

# 一种探测传感器式的扫描力显微镜的研制

陈晓梅<sup>1</sup> 马晓芬<sup>1</sup> 朱振宇<sup>1</sup> 杨德良<sup>2</sup>

(1 中国一航北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

(2 中科院化学所本原纳米仪器公司, 北京 100083)

**摘要:** 本文主要介绍了用于扫描力显微镜并带动探针运动的扫描器的研制。利用该扫描器, 研制了能安装在纳米测量机上作为探测传感器的上扫描力显微镜。扫描力显微镜与中科院化学所本原纳米仪器公司的扫描探针显微镜控制器联接进行实验测试, 在 $23\mu\text{m}\times 23\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ 的扫描范围对样品进行了扫描成像。经测试、分析和计算, 在全量程扫描范围内横向和纵向分辨率分别为 $0.35\text{nm}$ 和 $0.1\text{nm}$ 、在未有软件补偿的情况下横向满量程扫描范围内精度为5%。

**关键词:** 扫描力显微镜 (SFM), 纳米测量机 (NMM), 扫描器。

**中图分类号:** TH742 **文献标识码:** B

## Development of a SFM of probing sensor look-alike

Chen Xiaomei<sup>1</sup> Ma Xiaofen<sup>1</sup> Zhu Zhenyu<sup>1</sup> Yang Deliang<sup>2</sup>

(1 Changcheng Institute of Metrology and Measurement(CIMM), Beijing 100095China)

(2 Chemistry Institute of Chinese Academy Science, Beijing 100083China)

**Abstract:** This paper mainly introduces the development of a cantilever driving scanner. Based on this scanner a up-scanning mode of SFM has been developed which was originally aiming at mounting on the top of NMM as a probing sensor. SFM was connected to electronic control unit of CSPM a nano-instrument of CBeing<sup>TM</sup> to do experiment and test. As a result, it successfully scanned and imaged the sample within  $23\mu\text{m}\times 23\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$  scanning range. Tests, analysis and calculations shows that its lateral and vertical resolutions are  $0.25\text{nm}$  and  $0.1\text{nm}$  respectively on all axes for all scan sizes, and lateral accuracy is 5% on lateral axes for all scan sizes without any software and hardware correction and compensation.

**Keywords:** Scanning force microscope (SFM), Nanomeasuring machine (NMM), Scanner

纳米级探测传感器是纳米测量机 (NMM) 在  $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$  空间范围内实现分辨率  $0.1\text{nm}$ 、测量不确定度为  $1\text{nm}$  和  $25\text{mm}\times 25\text{mm}\times 5\text{mm}$  的空间范围内实现分辨率为  $1.24\text{nm}$ 、测量不确定度小于  $10\text{nm}$ 、量值可直接溯源到光波波长的三维坐标测量的关键。其测量标准器具是以双纵模稳频激光器为光源的激光干涉仪。实现上述测量精度需要传感器在布局上能在三个坐标方向消除 Abbe 误差, 即三台纳米级微型平面镜干涉仪的测量轴正交于探测传感器的测量点与被测对象的接触点。根据不同的测量范围, 探测传感器可以是扫描探针显微镜 (SPM)、激光定焦显微镜 (LFS) 或其他探测类型传感器等。但纳米测量机零 Abbe 误差点处有限的空间上只能安装结构上紧凑、看似探头式的传感器。为解决  $100\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$  范围内的标准台阶高度、标准沟槽深度和标准栅格样品等纳米实物尺寸标准的计量与校准问题需要在 NMM 上的零 Abbe 误差点处安装

类似扫描探针类显微镜这样高分辨率的探测传感器, 因此我们提出了研制外观和结构酷似传感器这样并能安装在纳米测量机上作为探测传感器的扫描力显微镜 (SFM)。

扫描力显微镜系统由扫描力显微镜和控制系统组成。而扫描力显微镜由扫描器和悬臂梁探针弯曲探测系统等组成。其基本原理是: 将一个对微弱力极敏感的  $100$  到  $200$  微米长的微悬臂一端固定, 另一自由端有一个几个微米长、直径小于  $10\text{nm}$  的微小针尖, 针尖与样品表面相对逼近时, 由于针尖尖端原子与样品表面原子间存在极微弱的原子间力, 使得微悬臂先是由于吸引力向下弯曲后是排斥力向上弯曲。在扫描时控制这种力的恒定, 带有针尖的微悬臂将沿针尖与样品表面原子间作用力做等位面运动。利用光学检测法或隧道电流检测法, 可测得微悬臂对应于扫描各点的位置变化, 从而可获得样品表面形貌的信息。

## 1 扫描力显微镜扫描方式的选择

扫描力显微镜根据扫描实施的方式可分为图 1 和图 2 所示的扫描器带动扫描探针在被测样品上扫描（简称为上扫描），用以区别于图 3 所示的扫描器带动被测样品扫描而扫描探针不动的扫描方式（简

称为下扫描方式）。上扫描全跟踪方式的扫描力显微镜和下扫描方式的扫描力显微镜占地体积大，看起来像台仪器而不像是个传感器；上扫描全跟踪方式扫描范围大、未有残余跟踪误差。但负载质量大，z 方向伺服反馈慢，扫描速度慢，也是体积大。上扫描半跟踪模式的扫描力显微镜负载小，扫描频率高。缺点是部分跟踪、有残余未跟踪误差存在。

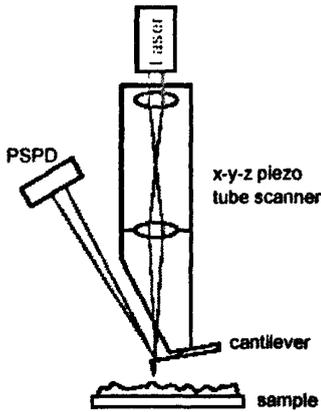


图 1 上扫描半跟踪方式 SFM

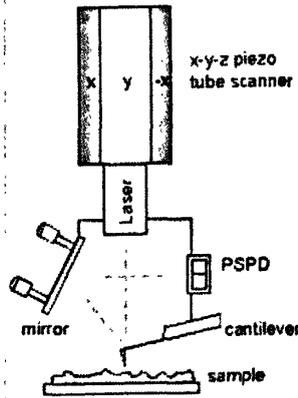


图 2 上扫描全跟踪方式 SFM

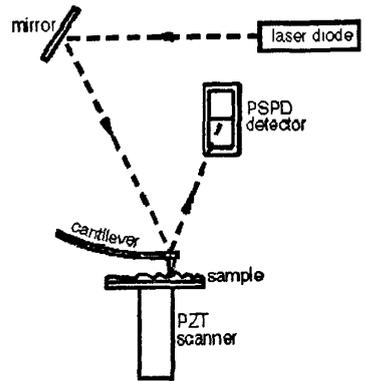


图 3 下扫描方式扫描力显微镜

纳米测量机需要结构上紧凑、看似传感器探头的扫描力显微镜安装在这样的位置使悬臂梁探针位于零Abbe误差点上而不占用过多的空间。而且纳米测量机的机械结构和“水平运动就是纳米测量机的X轴和Y轴微工作台的运动而垂直运动是探测传感器的位移和纳米测量机的Z轴微工作台的运动的组合”的工作模式需要扫描力显微镜扫描器的Z轴伺服反馈移动去实现快速扫描从而节省测量时间，因而只有上扫描半跟踪模式的扫描力显微镜的结构紧凑、看似传感器外形，虽然有残余未跟踪误差存在，但可通过结构设计减小该误差。况且作为探测传感器安装在纳米测量机上后额外的X和Y扫描只是用来帮助把悬臂梁探针调到被测样品上感兴趣的区域内。

## 2 扫描力显微镜上驱动悬臂梁探针运动的扫描器

对上扫描方式扫描器最重要的是激光光点能保持在悬臂梁探针的背面的同一位置上不动或变动很小，并能跟踪上悬臂梁原子力探针随着扫描器在控制电压下运动扫描被测样品表面。图2所示的半跟踪设计模式，采用一个四象限分割电极压电陶

瓷管作为x-y方向扫描管，采用另一个全电极的压电陶瓷管作为z向扫描管，一个会聚透镜安装在x-y压电扫描管的上方，用于把激光器发出的发散激光束会聚成像，把另一个会聚物镜安装在两个扫描管之间连接处，既起部分光学跟踪作用又与会聚透镜一起把激光器发出的发散激光束会聚成像在悬臂梁探针的背面。但是单一物镜跟踪的范围实在是有限，使得激光光束未能完全跟踪上探针而引起的残余误差较大，况且由于两个压电陶瓷管都伸缩，把散发的激光光束成像在悬臂梁探针背面所需要的两个光学成像物镜之间的相对位置是不固定的，将多个光学成像物镜安装在一个扫描管的内部结构很复杂、调整困难。

本文作者首先设计了上扫描力显微镜上驱动悬臂梁探针作扫描运动的扫描器。图4为该扫描器的设计原理图。它包括把x-y-z一体的四象限分割电极的压电陶瓷扫描管2、一端固定于壳体上的连接套1，绝缘隔离垫片4，套管5，用于安装悬臂梁探针8的专用扫描探针卡具7，圆柱形光学平行玻璃3和光学会聚物镜6；压电陶瓷扫描管一端固定于壳体上的连接套，另一端与套管的上端相接，套管的下端安装带有悬臂梁探针的扫描探针卡具；压电陶

瓷扫描管与套管内壁固定胶粘接在圆柱形光学平行玻璃的圆柱面上；在套管的顶端内壁平行玻璃的下方安装光学会聚物镜，使得平行准直的激光束会聚到悬臂梁探针的背面；压电陶瓷扫描管通过驱动细电缆线接到压电陶瓷伸缩控制驱动器上。压电陶瓷扫描管带动悬臂梁探针扫过被测样品表面，具有 $20\mu\text{m}\times 20\mu\text{m}\times 5\mu\text{m}$ 的扫描范围。

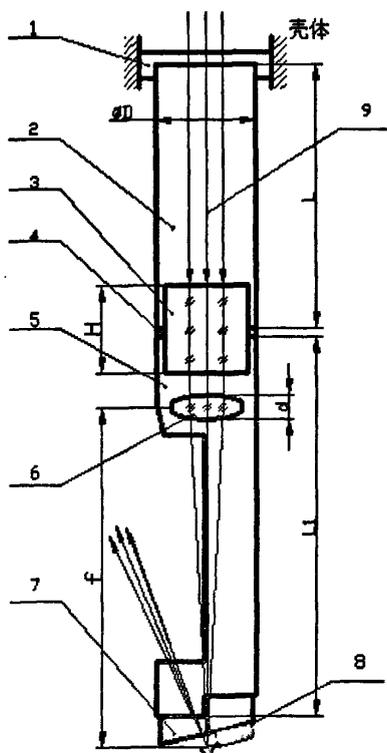


图4 扫描器原理图

图5为根据图4的扫描器原理图所设计的扫描力显微镜的实施原理图。在图5中，当压电陶瓷扫描管2与套管5通过压电陶瓷伸缩控制驱动器控制带动扫描探针卡具7上的悬臂梁探针8沿被测样品表面的水平x和y两方向扫描探测时，光学平行玻璃3和光学会聚物镜6作为光学跟踪两个器件共同随着扫描管摆动扫描时偏转由激光准直器9发出的激光光束，使悬臂梁探针8背面的激光点在很大程度上跟随悬臂梁探针一起扫描。当压电陶瓷管2伸长和缩短时，由于套管是不可伸缩的，所以平行准直激光束的设计使得悬臂梁探针8背面的激光光斑大小不变。经另一物镜11和光学转向镜12成像在

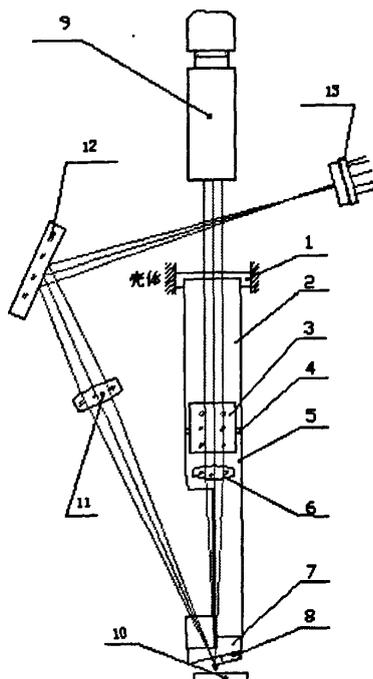


图5 扫描力显微镜原理图

光电位置接受器13上的反射激光束也随着悬臂梁探针的向上或向下弯曲使得成像光斑位置发生变化，继而可测得微悬臂对应于被测样品10扫描各点的位置变化，从而可以获得样品表面形貌的信息。各主要元器件的设计如下：

### 2.1 压电陶瓷管的选择

选择四象限分割式的压电陶瓷管。管长30mm，外径 $\phi D=12\text{mm}$ ，内径 $\phi d=10\text{mm}$ 。

### 2.2 光源的选择

通常图1所示的上扫描半跟踪扫描力显微镜中选用的是普通的激光二极管。根据本设计图4的扫描器原理图，选用带尾纤准直输出激光光束光源，输出功率2mW，准直光束直径1mm。选择带尾纤准直器联接的激光器的另一优点是激光器的发热不会传递到扫描力显微镜的内部。

### 2.3 上扫描半跟踪方案的设计

选择凸透镜和光学平行玻璃共同作为半跟踪器件。优点是跟踪量是凸透镜跟踪量和平板玻璃跟踪量之和。这在很大程度上减小了未跟踪误差。图6为平板玻璃的部分跟踪原理。在图6中， $L$ 是压电陶瓷管的长度， $h$ 为光学平行玻璃厚度。设在电压作用下，压电陶瓷扫描管带动光学平行玻璃由0位置转动到1位置，此时，入射准直激光束相对1位置

处的光学平行玻璃的入射角为  $a_1$ ，折射角为  $a_2$ ，则由光学折射公式

$$\sin a_2 = \frac{1}{n} \sin a_1 \quad (1)$$

其中， $n$ 为玻璃的红光折射率（波长为656.27nm）。

因为  $n > 1$ ，所以  $\sin a_2 < \sin a_1$ ，从而折射激光束的中心未能在1位置处射到悬臂梁探针背面的中心点。设  $S$ 为跟踪上的距离，则

$$\begin{aligned} S &= (H / \cos a_2) \cdot \sin(a_1 - a_2) \\ &= H \left[ 1 - \frac{\cos a_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 a_1}} \right] \cdot \sin a_1 \end{aligned} \quad (2)$$

因为  $a_1$  和  $a_2$  都很小，所以  $\cos a_1 \approx 1$ ， $\sin a_1 \approx a_1$ 。

$$\begin{aligned} S &= H(a_1 - a_2) = H \left( 1 - \frac{1}{n} \right) a_1 \\ &= H \left( 1 - \frac{1}{n} \right) \cdot \frac{\Delta x \text{ 或 } \Delta y}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

其中， $\Delta x$ 或 $\Delta y$ 是压电陶瓷管 $x$ 或 $y$ 方向的扫描位移。可见玻璃的红光折射率越高，折射角 $a_2$ 越小，越有利于跟踪，光学平行玻璃越厚（ $H$ 值越大），越有利于跟踪。设悬臂梁探针针尖的背面到光学平行玻璃底端中点的距离为 $h$ ，设悬臂梁探针中心在1位置相对0位置的偏移量为 $\Delta x'$ （见图中的 $\sigma$ ）。

$$\text{则 } \frac{L+h}{\Delta x'} = \frac{L}{\Delta x} \quad (4)$$

$$\text{所以 } \Delta x' = \frac{\Delta x}{L} (L+h) \quad (5)$$

未跟踪上的距差为

$$\Delta S = \Delta x' - S = \frac{\Delta x}{L} \left( L+h - \frac{H}{n} \right) \quad (6)$$

其中 $\Delta x$ 或 $\Delta y$ 为 $6\mu\text{m}$ ， $L=30\text{mm}$ ， $h=40\text{mm}$ 。K9冕玻璃的红光折射率为 $n=1.51$ ，光学平行玻璃厚 $H=10\text{mm}$ ，则跟踪上的距离 $S=0.67\mu\text{m}$ 。

关于凸透镜的跟踪原理不再赘述。在本设计原理图4中，在套管5的上端内壁平行玻璃3的下方安装光学会聚物镜6，物镜焦距 $f$ 大于 $(\phi_D + \phi_d) / (2 \times \tan 24^\circ)$ （ $\phi_D$ 为平行准直激光束直径， $\phi_d=1\text{mm}$ ），其水平安放的位置使物镜主光轴与套管和压电陶瓷扫描管的中心线重合，垂直安放位置上下可调，物镜和平行玻璃之间不接触，距离上留有

几个毫米，最佳位置是使得会聚物镜的中心到悬臂梁探针的背面的距离等于该物镜的焦距 $f$ ，因而平行准直的激光束9被其会聚到悬臂梁探针的背面。

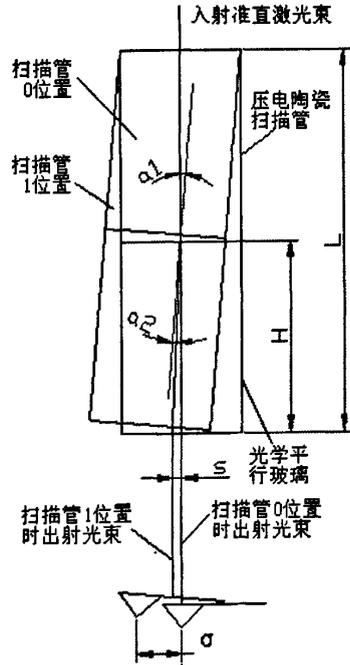


图6 平板玻璃的部分跟踪原理

### 2.4 套管的设计

在图4所示的扫描器原理图中，压电陶瓷扫描管9通过套管5加长，套管起到放大作用从而实现人的扫描范围。套管的长度足以使得其上端安装的光学胶合会聚物镜6能把准直激光束会聚成像到安装在其下端的专用扫描探针卡具上的悬臂梁探针的背面。其长度 $L_1 \geq f + (H+d)/2$ ，而且套管长度使得压电陶瓷扫描管 $x$ 和 $y$ 方向的扫描范围扩大了至少 $(L_1/L)$ 倍。在图7所示的套管立体图中，可见套管5左侧有一个开槽，开槽面积 $(h \times w)$ 及其相对底边的位置的设计能使从悬臂梁探针背面反射出的发散激光束全部通过而不被套管遮拦。套管底部的半圆筒套的设计是为了在该处安装卡有悬臂梁探针的探针卡具时定位用的。

### 2.5 扫描力显微镜卡具的设计

图8为配合图7所示的套管结构而设计和制作的扫描力显微镜上使用的、用于安装悬臂梁探针的探针卡具立体说明图。它包括悬臂梁探针垫块1、悬臂梁探针2、小磁铁（镶嵌在悬臂梁探针垫块1内）3、悬臂梁探针卡具零件4和紧固小螺钉5等。粘好悬臂梁探针的探针垫块靠磁力从底部被吸在探针

卡具零件的通渠处，磁力大小远远大于沿被测表面扫描测量时探针和被测表面之间的摩擦力，且又能保证粘有悬臂梁探针的探针垫块易于更换和安装上后能左右移动以保证悬臂梁探针的背面处于圆心的中心。探针卡具将从下部定向、定位地套到图7所示的扫描器的套管上并用中径为M的紧固小螺钉把探针卡具锁紧在扫描器的套管上。它带动粘有悬臂梁探针的探针垫块随扫描管前后、左右沿被测表面扫描。入射激光束毫无阻拦地通过探针卡具射向悬臂梁探针的背面。

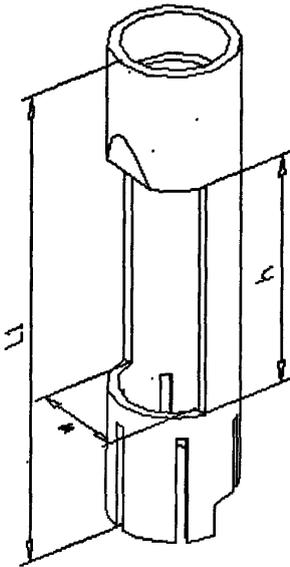


图7 套管的机械结构

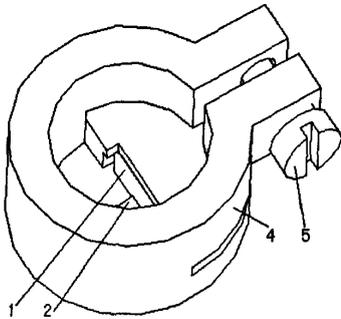


图8 安装悬臂梁探针的探针卡具

### 3 扫描力显微镜的设计和制作

基于所设计的上扫描半跟踪模式的扫描力显微镜，设计了扫描力显微镜。图9是根据图5的原理所设计的扫描力显微镜实物照片（前盖卸掉）。

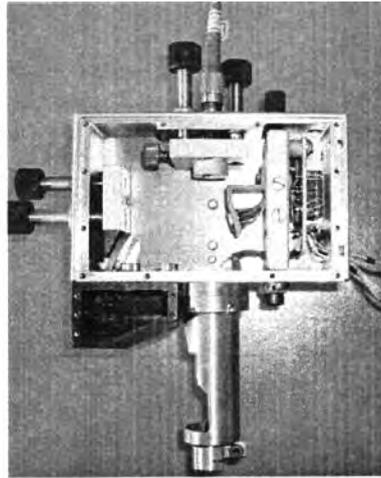


图9 所研制的扫描力显微镜实物

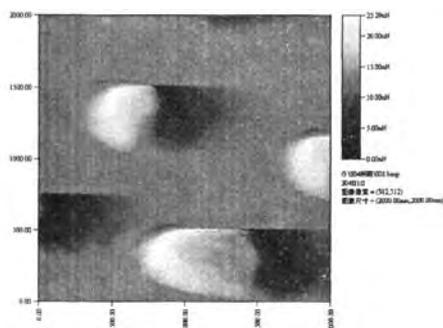
### 4 扫描力显微镜试验测试和结果分析

图10为扫描力显微镜与中科院化学所本原纳米仪器公司的CSPM扫描探针显微镜控制器的对接，并对DVD光盘表面进行了试验测试不同扫描范围的DVD盘片表面形貌扫描测量图。扫描力显微镜总体机构中设计有燕尾滑动导轨，用于将扫描力显微镜安装在立柱和工作台上，借用立柱和工作台完成了与CSPM控制系统的联机调试、测试等一系列试验。

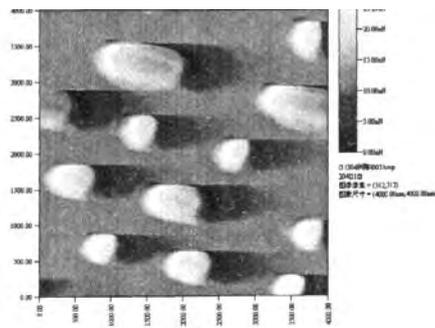
由于压电陶瓷扫描管的非线性、迟滞、蠕变、压电陶瓷扫描管四相限电极分割的不均匀和x轴与y轴实际上扫描运动交叉耦合到z上等一些缺点，扫描范围愈大，图像畸变愈严重，清晰度也愈差。例如图10中 (d) 图像的畸变就比其他图像的严重，清晰度也差。由于迟滞，对同一被测样板某个区域在对电子控制系统的设置不变的情况下反复扫描后得到的多幅图像也不可能完全重合。篇幅所限只列举图11所示的 $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ 扫描范围重复扫描的前2幅和最后2幅图像为例，从4幅图像中椭圆和矩形所标志的DVD盘片位置特征的变化即可看到压电陶瓷管的迟滞对图像扫描位置稳定性的影响，用SPIP图像分析软件对4幅图像进行分析计算，即计算矩形标志框中大圆粒中心由(a)图中的位置变化到(d)图中的位置的变化，发现图像在x方向平移了大约 $0.1\mu\text{m}$ 而在y方向平移了大约 $2\mu\text{m}$ 。同理分析计算椭圆标志框中长圆粒边缘最高点和最右点的位置变化，发现图像在x方向平移了大约 $0.1\mu\text{m}$ 而在y方向

平移了大约 $1.5\mu\text{m}$ 。这说明了由于y方向非线性 and 压电陶瓷扫描管四相限电极分割的不均匀的影响使得椭圆标志框和矩形标志框位置中的特征位移变化不同。由此计算到y方向5%的非线性、x方向小于1%的非线性。另外可从4幅图像中矩形标志框中大圆粒由(a)图中的长椭圆形变化到(d)图中的圆形,其y方向变化量约为 $0.14\mu\text{m}$ 、x方向变化量约为

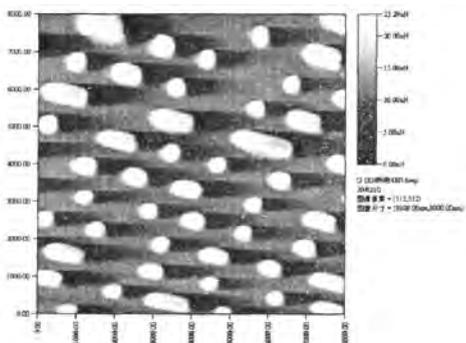
$0.02\mu\text{m}$ , 这同样说明了非线性引起的畸变。以上扫描试验是在没有CSPM任何软件和硬件修正的情况下完成的。实际上压电陶瓷扫描管的非线性、蠕变等缺点是可以靠计算机控制和处理软件来修正和补偿的,迟滞是可以通过外加位移传感器等硬件测控反馈来弥补的,这既是所谓的计量型扫描力显微镜。



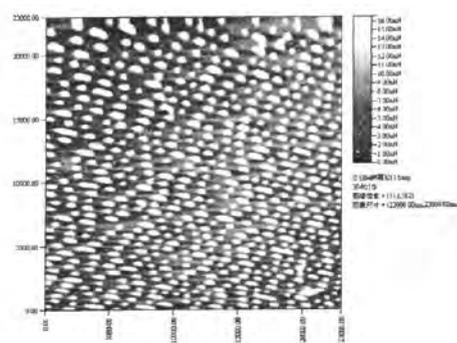
(a) 成像图( $2\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ )



(b) 成像图( $4\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$ )

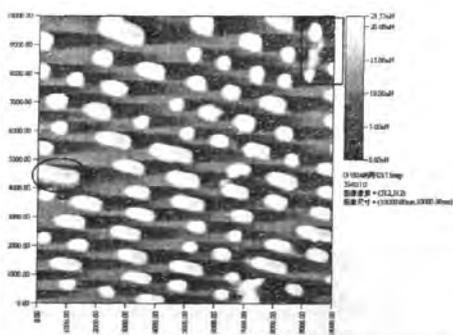


(c) 成像图( $8\mu\text{m}\times 8\mu\text{m}$ )

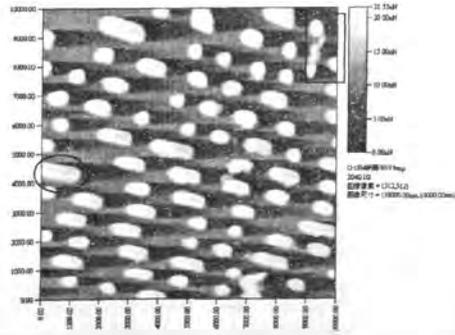


(d) 成像图( $23\mu\text{m}\times 23\mu\text{m}$ )

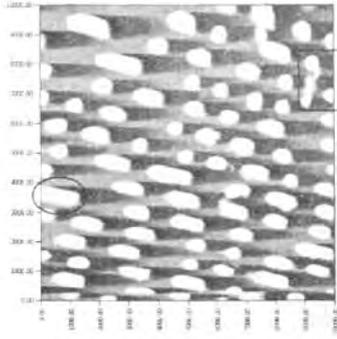
图10 DVD盘片表面形貌扫描测量图



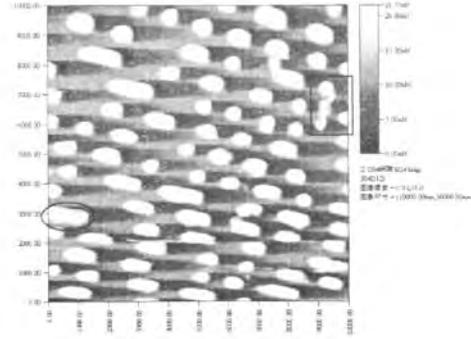
(a)  $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$



(b)  $10\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$



(c) 10µm×10µm



(d) 10µm×10µm

图11 同一位置同一扫描范围的重复扫描图像

### 5 结语

自主研发了一个上扫描半跟踪模式的扫描力显微镜，经实验测试该扫描力显微镜扫描范围为23µm×23µm×5µm、横向和纵向分辨率分别为0.35nm和0.1nm、在没有任何软件补偿和硬件测控的情况下横向扫描精度为5%。它可以单独作为扫描力显微镜使用，但很快它将被安装在纳米测量机上作为探测传感器，在100µm×100µm×5µm空间范围内对台阶高度标准样板、沟槽深度标准样板和栅格类线间隔标准样板进行校准测试实验，届时扫描力显微镜的x和y向扫描将只作为额外的扫描功能用于将扫描力显微镜悬臂梁探针搁置在被测样板感兴趣的区域内，x和y的扫描将由纳米测量机的纳米级x和y电动位移台来完成。

#### 参考文献：

[1] G. Jaeger, Nanomeasuring machine, MICRO Tec 2000 Hannover; 2000:551-556  
 [2] L. Koenders, Scanning Probe Microscopy—from Atomic Scale to Millimeter, Proceeding of CIMM-PTB Seminar, Beijing 2003: 1-10.  
 [3] J.Kramar, J.Jun, etc., The Molecular Measuring Machine, Proceedings of the 1998 International conference on mechatronic Technology(ICMT'98), Hsinchu, Taiwan, 1998:477-487.  
 [5] Gaoliang Dai, Frank Pohlentz etc., Metrological large range scanning probe microscope, Review of Scientific Instruments, 2004, 175(4): 962-969

[5] Gaoliang Dai, Ludger Koenders etc, Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings, Measurement Science Technology, 2005(16): 1241-1249.  
 [6] U. Brand, J. Flugge, Measurement capabilities of optical 3D-sensors for MST applications. Microelectronic Engineering, 1998(41/42): 624-626.

#### 作者简介：

陈晓梅：女，1961 年出生，毕业于哈尔滨工业大学，工学硕士，从事图像处理与视觉检测应用技术和光纤传感测量应用技术研究。现主要从事纳米计量测试与校准技术研究。