会降低针尖高度。记录反馈系统输出的 z 向位移信息，即可重建样品表面的形貌图像。

在电子学控制部分，系统包括偏置电压源、扫描控制器、高压放大模块以及数据采集系统等。偏置电压源用于在针尖与样品之间建立稳定偏压；扫描控制器负责产生 x 、 y 扫描信号；高压放大器则用于驱动压电陶瓷运动。数据采集系统将反馈信号转换为数字信号后传输至计算机，并最终生成 STM 图像。由于 STM 的工作依赖于亚纳米尺度下的隧穿电流变化，因此系统对机械振动极为敏感。外界微小振动都会导致针尖与样品间距发生明显变化，从而严重影响成像质量。因此，实验装置通常配备多级减震系统，包括弹簧悬挂结构、橡胶减震垫以及厚重基座等，以降低环境振动对实验的影响，提高 STM 成像稳定性与分辨率。

4 实验结果与分析

4.1 HOPG 表面 STM 图像

通过调节 STM 系统的扫描范围、偏置电压以及隧穿电流等参数，本实验成功获得了 HOPG 样品表面的原子分辨图像，如图 2 所示。

实验中不同扫描参数对应的结果如表 1 所示。

表 1 STM 扫描参数表

图像编号	扫描范围/V	偏压/mV	隧穿电流/nA	扫描时间/ms
(a)	6	800	2.09	200
(b)	4	800	2.09	160
(c)	2	750	1.68	100
(d)	1	750	1.68	50

从图 2 可以看出，在较小扫描范围下，HOPG 表面呈现出明显的周期性晶格结构，说明 STM 已经实现了原子尺度分辨率。图像中的亮斑对应于表面电子态密度较高的位置，而暗区域则对应电子态密度较低的位置。随着扫描范围逐渐增大，图像中的晶格结构逐渐变得模糊，局域细节分辨率下降，这主要是由于扫描范围增大后单位长度对应的像素减少，同时系统振动与漂移误差对成像质量的影响更加明显。

理论上，石墨表面的碳原子排列应为无心六角晶格结构。然而，在 STM 图像中通常观察到的是类似“三角晶格”或“有心六角结构”的排列形式。这是由于 HOPG 具有 AB 层状堆垛结构，表层碳原子可以分为两类：一类原子正下方存在下一层碳原子，另一类原子下方为空位。由于两类原子的局域电子态密度不同，在 STM 成像过程中其隧穿概率存在差异，因此只有其中一类原子在图像中表现为明显亮斑，从而形成了实验中观察到的三角晶格结构。

实验结果还表明，STM 图像中存在一定程度的条纹与拖影现象，尤其在部分图像左侧区域较为明显。这可能来源于以下几个因素：首先，扫描过程中环境振动会导致针尖与样品间距发生微小变化，从而影响隧穿电流稳定性；其次，针尖形状若不够尖锐或者存在污染，也会导致成像出现拖尾与重复结构；此外，反馈系统响应速度有限，在扫描速度较高时也可能引入一定畸变。在实验过程中，通过不断调整偏压、隧穿电流以及反馈参数，可以明显观察到图像质量的变化。当隧穿电流较小时，针尖距离样品较远，图像信噪

比较低；而当隧穿电流过大时，针尖距离样品过近，则容易引起针尖与样品接触，导致图像失真甚至损坏针尖。因此，实验中需要在成像分辨率与系统稳定性之间进行平衡。

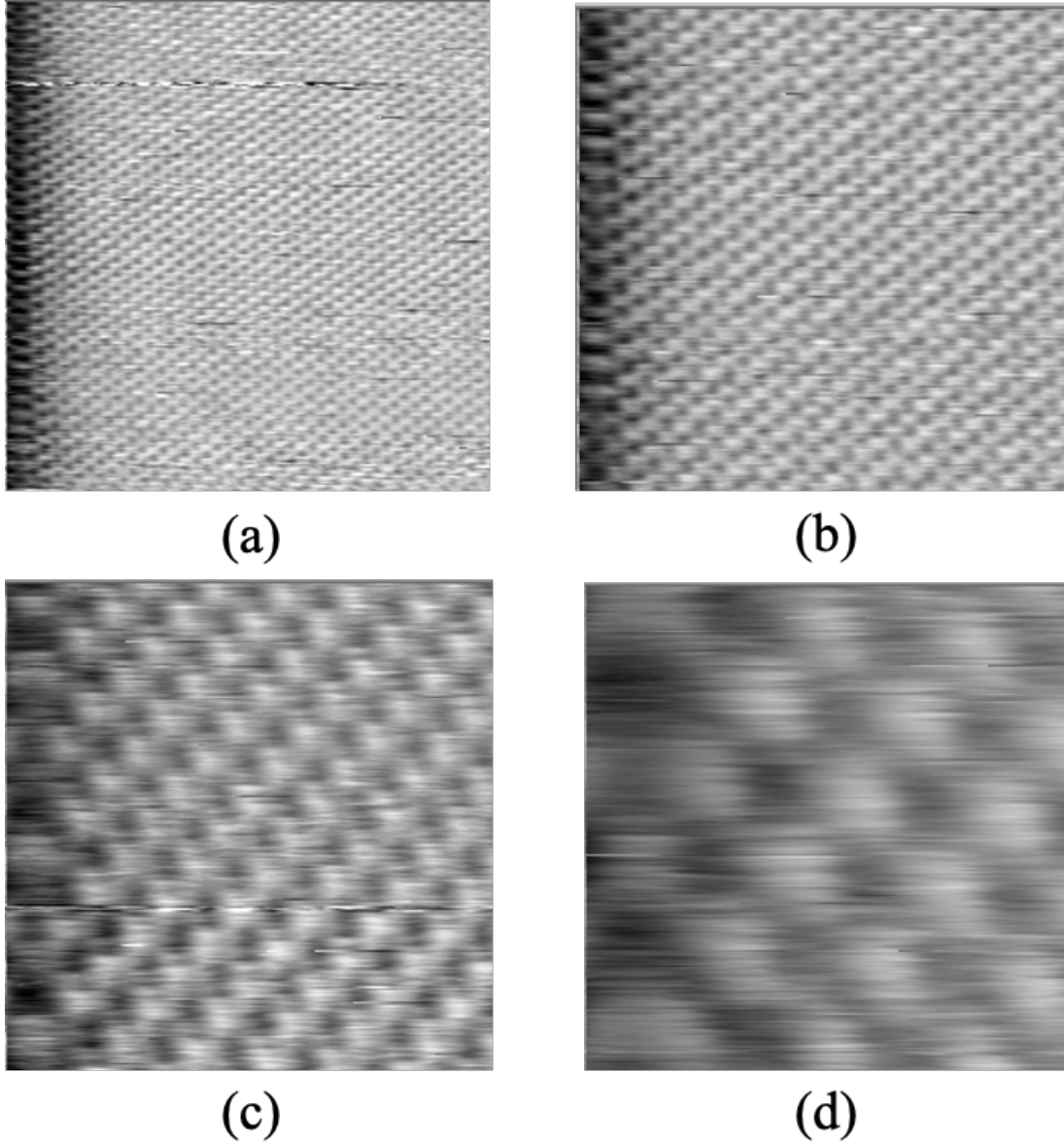


图 2 HOPG 表面的 STM 原子分辨图像

接下来我们要通过图像计算压电陶瓷的压电系数，直接观察 STM 图像进行定量计算误差比较大，本文进一步利用 Python 程序对实验所得 HOPG 原子分辨图像进行定量分析。该程序以 STM 图像为输入，首先读取 PNG 图像并将其转化为灰度强度分布；随后对图像逐行进行背景扣除，以减弱扫描过程中由于漂移、条纹和整体亮度不均匀带来的影响。在此基础上，程序对图像进行平滑处理，并通过局域极大值搜索识别图像中的亮斑位置。由于 STM 图像中的亮斑对应 HOPG 表面局域态密度较高的位置，因此这些亮斑可以近似视为原子周期结构中的特征点。程序进一步对识别出的亮斑中心进行两两距离分析，筛选出近似水平和斜向的相邻原子矢量。由于 HOPG 表面晶格常数已知，可取相邻亮斑间距

$$a = 0.246 \text{ nm}, \quad (4.1)$$

作为图像尺度标定的标准。若图像中水平方向相邻原子的像素距离为 N_x ，则水平方向每个像素对应的实际

长度可估计为

$$s_x = \frac{a}{N_x}. \quad (4.2)$$

类似地, 结合斜向晶格矢量的投影关系, 可以估计竖直方向的像素尺度 s_y 。于是, 对于像素宽度为 W 、高度为 H 的 STM 图像, 其实际扫描范围可写为

$$L_x = W s_x, \quad L_y = H s_y. \quad (4.3)$$

通过这种方法, 可以不依赖仪器给出的标称扫描电压, 而直接根据 HOPG 的晶格周期对图像尺度进行反推。图 3 给出了程序处理后的结果图。图中红色圆圈标出了程序识别出的原子亮斑位置, 黄色线段表示近似水平方向上的相邻原子间距, 蓝色线段表示斜向晶格方向上的相邻原子间距。图像上方和左侧的绿色、紫色刻度线分别表示根据晶格周期换算得到的横向和纵向尺度标尺。左下角给出的 x 和 y 数值为程序最终估计得到的图像实际扫描范围。

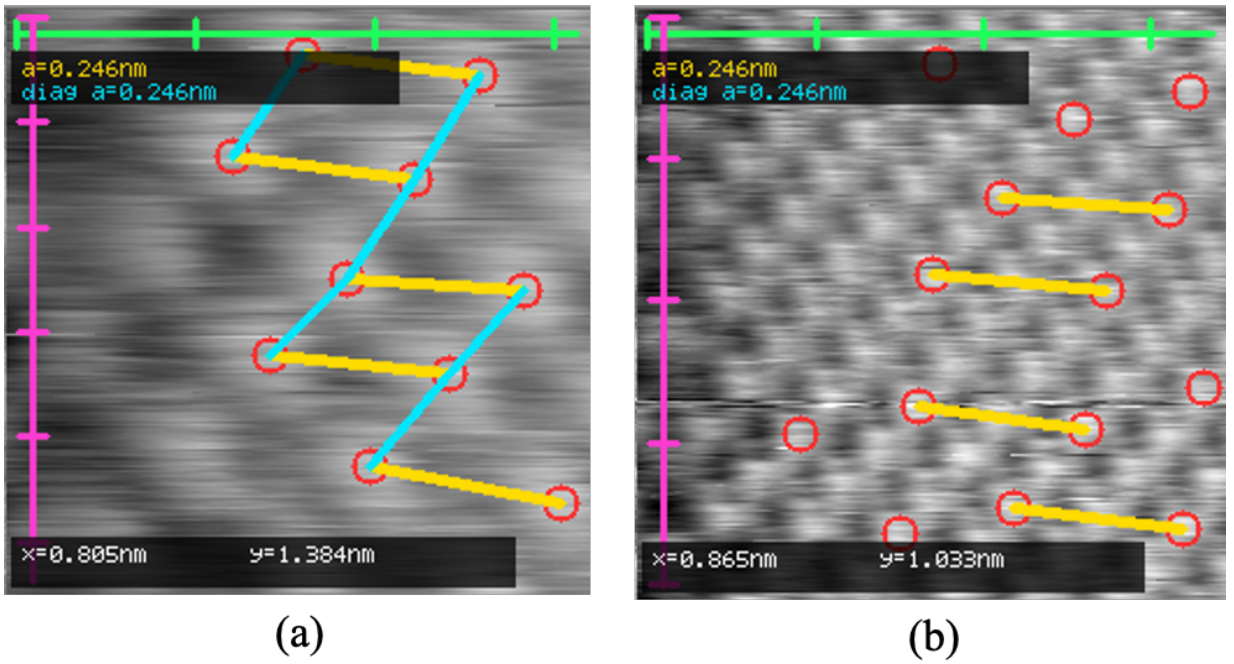


图 3 基于 Python 图像处理得到的 HOPG 晶格识别与尺度标定结果

从图 3 可以看出, 程序能够较好地识别出图像中周期性较明显的亮斑, 并在局部区域内给出相邻原子间距的标定结果。左图中晶格条纹相对模糊, 但程序仍能根据斜向与横向周期给出大致的晶格矢量; 右图中原子亮斑更加清晰, 识别结果也更稳定。程序得到的扫描范围约为纳米量级, 与 STM 原子分辨成像的尺度相符, 说明实验图像确实反映了 HOPG 表面的原子周期结构。需要指出的是, 该方法仍存在一定误差。首先, STM 图像并非单纯的几何形貌图, 而同时受到局域电子态密度、针尖状态和反馈参数影响; 其次, 实验图像中存在横向条纹、漂移和局部畸变, 这会影响亮斑中心的识别精度; 此外, 若针尖与样品表面不完全垂直, 图像中的晶格周期也可能发生拉伸或剪切。因此, 该程序给出的扫描尺度更适合作为数量级估计和辅助分析, 而不能完全替代仪器标定。

进一步结合 HOPG 已知的晶格常数以及程序分析得到的扫描范围, 可以对 STM 扫描系统中压电陶瓷的压电系数进行估计。设扫描过程中在 x 、 y 方向施加的扫描电压分别为 V_x 与 V_y , 对应实际扫描长度分别为 L_x 与 L_y , 则压电系数可由

$$c = \frac{L}{V} \quad (4.4)$$

进行估算。根据程序对图像的分析结果，得到

$$c_x = 0.805 \text{ nm/V}, \quad c_y = 1.384 \text{ nm/V}. \quad (4.5)$$

理论上，对于结构对称且工作正常的压电扫描系统而言， x 与 y 方向的压电陶瓷应具有相近甚至基本相同的压电系数，因此实验中得到的 c_x 与 c_y 存在明显差异，说明测量过程中存在较大的系统误差。造成这一现象的原因可能有多个方面。首先，STM 图像中存在较明显的横向条纹和漂移现象，这会导致程序在识别晶格周期时产生偏差，从而影响扫描长度的估计。其次，针尖与样品表面可能并未完全垂直，导致图像在某一方向上发生拉伸或压缩，使得两个方向上的像素尺度不一致。此外，压电陶瓷本身也可能存在一定各向异性，其响应并非完全线性；再加上扫描过程中反馈系统的迟滞效应与热漂移，也会进一步影响尺度测量结果。

另一方面，STM 图像反映的是局域电子态密度而非严格的几何原子位置，因此图像中的亮斑中心与真实原子位置之间也可能存在一定偏差。程序在自动识别局域极大值时，对阈值、平滑半径以及邻域大小等参数较为敏感，这也会对最终结果产生影响。因此，本实验中得到的压电系数结果主要反映其数量级范围，而不宜视为精确测量值。不过，实验结果仍然说明 STM 系统能够实现亚纳米尺度的位置控制，并验证了压电扫描系统在原子分辨成像中的关键作用。

5 结论

本实验利用扫描隧道显微镜 (STM) 对高定向热解石墨 (HOPG) 样品表面进行了扫描测量，并成功获得了具有原子分辨率的 STM 图像。实验结果表明，STM 能够利用针尖与样品之间的量子隧穿电流实现对固体表面原子尺度结构的探测，从而直观验证了量子力学中的隧穿效应。通过对 HOPG 表面周期性结构的观察，可以清晰看到 STM 图像中呈现出的三角晶格特征。这一结果与石墨 AB 堆垛结构中不同碳原子的局域电子态密度差异相一致，说明 STM 所获得的图像不仅反映样品表面的几何形貌，同时还与其电子结构密切相关。

在实验基础上，本文进一步利用 Python 程序对 STM 图像进行了自动化图像分析。程序通过识别图像中的原子亮斑位置，并结合 HOPG 已知晶格常数，对 STM 图像的实际扫描尺度进行了估计，同时计算得到了压电扫描系统在两个方向上的压电系数 $c_x = 0.805 \text{ nm/V}$ ， $c_y = 1.384 \text{ nm/V}$ ，虽然两个方向上的结果存在一定差异，但其数量级与 STM 压电扫描系统的典型参数基本一致。误差主要来源于图像漂移、扫描畸变、针尖状态以及图像识别过程中引入的不确定性。

总体而言，本实验不仅加深了对量子隧穿效应和 STM 工作原理的理解，也进一步认识到机械稳定性、反馈控制以及针尖状态对 STM 成像质量的重要影响。同时，通过结合图像处理与程序分析的方法，对 STM 实验数据进行了更进一步的定量研究，提高了实验结果分析的完整性与可靠性。

致谢

感谢卢晓波老师的悉心指导感谢另一位同学的协助，不过我忘了问另一位同学的名字 qwq

参考文献

- [1] GAMOW G. Zur quantentheorie des atomkernes[J]. Zeitschrift für Physik, 1928, 51(3-4): 204-212.
- [2] GURNEY R W, CONDON E U. Wave mechanics and radioactive disintegration[J]. Nature, 1928, 122: 439.
- [3] BINNIG G, ROHRER H, GERBER C, et al. Surface studies by scanning tunneling microscopy[J]. Physical Review Letters, 1982, 49(1): 57-61.
- [4] BINNIG G, QUATE C F, GERBER C. Atomic force microscope[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(9): 930-933.

附录 A：思考题

1. HOPG 的原子排列为六角密排（无心的），为什么实验中观察到的 STM 原子分辨图像通常呈现为有心六角结构或三角晶格结构？

从晶体结构上看，HOPG（Highly Oriented Pyrolytic Graphite）表面碳原子本应构成无心六角晶格。然而，在 STM 实验中通常只能观察到其中一半原子对应的亮斑，从而形成类似“三角晶格”或“有心六角结构”的图像。这一现象与石墨的 AB 层状堆垛结构有关。在 HOPG 中，相邻两层石墨烯并不是完全重合排列的，而是存在交错堆垛关系。对于表面层中的碳原子，可以分为两类：一类原子正下方存在下一层碳原子，另一类原子下方则为空位区域。由于两类原子的局域电子态密度不同，其对应的隧穿概率也不同。

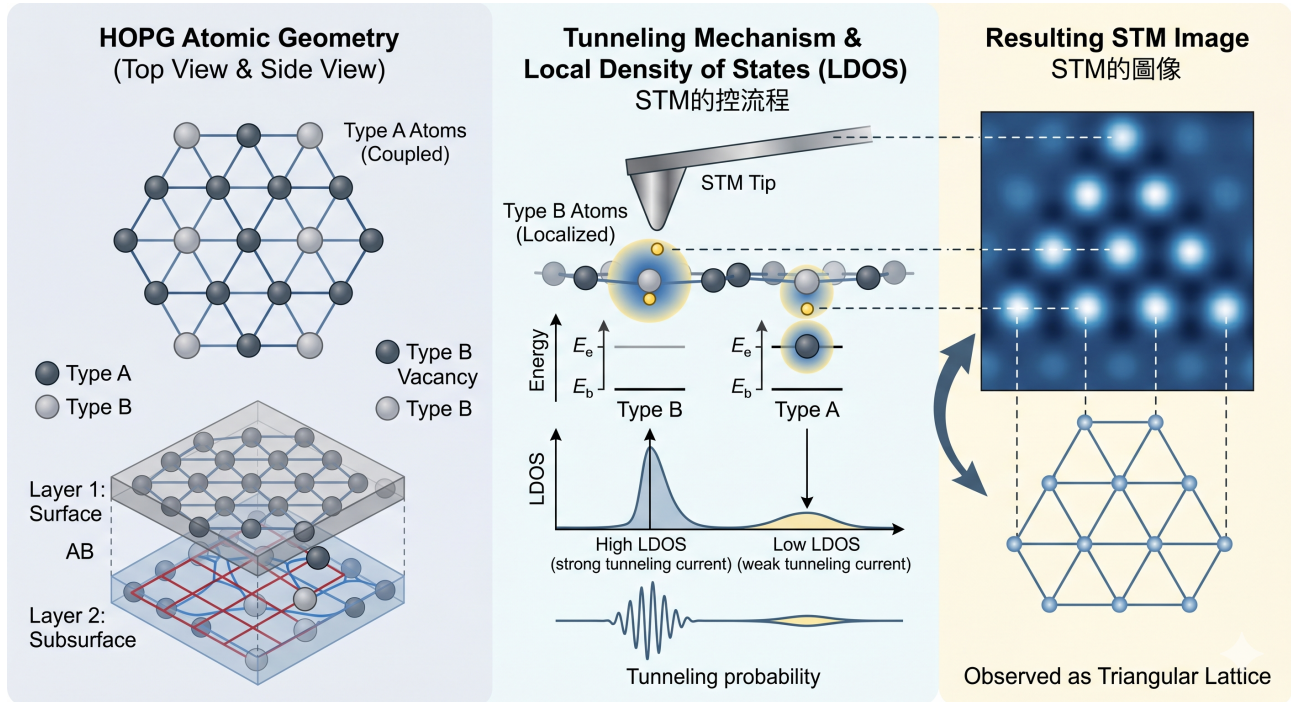


图 4 STM 探测 HOPG 的微观示意图

STM 所探测的并非单纯的面几何高度，而是针尖与样品之间局域电子态密度（local density of states, LDOS）所决定的隧穿电流。下方存在碳原子的原子，其电子云会与下一层发生较强耦合，因此局域电子态密度较低；而下方为空位的原子，其电子云更加局域于表面，能够产生更强的隧穿电流，因此在 STM 图像中表现为更亮的斑点。因此，STM 图像中实际只突出显示了其中一类碳原子的位置，从而使原本的六角晶格看起来变成了三角晶格结构。这也说明 STM 图像本质上反映的是电子结构而不仅仅是原子几何排布。

2. 为什么在金膜样品的 STM 图像中有时会出现形状相似的凸起（针尖像）？

在 STM 成像过程中，针尖的形状和状态会直接影响最终获得的图像质量。当针尖不够尖锐、存在污染，或者针尖顶端存在多个微观突起时，就可能在 STM 图像中出现重复的凸起结构，这种现象通常被称为“针尖像（tip artifact）”。

理想情况下，STM 针尖应只有一个最尖锐的原子参与隧穿过程，这样才能保证成像具有较高空间分辨率。然而，若针尖顶端存在多个相邻突起，则不同位置都可能与样品表面同时发生隧穿，从而导致同一个表面结构在图像中重复出现。由于这些重复结构来源于同一个针尖结构，因此其形状往往十分相似。此外，金膜表面通常不像 HOPG 那样具有规则且均匀的周期性电子结构，其表面粗糙度和电子态分布更复杂，因此针尖状态对成像结果的影响会更加明显。当针尖状态不理想时，图像中的局部凸起容易呈现出相似形貌，

从而形成针尖像。

除了针尖结构本身之外，扫描过程中机械振动、反馈系统响应不稳定以及针尖与样品发生轻微碰撞，也可能改变针尖形状并导致类似现象。因此，在 STM 实验中，针尖制备与维护是获得高质量图像的重要条件之一。当出现明显针尖像时，通常需要重新处理或更换针尖，并重新调整扫描参数。

附录 B：数据处理使用的代码

本实验的数据处理与分析主要基于 Python 编程语言完成，综合使用了 `numpy`、`matplotlib`、`scipy` 以及 `pandas` 等科学计算与数据处理库，对实验数据进行读取、处理、可视化以及拟合分析。相关代码已整理并上传至 GitHub 仓库，读者可通过 https://github.com/xisenal/PKU-modern-physical-experiment-code/tree/main/STM_experiment5 获取完整项目文件并复现实验数据处理过程。

本项目采用 MIT 开源协议，允许在非商业用途下自由查看、修改与使用。如需获取代码，可在目标目录下通过 `bash` 终端执行

```
git clone https://github.com/xisenal/PKU-modern-physical-experiment-code.git
```

将仓库克隆至本地。在项目目录中已提供基于 `.venv` 的虚拟环境配置，用户进入虚拟环境后即可直接运行相关 `.py` 文件完成数据处理与分析。此外，也可通过

```
pip install numpy matplotlib pandas scipy
```

手动安装所需依赖库，从而在本地环境中独立运行代码。