

Open STM

An **Open-source** Scanning Tunneling Microscope Project

扫描隧道显微镜 OpenSTM · 概述

项目简介

本项目正式开始于 2020 年 9 月，并最终于 2023 年 5 月实现了对高定向热解石墨（Highly Oriented Pyrolytic Graphite, HOPG）完成了成像，成功观察到石墨表面原子结构。显微镜利用陶瓷压电片实现探针的三维移动，利用自制惯性压电滑台实现样品粗接近，使用 ESP32 作为核心控制芯片，配合多个高精度 AD/DAC 实现扫描成像。

本项目开源协议为最宽松的 MIT 协议，你可以随意使用本项目开源的内容。此外，在显微镜的开发过程中，都尽量避免使用高成本套件，积极寻找平价替代方案。参考 2021 年芯片价格以及其他加工工艺成本，本项目的复刻物料成本为 1000 元左右（详见构建指南文档中的清单）。

引言

自 1981 年来自 IMB 的 Gerd Binnig 和 Heinrich Rohrer 发明了扫描隧道显微镜 (Scanning Tunneling Microscope, STM) 并获得了 1986 年的诺贝尔奖以来^{[1][2]}, 关于 STM 的新设计、新结构遍地开花, 其中不乏应用在常温、常压下的低成本设计。

在 1986 年 K.Besocke 便提出了一种易于操作的 STM 设计^[3], 这是一种不需要在低温、低压下的 STM 设计方案, 其利用了压电材料搭建的三轴式结构, 完成了 STM 成像。虽然其所使用的压电材料截止至目前仍然价格较为昂贵, 但论文中提出的“简化”、“小型化”设计原则将可以作为后续设计的核心原则。1999 年 John Alexander 提出了一种基于压电蜂鸣片的三维位移装置的设计^[4], 并且在 2000 年成功将该设计应用于 STM, 至此 STM 的扫描头的成本大幅度降低。

目前最广为人知的 DIY STM 项目是由 Dan Berard 在其网站(dberard.com)公布的方案, Dan 成功观察到了 HOPG 的原子结构、金的原子层结构。从设计的结构原理出发, Dan 的设计与 John 的设计基本一致, 他们都使用了压电蜂鸣片作为 STM 的扫描头, 并且都采用了三轴式机械升降台, 利用机械结构的位移缩放完成对样品和探针的粗接近。在 OpenSTM (后续简称为本项目) 设计之初, 也都大量参考了他们的设计, 但在实际操作的过程中, 这种设计仍然存在一定的问题。

其中最主要的问题是三轴式机械结构所带来的控制、温漂问题。在三轴式的机械接近结构中, 需要控制精密螺丝旋转完成扫描头升降, 虽然原理上可以手动进行控制, 但手动控制所带来的震动以及时耗的问题是致命的。故三轴式机械接近结构需要引入电机进行控制, 而电机发热所带来的温漂将难以忽视, 热胀冷缩效应将会在样品和探针间产生相对位移。同时, 由于该套接近系统是开环的, 没有可用的反馈量, 这将导致非常长的接近时间 (以实践经验

为参考，从样品装载到隧穿电流稳定通常需要耗时 20~60 分钟)。

为了解决这些问题，本项目放弃了应用广泛的三轴机械接近结构，转而采用了全压电控制系统（同时是低成本的）完成了 STM 的位移、接近控制。并在研发过程中，找到了较为可靠的反馈量，实现了粗接近过程中的闭环控制。

设计方案简述

机械结构

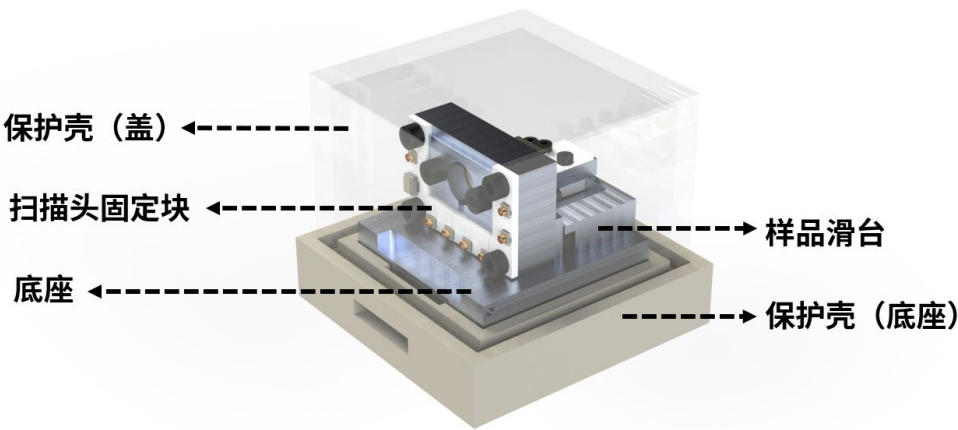


图 1 显微镜整体结构

显微镜主体机械结构分为三个部分：**底座**、**扫描头固定块**以及**样品滑台**。扫描头固定块与样品滑台固定在底座上方，底座、扫描头固定块通过铝合金加工而成，样品滑台主要部件同样由铝合金加工制成。

在工作过程中，样品被装载到样品滑台上，完成样品的粗接近（即将样品送入扫描头的行程范围内），随后固定块上的扫描头将完成细接近以及扫描任务。

为了保护显微镜主体以及达到一定程度的隔音、防尘目的，主体外还使用了光敏树脂材料制成的保护壳。

压电滑台设计

压电滑台基于 Hsien-Shun Liao 等人^[5]的低成本、开源纳米定位器修改而来，其核心原理为利用压电陶瓷的纳米级应变常数以及粘滑（Stick-Slip）效应，通过压电陶瓷的往复运动，带动滑台实现移动。

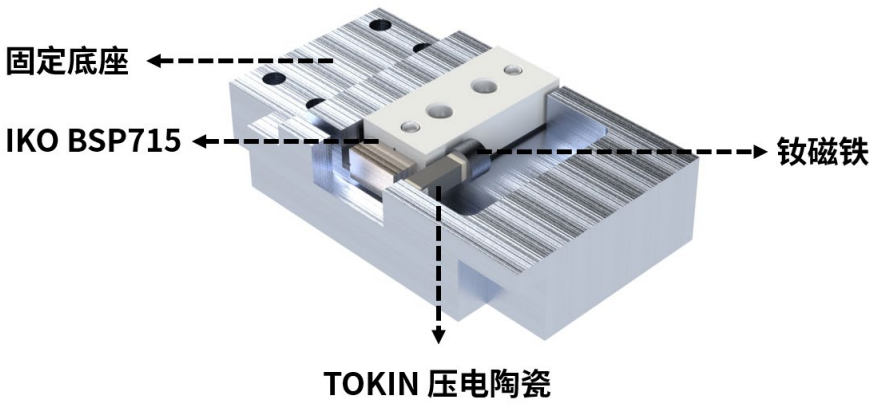


图 2 压电滑台结构

修改后的压电滑台结构如图 2 所示，其包括了精密滚珠滑组（IKO BSP715）、压电陶瓷（TOKIN AL1.65×1.65×5DF）、钕磁铁以及固定底座构成。磁铁与压电陶瓷通过硬质胶水（Ergo5400）粘接，组合成为压电致动器，致动器通过同型号胶水粘接于固定底座。

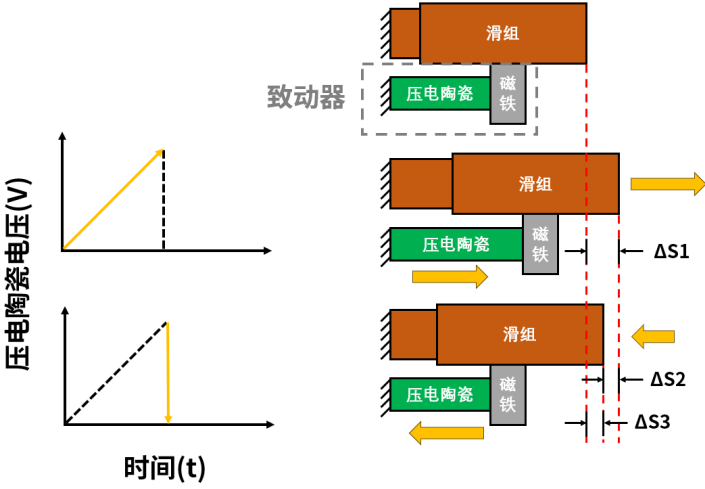


图 3 压电滑台长工作示意（单个步长）

致动器磁铁端通过磁吸固定于滑组上，致动器的运动将通过磁铁产生的摩擦力传递至滑

组。在工作工程中，致动器的压电陶瓷将被施加锯齿波。图 3 展示了压电滑台一个步长的运动情况：在锯齿波的上升阶段，滑组将被带动，与致动器同步运动，运动 ΔS_1 的距离。而在锯齿波下降阶段，致动器快速收缩至原位，此时由于粘滑效应，静摩擦力 μ_s 大于动摩擦力 μ_k ，滑台将不能与致动器同步运动，产生相对位移^[6]。每个锯齿波都将使滑组产生一小段步进 ΔS_3 ， ΔS_3 小于压电陶瓷的最大形变量。连续的锯齿波将实现滑组的连续步进。样品台通过金属连接件固定在滑组上，从而实现显微镜的粗接近功能。

接近程序闭环控制

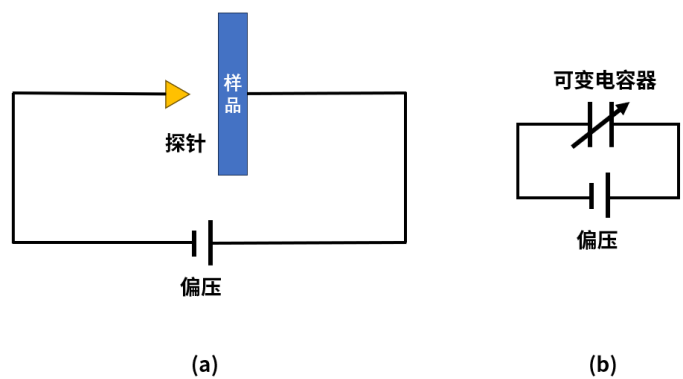


图 4 (a)探针样品简化模型 (b)探针样品电路等效模型

在缺少光学显微镜的辅助下，扫描隧道显微镜的粗接近程序通常需要耗费较长的时间，长者甚至需要几个小时才能将探针送入扫描头的行程范围内。Schlegel 等人^[7]通过给样品施加交流电，探测探针和样品间的微小电容变化，分析其二阶导数可以实现稳固的接近，但仍需要耗费至多 1~2 小时的接近时间。De Voogd 等人^[8]提出了基于探针和样品间电容确定其之间距离的方法，但需要额外的电容精密测量电路。

探针和样品组成可变电容器（如图 4 所示），样品的位移将导致电容器的容值变化。此时若施加在样品和探针之间的偏压固定，容值变化将在样品和探针之间产生电流，该电流可

以由扫描隧道显微镜的前级放大器检出，而无需额外的电路设置。

当样品接近到预隧穿距离时，滑组的往复运动将表现为可观的电流变化，并且随着样品和探针的距离缩短，电流变化将变得更为显著。下图展示了在样品进入可探测电流范围的距离后，一个锯齿波周期（步长）所引起的电流变化情况。当压电陶瓷电压为负向变化时，样品将向探针接近。

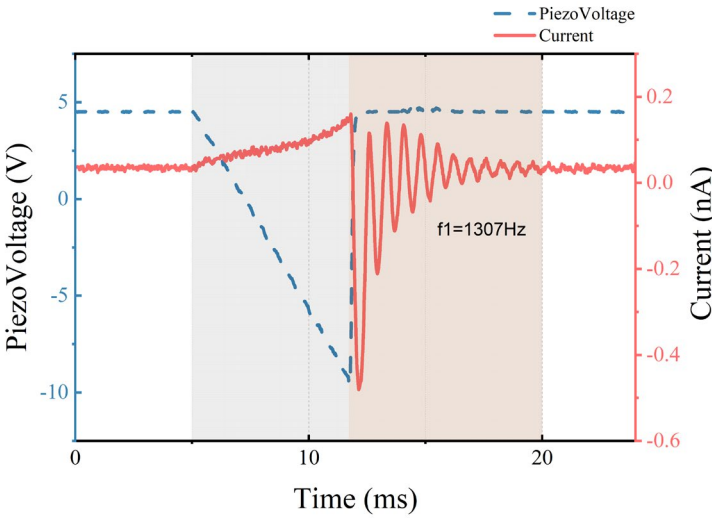


图 5 预隧穿距离下滑台运动所产生的电流（单个步长）

从图 5 中可以看出，当致动器处于正向缓动阶段时（灰色区域），产生了正向电流。而当致动器反向快速收缩时，产生了反向电流，并伴随有振荡（橙色区域）。相关研究表明，对于干摩擦制动系统进行制动的过程中，将会产生由摩擦引起的振动^[9]。当致动器快速动作时，存在一个摩擦制动的过程，并且该过程中产生的位移振荡所产生的电容变化以电流的形式被捕捉。

对于缓动阶段的电流，图 6 展示了临界步进的情况（即该次步进完成后，探针与样品发生碰撞）。随着滑台的推进，电流呈增大趋势。当样品偏压固定时，电容减少所产生的电流与隧穿电流方向相同。对该条电流曲线进行 \ln 缩放后，表现出一定程度的线性，符合隧穿电流的特征，即缓动阶段的电流由隧穿电流主导。橙色部分电流是由于摩擦振荡导致的，对该区域进行低通滤波后，能够观察出振荡特性，并且振荡频率 f_2 与图 5 中的频率 f_1 基本一

致。

对于图 5 中的振荡电流，考虑到其是在滑台远离时产生的，并且幅度大于缓动阶段时的隧穿电流，故可进一步佐证其主要是由电容变化所产生的。

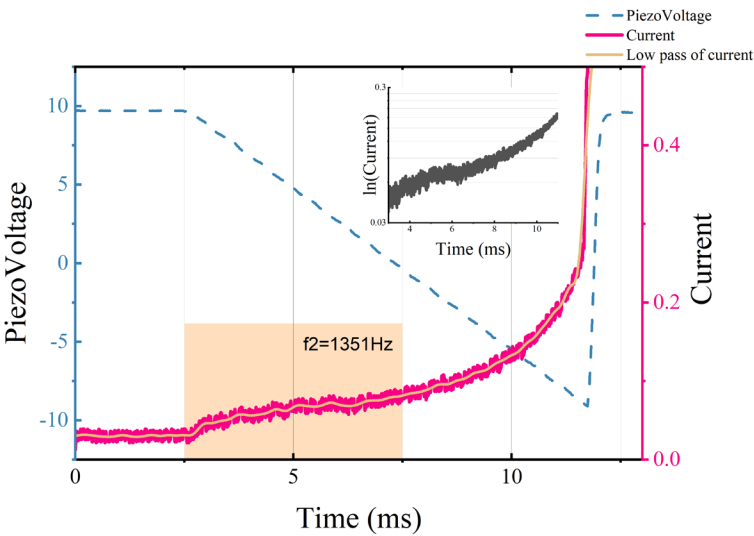


图 6 临界距离下滑台运动所产生的电流（单个步长）

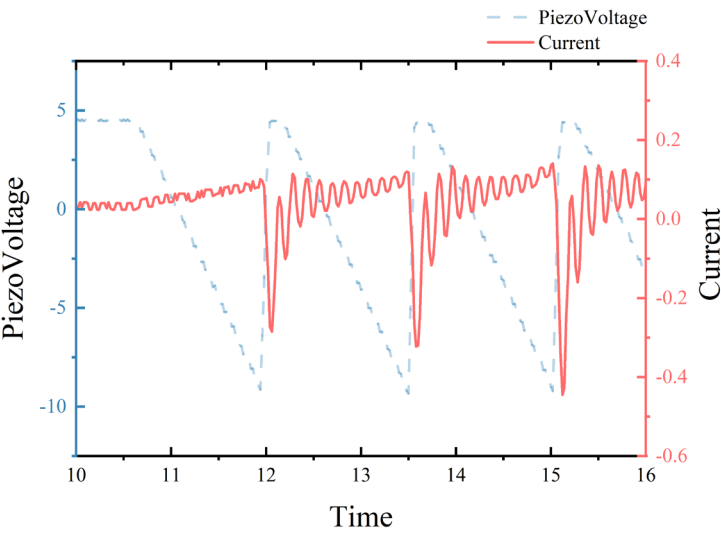


图 7 滑台连续运动产生的电流

当施加连续的锯齿波时，随着探针与样品距离缩短，振荡电流逐渐增强，如图 7 所示。通过对振荡波的第一个波峰进行采样，作为当前距离的特征量，当其超过设定的阈值再进行隧穿电流探测，可大幅度缩减样品接近的耗时。

扫描头设计

扫描头的致动部分使用了单片压电蜂鸣片完成，原理参考了来自 John Alexander 的专利。核心原理是利用盘式压电蜂鸣片的弯曲特性，带动探针实现三维运动。蜂鸣片的结构包括三层：镀银层、压电陶瓷层以及铜片层。压电蜂鸣片正常工作时，将会在银和铜层之间通上交流电，以驱动蜂鸣片上下弯曲，实现振动发声。若将探针通过连接器固定在盘片上，则可带动探针一起运动，此时的运动方向为 Z 轴方向。

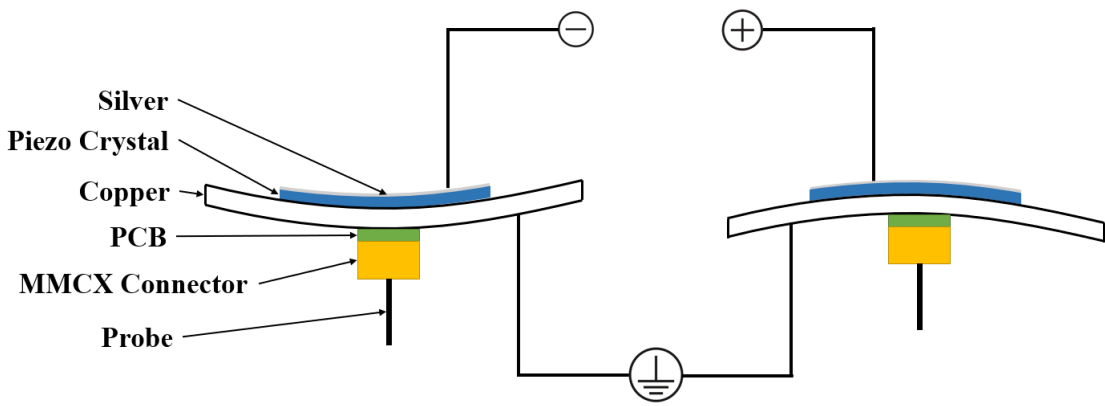


图 8 扫描头结构示意图

此时，若使用工具将银层划分为四个象限（如图 9a），通过对四个区域施加不同电压，则可实现 X 或 Y 方向的运动。以 X 方向为例，当对 +X 施加正向电压、-X 施加反向电压时，+X 区域的蜂鸣片向上弯曲，而 -X 区域向下弯曲，综合两个区域的运动实现探针左摆，反之则实现右摆。在此基础上，对 +X 和 -X 区域施加相同幅值的直流分量，则可实现 Z 轴移动。

对于压电陶瓷所产生的迟滞和蠕变效应，可以通过对已知的标准样品（如热解石墨，HOPG）进行标定后进行修正。

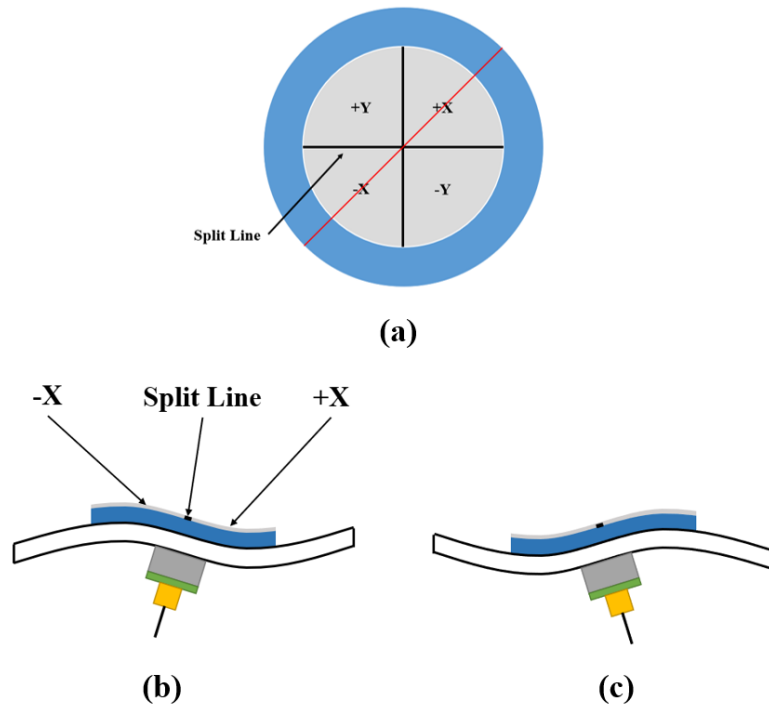


图 9 (a)压电蜂鸣片切割示意 (b) X 方向正向摆动 (c) X 方向反相摆动

电路设计

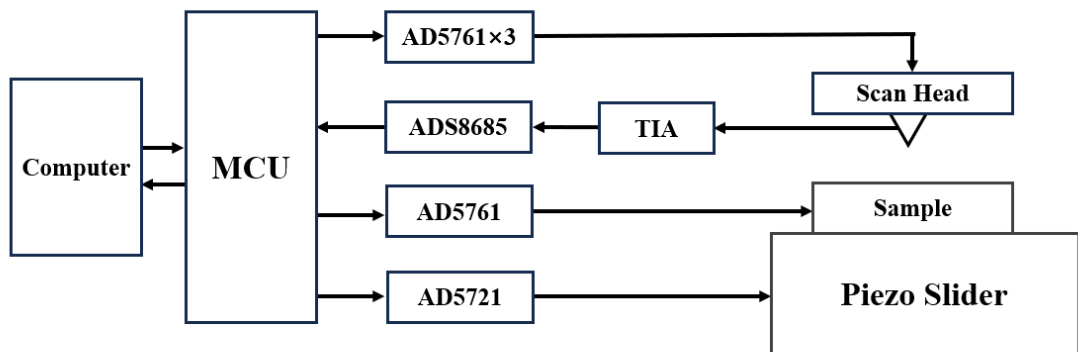


图 10 电路原理框图

电路系统采用全低压设计，即系统操作电压不高于 20V。扫描头由 3 个 16-bit DAC 进行控制，每个 DAC 对于 X、Y、Z 轴电压。压电滑台由 12-bit DAC 进行控制，样品偏压由 16-bit DAC 进行控制。

对于隧穿电流的检测，采用了在扫描隧道显微镜中运用较为广泛的跨阻放大器（TIA）^[11]作为前级放大器，用于检测微弱的隧穿电流。TIA 的运放为 OPA627，其具有极低的输入偏置电流，与 $100\text{M}\Omega$ 的反馈电阻组成 TIA。通过在前级放大器输入端分别串接 $1\text{M}\Omega$ 、 $100\text{M}\Omega$ 的电阻进行输入输出电压测试，其表现出了良好的线性（图 12）。

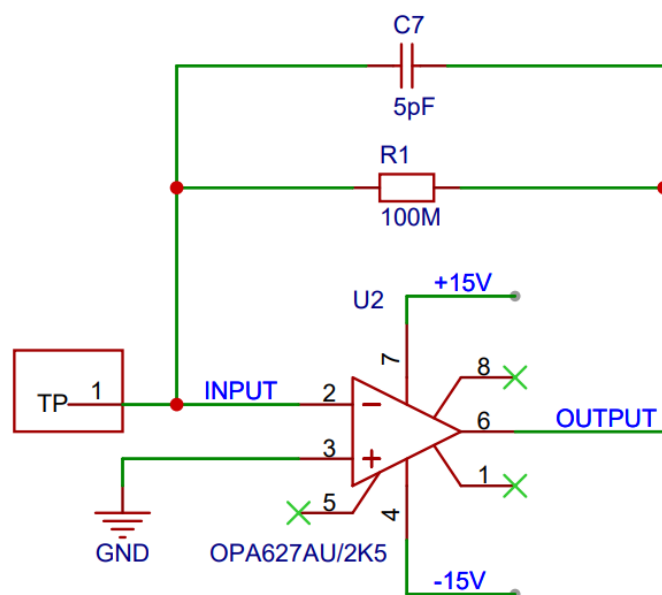


图 11 前级放大器（TIA）

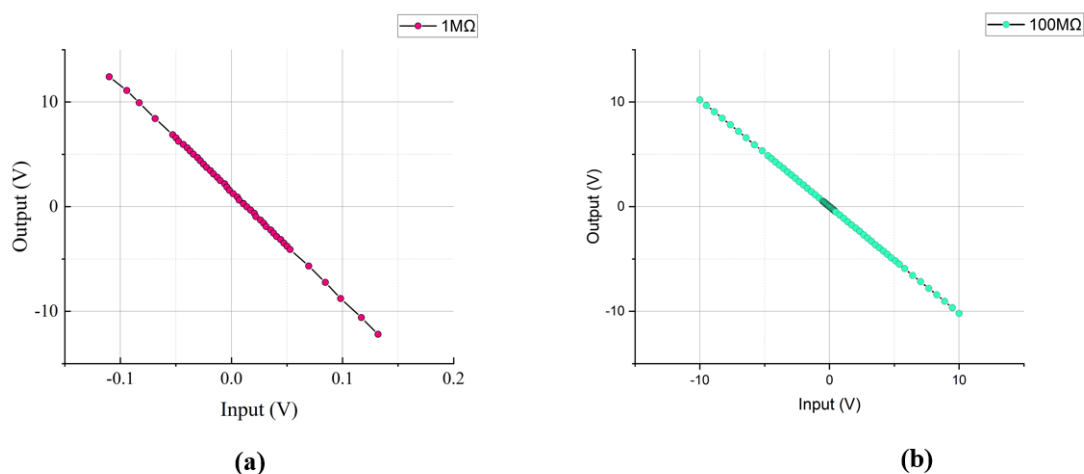


图 12 (a)串接 $1\text{M}\Omega$ 时的输入输出曲线 (b)串接 $100\text{M}\Omega$ 时的输入输出曲线

仪器表现

通过对热解石墨表面进行剥离后，将其装载到显微镜样品台，进行多种扫描测试。在偏压固定的情况下，改变扫描头 Z 轴距离完成了距离-电流曲线测试（图 13a）。曲线表现出了指数特征，将电流取 e 对数后，其表现出了线性特征。图 13b 为 HOPG 的偏压曲线，即将探针距离固定，改变样品偏压所测得的曲线，其走势与 HOPG 特征符合^[12]。

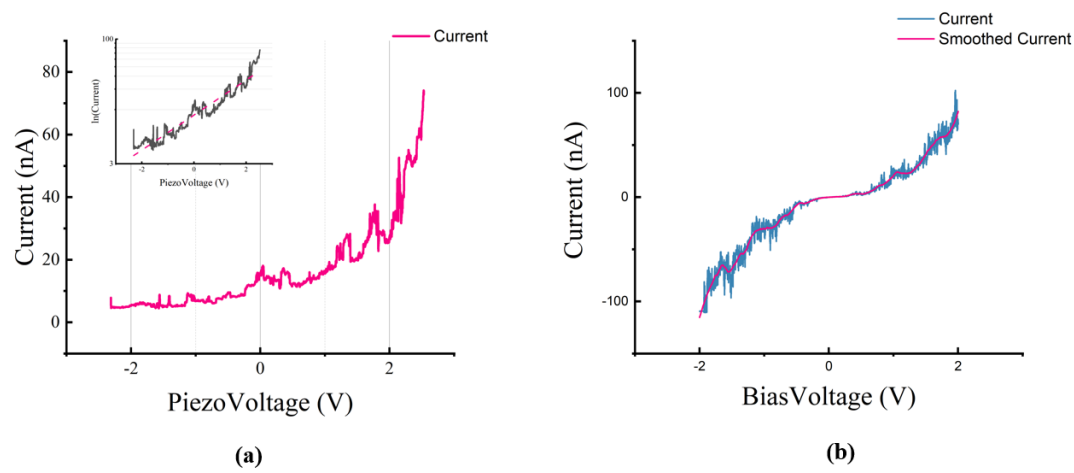


图 13 (a)距离-电流曲线， 横坐标为扫描头 Z 轴电压。小图为纵坐标取对数后的图像。(b)样品偏压曲线

图 14(a)为显微镜对 HOPG 未经滤波处理的扫描成像结果，可以较为清晰的观察出 HOPG 的晶格结构。在 STM 下对 HOPG 进行扫描通常只能扫描出石墨六边形晶格的一半，即呈现为三角形^[13]，则每个黑点间距应为 2.46 \AA 。在对原始图像进行 FFT 变换后，呈现出较为明显的六个峰值。图 15 展示了更为细节的 HOPG 晶格结构。

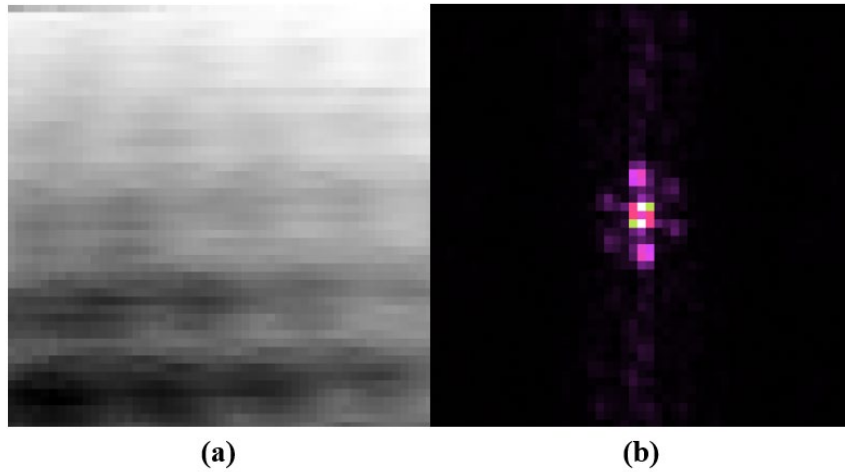


图 14 (a)热解石墨表面扫描结果 (b)FFT 图像

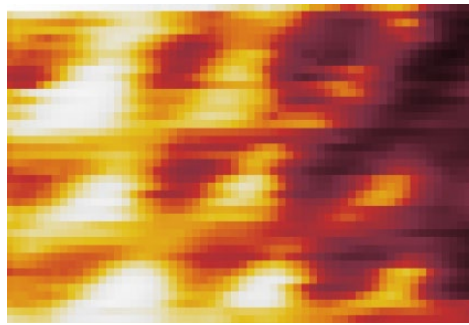


图 15 更为细节的晶格结构

参考文献

- [1]Binnig G, Rohrer H. Scanning tunneling microscopy[J]. IBM Journal of research and development, 2000, 44(1/2): 279.
- [2] Binnig G, Rohrer H. Scanning tunneling microscopy—from birth to adolescence[J]. reviews of modern physics, 1987, 59(3): 615.
- [3] Besocke K. An easily operable scanning tunneling microscope[J]. Surface Science, 1987, 181(1-2): 145-153.
- [4] Alexander J D, Tortonesi M, Nguyen T. Atomic force microscope with integrated optics for attachment to optical microscope: U.S. Patent 5,952,657[P]. 1999-9-14.

- [5] Liao H S, Werner C, Slipets R, et al. Low-cost, open-source XYZ nanopositioner for high-precision analytical applications[J]. *HardwareX*, 2022, 11: e00317.
- [6] Gao C, Kuhlmann-Wilsdorf D, Makel D D. The dynamic analysis of stick-slip motion[J]. *Wear*, 1994, 173(1-2): 1-12.
- [7] Schlegel R, Hänke T, Baumann D, et al. Design and properties of a cryogenic dip-stick scanning tunneling microscope with capacitive coarse approach control[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(1): 013706.
- [8] De Voogd J M, Van Spronsen M A, Kalff F E, et al. Fast and reliable pre-approach for scanning probe microscopes based on tip-sample capacitance[J]. *Ultramicroscopy*, 2017, 181: 61-69.
- [9] Nack W V, Joshi A M. Friction induced vibration: brake moan[J]. *SAE transactions*, 1995: 1967-1973.
- [10] Alexander J D, Tortonese M, Nguyen T. Atomic force microscope with integrated optics for attachment to optical microscope: U.S. Patent 5,952,657[P]. 1999-9-14.
- [11] Petersen J P, Kandel S A. Circuit design considerations for current preamplifiers for scanning tunneling microscopy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2017, 35(3).
- [12] Wang Q, Hou Y, Wang J, et al. A high-stability scanning tunneling microscope achieved by an isolated tiny scanner with low voltage imaging capability[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(11).
- [13] Mizes H A, Park S, Harrison W A. Multiple-tip interpretation of anomalous

scanning-tunneling-microscopy images of layered materials[J]. Physical Review B, 1987, 36(8): 4491.