

基于大高宽比 CD-AFM 探针的设计与制备

贺龙^{1,2,3}, 李淑娴¹, 苗斌^{2,3}, 李加东^{2,3}, 陈颖⁴, 苗小浦⁴, 吴森⁴

(1. 大连大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116622;

2. 中国科学院 苏州纳米技术与纳米仿生研究所轻量化实验室, 江苏 苏州 215123;

3. 中国科学院 多功能材料与轻巧系统重点实验室, 江苏 苏州 215123;

4. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)

摘要:针对传统原子力显微镜(AFM)探针和关键尺寸原子力显微镜(CD-AFM)探针受限于针尖有效扫描高度较低,无法对深沟槽和大悬垂侧壁结构进行精准扫描成像的问题,提出了一种大高宽比针尖结构的新颖 CD-AFM 探针设计与制备方案。开发的新颖 CD-AFM 探针针尖有效高度为 5.1~5.8 μm ,高宽比达到 14,相较于传统硅基 CD-AFM 探针,其有效高度提升了约 4 倍。利用开发的探针完成了标称深度为 2.3 μm 、深宽比为 4.6 的深沟槽样品测试。

关键词:关键尺寸原子力显微镜探针;深沟槽;大悬垂侧壁;大高宽比;有效高度

中图分类号:TN305 **文献标识码:**A

Design and Manufacture of CD-AFM Probe Based on High-Aspect-Ratio Structure

HE Long^{1,2,3}, LI Shuxian¹, MIAO Bin^{2,3}, LI Jiadong^{2,3}, CHEN Ying⁴, MIAO Xiaopu⁴, WU Sen⁴

(1. College of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China; 2. Suzhou Institute of Nano-Tech and

Nano-Bionics Lightweight Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China; 3. Key Laboratory of

Multifunctional Nanomaterials and Smart Systems, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

4. School of precision instrument and opto-electronics engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The conventional atomic force microscope (AFM) and critical-dimension atomic force microscope (CD-AFM) probes are limited by the low effective scanning height of the tip, which prevents the accurate scanning and imaging of deep trenches and large overhanging sidewall structures. Hence, a design and preparation scheme for a new CD-AFM probe with a large-aspect-ratio tip structure is proposed herein. The developed CD-AFM probe has an effective tip height of 5.1-5.8 μm and an aspect ratio of 14. The improved effective height is approximately four times that of conventional silicon-based CD-AFM probes. Finally, the developed probe is evaluated using a deep-trench sample with a nominal depth of 2.3 μm and an aspect ratio of 4.6.

Key words: critical dimension atomic force microscopy probes; deep grooves; large overhanging sidewall; large aspect ratio; effective height

0 引言

随着微机电系统(MEMS)和集成电路的发展,具有纳米量级的芯片制备对检测仪器提出了更高的要求。芯片制备中,关键线宽能否精确表征直接影响到后续工艺的成败,因此,各个生产环节都需要对芯片的关键线宽进行检测。其检测设备包括

光学显微镜、扫描电子显微镜(SEM)和原子力显微镜(AFM)等^[1]。其中光学显微镜可以检测微米量级的图形,对于亚微米和纳米量级的图案无法准确表征。扫描电子显微镜(SEM)可以准确测量纳米量级的图形,突破了传统光学显微镜的测量极限,但根据工作原理,扫描电子显微镜只能测量导体和

收稿日期:2024-03-12

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3201600),国家自然科学基金(面上项目)(62074159),苏州市科技计划项目(SSD2023001)。

作者简介:贺龙(1995-),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士。通信作者:李淑娴(1978-),女,山东省莱芜市人,副教授。李加东(1980-),男,山东省临沂市人,研究员。

半导体,不能直接测量绝缘体,材料的导电性限制了SEM的使用。原子力显微镜(AFM)由扫描隧道显微镜(STM)发展而来,它是通过测量AFM探针与样品表面之间的相互作用力来观测样品三维形貌,因此,无论样品是否导电,均可测量,消除了测量工具对材料属性的限制。传统的AFM图像采集是一种2.5D成像技术,仅能提供“俯视图”的轮廓扫描,这是因为普通硅基AFM探针的针尖主要通过各向异性腐蚀制备^[2],针尖形状呈金字塔结构,对于侧壁轮廓无法准确扫描^[3]。关键尺寸原子力显微镜(CD-AFM或3D-AFM)是一种重要的计量工具^[4-5],用于3D全轮廓图像采集,能够测量沟槽底部和侧壁特征形貌。

CD-AFM探针对沟槽和大悬垂侧壁结构具有精确的三维扫描成像能力,当前国内外研究人员对CD-AFM探针进行了开发研究。2013年法国J. Foucher等^[6]通过电子束诱导工艺将类金刚石碳沉积到硅基AFM探针的尖端,制备出T形CD-AFM探针尖端,有效高度为150 nm。2016年韩国J. Choi等^[7]通过安装在SEM中纳米操纵器将碳纳米管安装到AFM尖端,随后使用聚焦离子束对碳纳米管进行修饰,最终获得探针的有效高度为250 nm。2017年俄罗斯A. S. Kolomytsev等^[8]在磨损过的AFM探针尖端进行二次工艺开发,首先通过聚焦离子束刻蚀铣削将旧探针尖端清理平整,随后通过气相离子在针尖处诱导沉积钨和碳,最终获得有效高度为1.2 μm 的CD-AFM探针。聚焦离子束诱导沉积技术受前体气体、扫描策略、光束重叠、离子束电流密度等因素影响^[9],沉积效率和沉积厚度较低,限制了聚焦离子束技术在大高宽比针尖研制中的应用。目前CD-AFM探针的研制主要采用聚焦电子束或离子束刻蚀及诱导沉积等技术^[10-11],大多数CD-AFM探针的针尖工作有效高度小于1.5 μm ^[12]。

为了解决传统原子力显微镜(AFM)和关键尺寸原子力显微镜(CD-AFM)探针受限于针尖有效高度,无法对深沟槽和大悬垂侧壁结构进行精准扫描成像的问题,本文设计了一种具有大高宽比针尖结构的硅基CD-AFM探针。仿真结果表明,探针工作频率对针尖结构无影响,验证了探针结构设计的合理性。通过采用等离子体干法刻蚀、聚焦离子束诱导沉积等工艺完成了新型大高宽比结构CD-AFM探针的制备,并实现了对深度2.3 μm 、深宽比为

4.6深沟槽样品的精准成像扫描。

1 大高宽比CD-AFM探针结构设计

传统CD-AFM探针典型针尖形状包括圆柱形探针^[13]和喇叭形探针^[14-15],结构如图1所示。其中碳纳米管CD-AFM探针通常为圆柱形,碳纳米管生长或组装到硅底座上,但是在生长或组装的过程中,碳纳米管与底座的角度难以控制。喇叭形CD-AFM探针使用的材料通常为Si-C组合,在AFM探针的针尖顶部使用聚焦离子束刻蚀铣削平面并诱导沉积碳。聚焦离子束诱导沉积工艺受限于技术自身的影响,无法利用聚焦离子束诱导沉积实现针尖更大有效高度的探针制备。

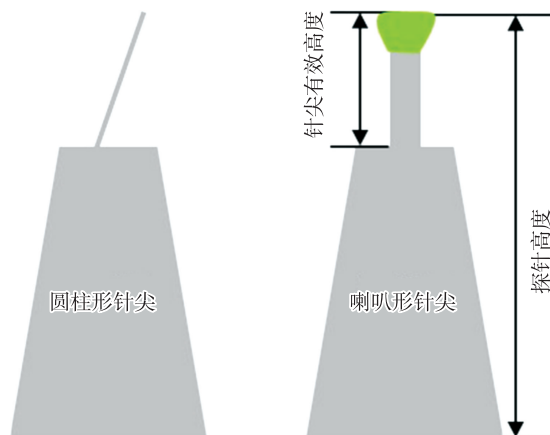


图1 传统CD-AFM探针结构示意图

本文设计了一种大高宽比CD-AFM探针结构,如图2所示。相较于传统CD-AFM探针结构,这种针尖的有效高度和高宽比有显著提高,结构参数如表1所示,其中R表示针尖最大宽度,C表示针尖涂层为碳。

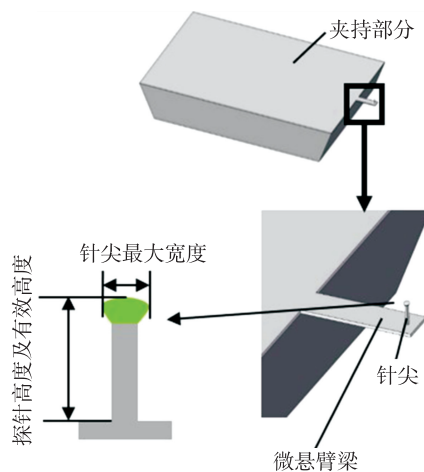


图2 大高宽比CD-AFM探针结构示意图

表 1 大高宽比 CD-AFM 探针的针尖结构尺寸

探针型号	针尖高度/ μm	有效高度/ μm	针尖最大宽度/nm
CDR350C	5	5	350
CDR400C	6	6	400

由于大高宽比结构对谐振频率具有更为敏感的感知特性,故对设计的大高宽比 CD-AFM 探针进行模态分析。分析表明,在探针工作频率下,设计的大高宽比探针的针尖结构未发生改变,仿真结果如图 3 所示。

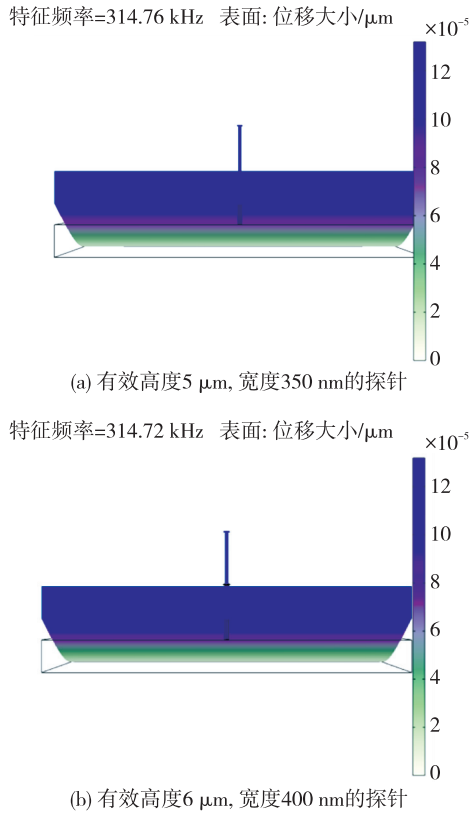


图 3 模态仿真

2 实验

根据设计需求,本实验方案采用厚度为 $300\ \mu\text{m}$ 、2 英寸(1 in=2.54 cm)双抛双氧 SOI 晶圆,晶圆顶层是 n 型 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅片,厚度为 $(15 \pm 1)\ \mu\text{m}$,电阻率为 $8 \sim 10\ \Omega \cdot \text{cm}$;中间埋氧层厚度为 $1\ \mu\text{m}$;底层是 p 型 $\langle 100 \rangle$ 晶向硅片,厚度为 $(280 \pm 10)\ \mu\text{m}$,电阻率为 $15\ \Omega \cdot \text{cm}$ 。图 4 为工艺流程图,具体加工步骤为:(a)SOI 晶圆热氧化。(b)光刻、刻蚀针尖掩膜。(c)光刻、刻蚀悬臂梁。(d)刻蚀圆柱形硅柱。(e)热氧化、LPCVD 氮化硅。(f)释放悬臂梁、去除氧化硅和氮化硅。(g)热氧化。(h)聚焦离子束诱导沉积碳。

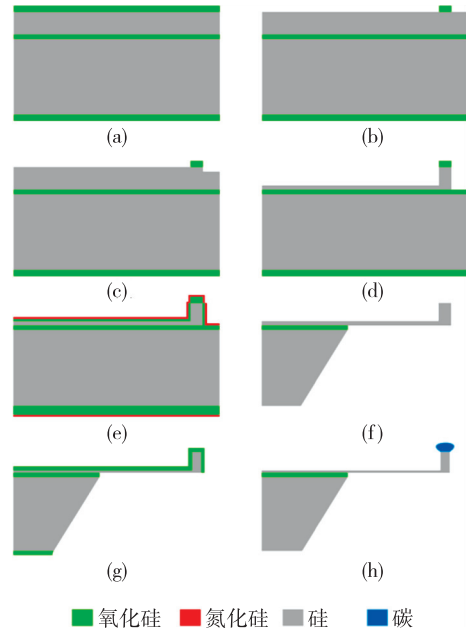


图 4 大高宽比 CD-AFM 探针工艺流程

大高宽比 CD-AFM 探针的制备工艺主要分为 6 部分:纳米针尖掩膜制备、悬臂梁制备、圆柱形硅柱制备、悬臂梁释放、热氧化和聚焦离子束诱导沉积。纳米针尖掩膜制备中,SOI 晶圆经过标准清洗工艺后,首先使用匀胶机对晶圆进行匀胶,然后在热板上前烘使光刻胶固化,再通过光刻机完成光刻掩模版和衬底的对准曝光,使用化学显影液去除由曝光造成的可溶解光刻胶,完成图形转移,最后通过镜检对关键线宽进行检查并使用热板坚膜,将光刻胶中多余的溶剂蒸发,增强光刻胶与晶圆的粘附性。坚膜后使用磁中性环路放电工艺去除二氧化硅(SiO_2)层,完成纳米针尖掩膜制作。悬臂梁制备中,完成纳米针尖掩膜制作的样品通过标准清洗工艺后,再经匀胶、前烘、第二次曝光和显影,坚膜后使用 STS 公司的深硅刻蚀机进行深反应离子刻蚀悬臂梁,完成悬臂梁制备。经标准清洗后,通过深硅刻蚀机进行干法刻蚀至预定深度,完成硅针结构制备,并通过热氧化工艺进一步缩小针尖直径。为了保护刻蚀出的针尖在四甲基氢氧化铵(TMAH)溶液中不被破坏,通过低压化学气相沉积生长 $150\ \text{nm}$ 氮化硅。通过背部匀胶、曝光及显影,完成背部腐蚀窗口图形转移,坚膜后通过反应离子刻蚀制备出背部窗口,并在 TMAH 热溶液中进行晶向腐蚀。利用热磷酸去除氮化硅,BOE 去除氧化硅,完成悬臂梁释放。最后利用聚焦离子束工艺在硅柱顶端诱导沉积碳,完成 CD-AFM 探针的制备,针尖结构

如图5所示。

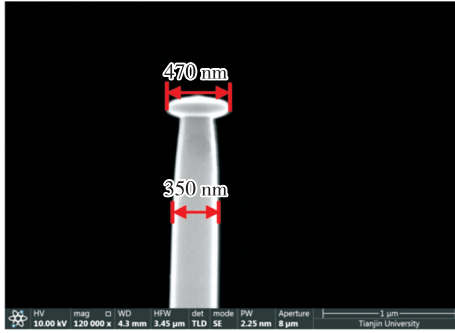
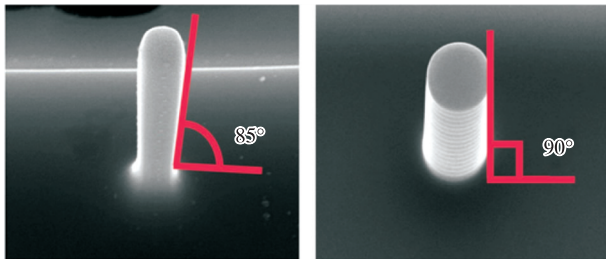


图5 制备完成的CD-AFM探针SEM图

3 实验结果与讨论

3.1 深反应离子刻蚀参数对针尖垂直度的影响

侧壁垂直度是实现大高宽比CD-AFM探针结构的关键参数,影响刻蚀垂直度的刻蚀参数主要包括下电极功率和钝化刻蚀时间比。常规深反应离子刻蚀功率为35 W,钝化刻蚀时间比为4:5,刻蚀后针尖结构呈倒锥台型,垂直度较差,无法实现大高宽比针尖制备,如图6(a)所示。当把刻蚀功率降低为18 W,钝化刻蚀时间比为8:7时,针尖刻蚀过程中侧壁产生的聚合物减少,同时钝化保护时间的增加也减少了侧壁的横向刻蚀速率,可实现垂直度更高的针尖制备,如图6(b)所示。



(a) 非垂直侧壁

(b) 垂直侧壁

图6 不同刻蚀参数下得到的硅柱SEM图

3.2 刻蚀边缘效应对针尖高度均匀性的影响

晶圆刻蚀过程中存在边缘效应,其边缘区域的刻蚀速率高于中心区域,因此,晶圆边缘的探针存在过度刻蚀的情况,导致针尖一致性较差,制备的针尖有效高度为1.3~3.1 μm ,有效宽度为62.9~121.4 nm,图7为改进前同一SOI晶圆不同区域的探针高度。针对此问题,通过对内外圈区域针尖掩膜尺寸进行合理补偿设计,可改善刻蚀过程中的边缘效应,制备的针尖有效高度为5.1~5.8 μm ,有效宽度为350~404 nm。图8是工艺改进后同一SOI晶圆不同区域探针高度的探针结构尺寸。

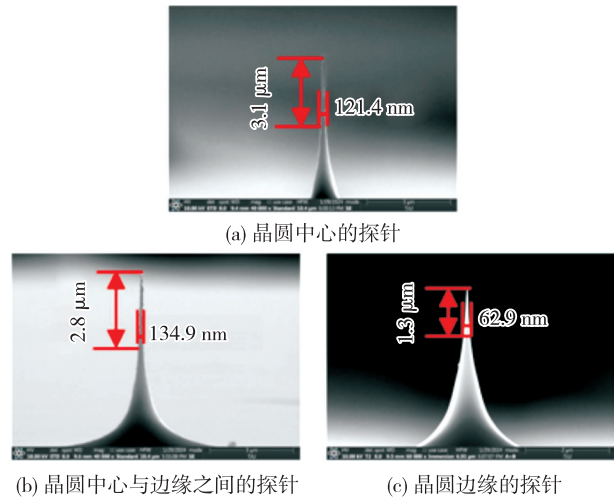


图7 改进前同一SOI晶圆不同区域探针高度

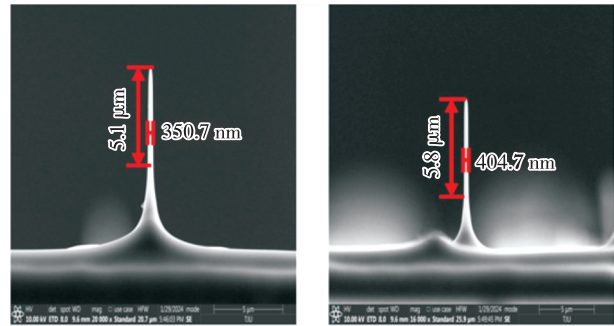
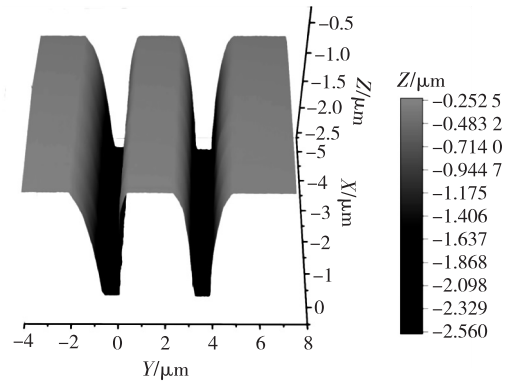


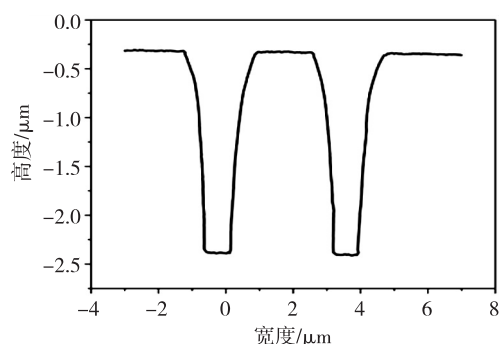
图8 改进后同一SOI晶圆不同区域探针高度

3.3 性能测试

选取同一片SOI晶圆上不同区域的探针进行谐振频率测试,得到该晶圆上CD-AFM探针的谐振频率范围为278~331 kHz。对于制备的新型CD-AFM探针,采用大步长和自适应角度扫描方法^[16-17]实现了对标称深度为2.3 μm 、深宽比为4.6深沟槽样品的精确三维扫描成像,扫描结果如图9所示。由图可知,相较于普通CD-AFM探针,开发的新型CD-AFM探针具备更大深宽比沟槽的精准三维扫描能力。



(a) CD-AFM探针扫描三维图



(b) CD-AFM探针Y-Z轴扫描二维图

图9 深沟槽样品扫描结果

4 结束语

本文设计并制作了一种新型大高宽比 CD-AFM 探针结构,分析并解决了制备过程中深反应离子刻蚀参数和刻蚀边缘效应对针尖垂直度及均匀性的影响,实现了有效高度为 5.1~5.8 μm 、深宽比为 14 的大高宽比 CD-AFM 探针的制备。使用制备的新型 CD-AFM 探针对标称深度为 2.3 μm 、深宽比为 4.6 的深沟槽样品进行扫描测试,完成了清晰的扫描成像。通过开发新型大高宽比 CD-AFM 探针,解决了传统原子力显微镜和关键尺寸原子力显微镜探针无法对深沟槽和大悬垂侧壁结构精准扫描成像的问题,也为新型超高宽比 CD-AFM 探针的开发奠定了工艺基础。

参考文献:

- [1] 殷伯华,初明璋,林云生,等. CD-AFM 在 45 nm 节点半导体芯片检测过程中的应用[J]. 电子显微学报, 2009, 28(2): 127-130.
YIN Bohua, CHU Mingzhang, LIN Yunsheng, et al. Application of CD-AFM in the detection process of 45 nm node semiconductor chips[J]. Journal of Electron Microscopy, 2009, 28(2): 127-130.
- [2] 薛伟,李加东,谢杰,等. 硅基自锐式纳米针尖一次成型制作工艺的研究[J]. 压电与声光, 2013, 35(1): 125-128.
XUE Wei, LI Jiadong, XIE Jie, et al. Study on the one-time molding process of silicon-based self-sharpening nanoneedle tip [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2013, 35(1): 125-128.
- [3] KROHS F, FATIKOW S. Novel high-resolution side-wall imaging using standard Atomic Force Microscopy equipment: Exceeding surface scanning using customized FIB-milled AFM tips in torsional feedback mode [C]//Oldenburg, Germany: 2013 Seventh International

- Conference on Sensing Technology, 2013: 608-611.
- [4] ORJI N G, DIXSON R G, NG B P, et al. Contour metrology using critical dimension atomic force microscopy[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(4): 044006.
- [5] BAO T, MININNI L, DAWSON D. Improving side-wall profile metrology with enhanced 3D-AFM[C]//Santa Barbara, CA USA: 2008 Lithography Asia, SPIE, 2008:113-121.
- [6] FOUCHER J, FILIPPOV P, PENZKOFER C, et al. Manufacturing and advanced characterization of sub-25nm diameter CD-AFM probes with sub-10nm tip edges radius[C]//Munich, German: Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVII, SPIE, 2013:449-454.
- [7] CHOI J, PARK B C, AHN S J, et al. Evaluation of carbon nanotube probes in critical dimension atomic force microscopes [J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2016, 15(3): 034005-034005.
- [8] KOLOMIYTSEV A, LISITSYN S, SMIRNOV V, et al. Application of focused ion beam for the fabrication of AFM probes[C]//Taganrog, Russia: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017:012007.
- [9] YAO N. Focused ion beam systems: basics and applications[M]. Princeton Materials Institute: Cambridge University Press, 2007
- [10] THIESLER J, TUTSCH R, FROMM K, et al. True 3D-AFM sensor for nanometrology[J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31(7): 074012.
- [11] FOUCHER J, SCHMIDT S W, PENZKOFER C, et al. Overcoming silicon limitations: new 3D-AFM carbon tips with constantly high-resolution for sub-28nm node semiconductor requirements[C]//Munich, Germany: Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXVI, SPIE, 2012:964-969.
- [12] DIXSON R. Tip-on-tip imaging and self-consistent calibration using critical dimension atomic force microscopy[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2017, 16(2): 024005-024005.
- [13] AGEEV O, BYKOV A V, KOLOMIITSEV A, et al. Study of modification methods of probes for critical-dimension atomic-force microscopy by the deposition of carbon nanotubes [J]. Semiconductors, 2015, 49: 1743-1748.