

扫描隧道显微镜扫描模式研究*

傅星, 魏小雷, 胡小唐

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在对扫描隧道显微镜模式研究的基础上, 首次提出“符合扫描”模式, 不但从理论上消除了原有扫描模式带来的测量误差, 而且还使测量速度提高了70%。这种模式可以应用于几乎所有扫描探针显微镜仪器的Z轴反馈控制, 对原子量级信息读取速度和精度的提高具有重要意义。

关键词: 扫描隧道显微镜; 扫描探针显微镜; 扫描模式; 符合扫描

中图分类号: TN 16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0493-2137(2001)03-0316-03

扫描隧道显微镜 STM (scanning tunneling microscope) 根据检测方式的不同, 可以分为恒高法检测和恒流法检测^[1]。恒高法仅适用于相对平滑的样品表面, 恒流法可以高精度地测量不规则的表面。在实际应用中, 被测样品表面形貌是未知的。一般来说在样品表面的凸、凹变化超过 10 nm 时, 如果要保证探针不与凸起部分碰撞, 那么在凹陷的部位就形成不了隧道电流, 这就基本限制了恒高法的应用。因此恒流法是目前该类仪器中使用的主要方法。本文以恒流法为研究对象, 论述“符合扫描”模式的作用。

通常的扫描模式是一种基于时间的模式, 一般设有两种扫描速度, 慢速扫描(通常为 2 Hz)和快速扫描(通常为 10 Hz)。样品表面的凸、凹变化较大时, 要减小图像的失真, 就要用慢速扫描。由于表面形貌未知, 早期的 STM 大都使用慢速扫描。典型的 STM 的扫描范围从几个 nm 到 100 μm , 每行的数据点为 64 至 512 (有些系统达到 1 024), 通常扫描区域为正方形, 总的的数据点数为 64 \times 64~ 512 \times 512 (或 1 024 \times 1 024), 即 4 096~ 262 144 (1 048 576) 点。这样, 扫描时间为 32~ 256 s (或 512 s), STM 的应用受到限制。后来有了一种改进的方案, 就是在做直线扫描时用高速, 在转向处使用慢速, 克服转向时带来的检测误差。在最近的报道中^[2], 有一种改进的称为“适应扫描”方案, 在检测系统检测到形貌的突变时, 自动将扫描速率降为

2 Hz, 相对平坦的部分扫描速度提高到 10 Hz。据称, 这种技术在维持陡峭样品表面适当的测量精度的同时, 还使扫描速度有了较大提高。

现有的恒流法扫描模式有两个缺点: 一是当扫描器扫到某点时, 即使隧道电流等于电流设定值, 扫描器还是要等待一个固定的时间后再进行下一点的扫描, 这是使扫描时间增加的原因; 二是当扫描器扫到某点时, 如果隧道电流不等于电流设定值, 扫描器在等待一个固定时间后, 不论隧道电流值是否等于电流设定值, 便进行下一点的扫描, 使得该点数据为一虚假数据。

1 符合扫描模式

本文提出一种新的扫描模式, 可以称其为“符合扫描”模式, 描述如下: X, Y 扫描器的扫描运动不再受时间的控制, 而是受隧道电流检测与电流设定值比较电路产生的“符合”信号控制。符合信号是在隧道电流等于电流设定值时产生的。

符合扫描模式克服了现有恒流法扫描模式的缺点。当扫描器扫描到某点时, 如果隧道电流等于设定值, 则扫描器快速进行下一点扫描; 隧道电流不等于设定值, 扫描器要等到两者相等时才进行下一点扫描。这样既缩短了测量时间, 又保证了测量精度。

具体调节流程参看图 1。

* 收稿日期: 2000-05-16; 修回日期: 2000-12-14

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(983800411)。

作者简介: 傅星(1957-), 男, 博士, 副教授

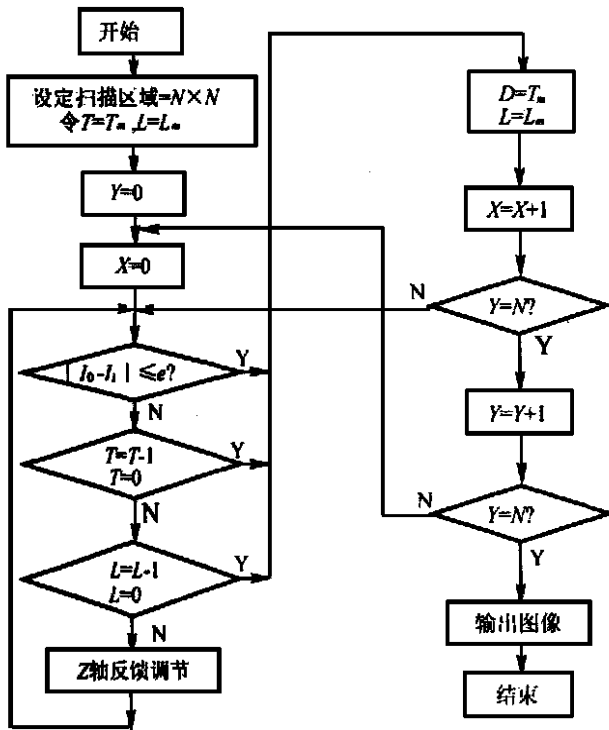


图1 符合扫描流程

Fig 1 Flowchart of coincidence scanning

2 Z 轴反馈调节

探针高度的调节是由控制电路根据一定的控制算法输出控制信号,用这个信号改变施加在压电陶瓷上的电压,使压电陶瓷的位移变化,这就使固定在压电陶瓷上的探针高度随之变化,而样品保持不动,因此探针与样品之间的距离就改变了。由于压电陶瓷的非线性,使得施加电场与电位移之间没有确定的对应关系,解决的方法有软件修正、硬件补偿、闭环反馈法。实践表明,软件修正和硬件补偿均不能完全消除非线性误差,而闭环反馈法可以消除这种误差。

通常 STM 采用 PD (或 PI) 算法做闭环调节。PD 算法是自动控制中最常用的调节算法之一,它通常具有的形式为

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

压电陶瓷 PD 调节的过渡过程曲线如图 2。

从图中可以看出,PD 算法的调节在稳定到设定值前通常有两三个调节周期的振荡。当然,通过调节参数的整定可以得到改善,特别是在对象的变化较平稳时,这种振荡的幅度可以整定得很小,但在对象变化无规律时,参数的整定就很困难。

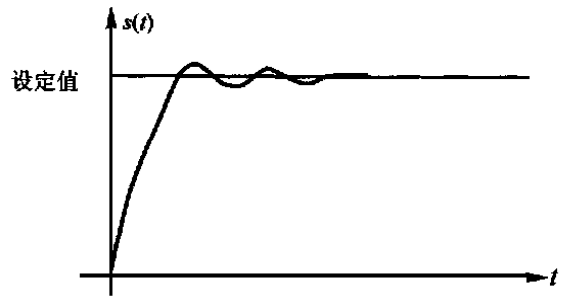


图2 压电陶瓷 PD 过渡过程

Fig 2 PD control

本文在探针高度的调节算法中,应用解决非线性控制的有力工具——模糊调节算法,得到了较好的调节效果。模糊控制的基本方法是将操作者的经验总结成若干条规则(称为模糊控制规则),经过模糊数学处理,存放到计算机中;另外模仿人脑的推理过程来确定推理规则,计算机根据输入的推理过程来确定推理规则,并根据输入的信息,按照模糊控制规则和模糊推理规则,作出相应的模糊决策,完成控制动作。

经过参数的选择和调节参数的整定,确定模糊调节参数和模糊控制表,使得调节参量值在一个(或两个)调节周期内即达到设定值,明显地提高了调节速度,同时也改善了调节精度。

模糊调节过渡过程曲线如图 3。

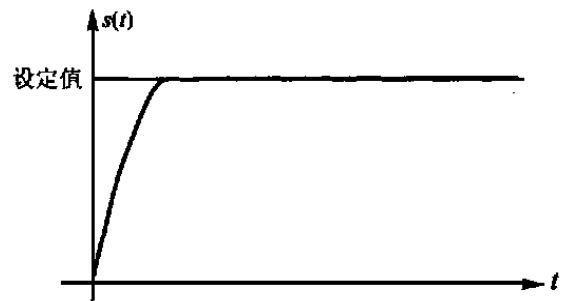


图3 模糊控制过渡过程

Fig 3 Fuzzy control

3 实验

在 CSTM-9000 型 STM 仪器上用这种模式做了测量实验。考虑到驱动电源和压电陶瓷的响应时间,实验设定调节周期为 100 μs(A/D 转换时间 2 μs,D/A 转换时间 1 μs)。在对同一石墨样品的同一区域(1 μm × 1 μm)采样实验中,比较原系统与新扫描模式的扫描时间,结果见图 4(对同一区域,保持探针与样品不动,用原系统和新的扫描模式交替扫描 5 次,用原系

统扫描时间的平均值 T_1 代表原系统用时, 用新扫描模

式所用时间的平均值 T_2 代表新模式用时)



(a) 原模式

(b) 新扫描模式

扫描范围 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 采样点 180×180 结果 $T_1 = 40.6 \text{ s}$

扫描范围 $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 采样点 180×180 结果 $T_2 = 15.1 \text{ s}$

图4 扫描图

Fig 4 Scanning image

实验表明, 新的扫描模式比原有扫描模式的检测速度快了近 2 倍. 图像质量也有所改善. 在实验中, 还解决了两个实际出现的问题:

1) 样品有严重缺陷. 这时, 可能出现隧道电流始终达不到设定值(或消失)的情况, 造成扫描器不能正常工作. 解决方法是增加判别信号: 一是时间信号, 如果在预定时间 T_m 内, 隧道电流还不等于设定值, 就认为是缺陷, 跳过这一点进行下一点扫描; 二是 Z 轴移动的距离, 如果 Z 轴移动了一个足够大的距离后, 隧道电流还不等于设定值, 就移到下一点继续扫描.

2) 符合信号的判断标准. 有时, 要达到隧道电流等于电流设定值需花相当时间. 本文在测量中设置了一个误差限 $e > 0$, 当隧道电流与电流设定值的差的绝对值 $< e$ 时, 为符合, 并用两者差值对显像进行修正.

本文所述的符合扫描模式不仅适用于 STM, 而且适用于 A FM (atomic force microscope 原子力显微镜) 等几乎所有 SPM (scanning probe microscope 扫描探针显微镜) 仪器的 Z 轴反馈控制. 这种扫描模式对 STM 的测量精度和速度的提高, 特别是对 STM 仪器从观测型向测量型的转变具有重要的意义.

参考文献:

- [1] Kuk Y, Silverman P J. Scanning tunneling microscope instrumentation [J]. Review of Science Instruments, 1989, (2): 120- 125.
- [2] Technique & Technologies for Scanning Probe Microscopy [Z]. Park Scientific Instruments, 1997.

STUDY ON SCANNING MODE OF SCANNING TUNNELING MICROSCOPE

FU Xing, WEI Xiao-lei, HU Xiao-tang

(State Key Lab. of Precision Measurement Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract Based on the study on the scanning mode of STM, the "Coincidence Scanning Mode" is described in this paper. This mode can not only avoid the error in theory of probe but also reduce the scanning time by 70%. It can be applied almost in the feedback control of Z -axis of all SPM instruments. It is very important to recognize atoms accurately and speedily.

Keywords: STM; SPM; scanning mode; coincidence scanning