

惯性步进扫描器控制接口的设计^{*}

杜贤算, 喜冬

(中山大学物理科学与工程技术学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 介绍了一种采用惯性步进型扫描器的新型扫描隧道显微镜 (STM) 的设计, 研制出了一种用于该扫描器的接口电路。文章重点对该扫描器的位置粗调驱动电路和隧道电流前置放大电路等接口进行了设计, 并完成了该接口的制作和调试, 最后在使用该接口电路的新型 STM 上扫描出具有较高分辨率的镀金铜的表面形貌。测试表明, 该接口工作稳定, 使用方便, 并能发挥该惯性步进型扫描器高稳定性的优点。

关键词: 扫描隧道显微镜; 惯性步进扫描器; 接口; 前置放大器

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2004) S1-0045-05

自第一台扫描隧道显微镜 (STM) 诞生后, STM 在各国得到了很大发展并商品化。但商品化 STM 往往功能有限, 机械稳定性不好, 难以满足特定领域的研究需求。

为了满足实验研究需要高稳定性 STM 的目的, 我们研究组从 RHK 公司引进了一台惯性步进型扫描器, 它具有很高的机械稳定性。结合我们自己研制的控制系统, 我们最终建立起适合我们实验研究用途的、具有高稳定性的新型 STM。

1 惯性步进型扫描器的工作原理

惯性步进型扫描器如图 1 所示, 它由 4 个完全等同的压电管组成。外围是 3 只等边三角形分布的“脚”; 而中心的压电管固定探针。样品圆台平分为 3 段, 每段都成一个角度完全相同的螺旋上升的斜坡。工作时扫描器的 3 个“脚”就分别踏在这 3 个斜坡上。

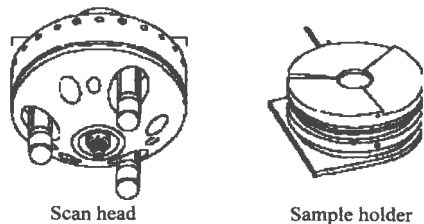


图 1 RHK STM 扫描器

Fig 1 RHK STM scanner

扫描器能实现粗调、细调和扫描功能。粗调是指驱动探针相对样品作较大距离的移动, 它步进移

动超过压电驱动的全程。而细调是控制探针在压电驱动范围内的精确定位。

扫描器的粗调原理如下。每个压电管外表面均分为 $+x$ 、 $-x$ 、 $+y$ 和 $-y$ 四个电极。当沿 $+x$ 轴粗调步进时, 锯齿波信号 (如图 2 的 A) 只加到 3 个“脚”的 $+x$ 电极上。在锯齿波缓慢变化的上升沿, 压电管沿 $+x$ 方向弯曲, 同时带动整个扫描器向 $+x$ 方向移动; 在锯齿波迅速下降时, 3 个压电管迅速回缩, 而金属体部分由于惯性保持静止不动, 这样, 扫描器就向 $+x$ 方向移动了一步。当加反相的锯齿波 (如图 2 的 B) 时, 扫描器向 $-x$ 方向移动。 y 轴步进原理一样, 而沿 z 轴步进时, 锯齿波信号分别加在 3 个“脚”各电极上的电压, 刚好使压电管沿着它们在样品圆台位置的切线方向弯曲步进。由于样品台是螺旋上升的斜坡结构, 每个“脚”切线移动的结果, 就带动了整个扫描器围绕中心螺旋升降。

扫描器的细调原理如下: 当探针距离样品小于 1 nm 时, 在两者间施加电压, 就会有隧道电流产生。在恒流扫描模式下, 隧道电流经过反馈元件形成反馈信号, 控制中间扫描管 z 方向的伸缩, 从而实现细调并保持隧道电流等于一个设定的参考电流值。隧道电流的变化同时也反映出形貌的高低起伏。

2 惯性步进型扫描器控制接口的设计

2.1 扫描器的计算机控制及其接口

STM 工作的过程, 一方面是计算机系统产生控

* 收稿日期: 2004-03-20

基金项目: 广东省科技计划资助项目 (A10703, C60110); 广州市科技计划资助项目 (2003Z2-D2021)

作者简介: 杜贤算 (1980 年生), 男; 通讯联系人: 丁喜冬; E-mail: stdp38@zsu.edu.cn

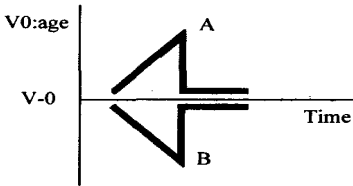


图 2 锯齿波信号
Fig 2 Sawtooth shaped waveform signal

制信号 (粗调信号和扫描/细调信号), 经电子控制系统各模块处理后形成高压信号输入到扫描器, 控制扫描器粗调和扫描/细调的过程。另一方面, 是产生隧道电流, 经过前置放大, 再经电子控制系统进行处理送到计算机形成反馈信号的过程。

因此, 扫描器的工作直接体现在计算机对其的控制上, 而接口是实现控制的通道。具体的说, 扫描器的接口就是下面要说的粗调驱动接口、扫描控制接口和前置放大接口, 这里所说的接口是指接口电路。

2.2 粗调驱动接口设计及其要求

扫描器的粗调步进在锯齿波的驱动下实现, 而且步长和步程和施加的锯齿波粗调信号最大电压有关, 因此, 要实现粗调驱动并获得到较大的步进全程, 必须设计接口来形成锯齿波并高压放大。锯齿波由计算机系统模拟再经电子控制系统的 DA 电路处理形成, 而放大是经过一块高压放大电路。DA 接口电路我们组已经研制完成, 这里要设计的就是作放大功能的粗调驱动接口。

由于粗调步进的步长和步程与所加锯齿波的最大电压有关, 如何设计粗调驱动接口, 使锯齿波具有合适的斜率和最大电压, 驱动扫描器快速步进, 这是设计时需要考虑的问题。

2.3 扫描控制接口设计及其要求

STM 的扫描同样由锯齿波控制, 但基于我们采用的扫描器的特点, 从 DA 接口电路出来的锯齿波扫描信号还要先经过一个信号变换电路处理, 再高压放大后才能实现对扫描运动的控制。DA 接口及其之前电路我们已完成, 这里要设计的就是扫描控制接口, 实现信号的变换和高压放大。

在扫描时, 我们希望扫描器能提供大范围的高压扫描和小范围的较低压扫描两种方式, 因此, 如何设计扫描控制接口, 才能实现扫描管的大范围扫描和小范围扫描, 这是设计时需要考虑的问题。

2.4 前置放大接口设计及其要求

扫描器的细调是利用隧道电流形成反馈信号来控制, 而从探针来的隧道电流极其微弱, 不能直接

输送到反馈系统进行处理, 因此, 这里要设计一块前置放大接口, 把探头来的微弱电流高倍放大, 再送到系统处理。

由于隧道电流只有 nA 数量级, 微弱的噪声都可能就会造成致命的干扰, 因此, 如何设计前置放大电路, 使之具备很强的抗干扰能力, 这是设计时不能忽略的问题。

3 接口的电路设计

3.1 粗调驱动电路的设计

粗调驱动电路的功能是将 DA 接口电路传输过来的粗调控制信号 CS 进行高压放大, 形成高压粗调驱动信号, 控制扫描器的步进。

粗调驱动电路的结构示意图如图 3 所示。从 DA 接口来的粗调控制信号先经过粗调驱动接口的滤波电路滤波处理, 再经过高压放大电路进行高压放大, 形成高压的粗调控制信号输出到扫描器三个“脚”上, 控制扫描器的粗调步进。

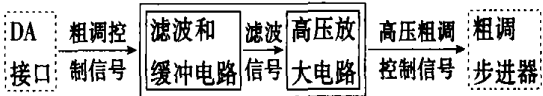


图 3 粗调驱动电路
Fig 3 Coarse regulation circuit

滤波电路由两个反相放大器 (OP27) 电路串连组成, 而高压放大电路的核心是一个高压放大器 PA85A, 它提供约 20 倍电压放大。

3.2 扫描控制电路的设计

扫描控制电路的功能是将底版传输过来的 x 、 y 、 z 控制信号进行信号变换并高压放大, 形成 x 、 y 、 z 三个方向的扫描控制信号。

扫描控制电路的结构示意图如图 4 所示。从 DA 接口来的 x 、 y 、 z 路控制信号先经过扫描控制接口的信号变换电路进行处理, 形成 $x-z$ 、 $y-z$ 、 $-x-z$ 和 $-y-z$ 四路信号。然后每路信号分别经过高压放大电路, 形成高压的 x 、 y 、 z 三个方向的扫描信号, 输出到扫描器中间的扫描管上。

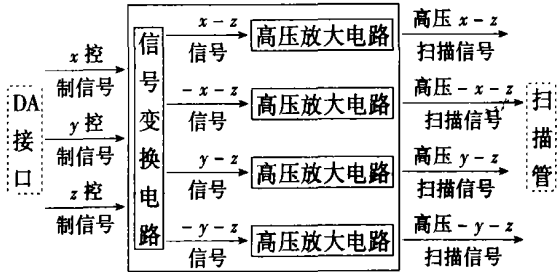


图 4 扫描控制电路
Fig 4 Scan-controlled circuit

信号变换电路由 7 个运算放大器 OP27 组成，其中 3 个作反相放大器，分别把 x 、 y 、 z 控制信号进行反相放大，形成 $-x$ 、 $-y$ 和 $-z$ 信号。 $-x$ 、 $-y$ 和 $-z$ 信号再分别经过两个差分输入放大

器和两个同相输入的加法电路进行运算，得到 $x-y-z$ 、 $y-z$ 、 $-x-z$ 和 $-y-z$ 四路信号。图 5 所示的便是其中的 $x-z$ 路信号变换电路，其他三路信号变换电路与此类似。

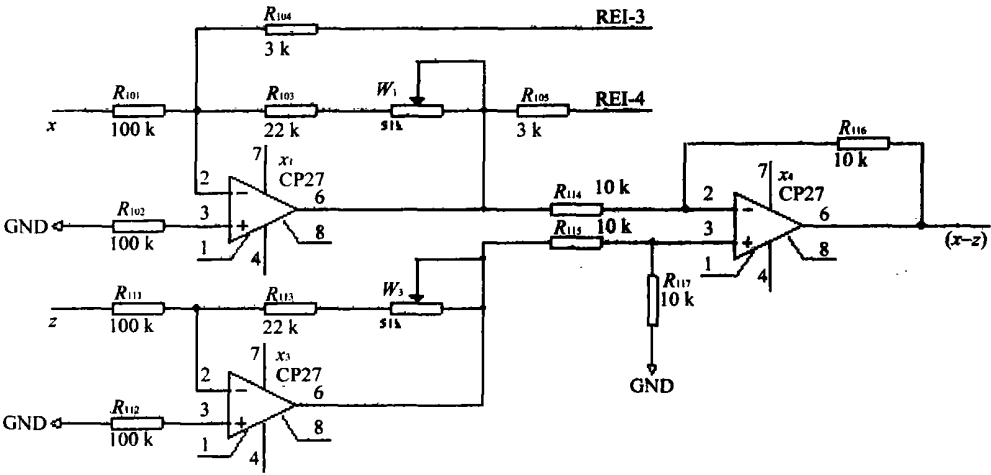


图 5 $x-z$ 路信号变换电路
Fig 5 $x-z$ signal-changed circuit

3.3 前置放大电路的设计

前置放大电路的主要功能是对微弱隧道电流放大，输出到反馈系统形成反馈信号。前置放大电路的结构示意图如图 6 所示。从探头来的隧道电流首先经过电流放大电路高倍放大，形成反相的隧道电流信号，然后再经过一个电压放大器反相处理，形成正相的隧道电流信号，输出到探头辅助接口。

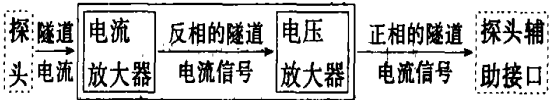


图 6 前置放大电路
Fig 6 Preamplifier circuit

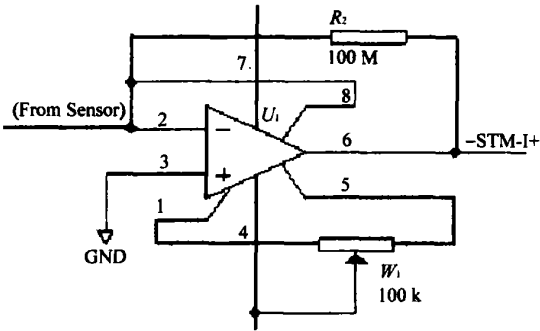


图 7 电流放大器电路
Fig 7 current amplifier circuit

隧道电流放大电路提供隧道电流的高倍放大，它的核心是一个高输入阻抗的极低电流放大器，它具有低漂移、高开环增益等特点，如图 7 所示。

电压放大电路的功能是把电流放大器放大的反相隧道电流再反相放大，形成正相的隧道电流信号输出。它的核心是一个 OP177 运算放大器，它有 4 个并联的反馈支路，可通过跳线选择 4 种不同的放大倍数： $\times 0.1$ 、 $\times 1$ 、 $\times 10$ 和 $\times 30$ 。如图 8 所示。

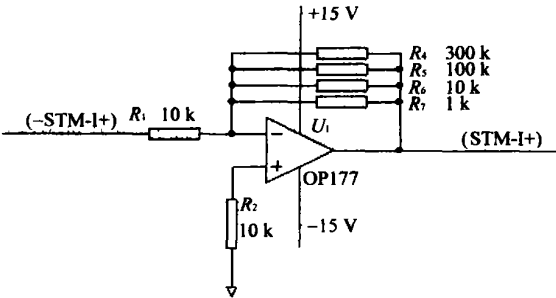


图 8 电压放大器
Fig 8 Voltage amplifier circuit

4 接口的制作

4.1 粗调驱动/扫描控制接口的制作

基于粗调驱动接口和扫描控制接口结构和功能相似的原因，还出于成本的考虑，两个接口做在同

一块 PCB 上，且按功能模块化设计制作，把高压放大器集中在一起，滤波电路和信号变换电路集中

到一模块上。

这样的布局,刚好与我们小组原来所做的扫描探针显微镜的一块接口布局相似,于是,在旧接口上改装,得到了我们需要的粗调驱动/扫描控制接口,如图 9 所示。

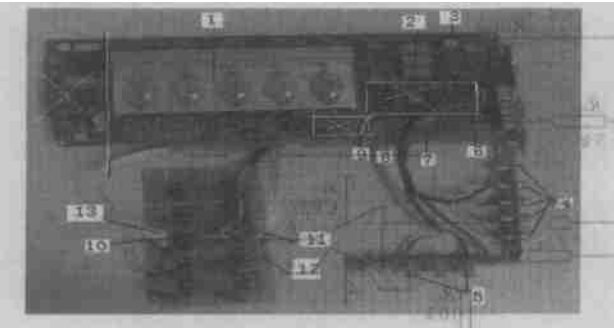


图 9 粗调驱动/扫描控制接口实照 (改装型)
Fig 9 Photo of coarse modulation& scan-controlled Interface

1. 高压放大部分, 包括 5 个高压放大管 PA85A 和相应的滤波电路;
2. 高压扫描和粗调继电器开关; 3. CS LED;
4. 扫描信号输出 BNC 接头;
5. 粗调 CS 信号输出 BNC 接头;
6. $\pm 15\text{ V}$ 和 GND 输入;
7. x 、 y 、 z 控制信号输入及插座;
8. $\pm 200\text{ V}$ 电源和 AGDN (200) 输入;
9. $\pm 5\text{ V}$ 电源和 GDN ($\pm 5\text{ V}$) 输入;
10. 滤波电路和信号变换电路模块, 包括 9 个 OP27 运算放大器和相应的 RC 滤波电路;
11. 从大板上连接进来的 $\pm 15\text{ V}$ 电源插座;
12. 从大板上连接过来的 x 、 y 、 z 控制信号输入插座;
13. 接到大板上去的 $x-z$ 、 $-x-z$ 、 $y-z$ 、 $-y-z$ 信号输出插座

4.2 前置放大接口的制作

出于提高电路抗干扰能力,减弱噪声的考虑,前置放大电路的电流放大器和电压放大器分开,前者采用金属盒屏蔽处理,提供 3 种方式的 $\pm 15\text{ V}$ 电源供电选择 (屏蔽盒内电池供电、屏蔽盒外电池供电和控制箱供电),并直接连接到探头的输出接口;后者放在控制箱里,前后通过屏蔽线连接,见图 10。

5 接口的测试

5.1 接口单独测试

测试方法:对前置放大接口,采用控制箱供电,零信号输入时测电路的噪声。对粗调驱动接口和扫描控制接口,控制计算机产生锯齿波输入,示波器检测输出,测最大电压输出。用信号发生器接接口输入,示波器检测输入输出,正弦波测噪声,



图 10 前置放大器及屏蔽盒实照
Fig 10 Photo of Preamplifier and shielded box

1. 屏蔽盒; 2. 电流放大器;
3. 隧道电流信号输入插座及其 BNC 接头;
4. 电源插座及其电源输入三芯屏蔽接头;
5. 反相隧道电流信号输出插座及其 BNC 接头;
6. 探针和样品间偏置电压输出插座及其与探头连接的 BNC 头;
7. 扩展用电源插座;
8. 连接探头辅助接口的插座及信号线;
9. 连接隧道电流放大电路的 DB9 接头;
10. 反相隧道电流信号输入插座;
11. 通过跳线有四种放大选择的反馈电路;
12. OP177 电压放大器;
13. RC 滤波电路;
14. 扩展用 9 芯插座;
15. $\pm 15\text{ V}$ 电源插座

方波测延时。

测试结果,如表 1 所示。

表 1 各接口 联机测试结果
Tab 1 The test result of each interface

接口	最大电压输出/V	延时/ μs	最大噪声峰峰值/ mV
前置放大接口	—	—	10
粗调驱动接口	± 130	1.5	5
扫描控制接口	± 100	3.2	5

结论:测试结果显示电路的主要技术参数达到设计要求。

5.2 接口联机调试

把整台 STM 搭建起来,运行控制软件。当控制扫描器前进时,样品台有“的的的…”密集的摩擦声音,同时可观察到扫描器缓慢的移动。控制扫描器后退时有同样的现象,这说明了粗调驱动接口工作正常。

把示波器用 3 口 BNC 接头连接到电流放大电路屏蔽盒的信号输出端,控制计算机产生一偏压加

在探针和样品间，把一导线两端分别接触到探针和样品台上，由于偏压存在，导线应该有电流。结果示波器上观察到了约 80 mV 的电流信号，这证明了前置放大接口工作正常。

5.3 新型 STM 整机调试

在样品台上放好镀金铜样品，在探针已逼近样品情况下，运行控制软件，调整合适参数进行扫描，结果，本 STM 扫描出了具有较高分辨率的镀金铜的表面形貌图（如图 11 所示）。

从图可见，图像特征明显，轮廓清晰，说明整个电路工作正常，仪器性能良好。但实验中也发现，新 STM 扫不出原子图象，外界振动对扫描的结果影响较大。

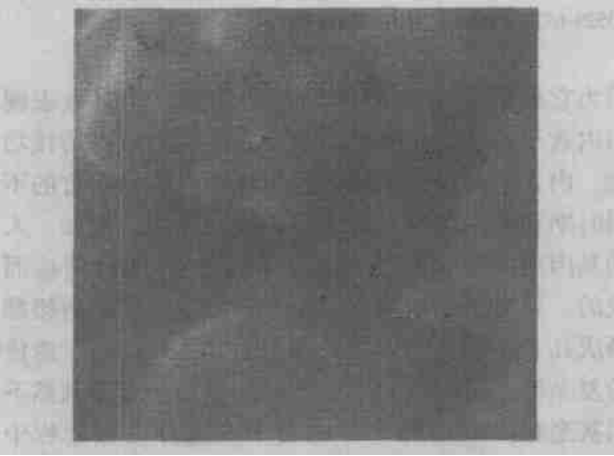


图 11 用新型 STM 扫描得到的镀金铜表面形貌图
Fig. 11 Surface picture of aumum plated copper scanned by the new STM
扫描范围: 50 nm× 50 nm

6 总结和讨论

采用惯性步进型扫描器，是提高 STM 稳定性的重要方法。我们所研制的惯性步进扫描器控制接口具有电路简洁、使用方便等优点。测试证明，接口工作稳定、性能可靠，且在整机调试中扫描出具有较高分辨率的镀金铜的表面形貌。和其他国产 STM 对同个样品在 50 nm× 50 nm 范围扫描得到的结果比较，研制的 STM 扫出的图像、形貌特征都更加明显。

但同时也发现，本 STM 扫描出来的原子图像不理想，对外界振动较为敏感，噪声也较大。RHK 扫描器具有很高的机械稳定性和热稳定性，它的精度优于 0.1 nm/min，理论上推测本 STM 的稳定性至少将比目前国内的 STM 高一个数量级，这说明我们尚没有完全发挥出扫描器的性能。对接口进一步研究分析并做改进，这是我们下一步工作。而本研究所做的接口由于工作稳定，使用方便，为进一步发挥该惯性步进型扫描器高稳定性的优点奠定了基础。

参考文献:

[1] [美 陈成均. 扫描隧道显微学引论[M] . 华中一，朱昂如，金晓峰, 译. 北京: 中国轻工业出版社, 1996.
[2] 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.
[3] RHK UHV 300 用户手册.
[4] HAMMICHE A, WEI Y, etc. The surrey STM: construction, development, and evaluation of scanning tunneling microscope [J] . Review of scientific instrments, 1991, 62(1).

The Design of the Control Interface of Inertially Stepped Scanner

DU Xian suan, DING Xi dong

(School of Physics Science and Engineering, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: This article will introduce the design of a new kind of scanning tunnng microscope (STM) which bases on the inertially stepped scanner, and it designs a type of interface for it. It mainly designs, manufactures and tests the coarse position regulator and the preamplifier of tunnel current. At last we get a surface picture of aumum plated copper scanned by the new STM, which integrated these interfaces. The test indicates that these interfaces can work steadily, and they are convenient to be used. They can also play an important role in the stability of the new STM.

Key words: scanning tunnng microscope (STM); inertially stepped scanner; interface; preamplifier