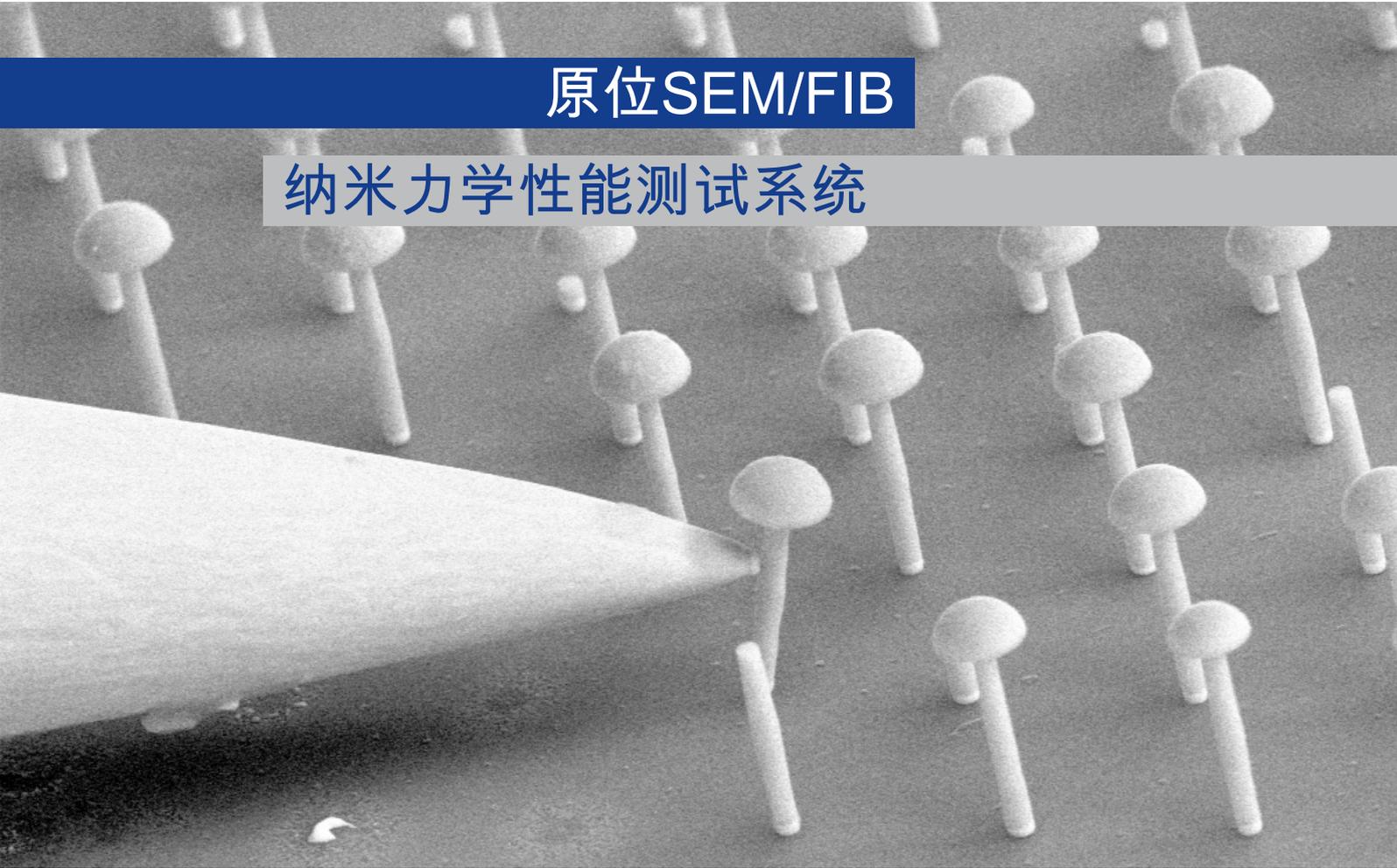


原位SEM/FIB

纳米力学性能测试系统



FT-NMT03  
纳米力学性能测试系统



FT-NMT03

纳米力学性能测试系统



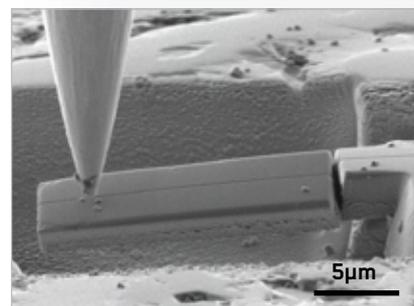
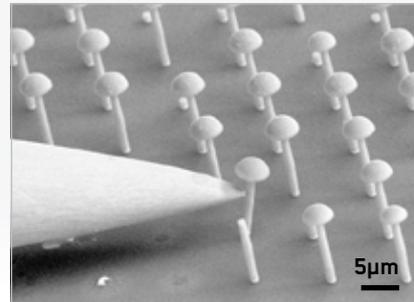
# 内容

|                   |    |
|-------------------|----|
| 系统简介              | 3  |
| 系统配置和技术参数         | 5  |
| 力学测试和微操作软件        | 7  |
| 应用实例: 纳米力学测试      | 9  |
| 应用实例: 电学和力学性能同步测试 | 12 |
| 配件                | 13 |
| 技术参数              | 14 |

## 纳米力学性能测试系统

FT-NMT03纳米力学性能测试系统是一款可在SEM/FIB中对微纳米材料和结构的力学性能进行原位、直接而准确测量的纳米机器人系统。测试原理是通过微力传感探针对微纳结构施加可控的力,同时采用位移记录器来测量该结构的形变。从测得的力和形变(应力-应变)曲线可以定量地分析微纳米结构的力学性能。通过控制加载力的大小和方向,可实现拉伸、压缩、断裂、疲劳和蠕变等各种力学测试。同时,其配备的导电样品测试平台可以对微纳米结构的电学和力学性能进行同步测试。

绝大多数的纳米力学测试都需要复杂的样品制备过程。为了使样品制备简单化和人性化,FT-NMT03采用能够感知力的微镊子和不同形状的微力传感探针针尖来实现对微纳结构的精确提取、转移直至将其固定在测试平台上。总而言之,集合纳米操作以及力学-电学性能同步测试功能于一体的FT-NMT03能够满足几乎所有的纳米力学测试需求。



### 特点

能同时实现SEM/FIB高分辨成像和纳米力学性能测试

力学测量范围0.5nN-200mN(9个数量级)

位移测量范围0.05nm-21mm(9个数量级)

五轴(X,Y,Z,旋转,倾斜)闭环控制保证样品和微力传感探针的精确对准

能在SEM/FIB最佳工作距离下实现高分辨成像(可达4mm)以及FIB切割和沉积

能够通过力和位移两种控制模式实现各种力学测试,例如拉伸、压缩、弯曲、剪切、循环和断裂测试等

五轴(X,Y,Z,旋转,倾斜)位移记录器实现样品台上多样品的自动测试和扫描

电性能测试模块能够实现力学和电学性能同步测试(样品座配备6个电极)

导电的微力传感探针可有效减少荷电效应

实现力学性能测试与其他SEM/FIB原位分析手段联用,如EDX、EBSD、离子束沉积和切割

兼容于SEM本身的样品台,安装和卸载快捷方便

模块化设计使系统适用于各种形貌样品的测试需求及各种SEM/FIB配置

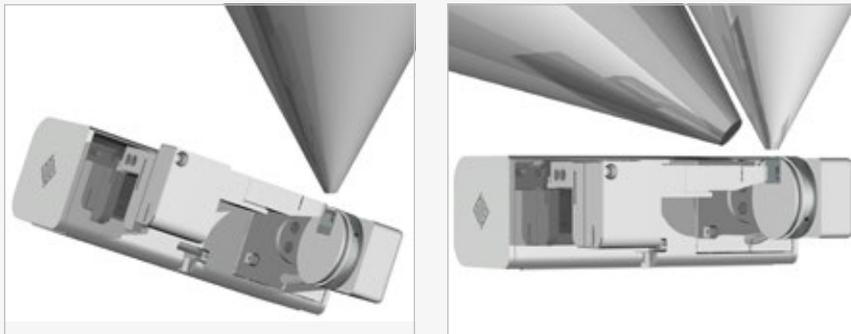
紧凑的外形设计适用于各种全尺寸的SEM/FIB样品室

用户可设计自定义的测试程序和测试模式



- 1 FT-NTP纳米力学测试平台,是一个5轴纳米机器人系统,能够在绝大部分全尺寸的SEM中对微纳米结构进行精确的纳米力学测试。
- 2 FT-nMSC模块化系统控制器,其连接纳米力学测试平台,同步采集力和位移数据。其最大特点是该控制器提供硬件级别的传感器保护模式,防止微力传感探针和微镊子的力学过载。
- 3 FT-nHCM手动控制模块,其配置的两个操控杆方便手动控制纳米力学测试平台。
- 4 带接线口的SEM法兰,实现模块化系统控制器和纳米力学测试平台的通讯。
- 5 FT-SH传感器接头,其配置的4个不同型号的连接头,可满足各种不同的测试条件(平面外或者平面内测试)和不同的测试距离。
- 6 FT-SB样品基座适配头,其配置的4个不同型号的适配头用来调节样品台的高度和角度。
- 7 FT-ETB电学测试样品台,包含2个不同的电学测试样品台,实现样品和纳米力学测试平台的电导通。
- 8 FT-S微力传感探针和FT-G微镊子,实现微纳力学测试和微纳操作组装(按需额外购买)。

## 与SEM/FIB系统配合使用



FT-S微力传感探针的精巧设计使得FT-NMT03纳米力学性能测试系统能够在SEM的最佳分析工作距离下测试。另外,其紧凑的设计能够在力学测试的同时进行离子束的沉积和切割。这可用于在拉伸测试中样品与微力传感探针针尖的粘合和移除。

## 系统配置和技术参数

FT-NMT03纳米力学性能测试系统是一款拥有5轴自由度的SEM原位微纳结构力学性能测量系统。外观尺寸为100x35x71mm,能够集成于绝大部分全尺寸的SEM/FIB中。基于MEMS的微力传感探针由3轴压电陶瓷驱动,移动范围为21x12x12mm。微力传感探针的力学测量范围为0.5nN-200mN。可旋转和倾斜的样品台确保样品和传感探针的精确对准。5个位移驱动器都配置了高分辨率的光栅位移记录器,可实现驱动器的闭环控制和自动化测量。另外,配置的线性压电扫描器拥有0.05nm的位移测量分辨率。这6个纳米级精度位移驱动器的配合使用,可使位移驱动范围从0.05nm到21mm,跨度达9个数量级。由于其精巧的微力传感探针和紧凑的系统设计使得该系统可在SEM图像最佳的工作距离下工作(通常SEM的最佳工作距离是5-10mm)。

### 力学测试指标

#### 力学测量

- 最大量程: 200mN
- 力学分辨率: 0.5nN@10Hz
- 最高测量频率: 96kHz

#### 位移测量

##### 粗调

- 位移范围: 21mm
- 位移分辨率: 1nm@10Hz
- 最大测量频率: 50Hz

##### 精调

- 位移范围: 25um
- 位移分辨率: 0.05nm@10Hz
- 最高测量频率: 96kHz

#### 微力传感探针和样品的对准

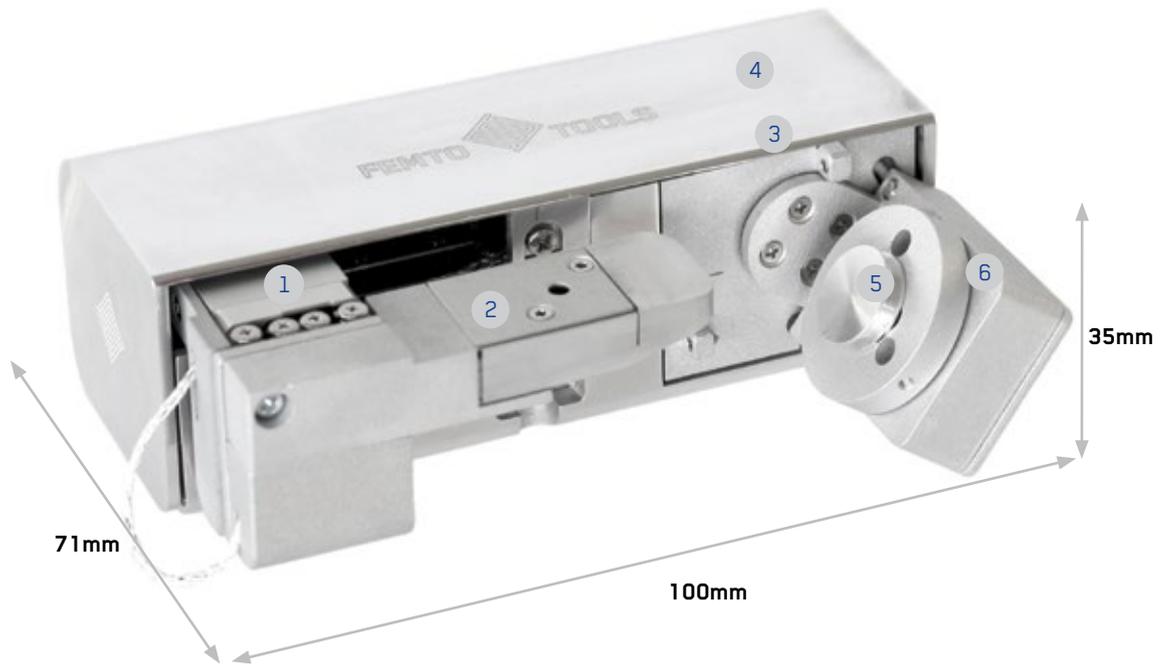
- X,Y,Z闭环控制,移动范围为21x12x12mm,分辨率为1nm
- 倾斜和旋转范围分别为90°和360°,角分辨率为35微度

#### 微力传感探针针尖选配

- 平头,50x50um
- 钨针,尖端半径<0.1um,<2um或<5um
- 球形针尖,球半径为125um或25um
- 用户定制

#### 外观尺寸

- 长: 100mm
- 宽: 71mm
- 高: 35mm



- ① 3轴纳米定位平台,位移驱动范围为21x12x12mm,分辨率为1nm
- ② FT-S微力传感探针,力学测量范围为0.5nN-200mN(按需额外购买)
- ③ 倾斜样品台,可选配角度记录器,角度测量分辨率为35微度
- ④ 挠曲型线性压电扫描器,可连续快速移动,位移范围为25 $\mu$ m,分辨率为0.05nm
- ⑤ 样品台基座可兼容1"和1/2"SEM样品座
- ⑥ 旋转样品台,可选配角度记录器,角度测量分辨率为35微度

## 代表性的系统构造



## 力学测试和微操作软件

与FT-NMT03配套的FT-W1003力学测试和微操作软件包含以下三部分:

- FT-WFS微力测试软件
- FT-WGS微操作软件
- FT-WMS模块化力学测试软件

FT-WFS和FT-WGS是用于微软Windows操作系统的图形用户界面,用户友好界面让微力测试和微操作简单易行。FT-WMS是基于LabVIEW的库文件,以使用户生成自定义的微力测试程序。

### FT-WFS微力测试软件

FT-WFS微力测试软件实现力-位移-时间的自动测量,可测试如下力学性能:

- 刚度
- 弹性和塑性变形
- 线性
- 滞后
- 断裂强度和韧性
- 尺寸/形貌
- 形变范围
- 粘合力
- 驱动力

用户友好的图形用户界面具备自动接触探测模式,保证微力传感探针快速而安全地接近样品表面。软件使测量数据(比如力和位移、力和时间数据等)可视化,可记录和导出数据(.txt或.xls)。

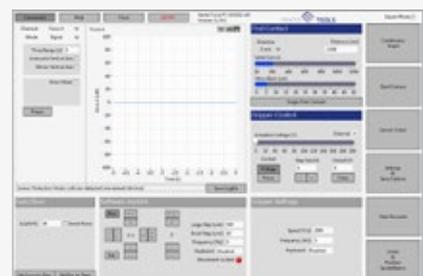
FT-WFS微力测试软件能够实现自动化单个位置或多个位置的重复测量,这一功能可以实现循环测试或针对感兴趣区域进行阵列测试。阵列测试的典型应用是测试感兴趣区域的形貌或刚度分布图。

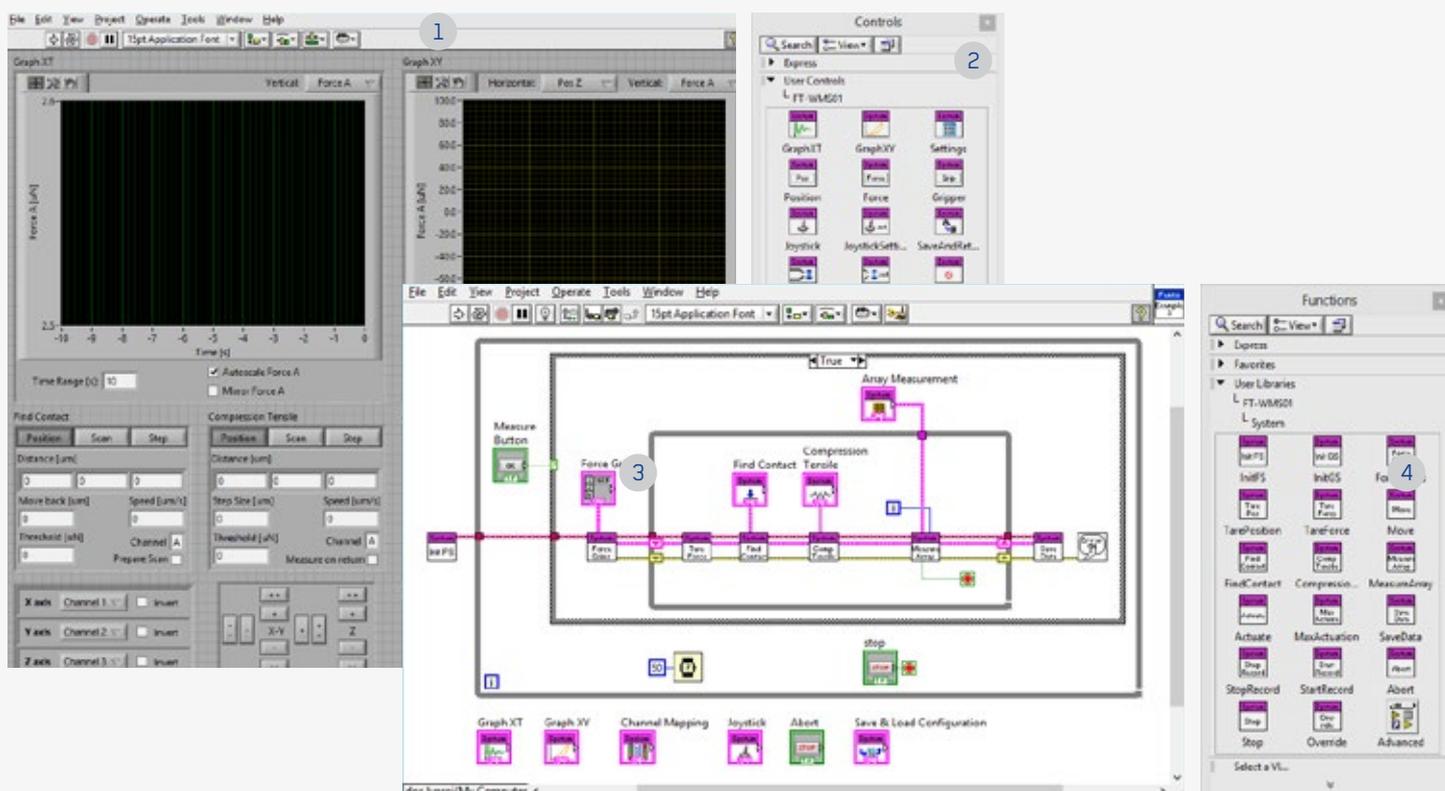


### FT-WGS微操作软件

FT-WGS微操作软件方便用户利用图形界面直观地进行复杂的微纳样品提取和转移操作与微装配。软件的主要功能有:

- 微镊子的高精度定位
- 夹持力的闭环控制
- 微镊子夹持力反馈,测量数据的可视化和输出(.txt或.xls)
- 软件限位功能可定义安全工作区域及防止微镊子过载
- 位置保存和返回功能使微操作任务重复进行





FT-WMS模块化力学测试软件方便用户设计自定义微力测试流程。基于LabVIEW的软件库包含预定义的构件,用户仅需要通过简单的拖拽动作来组装这些构件,从而生成自定义的测试序列。在生成自定义测试序列的过程中,FT-WMS模块能自动生成用户界面上的控件和图形元素。另外,提供的软件库能与其他LabVIEW兼容的软件和硬件结合使用。随盘提供的说明文档和示例程序可进一步指导用户开发自定义的微力测试序列。

- ① 自定义微力测试程序的图形界面
- ② FT-WMS模块化力学测试软件的图形用户界面控制器
- ③ 自定义测试程序的框图
- ④ FT-WMS模块化力学测试软件中的功能库

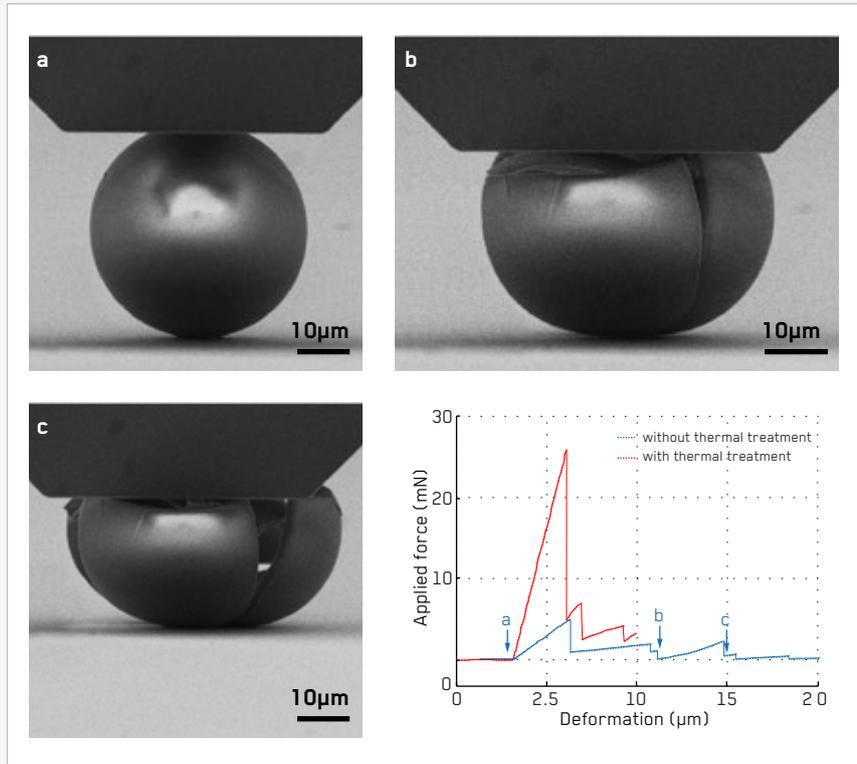
## 特点

- 支持微软Windows操作系统的图形用户界面
- 测量数据的可视化、记录和输出
- 接触保护模式保证微力传感探针安全地接近样品表面
- 压缩/拉伸、粘合力 and 弯曲测试
- 循环、疲劳和蠕变测试
- 自动化对线、面和体积测试
- 用户自定义测试软件库
- 构建用户自定义测试流程的教程文件

## 纳米力学测试

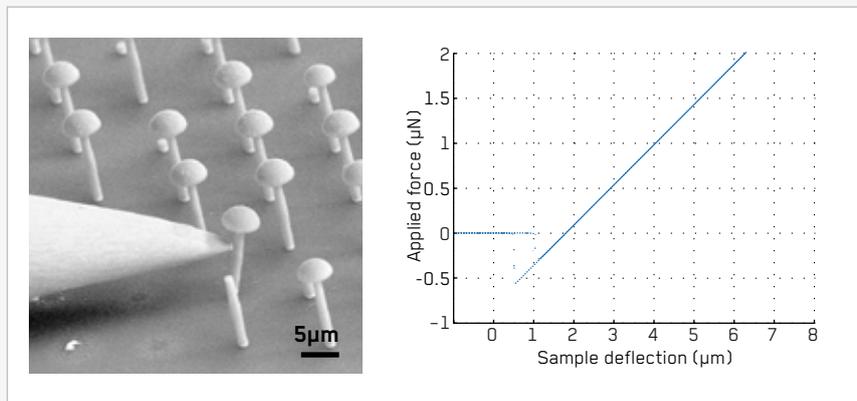
### 轻质纳米复合材料的表征

系统地研发新型轻质高强材料要求准确地对它们的力学性能进行表征。基于纳米结构(如纤维、颗粒和泡状结构)的复合材料由于其出色的强度和刚性受到越来越多的关注。UC Santa Barbara大学的Daniel S. Gianola教授研发了刚性中空微米颗粒增强的高分子基复合材料。研发此类轻质材料,测试和调控这些中空微球的力学性能至关重要。通过使用原位SEM纳米力学性能测试系统,Gianola教授发现这些拥有纳米颗粒薄壁的中空微球经过热处理后其刚度增加了14倍。



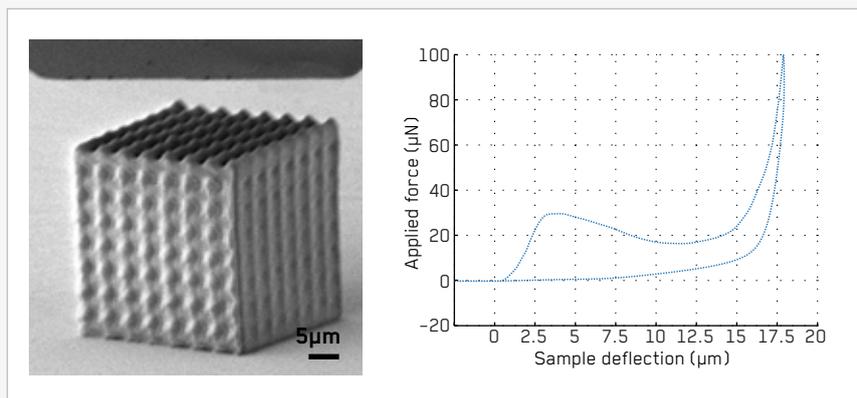
### 3D金属纳米柱的面内纳米力学性能测试

纳米结构具有高的表面积/体积比,可以用来制造高灵敏的传感器,例如气体传感器。利用纳米光刻和电沉积相结合所制备的三维纳米金属结构,其材料性能和几何形貌具有很大的差异。原位纳米力学测试系统能够定量地表征这些结构的力学性能。图片来自ETH Zurich的Bradly Nelson教授。

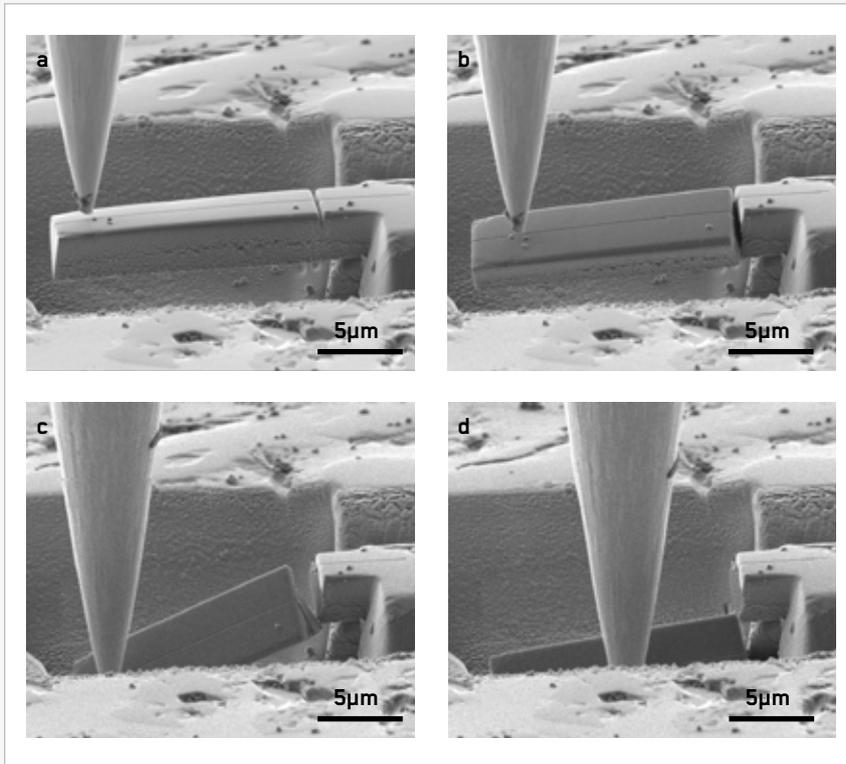


### 微支架的压缩测试

微型支架已用于不同的领域,例如材料科学领域的超轻材料以及生物学领域中用来培养人工组织的支架,这些结构需要预定的机械刚度来满足细胞生长所需的环境。原位压缩测试用来分析这些支架在坍塌之前和之后的弹性和塑性等力学性能。图片来自瑞士ETH Zurich。



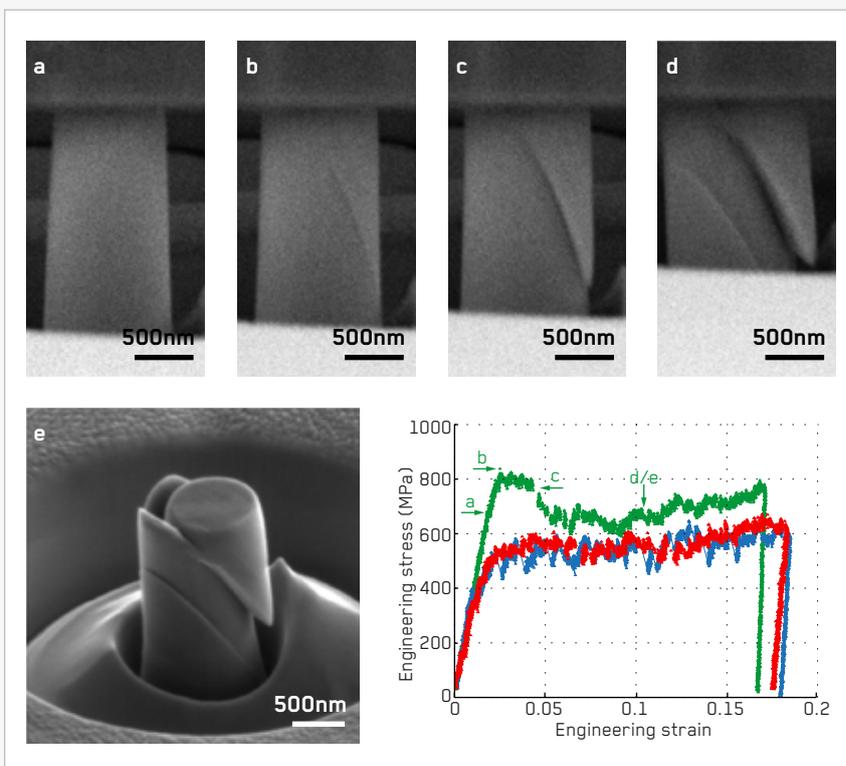
## 微纳尺度下人字形切槽断裂测试



左图中的人字形切槽断裂实验是非常重要的表征微纳材料力学性能的标准方法之一(图片来自Mortensen教授,机械冶金实验室,EPFL,瑞士)。尤其是对晶体材料,纳米尺度的力学性能是深入理解材料结构-性能相互关系的一种有效途径。

原位纳米力学性能测试系统可在SEM中对微纳材料进行力学测试,同时也可与SEM中配备的分析探测器配合使用,例如背散射电子衍射(EBSD)。这种组合能够研究材料的力学行为与晶体学微观信息之间的关联作用,例如和透射电子菊池衍射技术(Transmission Kikuchi Diffraction)联用来研究应力作用下晶粒及晶向的变化。

## 微柱体中剪切带的定量表征

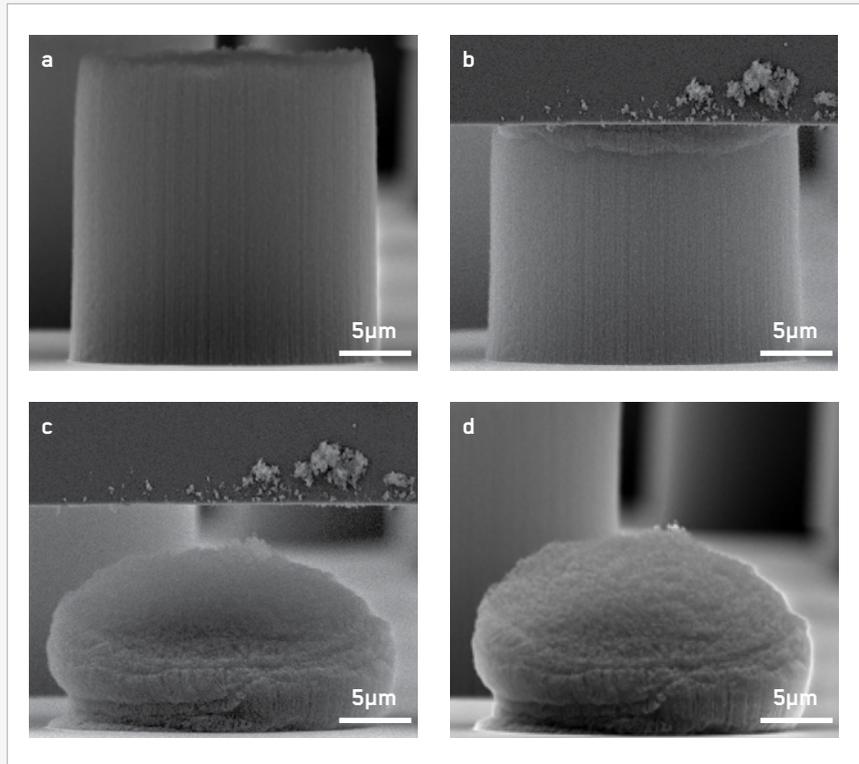


针对高辐射环境下,如原子核反应堆和太空中,使用的材料,定量分析辐射对负载材料的力学影响是非常有必要的。原位SEM纳米力学性能测试系统能够对微柱体进行压缩测试,并高分辨地记录应力-应变曲线。左图显示了经受强辐射后的微柱体塑性变形的形貌以及应力-应变曲线(图片来自UC Santa Barbara大学的Daniel S. Gianola教授)。

压缩的微柱经过线性弹性区间后(a),可以观测到样品的宏观屈服和局部剪切形核(b)。随着应变的增大,剪切带进一步扩展直至柱体表面,此时应力骤降(c)。随后,应力的降低来源于原子平面的平行滑移(d)。

## CNT柱的单轴压缩测试

平行排列的碳纳米管(CNT)柱在柔性电池、热界面材料和3D超级电容器方面有很大的应用潜能。这些CNT柱的力学性能不仅与单个的CNT力学性能有关,而且与CNT的排布密度和管与管间的相互作用力有关。右图显示了单轴压缩实验表征CNT柱的力学性能。首先,将微力传感探针和样品台上的CNT柱精确对准(a)。然后,对CNT柱施加预定的载荷,测试系统记录力和位移数据,同时通过SEM获得微结构形变的高分辨图像(b)。用户可实时跟踪柱体的塑性变形(c)以及载荷释放后柱体的应力松弛过程(d)。图片来自UC Santa Barbara大学的Daniel S. Gianola教授。



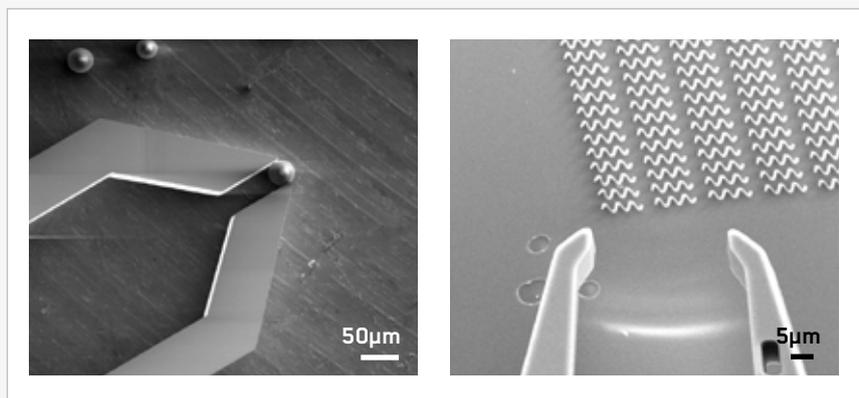
## 纳米结构的拉伸测试

沿长轴方向拉伸是定量表征纳米线和纳米螺旋结构力学性能的重要手段。FT-NMT03系统能够精确提取和转移纳米结构,并将样品放置于样品台和微力传感探针之间。样品的固定可采用FIB中的离子束诱导沉积或者SEM固化胶。图片来自瑞士ETH Zurich。



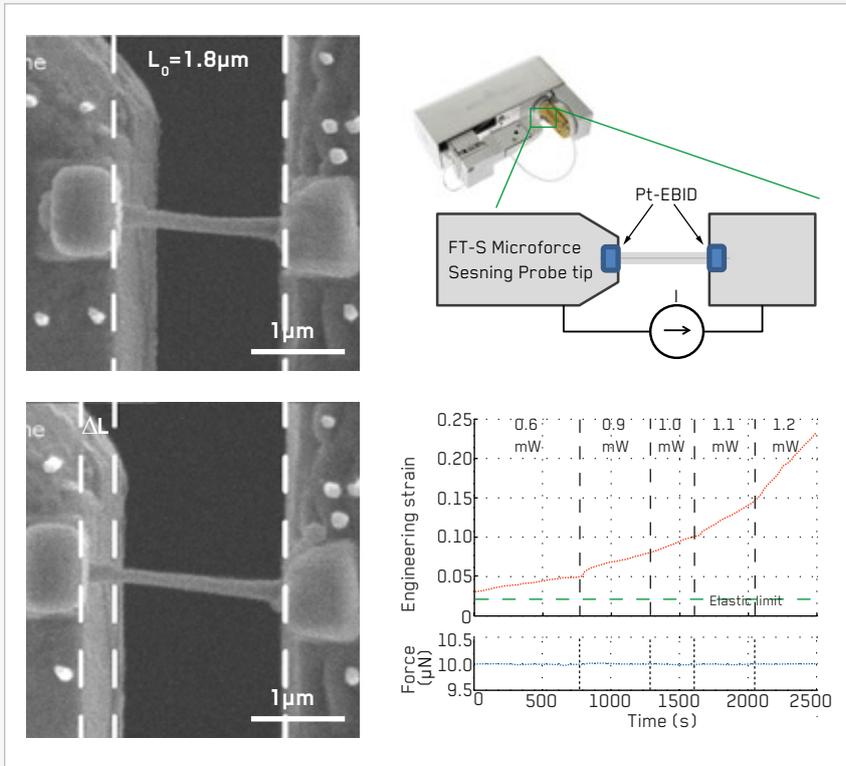
## 纳米结构的操作和装配

纳米结构的力学测试实验通常需要将试样置于特定的位置或特定的方向。FT-NMT03系统配备的5轴自由度微力传感探针能够对样品进行纳米级别的操作和装配。小样品的提取和转移可利用样品与微力传感探针之间的静电吸引力来实现。对于较大样品的操作和装配可使用FT-G微镊子。



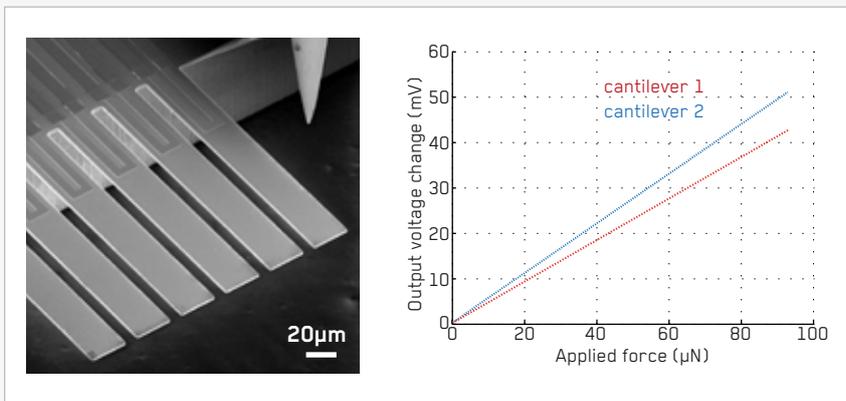
# 电学和力学性能同步测试

## 金属玻璃纳米线的热机械蠕变测试



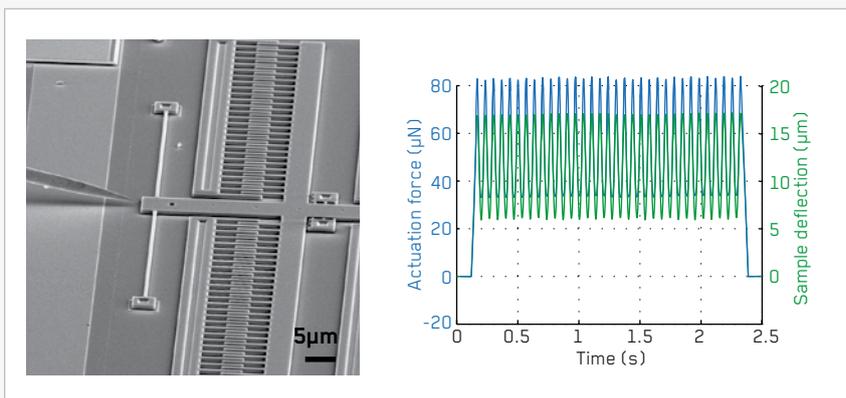
金属玻璃由于其独特的力学性能,如高弹性极限和高断裂韧性,而受到越来越多的关注。而且,其宽的过冷液态区间开启了超塑成形的材料加工工艺。因此定量研究金属玻璃的热机械行为是至关重要的。右图显示了针对金属玻璃超塑性性能的研究。金属玻璃纳米线通过Pt基电子束沉积方法固定在FT-S微力传感探针和样品台之间。在进行蠕变测试时(施加固定拉伸力来测量样品的形变量),采用对纳米线通电加热来控制纳米线温度。这样可测试纳米线在不同温度下的热机械蠕变性能。图片来自UC Santa Barbara大学的Daniel S. Gianola教授。

## 压阻微悬臂梁的阵列测试



压阻微悬臂梁阵列在气体传感器、存储器 and 纳米光刻等领域有广泛的应用。原位纳米力学性能测试系统能够实现自动对阵列中的每个悬臂梁进行力学(刚度、线性、断裂力等)及电-力学性能测试(电阻和力曲线)。图片来自瑞士NTB。

## MEMS/NEMS的平面内和平面外力学测试



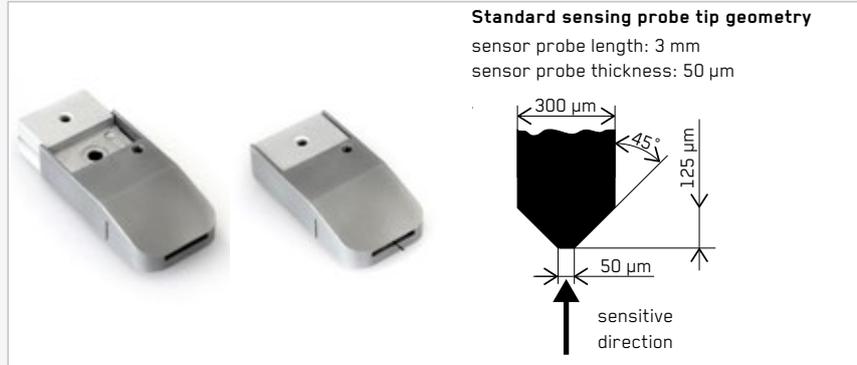
MEMS的小型化趋势使得MEMS的尺寸不断减小,已达到纳米尺度。受限于光学显微镜的分辨率,原来在光学显微镜下可进行的力学测试已无法满足需求。由于SEM更高的分辨率,原位SEM纳米力学性能测试系统可用于定量表征MEMS/NEMS的电学和力学性能。

## FT-S微力传感探针

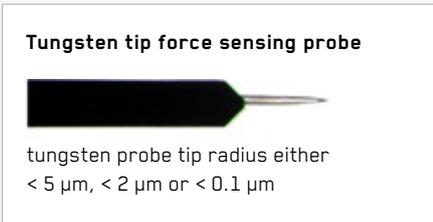
FemtoTools公司的FT-S微力传感探针能够精确探测沿探针轴向的力,其力学测量范围从200mN( $10^{-1}$ N)到亚nN( $10^{-10}$ N)。拉伸力和压缩力都可测量。FT-S微力传感探针提供五种不同的探针针尖可供选择:

- 硅材质平头,尺寸为50x50 $\mu$ m
- 钨针尖,尖端半径<5 $\mu$ m,<2 $\mu$ m或<100nm
- 球形针尖,球半径为125 $\mu$ m或25 $\mu$ m

每个微力传感探针的单独校准加上它们优异的长期稳定性保证其测量准确度优于任何在这个力学区间的力学传感器。每个微力传感探针提供相应的校准数据。



| Model       | Range              | Resolution |
|-------------|--------------------|------------|
| FT-S200     | +/-200 $\mu$ N     | 0.5nN      |
| FT-S2'000   | +/-2'000 $\mu$ N   | 5nN        |
| FT-S20'000  | +/-20'000 $\mu$ N  | 50nN       |
| FT-S200'000 | +/-200'000 $\mu$ N | 500nN      |



Microforce sensing probe-with tungsten tip option

FT-S200-TP

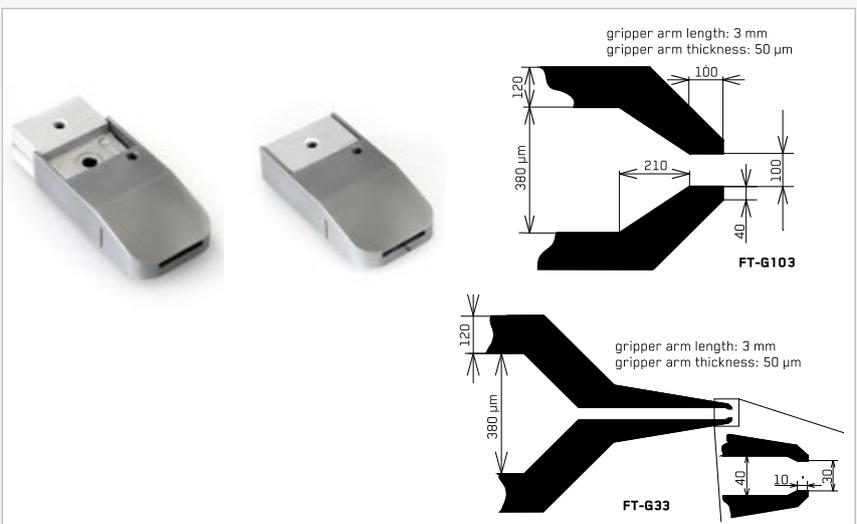
FT-S2'000-TP

FT-S20'000-TP

## FT-G力传感微镊子

FT-G微镊子系列是专门为微纳样品的操作和组装而设计。FT-G33型微镊子的开口尺寸为30 $\mu$ m,FT-G103的开口尺寸为100 $\mu$ m。开口大小的控制精度达纳米级,最大驱动电压对应镊子完全闭合状态。

FT-G33和FT-G103均带有集成的力传感器,能够在夹持的同时测量夹持力。夹持力的反馈大大增强了自动化微纳操作的效率和可靠性。



| Model   | Opening       | Force Sensor |
|---------|---------------|--------------|
| FT-G33  | 0-30 $\mu$ m  | yes          |
| FT-G103 | 0-100 $\mu$ m | yes          |

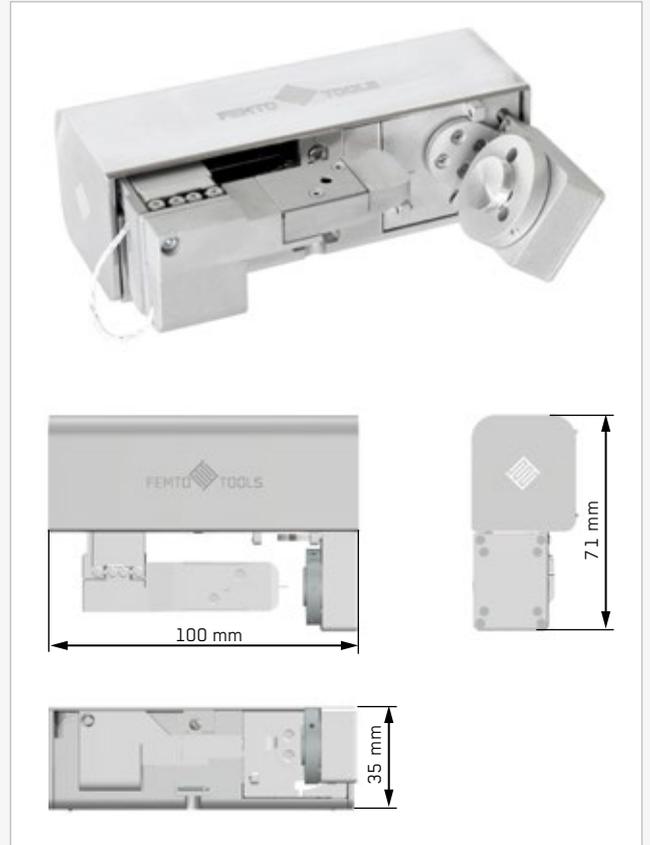
## FT-NMT03纳米力学性能测试系统

### FT-NTP纳米力学测试平台

|                        |                |
|------------------------|----------------|
| 驱动轴数(粗调)               | 5              |
| 驱动原理(粗调)               | 压电粘滑           |
| XYZ驱动范围(粗调)            | 21mmx12mmx12mm |
| 最小步进(粗调)               | 1nm            |
| 驱动原理(精调)               | 压电扫描           |
| 驱动范围(精调)               | 25 $\mu$ m     |
| 最小步进(精调)               | 0.05nm         |
| 位移记录器分辨率               | 0.05nm         |
| 位移测量范围                 | 0.05nm-21mm    |
| 样品倾斜范围                 | 90°            |
| 样品倾斜分辨率                | 35 $\mu$ °     |
| 样品旋转范围                 | 360°           |
| 样品旋转分辨率                | 35 $\mu$ °     |
| 最大测力范围 <sup>*1)</sup>  | $\pm$ 200mN    |
| 最小测力分辨率 <sup>*2)</sup> | 0.5nN          |

\*1)采用FT-S200\*000微力传感探针

\*2)采用FT-S200微力传感探针



### FT-nMSC模块化系统控制器

|         |   |
|---------|---|
| 主要功能    | 力的采集<br>控制纳米力学测试平台<br>位置读取<br>微镊子控制<br>数据同步 |
| 传感器保护模式 | 轴向保护<br>自动接近样品                              |
| 电学样品测试  | 配6个电极的样品台                                   |
| 操控杆控制   | 硬件操控杆<br>软件模拟操控杆<br>电脑键盘                    |
| 接口      | USB   |
| 电源      | 12V(110V/230V)                              |





FemtoTools AG  
Furtbachstrasse 4  
8107 Buchs / ZH  
Switzerland

T+41 44 844 44 25  
F+41 44 844 44 27

info@femtotools.com  
www.femtotools.com