

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.01.13

芯片表面形貌检测方法及系统研制

夏承晟, 邓惠文, 赵书浩, 陶伟灏, 张国锋, 杨树明*

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 传统检测方法由于测量范围小、测量时间长, 不能满足在线、在机和大幅面的检测需求, 本文提出了一种白光扫描干涉和原子力显微测量相结合的芯片表面形貌测量方法。在分析了白光扫描干涉测量技术和原子力显微测量技术特点的基础上, 构建了两种方法互补的测量方案: 首先采用白光扫描干涉测量技术对芯片进行大范围快速扫描, 再通过原子力显微测量技术对关键区域进行精细扫描检测。基于此进行了测量系统的硬件设计与集成, 测试结果表明, 该系统能够在毫米级检测范围内实现纳米级表面形貌的精确测量。

关键词: 芯片; 表面形貌测量; 白光干涉; 原子力显微镜

中图分类号: TB96

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2023)01-0137-06

Chip morphology measurement method and system development

XIA Chengsheng, DENG Huiwen, ZHAO Shuhao, TAO Weihao,

ZHANG Guofeng, YANG Shuming*

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Because of the small measurement range and long measurement time, the traditional detection methods can not meet the requirements of on-line, in-machine and large-format detection. In this paper, a chip surface morphology measurement method combining white light scanning interferometry and atomic force microscopy is presented. Based on the analysis of the characteristics of white light scanning interferometry and atomic force microscopy, a measurement scheme with two complementary methods was constructed. Firstly, the white light scanning interferometry was used to scan and inspect the chip in a large range with a high speed, and then the atomic force microscopy was used to measure the key areas by fine scanning. The measurement system was designed and integrated. The testing results showed that the system can accurately detect the nano-scale surface morphology in a range of millimeter.

Key words: chip; surface morphology measurement; white light interferometry; atomic force microscope

0 引言

在芯片制造过程中, 芯片表面微小形貌和结构对芯片性能来说至关重要。要提高芯片加工良品率和芯片性能, 就需要对芯片表面形貌和结构进行检测。传统检测微小结构的工具有扫描电

子束显微镜、原子力显微镜以及白光干涉仪、激光扫描共聚焦显微镜等使用光学方法进行测量的设备。这些方法均具有较高的分辨力, 可以实现纳米甚至亚纳米尺度的检测, 但由于测量范围小、测量时间长等缺点, 不能满足在线、在机和大幅面的检测需求。

收稿日期: 2022-12-05; 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(52225507)

引用格式: 夏承晟, 邓惠文, 赵书浩, 等. 芯片表面形貌检测方法及系统研制[J]. 计测技术, 2023, 43(1): 137-142.

Citation: XIA C S, DENG H W, ZHAO S H, et al. Chip morphology measurement method and system development[J]. Metrology and measurement technology, 2023, 43(1):137-142.



目前,意法半导体公司^[1]和格罗方德半导体股份有限公司^[2]将扫描电子束显微镜中的电子束倾斜发射,实现芯片的三维形貌检测。为了提高扫描电镜的检测效率,汉民微测公司开发了多电子束检测系统^[3]。由于原子力显微镜测量速度慢、效率低,荷兰应用科学研究组织光电电子系提出了一种并行工作的高通量原子力显微镜,通过精密的机械设计使得数枚探针可以同时工作,大大提高了检测效率^[4]。伊尔米诺理工大学发明了并联针尖的主动悬臂原子力探针^[5],在提高效率的同时,有效地减小了系统的体积,可实现对表面微小结构的有效测量。此外,先粗扫描定位、再精确扫描检测也是一种重要的技术路径。世界著名晶圆缺陷检测公司KLA提出使用光散射暗场检测法进行晶圆图案缺陷检测,同时提出使用光的偏振来提高缺陷的信噪比,使用波长较短的488 nm光源和较大的收集立体角来提高散射强度,使用傅里叶平面滤波技术进行图像处理,检测到了150 nm尺度的缺陷^[6-8]。近年来,KLA研发团队又将散射检测技术与电子束测量技术结合,用散射法对晶圆进行粗扫描定位缺陷,用电子束测量技术对缺陷进行精确复检。在国内纳米级表面形貌测量领域,李强等人设计了一种高分辨力光学显微测头,采用激光全息单元,根据差动光斑尺寸变化原理实现纳米量级的微位移测量^[9]。

在半导体芯片检测领域,随着芯片制程的减小,大测量尺度、高测量精度逐渐成为对检测方法的基本要求。目前还未出现一种可以实现从毫米到微米的测量范围,并且达到纳米级别的测量分辨力和精度的方法。要实现半导体芯片表面三维形貌的检测,很难使用单一方法进行检测。针对此种情况,本文提出了一种基于白光扫描干涉测量技术和原子力显微测量技术互补的芯片表面形貌检测方法,先利用白光扫描干涉测量技术对芯片进行大范围快速扫描测量,再通过原子力显微测量技术对关键区域进行精细扫描。

1 检测方法和系统搭建

设计芯片表面形貌检测系统的目标是实现大范围、高精度测量,因此选择白光扫描干涉显微镜和原子力显微镜分别进行半导体芯片表面结构三维形貌粗扫描定位和精确形貌扫描检测,两种

方法的测量范围和测量精度互补,可满足半导体芯片三维形貌检测领域中从毫米级到微米级的跨尺度检测范围要求以及从微米级到纳米级的跨尺度检测精度要求。白光扫描干涉测量技术的水平分辨力受到光学衍射极限的限制^[10],难以表征纳米级别芯片表面微小结构的三维形貌,所以仅由白光扫描干涉测量技术进行微米级的三维形貌检测。为了获取更加准确的半导体芯片表面微小结构的三维形貌,使用原子力显微测量技术进行纳米级别到亚纳米级别的扫描检测。白光扫描干涉测量技术的高效结合原子力显微技术的高分辨力,从而实现芯片表面微小结构三维形貌快速检测。

1.1 系统构建

芯片表面形貌检测系统如图1所示,主要包含三大部分:精密气浮运动平台、白光扫描干涉显微镜和原子力显微镜。由于精密气浮运动平台需要白光扫描干涉显微镜和原子力显微镜同时进行定位,为降低系统复杂性,采用大型整体运动平台的形式,将两种显微镜并列固定于精密气浮运动平台的龙门架上。

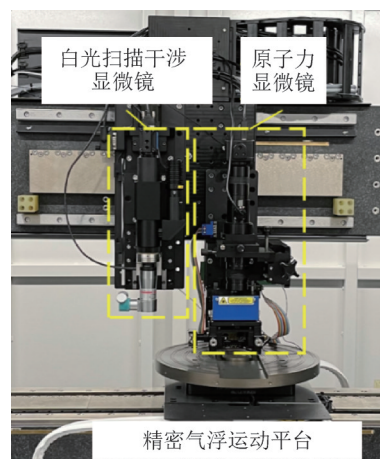


图1 芯片表面形貌检测系统

Fig.1 Chip surface topography measurement system

为满足整个扫描测量过程,精密气浮运动平台在水平方向二维移动的行程为500 mm。运用该系统进行超精密测量时,对精密气浮运动平台运动性能以及抵抗环境影响(如防尘、隔振等)的能力要求较高。进行白光扫描干涉测量时需要进行逐点扫描,通过三维点云重建和拼接处理实现大面积测量。为了减小设定测量范围的重复面积,把运动平台的水平直线度限制在晶圆尺寸上并对

应一个像素的大小,即 $\pm 0.5 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$,从而减少扫描位置点数,提高效率。白光扫描干涉测量时垂直扫描范围由压电陶瓷决定,为保证全过程中扫描范围大致不变,把运动平台垂直直线度限制在 $\pm 0.5 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ 内,以此减小压电陶瓷运动范围,降低点云拼接的难度。原子力显微测量时,基于白光扫描干涉测量结果定位,若运动平台的重复定位精度较低,会使原子力显微镜测量范围产生较大误差,故选择重复定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}/300 \text{ mm}$ 的位移平台,可为实现高速测量提供保障。此外,扫描过程需要保持样品位置稳定,因此定位抖动也同样重要,这里将定位抖动值限制在 $\pm 50 \text{ nm}$ 内,可在原子力显微镜的测量范围内有效降低振动对测量结果的影响。

1.2 白光扫描干涉显微镜模块

白光扫描干涉显微镜模块如图2所示。白光干涉显微镜采用中心波长为 520 nm 的白色LED(发光二极管)光源;CCD(电荷耦合器件)相机具有 1280×1080 的分辨率,像素尺寸为 $4.8 \mu\text{m} \times 4.8 \mu\text{m}$,帧率可达 100 frame/s ;垂直扫描系统具有 $220 \mu\text{m}$ 的行程,内置电阻应变片式传感器作为反馈,开环分辨力为 5.5 nm ,闭环分辨力为 2 nm ,具有 0.1% 的线性度和 0.05% 的重复定位精度。当搭载 $5 \times$ 干涉物镜时,白光干涉显微镜横向分辨力可达 960 nm ;纵向分辨力不受物镜放大倍率影响,其分辨力优于 1 nm 。该白光干涉显微镜可以通过更换不同放大倍率的干涉物镜来改变检测视场大小,采用改进的重心法加相位技术相结合的信号处理综合算法^[12]进行芯片表面形貌三维测量。

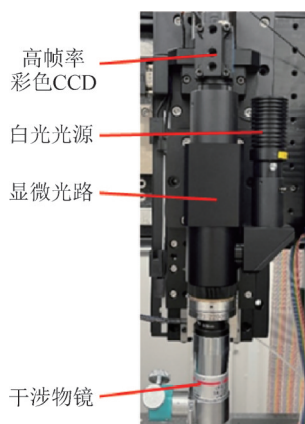


图2 白光扫描干涉显微镜实物图

Fig.2 White light scanning interference microscope

1.3 原子力显微镜模块

原子力显微镜采用样品台在水平方向二维移动的方式实现扫描,扫描头提供探针振动信号,通过信号处理获得每一个扫描点位的样品高度信息。样品台扫描精度要求较高,需要使用压电陶瓷进行精密的运动控制,所以具有扫描功能的样品台具有较大的质量和体积。芯片表面形貌检测系统使用原子力显微镜进行半导体芯片表面微小三维形貌测量时,需要使用精密气浮运动平台将白光扫描干涉显微镜找到的关键区域移动到原子力显微镜下,但在复杂的精密气浮运动平台上无法设置体积和质量均无法减小的扫描台装置,所以采用了头扫描式原子力显微镜。所搭建的原子力显微镜使用扫描头驱动探针振动,同时进行水平方向扫描,降低了样品台复杂性,提高了原子力显微镜的集成度。扫描范围为 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$,其 X, Y 轴方向的线性误差小于 1% , Z 轴的典型噪声水平小于 0.15 nm 。为方便观察和操作,原子力显微镜配备了照明LED光源和俯视 300 万像素CCD相机。俯视摄像头用于辅助寻找待测特征区域,在扫描时实时显示扫描状态。

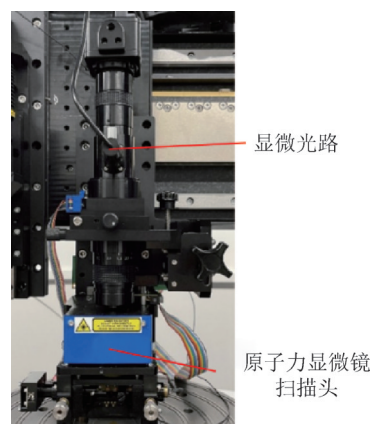


图3 头扫描式原子力显微镜实物图

Fig.3 Head-scanning AFM

2 实验及分析

采用芯片表面形貌检测方法和系统进行检测,使用白光扫描干涉显微镜进行了 $1.6 \text{ mm} \times 1.35 \text{ mm}$ 范围的垂直扫描,芯片结构基本为微米级,在其检测范围内获得图4(a)所示的检测结果,能够较为清晰地看出表面微小形貌结构;针对白光扫描干涉测量技术检测结果中更加微小、难以通过白光扫描干涉测量技术表征清晰的结构,则使用

原子力显微技术进行扫描,得到图4(b)所示的检测结果。该系统能够检测直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右、高度为 400 nm 左右的球形突起微小结构的形貌。白光扫描干涉三维形貌测量结果如图5所示,平面上有一些周期性的波浪曲面,该三维形貌误差是由于周期性的低频振动导致的。原子力显微镜三维形貌测量结果如图6所示,低频振动对于原子力显微镜的影响较小,没有产生明显误差。

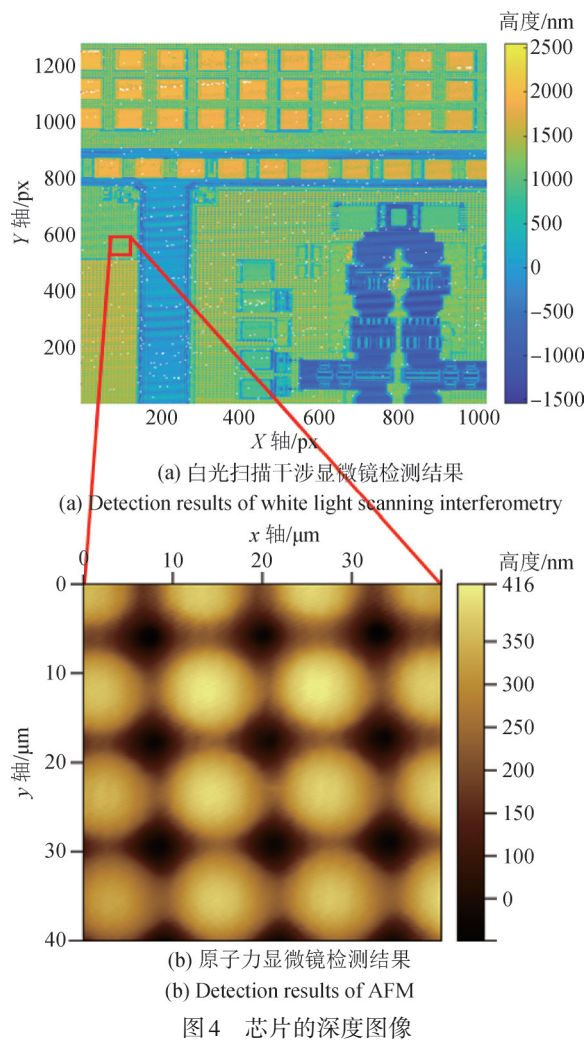


Fig.4 Topographic image of the chip

选择一块周期为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 、深度为 520 nm 的光栅样品进行测量,结果如图7所示。其中,图7(a)为光栅样品表面深度图像,图7(b)为光栅样品表面三维形貌图像。结果表明该系统能够实现纳米级结构扫描检测,能够满足对于样品表面结构的测试分析要求。

在图7中选择4个分析截面,位置分别为线条1、线条2、线条3、线条4。绘制分析截面形貌曲

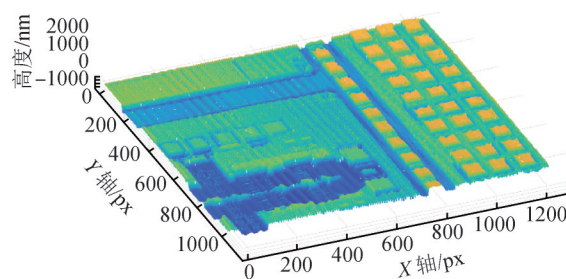


图5 白光扫描干涉测量技术三维形貌检测结果
Fig.5 3D topography measurement results of white light scanning interferometry

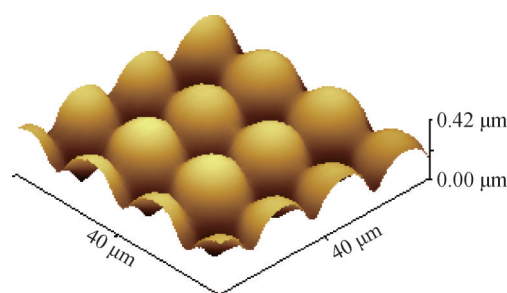
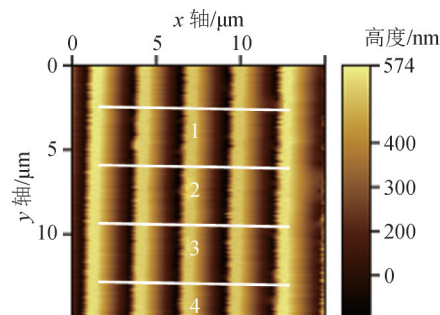
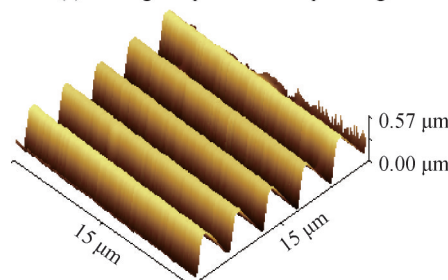


图6 原子力显微技术三维形貌检测结果
Fig.6 3D topography measurement results of AFM



(a) 光栅样品表面深度图
(a) Grating sample surface depth image



(b) 光栅样品表面形貌图
(b) Grating sample surface topography image

图7 光栅样品表面测试结果

Fig.7 Measurement results of grating sample surface

线,如图8所示,其中曲线 z_1 , z_2 , z_3 , z_4 分别对应图7中线条1, 2, 3, 4。可明显看到光栅周期性结构,在每一个光栅结构上升沿找到固定测量位置进行结构周期测量,如图8中红色竖直虚线所示,

所得结果如表1所示。四处位置对应的三个光栅结构周期分别为2.91, 2.78, 2.90 μm 。将周期性结构上顶点和下顶点平均位置之间的距离作为该光栅样品的结构深度,如图8中绿色虚线所示,分析所得结果如表2所示,测得的光栅结构深度为470 nm左右。相较于3 μm 的标准周期、520 nm的标准结构深度,存在误差。原子力显微镜在大深度结构测试中固有的伪影问题^[13-14],导致结构侧壁不垂直;竖直方向振动引起了测试模糊,导致周期性结构的最高表面和最低表面位置不稳定。

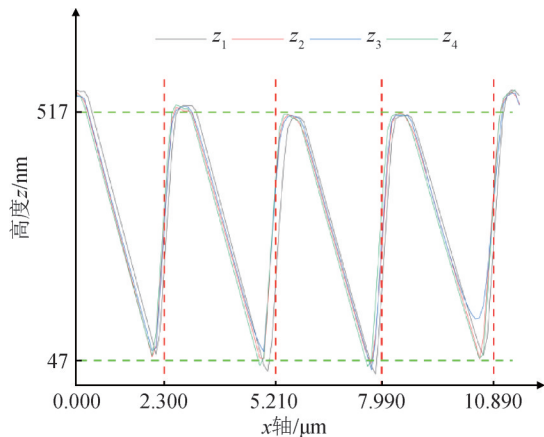


图8 分析截面形貌曲线
Fig. 8 Topography curve of analysis section

表1 分析截面光栅周期分布

Tab.1 Grating period distribution of analysis section		
序号	x轴/ μm	水平间距/ μm
1	2.30	/
2	5.21	2.91
3	7.99	2.78
4	10.89	2.90

表2 分析截面光栅深度

Tab.2 Grating depth of analysis section		
序号	高度/nm	高度间距/nm
1	47	/
2	517	470

选择另一块周期为800 nm、深度为400 nm的深沟槽结构的光栅样品,使用普通硅探针进行扫描,出现针尖无法接触到样品沟槽底面的情况,如图9所示,测量高度因而存在较大误差。

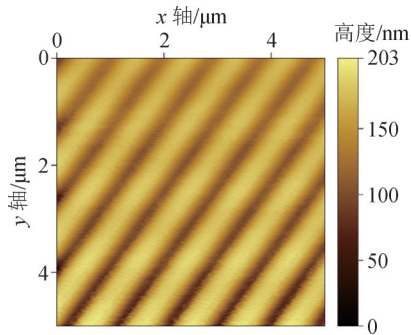


图9 大深宽比光栅样品普通硅探针测量结果
Fig.9 Measurement results of common silicon probe for grating samples with large depth-width ratio

采用碳纳米管大长径比探针^[15]可对类似大深宽比结构进行三维形貌测量,对相同光栅样品进行测试,结果如图10所示。相较于使用普通硅探针测得203 nm的光栅结构深度,使用大长径比碳纳米管探针的测量结果为566 nm,存在误差,但可以证明探针尖端已经完全接触光栅结构底部,能够实现大深宽比光栅结构形貌的准确测量。

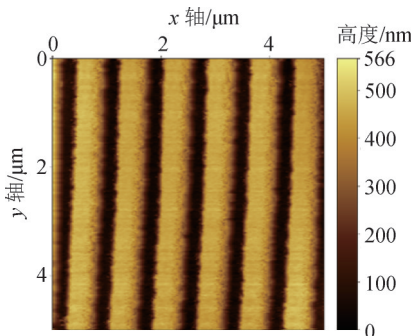


图10 大深宽比光栅样品大长径比碳纳米硅探针测量结果
Fig.10 Measurement results of large length-diameter ratio carbon nano silicon probe for large depth-width ratio grating samples

3 结论

提出了一种芯片表面三维形貌的测量方法,开发了相应的测量系统,系统集成了白光扫描干涉显微镜和原子力显微镜,实现了二者的优势互补。采用白光干涉仪快速测量芯片全貌并定位到更加微小的结构,利用原子力显微镜直接对白光干涉仪无法有效分辨的微小结构进行更高分辨力的测量。通过样品测量验证了所提出方法的合理性和可行性,实现了1.6 mm×1.35 mm大视场范围内直径为10 μm 、高度为400 nm的球形突起微小结构的形貌检测,及周期为3 μm 、深度为520 nm的光栅结构和周期为800 nm、深度为400 nm的深沟槽光栅结构形貌检测。

参考文献

- [1] VALADE C, HAZART J, BERARD-BERGERY S, et al. Tilted beam SEM, 3D metrology for industry[C]// Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXIII. San Jose: SPIE Advanced Lithography, 2019.
- [2] ZHANG X X, ZHOU H, GE Z H, et al. Addressing Fin-FET metrology challenges in $1 \times$ node using tilt-beam critical dimension scanning electron microscope[J]. Journal of micro/nanolithography, MEMS and MOEMS, 2014, 13(4): 41407.
- [3] MA E L, REN W M, LUO X N, et al. Multi-beam inspection (MBI) development progress and applications[C]// Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXXIV. San Jose: SPIE Advanced Lithography, 2020.
- [4] HAMED S, RODOLF H, BERT D, et al. High-throughput atomic force microscopes operating in parallel[J]. Review of scientific instruments, 2017, 88: 33703.
- [5] HOLZ M, REUTER C, REUM A, et al. High throughput AFM inspection system with parallel active cantilevers[C]// Photomask Technology, 2019.
- [6] NIKOONAHAD M, LESLIE B C, STOKOWSKI S E, et al. New laser scanning techniques for wafer inspection[J]. Proceedings of SPIE—the international society for optical engineering, 1995, 210(1): 93–99.
- [7] 李莉萍. 新的3D缺陷检测技术实现纳米级快速检测[J]. 计测技术, 2013, 33(4): 36.
- LI L P. New 3D defect detection technology enables rapid detection at the nanoscale[J]. Metrology and measurement technology, 2013, 33(4): 36. (in Chinese)
- [8] NAGARAJA R, PATRICK K, ANAND G. High throughput wafer defect monitor for integrated metrology applications in photolithography[C]. San Jose: SPIE Advanced Lithography, 2008.
- [9] 李强, 任冬梅, 兰一兵, 等. 用于纳米级表面形貌测量的光学显微测头[J]. 计测技术, 2022, 42(2): 91–96.
- LI Q, REN D M, LAN Y B, et al. Optical microprobe for surface topography measurement at nanometer scale[J]. Metrology and measurement technology, 2022, 42(2): 91–96. (in Chinese)
- [10] 姚东. 大视场白光干涉三维形貌测量关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- YAO D. Research on key technologies of large field of view white light interferometry for 3D topography measurement[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS), 2021. (in Chinese)
- [11] 王维, 吴爱华, 张家欢, 等. 一种基于原子力显微镜的晶圆表面粗糙度测量方法[J]. 上海计量测试, 2022, 49(2): 45–48.
- WANG W, WU A H, ZHANG J H, et al. A method for measuring wafer surface roughness based on atomic force microscope[J]. Shanghai measurement and testing, 2022, 49(2): 45–48. (in Chinese)
- [12] ZHANG G F, YANG S M, FLREGGE J, et al. Fiber optic white light interferometer for areal surface measurement[J]. Measurement science and technology, 2019, 31(12).
- [13] OKAMOTO K, SUGAWARA Y, MORITA S. The elimination of the “artifact” in the electrostatic force measurement using a novel noncontact atomic force microscope/electrostatic force microscope[J]. Applied surface science, 2002, 188: 381–385.
- [14] GOŁEK F, MAZUR P, RYSZKA Z, et al. AFM image artifacts[J]. Applied surface science, 2014, 304: 11–19.
- [15] CHENG B Y, YANG S M, LI W, et al. Controlled growth of a single carbon nanotube on an AFM probe[J/O]. Microsystems nanoengineering, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41378-021-00310-w>.

(本文编辑: 郑燕)

第一作者: 夏承晟(1999—), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 主要研究方向为微纳光学测量技术。



通讯作者: 杨树明(1979—), 男, 教授, 博士生导师, 国家杰出青年基金获得者、国家重点研发计划项目首席、国际纳米制造学会(ISNM)会士、陕西省重点科技创新团队带头人。主要研究方向为微纳制造及测量。承担国家及省部级重大重点项目20余项, 发表学术论文近200篇; 授权/公开国际国内发明专利100余项, 获省部级和国家行业学会等科技奖励7项。担任亚洲精密工程与纳米技术学会(ASPEN)理事、中国计量测试学会常务理事等, 应邀在国际学术会议做大会报告和特邀报告30余次, 担任JMS, IJPEM-GT, IJRAT, NMME, MST, PE, IJAMT, Photonics等国际期刊编委和客座编委等。

