

文章编号:1000-582X(2004)10-0048-04

高精度 IPC-205B 型扫描隧道显微镜的设计及应用*

辛洪政,彭光含,杨学恒

(重庆大学 数理学院,重庆 400030)

摘要:为提高 STM 的工作效率、解决原始图象难于理解的问题,在一种 STM 新机型中对硬件设计和软件配备进行了改进。通过引入自动进车、自动停车与锁定装置,实现了进入隧道状态的半自动化。通过借用 A/D 转换卡的倒 T 电阻网络,实现了程控快速扫描。配备了独立开发的专用软件用于图象处理,应用此软件处理获得的扫描图象,可以更精确、更形象、更直观的获取样品表面信息。把典型样品的扫描图象与已有知识和已确认的结果比较,可以判断出新机型的分辨本领为:横向 0.1 nm,纵向 0.01 nm。给出了用该机型获得的几种样品的扫描图象。

关键词:扫描隧道显微镜;硬件设计;半自动;图象处理

中图分类号: O562.2

文献标识码: A

纳米科技是当前科技生活中的热点之一,STM (Scanning Tunneling Microscope) 作为检测工具在这一领域有着广泛的应用,如微机械制造(纳米级定位、传动和加工)^[1]、材料学(观察材料微观结构、判断其性质)^[2-3]、生物医学(观察生物样品的微结构、变化)^[4]、化学(观察分子在化学过程中的变化)等。相对于其应用的报道而言,关于 STM 的系统设计的报道并不多见。通常 STM 进入隧道状态要花费很多时间,而扫描获得的原始图象不易理解。

1 原理

所有扫描隧道显微镜的工作原理都是量子隧道效应^[5],即:电子可以以一定几率穿过绝缘空间,这些穿过来的电子宏观表现为穿越绝缘空间的电流——隧道电流。研究表明关于隧道电流 I 有如下关系:

$$I \propto V \exp(-2Kd), K \propto \frac{2\pi}{h \sqrt{2m\psi}} \quad (1)$$

其中, ψ 为局部有效功函数, m 为电子质量, h 为普朗克常数, V 为加在探针与样品间的偏压, d 为探针针尖与样品间的间距。在典型条件下, $K = 10/\text{nm}$, 也就是说,若维持其他条件不变,将探针与样品间的间距 d 减少 0.1 nm, I 将增加一个量级。显然,若维持 V 与

I 不变,当探针沿样品表面扫描时,探针必须随样品表面的起伏而上下移动,把这种移动记录下来就可得到样品表面形貌;若维持 V 不变,当探针以恒定高度沿样品表面扫描时,隧道电流 I 会随针尖与样品间距的变化而变化,把这种变化记录下来同样可以推得样品表面形貌。这就是扫描隧道显微镜的 2 种工作方式,前者称为恒流方式,后者称为恒高方式。

2 系统设计

IPC-205B 型机具有半自动的工作能力,由镜体、数据采集系统、步进及扫描驱动系统和计算机工作站组成^[6]。镜体完成进车、停车、退车以及扫描等动作;数据采集系统把隧道电流 I 、偏压 V 以及探针状态处理后送入计算机(其中探针状态取决于固定探针的压电陶瓷管的状态,包括平行于扫描面方向的偏转和垂直于扫描面方向的伸缩);步进及扫描驱动系统控制镜体完成扫描工作;计算机工作站设定各种工作参数,记录并处理数据。

2.1 镜体的设计

镜体是 STM 工作的执行部分,具有 X 、 Y 、 Z 三向步进能力,同时又有 x 、 y 、 z 三向扫描能力,分别由 3 个

* 收稿日期:2004-04-03

作者简介:辛洪政(1979-),男,山东海阳人,重庆大学硕士研究生,主要从事扫描隧道显微镜和工业计算机断层扫描成像技术研究。

步进电机和 1 个压电陶瓷管实现。为了保证进入隧道状态时探针与样品间的接近速度足够低, Z 向步进系统包含有高精度的减速机构。为保证 STM 的高分辨率, 要求针尖为单原子, 即隧道电流在单原子与样品间产生。显然, 要将压电陶瓷与探针间的漏电流降低到 1 nA 以下。压电陶瓷是实现扫描的核心器件, 应根据所需的扫描范围选取压电参数, 保证在满量程内线性扫描; 应该注意其本征频率值, 为防止共振, 扫描时工作频率必须远离本征频率值一个数量级以上。在工作时必须采取一定的隔振措施。采用了三簧悬挂的方法, 用较重的可密闭的桶作为封闭条件, 并要求镜体必须置于光学平台上以达到隔振目的。

2.2 数据采集系统的设计

图 1 是数据采集系统框图。包括有前置放大器、高低通滤波器、误差放大器、预置保护和图象信号处理电路等。

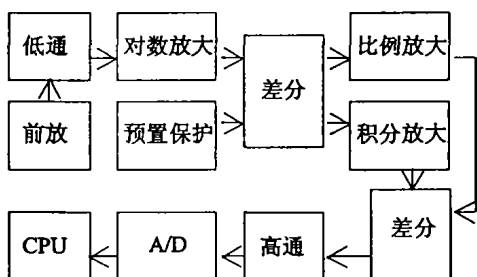


图 1 数据采集系统框图

STM 可以设置的扫描范围变化很大, 从 1 nm 到几千 nm, 扫描点通常为 256×256 , 因而有用信息的频率变化较大, 要在不同扫描范围都获得较好图像, 必须对应选取相应的低通、高通通道。IPC-205B 型机可以在计算机工作站上设定、更改所选通道, 即通过预先定义, 按一定的编码方式选通不同的低通、高通通道。

通常 STM 中采用折线压缩代替对数压缩, 在小范围内这种近似尚能接受, 但在大范围扫描时, 由于样品表面起伏较大, 效果不太理想。采用比例放大与对数放大联用效果更优, 既可以清除静态误差、提高响应速度, 又加强了有用的信号。

2.3 步进及扫描驱动系统的设计

该系统分为步进驱动和扫描驱动两个子系统。步进驱动系统完成从非隧道状态到隧道状态的逼近; 扫描驱动系统完成对样品的扫描。

2.3.1 步进驱动系统的设计

步进驱动分为 X、Y、Z 3 个方向, X、Y 方向是使样品在平行于扫描面内相对移动, 以便于选择扫描区域; Z 方向是把探针与样品间距由肉眼判断的 0.1 mm 级缩短到进入隧道状态为止。3 个方向均为手动、自动

两种选择, 自动挡又有从低到高 8 个速度档位。

Z 向进车是 STM 工作的关键步骤之一。显然, 步进步幅不能太大, 因为单步幅度太大, 系统就会出现要么不进入隧道状态, 要么就撞车的状态。步幅小就必然带来一个进车时间太长的问题。可以根据观察到的探针与样品间的间距, 适当地从高到低选择 Z 向速度档位和安排进车时间, 这样就可以缩短进车时间。另外, 当探针与样品间距缩短到进入隧道状态时, 通过比较电路系统会得出自动停车信号, 此信号通过处理电路后, 控制所有的步进电机停车, 这就可以避免因探针与样品过于接近而撞针。此时, 自动进车档被锁定, 不能继续自动进车。为了能够更深地进入状态, 即使探针与样品间距继续缩小, 可以用手动档进行逐步的进车。

2.3.2 扫描驱动系统设计

STM 扫描是以点扫描为基础的, 每一幅图像所包含点的个数为 256×256 。这么多工作点, 必须采用程控方式工作才行。先由程序控制计算机发出数字信号, 然后通过 D/A 卡变换成模拟信号, 再由电位器分压, 最后由后处理电路输出所需的扫描电压。当压电陶瓷的压电参数为 1 nm/50 mV 时, 为确保 STM 的横向精度, 扫描电压精度应为 5 mV, 如 D/A 卡变换的输出电压范围为 5 000 mV, 则 D/A 卡的精度不能少于 10 位。一般电位器难以达到如此精度, 为克服这一困难, 采取了借用 D/A 转换卡的倒 T 电阻网络的方法。扫描驱动电路如图 2, 其中第 2 个 D/A 卡的电阻网络是被借用为电位器的。

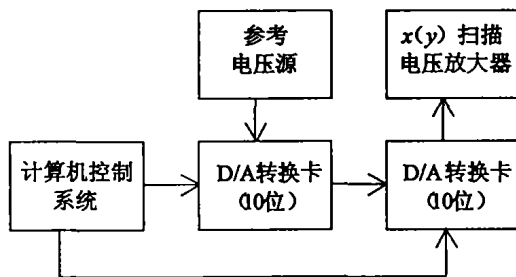


图 2 扫描驱动电路

由于扫描的动态范围为 40 dB, 并且要求全程线性, 这对扫描电压的处理电路要求十分苛刻。设计电路必须慎重, 并选择优良器件, 以保证提供符合要求的驱动电压。

2.4 计算机工作站

IPC-205B 型机的计算机工作站为工业控制计算机。工作站是实现软硬结合、达到能化半自动工作的关键部分, 首先考虑的是稳定性, 在此基础上考虑速度和其他性能指标。完成的任务是: 通过程序给扫描驱

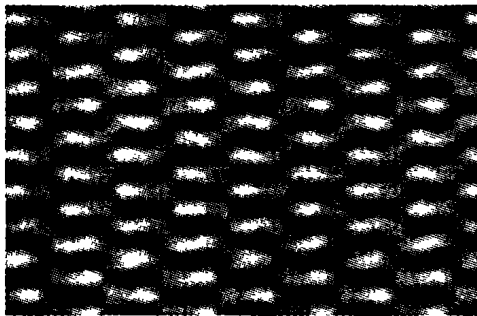
动系统发指令,完成自动扫描;设定一些参数,控制进入状态深浅和扫描的速度快慢与范围大小;监视仪器运行的稳定情况;完成对扫描结果的分析与处理。

3 图象处理与仪器定标

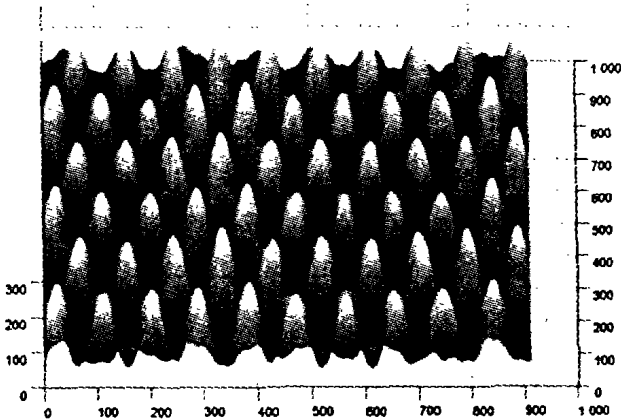
为了能够精确、形象、直观地获取样品表面信息,需要对原始的16位灰度图进行处理。首先,要把那些由于扰动而引入的杂乱信号去除,即去斑,是一种低滤波操作;其次,为了整体了解样品表面信息,需要把过于丰富的细节弱化,即平滑,是一种模糊处理;最后,把处理好的图像进行三维重建,就可以得到形象而直观的表面形貌图。

为了方便用户,IPC-205B型机配有用于图像处理的专用软件。专用软件更好的结合了STM图像处理的特点,能够根据原始数据和运行参数可以确定扫描范围的实际大小,也可以确定扫描范围内任一点的相对高度,还可以确定扫描范围内任两点的间距。专用软件具有专业性强、易学、易用、升级方便等特点。

图3是有序石墨的原始图和处理好的图。显然,经过处理后的图象很形象、直观。有序石墨样品是对STM进行定标的最优选择,根据固体物理知识,并与国外已有结果比较可以得出仪器的分辨本领确为:横向0.1 nm;纵向0.01 nm。



(a) 有序石墨原始图



(b) 处理好的有序石墨图

图3 有序石墨

4 应用与展望

STM广泛应用于纳米医学与生物学、纳米材料学、表面分析等领域。IPC-205B型先后测量了核酸、双键核酸、病毒等生物样品;测量了 TiO_2 、 CaCO_3 、金刚石等纳米粉;测量了钴铂薄膜、碳化钨薄膜、激光处理钢表面等。用户对结果非常满意。

图4为测得的双键核酸的图象,通过比较就会发现其典型结构;图5为测得的镍薄膜的图象,与其他薄膜样品类比,得出结论:薄膜材料存在岛状结构。

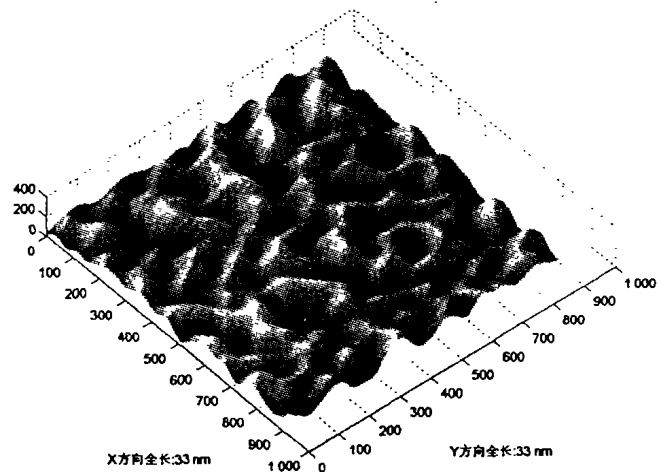


图4 双键核酸

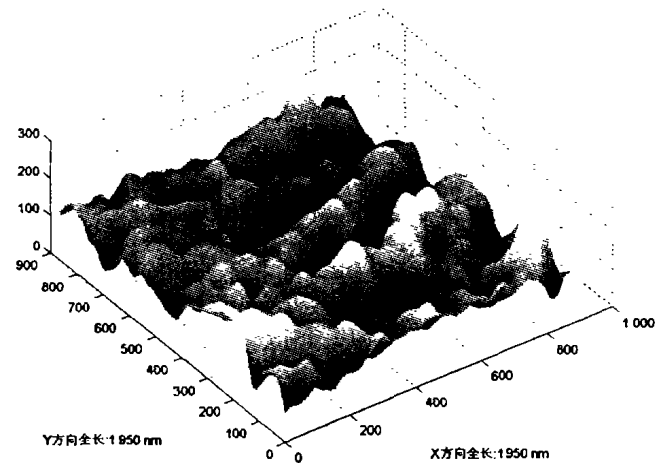


图5 镍薄膜

Z向初始位置是以手动方式达到,凭肉眼观察来判断距离,判断往往不准。观测值比实际值小时,造成进车时间过长,降低了工作效率;观测值比实际值大时,会造成探针以较快速度进入状态,不易控制进入状态的深度。以后可以考虑结合测距系统来消除肉眼观察的不便,并借此实现程控进车、退车,进一步提高自动化程度。若与低温、真空设备结合,还可以实现纳米级定位、加工。

参考文献:

- [1] 刘安伟, 吉贵军. 扫描隧道显微镜电压脉冲法加工产生纳米结构的研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(4): 320 - 324.
- [2] QIU X, SHANG G, WANG C, et al. Use of Ballistic Electron Emission Microscopy to Observe the Diversity of Fabricated Nanometer Features at the Au/Si interface[J]. Appl Phys A, 1998, 66(S): 91 - 94.
- [3] WANG C, LI X D, SHANG G Y. Threshold Behavior of Nanometer Scale Fabrication Process Using Scanning Tunneling Microscope[J]. J Appl Phys, 1997, 81(3): 1 227 - 1 230.
- [4] MURALI S, ASHAVANI K, SUWARNA D, et al. DNA-mediated Electrostatic Assembly of Gold Nanoparticles Into Linear Arrays by a Simple Drop-coating Procedure[J]. Appl. Phys. Lett, 2001, 78(19): 2 943 - 2 945.
- [5] 白春礼. 扫描隧道显微术及其应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992.
- [6] 杨学恒, 陈安, 何光宏, 等. 扫描隧道显微镜系统[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2001, 24(3): 137 - 141.

Design and Application of a New-style High Resolving Capability Scanning Tunneling Microscope

XIN Hong-zheng, PENG Guang-han, YANG Xue-heng

(College of Mathematics and Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A new-style STM is presented. With its automatic advancing, braking and locking devices, it can achieve the tunneling state semi-automatically. Scanning programmed makes it work more quickly. A special software is used to manipulate the images. This gives us a better way to know the information of the surface of the specimen. By comparing typical images obtained with the acknowledged ones, its resolving capability given transverse is 0.1 nm, and vertical is 0.01 nm. Several images are given as samples.

Key words: STM; hardware design; semi-automation; image manipulation

(编辑 吕赛英)