

开放式 SPM 控制系统的设计与实现*

丁喜冬^{1,2} 杨 森² 张进修^{1,2}

¹(光电材料与技术国家重点实验室 广州 510275)

²(中山大学物理学与工程技术学院 广州 510275)

摘要 本文设计并实现了一种新的扫描探针显微镜的开放式控制系统。该控制系统设计了灵活开放的总线接口,并对电路模块进行了优化,采取了一系列抗干扰措施,从而使之具备了接口开放、稳定性高等优点,特别适合于个性化的科学研究。本文所采用的开放式设计思想及总线接口的具体实现,对 SPM 的结构改进及商品化有一定的参考价值。

关键词 扫描探针显微镜 控制 开放式 总线接口

中图分类号 TN06 **文献标识码** A **国家标准学科分类代码** 510.1010

Design and realization of an exoteric control system for scanning probe microscope

Ding Xidong^{1,2} Yang Sen² Zhang Jinxiu^{1,2}

¹(The State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Guangzhou 510275, China)

²(School of Physics & Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract A new open control system for scanning probe microscope (SPM) was designed and implemented. Based on the structure of commercial SPM, a flexible and open bus interface was designed. The circuit modules were optimized and a series of anti-interference measures was adopted, so that open interface and high stable control system were realized. Variable needs of different researchers can be satisfied by this new SPM. The design idea of open control system and its implementation method are helpful for improving the structure of SPM and its commercialization.

Key words scanning probe microscope control exoteric bus interface

1 引 言

扫描探针显微镜(scanning probe microscope, SPM)^[1]以其高分辨率等突出优点在科学研究和工业领域中得到了非常广泛的应用,成为探索纳米微观世界的不可缺少的工具,并且已实现了商品化。但是,商品化 SPM 在科学研究领域的应用受到了一定的制约,因为绝大多数商品化 SPM 只具有常规的测量功能,难以满足个性化研究的需要。因此,在 SPM 领域,很多前沿的科学研究都只能在自行研制或改进的 SPM 上完成。通过对 SPM 进行改造,可以研制出具有特殊功能的 SPM,如在常规 SPM 上增加新的设备以实现联用,使 SPM 增加新

的功能^[2-3];或者替换原来 SPM 的探针等部件以探测特殊的物理化学性质,从而组装成新类型的 SPM^[4]。

如能以商品化 SPM 为基础完成所需 SPM 的研制,则新仪器研制的工作将大为简化。但是,受各种因素的影响,商品化 SPM 一般不开放系统的底层技术资源,也不具备开放式的体系结构;不同厂商生产的 SPM 往往互不兼容,用户可扩展的空间很小。这就使得以商品化 SPM 为基础来完成特殊 SPM 研制的设想难以实现。

近年来,以 SPM 技术为基础,我们开展了材料微区阻抗及介电特性等方面的研究工作^[5]。为了完成这些现有商用 SPM 所不具备的特殊物理性质的测量,自行研制了一套开放式、高稳定的 SPM 测量技术平台。该 SPM 测量技术平台不但具备了扫描隧道显微镜(STM)、原子

* 本文于 2005 年 12 月收到,系广东省(01-09080-4202372,2005A10703001)、广州市政关(2003Z2-D2021,2006Z3-D2071)资助项目。

力显微镜(AFM)等常见的SPM测量功能,而且由于其开放性,能够方便地进行改造升级以实现各种特殊的功能。后续的研究人员并不需要深入了解SPM测量技术平台的内部结构,只要按照开放接口的定义设计出必要的新模块,就能完成新的SPM测量,特别适于个性化的科学研究。

本文介绍本实验室新近研制成功的开放式SPM控制系统的设计与实现。

2 设计思想

SPM控制系统设计的关键是SPM总线的开放式接口设计。在设计SPM总线接口时首先要考虑对SPM的“通用”功能和“特殊”功能的适当划分:在功能模块化的基础上,对实现“通用”功能的硬件模块,封装在SPM总线以内,以简化总线接口;对于“特殊”功能则提供完备的接口,以方便硬件模块的扩展。

SPM控制系统的总设计思想是通过具有“标准”接口的SPM总线来实现较好的开放性、较高的稳定性以及对各种商品化SPM的兼容。

本文设计的SPM控制系统不但应当具备常规SPM的功能,更重要的是还应能够方便地完成新模块的添加,以实现新功能。最彻底的开放性实现方案是开放所有的资源和技术资料,但是这样不但带来知识产权保护的困难,而且在新功能的二次开发时需要了解所有的技术细节,难度和工作量都很大。SPM控制系统开放性的实现可以从PC的兼容性思想得到启发。参照PC的标准总线接口的做法,可以定义1套SPM总线的“标准”接口。SPM共用部分和基本功能可以做成模块,以总线接口的形式开放,各种特殊功能的扩展则可通过在SPM总线上添加各种新模块来实现。

通常SPM具有原子级高分辨率,测量的是非常微弱的信号,用于科学研究的SPM稳定性要求更高。因此,SPM控制系统需要采取严格的抗干扰措施,以减小来自周边设备的干扰,提高电路的稳定性。

SPM的测量环境由SPM的探头系统提供。作为研究型SPM的控制系统,应该尽可能与各种类型的SPM探头兼容,以便利用商品化SPM的探头系统的技术优势实现测量环境的迅速升级。

3 控制系统的设计

3.1 总体结构与功能

本文研制的SPM测量技术平台主要由探头系统、计算机系统、控制系统3部分组成。其中,探头系统主要包括探针、压电扫描管(PZT)、步进装置等,是SPM测量技

术平台的执行机构;计算机系统由计算机工作站、计算机接口及SPM实时控制软件等组成,提供人机交换的界面,实现对SPM测量的控制及数据的处理;控制系统则包含SPM的硬件电路,是SPM测量技术平台的关键部分,也是连接探头和计算机系统的桥梁。

为了满足控制系统的开放性要求,本文将控制系统分为SPM基本功能和特殊功能的扩展2个部分来设计。作为完成基本SPM功能的控制系统,其主要作用是:一方面将从探头来的信号进行运算和处理,提供给计算机系统;另一方面,将从计算机来的扫描和逼近等信号进行变换和放大以驱动扫描器工作,将电压偏置信号送到探头。SPM控制系统需要扩展的特殊功能则对于不同的应用可能会存在很大的差异,可通过在SPM总线上添加特殊的模块来实现。

通过对现有的商品化SPM的各组成部分的驱动控制方式及技术特点进行深入分析可知,SPM控制系统主要由4个功能模块组成:逼近装置、扫描控制、成像处理、反馈控制。按照将基本驱动控制封装在SPM总线之内、其余通过扩展总线上的模块来实现的设计思想,完成了各功能模块的设计。

3.2 逼近装置

SPM系统常用的逼近方式有步进马达、惯性步进、压电爬行等多种。商品化的SPM通常采用步进马达与扫描管相组合的形式,其中步进马达用来做垂直方向(z 方向)的位置粗调,扫描管用来做垂直方向的位置细调和水平方向(x 、 y 方向)的扫描。这种方法简单易用,但精度不高。惯性步进型扫描器体积较小,具有很高的稳定性,并且一个扫描器就能实现垂直方向的位置粗调、细调和水平方向的扫描,但 z 方向的粗调范围较小。惯性步进型扫描器由4只完全等同的压电管和一个帽形的金属体组成,外围的3只压电管以第4只压电管为中心成等边三角形排布,形成扫描器的“脚”,支撑在样品台上;而中心的压电管固定探针。考虑到步进马达逼近方式的普遍性,把这种方式作为“通用”功能。考虑到惯性步进方式的高稳定性,把这种方式作为扩展功能。

3.3 扫描控制

将PZT扫描器的 x 、 y 方向控制信号和反馈系统产生的 z 方向控制信号进行高压放大得到高压信号,驱动扫描器的运动,实现 x 、 y 、 z 三个方向的扫描控制。不同的扫描管,其接线方式及驱动电压大小可能存在差异,但只要提供 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 等6路高压驱动信号,即可满足各种类型的SPM扫描器的需要。

3.4 成像处理

SPM通常有电压成像、电流成像、振幅成像、相位成像等多种成像方式。将PZT扫描器的 z 方向控制信号由计算机采集和处理后进行实时成像的方式即为电压成

像,在恒流模式下电压成像得到的是样品表面的形貌信息。成像处理模块需提供信号隔直、倾斜校正等功能。开放式 SPM 控制系统应能提供多路硬件成像通道以及同时对多路信号的处理和显示功能。在本文的 SPM 控制系统中,设计了 3 路基本的硬件成像处理通道及 7 路软件处理通道,每个硬件成像处理通道可切换到不同的内部或外部信号。SPM 总线接口还提供了成像通道的扩展功能。

3.5 反馈控制

反馈控制的作用是自动调节探针-样品间距。反馈控制器通常为 1 个比例/积分/微分均可调节的放大器,即 PID 控制器。SPM 常用的反馈控制器有模拟和数字 2 种。模拟反馈噪声小,但不能长时间(如 1 s 以上)保持输出恒定,不能满足微区损耗等测量的需要;数字反馈能满足此需要,但噪声较大,不适合在隧穿测量时使用。因此,在本文的 SPM 控制系统中,同时设计了模拟和数字 2 种反馈。

4 控制系统的实现

4.1 控制系统的模块组成

最终实现的 SPM 控制系统的模块组成如图 1 所示。该 SPM 控制系统以开放式的 SPM 总线接口为核心,由 7 个电路模块组成:高压驱动模块、模拟信号输出模块、探头信号模块、模拟信号输入模块、数字信号模块、反馈控制模块、电源模块等。这 7 个电路模块共同完成了逼近、扫描、成像、反馈控制等功能。

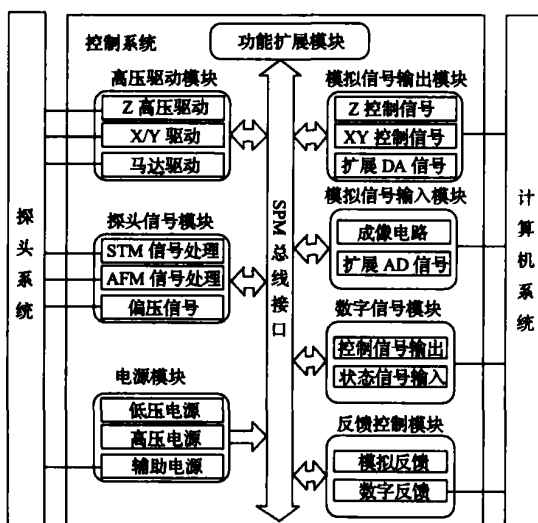


图 1 开放式 SPM 控制系统的模块组成

4.2 总线接口

SPM 总线接口定义了一组基本信号,作为不同模块、不同设备间的接口,以规范控制系统的功能及其扩

展。这些接口信号包括:粗调驱动信号、扫描控制信号、反馈控制信号、成像信号、探头信号、电源信号等,此外还保留了供用户自定义的接口通道。这些接口信号由控制器各个电路模块产生,也可以通过增加新的电路模块产生这些信号或对这些信号进行处理以实现功能扩展。

SPM 总线接口在硬件电路上由 1 个 98 针的 EISA 型插槽和 1 个 62 针的 ISA 插槽提供。EISA 型插槽主要提供基本的 SPM 信号,ISA 插槽则主要提供扩展的 SPM 信号。在 SPM 控制器的底板上安装了 12 个相同的 SPM 总线的电路接口。

4.3 逼近、扫描及控制

逼近驱动主要由高压驱动模块完成,扫描控制信号由模拟信号输出模块产生,数字信号模块则提供各种数字控制信号。

高压驱动模块提供步进马达和惯性步进 2 种粗调逼近装置的驱动电路,其他的粗调逼近装置则在需要时进行功能扩展。步进马达的控制时序由计算机软件产生,控制信号配置为 3 线驱动方式;硬件电路完成步进马达控制信号的放大,输出采用集电极开路的形式。惯性步进器的控制时序同样由计算机软件产生,控制信号为 2 路方向相反的锯齿波信号;硬件电路完成这 2 路锯齿波控制信号的放大,最大输出电压为 ± 200 V。

模拟信号输出模块与计算机的 DA 卡连接,对计算机输出的模拟信号进行处理,产生各种模拟控制信号,如 x 、 y 、 z 方向的扫描信号。扫描信号在高压驱动模块进行高压放大,得到 $\pm X$ 、 $\pm Y$ 、 $\pm Z$ 等 6 路高压驱动信号,其最大输出电压为 ± 200 V。如选择低压(即小范围)扫描模式,则扫描信号不经高压放大直接输出,其最大输出电压为 ± 10 V。另外,此模块为 SPM 总线接口提供了扩展的 DA 信号输出,以满足扩展外部控制的需要。

PZT 扫描器的扫描控制由 x 、 y 、 z 三个方向的控制信号实现。 x 、 y 方向信号实现探针在样品表面的定位及扫描等功能; z 方向信号控制 PZT 在垂直方向上的伸缩,以调节探针样品间距。在本文的控制器中,控制信号是在模拟信号输出模块中由模拟加法电路将计算机产生的扫描信号和偏置信号叠加而成的。

数字信号模块是控制器与计算机系统的数字控制信号的接口,形成各种数字控制信号。本模块提供 16 路数字输入信号及 64 路数字输出信号。为了避免干扰,数字信号模块与计算机之间采用了光电隔离,部分数字输入输出信号与 SPM 总线之间也进行了光电隔离。为了满足扩展的硬件模块的控制需求,预留了一部分控制信号通道,连接到 SPM 总线接口。

4.4 信号输入及成像处理

探头信号模块对从探头来的信号进行放大和处理。基本的探头信号包括 STM 的隧道电流信号、AFM 的高

度信号及侧向偏转信号等。根据探头的不同,可以通过软件选择采用 STM 还是 AFM。为了方便 SPM 的功能扩展,在 SPM 总线接口上定义了输入信号的扩展接口,新增的 SPM 探头信号经过相应的信号处理模块转换为电压信号后,可以通过这些扩展接口接入控制器并进行成像。另外,此模块还提供了 STM 偏压及其外部调制电路,外部的交直流信号经过缓冲可与内部的直流偏压叠加。

模拟信号输入模块主要完成成像功能,同时将探头信号变换后送给反馈控制器。成像功能包括 3 路硬件成像通道和 4 路软件成像通道。3 路硬件成像通道由模拟成像电路实现用于对探头信号(如 STM 的隧道电流或 AFM 的激光光斑信号)、PZT 的 z 方向电压信号及 AFM 的侧向摩擦力信号等进行成像处理,也可通过软件切换对扩展的输入信号进行成像处理。

为了避免计算机等设备的电磁干扰,模拟信号的输入均采用差分输入;采用高共模抑制比的电路,抑制由于接地环路带来的共模信号的干扰。在模拟信号输入模块与计算机的 AD 卡输入通道之间,添加了隔离电路,以防止接地环路的产生。

4.5 反馈控制

反馈包括模拟反馈和数字反馈 2 部分。模拟反馈采用商品化的 PI 控制器,重点研制了数字反馈控制器。数字反馈采用应用广泛的 PID 控制算法。

数字反馈通过 A/D 转换器把信号输入到数字信号处理器(DSP),然后由 DSP 的监控软件完成 PID 等运算,再通过 D/A 转换器把信号输出。数字信号处理由安装在计算机内的 DSP 板卡完成,信号接口则由 SPM 控制系统提供。DSP 板卡采用美国 TI 公司的高速数字处理芯片 TMS320C6701。DSP 板卡上的 A/D/D/A 转换模块则提供 4 个 200 kHz、16 位的模数转换通道及 4 个 200 kHz、16 位的数模转换通道。

5 测试及应用

5.1 性能测试

开放式 SPM 控制系统研制完成后,利用美国 RHK 公司的 UHV300 型扫描隧道显微镜(STM)的探头系统,本实验室自行搭建了一套完整的 STM 仪器,在大气环境下实现所有的 STM 功能^[6]。

控制系统的性能测试在该自行搭建的 STM 上进行。在仪器正常工作时,测试了控制系统在采用模拟反馈和数字反馈时由高压信号噪声所引起的探针位移噪声(扫描器在 x 、 y 方向的灵敏度是 19.5 nm/V ,在 z 方向的灵敏度是 $2.2 \text{ nm/V}^{[7]}$),结果列于表 1(表中数值为噪声的均方根值)。

表 1 控制系统的噪声

	nm	
	x 、 y 方向	z 方向
采用模拟反馈时	0.01	0.000 7
采用数字反馈时	0.02	0.001

从表中可看到,采用模拟反馈时的噪声比采用数字反馈时小,这是因为数字反馈所用的 DSP 硬件板卡置于计算机主机箱内带来了噪声从而使噪声增大。由于选用的扫描器的温度稳定性很高,本文所设计的 STM 的噪声基本由控制系统决定。因此,该 STM 系统的实际分辨率达到: x 、 y 方向 0.02 nm , z 方向 0.001 nm 。而商品化 SPM 仪器的分辨率一般为: x 、 y 方向 0.1 nm , z 方向 0.01 nm 。可见,本文研制的 SPM 控制系统的噪声水平低于商品化的 SPM 仪器,其具有更好的稳定性。

图 2 是在该 STM 上获得的 HOPG 样品的原子图像。所得到的 HOPG 的原子图像清晰有序,和国外先进的商品化 STM 在相同环境下获得的图像相比毫不逊色。这也从一个侧面反映出该控制系统具有很高的稳定性。

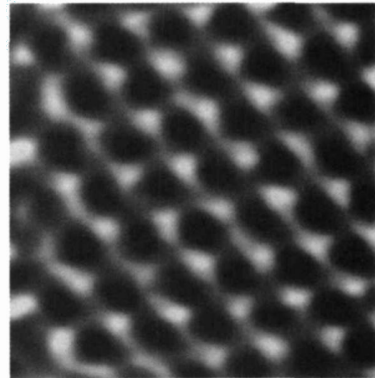


图 2 在使用本控制系统的 STM 上获得的 HOPG 原子图

5.2 控制系统的应用

采用该开放式 SPM 控制系统,完成了对多种商品化的 SPM 探头系统的控制,并扩展了微区阻抗测量等新测量功能。

国产的本原 CSPM 2000 型 SPM 的探头系统采用一般的 3 相步进马达作为粗调逼近装置^[8]。利用已有的马达驱动电路模块,在不对本控制系统电路作任何修改的情况下,实现了对 CSPM 2000 探头的控制。

利用该开放式控制系统并通过功能扩展,实现了对日本精工 SPA300HV 型 SPM 的探头系统的控制,控制示意图如图 3 所示。该型号的 SPM 采用 4 相步进马达为粗调逼近装置;它的 AFM 模式采用特殊的激光二极管做信号发生源^[9]。本文所设计的基本的开放式控制系统不能直接驱动这 2 个部件,因此需要进行功能模块扩展。根据 SPM 总线接口的定义,本文新设计了 2 个电路模块:利用总线上预留的控制信号设计了 4 相马达的驱动电路模块,并对控制时序做了修改;采用激光二极管专

用集成电路,设计了激光管的驱动电路模块。将新电路模块制成 SPM 总线接口上的插卡,安装在原 SPM 控制系统的机箱内并经过简单的调试,实现了对该探头系统的控制。

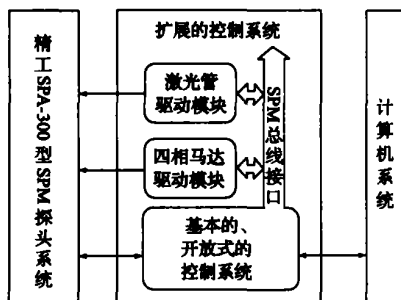


图 3 精工 SPM 探头系统的控制

基于 SPM 的微区阻抗测量系统主要由基本 STM 系统和锁相放大器组成。测量过程如下:首先在样品和探针之间同时施加直流偏压和交流偏压,然后将反映微区阻抗性质的交流信号送到锁相放大器处理,最后将处理结果送回控制系统以实现反馈并成像。控制系统需要完成偏压叠加、阻抗信号成像等功能的扩展。利用 SPM 总线的外偏压输入接口,可以直接实现偏压叠加功能。利用 SPM 总线的外信号成像接口,同时使硬件成像通道和软件成像通道串联工作,可以实现微区阻抗信号在控制系统上的成像。由于具备开放式的 SPM 总线接口,这些功能的扩展都不需对原有的硬件模块做任何修改,扩展非常方便。

6 结 论

本文自行研制的 SPM 控制系统,在商品化 SPM 的体系结构基础上,定义了开放的 SPM 总线接口,对硬件电路进行了模块化设计和功能优化,并采取了一系列的抗干扰措施,从而具有接口开放、稳定性高等突出优点。在本 SPM 控制系统上,实现了对多种商品化 SPM 探头系统的兼容及微区阻抗等测量功能的扩展。只要按照 SPM 总线接口的定义,很容易就能设计出新模块完成新功能扩展。这种开放式的 SPM 控制系统的研制成功,为开展在微区阻抗或介电特性等方面的研究奠定了基础,

在其他的 SPM 测量研究中也有一定的应用前景。

该 SPM 控制系统突破了传统商品化 SPM 不易扩展的局限,所采用的开放式设计思想及其 SPM 总线接口的具体实现,为 SPM 的结构改进及商品化提供了新的思路,对于 SPM 技术的推广应用有一定的参考价值。

参考文献

- [1] MEYER E, HUG H J, BENNEWITZ R. Scanning probe microscopy[M]. Berlin:Springer,2003.
- [2] DURKAN C, WELLAND M E. Electronic spin detection in molecules using scanning-tunneling-microscopy-assisted electron-spin resonance[J]. Appl. Phys. Lett, 2002(80):458-460.
- [3] BREZNA W, SCHRAMBOECK M. Quantitative scanning capacitance spectroscopy[J]. Appl. Phys. Lett.,2003(83):4253-4255.
- [4] SUGANUMA Y, DHIRANI A A. A hybrid scanning tunneling-atomic force microscope operable in air[J]. Rev. Sci. Instrum, 2003(74):4373-4377.
- [5] 丁喜冬,熊小敏,张进修. 介电损耗扫描显微镜及其测量方法:中国,200410077616.5[P]. 2004-12-28.
- [6] 杜贤算,丁喜冬. 惯性步进扫描器控制接口的设计[J]. 中山大学学报:自然科学版,2004,43(增刊):45-49.
- [7] RHK Technology, Inc. UHV300 variable temperature ultra-high vacuum scanning tunneling microscope user's guide[Z]. 2001.
- [8] 本原纳米仪器有限公司. CSPM2000 型扫描探针显微镜用户手册[Z]. 2001.
- [9] Seiko Instruments Inc. SPI3800 probe station & SPA300HV SPM unit user's guide[Z]. 2001.

作者简介



丁喜冬,男,1968年11月出生,博士,高级工程师,主要研究方向为纳米表征仪器及技术。

E-mail:stdp38@zsu.edu.cn