

极紫外光刻物镜补偿器的选择及定位精度分析

曹 振 李艳秋 孙圆圆

北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

摘要 极紫外(EUV)光刻物镜设计不仅要在系统优化阶段尽可能减小残余像差,还必须选择像质补偿器合理分配各项公差,从而在保证系统可制造性的前提下实现预期性能。针对一套数值孔径0.33的极紫外光刻物镜,进行了补偿器的优选和定位精度分析。根据结构参量对系统波像差的灵敏度并结合各结构参量之间的相关性选择了6个像质补偿器,并分析了非补偿器结构参量的公差。在此基础上,提出了基于蒙特卡罗法的补偿器定位精度分析方法。利用蒙特卡罗法模拟实际装调过程,通过分析补偿器定位精度对像质的影响,确定满足统计像质要求的补偿器定位精度。结果显示,当物镜系统最严间隔公差、偏心公差、倾斜公差分别在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 范围内,间隔和偏心补偿器的定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 时,系统波像差均方根(RMS)值在97.7%的置信概率下小于1 nm。

关键词 光学设计;公差分析;补偿器;反射系统;极紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1211003

Compensator Selection and Accuracy Analysis for Extreme Ultraviolet Lithographic Objective

Cao Zhen Li Yanqiu Sun Yuanyuan

Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education,
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Extreme ultraviolet (EUV) lithographic projection objective must be well-corrected for aberrations after optimization process. However, selecting compensators to allocate tolerances properly is also needed in consideration of manufacturability and expected performance. For an EUV lithographic projection objective with a numerical aperture of 0.33, six compensators are chosen based on the sensitivity to wavefront error and correlation, and then the tolerances of non-compensators are analyzed. Furthermore, a method based on Monte Carlo trials is presented to analyze the accuracy of compensators. Using this method, the accuracy of compensators is obtained. The result shows that the most rigorous thickness tolerances, decentering tolerances and tilt tolerances are in the range of $\pm 2 \mu\text{m}$, $\pm 3 \mu\text{m}$ and $\pm 5 \mu\text{rad}$ respectively, and the accuracy of thickness and decentering compensators is $\pm 0.1 \mu\text{m}$. The root mean square (RMS) wavefront error of the projection system is less than 1 nm in the probability of 97.7%.

Key words optical design; tolerance analysis; compensator; catoptric system; extreme ultraviolet lithography

OCIS codes 220.1000; 220.4830; 140.7240; 340.7480

1 引言

极紫外光刻(EUVL)是很有潜力的下一代光刻技术,其投影物镜是实现高分辨率光刻的关键。为实现物镜的预期性能并保证其良好的可制造性,必须合理分配各项公差。补偿器是光学系统中可调节的结构参量,合理地选择像质补偿器能够有效降低制造公差要求^[1-2]。

收稿日期: 2015-7-1; 收到修改稿日期: 2015-7-15

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001-002)

作者简介: 曹 振(1986—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: feifei4150@163.com

导师简介: 李艳秋(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事高分辨成像及先进光刻技术、传感与微系统技术、微纳检测技术及精密光学仪器等方面的研究。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

对于球面元件较多的光学系统如深紫外光刻物镜,可选择对某种像差敏感而对其他像差不敏感的结构参量作为该像差的补偿器^[1]。然而,EUVL物镜由于采用非球面反射镜且镜片数较少,其结构参量与像差之间的关系较为复杂,一个结构参量会影响多种像差^[4]。因此,上述传统的补偿器选择方法不再适用于EUVL物镜系统的公差分析。此外,EUVL物镜是高精度光学系统,其补偿器为像质灵敏度较高的结构参量,系统对补偿器定位精度的要求甚至高于对非补偿器装调精度的要求,而现有的光学设计软件不具备分析补偿器定位精度的功能。为了全面反映物镜系统对装调精度的要求,有必要对补偿器的定位精度进行分析。

本文以数值孔径(NA)0.33的六反EUVL物镜为研究对象,依据结构参量对波像差Zernike系数的灵敏度并结合各结构参量之间的相关性选择补偿器。在灵敏度较高的结构参量中,优先选择不相关(对Zernike系数的影响不存在耦合)的结构参量作为补偿器。如不相关的补偿器仍不能满足像质和公差要求,后续增加的补偿器要避免与已有补偿器之间存在较强的负相关性。选择高灵敏度的结构参量能够减少补偿器数目,从而降低机械和装调的复杂度。排除负相关的结构参量能够避免补偿器调节行程的增加,从而保证镜片压电陶瓷驱动器的调节精度^[5]。依据上述标准选取了6个像质补偿器,并利用光学设计软件CODE V分析了物镜非补偿器结构参量的公差。进一步,提出了基于蒙特卡罗法的补偿器定位精度分析方法。利用蒙特卡罗实验模拟实际装调过程,分析各补偿器所对应补偿量的有效数字位数对系统像质的影响。最终确定满足统计像质要求的各补偿量最少有效数字位数,该有效数字位数则对应补偿器的定位精度。蒙特卡罗法能够反映各误差间的相互作用,在实验次数足够多的情况下分析精度较高。利用以上方法得到的分析结果表明,当物镜最严间隔公差、偏心公差、倾斜公差分别在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 、 $\pm 3 \mu\text{m}$ 、 $\pm 5 \mu\text{rad}$ 范围内,间隔和偏心补偿器的定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 时,系统波像差均方根值在97.7%的置信概率下小于1 nm。

2 极紫外光刻物镜光学系统

EUVL采用13.5 nm的照明光源,由于光学材料在这一波段具有强吸收性,因此投影物镜必须采用反射式光学系统^[6]。光刻物镜要求像方远心^[7-8],以保证像面有微小移动的情况下系统放大倍率不变。所涉及的投影物镜采用六片非球面反射镜,其综合波像差设计值小于0.4 nm。数值孔径0.33的极紫外光刻物镜结合离轴照明等分辨率增强技术^[9-10],能够满足16 nm光刻技术节点的要求。投影物镜结构如图1所示,其主要设计指标如表1所示^[11]。

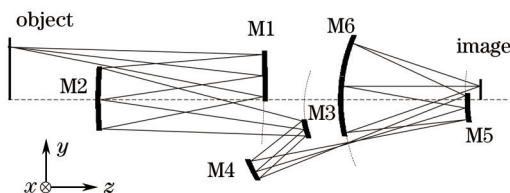


图1 物镜结构图和坐标系

Fig.1 Layout and coordinate of objective system

表1 投影物镜主要设计指标

Table 1 Specification of objective system

Parameters	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Diameter /mm	248	208	202	423	111	307
Max asphericity / μm	40.0	1.4	40.0	13.7	24.3	22.2
Incident angles /($^\circ$)	1.5~10.8	5.2~7.7	19.5~24.5	9.4~13.2	1.0~22.7	2.7~6.5

物镜的孔径光阑设置在第二片反射镜M2上,有利于制造和装调^[12]。整个物镜设计关于光轴旋转对称。但是,为了避免光路遮拦,需要采用如图2所示的离轴环形视场。这使得反射镜的通光区域偏离光轴,而反射镜通光区域之外的部分会被去除。因此,EUVL物镜的公差分析类似于离轴光学系统。将中心视场主光线在各反射镜上的交点作为各反射镜的基准点,则每个反射镜有5个独立的装调自由度,分别为相对基准点的偏心 Δ_x 、 Δ_y 、 Δ_z ,以及绕各自x轴和y轴的旋转 θ_x 和 θ_y 。由于通光区域所在的母镜具有旋转对称性,因此反射镜绕z轴的旋转 θ_z 可等效为 Δ_x 和 Δ_y 。

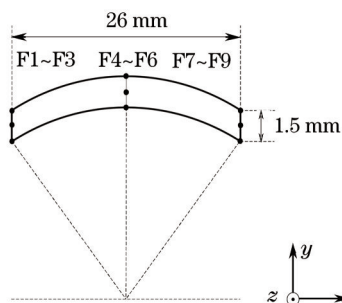


图2 像方离轴环形视场图和视场点 F1~F9

Fig.2 Off-axis ring image field and F1~F9 field points

如图2所示,选择像方 26 mm×1.5 mm 环形视场上的9个视场点 F1~F9用于评价分配公差后的物镜像质。参考 ASML 产业化极紫外光刻物镜的性能指标^[13],以波像差均方根(RMS)值小于 1 nm 为评价标准。在不添加补偿器的情况下,利用光学设计软件 CODE V 对物镜进行初始装调公差分配。结果表明,M6的偏心和倾斜误差最为严格,分别为 0.05 μm 和 0.1 μrad。因此,可将 M6 固定作为装调基准,从而去除其严格的装调误差。同时,为了进一步放松其余反射镜的装调公差要求,还需选择适合的像质补偿器。

3 补偿器的选择

补偿器是装调过程中特定的结构参量,通过调节这些结构参量能够弥补公差引起的像质恶化。反射镜的面型误差会造成物镜系统高阶像差的恶化,而系统装调中引入的补偿器对高阶像差的补偿作用较弱^[14]。因此,在不考虑补偿器的情况下,以波像差小于 1 nm 为评价标准分配反射镜的面型误差。

表 2 六片反射镜的面型误差

Table 2 Figure error of six reflective mirrors

Mirror	M1	M2	M3	M4	M5	M6
RMS figure error /nm	0.32	0.20	0.89	1.31	0.25	0.22

分析结果如表2所示,其中M2反射镜的面型误差要求最为严格,面型误差RMS值为0.20 nm。目前,Carl Zeiss和Nikon公司报道的非球面反射镜的加工能力能够满足上述面型误差的制造要求^[15-16]。

除去作为装调基准的M6,物镜系统中独立的装调自由度共25个(每个反射镜对应5个自由度)。为降低装调机构的复杂度,应选择尽可能少的补偿器。同时为保证驱动镜片的压电陶瓷的调节精度,应避免补偿器调节行程过大。为实现上述目标,通过分析各结构参量在微小范围内变化时波像差各项Zernike系数的变化量,获得各结构参量对波像差的灵敏度以及结构参量之间的相关性。优先选择灵敏度高且不相关的结构参量作为补偿器,在此基础上逐个添加不具有较强负相关性的补偿器(负相关性会导致补偿器调节行程增加),直至满足像质和公差的要求。补偿器选择方法的流程如图3所示。

通过分析各装调量对波像差Zernike系数的影响发现:单面反射镜的 $x(y)$ 方向的偏心 $\Delta_x(\Delta_y)$ 与绕 $y(x)$ 轴的旋转 $\theta_y(\theta_x)$ 对Zernike系数的影响相同,为相关补偿器。图4为M4- Δ_x 和M4- θ_y 有微小变化时,波像差Zernike系数的变化量。鉴于单个反射镜的偏心和倾斜之间存在相关性,只选择偏心作为补偿器。

首先,根据各结构参量对波像差的灵敏度,确定12个灵敏度最高的结构参量作为备选结构参量。在各备选结构参量中,M4- Δ_x 和M4- Δ_y 对波像差最为敏感,M3- Δ_z 对波像差较为敏感,三者对波像差Zernike系数影响近似相互独立,如图5所示。选取上述3个结构参量配合像面移动作为补偿器进行公差分析。结果表明,非补偿器的装调公差仍较为严格且像质也不满足要求,需要增加补偿器数目。

进一步分析发现,M5- Δ_x 和M5- Δ_y 对波像差较为敏感,但分别于M4- Δ_x 和M4- Δ_y 相关,如图6所示。因此,需要考察M5- Δ_x 与M4- Δ_x 之间以及M5- Δ_y 与M4- Δ_y 之间是否存在负相关性。

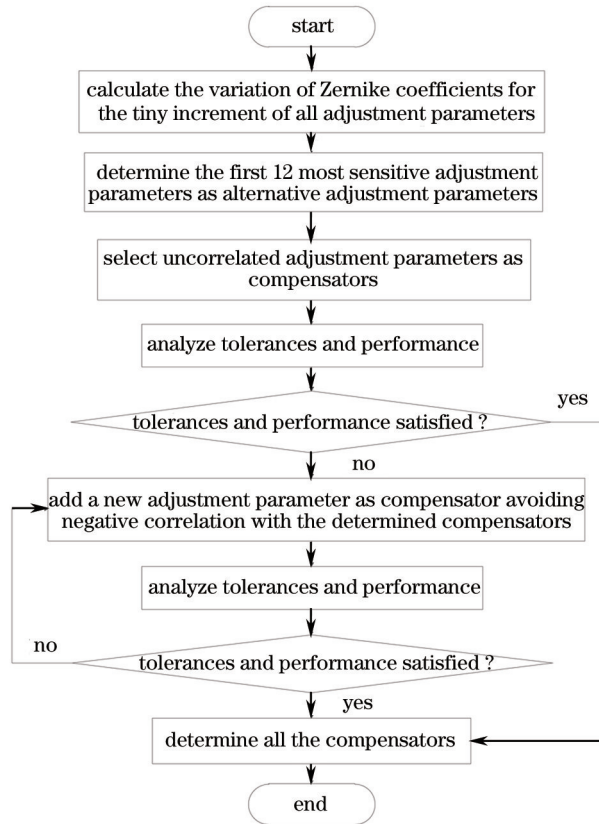


图 3 补偿器选择流程图

Fig.3 Flow chart of compensators selection

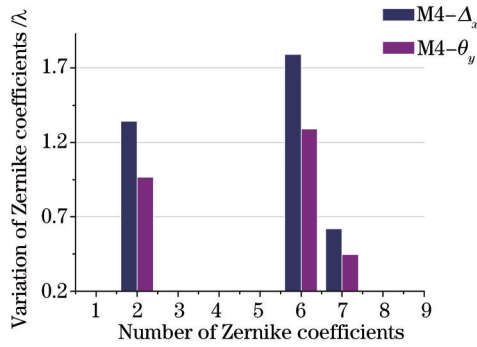


图 4 M4- Δ_x 和 M4- θ_y 对 Zernike 系数的影响

Fig.4 Effect of Zernike coefficients of M4- Δ_x and M4- θ_y

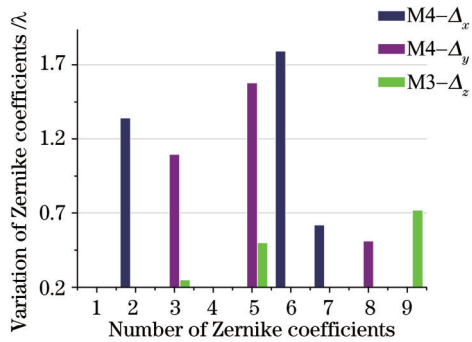


图 5 M4- Δ_x 、M4- Δ_y 以及 M3- Δ_z 对 Zernike 系数的影响

Fig.5 Effect of Zernike coefficients of M4- Δ_x , M4- Δ_y and M3- Δ_z

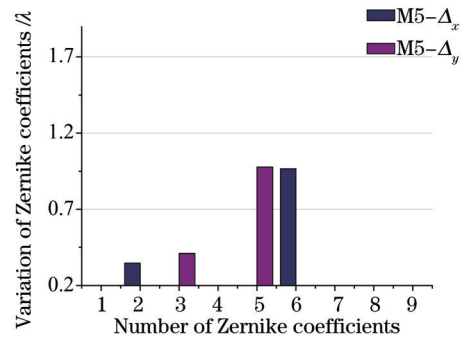


图 6 M5- Δ_x 和 M5- Δ_y 对 Zernike 系数的影响

Fig.6 Effect of Zernike coefficients of M5- Δ_x and M5- Δ_y

引入 $M1-\Delta_x$ 的失调量造成像质降低,仅使用 $M4-\Delta_x$ 作为补偿器时,其对应的补偿量为 $1.6\ \mu\text{m}$ 。而仅使用 $M5-\Delta_x$ 作为补偿器时,其对应的补偿量为 $4.3\ \mu\text{m}$ 。使用 $M4-\Delta_x$ 和 $M5-\Delta_x$ 同时作为补偿器时,二者对应的补偿量分别为 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.6\ \mu\text{m}$ 。上述分析说明 $M4-\Delta_x$ 和 $M5-\Delta_x$ 不具有较强的负相关性,即引入 $M5-\Delta_x$ 不会造成 $M4-\Delta_x$ 调节行程的增加。通过类似的方法验证了 $M4-\Delta_y$ 和 $M5-\Delta_y$ 之间也不存在较强的负相关性。由以上讨论,最终选取了 $M4-\Delta_x$ 、 $M4-\Delta_y$ 、 $M5-\Delta_x$ 、 $M5-\Delta_y$ 、 $M3-\Delta_z$ 以及像距作为系统的像质补偿器。

上述6个补偿器组合确定后,使用 CODE V 分配物镜非补偿器的装调公差,分配结果如表3所示。在上述公差下(假设补偿器的定位精度足够高),物镜的波像差 RMS 值以 97.7% 的概率小于 $1\ \text{nm}$,评价像质时加入了已分配的反射镜的面型误差。

表3 非补偿器的装调公差

Table 3 Alignment tolerances of non-compensators

Mirror	$\Delta_x / \mu\text{m}$	$\Delta_y / \mu\text{m}$	$\Delta_z / \mu\text{m}$	$\theta_x / \mu\text{rad}$	$\theta_y / \mu\text{rad}$
M1	4	4	10	10	5
M2	8	5	5	10	5
M3	3	3	-	10	5
M4	-	-	4	20	10
M5	-	-	2	5	5
M6	Alignment datum				

4 补偿器定位精度分析

补偿器为像质灵敏度较高的结构参量,其定位精度决定整个系统对装调精度的要求。在完成补偿器的选择和非补偿器公差分析的基础上,利用蒙特卡罗分析补偿器的定位精度。通过蒙特卡罗试验模拟实际的装调过程,分析补偿器定位精度对像质的影响,最终确定满足统计像质要求的补偿器定位精度。具体流程如图7所示。

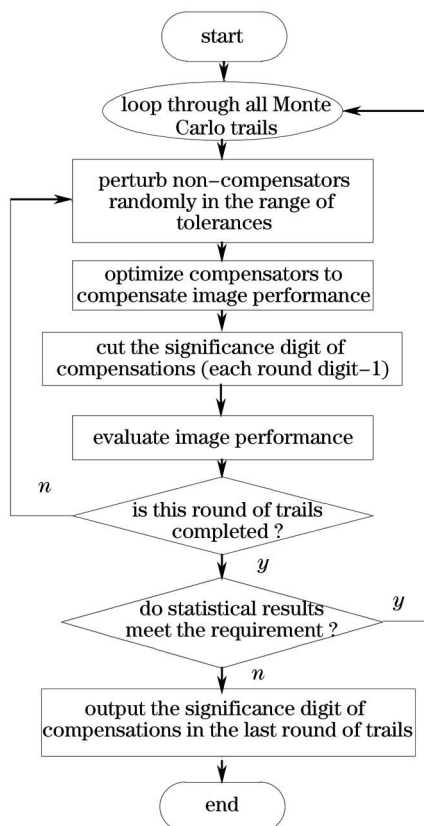


图7 补偿器精度分析流程图

Fig.7 Flow chart of compensators accuracy analysis

利用CODE V宏语言实现补偿器定位精度的分析。首先,调用软件的蒙特卡罗分析功能,设置每轮蒙特卡罗试验的次数,在公差范围内随机给定各非补偿器的误差。其次,利用优化功能,以成像质量为评价标准,以各补偿器为优化变量对系统进行优化。在获得各补偿器对应的补偿量后,继续对各补偿量小数点之后的有效数字进行截取(补偿量的单位为毫米)。最后,再对物镜系统进行像质评价。如果本轮蒙特卡罗试验的像质统计结果能够满足性能要求(在97.7%的概率下波像差RMS值小于1 nm),则再去掉各补偿量小数点后的一位有效数字,进行新一轮蒙特卡罗试验。重复上述流程,直到像质统计结果不能满足要求,则退出实验并输出上一轮试验中补偿量的有效数字位数和像质的统计结果图。利用上述方法,最终确定满足像质要求的各补偿量小数点后的最少有效数字位数为4,对应各补偿器的定位精度为 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (定位精度以所允许的最大误差的形式给出)。考虑到补偿器的定位精度、非补偿器的装调误差以及反射镜的面型误差后,物镜系统波像差的累积概率分布如图8所示,各视场点波像差均方根值在97.7%的置信概率下小于1 nm,实现了预期的像质要求。

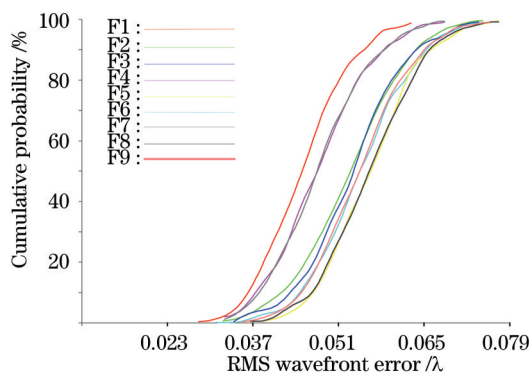


图8 波像差的累积概率分布

Fig.8 Cumulative probability of wavefront error

5 结 论

详细讨论了EUVL物镜公差分析中像质补偿器的选择及其定位精度的分析方法。针对实验室设计的NA 0.33物镜系统,最终选择6个像质补偿器分析了系统非补偿器结构参量的公差,并利用蒙特卡罗法分析了系统补偿器的定位精度。结果表明,物镜系统对反射镜面型误差和装调精度的要求与国外产业化EUVL物镜的要求相当^[17]。考虑上述制造误差后,物镜系统波像差RMS值在97.7%的置信概率下小于1 nm。分析结果证明了物镜光学设计和公差分析的合理性。以上方法也可应用于其它非球面、高精密光学系统的公差和补偿器定位精度分析。

参 考 文 献

- 1 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122003.
徐伟才,黄玮,杨旺. 投影光刻物镜倍率的公差分析与补偿[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1122003.
- 2 Fu Yuanying, Li Yanqiu, Liu Xiaolin, et al.. A method of tolerance analysis for wavefront error of lithographic projection lens[J]. Optical Technique, 2014, 40(4): 289-294.
符媛英,李艳秋,刘晓林,等. 投影光刻物镜波像差的公差分析方法[J]. 光学技术, 2014, 40(4): 289-294.
- 3 D M Williamson. Compensator selection in the tolerancing of a microlithographic lens[C]. SPIE, 1989, 1049: 178-185.
- 4 H N Chapman, D W Sweenry. Rigorous method for compensation selection and alignment of microlithographic optical systems[C]. SPIE, 1998, 3331: 102-112.
- 5 Zhao Yang, Wang Ping, Zhao Lei, et al.. Selecting system compensators for small scale projected objective using displaced parameters vector[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822001.
赵阳,王平,赵磊,等. 利用失调量选择投影物镜小比例模型系统补偿量[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822001.
- 6 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16~22 nm extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013,

- 33(9): 0922005.
曹 振, 李艳秋, 刘 菲. 16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0922005.
- 7 Cai Yanmin, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Optical design of lithography projective lens with variable total track[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0416003.
蔡燕民, 王向朝, 黄惠杰. 共轭距可变的光刻投影物镜光学设计[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0416003.
- 8 Rui Dawei, Shi Zhenguang, Yuan Wenquan, *et al.*. Pupil non-balance calibration for lithographic lens[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(9): 0916002.
芮大为, 史振广, 袁文全, 等. 光刻物镜光瞳极平衡性标定方法[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0916002.
- 9 A Pirati, R Peeters, D Smith, *et al.*. Performance overview and outlook of EUV lithography systems[C]. SPIE, 2015, 9422: 94221P.
- 10 Hu Zhonghua, Yang Baoxi, Zhu Jing, *et al.*. Design of diffractive optical element for pupil shaping optics in projection lithography system [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0616001.
胡中华, 杨宝喜, 朱 菁, 等. 用于投影光刻机光瞳整形的衍射光学元件设计[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0616001.
- 11 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Grouping design method with real ray tracing model for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Optical Engineering, 2013, 52(12): 1251021-1251026.
- 12 R Hudyma, H J Mann, U Dinger. Projection system for EUV lithography: U S, 7151592[P]. 2006-12-19.
- 13 H Meiling, N Buzing, K Cummings, *et al.*. EUVL system: Moving towards production[C]. SPIE, 2009, 7271: 727102.
- 14 Xu Weicai. Optical Design and Maging Performance Compensation for the Lithographic Lens[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.
许伟才. 投影光刻物镜的光学设计与像质补偿[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
- 15 M Lowisch, P Kuerz, H J Mann, *et al.*. Optics for EUV production[C]. SPIE, 2010, 7636: 763603.
- 16 K Murakami, T Oshino, H Kondo, *et al.*. Development progress of optics for extreme ultraviolet lithography at Nikon[J]. J Micro/Nanolith MEMS MOEMS, 2009, 8(4): 041507.
- 17 H Meiling, J P Benschop, R A Hartman, *et al.*. EXTATIC ASML's α -tool development for EUVL[J]. SPIE, 2002, 4688: 52-63.

栏目编辑: 韩 峰