

# 大面积扫描探针显微镜研制

路小波<sup>1</sup>, 陆祖宏<sup>2</sup>, 周庆<sup>2</sup>, 王国著<sup>2</sup>

- (1. 东南大学智能运输系统研究中心, 南京 210096;  
2. 东南大学分子与生物分子电子学教育部重点实验室, 南京 210096)

**[摘要]** 介绍了一种大面积扫描探针显微镜。仪器采用大范围扫描与高精度微动扫描相分离、X-Y扫描与纵向检测相分离的方案, 同时具备较大扫描范围和较高的分辨率, 扫描重复性好, 大面积扫描范围 220 mm × 290 mm × 60 mm, 重复性 2~3 μm, 并可实现探针的自动逼近、光学显微镜自动聚焦和图像自动拼接。

**[关键词]** 扫描探针显微镜; 自动逼近; 自动聚焦; 图像拼接

**[中图分类号]** TN16 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)09-0050-06

## 1 引言

扫描隧道显微镜<sup>[1]</sup> (STM, scanning tunneling microscope) 出现, 在技术上使人类有可能在原子尺度上直接观察材料表面的原子排列状态及电子结构, 发明者因此获得诺贝尔奖。在 STM 的基础上, 又出现了一系列利用探针在样品表面扫描而获得表面信息的测量仪器, 统称为扫描探针显微镜 (SPM, scanning probe microscope), 如原子力显微镜 (AFM, atom force microscope), 激光力显微镜 (LFM, laser force microscope) 等。SPM 在材料科学、生命科学等领域得到了广泛的应用。在实际应用中, SPM 存在以下局限性:

1) SPM 一般采用压电陶瓷作为扫描控制器, 压电陶瓷由于本身材料的性质很难同时具备大扫描范围和高的分辨率。在某些应用中 (如微电子工业) 需要对材料表面相距数毫米的某几处进行纳米级的观测, 在这种情况下, 传统的 SPM 就显出了局限性。

2) 各种 SPM 探头对于探针和样品的距离均有一定要求, 而扫描控制器的动态范围有限, 因此必须增加粗调机构。现在普遍采用的方式有<sup>[2]</sup> 爬行

方式、差分螺杆调节方式、螺杆加簧片结合方式等, 但一般为开环调节, 随意性较大, 而且需人工干预。

3) 对样品的某一处进行重复观测存在较大困难。一旦观测点偏离, 就无法重复观测。即使提供了类似于显微镜的手动螺杆粗调, 由于精度原因也难以解决问题。

笔者研制的大面积扫描探针显微镜 (LS-SPM) 克服了以上局限性, 可作为微电子工艺过程的检测设备, 对促进我国微电子技术的发展具有重大意义。

## 2 工作原理<sup>[2]</sup>

STM 的工作原理是利用量子理论中的隧道效应。将原子线度的极细探针和样品表面作为两个电极, 当样品与针尖的距离非常接近时, 在外加电场的作用下, 电子会穿过 2 个电极之间的势垒流向另一电极, 这种现象即是隧道效应。隧道电流  $I$  与针尖和样品之间的距离  $S$  以及平均功函数  $\Phi$  有关:

$$I \propto V_b \exp(-A\Phi^{1/2}S), \quad (1)$$

式中,  $V_b$  是加在针尖和样品之间的偏置电压, 平均功函数  $\Phi \approx (\Phi_1 + \Phi_2)/2$ ,  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  分别为针尖

和样品的功函数， $A$  为常数，在真空条件下约为 1。由式 (1) 可知，隧道电流强度对针尖与样品表面之间的距离  $S$  非常敏感。如果控制隧道电流恒定，同时控制针尖在样品表面进行扫描，则探针在垂直于样品方向上高低的变化就反映了样品表面的起伏，如图 1 所示。

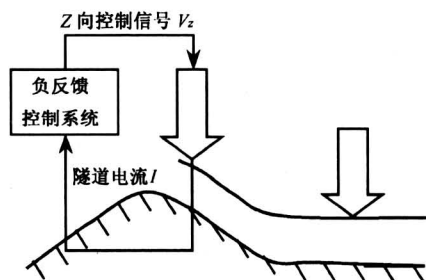


图 1 STM 工作原理示意图

Fig.1 Principle of STM

AFM 的工作原理是将一个微小的针尖与待测样品表面轻轻接触，由于针尖原子和样品原子之间存在斥力（约为  $1 \sim 10$  nN），可将此斥力作为反馈信号，在扫描时使这一斥力为恒定值，那么，扫描过程中针尖将随着针尖和样品间作用力的等位面在垂直于样品的方向上、下移动，针尖对应于各扫描点的垂直位置即反映样品表面的形貌。

### 3 硬件系统设计

LS-SPM 系统结构如图 2 所示。仪器在上位机 (P4) 控制下运行，上位机的功能是控制扫描控制系统、计算机数控系统 CNC 及图像采集；扫描控制系统主要承担与上位机的通信，接收来自上位机或键盘的指令，控制扫描，进行数据采集、存储、传送。大面积扫描平台实际上是一个三维定位系统。三维定位系统在计算机数控系统的控制下实现样品的大范围扫描及 STM/AFM 探头和光学成像系统在竖直方向 (Z 向) 的大范围移动，微动扫描平台用于实现样品的高精度定位；光学成像系统由光学显微镜和 CCD 组成，其主要功能是对样品进行大面积成像，为 STM/AFM 成像提供参考，也可对分辨率要求不高的样品直接成像；为了实现样品的大范围扫描并保证高分辨率，采用大范围扫描与高精度微动扫描相分离、X-Y 扫描与探针纵向检测相分离的方案，克服了压电扫描管大面积扫描中图像畸变、扫描稳定性不好的缺点，这种探头结构扫描稳定，成像质量较高，同时还有可以置

换探头的优点。扫描探针显微镜的探针进给及反馈控制系统由粗调和精调 2 套系统进行，对于大于  $1 \mu\text{m}$  的进给及控制，由三维定位系统的 Z 轴驱动，探针微小位移的进给由压电陶瓷管提供。系统可以实现探针进给的全自动调整，整个扫描过程无需人工干预。

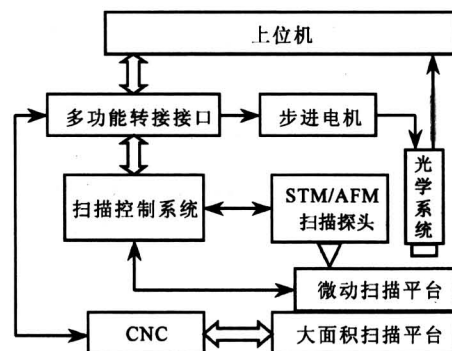


图 2 大面积扫描探针显微镜系统示意图

Fig.2 The structure of large scale scanning probe microscope

#### 3.1 STM/AFM 探头

STM 扫描探头采用 AE0505D16 管状压电陶瓷，其内、外壁都有电极，极化方向穿过管壁，它的轴向移动为<sup>[2]</sup>

$$\Delta l = \frac{d_{31} V l}{d}, \quad (2)$$

式中， $V$  为电极上的电压， $l$  为压电陶瓷管长度， $d$  为管的壁厚， $d_{31}$  为压电常数。

所设计的原子力显微镜 (AFM) 工作原理如图 3 所示。图中的“粗调切换器”是一个可推进、可拉出的中空活动圆杆，当其推进时，激光束从悬臂反射，经反射镜 A, B, C, D 传送至 CCD 摄像头，实验者可通过观察监视屏调节悬臂支架位置 (粗调)，使激光束落在悬臂上，然后即可抽出粗调切换器，此时反射镜 C, D 不再起作用，反射光束落在光电二极管上。

系统采用的光电管为四象限管，分别对横向和纵向 2 个相邻象限进行信号差动放大，调零时必须将这 2 个放大信号均调零，这样保证初始时光束落在光电管中心，改善重复性。而二元光电管采光面划分为 2 个半圆，调零时不能保证光束落在光电管中心。图 4 展示了这两种方法的不同。

四象限管的差动放大信号通过扫描控制系统采样，传送至上位机。上位机根据这两路差动信号，在屏幕上模拟显示出采样光电二极管和反射光位

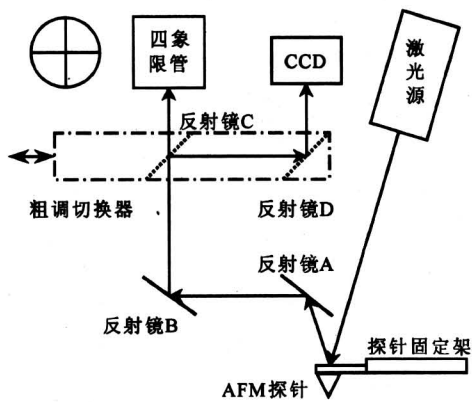


图3 原子力显微镜原理示意图

Fig.3 Principle of atomic force microscope

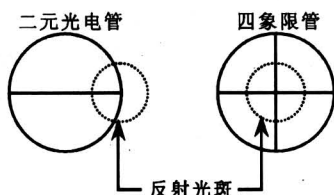


图4 反射光斑的位置判别

Fig.4 The position of facula at zero value

置，实验者可通过观看上位机屏幕来调节微悬臂支架（细调），使反射光束位于四象限管中心，即完成调零工作。

AFM扫描样品时，针尖和样品距离变化，受力也发生变化，悬臂弯曲程度改变，反射光束位置偏移，四象限管的差动信号即作为反馈信号调节探头的Z轴，使针尖受力值保持恒定。此时Z轴的驱动电压值反映了样品的表面形貌。

### 3.2 三维定位系统

三维定位系统由花岗岩基座、滚珠丝杆、滚动导轨和交流伺服电机组成。整个三维工作平台由数控系统 SIN $\mu$  MERIK 810M CNC 实行闭环控制，位移传感器采用 LS-406 光栅位移传感器。三维定位系统性能指标见表1。

表1 三维定位系统性能指标

Table 1 Performance of 3 dimensions positioning system

	有效范围/mm	分辨率/ $\mu\text{m}$	重复定位精度/ $\mu\text{m}$
X轴	220	1	2~3
Y轴	290	1	2~3
Z轴	60	1	2~3

### 3.3 微扫描平台

微动扫描平台的作用是控制探针在样品表面进

行扫描运动。采用 WTDS-I 型电致伸缩陶瓷作为驱动源，驱动具有位移放大功能的弹性体组成微动工作台。微位移器由多片电致伸缩陶瓷 (PMN) 叠加后封装。PMN 与 PZT 相比，具有迟滞小的优点，但其驱动电压与位移之间非线性较严重，因此采用插值法进行修正。扫描平台的最大行程为  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ ，分辨率为  $10\ \text{nm} \times 10\ \text{nm}$ 。

对更高分辨率要求的扫描，采用 P-517.3CL 微动平台，其最大行程为  $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ ，分辨率为  $1\ \text{nm} \times 1\ \text{nm} \times 0.1\ \text{nm}$ 。

### 3.4 扫描控制系统

扫描控制系统包括下位机（单片机）系统、高压驱动电路及反馈控制电路。扫描控制系统原理示意图如图5所示。

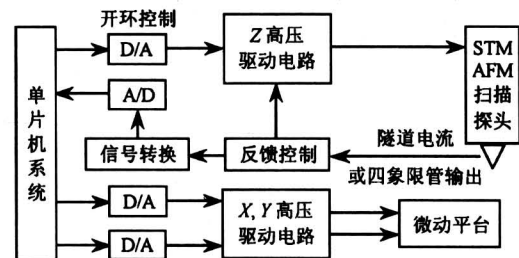


图5 扫描控制系统原理框图

Fig.5 Scanning control system

单片机系统主要承担与上位机的通信，接收来自上位机或键盘的命令，控制扫描，进行数据采集、存储、传送。系统中 CPU 采用 8031 单片机。显示器采用 HD44780 点阵式液晶显示器，用于显示仪器工作状态。系统配备  $2 \times 5$  键盘，由键盘/显示器接口芯片 8279 控制。单片机系统带有 32 kB RAM，用于扫描过程中暂存数据。模数转换器 (A/D) 采用 AD7846 (16 b)，用于将形貌信号转换为数字信号，数模转换器 (D/A) 采用 AD7884 (16 b)，3 路 D/A 分别提供 X、Y、Z 方向驱动信号。与上位机的通信采用 RS-232 接口。

高压驱动电路用于提供驱动微动平台和扫描头所需的高压，所研制的精密高压驱动电路输出电压范围为  $0 \sim 300\ \text{V}$ ，分辨率为  $0.01\%$ 。

控制器的功能是保持 STM 隧道电流或 AFM 针尖与样品间力的恒定。PID 控制器用 ITAE 优化设计方法确定控制器传递函数。

### 3.5 光学成像系统

光学成像系统由光学显微镜和 CCD 组成，其主要功能是对样品进行大面积成像，为 STM/

AFM 成像提供参考,也可对分辨率要求不高的样品直接成像。在观察分析微米及亚微米样品时,光学显微镜有其显著的优势。为了自动地对大范围样品进行成像,系统必须能够自动聚焦。在 LS-SPM 中,CCD 与显微镜目镜之间的距离是不变的,因此,如果在扫描过程中由于样品的起伏导致图像模糊,必须通过调整物镜和样品的距离来达到聚焦的目的。系统根据对比度检测法,实现了自动聚焦功能。

## 4 软件系统设计

LS-SPM 系统的软件包括上位机软件和下位机软件,软件系统结构如图 6 所示。

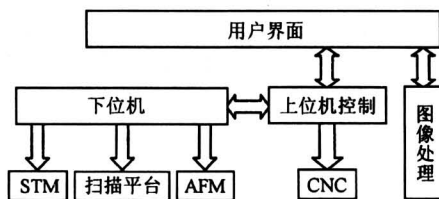


图 6 LS-SPM 软件系统框图

Fig.6 Software structure of large scale scanning probe microscope

### 4.1 上位机软件

上位机软件从功能上可分为 3 部分:

1) 用户界面: 在 Windows 98/NT 操作系统支持下,提供一个集成的图形化操作界面,使用户不必关心各功能的实现细节,简单高效地使用系统,方便地获得扫描结果及各种数据处理结果。

2) 控制模块: 由一系列子程序组成,下达指令给下位机系统和 CNC,协调系统各组成部分的工作,实现扫描控制、图像采集、光学显微镜自动聚焦、STM/AFM 自动逼近等功能。

3) 数据处理模块: 实现图像处理、分析,图像的拼接,图像的三维显示,连续图像的浏览、回放,图像的保存、打印等功能。

上位机软件包由一系列组件组成,它们既可以独立运行,控制管理相关的设备,又可通过公共接口相互调用,联合使用。

### 4.2 下位机软件

下位机软件主要完成以下工作:

- 1) 与上位机通信;
- 2) 控制 STM/AFM 探针采样;
- 3) 控制微动扫描平台。

### 4.3 光学显微镜的自动聚焦

采用图像处理法实现自动调焦的关键在于图像清晰度评价函数的选取。理想的评价函数应具有无偏性、单峰性,且灵敏度、信噪比高,运算量小。对图像灰度熵、图像灰度方差和图像灰度差分绝对值之和和三种评价函数进行了比较,选取图像灰度方差作为清晰度评价函数。

在 Z 方向的不同位置(通过三维定位系统控制光学探头在 Z 方向移动)采集一系列图像:

$$\{f_k(x, y), k = 1, 2, 3, \dots, M\}.$$

对图像序列的第 k 幅图像,在窗口 W 内的灰度方差为

$$S_k^2 = \frac{1}{N_w} \sum_{(x,y) \in W} (f_k(x, y) - \bar{f}_k)^2, \quad (3)$$

其中  $N_w$  表示图像窗口内的像素个数,

$$\bar{f}_k = \frac{1}{N_w} \sum_{(x,y) \in W} f_k(x, y),$$

则  $S_k^2$  值最大的图像所对应的位置就是最佳聚焦位置。

用以上方法,通过调整图像窗口 W 的大小,并自适应改变 Z 方向移动的步长,系统实现了对放大 600 倍的微电子芯片电路自动聚焦,聚焦速度基本达到在线检测的要求。

### 4.4 图像自动拼接

扫描样品的尺寸一般都远远超出显微镜的视野,为形成样品的全貌图,必须对样品连续扫描,并将扫描过程中在样品不同位置处采集得到的图像进行拼接。手工拼接存在费时且精度低的缺点,往往达不到预期的拼接效果。系统采用计算机实现自动拼接,大大提高图像拼接的效率和精度。

对于两幅待拼接的图像,若已知它们重叠区域的大致范围,则可在其中一幅图像的重叠区域中选取一模板,然后让模板在另一幅图中进行匹配,在其中搜索最佳配准位置<sup>[3]</sup>。所采集的各幅图像由于光照度的不均,同一观测对象在不同图像中的灰度平均值会有不同程度的偏移,如果直接用采集的图像进行匹配,往往达不到理想的匹配效果。但这种光照度的不均对相邻元素间灰度变化率的影响很小,因此对采集的图像进行锐化,用锐化图像作为寻找匹配点的原始图像,有利于提高匹配精度,锐化算子采用各向同性拉普拉斯算子(Laplacian)<sup>[4]</sup>。考虑到锐化是微分运算,为使高频的孤点噪声不致被放大,在锐化之前,先对图像进行中值滤波。

以锐化图像作为匹配运算的依据，在两幅图像的重叠区域内，以某一点为候选配准位置选取两模板，分别为  $g_1(x, y)$  和  $g_2(x, y)$ ，则均方误差  $E$  为

$$E = \sum_{x,y} [g_1(x,y) - g_2(x,y)]^2 \quad (4)$$

$E$  值最小的点对应的就是最佳配准位置。在图像合成时，还要做一些镶嵌处理，使图像之间的拼接处无明显的痕迹。利用微动平台具有的高精度定位能力，可将可能的最佳配准点限制在很小的区域内，减少计算量。

利用以上算法，对 25 幅微电子掩膜版光学显微图像进行自动拼接，时间约 20 s。图 7 显示了一个集成电路局部图像拼接的情况。

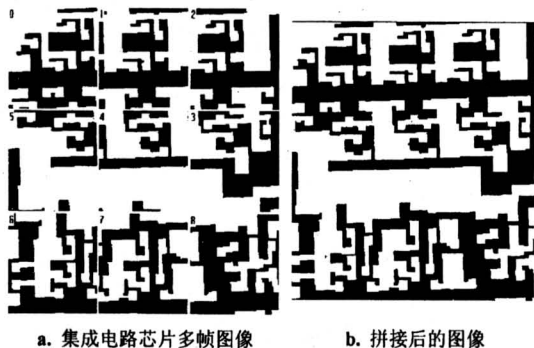


图 7 图像自动拼接示例

Fig.7 Image mosaicking

#### 4.5 STM/AFM 自动逼近

早期的 STM/AFM 在进行正常扫描前，需借助显微镜观察，用手工调节针尖至一定位置后（粗调），STM/AFM 才能正常工作，这是非常麻烦和困难的事情。在 LS-SPM 中，利用三维定位系统实现了探针的自动逼近，取代了原先的手工粗调。

STM 自动逼近的原理：当探针（实际为 Z 向驱动器）尽量伸长仍无隧道电流时，说明样品还在探针的行程之外，这时将探针缩到最短，然后控制三维定位系统下降一个探针行程，再次伸长探针，检测隧道电流，如此反复，直到检测到隧道电流为止，此时三维定位系统再下降半个探针行程，即为探针的最佳位置。自动逼近的流程如图 8 所示。自动逼近的实现，使大范围的自动扫描成为可能。

AFM 自动逼近过程与 STM 相似，只是不检测隧道电流，而是监测针尖是否因受力而产生位

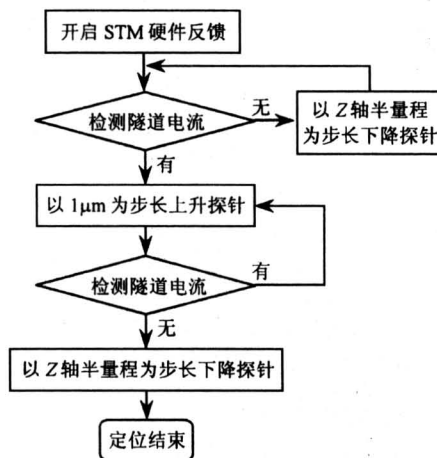


图 8 自动逼近流程图

Fig.8 The flow chart of auto-feeding

移，使四象限管信号发生变化。

#### 5 结语

所介绍的大面积扫描探针显微镜是“九五”国家科技攻关项目，已通过验收。该仪器同时具备较大扫描范围和较高的分辨率，扫描重复性好，并可实现探针的自动逼近、光学显微镜自动聚焦，软件具有图像分析、图像自动拼接、三维立体显示、图像数据管理等功能，为我国微电子工业提供了一种精密检测仪器，填补了国内空白。图 9 为材料表面的三维立体显示。

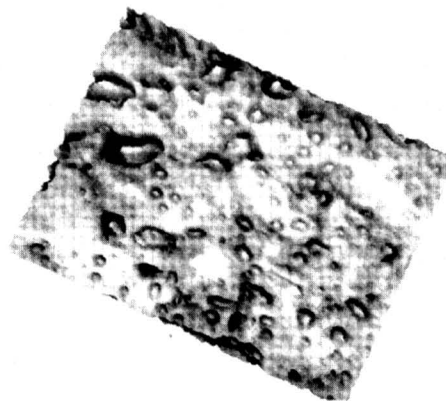


图 9 三维立体显示

Fig.9 Three dimensions stereo display

仪器主要性能指标如下：

- 1) 大范围 X-Y 扫描平台（三维定位系统），扫描范围为 220 mm×290 mm×60 mm，分辨率为 1 μm，定位精度 2~3 μm。
- 2) 微动 X-Y 扫描平台，扫描范围 100 μm



$\times 100 \mu\text{m}$ , 分辨率为 10 nm, 定位精度  $0.1 \mu\text{m}$ 。

3) 扫描隧道显微镜、原子力显微镜探头垂直方向分辨率优于 2 nm, 并实现了探针自动进给。

目前国际上 SPM 技术主要发展方向：一是不强调过大的扫描面积，而是竭力提高 SPM 的精度、重复性等指标；另一个发展方向就是将测量范围扩大到数百毫米，同时加强仪器的自动化性能以及抗干扰能力，使之可以满足工业环境下微电子工业生产的大面积材料检测，使 SPM 从实验室走向实际的生产线。在这一类产品中，Dimension 7000/9000 是其中的佼佼者。从设计思想和服务对象来看，大面积扫描探针显微镜 LS-SPM 比较接近于 Dimension 系列，在大面积检测方面，LS-SPM 系统指标与 Dimension 7000 相当，部分指标见表 2。

LS-SPM 系统已成功地为东南大学微电子中心、华晶电子集团公司等单位进行微电子芯片成像和图像拼接，进行微电子芯片的逆向设计。

表 2 性能比较

Table 2 Performance comparison

	LS-SPM	Dimension 7000
最大采样范围/mm $\times$ mm $\times$ mm	220 $\times$ 290 $\times$ 60	200 $\times$ 200 $\times$ 12
定位分辨率/ $\mu\text{m}$	1	1
重复定位精度/ $\mu\text{m}$	2~3	$\approx 2$
最大扫描范围/ $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	100 $\times$ 100	90 $\times$ 90
Z 轴动态范围/ $\mu\text{m}$	4	6

## 参考文献

- [1] Binning G, Rohrer H, Gerber C, et al. Surface studies by scanning tunneling microscopy [J]. Phys Rev Lett, 1982, 49 (1): 57~61
- [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] 于为, 郁道银. 医学超声图像的处理与拼接 [J]. 中国生物医学工程学报, 1997, 16 (3): 253~257
- [4] Castleman K R. Digital image processing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998

## Large Scale Scanning Probe Microscope

Lu Xiaobo<sup>1</sup>, Lu Zuhong<sup>2</sup>, Zhou Qing<sup>2</sup>, Wang Guozhu<sup>2</sup>

( 1. Research Center for Intelligent Transportation Systems, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Key Laboratory of Molecular and Biomolecular Electronics of MOE, Southeast University, Nanjing 210096, China )

[Abstract] This paper introduces a type of large scale scanning probe microscope, which adopts the scheme of the separation of large scale scanning from high precise scanning, and the separation of X - Y scanning from vertical detection. The instrument has the advantages such as good repeatability, large scanning scale as well as high resolution. The large scale scanning range is 220 mm $\times$ 290 mm $\times$ 60 mm and the repeatability is 2~3 $\mu\text{m}$ . The instrument achieves the auto-feeding of the probe, the auto-focusing of the optical microscope and the auto-mosaicking of the scanning image.

[Key words] scanning probe microscope; auto-feeding; auto-focusing; image mosaicking