

超高真空-四探针扫描隧道显微镜系统的彻底改造 及其强大功能的实现

扫描隧道显微镜 (STM) 发明于二十世纪八十年代初, 这一强大的工具赋予人们研究和操控微观体系的能力。传统的单探针 STM 可以用来研究样品的形貌和材料局域的电子结构等性质, 然而其无法测量低维体系的横向电输运特性。为了将输运测试能力与极高空间分辨率相结合, 人们陆续开发了双探针、三探针甚至四探针等多探针 STM 系统。其中, 四探针 STM 同时兼容标准的四端输运测试方式, 可以更准确对样品输运性质进行原位表征。

国际上第一代商业化超高真空 (UHV) 四探针 STM 系统是由知名的科研仪器生产商德国 Omicron 公司所生产。作为世界上最早的商用化多探针系统 (型号: UHV Nanoprobe), 其在实际应用中无法有效地对纳米体系原位形貌与输运研究, 如: 通常条件下无法获得原子级分辨图像, 亦不能形成稳定的点电极接触。上述不足是由该系统的设计缺陷所致: 首先, 系统的机械振动隔绝设计相对简单, 成像时存在严重噪音。其次, 降温时仅有样品被冷却且直接暴露于室温环境中。因此, 样品最低温度过高且与针尖之间存在较大的温度梯度, 导致了显著的热漂移和热电子注入, 很大程度上影响了输运测量的精度, 所测得的扫描隧道谱 (dI/dV) 亦不可信。此外, 系统还存在扫描结构易耦合噪音、定位所用扫描电镜 (SEM) 老化等缺陷和问题。

中国科学院物理研究所高鸿钧研究组 (N04 组) 多年来一直致力于扫描探针显微学研究及其高精尖技术与设备的研发, 在科学上取得了一系列重要成果, 同时也为研制该类高精尖仪器奠定了雄厚基础。近期, 在物理所技术部郇庆副研究员的直接指导与带领下, 该研究组的博士生马瑞松、严佳浩、吴良妹等对这台商业化四探针 STM 系统进行了全面彻底的改造, 从根本上解决了系统信噪比、机械和温度稳定性、成像分辨率以及降温等问题。

针对原有系统所存在的噪音大、温漂显著、分辨率低 (参见图 4 b-c) 等问题, 他们将该系统进行了多方位的彻底改造, 包括减振与阻尼、扫描结构、导热链接与热屏、针尖定位 SEM 的替换等等。

1. 减振与阻尼

在保留空气腿减振和氟橡胶圈减振的同时, 增加了悬挂弹簧以及有效磁阻尼

结构（图 1）。

2. 扫描结构

针对四探针系统应用的特点，他们采用了双扫描管结构，即可以保证大的扫描范围又可同时实现高空间分辨率（图 2）。

3. 导热链接与热屏蔽

他们更改了原有设计与冷指的连接方式，在样品外围增加了内外两层热屏蔽罩（图 2），并将小扫描管和针尖包裹于其中，进一步降低外界热辐射的影响。

4. 将 SEM 替换为光学显微镜

为了对样品进行无损观察，他们将原设计所使用的 SEM 替换为一台长焦距的光学显微镜（分辨率为 1.1 微米），并为其设计了一部移动支撑台（图 3），可以实现对纳米结构快速高效地“定位”。

经过此次彻底改造，该四探针系统在原子级别成像（图 4）、降温能力以及输运测试（图 5）稳定性方面的性能得到了根本性的提升。这种双扫描管联动扫描机制，可以同时实现大范围的针尖定位和高扫描精度，使之成为了具有鲜明特色微纳体系的表征和物性测量平台。在针对绝缘衬底上样品的输运测量中，他们提出了以针尖与栅极之间电容信号作为反馈的进针机制，解决了 STM 系统无法利用隧穿电流进行反馈的难题。目前，他们物理所仪器专项的资助下正在研发一套“分时复控电路单元”，将为多探针 SPM 系统提供低成本的分时控制解决方案，进一步发挥该系统的特色和优势。

相关仪器装备彻底改造及其建设的工作发表在近期的《科学仪器评论》杂志上【*Review of Scientific Instruments*, 88(6):063704, 2017】上。

该工作得到了科技部（2013YQ1203451）、国家自然科学基金委（61474141, 61674170）和中国科学院的资助。

相关工作链接：

<http://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4986466>

图注：

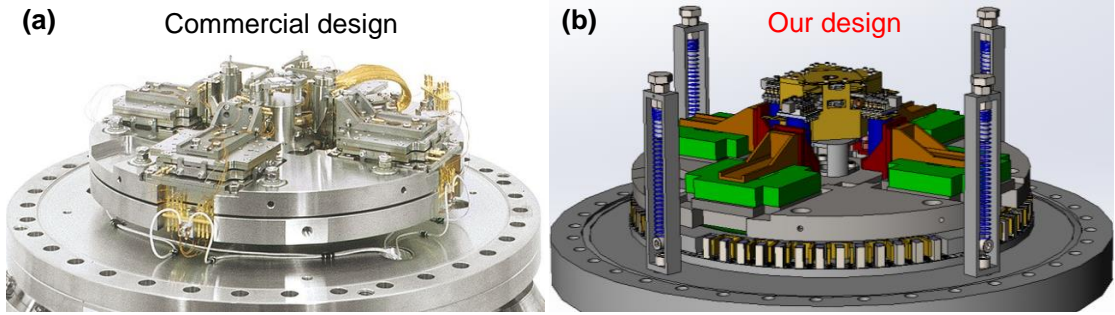


图 1. 原商用系统 (a) 与升级方案 (b) 中 STM 核心部件的比较。

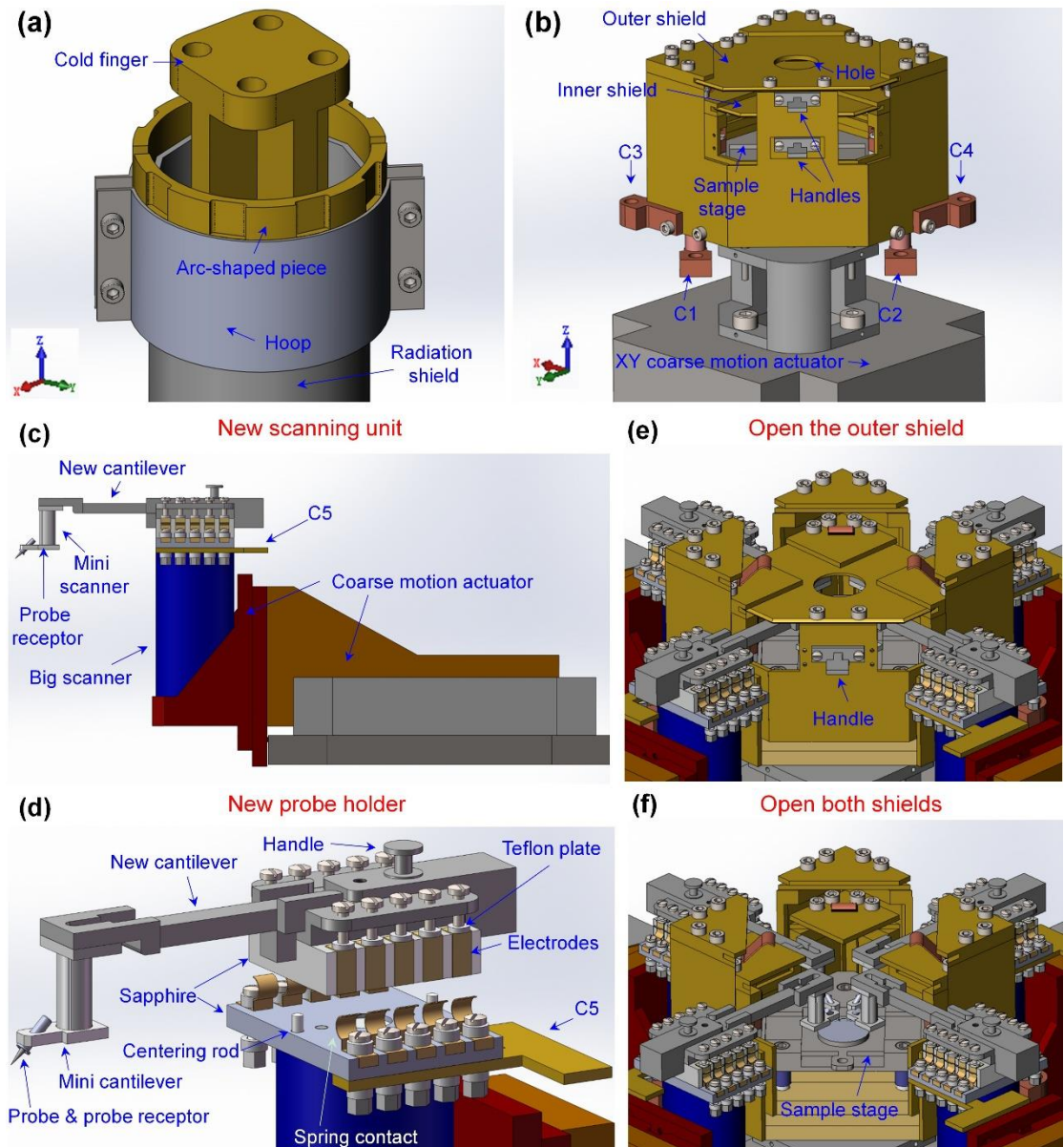


图 2. 降温和扫描机构的设计。(a) 连续流冷指处的设计；(b) 热屏蔽罩的设计；(c) 扫描机构的设计，大小扫描管可以独立进行 XYZ 方向的扫描；(d) 新针尖座处的设计；(e)，(f) 更换样品与针尖示意图，过程中需要利用机械手将内外屏蔽罩以此打开。

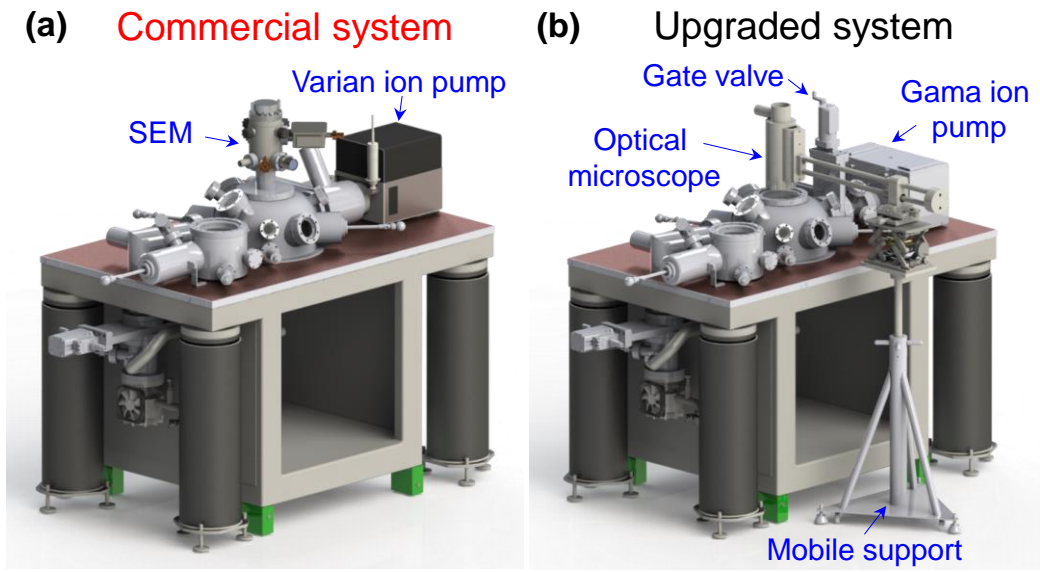


图 3. 原商用系统 (a) 与升级方案 (b) 中系统外观的比较。商用设备中 SEM 被替换为一部长工作距离光学显微镜

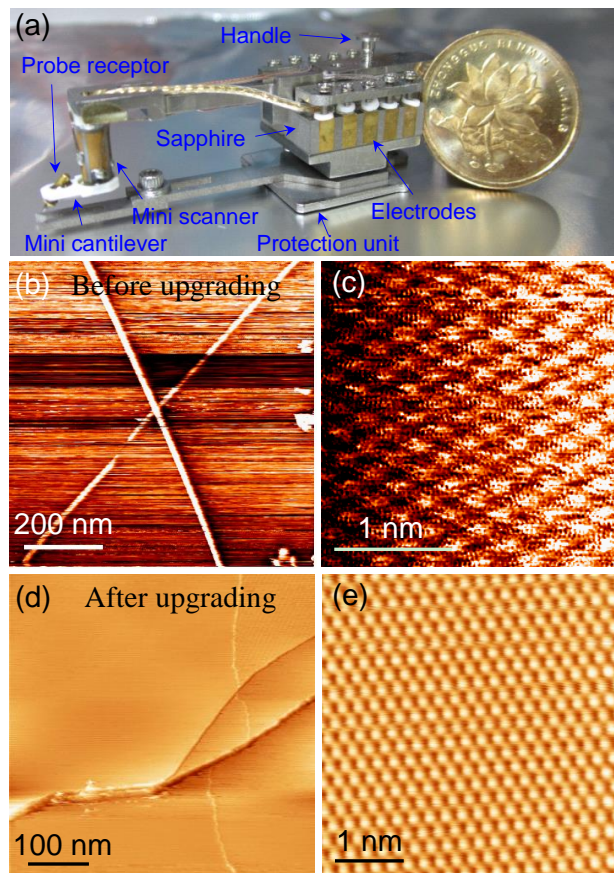


图 4. 改造前后 STM 扫描测试。(a) 新针尖座的光学照片。b-e: 改造之前 HOPG 上硼纳

米线的 STM 图像 (b)、改造之前, 在春节期间年初二凌晨 2 点钟得到的 HOPG 的原子分辨 STM 图像(其它时间均得不到原子分辨的 STM 图像)。(c)、改造之后 HOPG 的 STM 图像 (d)、改造之后 HOPG 的原子分辨 STM 图像 (e)。

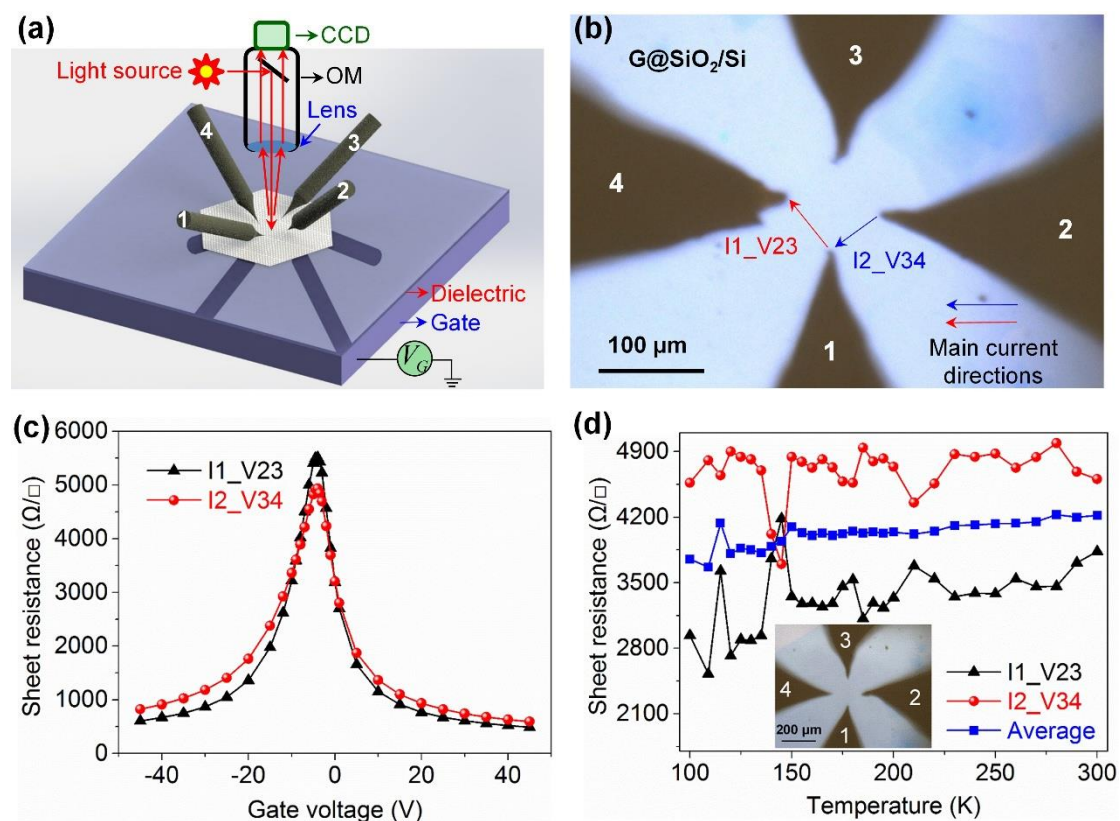


图 5. 改造后四探针法输运测试。(a) 升级后系统输运测试示意图。(b) 四探针法测量石墨烯输运性质时的光学显微照片。(c) 室温时不同栅压下石墨烯的二维电阻。(d) 100~300 K 石墨烯的二维电阻。