

一体型平行弹簧扫描隧道显微镜

张海成

佐佐木彰

(长春光学精密机械学院光电工程系, 长春 130022) (日本静冈大学工学部)

摘 要 描述了一种新结构形式的扫描隧道显微镜(STM)系统。该系统使用一体型平行弹簧和压电致动元件(PZT)作为精密二维位置控制器件,使得 x 轴和 y 轴间的位移干扰变得极其微小。控制 z 轴位移及试件与探针间距的压电致动元件是以悬挂方式固定在一体型平行弹簧上的,因此,对 z 轴的位移干扰亦可忽略。

关键词 扫描隧道显微镜, 一体型平行弹簧。

1 引 言

扫描隧道显微镜是一种能以原子级分辨率观察物体表面微观结构的新型显微镜,在最近十年得到了迅速发展^[1, 2]。从机械结构角度看,这种显微镜的扫描驱动系统几乎全部用压电致动元件来制作^[3]。具体的结构形式有鼎型、立方体型、圆管型等。但是,无论哪种形式的扫描驱动机构都存在轴间干扰的问题^[3~7]。以三脚架型为例,在 x 轴方向扫描距离达 $10\ \mu\text{m}$ 时,在 y 轴方向上产生的偏移量(即干扰量)约为 $10\ \text{nm}\sim 100\ \text{nm}$ ^[8]。该量级的干扰在超光滑表面,大规模集成电路芯片、光盘等测试中,是不可忽视的误差因素。由一体型平行弹簧和层叠式压电致动元件构成的扫描驱动机构,轴间干扰量极其微小,而且扫描范围大,动态特性好。与圆管型压电致动元件组合成复合系统,既适用于工程测量,又可用于原子像的观察。在空气中观察金膜和块规表面的实验表明,该结构稳定性好,分辨率高。

2 一体型平行弹簧扫描隧道显微镜

扫描隧道显微镜是利用量子力学中的电子隧道效应,以一定的隧道电流探测模式进行物质的微观表面结构观测的一种新型非接触扫描探针显微镜。由于极限分辨率可达到 $0.01\ \text{nm}$,所以对仪器的机械结构,测量和控制系统等的要求极高。本文设计制作的一体型平行弹簧扫描隧道显微镜是一种结构新颖的扫描隧道显微镜系统,如图1所示。它由隧道机构、测量电路系统、控制电路系统和图像显示系统构成。隧道机构如图2所示,其最关键部件是探针扫描驱动器,它由一体型平行弹簧、层叠式压电致动元件和圆管型压电致动元件组成。采用这种结构,不仅可减小各轴间的相互干扰,而且便于各轴向位移大小的监控。由于把圆管

* 本文所用压电致动元件均系日本国日本电气公司制造。

收稿日期:1994年5月10日;收到修改稿日期:1994年8月16日

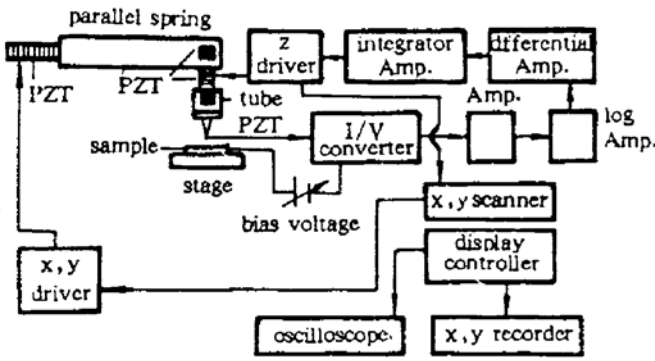


Fig. 1 Schematic diagram of STM system

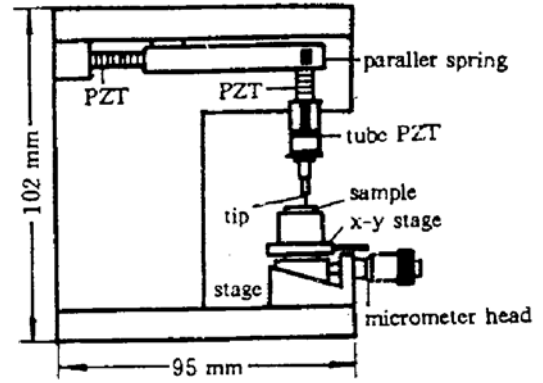


Fig. 2 Scheme of STM setup

型压电致动元件安装在 z 轴层叠式压电致动元件之上，所以该扫描驱动器使探针具有两级扫描范围，使得一体型平行弹簧扫描隧道显微镜既可作工程测量，又可进行原子像的观察。

2.1 一体型平行弹簧

一体型平行弹簧如图 3 所示。是一个用高强度铝合金材料制成的正方形二维平行弹簧，边长 $44\text{ mm} \times 44\text{ mm}$ ，厚度 10 mm ，五个孔的直径均为 $\phi 14\text{ mm}$ ，呈十字线均匀分布。由实验知，其刚度为 0.7 MN/m 。重量为 30 g 。由一体型平行弹簧和层叠式压电致动元件构成的探针扫描驱动机构，与目前通用的三脚架型、立方体型机构相比， x 和 y 轴间的干扰量大大减小。由于 x 和 y 轴的位移量及其干扰量是扫描隧道显微镜设计上最重要的指标，下面简要地作一下变形分析。为分析方便，将一体型平行弹簧简化成图 4 所示的模型。由图可知，它相当于一个平行四连杆机构。设边长为 L ， x 轴方向的位移量为 D ，对 y 轴方向的干扰量(即位移量)为 d 。由简单的几何关系可知：

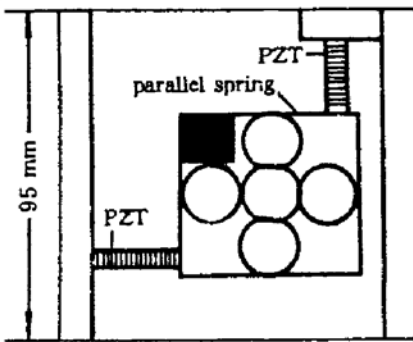


Fig. 3 MPS of STM

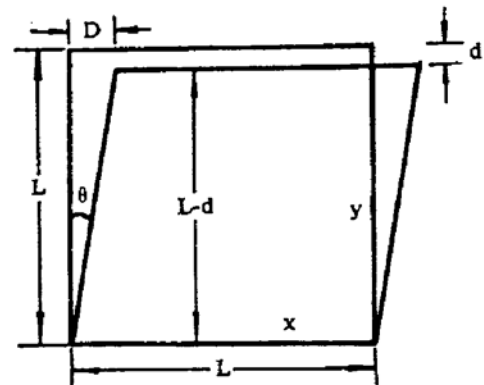


Fig. 4 Simplified model of MPS

$$\sin \theta = D/L, \quad d = L - L \cos \theta = L(1 - \cos \theta), \quad \cos \theta = \sqrt{1 - (D/L)^2}$$

实际上， D 很小，本仪器最大取 $D = 11.5\text{ }\mu\text{m}$ ，故 $D/L \ll 1$ ， θ 也很小。因此，可将 $\cos \theta$ 用级数表示，取到二次项时，则

$$\cos \theta = 1 - (1/2) (D/L)^2, \tag{2}$$

将(2)式代入(1)式，则得：

$$d/L = (1/2) (D/L)^2. \tag{3}$$

(3)式就是 x 轴方向的位移对 y 轴方向的位移的影响关系式。当然，反过来也适用。设 $D = 10\text{ }\mu\text{m}$ ，由(3)式可算出 $d \approx 1.1\text{ nm}$ 。此干扰量只是三脚架型的 $1/100$ 左右。用(2)式计算时，计算值比实际值大，误差为 $(D/L)^4$ 量级，约为 $2.7 \times 10^{-19}\text{ }\mu\text{m}$ ，极其微小。

z 轴压电致动元件是垂直于 xy 平面固定的，从原理上讲，该元件控制的探针在试件表面

垂直方向的位移不受 x 轴和 y 轴位移的干扰。但是，如果平行平面之间存在较大平行度误差，则对 z 轴的位移有影响，因为在这种情况下， xy 平面伴有挠曲现象发生。机械振动频率对仪器的扫描速度和稳定性影响很大，实验表明，由一体型平行弹簧构成的扫描机构的固有频率较高，尤其是 z 轴方向的固有频率更高。这些特性可满足扫描隧道显微镜设计上的要求。

2.2 隧道机构

隧道机构是实现了对试件表面进行观测的机械结构部分。由图 2 可知，它由粗动机构，微动扫描机构，以及固定上述两种机构的机架组成。

粗动机构是使探针和试件快速接近，达到隧道电流检出所需要的间距，并通过它进行观测范围选择的三维运动机构。一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的粗动机构由手动式垂直升降载物台和水平移动载物台构成。垂直升降载物台的斜面滑块在测微鼓的驱动下，每进退 6 mm，升降 1 mm。与 z 轴层叠式压电致动元件配合，可使探针快速接近试件表面并保持隧道间距。水平移动载物台装配在垂直升降载物台之上，在 x 轴和 y 轴方向的位移均可达 3.4 mm。在 $3.4 \times 3.4 \text{ mm}^2$ 的范围内自由地选定视场。

微动扫描机构既要保持探针与试件间的隧道间距，又能控制探针作二维平面扫描运动。本仪器的微动扫描机构是具有两级扫描范围和探测精度的复合机构。第一级由一体型平行弹簧和三只层叠式压电致动元件组成。 x 轴和 y 轴的扫描范围均为 $11.5 \mu\text{m}$ ， z 轴的位移量可达 $6.5 \mu\text{m}$ ，主要用于工程测量。第二级由固定在 z 轴压电致动元件上的圆管型压电致动元件构成， x 轴的扫描范围 185.1 nm， y 轴的扫描范围 190.3 nm， z 轴的位移量可达 120.4 nm。主要用于原子像的观察。以上机构的位移灵敏性影响着仪器的分辨率，主要由压电致动元件的响应来决定。 z 轴压电致动元件的响应达 1.5 nm/V 。

机架用铝合金制作。为提高整机刚性，应尽量缩小结构尺寸。本扫描隧道显微镜的机架长 95 mm，宽 95 mm，高 102 mm，壁厚 10 mm。可测试的最大试件尺寸为 $\phi 60 \times 10 \text{ mm}$ 。由于采用折合式结构，装卸试件和更换探针都很方便。

整机组装后，测试微动扫描机构的振动频率特性和电压·位移特性十分重要，因为它们直接影响整机的性能。首先用光纤位移计(SUNMETRIX 公司的 OM-15)和快速傅里叶变换频谱分析仪(日立电子 VC-2420)进行了振动频率测试，测试结果如图 5 所示。图 5 中(a)曲线是 z 轴方向的机械振动频率特性曲线，共振频率在 1.3 kHz 处。说明装置的机械固有振动频率较高，刚性好，对声音和地面振动的影响不敏感。图 5 中的(b)曲线是 x 、 y 轴方向的机械振动频率特性曲线，共振频率在 1.05 kHz 处。说明对探针的扫描速度无限制。层叠式压电致动

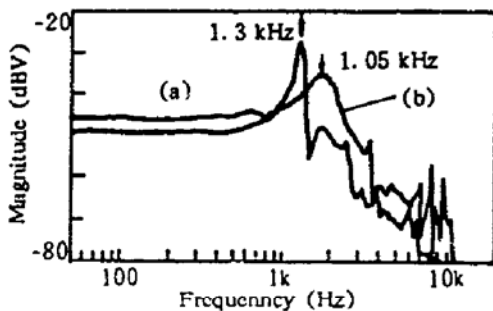


Fig. 5 Frequency behaviour of x , y and z axis superimposition PZT

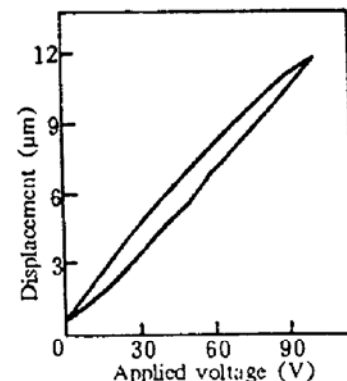


Fig. 6 Displacement behaviour of PZT driven MPS

元件与一体型平行弹簧组合后的电压·位移特性如图 6 所示。在外加电压 100 V 时, x 轴和 y 轴方向的位移均可达到 $11.5 \mu\text{m}$ 。电压·位移特性与压电致动元件空载时相同。

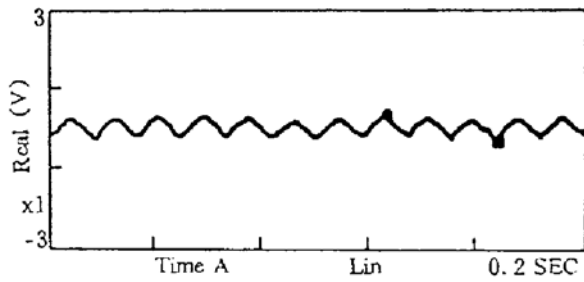


Fig. 7 Output curve of tunneling voltage characteristics of STM with MPS

为确定组装后 z 轴的稳定性, 测试了某一点的隧道电压随时间变化的特性曲线, 如图 7 所示。由曲线可知, z 轴的稳定性很好, 表明一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的结构设计合理, 由一体型平行弹簧构成的微动扫描机构的特性、测量用电路和控制用电路系统的噪音特性等, 均符合扫描隧道显微镜测量精度的要求。探针用铂铱合金细线制作, 用机械切断法和电化学腐蚀法制

成。化学稳定性好, 机械强度适中。

2.3 测量、控制及显示系统概要

图 1 中的电流/电压变换器(I/V 变换器)是扫描隧道显微镜测量、控制系统中最关键的器件。为了能有效地检测出极其微弱的隧道电流, 避免机械振动和电磁噪音的干扰, 技术上的措施是把它装置在探针的附近。该变换器由漏电流为 3 fA 的放大器 OPA104 AM 和热噪音小的金属膜电阻构成, 电流/电压变换系数为 $5 \times 10^7 \text{ V/A}$ 。考虑到隧道机构频率特性的要求, 在反馈电阻旁并联一电容, 减少了噪音干扰, 提高了检测系统的稳定性。从 I/V 变换器输出的信号电压通过初级放大器, 对数变换器, 差动放大器, 积分器处理后, 反馈到 z 轴压电致动元件的控制电路中, 控制隧道电流在工作过程中始终保持一定。这种方式称定电流模式, 是常用的一种测量模式。把反馈到 z 轴压电致动元件控制电路的电压同时输入到显示电路中, 则可在多种显示器上显示出各种信号和图像。本仪器的显示电路既能与示波器连接, 又能与 xy 记录仪连接, 还可与个人计算机连接。可用等高线法和辉度图法作二维或三维的图像显示。用波形发生器产生的三角波电压控制探针作 x 、 y 两个方向的扫描。具体扫描方式见图 8。在显示电路的设计上, 只允许 x 轴的某一个方向的扫描信号通过, 因此, 克服了压电致动元件滞后现象的影响。 y 轴的扫描速度比 x 轴慢许多, 所以, y 轴扫描时获得的两个方向上的信号均可显示出来。

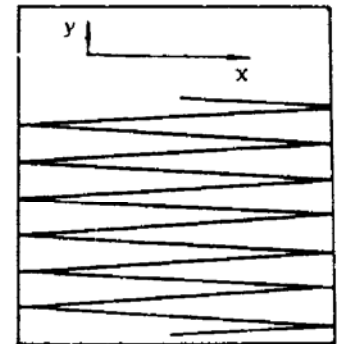


Fig. 8 Probe scanning way at x , y directions

2.4 消振隔振措施

扫描隧道显微镜工作时的针尖与试件表面间距一般在 1 nm 左右, 以定电流扫描模式, 可观测到 0.01 nm 的表面起伏变化。因此, 扫描隧道显微镜应具有良好的消振隔振设计, 以保证振动引起的隧道间距变化小于 0.001 nm 。消振是指减小仪器自身产生的振动, 无法用隔振器隔离, 这是扫描隧道显微镜结构设计时就应考虑的问题。为消除自身振源, 要采用特殊材料的零件, 特殊的结构和特殊的传动方式。后述的实验结果表明, 一体型平行弹簧扫描隧道显微镜在这方面的处理是很成功的。所谓隔振, 是指将扫描隧道显微镜的探头部分与外界的振动隔离, 这是扫描隧道显微镜使用时必须解决的问题。在空气中使用的扫描隧道显微镜除需要隔绝来自地面的振动外, 还需要隔绝空气振动的影响。为隔绝地面振动的影响, 根据隧道机构的固有频率特性, 设计制作了层叠式小型防振台。用此防振台在实验桌上成功地进行了金膜和块规表面的扫描隧道显微镜观测实验。当然, 若观察原子, 还应在大型防振台上

进行。在仪器工作过程中，微风或轻轻的说话声，也会对探头有强烈的影响，所以应将探头封闭。本研究组用铅皮作封闭材料，用液态泡沫橡胶作固定材料，收到了良好的效果。

3 观测实验

为了验证一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的性能及分辨率，对真空蒸镀在玻璃片上的金膜和精密块规表面进行了多种条件下的观测实验。

图 9 是等高线图表示的金膜表面的观测结果。隧道电流为 0.6 nA，试件上的偏压为 0.38 V，扫描范围 $11.5 \times 11.5 \mu\text{m}^2$ 。图 9(a) 是 y 轴正向扫描时得到的图像，图 9(b) 是 y 轴回归扫描时得到的图像。很明显，两幅图像几乎无差别。说明一体型平行弹簧扫描隧道显微镜测试精度高，再现性好。由等高线图可知，在所测范围内的最大起伏约为 28 nm，最小可观察到 1 nm 的起伏变化。

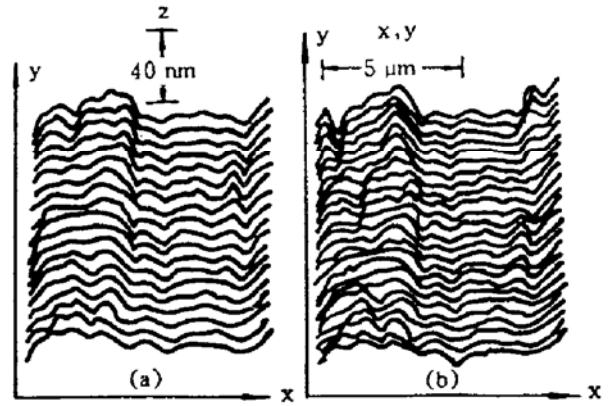


Fig. 9 STM images of Au vaporization film

图 10 是用辉度图表示的金膜表面观测结果。隧道电流为 0.4 nA，试件上的偏压为 64 mV，扫描范围 $1.4 \times 1.4 \mu\text{m}^2$ 。由图可知，金膜表面由金原子的凝聚颗粒构成，凹凸不平，凝聚的颗粒直径约 100 nm 左右。

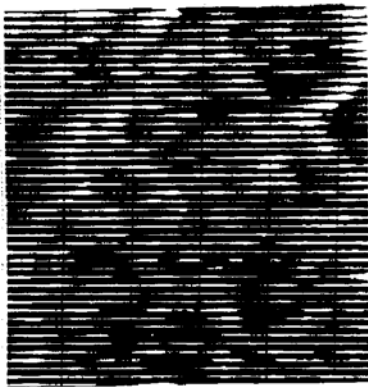


Fig. 10 STM brightness image of Au film

图 11 是用等高线图表示的精密块规表面的粗糙度测试结果。隧道电流 0.66 nA，试件上的偏压为 64 mV，扫描范围为 $11.5 \times 11.5 \mu\text{m}^2$ 。表面最大凹凸深度为 40 nm 左右。此实验表明，用大扫描范围的扫描隧道显微镜可进行超光滑表面的测试。

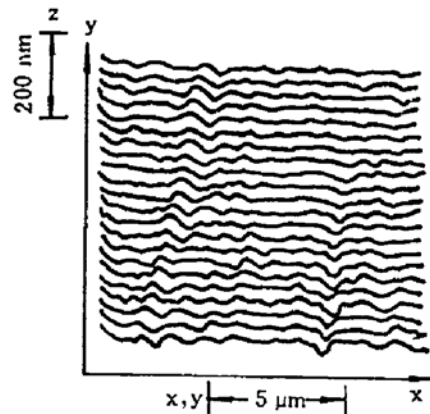


Fig. 11 STM image of gauge

以上实验结果与有关的实验结果相符^[9~11]。表明一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的观测结果是可靠的。

4 结 论

通过各项特性试验和表面观测实验结果表明，一体型平行弹簧扫描隧道显微镜具有如下特性：

- 1) 二维一体型平行弹簧，固有振动频率高，刚性好，位移特性理想。可用来制作大扫描范围的扫描隧道显微镜的扫描机构。本研究的最大扫描范围达到 $11.5 \mu\text{m}$ 。

2) 一体型平行弹簧和探针的位移是一一对应的关系。这对探针的位置和位移大小的测量和校正十分方便。现已研制出带有位移校正系统的一体型平行弹簧扫描隧道显微镜。

3) 由一体型平行弹簧和层叠式压电致动元件组成的探针扫描驱动系统的位移响应与三脚架型等相同。所以, 一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的分辨率与相应的扫描隧道显微镜的分辨率相同。由位移特性实验和金膜等的表面观测实验表明, 第一级扫描探测机构的分辨率约为 1 nm, 扫描范围为 $11.5 \times 11.5 \mu\text{m}^2$, z 轴位移量可达 $\pm 6.5 \mu\text{m}$ 。因此, 它适用于超光滑表面的粗糙度测量和评价。

4) 由扫描隧道显微镜系统的噪音电压测试结果表明, 一体型平行弹簧扫描隧道显微镜的测量、控制、显示电路系统和机械结构的设计合理。用第二级扫描探测机构可进行原子像的观察, 垂直分辨率可达到 0.1~0.01 nm。

参 考 文 献

- [1] G. Binnig, H. Rohrer, Scanning tunneling microscopy—from Birth to adolescence. *Rev. Mod. Phys.*, 1987, **59**(3): 615
- [2] P. K. Hansma, J. Tersoff, Scanning Tunneling Microscopy. *J. Appl. Phys.*, 1987, **61**(2): R1
- [3] 岡山重夫, 尾村皓二ほか, 高分解能微動アクチ, エータと制御. 精密工学会志, 1988, **54**(5): 817
- [4] 佐佐木彰, 山田浩史ほか, レーザービーム偏向による走査型トンネル顕微鏡圧電素子の変位測定. 光学, 1992, **21**(2): 95
- [5] 中山貫, STMファミリーにおけるレーザーの利用. レーザー研究, 1991, **19**(2): 147
- [6] 津田展宏, 山田啓文, 石田文彦等, 大ストロークSTM. 精密工学会志, 1989, **55**(1): 146
- [7] 森田清三著, 走査型プローブ顕微鏡のすべて. 工業調査会, 1992年2月10日初版
- [8] 西村国俊, ばね支持された小形微動台の開発. 精密工学会志, 1988, **54**(7): 1369
- [9] H. C. Zhang, A. Sasaki, Surface roughness observation by scanning tunneling microscopy using a monolithic parallel spring. *J. Vac. Sci. Technol.*, 1994, May/June, **B12**(3): 1669
- [10] 佐佐木, 岩田, 藤又等, 高安定STMの制作とナノ加工への応用. 精密工学会志, 1993, **59**(6): 987
- [11] 佐佐木, 川上, 山内等, 変位補正機能付き走査型トンネル顕微鏡. 精密工学会志, 1993, **59**(1): 95
- [12] 张海成, 扫描隧道显微镜. 长春光学精密机械学院学报, 1993, **16**(2): 6

Scanning Tunneling Microscope Using a Monolithic Parallel Spring

Zhang Haicheng

(Department of Opto-Electro Engineering

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022)

Sasaki Akira

(Faculty of Engineering, Shizuoka University, Johoku Hamamatsu 432, Japan)

(Received 10 May 1994; revised 16 August 1994)

Abstract This paper describes a novel scanning tunneling microscope (STM) system using a two-dimensional monolithic parallel spring (MPS) and piezo-electric actuators (PZT) for precision two-dimensional positioning. This leads the interference between the x-axis displacement and the y-axis to be very small. The PZT used for controlling the z-axis displacement and the sample-to-tip distance is mounted on the monolithic parallel spring. Therefore, the mutual interference to z-axis displacements is negligible.

Key words scanning tunneling microscope, monolithic parallel spring.