

## 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量

吴俊杰, 李源

引用本文:

吴俊杰, 李源. 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(10): 2252–2259.

WU Jun-jie, LI Yuan. Three-dimensional coordinate measurement of microstructures based on nano measuring machine[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(10): 2252–2259.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202810.2252>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 双测头复合型微纳米测量仪的研制

Development of double probe composite micro-and nano measuring instrument

*光学精密工程*. 2020, 28(2): 415–423 <https://doi.org/10.3788/OPE.20202802.0415>

### 用于多传感器坐标测量机探测误差评价的薄环规标准器

Thin ring gauge artifact for probing error evaluation of multi-sensor coordinate measuring machine

*光学精密工程*. 2016, 24(3): 521–525 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162403.0521>

### 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定

Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target

*光学精密工程*. 2015, 23(3): 678–685 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152303.0678>

### 变异机制粒子群优化的摄像机内参数校准

Mutation mechanism particle swarm optimization for camera internal parameter calibration

*光学精密工程*. 2019, 27(8): 1745–1753 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192708.1745>

### 叶片进排气边光学测量系统的实现

Establishment of optical measuring system for blades edges

*光学精密工程*. 2017, 25(10): 2744–2751 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172510.2744>

文章编号 1004-924X(2020)10-2252-08

# 基于纳米测量机的微结构三维坐标测量

吴俊杰, 李 源\*

(上海市计量测试技术研究院 机械与制造计量技术研究所, 上海 201203)

**摘要:**针对当前微纳米测量中存在的微结构跨尺度、高精度测量及高深宽比结构多参数表征问题,基于纳米测量机和微接触测头构建了纳米坐标测量系统。通过对测头与定位平台机械、电气及软件接口的设计,实现测头与平台的集成,并利用标准球对测量系统进行校准。为保证测量结果的可溯源性,对定位平台三轴激光干涉仪的激光器进行了拍频。最后,利用搭建的测量系统对高度  $10\ \mu\text{m}$ ,  $2\ \text{mm}$  的超高台阶及硅臂卡爪的侧壁倾角进行了测量,表明系统具备大尺寸结构的高精度测量和复杂 MEMS 器件特征尺寸的精确表征能力。

**关键词:**微纳米测量; 纳米测量机; 三维微接触测头; 高深宽比; 侧壁倾角

**中图分类号:** TH711 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202810.2252

## Three-dimensional coordinate measurement of microstructures based on nano measuring machine

WU Jun-jie, LI Yuan\*

(Division of Mechanics and Manufacture Measurement Technology,  
Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

\* Corresponding author, E-mail: liyuan@simt.com.cn

**Abstract:** To realize the trans-scale and high-precision measurement of microstructures, as well as to perform multiple geometrical parameter characterizations of some high-aspect-ratio structures, a nano coordinate measurement system was developed based on a nano measurement machine and a micro tactile probe. The mechanical, electrical, and software interfaces between the probe and positioning platform were designed. After the integration of the probe and positioning platform, the measurement system was calibrated using a standard micro ball. To ensure traceability of the measurement results, the laser sources of three interferometers in the positioning platform were also calibrated using the laser beat frequency. Finally, ultra-high steps with heights of  $10\ \mu\text{m}$  and  $2\ \text{mm}$  and the sidewall angle of a silicon arm were measured using the developed system. The experiments indicated that the system can accurately measure large-size structures and complex MEMS devices.

**Key words:** micro-and nano measurement; nano measuring machine; 3D micro tactile probe; high aspect ratio; sidewall angle

收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-05-11.

基金项目: 上海市市场监督管理局科技项目资助 (No. 2019-02); 上海市青年科技英才扬帆计划资助项目 (No. 19YF1441700); 国家重点研发计划资助项目 (No. 2019YFB2004904)

## 1 引言

纳米测量技术是纳米科技发展的基础和保障,随着微纳加工技术的快速发展,器件特征尺寸和与之关联的公差不断减小,而其形状结构的复杂程度却不断增加,对微纳尺度的几何量检测提出了更高的要求。近年来,超精密加工中产生的微孔、微槽、侧壁、自由曲面等结构的测量问题日益突出,这些结构的尺寸一般在毫米、微米尺度,并要求达到纳米级精度。因此,解决高深宽比、大尺寸器件的高精度测量和表征问题显得尤为迫切<sup>[1]</sup>。

目前,接触式坐标测量仍是生产测量技术领域通用的测量手段。该方法通过一根探针探测样品表面,获取接触点的空间坐标,然后改变位置逐点重复该过程或拖动探针在样品表面扫描,获取样品表面特征的点云信息,从而实现测量。与光学方法相比,接触式测量法测量范围大、重复性好,且不受样品表面光学特性及光学衍射极限的影响。对于微纳尺度的接触测量而言,其测量力小,横向和纵向探测精度都很高,且可实现高深宽比结构的测量。接触式测量有多种传感方式,如基于电容、电感、压电、压阻等原理,也有与光学原理相结合的,其共同特征是测量过程中测头通过一根探针与样品接触,扫描样品表面,进而得到样品表面轮廓<sup>[2-3]</sup>。

在微纳坐标测量领域,通常采用高分辨的微接触测头结合高精度的定位平台构建测量系统,典型的有英国国家物理实验室(NPL)研制的基于电容传感器的三维微接触测头,结合自研的 Small CMM 测量平台构建的微纳坐标测量系统;德国联邦物理研究院(PTB)研制的薄膜结构压阻测头,结合商用坐标测量平台构建的 Special CMM;荷兰 IBS 精密工程公司在代尔夫特理工大学研制的定位平台基础上,集成 NPL 的电容测头和埃因霍温大学的压阻测头,构建的 Isara 系列超精密坐标测量机<sup>[4-7]</sup>。

此外,类似的研究成果还有德国卡尔蔡司的 F25、日本三丰的 UMAP、合肥工大的纳米坐标测量机等<sup>[8-11]</sup>。此类仪器的核心技术主要包括精密定位平台、高精度测头和测量软件三部分。其中,精密定位平台正朝着大范围、高精度、可溯源的方

向发展;微接触测头主要往低测量力、高分辨力和低测量不确定度方向发展;测量软件也在测量效率、误差补偿和数据后处理等方面不断完善<sup>[12-13]</sup>。

本文针对微纳米测量中存在的大范围、高精度测量需求和高深宽比结构三维表征难题,基于商用纳米测量定位平台,采用压阻型三维微接触测头作为零点定位传感器,构建了测量范覆盖 25 mm × 25 mm × 5 mm,测量分辨力达到纳米量级的微纳米坐标测量系统,并采用标准球对测头探测误差进行校准。最后,利用搭建的测量系统对超高台阶、硅臂侧壁倾角进行了测量。

## 2 测量系统构建

### 2.1 纳米测量定位平台

本文采用德国 SIOS 公司的 NMM-1 型纳米测量机作为纳米测量定位平台,NMM-1 最早由德国伊尔梅瑙工业大学的 G. Jager 教授团队开发,后经 SIOS 公司商业化。NMM-1 可在 25 mm × 25 mm × 5 mm 范围内,实现三轴方向 0.1 nm 的定位分辨力。仪器主要由计量模块、定位驱动模块和控制系统组成,采用零阿贝误差设计,其计量框架和驱动机构分离,计量框架采用零膨胀玻璃加工,以保证良好的热稳定性。仪器计量模块包括三个激光干涉仪和两个角度传感器,三个激光干涉仪呈正交分布,其光路交汇于一点,用于记录运动平台三轴方向的位置,两个角度传感器分布在 X 和 Y 方向,用于监控样品台的俯仰、偏摆和滚转,并实时反馈给控制系统进行修正。仪器的计量学框架如图 1 所示。

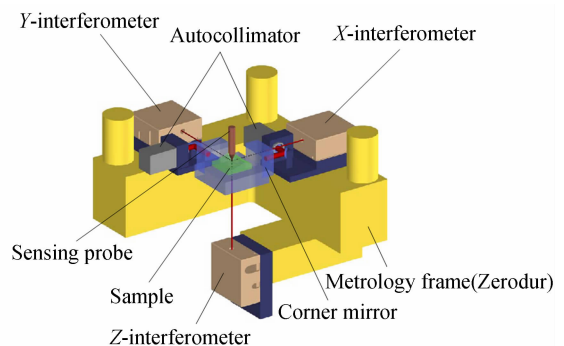


图 1 NMM-1 计量框架

Fig. 1 Metrological structure of NMM-1 (Courtesy of SIOS Meßtechnik GmbH)

平台  $X, Y$  轴采用线性滑轨配合直流线性马达驱动, 最小定位分辨力取决于闭环控制系统及激光测长系统的分辨力;  $Z$  轴采用滚柱导轨配合四组音圈马达驱动, 用于调整平台的位姿。仪器采用开放式的软硬件接口, 便于集成不同类型的测头。定位平台控制器可接收测头输出的电压信号, 并根据反馈信号控制平台运动, 实现测量。仪器可集成激光聚焦测头、白光干涉测头、原子力显微镜测头及微接触测头等不同类型和功能的测头, 以实现不同尺度、不同结构及不同表面特性的样品测量。

## 2.2 三维微接触测头

相比传统的三坐标测头, 三维微接触测头具有结构简单、接触力小、灵敏度高等优点。本文采用荷兰 Xpress 公司的 Gannen-XP 压阻型三维微接触测头与定位平台进行集成, 构建三维纳米坐标测量系统。该测头传感范围  $30 \mu\text{m}$ , 三轴重复性  $2 \text{ nm}$ , 并搭载长度  $6.8 \text{ mm}$ , 测端球直径  $120 \mu\text{m}$ ,  $300 \mu\text{m}$  和  $500 \mu\text{m}$  三种探针, 可进行模拟扫描测量和触发测量。测头采用三梁拓扑弹性悬挂结构, 如图 2 所示。该结构具有接触力各向同性的特点, 测头接触力为  $0.4 \text{ mN}/\mu\text{m}$ 。

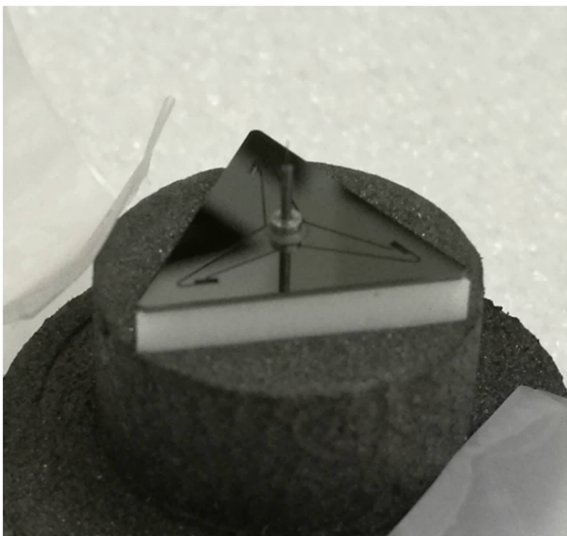


图 2 Gannen-XP 测头  
Fig. 2 Gannen-XP probe

测头悬挂结构采用体硅 MEMS 工艺加工, 悬梁末端厚度仅为几微米, 并通过刻蚀、沉积和离子注入等复杂半导体工艺制作压阻条, 构建敏感电

桥, 进而将针尖受力后引起的微位移转换为电信号。测头三梁末端均设置了惠斯通电桥, 电桥输出的三路模拟电压信号经信号调理模块处理后, 反馈至纳米测量机控制器, 用于对定位平台的控制。

## 2.3 测头集成及校准

测头与纳米测量机的集成工作主要包括机械集成、电气集成和软件集成三部分。在机械集成中, 根据测头和纳米测量机安装单元尺寸, 采用热膨胀系数较低的殷钢材料, 设计了测头的夹持机构; 在电气集成中, 采用 BNC 接口, 将测头输出的三路模拟信号输入至纳米测量机控制器的 DSP 单元, 作为定位平台测量控制过程中的反馈信号; 在软件集成中, 采用与纳米测量机控制软件相同的 Matlab 语言, 实现 3D 测头软件模块的无缝嵌入。测量系统工作时, 测头静止不动, 由定位平台驱动样品, 实现三轴方向的运动。

在测头和定位平台的反馈系统中, 测头输出的模拟信号经平台控制器内置的 A/D 转换器转换为受位移调制的数字信号, 并保存在一个系数矩阵中。该系数矩阵通过对测头进行校准获取。由于测头输出三路模拟信号, 对其每路输出的特性曲线进行三阶拟合, 既可获取相应的拟合系数矩阵。获取相应的系数矩阵后, 根据图 3 所示的测头输出特性曲线确定各参数点的位置, 作为反馈系统的控制参数。当测头输出达到设定下限阈值时, 控制系统进入反馈控制模式, 并根据

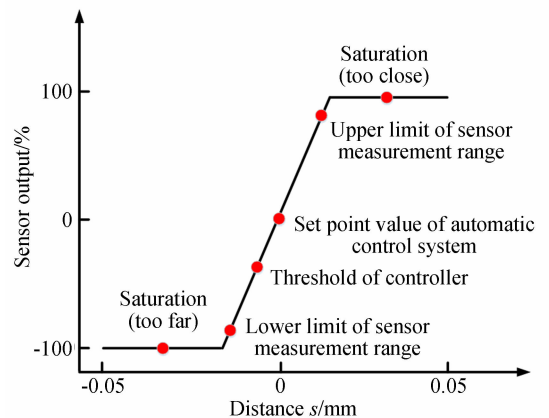


图 3 典型的测头输出特征曲线  
Fig. 3 Typical probe characteristic curve

设定点进行自动测量控制;当测头输出超过设定上限阈值时,测量系统跳出反馈控制模式,运动平台急停并发出报警信息,以防止测头超量程而损坏。

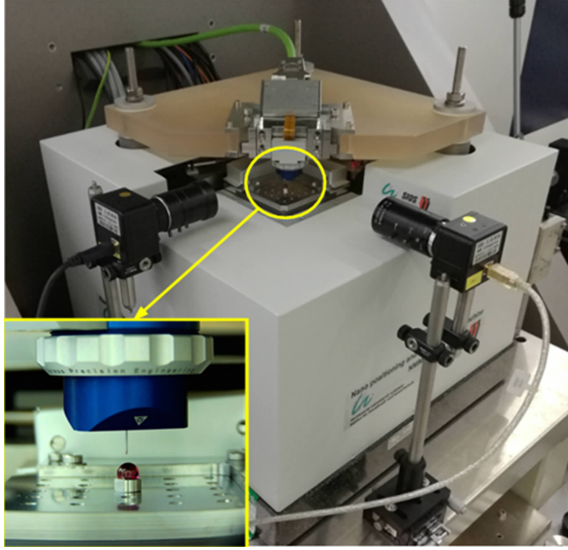


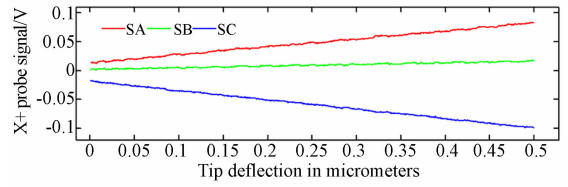
图 4 三维坐标测量系统

Fig. 4 3D coordinate measurement system

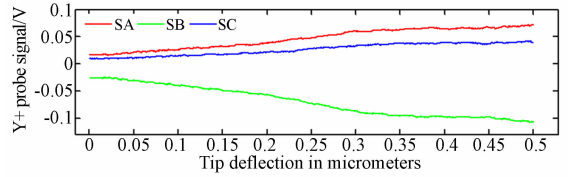
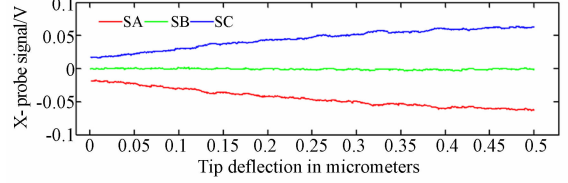
集成后的测量系统如图 4 所示,为使测量过程可视化,并保证测头和样品在测量过程中的安全性,在 X,Y 方向设置了两个 CCD 相机,用于观察测头探针与样品表面的接近情况。CCD 相机采用光学支杆和通用夹具进行固定,可方便调节位置和角度。CCD 传感器前部的光学镜头可进行焦距和光圈大小的调节,以使图像焦点聚焦于测头针尖位置,从而获取高质量的图像。

与传统三坐标测量机一样,系统在进行测量任务前,需对测头探针进行校准,以获取测球的精确直径和空间位置,方便后续的半径补偿和偏移校正。采用直径 5 mm,圆度 RONt 57 nm 的红宝石标准球进行校准,分别从 X+,X-,Y+,Y-,Z+五个方向对测头进行触发,并将校准系数矩阵保存,供后续数据修正。图 5 为测头在 X,Y,Z 三轴五个方向的校准曲线,其中,SA,SB,SC 分别为测头三梁末端敏感电桥的输出信号。

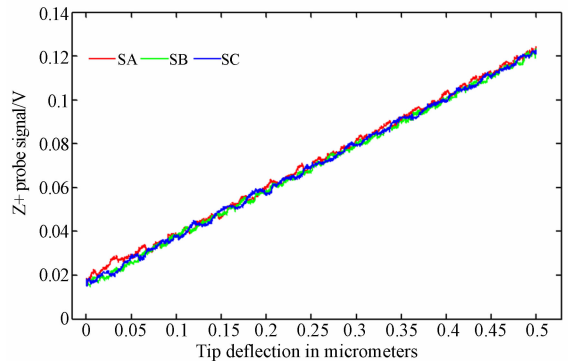
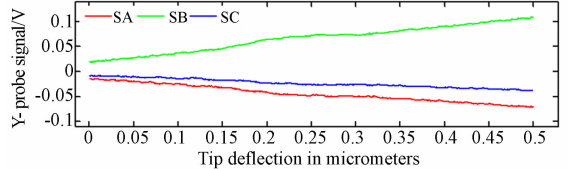
由于纳米测量机的测量数据通过三轴激光干涉仪读取,为保证测量结果的溯源性,对三轴激光干涉仪的激光器进行了拍频测试,并记录三轴激



(a) X 向校准  
(a) Calibration of X direction



(b) Y 向校准  
(b) Calibration of Y direction



(c) Z 向校准  
(c) Calibration of Z direction

图 5 测头校准

Fig. 5 Calibration of the probe

光器与标准激光器的频差,结果如图 6 所示。图中,S 为标准激光器,绿线为标准激光器频率。其中,X,Y,Z 三轴激光器的波长漂移均小于 0.01 nm,频差分别为 167.581 MHz,167.972 MHz 和 170.663 MHz,波长漂移和频率稳定度指标均在误差允许范围。

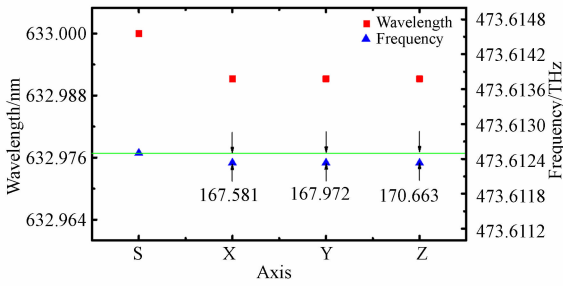


图 6 拍频结果

Fig. 6 Result of laser beat frequency

$L$  为被测长度。被测样品如图 7 所示。



(b) 2 mm 研合量块  
(b) 2 mm lapped gauge blocks

图 7 超高台阶样品

Fig. 7 Ultra-high step samples

### 3 微结构测量实验

完成测量系统校准后,为验证系统性能和对不同类型几何参数的测量能力,利用目标系统对超高台阶和硅臂侧壁倾角进行测量。台阶作为半导体、MEMS 器件和超精密加工中的常规结构,其尺寸的精确表征对促进加工工艺提升、保证产品质量具有重要意义。对于大多数测量仪器,测量范围和测量精度是一对矛盾体。对高度介于几十微米至几毫米范围的台阶,实现纳米级精度的测量仍是一个值得研究的问题。

#### 3.1 超高台阶测量

本文利用搭建的测量系统,对高度  $10\ \mu\text{m}$  和  $2\ \text{mm}$  这两种尺度的台阶进行测量。 $10\ \mu\text{m}$  台阶采用日本小坂实验室的 SS-G41C 型标准样板,该样板校准值为  $(10.291 \pm 0.100)\ \mu\text{m}$ 。 $2\ \text{mm}$  台阶采用量块研合的方式实现,并对研合的量块进行校准。量块标称值  $2\ \text{mm}$ ,校准偏差为  $0.20\ \mu\text{m}$ 。量块校准仪的不确定度为  $\pm(0.03\ \mu\text{m} + 0.3 \times 10^{-6}L)$ ,

由于被测台阶尺寸较大,很难实现完整结构的测量,本文采用分区域测量的方法,分别对台阶结构的 A,B,C 三个区域进行测量,如图所示。然后将测量结果进行拼接,采用 ISO5436-1 中定义的方法进行评价。对于单边台阶,测量和评价方法类似。

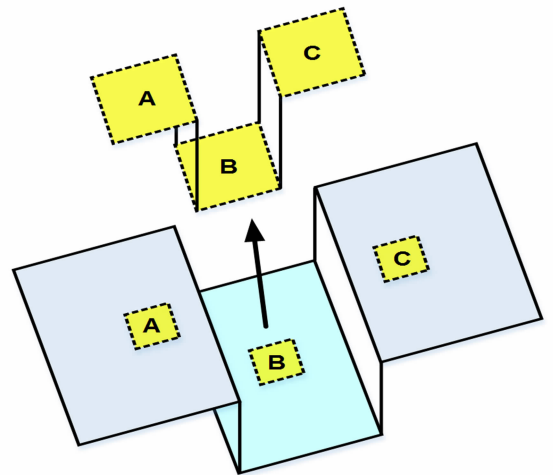


图 8 测量区域

Fig. 8 Measurement areas



(a) 小坂  $10\ \mu\text{m}$  台阶标准样板  
(a) Kosaka  $10\ \mu\text{m}$  step standard

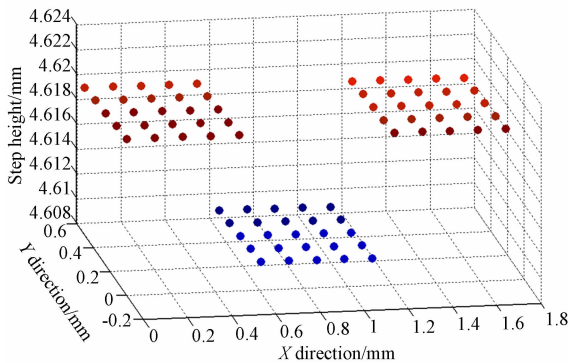
在  $10\ \mu\text{m}$  台阶的测量中,A,B,C 三个区域的测量范围均设置为  $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$ ,每个区域测 25 个点;由于  $2\ \text{mm}$  台阶为单边台阶结构,仅对 A,B 区域进行测量,测量范围均设置为  $1\ \text{mm} \times 1\ \text{mm}$ ,每个区域测 25 个点。每次扫描可依次获取 5 条台阶轮廓线,对轮廓线进行评价,结果如表 1 所示。

表 1 超高台阶测量结果

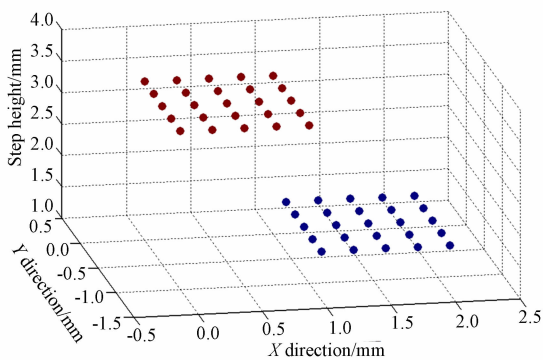
Tab.1 Measurement result of the ultra-high steps

轮廓次序	10 $\mu\text{m}$ 台阶/ $\mu\text{m}$	2 mm 台阶/mm
1	10.322	2.000 131 3
2	10.332	2.000 123 8
3	10.329	2.000 102 0
4	10.338	2.000 083 8
5	10.341	2.000 077 5

10  $\mu\text{m}$  台阶 5 次轮廓测量均值为 10.332  $\mu\text{m}$ ,标准偏差 0.008  $\mu\text{m}$ ;2 mm 台阶 5 次轮廓测量均值为 2.000 103 7 mm,标准偏差 0.000 023 7 mm。可见,测量系统可精确表征超高台阶尺寸。图为测量数据的点云。



(a) 10  $\mu\text{m}$  台阶测量点云  
(a) Measurement point cloud of 10  $\mu\text{m}$  step



(b) 2 mm 台阶测量点云  
(b) Measurement point cloud of 2 mm step

图 9 超高台阶测量点云

Fig. 9 Measurement point clouds of the ultra-high steps

### 3.2 侧壁倾角测量

在 MEMS 工艺中,广泛采用高深宽比的深沟槽结构,其侧壁倾角、粗糙度等形貌参数直接影响着器件的性能,并在器件失效分析中发挥着重要作用。硅臂作为某系统中的关键部件之一,主要用于某试验中靶丸的夹持,其待评价参数包括硅臂卡爪厚度、卡爪侧面陡直度等。硅臂卡爪宽度小于 1 mm,厚度约 500  $\mu\text{m}$ ,如图 10 所示。对于该尺度的样品,传统三坐标方法已无法实现测量,而普通光学方法难以测量倾角较大的侧壁,虽然有改进的扫描隧道显微方法可以测量较大角度的倾角<sup>[14-15]</sup>,但在接近 90°且倾角未知的侧壁测量中仍有一定局限性,且无法与坐标测量法一样实现真正意义上的 3D 测量。本文采用集成三维微接触测头的纳米坐标测量系统对硅臂厚度和侧壁倾角进行测量。

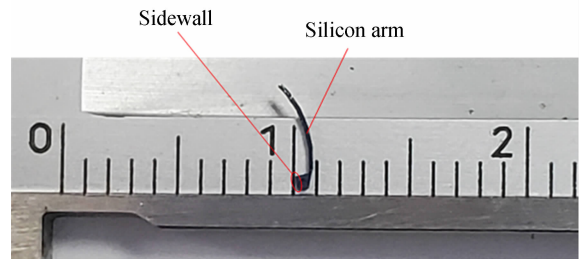


图 10 硅臂卡爪

Fig. 10 Clamping jaw of the silicon arm

测量时,分别对硅臂卡爪的上表面、侧壁和载物台面选定区域进行测量,其中上表面和载物台面每条轮廓线分别测量 5 个点,侧壁每条轮廓线测量 10 个点,共 5 组。测量数据点云如图 11 所示。

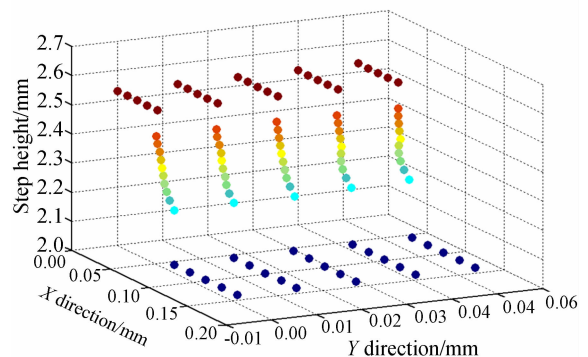


图 11 硅臂测量点云

Fig. 11 Measurement point cloud of the silicon arm

示。硅臂厚度采用与台阶高度相同的方法进行评价,侧壁倾角通过计算侧壁数据拟合直线与上表面测量数据拟合直线的夹角获得。计算得到硅臂厚度 5 次测量均值为 502.147  $\mu\text{m}$ ,标准偏差 0.319  $\mu\text{m}$ ;侧壁倾角均值 84.82°,标准偏差 0.61°。测量结果如表 2 所示。

表 2 硅臂测量结果

Tab.2 Measurement result of the silicon arm

轮廓次序	硅臂厚度/ $\mu\text{m}$	侧壁倾角/(°)
1	502.460	85.58
2	502.452	85.38
3	502.140	84.22
4	501.965	84.53
5	501.719	84.41

### 3.3 测量不确定度分析

受测量环境、仪器本体噪声及测量对象的影响,仪器的测量结果与真值之间存在一定偏差。以 10  $\mu\text{m}$  台阶的测量为例,对测量系统的误差来源和测量不确定度进行分析。测量时,环境温度保持在(20±0.2)°C,湿度为(50±5)%。按测量结果的误差来源,其不确定度包含如下分量:(1)测量重复性引入的不确定度  $u_s$ ; (2)激光干涉仪波长引入的不确定度  $u_\lambda$ ; (3)Z 轴激光干涉仪轴向运动误差引入的不确定度  $u_z$ ; (4)测头引入的不确定度  $u_p$ ; (5)温度变化引入的不确定度  $u_t$ ; (6)样品表面污染引入的不确定度; (7)样品表面粗糙度引入的不确定度; (8)样品表面湿度引入的不确定度; (9)样品表面硬度引入的不确定度; (10)测量时范德华力引入的不确定度; (11)测量时探针磨损引入的不确定度。

上述误差来源中,第 6~11 项不确定度分量的影响数值无法准确测量,本文将其影响归入测量重复性,通过重复性的评定综合反映这些因素对测量结果不确定度的影响。分别对前 5 项不确

定度分量进行计算,得到各不确定度分量值如表 3 所示。

表 3 标准不确定度汇总

Tab.3 Summary of standard uncertainty

符号	标准不确定度/ $\mu\text{m}$	评定方法	灵敏系数
$u_s$	0.003 600	A 类	1
$u_\lambda$	0.000 017	B 类(均匀分布)	1
$u_z$	0.000 500	B 类(均匀分布)	1
$u_p$	0.010 000	B 类(均匀分布)	1
$u_t$	0.000 009	B 类(均匀分布)	1

利用各标准不确定度分量,根据式(1)计算合成标准不确定度  $u$ :

$$u = (u_s^2 + u_\lambda^2 + u_z^2 + u_p^2 + u_t^2)^{1/2}. \quad (1)$$

将各不确定度分量值代入式(1),得合成标准不确定度为 0.010 640  $\mu\text{m}$ 。扩展不确定度( $k=2$ )为 0.021 280  $\mu\text{m}$ 。

## 4 结 论

本文基于纳米测量机和三维微接触测头,构建了大范围、高精度、可溯源的微纳米坐标测量系统,并利用标准球对测量系统进行了校准。系统可对尺度范围从毫米到纳米的特征进行纳米级精度的表征,同时具备高深宽比结构的测量能力,可实现真正意义上的 3D 测量。通过对超高台阶和硅臂卡爪的测量实验,验证了目标系统对大尺寸结构和复杂 MEMS 器件的跨尺度、多参数表征能力。

仪器的测量结果可以通过激光波长溯源至米的定义,定位平台的激光干涉模块实行定期校准机制,从源头保证了测量结果的准确性和溯源性。除文中列举的测量案例外,系统还可实现诸如台阶宽度、微孔直径、侧壁形貌和自由曲面等结构的测量,为半导体、精密制造和国防军工等领域的复杂微结构表征提供计量支撑。

### 参考文献:

[1] MANSKE E, JAGER G, HAUSOTTE T, et al.. Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(7): 074001.

[2] LI R J, XU P, WANG P Y, et al.. Development of a micro/nano probing system using double elastic mechanisms[J]. *Sensors*, 2018, 18(12): 4229.

- [3] YANG W J, LIU X J, LU W L, *et al.*. Influence of probe dynamic characteristics on the scanning speed for white light interference based AFM[J]. *Precision Engineering*, 2018, 51: 348-352.
- [4] PEGGS G N, LEWIS A J, OLDFIELD S. Design for a compact high-accuracy CMM [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1999, 48(1): 417-420.
- [5] DAI G L, BUTEFISCH S, POHLENZ F, *et al.*. A high precision micro/nano CMM using piezoresistive tactile probes [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(8): 1-9.
- [6] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, *et al.*. Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(2): 823-846.
- [7] SPAAN H, WIDDERSHOVEN I, DONKER R. Design and calibration of "Isara 400" ultra-precision CMM[J]. *Opticals and Precision Engineering*, 2011, 19(9): 2236-2241.
- [8] GAO W, KIM S, BOSSE H, *et al.*. Measurement technologies for precision positioning [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2015, 64(2): 773-796.
- [9] VERMEULEN M, ROSIELLE P, SCHELLEKENS P. Design of a high-precision 3D-coordinate measuring machine[J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1998, 47(1): 447-450.
- [10] MITUTOYO. UMAP vision system TYPE2 series 364-micro form measuring system [EB/OL]. <http://ecatalog.mitutoyo.com/UMAP-Vision-System-TYPE2-Series-364-Micro-Form-Measuring-System-C1577.aspx>, 2020.
- [11] FAN K C, LI R J, XU P. Design and verification of micro/nano-probes for coordinate measuring machines [J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2019, 2: 1-15.
- [12] CLAVERLEY J D, LEACH R K. Development of a three-dimensional vibrating tactile probe for miniature CMMs [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(2): 491-499.
- [13] GOO C, JUN M B G, SAITO A. Probing system for measurement of micro-scale components [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2012, 14(2): 174-180.
- [14] JU B F, ZHU W L, ZHANG W. Note: Symmetric modulation methodology applied in improving the performance of scanning tunneling microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 126107.
- [15] ZHU W L, YANG S Y, JU B F, *et al.*. On-machine measurement of a slow slide servo diamond-machined 3D microstructure with a curved substrate [J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(7): 075003.

#### 作者简介:



吴俊杰(1989—),男,浙江金华人,博士。2011年、2014年分别于中国计量大学获得学士、硕士学位,2018年于上海交通大学获得博士学位,现为上海市计量测试技术研究院与哈尔滨工业大学联合培养博士后。主要从事微纳米测量及仪器开发方面的研究。E-mail: wujunjie@simt.com.cn

#### 导师简介:



李源(1979—),男,山东莱西人,博士,高级工程师。2002年、2004年和2007年分别于天津大学获得学士、硕士、博士学位,现为上海市计量测试技术研究院微米纳米计量实验室负责人。主要从事微纳米计量及仪器开发方面的研究。E-mail: liyuan@simt.com.cn