

# 我国微纳几何量计量技术的研究进展\*

高思田, 李琪, 施玉书, 李伟, 黄鹭

(中国计量科学研究院 北京 100029)

**摘要:**随着微纳技术中材料和器件关键尺寸的减小以及几何结构复杂性的增加,给微纳尺度的精确测量带来了新的挑战。微纳几何量计量技术主要是研究微纳尺度下测量量值的准确一致,并实现量值溯源到国际长度基本单位的科学。为保证微纳技术的领先优势,国外先进国家一直高度重视微纳几何量计量技术的研究。目前,我国在微纳计量领域已成功研制了多种微纳几何量计量标准装置,并初步建立了我国自己的微纳计量溯源体系。对我国现有的微纳几何量计量技术与计量标准装置进行了回顾和介绍,并对我国微纳计量的未来发展做出了展望。

**关键词:**微纳几何量; 关键尺寸; 量值准确; 溯源; 标准装置

**中图分类号:** TH711      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 460.4030

## Research progress of China's micro/nanometer geometric quantity metrology technology

Gao Sitian, Li Qi, Shi Yushu, Li Wei, Huang Lu

(National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In nanotechnology research area, since the material and device's critical dimensional size decrease as well as the geometric structure complexity increase, bringing the continuous challenges in micro/nanometer accuracy measurements. Micro/Nanometer geometric quantity metrology research is the way to keep measurement quantities accuracy, uniformity and all measurement results trace back to international length basic unit. In order to keep the country's advantages in nanotechnology research and industry area, developed countries have always attached great importance to nanometer geometric quantity metrology research. In China, currently we have also successfully built several micro/nanometer geometric quantity measurement standard devices, which preliminarily established our nation's nanometer standard traceability framework. The paper reviews the micro/nanometer measurement technologies and measurement standard devices in China, and discusses micro/nanometer metrology's development for future.

**Keywords:** micro/nanometer geometric quantity; critical dimensional size; quantities accuracy; Traceability; standard device

## 0 引言

微纳技术自诞生之日起,即以其革命性的突破给世界带来深远的影响<sup>[1]</sup>。目前微纳技术作为全球研究最热门的领域之一,已经发展出众多的交叉学科以及一系列的高新技术产业<sup>[2-4]</sup>。我国一直高度重视微纳技术的研究与应用,制定了“国家中长期科学和技术发展纲要”、“国家‘十二五’科学和技术发展规划”等多个规划。得益于这些规划的实施,我国的微纳技术在研究和应用领

域均得到了较快的发展。

在微纳技术中,对微纳结构及尺寸的准确测量是微纳前沿研究与高技术产业的关键支撑之一<sup>[5-8]</sup>。1986年诺贝尔物理学奖获得者 Eigler D 等人<sup>[9]</sup>、Binnig G 等人<sup>[10]</sup>和 Pasquini A 等人<sup>[11]</sup>分别发明了基于电子束成像原理的电子显微镜以及基于量子隧道效应原理的扫描隧道显微镜,正是由于他们的研究使人类第一次实现了对物质表面纳米级空间分辨率的成像与测量,也宣告了纳米技术的开端。2014年 Betzig E<sup>[12-13]</sup>、Rust M. J. 等人<sup>[14]</sup>、Jia S 等人<sup>[15]</sup>和 Mukamei E 等人<sup>[16]</sup>因发明超分辨率显微

镜获得诺贝尔化学奖则标志着微纳测量领域获得的又一次突破。超分辨率显微镜能够对DNA和蛋白质进行分子尺度下的测量,在纳米医学和纳米生物学的研究中有重要的意义。同时在微纳产业中,对微纳结构及尺寸的准确测量也至关重要。目前全球微纳产业的产值已超过万亿美元,其中以半导体为代表的集成电路技术是最重要、发展最快的领域之一。随着半导体集成电路芯片的关键尺寸不断减小,尺寸及形状偏差对芯片电气性能的影响日趋显著,因此国内外先进半导体芯片制造商都在大力提高微纳尺寸测量精度,减小相应测量误差,以提高芯片良品率。

可以看出,微纳测量技术是微纳前沿研究实现突破和微纳产业发展进步的重要保障。目前微纳技术正不断向更小的尺度发展,对微纳几何结构关键尺寸的测量提出了极大的挑战<sup>[17]</sup>。如何保证微纳测量的量值准确一致,保证测量的结果符合国际长度基本单位定义并具有可溯源性,微纳几何量计量技术起着极为重要的作用。

## 1 微纳几何量计量技术研究

微纳几何量计量技术主要研究微纳几何尺寸的测量量值溯源到国际长度单位制定义,分析测量不确定度,并保证最终测量结果准确可靠的问题<sup>[18-19]</sup>。在微纳几何量计量技术中,计量标准装置向上直接溯源到长度基本单位定义,向下为纳米计量标准样板定值,再由纳米计量标准样板进行量值传递<sup>[20-22]</sup>,因而在微纳几何量计量中,标准装置是微纳量值溯源和量值传递的关键。

微纳几何量计量标准装置主要对线宽宽度、栅格周期、台阶高度、薄膜厚度和粗糙度等特征尺寸进行计量,依据测量原理的不同标准装置可分为接触式和非接触式两类。其中接触式计量标准装置主要原理是通过非常细的探针扫描样品表面得到形貌轮廓,具体包括各种计量型扫描探针显微镜标准装置等<sup>[23-24]</sup>。非接触式计量标准装置主要原理分为基于电子束成像和光学成像两类,主要包括扫描电子显微镜、高分辨率光学显微镜、白光干涉显微镜标准装置等。在微纳几何量计量中,接触式和非接触式标准装置有各自的优点。接触式测量的优点在于分辨率高,能够生成三维形貌,对样品无需特殊处理,能测量非导电样品,不需要真空环境。非接触测量中电子显微镜的优点在于放大倍率高、景深较大、测量范围较大、对样品污染小、损伤小;而光学显微镜的优点在于测量范围大,测量速度快,对样品无污染,可以得到真彩色信息。因此可以根据不同的测量对象,选择最优的测量方法。

随着微纳技术在研究和产业化领域的快速发展,对微纳几何结构及尺寸的精准测量提出了很高的要求,相

应内容已成为研究的热点。为保证微纳量值的测量准确,目前国内外都在积极开展微纳几何量计量方面的研究,为纳米前沿科学及微纳制造产业的发展提供支撑。

## 2 国外微纳几何量计量技术现状

一直以来国外发达国家都重点资助微纳基础研究和先进微纳制造领域,如美国开展的“国家纳米技术计划”,欧盟成立的纳米技术创新与产业联盟,日本的“部际战略性创新促进计划”,相关研究成果已催生出大量的微纳产业部门,为社会带来了巨大的经济效益。而微纳几何量计量是微纳技术研究的一个关键领域,起到为相关的微纳产业保驾护航的作用,因此世界上主要先进国家的计量研究机构都开展了相应计量标准装置的研究工作<sup>[25-28]</sup>,并取得了显著的成果。

对于微纳接触式测量标准装置,美国国家标准与技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)研制了C-AFM计量型原子力显微镜标准装置,装置测量100 nm~1 μm栅格时,相对测量不确定度为 $1.0 \times 10^{-3}$ ;测量100 nm台阶高度时,相对测量不确定度是 $2.0 \times 10^{-3}$ 。与之相对应的,德国联邦物理技术研究院(physikalisch-technische bundesanstalt, PTB)研制的计量型原子力显微镜Met. LR-AFM移动范围可达到25 mm×25 mm×5 mm,测量速度可达到10 μm/s,水平线间距测量不确定度优于1 nm,Z向优于2~3 nm。对于微纳非接触式测量标准装置,在电子束成像领域,NIST建立了Reference Metrology SEM1、SEM2两种计量型电镜标准装置,SEM1行程100 mm×100 mm,最小步进1.24 nm,SEM2行程50 mm,目前NIST仍未发布有关两种标准装置最终测量能力和不确定度的报道。而PTB则研制了电子光学计量系统(electron optical metrology, EOMS),行程300 mm,最小步进40 nm,测量扩展不确定度为15 nm( $k=2$ )。在光学成像领域,NIST建立了248 nm紫外计量标准装置,测量标准不确定度可达20 nm( $k=2$ )。PTB建立了365 nm紫外计量标准装置,测量标准不确定度可达40 nm( $k=2$ );PTB另有一台193 nm紫外计量装置,但是目前尚未研发成功。

## 3 我国微纳几何量计量技术的发展

我国一直以来高度重视微纳技术的科学研究和产业化进展,在国家的大力支持下,微纳技术在研究与产业上均得到了高速发展。而与之对应的是由于在微纳计量领域研究的滞后,使得我国之前缺乏相应的微纳溯源和计量体系,导致我国的半导体企业都不得不转向国外寻求溯源,不但每年要向国外支付高额的费用,而且在关键技

术和标准制定方面也受制于人。为改变这种状况,中国计量科学研究院通过研究建立了我国自己的微纳几何量关键尺寸计量标准体系,有力的支撑了我国纳米技术的发展。

中国计量科学研究院目前已建立的标准装置<sup>[29-32]</sup>包括:接触式测量的纳米几何结构计量标准装置、毫米级纳米几何结构计量标准装置以及双探针扫描探针显微镜标准装置;非接触测量的计量型扫描电子显微镜标准装置、紫外光学二维微纳几何结构标准装置、白光干涉显微镜标准装置。其中纳米几何结构计量标准装置是我国第一台微纳尺寸计量标准装置,成功的解决了我国在该领域的标准装置缺失问题;针对半导体行业晶圆片尺寸不断增大的趋势,我国又研制了毫米级纳米几何结构计量标准装置;另外纳米线宽测量一直是微纳计量领域中的重点和难点,现有的方法测量结果不够理想,为此我国创新性的研制了双探针扫描探针标准装置,以及计量型扫描电子显微镜标准装置、紫外光学二维微纳几何结构标准装置等,同时针对微米、纳米台阶高度及表面粗糙度,建立了白光干涉显微镜标准装置,初步建立起微纳几何结构的溯源体系。

### 3.1 微纳几何结构计量标准装置

微纳几何结构计量标准装置是中国计量科学研究院在德国联邦经济技术和发展部以及国家自然科学基金的双重资助下研制成功的。该装置是目前我国微纳几何结构尺寸溯源的标准装置。装置的基本原理<sup>[34-37]</sup>是通过针尖与样品之间的原子相互作用力测量表面结构,并经过激光干涉仪将位移溯源至国际长度基本单位。装置结构上主要由近场力检测器、三维柔性铰链位移台以及微型三维激光干涉测量系统3大部分构成。其中近场力检测器接收探针悬臂的反射光线,通过检测反射光线位置判断针尖与样品的接近程度,然后由反馈控制实现针尖跟踪样品表面形貌;三维柔性铰链位移台分别由 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 轴压电陶瓷驱动器推动,可以实现纳米量级的最小步进,能够精确的调节针尖与样品之间的距离;三维激光干涉测量系统中 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三轴激光光束正交,且延长线的交点位于探针针尖位置,能够实现测量柔性铰链位移台的纳米位移并溯源至国际长度基本单位。装置实现的测量范围为 $x$ 方向 $70\ \mu\text{m}$ 、 $y$ 方向 $15\ \mu\text{m}$ 、 $z$ 方向 $7\ \mu\text{m}$ ;测量分辨率为 $x$ 方向 $1.2\ \text{nm}$ 、 $y$ 方向 $0.25\ \text{nm}$ 、 $z$ 方向 $0.12\ \text{nm}$ <sup>[33]</sup>,装置实物如图1所示。标准装置主要创新点为1)具有整体切割的三维弹性位移台,与压电陶瓷驱动器连接采用一端球形支撑的结构,大大提高了整体计量性能;2)采用分布式控制方式, $X$ 、 $Y$ 方向由计算机控制, $Z$ 轴方向由DSP进行独立精确控制;3)从运动学的角度通过数学分析建立了扫描器完整的运动模型,首次提出了全空间校准的概念,并建立了单轴校准和全空间校准组合式校准

方法。该装置完成后参加了由PTB主导的台阶高度国际比对(Nano 2),最终测量结果处于参比国家和地区的前列。

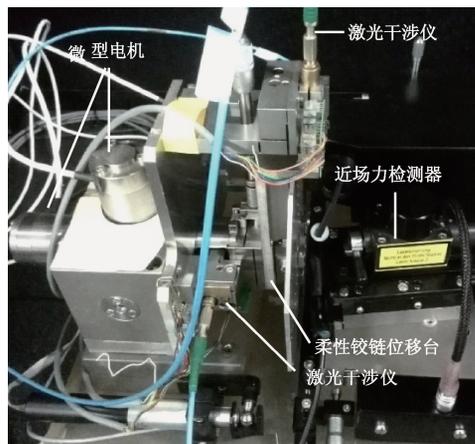


图1 微纳几何结构计量标准装置

Fig. 1 Metrological micro/nano geometric structure standard device

### 3.2 毫米级纳米几何结构计量标准装置

毫米级纳米几何结构计量标准装置是中国计量科学研究院在国家质量监督检验检疫总局“质检公益性行业科研专项项目”的资金资助下研究完成的。该装置的最大特点是测量范围能够达到 $10\ \text{mm}$ 量级,远超现有扫描探针显微镜 $100\ \mu\text{m}$ 量级的测量范围。为实现不同范围的测量,装置在原理上设计了由测头、三维纳米位移台以及大范围位移台实现正交扫描的多种扫描模式;在测头系统中实现了无畸变的三维正交扫描,以及光束跟踪测头移动并聚焦于探针悬臂的测量方式;在溯源系统中设计了无阿贝误差的多倍程测长激光干涉仪和测角激光干涉仪。装置的实物如图2所示,由测头、位移系统、干涉仪计量系统、测控系统和环境测控系统组成<sup>[38-39]</sup>。该标准装置有 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ 和 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$ 两种测量范围,前者全量程的测量不确定度( $k=1$ )不大于 $20\ \text{nm}$ ,后者全量程测量不确定度( $k=1$ )不大于 $2\ \text{nm}$ ,具体如表1所示。装置的创新性主要体现在如下<sup>[40]</sup>:1)位移台采用了“气浮-滑动混合位移台”的设计,保证了三维大范围运动时的平稳性,在垂直方向上无微振动,并且全行程内角摆误差减小到极小值;2)测头装置突破了商品化原子力显微镜测头采用的管状扫描器的局限,使用三维纳米位移台驱动,实现了正交、闭环扫描,使得测头量值可溯源;3)在干涉测量系统中,自研了光学8倍程激光干涉仪,提出了“谐波分离修正法”并已申请国家专利。最终毫米级装置具备了量值可溯源、大行程范围以及测头可实现三维正交扫描的特点。



图2 毫米级纳米几何结构计量标准装置

Fig. 2 Millimeter measurement range metrological nano geometric structure standard device

表1 毫米级纳米几何结构标准装置合成不确定度

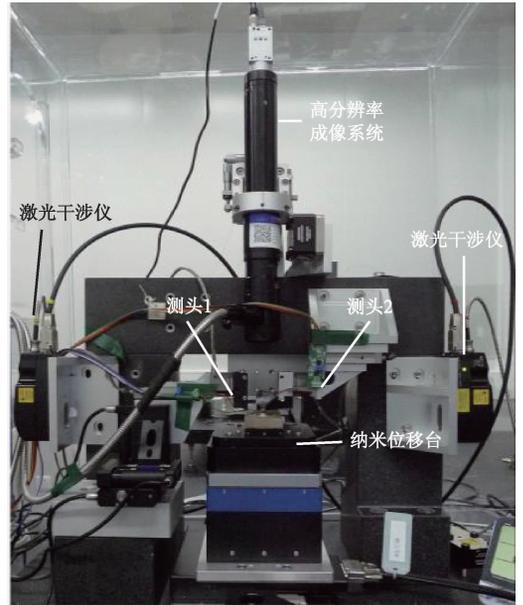
Table 1 Millimeter measurement range metrological standard device combined uncertainty

测量范围	X 轴	Y 轴	Z 轴	
小范围测量/ $\mu\text{m}$	100	100	3	
大范围测量/ $\text{mm}$	50	50	2	
合成标准不确定度				
测量范围	X 轴	Y 轴	Z 轴	三维合成 不确定度 ( $k=1$ )
小范围测量/ $\text{nm}$	1.34	1.34	0.60	1.98
大范围测量/ $\text{nm}$	16.06	9.97	4.21	19.37

### 3.3 双探针扫描探针显微镜标准装置

目前在微纳几何结构三维尺寸的测量中,扫描探针显微镜已经能够非常准确地测量出台阶高度和一维、二维栅格的特征值,但是对于纳米线宽结构,现有的扫描探针显微镜测量值会出现较大误差,其原因是现有的扫描探针方法无法同时准确地测量纳米线宽的双边侧壁,导致不能准确测量校准线宽。中国计量科学研究院在国家科技支撑项目的资金资助下创新性的研制了双探针扫描探针显微镜标准装置<sup>[41-42]</sup>。该装置的最大特点是设计了两套测头机构,共同完成线宽的测量。其基本的测量原理为两套具有溯源能力的测头机构各测量线宽的一半轮廓,最后合成整个线宽,该方法很好地解决了扫描探针显微镜由于针尖形状对另一半线宽出现测量盲区而产生测量误差的问题。装置的具体测量过程为测量时两个测头相接近直至针尖顶点互相接触,此时两个探针建立起一个统一的坐标系,接着每个探针测量线宽的一半轮廓,实现纳米线宽的准确计量<sup>[43-44]</sup>。该装置的最小测量线宽

50 nm,测量标准不确定度 5.2 nm ( $k=1$ )。装置的实物如图3所示,装置的创新性主要体现如下:1)首次提出并实现了双探针针对顶测量纳米线宽的方法,消除了传统扫描探针显微镜的测量盲区,减小了针尖形状对线宽测量的影响,研制了无需校准针尖尺寸的音叉自感应双探针扫描显微镜标准装置,实现了纳米几何结构线宽的准确测量;2)研制了符合阿贝原则的差动干涉计量系统,实现了线宽量值的直接溯源,有效降低了温度漂移和机械漂移的影响;3)提出并实现了图像边缘提取定位与针尖反馈扫描对准结合的探针对准方法,提高了对针准确度。

图3 计量型双探针扫描探针显微镜标准装置  
Fig. 3 Metrological dual probe SPM microscope standard device

### 3.4 计量型扫描电子显微镜标准装置

扫描电子显微镜具有很高的成像分辨率,是微纳几何结构测量中一类非常重要的设备<sup>[45-46]</sup>。但是目前扫描电子显微镜是通过电子束流偏转的方法扫描被测样品从而获得表面形貌,因而产生的测量值无法溯源至国际长度单位定义。针对现有的扫描电子显微镜测量量值无法进行溯源的问题,中国计量科学研究院在国家科技支撑项目的资金资助下研制了计量型扫描电子显微镜标准装置。该装置以扫描电子显微镜为主体,基本的原理为固定电子束流于垂直位置,采用纳米位移台驱动样品扫描,当线宽的两侧边缘或栅格的起始位置都经过电子束流位置时,此时线宽或栅格的特征量值与位移值相等,通过激光干涉仪即可实现对纳米线宽和栅格几何结构尺寸的溯源。装置结构上主要由自行研制的密封仓门、真空纳米位移系统以及激光干涉计量系统构成,其中纳米位移系统和激光干涉计量系统均安装在自研仓门上,装置的实

物如图4所示。装置的最小测量线宽50 nm,测量标准不确定度3.0 nm ( $k=1$ )。装置的创新性主要体现如下:1)基于纳米位移台驱动样品扫描的测量方案,实现了电镜测量量值到激光波长基准的溯源;2)研制了集激光干涉计量与位移驱动于一体的电镜真空腔门,提高了测量稳定性,电镜腔内分光的两轴激光干涉仪测量光路,优化了激光干涉计量系统的布局,大幅减小了阿贝误差和环境扰动对干涉测量的影响;3)超声电机共面驱动的机械位移台和压电陶瓷位移台构成的层叠式双位移台系统,显著减小了位移台振动引起的图像抖动和畸变。

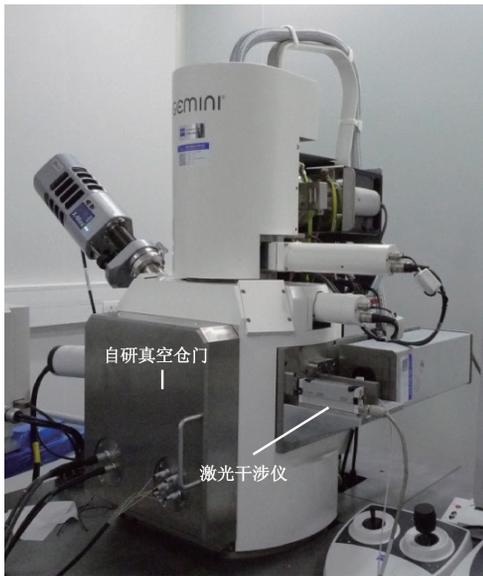


图4 计量型扫描电子显微镜标准装置

Fig.4 Metrological scanning electron microscope standard device

### 3.5 紫外光学二维微纳几何结构计量标准装置

针对光刻掩模版上二维微纳几何结构尺寸的溯源问题,中国计量科学研究院在国家科技支撑项目的资金资助下研制了紫外光学二维微纳几何结构标准装置<sup>[47-48]</sup>。该装置的基本原理是基于248 nm深紫外光源及高数值孔径物镜获取高分辨率图像,同时为进一步提高分辨率,在显微镜物镜焦点的共轭像点位置放置针孔实现对微纳线宽和栅格的扫描,并溯源至国际长度基本单位。装置结构上主要由深紫外光学系统,位移系统,激光干涉计量系统等部分构成。其中光学系统包括深紫外光源、聚束镜、物镜、分光光路、相机和光电倍增管等部件,用于构成紫外成像和共轭点扫描光学系统。位移系统包括二维大尺寸重载纳米台以及摩擦轮驱动二维气浮平台,重载纳米台行程为100  $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ,用于标准样板的高分辨率测量;气浮平台行程大于10 mm量级,用于标准样板的大范围测量。激光干涉计量系统由X、Y方向差动式测长干涉仪与测角干

涉仪构成,测长干涉仪用于测量并溯源微纳几何结构量值,测角干涉仪用于运动过程中偏摆的实时监控与修正。装置实现的测量范围为300 nm ~ 50  $\mu\text{m}$ ,测量标准不确定度为10 nm ( $k=1$ )。装置的实物如图5所示,其创新性主要体现如下:1)研制了整体框架式零膨胀玻璃镜和样板质量传导机构,承载大尺寸标准片时变形误差小;2)利用光电倍增管与紫外CCD构成组合双光路,光电倍增管实现线宽测量,CCD结合物镜执行器实现实时定位与聚焦,并研制了高数值孔径的科勒照明系统实现透射照明;3)研制了X、Y轴移动,Z轴转动的大尺寸纳米位移台,实现角度实时修正;同时研制了高平稳性的摩擦轮驱动共面串联气浮位移台,并采用了卸载力可调、无横向力的气浮-弹簧卸载方案,有效的避免了导轨弯曲和气浮台扰动。

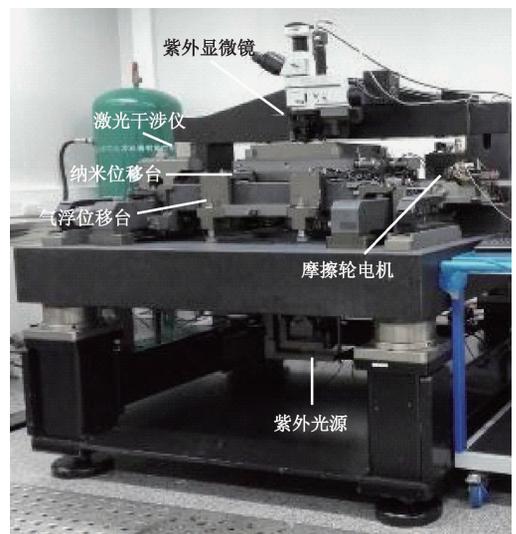


图5 紫外光学二维微纳几何结构标准装置

Fig.5 Metrological UV optical two dimensional micro/nano geometric structure standard device

### 3.6 白光干涉显微镜标准装置

针对先进制造中微米及纳米台阶高度以及粗糙度参数的溯源问题中国计量科学研究院在国家质量监督检验检疫总局的资助下正在开展白光干涉显微镜标准装置的研制<sup>[51]</sup>。装置采用Mirau双光束白光干涉原理,计算出二维粗糙度以及台阶高度的参数量值,并通过激光干涉仪溯源至国际长度基本单位<sup>[49-50]</sup>。装置结构上主要由Mirau干涉物镜及相机、纳米位移台和激光干涉仪构成。其中纳米位移台承载样品在行程范围内以高分辨率步进位移,同时相机通过干涉物镜采集一系列干涉图像,经过求取零级干涉条纹的算法计算出粗糙度以及台阶高度量值,激光干涉仪的作用是记录每次位移值实现量值溯源。经过验证装置的垂直测量范围不小于50  $\mu\text{m}$ ,相对测量重复性和相对示值误差均小于1%。装置如图6所示,其创新性主要体现如下:1)升降装置采用两级纳米位移台,

能够在较大行程范围保持高分辨率;2)垂直方向采用激光干涉测量装置,结合白光干涉测量方法对视场内每点的高度位置进行溯源;3)研究白光干涉相移算法,实现亚纳米级测量能力。

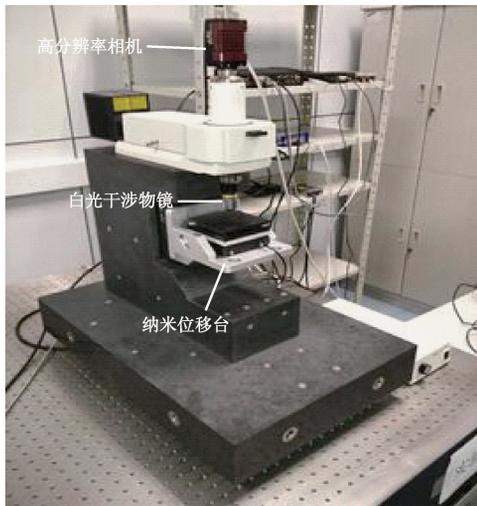


图6 白光干涉显微镜标准装置

Fig.6 Metrological white light interferometer standard device

目前我国建立的微纳几何量计量标准装置已为微纳产业开展计量校准服务,取得了很好的社会经济效益。

## 4 展 望

目前微纳技术作为全球的研究热点领域,已展现出广阔的应用前景以及巨大的社会经济效应。微纳技术的飞速发展给微纳几何量计量研究带来了巨大的挑战,为改变我国微纳计量落后于产业发展的局面,中国计量科学研究院在国家科技项目的支持下研制了多种接触式和非接触式微纳计量标准装置,初步建立起了我国的微纳几何量计量溯源体系。自标准装置建立以来,中国计量科学研究院已经与国内多家大型半导体芯片制造商建立了合作关系,为其关键尺寸的测量提供溯源到我国国家基准的途径,有力地支撑了我国微纳产业的研发和生产。

微纳技术的发展是日新月异的,微纳计量的研究也必须不断的与时俱进。未来微纳几何量计量的发展方向在科学研究方面应着手开展以X射线干涉仪、超高分辨率原子力显微镜为代表的新一代原子尺度关键尺寸计量标准装置的研究,为国家在重大基础研究领域的发展提供支撑;在产业方面一是继续发展大尺寸、高精度的微纳计量装置,二是研究不同微纳测量方法的集成联用技术,以期为我国未来的重大科学研究及高科技产业发展提供坚实的基础。

## 参考文献

- [1] BHUSHAN B. 纳米技术手册[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2013.  
BHUSHAN B. Handbook of Nanotechnology [M]. Harbin: Harbin institute of technology press, 2013.
- [2] Kumar A. Nanotechnology requirements and challenges for large-scale brain computing [C]. IEEE 16th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO),2016; 22-25.
- [3] ZHANG M Y, YEOW J T W. Nanotechnology-Based Terahertz Biological Sensing: A review of its current state and things to come[J]. IEEE Nanotechnology Magazine, 2016, 10(3) 30-38
- [4] KOLYADINA E Y, MATVEEVA L A, NELUBA P L, et al. Nanotechnology, features of surfaces and interfaces in the nanostructures with C60 fullerenes and carbon composite films [C]. International Conference on Nanomaterials; Application & Properties,2016;14-19.
- [5] DASS,GATESA J, ABDU H A, et al. Designs for ultratiny, special-purpose nanoelectronic circuits [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I, 2007, 54 (11): 2528-2540.
- [6] MASHAGHI S, JADIDI T, KOENDERINK G, et al. Lipid nanotechnology [J]. International Journal of Molecular Sciences,2013(14): 4242-4282.
- [7] KROTO W, HEATH R, O'BRIEN C, et al. C<sub>60</sub>: Buckminsterfullerene[J]. Nature, 1985, 318 (6042): 162-163.
- [8] GOODMAN P, SCHAAP T, TARDIN F, et al. Rapid chiral assembly of rigid DNA building blocks for molecular nanofabrication[J]. Science, 2005, 310 (5754): 1661-1665.
- [9] EIGLERD, LUTZG, RUDGEW. An atomic switch realized with the scanning tunneling microscope [J]. Nature, 1992, 352 (6336):600-603.
- [10] BINNIGG, ROHRERH. Scanning tunneling microscopy [J]. IBM Journal of Research and Development. 1986, 30 (4): 355-369.
- [11] PASQUINIA, PICOTTOG, PISANIM. STM carbon nanotube tips fabrication for critical dimension measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical. 2005, 123-124(9): 655-659.
- [12] BETZIG E. Proposed method for molecular optical imaging[J]. Optical Letters,1995, 20(3):237-239.
- [13] BETZIG E, PATTERSON GH, SOUGRAT R, et al. Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution[J]. Science, 2006, 313(5793):1642-1645.
- [14] RUST M J, BATES M, ZHUANG X W. Sub-diffraction-

- limit imaging by stochastic optical reconstruction microscopy (STORM) [J]. *Nature Methods*, 2006(3): 793-796.
- [15] JIA S, VAUGHAN J, ZHUANG X. Isotropic three-dimensional super-resolution imaging with a self-bending point spread function [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(4):302-306.
- [16] MUKAMEL E, BABCOCK H, ZHUANG X. Statistical deconvolution for super-resolution fluorescence microscopy [J]. *Biophysical Journal*, 2012, 102(10): 2391-2400.
- [17] KRAMAR A, DIXSON R, ORJI G. Scanning probe microscope dimensional metrology at NIST [J]. *Measurement Science & Technology*, 2011, 24(22): 1-10.
- [18] MANSKE E, J? GER G, HAUSOTTE T, et al. Recent developments and challenges of nanopositioning and nanomeasuring technology [J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(7): (074001)1-10.
- [19] YACOOT A, KOENDERS L. Recent developments in dimensional nanometrology using AFMs [J]. *Measurement Science & Technology*, 2011, 22(12): (122001)1-12
- [20] DAIL, KOENDERS L, POHLENZ F, et al. Accurate and traceable calibration of one-dimensional gratings[J]. *Measurement Science & Technology*, 2005 16(6): 1241-1249.
- [21] DAIL, POHLENZF, DZIOMBA T, et al. Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings [J]. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18(2): 415-421.
- [22] THOMAS S, ULRICH S, HOLGER S, et al. Wafer level CD metrology on photomasks using aerial imaging technology [C]. *Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology 2008*:70282W-70282W-8.
- [23] 陈代谢, 殷伯华, 林云生, 等. 大范围扫描原子力显微镜自动调平控制技术[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(1):225-229.  
CHEN D X, YIN B H, LIU Y SH, et al. Auto leveling control technique for large-range atomic force microscope [J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2011, 32(1):225-229.
- [24] 彭光含, 杨学恒, 刘济春等. 一种高精度多功能双用原子力显微镜技术及应用[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(1):179-184  
PENG H G, YANG X H, LIU J CH, et al. Technology and application of a new-style high-resolution capability multifunctional amphibious atomic force microscope[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2008, 29(1): 179-184.
- [25] GROHNEW, BOSSEH. An electron optical metrology system for pattern placement measurements [J]. *Measurement Science & Technology*, 1998, 9(7): 1120-1128.
- [26] DAI G L, HÄßLER-GROHNE W, FLUEGGE J, et al. Reference nanometrology based on AFM, SEM and TEM techniques [C]. *GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme*, 2016: 148-155
- [27] DAI G L, NEUGEBAUER M, STEIN M, et al. Overview of 3D Micro-and nanocoordinate metrology at PTB [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(9): 1-17.
- [28] MANSKE E, HAUSOTTE T, MASTYLO R, et al. New applications of the nanopositioning and nanomeasuring machine by using advanced tactile and non-tactile probes[J]. *Measurement Science & Technology*, 2007 18(2): 520-527.
- [29] 施玉书, 高思田, 卢明臻, 等. 多倍程激光干涉仪光路几何特性分析[J]. *计量学报*, 2008, 29(增刊1): 43-47.  
SHI Y SH, GAI S T, LU MZH, et al. Analysis of the geometric characters of optical multi-pass laser interferometer [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(Suppl.1):43-47.
- [30] 高思田, 杜华, 卢明臻, 等. 利用计量型原子力显微镜进行二维纳米格栅的测量[J]. *计量学报*, 2006, 27(增刊1):6-10.  
GAO S T, DU H, LU M ZH, et al. Two-dimensional nanometer scale gratings measurement by metrological atomic force microscope [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2006, 27(Suppl.1):6-10.
- [31] GAO S T, LI Q, LI W, et al. A large range metrological atomic force microscope and its uncertainty analysis [C]. *Proceedings of SPIEScanning Microscopies*, 2013: 872905-872905-12.
- [32] GAO S T, LU M Z, LI W, et al. A large range metrological atomic force microscope with nanometer uncertainty [C]. *Proceedings of XX IMEKO Conference*, 2012:.
- [33] 李伟, 高思田, 卢明臻, 等. 计量型原子力显微镜的位移测量系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(4): 796-802.  
LI W, GAO S T, LU M ZH, et al. Position measuring system in metrological atomic force microscope [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(4): 796-802.
- [34] BINNIG G, QUATE F, CERBER CH. Atomic force

- microscope[J]. Physical Review Letters, 1986, 56(9): 930-933.
- [35] BUTT H, CAPPELLA B, KAPPL M. Force measurements with the atomic force microscope: Technique, interpretation and applications [J]. Surface Science Reports, 2005, 59(1):1-152
- [36] LAPSHIN R. Feature-oriented scanning methodology for probe microscopy and nanotechnology [ J ]. Nanotechnology, 2004, 15(9): 1135-1151.
- [37] LAPSHIN R. Feature-oriented scanning probe microscopy [J]. Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology, 2011, 14(1): 105-115.
- [38] 卢明臻, 高思田, 杜华, 等. 计量型原子力测头模型研究及性能分析 [J]. 纳米技术与精密工程, 2007, 5(1): 33-37.  
LU M ZH, GAO S T, DU H, et al. Model of a metrological AFM head and performance analysis [J]. Nanotechnology and precision engineering, 2007, 5(1): 33-37.
- [39] LUM ZH, GAO S T, LI Q, et al. Long range metrological atomic force microscope with versatile measuring head[C]. 8th Proceedings of ISPEMI Conference, 2012: 87594Y-87594-9.
- [40] 卢明臻, 高思田, 杜华, 等. 计量型原子力测头用于纳米台阶高度样板的测量[J]. 计量学报, 2008, 29(3): 193-197  
LU M ZH, GAO S T, DU H, et al. Measurement of nano-step height scales with a metrological AFM head [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29 ( 3 ): 193-197.
- [41] 张华坤, 高思田, 卢明臻等. 双探针原子力显微镜视觉对准系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2399-2406.  
ZHANG H K, GAO S T, LU M ZH, et al. Vision alignment system for AFM with dual probes [J]. Optical and Precision Engineering, 2014, 22(9):2399-2406.
- [42] ZHANG H, GAO S, LU M, et al. Dual AFM probes alignment based on vision guidance [ C ]. SPIE 6th International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2013 :891627-891627-7.
- [43] WANG H Q, GAO S T, LI W, et al. Characterization of Akiyama probe applied to dual-probes atomic force microscope [ C ]. Optical Measurement Technology and Instrumentation, 2016:1-6.
- [44] CHEN S Q, YAN L P, GAO S T, et al. AFM system with a special quartz tuning fork probe [ C ]. International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale, 2015:60-63.
- [45] VISWANATHANS, WILLIAMSME. , BLOSSEB, et al. High-performance probes for light and electron microscopy[J]. Nature Methods, 2015, 12 ( 6 ): 568-576.
- [46] ZHANG R J, GAO S T, LI W, et al. Control and measuring system of a two-dimensional scanning nanopositioning stage based on LabVIEW [ C ]. Frontiers in Optical Imaging Technology and Application, 2015: 1-6.
- [47] LI Q, GAO S T, LI W, et al. Critical dimensional linewidth calibration using UV microscope and laser interferometry [ C ]. 6th International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2013:1-9.
- [48] WANG ZH X, LI Q, GAO ST, et al. The Research progress of metrological 248 nm deep ultraviolet microscope inspection device [ C ]. 7th International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2015:1-9.
- [49] DONGJT, LURS. Sensitivity analysis of thin-film thickness measurement by vertical scanning white- light interferometry [ J ]. Applied Optics, 2012, 51 ( 23 ): 5668-5675.
- [50] DONGJT , LURS. Achromatic phase shifter with eight times magnification of rotation angle in low coherence interference microscopy [ J ]. Applied Optics, 2011, 50(8): 1113-1123.
- [51] ZHANG SH, SHI Y SH, GAO S T, et al. Analysis method of microstructure surface topography based on wavelet filter [ C ]. International Conference on Optoelectronics and Microelectronics Technology and Application, 2016:1-7.

## 作者简介



高思田, 2007 年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量科学研究院长度计量科学与精密机械测量技术研究所研究员, 研究方向为纳米测量、精密仪器测量。

E-mail: gaost@nim.ac.cn

**Gao Sitian** received his Ph. D. degree from Tianjin university in 2007. Now, he is a research fellow in division of metrology in length and precision engineering of National institute of metrology, China. His main research interest is nanometer measurement, precision device measurement.