

超大数值孔径极紫外光刻物镜的公差分析

孙圆圆 李艳秋 曹 振

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 超大数值孔径极紫外光刻物镜($NA>0.45$)能够满足 11 nm 光刻技术节点的需求,而高分辨率成像对物镜系统的公差要求非常严格。针对一套数值孔径为 0.50 的极紫外投影物镜进行了补偿器选择和制造公差分析。通过对系统敏感元件结构参量构成的灵敏度矩阵进行奇异值分解(SVD)来选择像质补偿器。物镜系统的结构参量数目较多,而奇异值分解法要求灵敏度矩阵中结构参量数不多于像差数。为了满足奇异值分解法的要求,首先确定系统的敏感元件并选择敏感元件对应的结构参量构造灵敏度矩阵。再通过对该灵敏度矩阵进行奇异值分解确定有效的补偿器组合,从而弥补公差造成的像质恶化。采用上述方法确定了 8 个补偿器,并利用 CODE V 软件进行了公差分配。结果表明,系统波像差均方根值在 97.7% 的置信概率下小于 0.5 nm,且最严公差控制在微米及微弧度量级。

关键词 光学设计;公差分析;奇异值分解;极紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.122207

Tolerance Analysis of High-Numerical Aperture Extreme Ultraviolet Lithographic Objective

Sun Yuanyuan Li Yanqiu Cao Zhen

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

Abstract High-numerical aperture ($NA>0.45$) extreme ultraviolet lithography is a promising candidate for 11 nm node lithography, and the tolerances of the objective system are rigorous due to high resolution image. The singular value decomposition (SVD) of the sensitivity matrix from sensitive mirrors is used to select efficient compensators for an extreme ultraviolet (EUV) lithographic objective with a numerical aperture of 0.50. The method requires that the amounts of configuration parameters is less than that of the aberration parameters, so the sensitive mirrors are confirmed and the sensitivity matrix is obtained by the configuration parameters of the sensitive mirrors. Then the sensitive and efficient compensators are selected to relax the other tolerances and compensate the worse of image quality by using the SVD of the sensitivity matrix. Using the above method, eight compensators are selected and other tolerances are assigned. Result shows that the RMS wavefront error of the objective system is less than 0.5 nm in the probability of 97.7% and the most rigorous tolerances are in the range of micron and microradian respectively.

Key words optical design; tolerance analysis; singular value decomposition; extreme ultraviolet lithography

OCIS codes 220.1000; 220.4610; 220.3740; 340.7480

1 引言

极紫外光刻(EUVL)是很有前景的下一代光刻技术之一。2013年,荷兰ASML使用数值孔径(NA)为 0.33 的极紫外光刻物镜,实现了 22 nm 的光刻分辨率^[1]。同年,国内曹振等^[2]报道了 NA 为 0.32 的极紫外光刻物镜的工程化设计及初步公差分析。实现 11 nm 及以下光刻技术节点,需要研制超大数值孔径($NA>0.45$)的极紫外投影光刻物镜^[3]。物镜 NA 的增大导致反射镜口径的增加和中心遮拦的引入,这使得系统结构参量与像

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15; 网络出版日期: 2015-11-25

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001-002)

作者简介: 孙圆圆(1990—),女,硕士研究生,主要从事极紫外光刻光学系统设计及公差方面的研究。

E-mail: 2120130566@bit.edu.cn

导师简介: 李艳秋(1962—),女,博士,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)

差之间的关系更加复杂,对加工与装调公差的要求也更为苛刻^[4-7]。因此,需要对超大 NA 物镜系统进行详细的公差分析,以此来评估物镜设计的可制造性并指导加工与装调。

补偿器是光学系统装调过程中可调节的结构参量,能够补偿公差造成的像质恶化,确定有效的补偿器是公差分析的关键步骤。奇异值分解法通过对光学系统灵敏度矩阵进行奇异值分解相关运算,确定有效的补偿器组合。该方法运算过程严谨,并且已应用于四反极紫外光刻物镜补偿器的选择^[8]。奇异值分解方法要求灵敏度矩阵中结构参量数不多于像差数。但是,随着物镜 NA 的增大,反射镜的数目也随之增加,这使得系统灵敏度矩阵中结构参量的数目超过了补偿器所能补偿的像差数(装调补偿器仅能够有效补偿低阶像差)^[9-11]。因此,该方法不能直接应用于超大数值孔径六反极紫外投影物镜补偿器的优选。

本文拓展了奇异值分解方法,并将其应用于六反物镜系统的补偿器选择,针对实验室设计的一套 NA 为0.50的六反极紫外光刻物镜进行补偿器选择和制造公差分析。首先,通过分析灵敏度曲线确定系统的敏感元件,其次,利用敏感元件对应的结构参量构造灵敏度矩阵。通过对敏感结构参量构造的灵敏度矩阵进行奇异值分解运算,确定有效的补偿器组合。采用上述方法确定了8个补偿器,并利用CODE V软件进行了公差分配。系统波像差均方根值在97.7%的置信概率下小于0.5 nm,且最严公差控制在微米及微弧度量级。结果表明,该方法可有效地应用于超大 NA 的极紫外投影物镜的公差分析。

2 光刻物镜光学系统及公差类型

对于实现11 nm光刻技术节点,数值孔径为0.50、缩小倍率为8×的极紫外光刻物镜设计被认为是最具潜力的物镜设计之一。所涉及的超大数值孔径极紫外光刻物镜的系统结构设计图及技术指标要求分别如图1和表1所示,其能够满足11 nm光刻技术节点的性能要求^[12]。

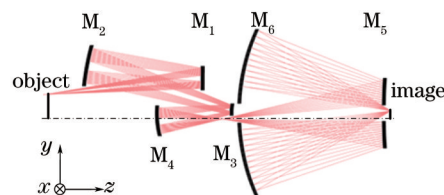


图1 光刻物镜结构图

Fig.1 Layout of projection objective

表1 物镜技术指标要求

Table 1 Optical characteristics of projection objective

Optical characteristics	Value
Wavelength /nm	13.5
Numerical aperture	0.50
Image field /mm	13×1
Reduction	8
Total track length /mm	1521
Back working distance/mm	39
Chief ray angle of incidence at mask /($^{\circ}$)	6
Telecentricity on wafer /($^{\circ}$)	0.0003
Design wavefront error (RMS) / λ	≤ 0.027
Expect wavefront error (RMS) / λ	≤ 0.035

系统装调时一般以相对敏感且口径较大的元件为基准,去除其严格的装调公差进而降低装调成本。所分析的物镜以 M_6 作为其他元件装调的基准。对于加工误差,考虑由5~37项Zernike多项式表征的面型误差;在分析装调公差(偏心与倾斜)时,仅考虑刚体自由度对系统波像差的影响,即每一元件有6个自由度,去掉5个相互作用的结构参量共需考虑25个装调公差。

参考现有的极紫外光刻样机的成像性能,并综合考虑制造成本和成像性能,将物镜系统波像差的评价标准设定为小于0.5 nm^[13-14]。利用光学设计软件CODE V对加工与装调公差进行反灵敏度分析,得到图2所示的初始公差下的波像差RMS值累积概率分布以及表2满足像质要求的初始(补偿器组补偿前)制造公差范

围。由图2可知,在97.7%的置信概率下物镜系统的波像差RMS值小于0.5 nm。

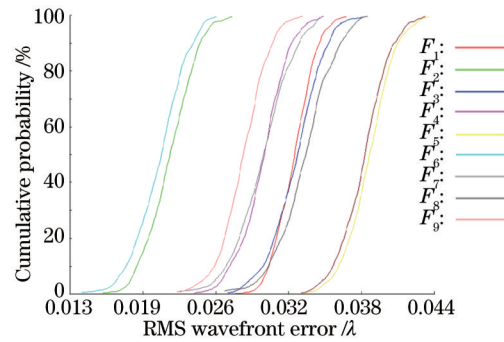


图2 初始公差下的波像差RMS值的累积概率分布

Fig.2 Cumulative probability of RMS wavefront error in initial tolerances

表2中DLT代表元件间隔公差,DLX、DLY分别代表元件沿 x 轴/ y 轴方向的偏心公差,DLA、DLB分别代表元件绕 x 轴/ y 轴的倾斜公差,Figure error(RMS)代表各元件的面型误差。参照文献中报道的国际最先进的加工与检测水平^[15-18],只有各元件面型误差满足制造要求,而初始分配的各项装调公差均过于严紧,需要进一步的公差灵敏度分析和补偿器选择来放松各项装调公差,并补偿其造成的像质恶化。

表2 初始制造公差范围

Table 2 Initial fabrication tolerances

Mirrors	DLT / μm	DLX / μm	DLY / μm	DLA / μrad	DLB / μrad	Figure error (RMS) / μm
M ₁	0.26	0.08	0.08	0.50	0.50	79.1
M ₂	0.13	0.03	0.03	0.03	0.03	75.8
M ₃	0.30	0.04	0.04	0.20	0.20	77.7
M ₄	0.33	0.02	0.02	0.03	0.03	76.0
M ₅	0.05	0.09	0.09	0.03	0.03	75.3
M ₆	--	0.02	0.02	0.04	0.04	81.1

3 奇异值分解的理论分析

3.1 像差参数的选定及表征

由于Zernike多项式自身的正交性、旋转对称性以及和初级Seidel像差的对应性,其对光学系统波面的拟合精度最高,因此,利用Zernike多项式表征出瞳处所有选定视场的波像差。由于装调补偿器仅能有效补偿Zernike系数表征的低阶像差,对高阶像差的补偿作用非常有限,因此仅考虑结构参量对低阶像差的影响,选取Zernike多项式的前16项作为像差参量。物镜的像方视场示意图如图3所示,物镜的像方环形视场关于光轴旋转对称,选取对像差敏感的中心视场及两侧边缘视场,共9个视场点作为参考视场点。

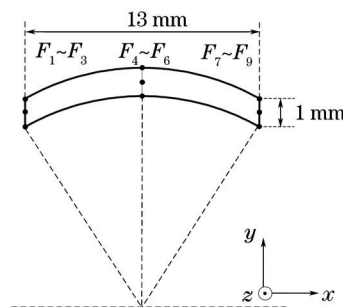


图3 像方离轴环形视场上的9个视场点

Fig.3 9 points on off-axis image ring field

若所有视场取相同的权重,则全视场的像差参量 $Z = (z_1, \dots, z_j, \dots, z_{16})^T$ 的第 j 个分量 z_j 可表示为:

$$z_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_{ij}^2}, \quad (1)$$

式中 Z_j 代表第 i 个视场的第 j 项 Zernike 多项式系数, N 为视场总数。上标 T 代表矩阵转置。

3.2 公差灵敏度矩阵

像差参量 Z 与各结构参量密切相关,二者之间的关系可表示为:

$$Z = Z(X), \quad (2)$$

式中 X 为所有结构参量(25项)组成的结构参数列向量。当结构参量存在公差时,会使像质恶化,像差参量变为 $Z(X + \Delta X)$,按照泰勒级数展开:

$$Z(X + \Delta X) = Z(X) + J\Delta X + O(\delta X^2), \quad (3)$$

式中 ΔX 代表各结构参量引入的公差值, J 即为 16×25 的公差灵敏度矩阵,其中 $J_{ij} = \frac{\partial Z_i}{\partial X_j}$,代表各像差参量对

各结构参量变化的敏感程度。由(3)式可知,像差参量与结构参量存在复杂的非线性关系。当结构参量存在微小扰动时,为了便于研究,利用差商代替微商,并忽略高阶项的影响,将非线性问题转化为线性问题。此时,公差灵敏度矩阵 J 可表示为:

$$J = \frac{Z(X + \Delta X) - Z(X)}{\Delta X} = \frac{\Delta Z}{\Delta X}. \quad (4)$$

在计算公差灵敏度矩阵时,人为给定误差 ΔX 要大于最大公差值,以保证公差灵敏度矩阵的准确性。 ΔX 取值如下:间隔/偏心取 $3 \mu\text{m}$,倾斜取 $5 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 。将 ΔX 代入到光学设计软件 CODE V 中,得到其对 Zernike 系数的影响,再利用数据处理软件进行数据处理得到物镜结构参量的公差灵敏度矩阵。

3.3 公差灵敏度矩阵的奇异值分解

灵敏度矩阵的奇异值分解可表示为:

$$J_{n \times m} = U_{n \times n} W_{n \times m} V_{m \times m}^T, \quad (5)$$

式中矩阵 U 、 V 的列向量分别代表像差向量及结构参量向量,而 W 为对角元素按递减顺序排列的对角矩阵,对角元素即为奇异值。奇异值越大,则对应的像差向量对结构参量向量越敏感,反之,奇异值越小,说明对应结构参量向量对像差向量的影响越小。而公差灵敏度矩阵一次奇异值分解后得到的敏感结构参量向量包含所有结构参量,仍然没有简化像质补偿过程。奇异值分解方法通过奇异值分解相关运算,去除结构参数向量中对像差不敏感的结构参量,将敏感结构参量选作补偿器。

4 补偿器选择及补偿效果分析

4.1 补偿器选择

物镜所有结构参量构成的灵敏度矩阵 J 为 16×25 的矩阵,该系统灵敏度矩阵中结构参量的数目明显超过了补偿器所能够有效补偿的像差数。所以,先筛选出敏感元件,缩小补偿器选择范围,进而减少计算误差;再利用敏感元件结构参量构成的灵敏度矩阵进行奇异值分解,通过严谨的理论计算选择敏感且有效的像质补偿器。

图4为补偿器选择的流程图。首先,求得元件各项单位公差对应的 Zernike 系数的均方根值,并绘制每个元件结构参量的灵敏度曲线。灵敏度曲线反映了像差参量对元件各项结构参量的敏感程度,对比不同元件的灵敏度曲线选取敏感元件,而选取的敏感元件数量由奇异值分解要求和系统所需补偿效果共同决定;然后,利用所选敏感元件的结构参量构成灵敏度矩阵 J_{sens} ,对 J_{sens} 进行奇异值分解运算,找到最小奇异值对应的结构参数向量中绝对值最大的元素所在的列 j ,这意味着像差向量对系统灵敏度矩阵中第 j 个结构参量最不敏感,因此将灵敏度矩阵 J_{sens} 的第 j 列化为零向量。反复进行上述操作并记录灵敏度矩阵每列被化为零向量时的次序,直到推算出最敏感的结构参量。通过上述操作获得所有结构参量的敏感排序,从最敏感的结构参量开始依次选作补偿器,直到补偿后的像质满足要求且各项公差满足现有的加工与检测水平。

灵敏度曲线如图5所示,每条曲线代表一个元件所有结构参量的公差灵敏度,其中 M_i 代表第 i 个元件。综合考虑元件各个结构参量的补偿效果,最终选择 M_5 、 M_4 、 M_2 作为敏感元件,用其结构参量构成灵敏度矩阵 J_{sens} 。

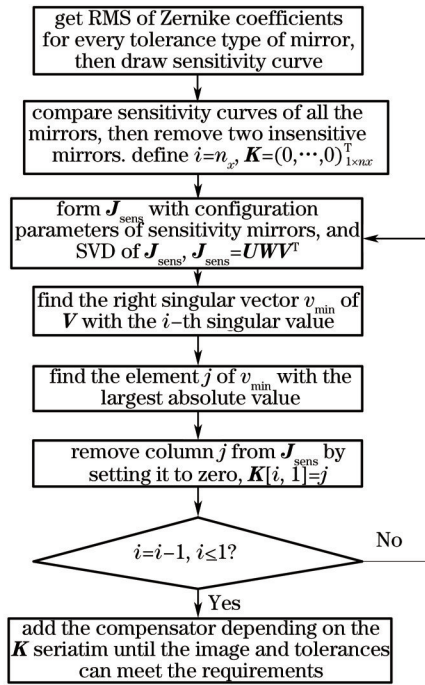


图4 补偿器选择流程图

Fig.4 Flow chart of compensator selection

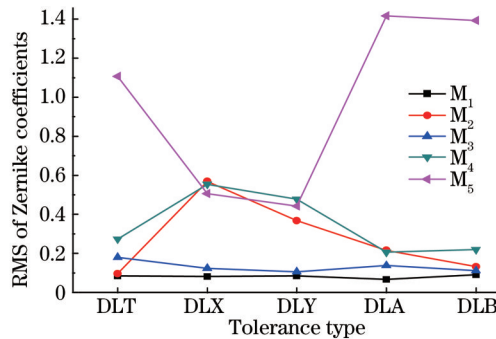


图5 各元件装调公差灵敏度分布

Fig.5 Distributions of assembly tolerance sensitivities of each mirror

4.2 补偿效果分析

利用上述补偿器选择方法,分别选择了倾斜补偿: M_2 的倾斜公差 DLA 和 DLB、 M_4 的倾斜公差 DLA 和 DLB;偏心补偿: M_5 的偏心公差 DLX 和 DLY;间隔补偿: M_5 的间隔公差 DLT、像面离焦,共 8 个补偿器。此时像质满足要求且其余各项公差得到有效放松。补偿后的系统波像差 RMS 值如图 6 所示,波像差 RMS 值在 97.7%的累积概率下小于 0.5 nm。

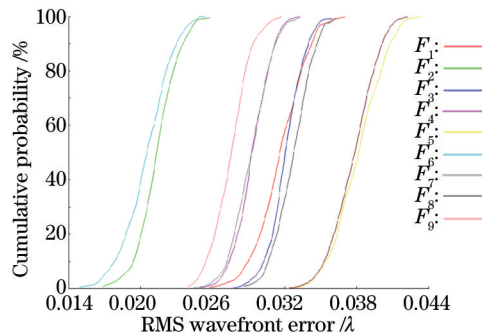


图6 补偿后的波像差 RMS 值的累积概率分布

Fig.6 Cumulative probability of RMS wavefront error after compensation

在像质满足要求的情况下,其余各项公差得到适当放宽。如表 3 所示,补偿后的各项公差均在微米和微

弧度量级,国际现有的加工与检测能力均能满足该装调公差要求。与此同时,从补偿后每片元件的公差范围可以看出在实际装调过程中要更多关注 M_2 的轴向装调位置以及 M_4 和 M_5 的横向装调位置。此结论也验证了选择 M_2 、 M_4 、 M_5 为敏感元件的合理性。

表3 补偿后的制造公差范围

Table 3 Fabrication tolerances compensated

Mirrors	DLT/ μm	DLX/ μm	DLY/ μm	DLA/ μrad	DLB/ μrad
M_1	1.4	2.1	2.1	4.5	4.5
M_2	1.2	2.4	2.4	--	--
M_3	1.6	2.0	2.0	5.0	5.0
M_4	8.0	1.2	1.2	--	--
M_5	--	--	--	1.0	1.0
M_6	Alignment datum				

Note: '--' represents compensator.

为了进一步验证所选补偿器的补偿效果,还对比了图7所示的补偿前后的各项公差值,图中DLS代表偏心公差(DLX、DLY),TLS代表倾斜公差(DLA、DLB), i 代表第 i 个元件。图中显示补偿后的公差均远远大于补偿前的各项公差值,说明各项公差都得到了极大地放松,且补偿后的各项公差能够与现有的极紫外光学元件的制造能力相匹配。

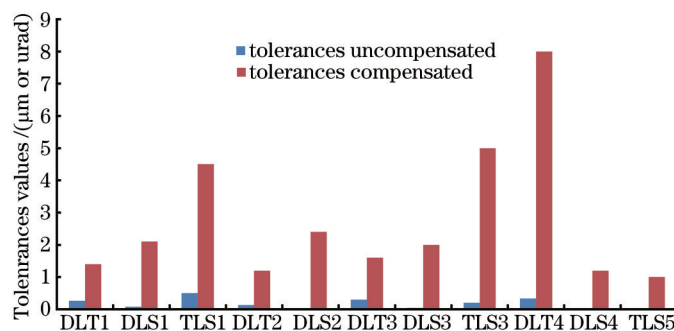


图7 补偿前后的公差对比

Fig.7 Comparing of tolerances uncompensated and compensated

5 结 论

针对超大 NA 的极紫外光刻物镜,利用奇异值分解方法对其进行了公差分析。通过预选敏感元件满足了奇异值分解法中灵敏度矩阵的结构参量数不多于像差数的要求,获得了超大 NA 物镜中各元件的制造公差。利用上述方法对一套 NA 为0.50的极紫外光刻物镜进行补偿器选择和制造公差分析,确定的8个像质补偿器能够有效补偿系统像质并放松公差。系统波像差RMS值在97.7%的置信概率下小于0.5 nm,且各项公差均控制在微米和微弧度量级,该物镜的公差具有可制造性。分析结果表明,拓展后的奇异值分解方法可有效应用于超大 NA 极紫外光刻物镜的公差分析。在综合考虑成像质量和制造成本的情况下分析物镜的制造公差,为物镜的实际加工与装调起到先导作用。

参 考 文 献

- 1 Rudy Peeters, Sjoerd Lok, Erwin van Alphen, *et al.*. ASML's NXE platform performance and volume introduction[C]. SPIE, 2013, 8679: 86791F.
- 2 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.
- 3 Holger Glatzel, Dominic Ashworth, Mark Bremer, *et al.*. Projection optics for extreme ultraviolet lithography micro field exposure tools with a numerical aperture of 0.5[C]. SPIE, 2013, 8679: 867917.
- 4 Bernhard Kneer, Sascha Migura, Winfried Kaiser, *et al.*. EUV lithography optics for sub 9 nm resolution[C]. SPIE, 2015, 9422: 94221G.

- 5 Hiroo Kinoshita, Takeo Watanabe, Masato Koike, *et al.*. Design of imaging system for EUVL[C]. SPIE, 1998, 3152: 211–220.
- 6 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.
- 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 Henry N Chapman, Donald W Sweeney. Rigorous method for compensation selection and alignment of microlithographic optical systems[C]. SPIE, 1998, 3331: 102–113.
- 9 Xu Weicai. Optical Design and Imaging Performance Compensation for the Lithographic Lens[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011, 97–109.
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, 97–109.
- 10 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. 利用失调量向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.
- 11 David M Williamson. Compensator selection in the tolerancing of a microlithographic lens[C]. SPIE, 1989, 1049: 178–186.
- 12 Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Designing projection objectives for 11-nm node of extreme ultraviolet lithography[J]. Journal of Micro / Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2014, 13(3): 033014.
- 13 Kevin Cummings, Dominic Ashworth, Mark Bremer, *et al.*. Update on the SEMATECH 0.5 NA extreme ultraviolet lithography (EUVL) microfield exposure tool (MET)[C]. SPIE, 2014, 9048: 90481M.
- 14 Eelco van Setten, Guido Schiffflers, Cristina Toma, *et al.*. NXE: 3300 B platform—imaging applications for logic and DRAM [C]. SPIE, 2013, 8886: 888604.
- 15 Martin Lowisch, Peter Kuerz, Hans-Juergen Mann, *et al.*. Optics for EUV production[C]. SPIE, 2010, 7636: 763603.
- 16 Hans Meiling, Jos Benschop, Rob Hartman, *et al.*. Extatic ASML's α -tool development for EUVL[C]. SPIE, 2002, 4688: 59–62.
- 17 Martin Lowisch, Peter Kuerz, Olaf Conradi, *et al.*. Optics for ASML'S NXE: 3300B platform[C]. SPIE, 2013, 8679: 86791H.
- 18 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.

栏目编辑: 韩峰