

点衍射干涉仪小孔掩模技术研究进展

于长淞 向阳

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要 在点衍射干涉仪中小孔掩模的主要作用是通过衍射产生接近理想的球面波用于干涉测量,其直径、圆度及三维形貌对测量精度有决定性影响。介绍了小孔掩模的结构与作用原理,对小孔衍射电磁场仿真技术进行了分类比较。对国内外现有小孔掩模加工技术的发展进行了归纳总结,阐述了聚焦离子束刻蚀、电子束曝光等加工技术的加工原理、加工精度及技术特点,指出了掩模对准精度对测量重复性的影响。分析了各种检测方法及存在的主要技术问题,并对小孔三维形貌的测量技术进行了展望。

关键词 光学器件;小孔掩模;电磁场仿真;波像差

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.030004

Research Progress of Pinhole Mask Technology of Point Diffraction Interferometer

Yu Changsong Xiang Yang

(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract The main role of the pinhole mask of point diffraction interferometer is to produce a nearly ideal spherical wave for interferometry through diffraction. The quality of the reference wavefront depends on the pinhole diameter, roundness and three-dimensional surface profile. The structure and principle of pinholes are introduced, and the classification and comparison of the pinhole diffraction electromagnetic field simulation technology are made. The pinhole mask processing technologies are summarized, and the machining mechanism, precision and technical features of focused-ion-beam etching and electron-beam lithography are expounded. The influence of mask alignment accuracy on measurement repeatability is pointed out. The different testing approaches and the main technical problems are analyzed and the trend of the pinhole three-dimensional topographical measurement technology is described.

Key words optical devices; pinhole mask; electromagnetic-field simulation; wave aberration

OCIS codes 230.3990; 120.4630; 230.7408

1 引言

系统波像差是光刻投影物镜的标志性指标,精确测量投影物镜的波像差是极紫外投影光刻技术研发过程中的主要挑战之一。美国劳伦斯伯克利国家实验室于1996年开始致力于点衍射干涉仪的研究^[1,2],以小孔衍射产生的接近理想的球面波为参考波面,消除了常规干涉仪参考波面误差的影响,能够实现深亚纳米量级的检测精度^[3~6],可为极紫外光刻投影物镜系统波像差检测提供测试基准。点衍射干涉仪中小孔掩模的作用是生成超高精度光学波前测试基准,其材料、直径、圆度和三维形貌等参数对最终的检测精度具有重要影响,是干涉仪的关键器件之一。制备与检测直径是亚微米甚至纳米量级的小孔将是极大的挑战。本文对现有的小孔掩模仿真分析与制备技术进行阐述和分析,并对小孔掩模检测技术的发展趋势进行展望。

2 小孔掩模结构与衍射仿真

点衍射干涉仪利用光栅作为分束元件产生测试波和参考波,二者分别通过位于像平面上的掩模并产生

收稿日期:2012-10-15;收到修改稿日期:2012-12-28;网络出版日期:2013-01-31

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX02202)资助课题。

作者简介:于长淞(1983—),男,硕士,助理研究员,主要从事光学检测方面的研究。E-mail: changsongyu@yahoo.cn

干涉,干涉图由相应的图像传感器采集,通过对干涉条纹的处理,最终得到由 Zernike 多项式所表示的系统波像差。

2.1 小孔掩模结构

通常情况下像面掩模板由小孔和相对大的窗口组成(如图 1 中所示的标准掩模),其作用相当于空间滤波器,其中参考波通过掩模上的小孔并发生衍射,而携带被测物镜波像差信息的测试波则通过掩模上较大的窗口,窗口宽度取决于被测光学系统波像差空间频率。不同结构的像面掩模对应于不同的应用场合,如图 1 中所示标定系统误差时所采用的双孔掩模^[7]。

2.2 小孔衍射仿真技术

点衍射干涉仪中参考球面波的精度取决于小孔的直径、圆度以及三维形貌,要制造出满足测量要求的高质量的小孔,需对影响参考球面波质量的要素进行严格的仿真计算和分析。

国内学者主要针对小孔直径对透射球面波前畸变及强度的影响开展研究。中国科学院光电技术研究所许嘉俊等^[8]基于有限元方法,计算了聚焦入射情况下不同直径小孔的衍射波面,分析了聚焦斑发生对准误差和倾斜误差对衍射波面的影响。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所卢增雄等^[9]利用瑞利-索末菲衍射公式,对小孔的远场衍射波前质量做了详细的分析。浙江大学陈琛等^[10]基于矢量衍射理论中的时域有限差分(FDTD)方法,精确分析了可见光情况下衍射小孔直径接近以及小于入射光波长时所对应的衍射波。

国外研究者不仅关注小孔尺寸对衍射波前的影响,还针对小孔掩模材料以及内部三维形貌、近场电磁场分布等问题开展研究^[11,12]。美国劳伦斯伯克利国家实验室使用 TEMPEST 3D 软件编制的临近小孔区域的极紫外波段时域矢量电磁场仿真程序参数如表 1 所示,掩模材料为钴,小孔直径为 50~150 nm。

表 1 小孔仿真参数

Table 1 Parameters of the pinhole simulations

Parameter	Specification
Wavelength	$\lambda=13.55 \text{ nm}(91.5 \text{ eV})$
Illumination	Uniform plane wave, normal incidence, plane polarized
Simulation domain size	$230.6 \text{ nm} \times 230.6 \text{ nm} \times 115.2 \text{ nm} = 17\lambda \times 17\lambda \times 8.5\lambda$, periodic in x and y directions
Simulation nodes	Uniform, $\lambda/15$ spacing, 2×10^6 total nodes, exploiting two-fold symmetry
Pinhole diameters	50~150 nm
Cobalt membrane	Thickness 90 nm= 6.64λ ; density 8.9 g/cm ³
Index of refraction	$n=0.9431+0.0657i$

仿真方法和计算结果为针对各种高精度检测任务而设计的点衍射干涉仪提供了理论参考,并为实际检测中小孔掩模尺寸、材料的选择提供了精确的数值依据。大量的实验数据证明,镍是比较理想的掩模材料,相同厚度时不仅对极紫外波段的光有足够的衰减能力,而且抗碎屑沉积的能力较强,小孔不容易被碎屑堵住。

3 小孔掩模的制备与对准

根据应用场合的不同,作为空间滤波器的小孔掩模直径跨度从几十纳米到几百纳米,为实现亚微米级乃至纳米量级小孔掩模的加工,传统的机械加工方法及激光打孔技术已经不能满足需要。目前国内外对小孔掩模的制备主要采用电子束曝光和离子束刻蚀等方法,这些方法均能实现小于 100 nm 的实用图形^[13~16],并且可保证良好的尺寸精度与表面粗糙度。

3.1 电子束与聚焦离子束

通过具有一定能量的电子束、离子束与固体表面相互作用来改变固体表面物理、化学性质和几何结构的

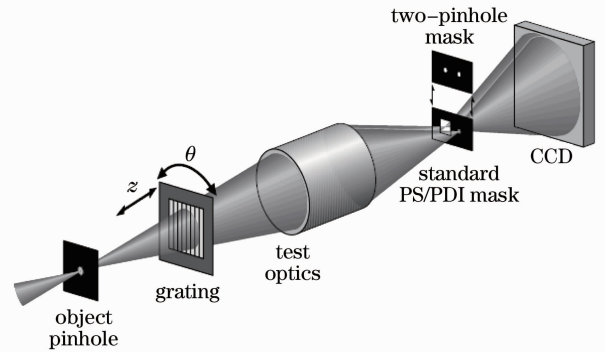


图 1 点衍射干涉仪测量原理

Fig. 1 Principle of optics testing with the point diffraction interferometer

精密加工已经发展得较为成熟,其加工精度可达亚微米甚至纳米级。

日本极紫外光刻系统发展协会采用了一种由聚焦离子束(FIB)制作小孔掩模的方法^[17,18]。图2所示为在镍表面刻蚀直径50 nm的通孔,此时掩模厚度150 nm。由于FIB是利用惰性气体离子的物理溅射作用来进行刻蚀,在处理深径比大于1的小孔时,小孔横截面往往会形成锥形或高斯型,如图3所示。电子束或聚焦离子束可以制作出纳米级的高分辨率图形,但是不能够制作高深径比的图形,因此对小孔直径与掩模的厚度都有要求。

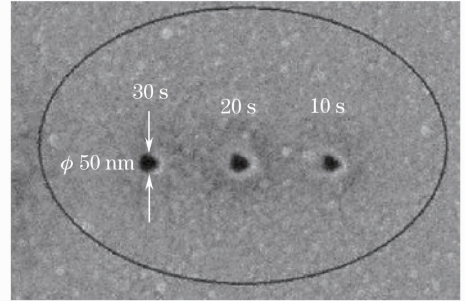


图2 从顶层观察镍50 nm小孔

Fig. 2 Top view of 50 nm Ni pinhole

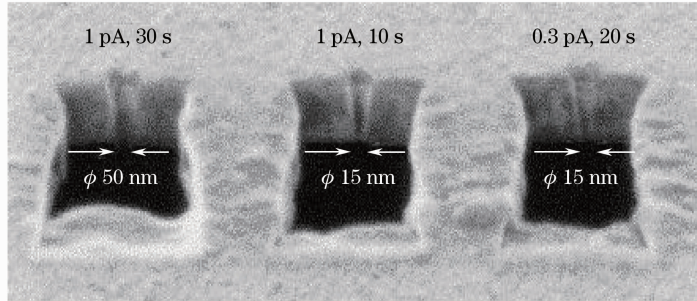


图3 扫描电子显微镜下镍掩模横截面

Fig. 3 Cross-section profile of Ni pinhole mask in scanning electron microscope

3.2 反应离子束刻蚀

反应离子束刻蚀是离子束刻蚀技术的进一步发展,利用反应离子(如氯或氟离子)和固体表面材料的化学反应和物理溅射双重作用来进行刻蚀,在刻蚀的选择性和刻蚀速率方面有很大提高。反应离子束刻蚀的作用主要是在掩模基片需要打孔的区域形成V型或梯形槽,再结合电子束曝光或聚焦离子束刻蚀形成所需小孔。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室采用电子束曝光和反应离子束刻蚀的方法制备直径变化的小孔阵列^[19],其目的是验证最优化的小孔直径和匹配极紫外光刻投影曝光系统的数值孔径,该方法为我们设计优化小孔掩模参数提供了有益的借鉴。如图4所示,其制备过程大致如下:

- 1) 通过低压化学气相淀积(LPVCVD)方法在硅基片两个表面上形成氮化硅作为低应力支撑膜;
- 2) 在基片上方涂聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光刻胶,采用电子束曝光和反应离子束刻蚀产生所需小孔,7×7小孔阵列中心距40 μm,直径范围0.1~0.4 μm;
- 3) 在硅基片背面的氮化硅膜上涂光刻胶,通过反应离子束刻蚀方法除去氮化硅膜,在指定的2 mm×

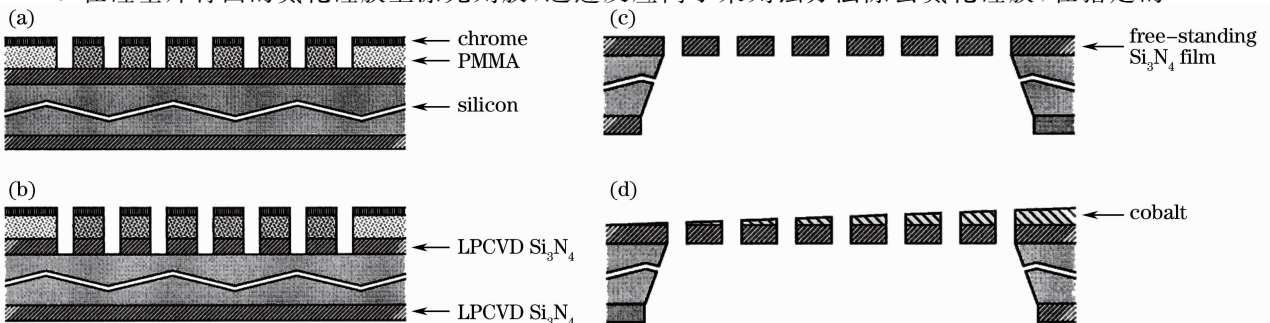


图4 直径变化的小孔阵列截面图。(a)电子束光刻;(b) Si₃N₄ 反应离子束刻蚀;(c)独立膜形成;
(d) Co 渐变折射率膜沉积

Fig. 4 Illustration representing a cross section of the diameter-variation pinhole array following. (a) Electron-beam lithography; (b) Si₃N₄ RIE; (c) free-standing membrane formation; (d) of Co film with gradient refractive index deposition

2 mm区域暴露出硅基片；

4) 在除去光刻胶之后,通过氢氧化钾执行湿法刻蚀,在硅基片暴露区域中的硅被除去,形成暴露于基片上表面的氮化硅膜开口部分；

5) 最终在已加工成形的基片上,旋涂抗紫外层金属 Co 作为空间渐变折射率传输膜。

美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室运用相似方法制作了用于极紫外光刻投影曝光系统元件面形检测的直径 800 nm 的小孔^[20],在 0.5 mm 厚的硅晶片上覆盖 Si_3N_4 化合物,化合物背面涂有抗蚀剂,通过反应离子束刻蚀和氢氧化钾湿法刻蚀形成基底背面的梯形槽,最上面覆盖 Mo/Si 材料,由束斑直径约 30 nm 的离子束刻蚀工具刻蚀,小孔结构如图 5 所示,刻蚀结果如图 6 所示。从图中可以看出,小孔非常平滑并且非常圆,圆度公差小于 4 nm。

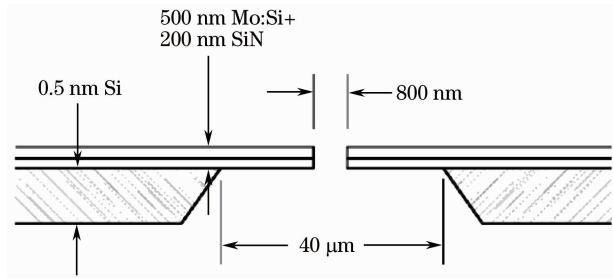


图 5 小孔结构剖面图

Fig. 5 Schematic cross section of pinhole structure

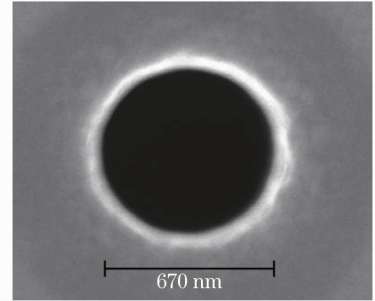


图 6 扫描电子显微镜下聚焦离子束刻蚀小孔

Fig. 6 Scanning electron microscope picture of FIBE-etched pinhole

3.3 对准精度

对小孔装调效果的评估也是点衍射干涉仪研制过程中的重要内容。像面掩模的对准精度对测量重复性具有显著影响,当照明光源束斑与小孔未严格对准时,将导致透过掩模的参考波强度变小而测试波强度则相对变强,即使小孔达到加工要求,也将由于照明对准误差而引入多种像差并降低能量。对于工作在极紫外波段的点衍射干涉仪,要求的像面对准精度小于 20 nm。在最终的实际测量中,日本极紫外光刻系统发展协会(EUVA)所达到的对准精度在像平面方向为 10 nm,沿光轴方向为 15 nm,此时点衍射干涉仪测量重复性 0.045 nm(均方根值)^[6]。

4 小孔掩模的检测

小孔的圆度、三维形貌等会影响衍射球面光波的波前质量,并且由于小孔直径非常小(小于 1 μm),不仅制备难度大,质量检测也是难点。小孔尺寸可以通过测量艾里斑直径并根据公式推导来获得^[21],但此种方法无法获得高精度的检测结果,因此对于小孔直径的测量普遍采用以下几种方法。

4.1 光学显微镜

光学显微镜在光学检测以及精密制造技术领域为市场提供了完善高效的解决方案以及多功能的附件,使显微镜的性能和功能大大提高,使用和检测更加可靠和方便。由于光学显微镜分辨率受光波衍射的限制,无法满足纳米尺度的测量需要,意味着传统光学方法仅是微米/亚微米量级的检测方案。

4.2 扫描电子显微镜

为适应纳米测量学、纳米表征与测量方法发展的需要,在后光学时代,研究者逐渐采用扫描探针技术等能够获得更高分辨率的测量仪器研究微观形貌。这些仪器包括扫描:近场光学显微镜(SNOM)、扫描电子显微镜(SEM)、扫描透射显微镜(STM)以及原子力显微镜(AFM)等很多种。

目前国内外研究者广泛使用扫描 SEM 评估小孔掩模制造过程中的产品质量^[22,23]。由于电子束半径可以做得比光学成像的小孔孔径更小,因此 SEM 图像分辨率比光学图像方式高,目前高端的 SEM 横向分辨率已能达到 0.1 nm^[24],商用 SEM 对圆等基本形状可实现自动化测量,测量精度可以达到几纳米。由于 SEM 的成像图像为平面图像,即不存在垂直方向的分辨率,在获得针孔直径、圆度等参数的同时不能确切知道其内部信息。

4.3 原子力显微镜

目前对小孔掩模内部参数的测量具有很大的难度^[21],相关的文献报道也非常少,通过相关领域的研究及实践^[25~27],AFM的一些特性使其成为除断面技术外解决小孔掩模内部三维形貌及相关参数测量及评估的最有效仪器。

AFM是微观领域广泛使用的表面形貌观测工具,与SEM相比,AFM在空间中的3个坐标上都能达到纳米级的分辨率,且能够测量非导体,在大气或液体环境下可以对物体表面形貌进行三维成像。

AFM的测量图像是样品和探针共同作用的结果,它只是样品实际形貌的近似描述。除了近场作用的影响之外,探针的形状和尺寸对测量结果有很大的影响,当样品形状特性相对于探针尺寸很小时,得到的AFM图像主要是探针形状的反映,而不是被探测样品的真实形貌^[28]。点衍射干涉仪小孔掩模的直径多数在1 μm 以下,而普通商用AFM的探针针尖直径在微米量级,其宽深比小于针尖的宽深比,当进入小孔掩模时测量出来的轮廓为一个尖锐的V型,形成针尖与表面的卷积。

目前有两种方式消除或减少针尖对测量的影响,即利用数学方法进行表面重建或选择合适的针尖形状。图像重建是对真实表面的一种近似,对于针尖完全没有接触到部位,无法得到真实的表面形状。因此,采用特殊形状的针尖是解决针尖对测量结果影响的主要方式,特殊的针尖主要包括以下几种类型。

1) 高纵深比的针尖。如果针尖能够做到高的纵深比,则其形状对测量的影响大为降低。图7所示为Nanosensor公司生产的AR10型高纵深比针尖^[29],其纵深比超过了5:1。

2) 碳纳米管(CNT)探针。为获得被测样本表面的精细形貌,探针针尖的半锥角越小越好,但是探针太细也存在强度降低的问题,容易在扫描时发生弯曲或折断现象。碳纳米管技术的兴起给减小探针针尖的半锥角提供了一种途径,将纳米碳管粘附在普通微悬臂的针尖上,成为高级纵深比的针尖。根据制造工艺的不同,碳纳米管的直径一般为几纳米,最细的可达0.4 nm,比目前一般的微悬臂针尖底部还要锐利^[30,31],如图8所示。

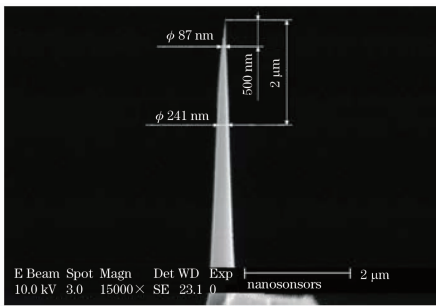


图7 高纵深比针尖

Fig. 7 Tip of high ratio of depth to width

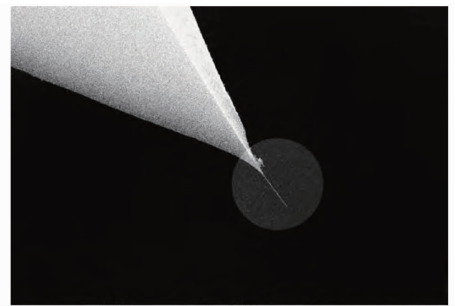


图8 碳纳米管探针的扫描电镜图像

Fig. 8 Scanning electron microscope picture of CNT probes

3) 特殊目的的针尖(图9)。如果不是为了得到表面形状,而是为了得到纳米几何结构参数,则可以采用特殊形状的针尖^[32~34]。例如在掩模测量中,可以将针尖末端做成膨胀的微球形,且球的直径大于针尖的其他部分。这样探针就能够测量到样品的侧壁,如果球能够准确校准,则能够准确测量出样品的相关数值。

5 结束语

高质量的小孔需要纳米级的制造与检测技术、大量的电磁场仿真及数学计算来实现。目前国际上小孔掩模加工及检测技术发展已经较为成熟,聚焦离子束刻蚀和电子束曝光刻蚀技术都可在基片上实现亚微米甚至纳米

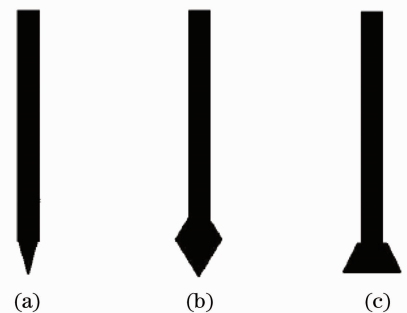


图9 三种不同形状针尖。(a)锥形针尖;(b)三点突起针尖;(c)外展式针尖

Fig. 9 Schematic of three types of AFM probe tip. (a) Cone shaped tip; (b) three-point tip; (c) flared tip

量级的小孔,逐渐成为小孔掩模最为理想的加工技术,并且其加工精度都可满足高精度点衍射干涉仪的要求。而我国虽然在小孔衍射的电磁场分析方面取得了一系列成果,但小孔掩模加工仍处于研究的初级阶段,加工精度有待提高。随着半导体行业向更小的特征尺寸发展,光刻机数值孔径不断上升,检测设备的精度要求也不断提高,小孔掩模的加工及对准技术还将得到进一步发展,新的加工机理和材料也将不断涌现。

参 考 文 献

- 1 H. Meddecki, E. Tejnir, K. A. Goldberg *et al.*. Phase-shifting point diffraction interferometer[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1526~1528
- 2 H. Meddecki. Phase Shifting Point Diffraction Interferometer [P]. U. S. Patent 5835217, 1998-11-10
- 3 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee *et al.*. Extreme ultraviolet phase shifting point diffraction interferometer; a wave-front metrology tool with subangstrom reference-wave accuracy[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7252~7263
- 4 K. A. Goldberg, P. P. Naulleau, J. Bokor *et al.*. Honing the accuracy of extreme ultraviolet optical system testing: at-wavelength and visible light measurements of the ETS Set-2 projection optic[C]. *SPIE*, 2002, **4688**: 329~337
- 5 K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu *et al.*. Comparisons between EUV at-wavelength metrological methods[C]. *SPIE*, 2005, **5921**: 59210D
- 6 C. Ouchi, S. Kato, M. Hasegawa *et al.*. EUV wavefront metrology at EUVA[C]. *SPIE*, 2006, **6152**: 615220
- 7 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee *et al.*. Characterization of the accuracy of EUV phase-shifting point diffraction interferometry[C]. *SPIE*, 2003, **3331**: 114~123
- 8 Xu Jiajun, Xing Tingwen. Analysis of two-dimensional pinhole vector diffraction in visible light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(12): 1205003
许嘉俊,邢廷文. 可见光二维小孔矢量衍射分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(12): 1205003
- 9 Lu Zengxiong, Jin Chunshui, Ma Dongmei *et al.*. Analysis of effect of tiny pinhole deviation on far-field wavefront quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0812002
卢增雄,金春水,马冬梅等. 微小孔偏差对远场波前质量影响分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0812002
- 10 Chen Chen, Yang Yongying, Wang Daodang *et al.*. Analysis of point diffraction wavefront error based on finite difference time domain method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 8031~8035
陈琛,杨甬英,王道档等. 基于时域有限差分方法的点衍射波前误差分析[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 8031~8035
- 11 K. A. Goldberg. Extreme Ultraviolet Interferometry[D]. Berkeley: University of California, 1997. 8~12
- 12 K. Sugisaki, M. Hasegawa, S. Katob *et al.*. Evaluation of contamination deposition on pinholes used in EUV at-wavelength PDI[C]. *SPIE*, 2004, **5374**: 703~709
- 13 Chen Baoqin, Liu Ming, Xu Qiuxia *et al.*. Match and mixed lithography technology between e-beam lithography system and optical lithography system[J]. *Chinese J. Semiconductors*, 2006, **27**(8): 802~806
陈宝钦,刘明,徐秋霞等. 光学和电子束曝光系统之间的匹配与混合光刻技术[J]. *半导体学报*, 2006, **27**(8): 802~806
- 14 Yang Qinghua, Chen Dapeng, Ye Tianchun *et al.*. Development of mask for scattering with angular limitation projection electron-beam lithography[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(4): 13~16
杨清华,陈大鹏,叶甜春等. 电子束散射角限制投影光刻掩模研制[J]. *光电工程*, 2004, **31**(4): 13~16
- 15 R. Soufli, M. F. Perea, S. L. Baker *et al.*. Development and calibration of mirrors and gratings for the soft X-ray materials science beamline at the Linac Coherent Light Source free-electron laser [J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(12): 2119~2128
- 16 Xiao Pei, Zhang Zengming, Sun Xia *et al.*. Monte Carlo simulation of electron transmission through masks in projection electron lithography[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5803~5808
肖沛,张增明,孙霞等. 投影电子束光刻中电子穿透掩模的 Monte Carlo 模拟[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5803~5808
- 17 M. Hasegawa, C. Ouchi, T. Hasegawa *et al.*. Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA[C]. *SPIE*, 2002, **5533**: 27~36
- 18 T. Hasegawa, C. Ouchi, M. Hasegawa *et al.*. EUV wavefront metrology system in EUVA [C]. *SPIE*, 2002, **5374**: 797~807
- 19 J. P. Spallas, R. E. Hostetler, G. E. Sommargren *et al.*. Fabrication of extreme-ultraviolet point-diffraction interferometer aperture arrays[J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(28): 6393~6398

- 20 M. A. Johnson, D. W. Philliona, G. E. Sommargren *et al.*. Construction and testing of wavefront reference sources for interferometry of ultra-precise imaging systems[C]. *SPIE*, 2005, **5869**: 586909
- 21 K. A. Goldberg, R. Beguiristain, J. Bokor *et al.*. At-wavelength testing of optics for EUV [C]. *SPIE*, 2001, **2437**: 347~354
- 22 P. P. Naulleau, K. A. Goldberg. Dual-domain point diffraction interferometer [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16): 3523~3533
- 23 T. Nagai, T. Sutou, Y. Inazuki *et al.*. Mask CD compensation method using diffraction intensity for lithography equivalent metrology[C]. *SPIE*, 2009, **7028**: 70281M
- 24 H. Watanabe, M. Kihara, M. Tanaka *et al.*. Inspection technique for cleaved optical fiber ends based on Fabry-Perot interferometer[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2012, **30**(8): 1245~1249
- 25 Jin Jingcheng, Jin Chunshui, Deng Wenyuan *et al.*. Testing method for optical supersmooth substrate surface by atomic force microscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11):1108003
靳京城, 金春水, 邓文渊 等. 超光滑光学基底表面原子力显微镜测试方法[J]. 中国激光, 2011, **38**(11):1108003
- 26 A. Kiani, K. Venkatakrishnan, B. Tan *et al.*. Maskless lithography using silicon oxide etch-stop layer induced by megahertz repetition femtosecond laser pulses[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(11): 10834~10841
- 27 T. Bao, A. Zerrade. Advanced CD AFM metrology for 3D critical shape and dimension control of photomask etch processing[C]. *SPIE*, 2006, **6349**: 63493Z
- 28 H. Imamoto, S. Kanehira, X. Wang *et al.*. Fabrication and characterization of silicon antireflection structures for infrared rays using a femtosecond laser[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(7): 1177~1178
- 29 F. D. Angelis, R. P. Zaccaria, M. Francardi *et al.*. Multi-scheme approach for efficient surface plasmon polariton generation in metallic conical tips on AFM-based cantilevers[J]. *Opt. Express*, 2011, **19**(22): 22268~22277
- 30 Xu Zongwei, Fang Fengzhou, Zhang Shaojing *et al.*. Effects of carbon nanotube probe mechanical properties on its performance[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2009, **30**(1): 158~161
徐宗伟, 房丰洲, 张少婧 等. 纳米管探针机械性能在纳米表征中的优势研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(1): 158~161
- 31 Zhu Pan, Sang Mei, Wang Xiaolong *et al.*. Research on nonlinear characteristics of SWCNT film by Z-Scan method measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(9): 091202
朱攀, 桑梅, 王晓龙 等. Z扫描法测单壁碳纳米管薄膜非线性特性的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(9): 091202
- 32 J. Fouchera, D. Gorelikovb, M. Poulingueb *et al.*. Minimizing CD measurement bias through realtime acquisition of 3D feature shapes[C]. *SPIE*, 2006, **6152**:
- 33 Zhu Xueliang, Hang Lingxia, Tian Ailing. Efficient testing technology of optical nanosurface processing defect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(10): 101201
朱学亮, 杭凌侠, 田爱玲 等. 纳米光学表面加工缺陷高效检测技术[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(10): 101201
- 34 Li Hongbo. Research on the Measurement Technology of Line Edge Roughness by AFM[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006. 24~27
李洪波. 基于 AFM 的刻线边缘粗糙度测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. 24~27