

文章编号: 1002-1582(2025)04-0408-07

混合面型极紫外光刻物镜优化设计

余思辰, 南雁北, 陈雨情, 闫旭, 刘丽辉*, 李艳秋
(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: 数值孔径为0.33的极紫外光刻物镜由6面高阶非球面反射镜构成。然而, 包含大口径非球面反射镜的物镜系统, 对加工和检测精度要求更加严苛。提出一种混合面型优化的设计方法, 即采用自由曲面、非球面反射镜交互迭代优化技术, 将小口径非球面镜逐次替换为自由曲面, 有效降低大口径反射镜的高阶系数, 最大口径反射镜非球面系数由16阶降至10阶, 显著降低了物镜加工和检测难度。采用这种方法设计了一套NA 0.33混合面型极紫外光刻物镜系统, 物镜系统畸变值小于0.294nm、波前误差均方根值小于0.0143 λ ($\lambda=13.5\text{nm}$)。通过反灵敏度法择选补偿器, 物镜系统的公差容限提高了1个数量级, 在97.7%的累积概率下, 波前误差RMS小于0.037 λ , 光刻物镜系统的稳定性得到进一步提高。

关 键 词: 光学设计与制造; 极紫外光刻; 自由曲面; 物镜系统设计

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

Optical design of hybrid surface EUV lithography objective

YU Sichen, NAN Yanbei, CHEN Yuqing, YAN Xu, LIU Lihui*, LI Yanqiu

(Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The extreme ultraviolet lithography objective with a numerical aperture of 0.33 is composed of 6 high-order aspheric mirrors. However, the objective system containing large-aperture aspheric mirrors has more stringent requirements on processing and detection accuracy. A design method for hybrid surface optimization is proposed. Small-aperture aspheric mirrors are replaced with free-form surfaces one by one using the interactive iterative optimization technology of free-form surfaces and aspheric mirrors. The high-order coefficients of large-aperture mirrors are effectively reduced, and the aspheric coefficient of the largest-aperture mirror is reduced from 16th order to 10th order. The difficulty of objective processing and detection is significantly reduced. A set of NA 0.33 hybrid surface extreme ultraviolet lithography objective system was designed using this method. The distortion value of the objective system is less than 0.294nm, and the root mean square value of the wavefront error is less than 0.0143 λ ($\lambda=13.5\text{nm}$). By selecting the compensator by the inverse sensitivity method, the tolerance of the objective system is improved by one order of magnitude. At a cumulative probability of 97.7%, the wavefront error RMS is less than 0.037 λ , and the stability of the lithography objective system is further improved.

Keywords: optical design and manufacturing; extreme ultraviolet lithography; free-form surface; objective system design

0 引 言

目前, NA 0.33极紫外 (EUV) 光刻机为半导

体制造的重要设备^[1-5]。ASML公司已经研制了NA 0.33的光刻机系列产品, 如TWINSCAN NXE: 3X00系列样机^[6]。最新的TWINSCAN NXE:

收稿日期: 2025-02-20; 收到修改稿日期: 2025-03-07

基金项目: 国家自然科学基金 (62175014)、国家科技重大专项 (2017ZX02101006-001)

作者简介: 余思辰 (2000—), 女, 硕士研究生, 从事高分辨成像技术方面的研究。277483660@qq.com

刘丽辉 (1975—), 男, 副教授, 从事高分辨成像技术、光电传感技术方面的研究。

* 通讯作者: liulihui@bit.edu.cn

3800E EUV 光刻机, 物镜系统波像差 RMS 值小于 0.2nm, 畸变小于 0.3nm, 光刻系统性能满足 3nm、2nm 逻辑器件节点的芯片制造。下一代的 TWINSCAN NXE: 4000F 光刻机预计 2026 年生产^[7-12]。

国内于 20 世纪 90 年代末开展对 EUV 光刻机曝光系统的设计研发^[13]。2002 年, 国内第一套小视场 EUV 实验型光刻装置由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所金春水等人成功研制, 该装置可实现最小线宽 0.25 μ m 的曝光^[14,15]。该团队提出一种基于渐进优化与 Q-type 非球面分组设计方法, 设计了一套 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜系统^[16]。此外, 研究团队在实际光线追迹的基础上, 与像差平衡结合, 进行物镜的分组设计, 设计出一套 NA 为 0.33 的离轴极紫外光刻投影物镜系统^[17]。北京理工大学提出了多种设计方法。其中, 仿形设计法设计了一种具有 NA 为 0.25、视场为 26mm $\times$ 1mm 的六面反射镜 EUV 光刻投影物镜, 分辨率可达 50nm^[18,19]。并建立近轴分组设计法, 设计了 NA 为 0.25~0.7、反射镜数量为 6~10 面的 EUV 光刻投影物镜^[20-23]。建立傍轴近似和真实光线追迹的分组设计方法, 优化了 NA 为 0.33 的 EUV 光刻投影物镜系统^[24,25]。同时, 提出了物镜形态参数分析判别法^[26]。建立双向真实光线追迹的分组设计方法, 设计了一种 EUV 光刻物镜的非球面初始结构^[27]。

国内外关于极紫外光刻物镜设计的文献, 未见如何降低镜片加工和检测难度的报导。目前, NA 0.33 极紫外光刻物镜为 6 块非球面反射镜, 其物镜系统波像差 RMS 值小于 0.2nm, 畸变值小于 0.3nm。物镜系统必须使用非球面高阶系数, 为优化提供足够自由度。非球面阶数过高, 导致系统对加工与检测技术提出更高的精度要求, 中国缺少更高精度加工与检测设备。为解决上述问题, 本文提出一种混合面型极紫外光刻物镜系统的优化设计方法, 该方法能提供更高的设计优化自由度, 可降低非球面镜非球面阶数, 放宽公差容限, 满足 EUV 光刻物镜系统高精度成像要求。

1 方 法

1.1 极紫外光刻物镜系统设计需求

分辨率和成像质量是极紫外光刻物镜系统的关键设计指标。由光刻系统理论可知, 分辨率表示为^[28]

$$CD = k_1 \frac{\lambda}{NA} \quad (1)$$

式中, CD 为光刻特征尺寸; λ 为曝光光源波长; NA 为投影物镜像方数值孔径; k_1 为光刻工艺因子

(通过多种分辨率增强技术可降至 0.61 以下)。在保证像差极小的前提下, 成像质量应接近衍射极限。NA 0.33 极紫外物镜系统倍率为 1/4 (像高与物高之比, 即掩模图形经物镜系统在硅片上成的像与掩模图形尺寸之比)^[7]。EUV 光刻物镜系统倍率必须不受像面位置微小变化产生的影响, 物镜系统必须为像方远心系统, 故像方远心度需要控制在毫弧度量级^[29]。要满足系统像方远心, 物方主光线入射角需要小于 6°, 同时要避免角度过小引起掩模阴影效应, 及满足以下条件^[29]

$$\arcsin(NA \times |M|) \leq CRA \leq 6^\circ \quad (2)$$

1.2 混合面型极紫外光刻物镜优化设计方法

国内外报道的 NA 0.33 极紫外光刻物镜系统仅采用非球面反射镜优化设计。这会导致非球面阶数过高, 从而使物镜系统对加工和检测的精度要求更为严苛。因此, 本文提出一种自由曲面与非球面镜共同优化的方法, 设计了混合面型极紫外光刻物镜系统。常用的自由曲面面型介绍如下:

Zernike^[30]多项式曲面通过引入 Zernike 多项式, 可以简洁地表达和量化光学系统的各类像差。其采用极坐标形式, 特别适用于圆对称的光学系统。Zernike 多项式曲面的数学表达式表示为

$$Z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{j=1}^p C_j Z_j \quad (3)$$

式中, c 是顶点曲率; k 是二次曲面系数; C_j 为第 j 项多项式系数, Z_j 为第 j 项 Zernike。

XY 多项式曲面是一种具有较高自由度的光学曲面。其特征是在二次曲面表达式的基础上加入 XY 两个方向不同阶次的多项式, 能够高效地描述非旋转对称的复杂自由曲面。该曲面特殊的数学表达形式, 令其能在 XY 两个方向上进行独立设计, 从而实现对非对称像差的高精度校正。其数学表达式表示为

$$Z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^p A_{(i,j)} x^i y^j \quad (4)$$

式中, c 是顶点曲率; k 是二次曲面系数; $A_{(i,j)}$ 为第 i, j 项多项式系数, $1 \leq i + j \leq p$; i 和 j 分别为 x 和 y 的阶数, 均为非负整数; XY 多项式阶数在光学软件中受到限制, 通常 x 与 y 的阶数之和不超过 10 阶^[31]。

变形非球面是一种在 XY 两方向上呈非球形特征的复杂自由曲面^[32]。非球形的特性使该曲面在设计上不受传统光学曲面的限制。其数学表达式表示为

$$Z = \frac{c_x x^2 + c_y y^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k_x)c_x x^2 - (1 + k_y)c_y y^2}} + \sum_{i=2}^p A_{2i} [(1 - B_{2i})x^2 + (1 + B_{2i})y^2]^i \quad (5)$$

式中 c_x 、 c_y 表示变形非球面在 x 和 y 方向的曲率； k_x 、 k_y 分别是变形非球面在 x 轴和 y 轴方向的二次曲面系数； A_{2i} 表示高阶非球面项的系数，这些项描述了表面的高阶偏离，它们是优化光学性能的关键参数； B_{2i} 是专门用于控制高阶项中 x 和 y 方向的影响比例，体现了变形非球面的非对称性。

XY 多项式自由曲面具有较高设计自由度和便于加工的特点，能在保证实际制造可行性的同时，有效地校正非对称像差。基于 XY 多项式自由曲面，本文提出自由曲面和非球面反射镜的交互迭代优化方法，进行混合面型 EUV 光刻物镜的优化设计。通过逐次将小口径反射镜（M3 和 M4）替换为自由曲面，同时将其余反射镜（M1、M2、M5 和 M6）逐次替换为非球面，以实现系统优化。小口径自由曲面镜的加工难度较低，本文仅选择将小口径反射镜替换为自由曲面。物镜系统关于 YOZ 平面对称，有利于后续的像质评价。因此，本文在物镜系统优化过程中，仅使用 x 的偶次项系数作为变量，保持物镜系统关于 YOZ 平面对称。在迭代过程中，不断调整各变量的约束条件。通过交互式优化来约束系统畸变和波前误差，实现物镜系统高分辨率成像，并满足极小像差的要求。采用混合面型极紫外光刻物镜的优化设计方法，可以有效降低大口径非球面镜的非球面阶数。同时，提供足够的优化设计自由度，实现物镜系统波像差 RMS 值小于 0.2nm，畸变值小于 0.3nm，满足物镜系统极小像差的要求。

图 1 是面型替换策略示意图。通过这种设计策略，可以实现系统极小像差，显著降低非球面镜的非球面阶数，提高系统成像分辨率。

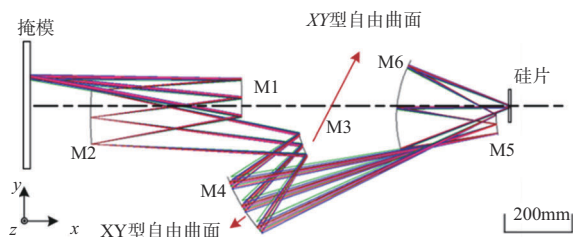


图 1 面型替换示意图

2 物镜系统优化设计结果及性能分析

以面向 5~3nm 技术节点的 NA 0.33 极紫外光

刻物镜系统的设计为实例，设计了一套 NA 0.33 混合面型极紫外光刻物镜系统，系统图如图 2 所示，物镜结构紧凑，光路无遮拦。

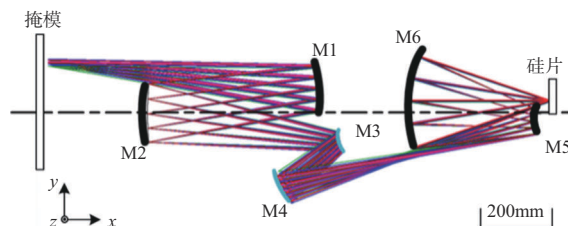


图 2 混合面型物镜系统结构图

选取弧形视场中的 15 个关键点来评估整体成像质量，系统采样视场点如图 3 所示。XY 多项式自由曲面不具备旋转对称性，但非球面反射镜具有旋转对称性。为提升优化效率，在 1.2 节中提到，仅采用自由曲面 x 的偶次项作为优化变量，使整个系统关于 YOZ 平面对称。第一象限内的视场点代表整个视场的特性。

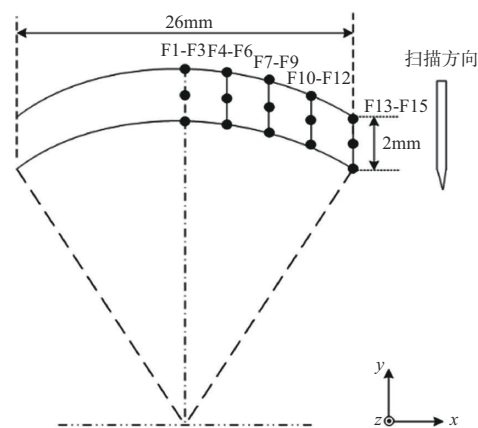


图 3 物镜系统弧形离轴视场示意图

混合面型极紫外光刻物镜系统光学特性参数如表 1 所示，该表是物镜系统的设计结果，表示物镜系统并未公差分析的性能指标。在面型替换优化后，大口径反射镜 M6 的非球面阶数仅使用了 10 阶，降低了最大口径反射镜的非球面阶数。表 2 详细列出物镜系统中 M6 的非球面阶数的使用情况，对比了使用自由曲面和未使用自由曲面的非球面阶数。如果仅使用非球面反射镜，则非球面阶数需达到 16 阶。而利用自由曲面优化物镜系统，可有效降低非球面阶数的使用。

设计完成的 NA0.33 混合面型极紫外光刻物镜系统在掩模面和硅片面处的主光线入射角如表 3 所示。优化后系统主光线在掩模面的入射角均小于 6° ，在硅片面的主光线入射角均小于 0.119° (2.077mrad)。主光线在掩模面和硅片面处的入射角均满足设计需求。

优化后的 NA 0.33 混合面型极紫外光刻物镜系

表1 NA0.33混合面型EUV光刻物镜光学特性参数

指标项	数值
波长/nm	13.5
数值孔径	0.33
系统倍率	1/4
系统总长/mm	<1293
像方视场/mm ²	26×2
畸变/nm	≤0.294
波像差RMS值/nm	≤0.194
掩模面主光线入射角/(°)	≤6
硅片面主光线入射角/mrad	≤2.077
自由曲面个数	2

表2 NA0.33极紫外光刻物镜系统未使用与使用自由曲面的非球面阶数对比

非球面阶数	未使用自由曲面	使用自由曲面
4th	1.6×10^{-1}	1.5×10^{-1}
6th	1.2×10^{-15}	1.2×10^{-15}
8th	1.8×10^{-20}	7.3×10^{-21}
10th	-8.5×10^{-25}	7.9×10^{-26}
12th	4.8×10^{-29}	—
14th	-1.3×10^{-33}	—
16th	1.5×10^{-38}	—

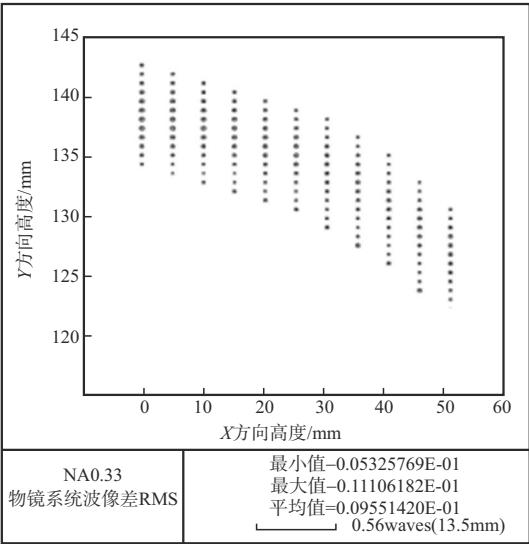
表3 NA0.33混合面型EUV光刻物镜主光线在掩模面和硅片面的入射角

视场	X-Field/mm	Y-Field/mm	硅片面入射角/(°)	掩模面入射角/(°)
1	0.000	134.000	0.119	5.637
2	0.000	136.000	0.087	5.722
3	0.000	138.000	0.053	5.807
4	0.000	140.000	0.017	5.892
5	0.000	142.000	0.020	5.977
6	26.000	131.599	0.117	5.644
7	26.000	133.599	0.085	5.727
8	26.000	135.599	0.052	5.810
9	26.000	137.599	0.017	5.893
10	26.000	139.599	0.020	5.977
11	52.000	124.136	0.110	5.662
12	52.000	126.136	0.079	5.740
13	52.000	128.136	0.020	5.819
14	52.000	130.136	0.048	5.898
15	52.000	132.136	0.015	5.977

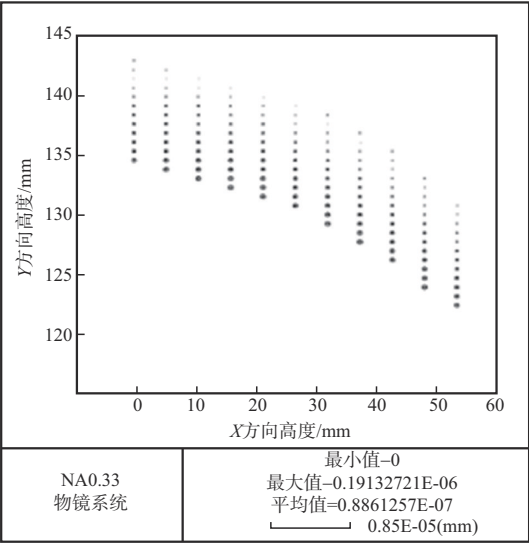
统波像差RMS值如图4(a)所示,畸变值如图4(b)所示。可以看出,优化后物镜系统波像差RMS值小于0.194nm,畸变小于0.294nm,均符合设计需求。

图5为选取15个视场点的光学调制传递函数图(MTF),这些点的MTF已接近衍射极限。

实际加工过程中,一般采用金刚石单点车削的方式加工自由曲面,工件轴向截面的端面截线凹处曲率半径必须大于或等于刀尖圆弧半径。因此,自由曲面越平缓越易于加工。M3、M4两块自由曲面X与Y方向局部曲率经计算得到,局部



(a) 波像差图



(b) 畸变图

图4 设计完成的NA0.33混合面型EUV光刻物镜系统曲率最大的值为 0.463×10^{-4} (1/mm)。对比目前已经加工制造且实际使用的自由曲面光学元件(最大局部曲率大于0.1)可知^[33],各自由曲面面形局部曲率设计合理,未出现矢高过于剧烈变化的局部区域,各面形均可满足加工制造与检测的要求。

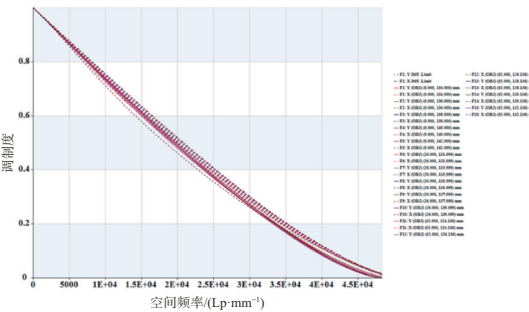


图5 优化完成的NA0.33混合面型极紫外光刻物镜系统MTF图

3 公差分析

本节选用波前差分法作为公差分析方法的基础,对设计完成的 NA 0.33 混合面型极紫外光刻成像系统进行公差分析,为物镜系统后续的加工制造和装调提供依据。波前差分法计算精度高、速度快,能给出每项结构参数的公差灵敏度,还可以有效预测公差影响下系统的成像性能。对于像质要求高的成像系统,该方法的分析结果会更精确。利用波像差分解理论,将 Zernike 系数的前 16 项拟合成球差、慧差及像散,分析结构参数的微小变化引起 Zernike 系数的变化量,计算像差变化量。这为补偿器的选择以及确定制造过程中的公差要求提供了依据。在像质评估中,视场点仍按照图 3 所示,在半视场内均匀选取了 15 个视场点。

3.1 初始公差分配

在进行装调公差分析之前,本文基于现有的面型误差加工水平,对各光学元件的面型误差进行分配。要实现与国际先进水平相匹配的加工、检测能力,必须确保每个元件的面型误差均满足严格的制造标准,以达到规定的性能指标^[34]。特殊面形采用 37 项条纹 Zernike 多项式来表征面形误差。当全视场波像差的 RMS 值因公差影响而下降 0.005λ 时,各元件分配后的面型误差 RMS 值如表 4 所示。物镜系统的面型误差大于 75 pm 时,仅依赖像面离焦补偿和当前光学制造加工能力,无法满足系统成像质量的要求。可以通过离子束面型精修技术补偿面型误差。

表 4 投影物镜面型误差分配表

反射镜	M1	M2	M3	M4	M5	M6
面型误差 RMS/pm	125	159	130	129	120	123

EUV 混合面型物镜的初始公差分配数据如表 5 所示,其中各项装调误差为元件间隔公差 (DLT)、元件沿 X 轴方向的偏心公差 (DLX)、元件沿 Y 轴方向的偏心公差 (DLY)、元件绕 X 轴的倾斜公差 (DLA),以及元件绕 Y 轴的倾斜公差 (DLB)。

表 5 NA 0.33 EUV 物镜系统初始公差分配

公差类型	公差范围	公差容限
面型误差 (RMS)	$\pm 120 \sim \pm 159 \mu\text{m}$	$\pm 75 \mu\text{m}$
空气间隔	$\pm 1 \sim \pm 2 \mu\text{m}$	$\pm 1 \sim \pm 2 \mu\text{m}$
倾斜	$\pm 2.5 \mu\text{rad}$	$\pm 0.5 \sim \pm 1 \mu\text{rad}$
偏心	$\pm 1 \mu\text{m}$	$\pm 1 \sim \pm 2 \mu\text{m}$

本文采用波前差分法对系统在像面离焦补偿作用下的波像差均方根 (RMS) 值进行了预估。分析结果表明,在 97.7% 的累积概率分布下,由公差引起的波像差 RMS 值的最大下降幅度为 0.9λ ,

导致像质降至 12.15 nm。像质恶化导致物镜系统无法实现高精度成像。物镜系统必须选择补偿器,其效果可满足成像性能指标要求。

3.2 补偿器选择

物镜系统的补偿器主要对 Zernike 低阶像差进行校正,而对高阶像差的影响较小。因此,将 Zernike 系数的前 16 项拟合成球差、慧差及像散,作为补偿器选择依据。根据各个元件结构参数沿轴向、横向的微小变化,得到 Zernike 系数变化量,由此计算球差、慧差及像散变化量。并通过实际光线追迹得到畸变的变化量。根据球差、慧差、像散及畸变的变化量,绘制物镜系统轴向和横向灵敏度折线图。图 6 为各元件沿 Z 轴微小移动后的灵敏度折线图。图 7 为各元件沿 X 轴偏心后灵敏度折线图。分析得到各元件沿 X 轴偏心移动引起的 Zernike 系数变化最明显,故使用图 7 作为补偿器选择依据。根据灵敏度折线图选择具体的补偿器补偿对应像差,最终选定 8 块补偿器。

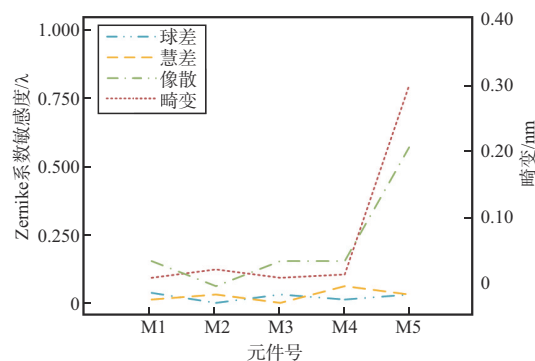


图 6 球差、慧差、像散及畸变的轴向灵敏度

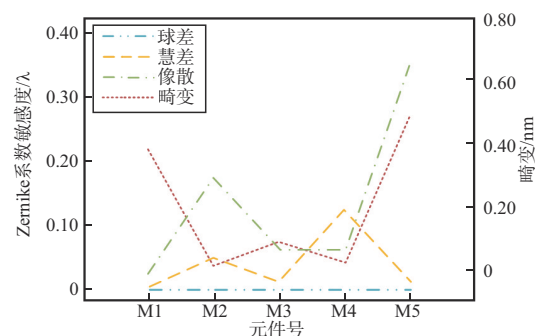


图 7 球差、慧差、像散及畸变的横向灵敏度

如表 6 为混合面型 EUV 光刻物镜系统公差容限。其中,--代表选中的补偿器。系统中 M6 口径最大,装调困难,易产生更大误差,故作为装调基准。表 7 为传统 NA 0.33 EUV 物镜系统公差容限。对比两套系统得到,除装调基准和补偿器外,多项公差容限有效放松,如表 6 所示的 M2 间隔误差 (DLT) 和 M1 倾斜误差 (DLA)。本文选取的补偿器极大提高了物镜系统的成像性能及稳定性。

表 6 NA 0.33混合面型 EUV 光刻物镜系统公差容限

元件	间隔公差 DLT/ μm	偏心公差 DLX/ μm	偏心公差 DLY/ μm	倾斜公差 DLA/ μrad	倾斜公差 DLB/ μrad
1	2.0	1.2	1.5	15.1	--
2	10.2	1.4	1	1.0	--
3	1.0	--	1.8	2.0	1.7
4	2.0	--	--	1.6	1.5
5	--	--	--	1.0	1.0
6	装调基准				

表 7 传统 NA 0.33 EUV 物镜系统公差容限

元件	间隔公差 DLT/ μm	偏心公差 DLX/ μm	偏心公差 DLY/ μm	倾斜公差 DLA/ μrad	倾斜公差 DLB/ μrad
1	1.8	1.1	1.2	1.4	1.2
2	装调基准				
3	--	1.2	1.3	1.2	1.1
4	1.3	--	--	1.5	1.5
5	1.0	1.0	2.0	1.3	1.3
6	1.0	--	--	1.0	1.0

图 8 为补偿后的 NA0.33 混合面型 EUV 光刻物镜系统波像差 RMS 值概率分布图，波像差 RMS 值均小于 0.037λ ($\lambda=13.5\text{nm}$) 的概率为 97.7%。表 8 为混合面型极紫外光刻物镜系统公差分析后性能指标。物镜系统像质恢复到极紫外光刻物镜设计指标要求的精度，波像差 RMS 值小于 0.5nm，畸变小于 0.3nm，满足物镜系统加工制造的要求。

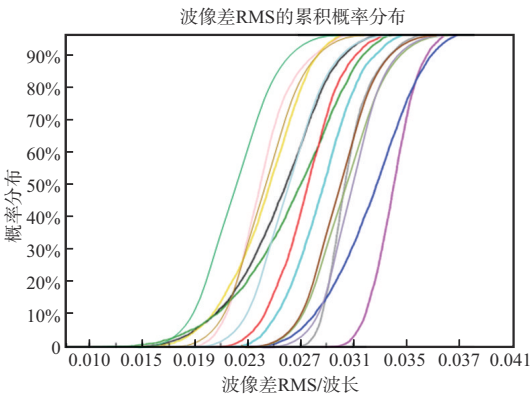


图 8 补偿后的 NA0.33 混合面型 EUV 光刻物镜系统波像差 RMS 值概率分布图

公差分析表明，本文所设计的 NA 0.33 混合面型极紫外光刻物镜系统和传统极紫外光刻物镜系统相比较，公差容限更为宽松。

4 结 论

针对传统极紫外光刻物镜大口径非球面镜的非球面阶数过高的问题，本文提出了一种混合面型极紫外光刻物镜系统设计优化的方法。采用该方法设计了一套 NA 0.33 混合面型极紫外光刻物镜系统，并对设计的物镜系统进行了公差分析。通过综合评估物镜系统的各优化设计结果和公差分析结果。以现报道的实际加工和检测数据为依据，

表 8 NA0.33混合面型 EUV 光刻物镜公差分配后光学特性参数

指标项	数值
波长/nm	13.5
数值孔径	0.33
放大倍率	4:1
系统总长/mm	<1293
像方视场/ mm^2	26×2
畸变/nm	≤ 0.3
波像差 RMS 值/nm	≤ 0.5
掩模面主光线入射角/ $^\circ$	≤ 6
硅片面入射角/mrad	≤ 2.077
自由曲面片数	2

验证该方法具有可行性。设计结果表明，本方法可显著降低大口径非球面反射镜的非球面阶数、有效放宽公差容限，降低物镜系统的加工、检测难度，提高其工程可制造性。本研究为极紫外光刻技术的发展提供了新的设计理念和技术支持，具有一定的工程应用价值和理论指导意义。

参考文献：

[1] Levinson H J. The challenges and limits to patterning using EUV lithography[C]//39th European Mask and Lithography Conference(EMLC 2024):SPIE, 2024, 13273:172—184.

[2] Hou X, Zhang S, Hu X C, et al. The research progress of surface interferometric measurement with higher accuracy[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(8):200209-1-200209—13.

[3] Levinson H J. High-NA EUV lithography: current status and outlook for the future[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2022, 61(SD):SD0803.

[4] Van Schoot J. The moore’s law machine: The next trick to tinier transistors is high-numerical-aperture euv lithography[J]. IEEE Spectrum, 2023, 60(9):44—48.

[5] Lee I, Franke J H, Philipsen V, et al. Hyper NA EUV lithography: an imaging perspective[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2023, 22(4):043202—043202.

- [6] Bilski B, Jürgens D, Gräupner P. EUV optics at ZEISS: status and outlook[C]//International Conference on Extreme Ultraviolet Lithography 2022, SPIE, 2022, 12292:19—26.
- [7] Asml. Twinscannx: 3600D[EB/OL]. [2023-03-01] <https://www.asml.com/en/products/euv-lithography-systems/twin-scan-nxe-3600d>.
- [8] Van Setten E, Schiffelers G, Toma C, et al. NXE: 3300B platform: imaging applications for logic and DRAM[C]//29th European Mask and Lithography Conference, SPIE, 2013, 8886: 14—25.
- [9] Pirati A, Peeters R, Smith D, et al. Performance overview and outlook of EUV lithography systems[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VI:SPIE, 2015, 9422:554—571.
- [10] Peeters R, Lok S, Mallman J, et al. EUV lithography: NXE platform performance overview[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V:SPIE, 2014, 9048:379—396.
- [11] Van De Kerkhof M, Jasper H, Levasier L, et al. Enabling sub-10nm node lithography: presenting the NXE: 3400B EUV scanner[C]//Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography VIII:SPIE, 2017, 10143:34—47.
- [12] Kalden J, Neumann J T, Jürgens D, et al. EUV optics at ZEISS: status, outlook, and future[C]//Optical and EUV Nanolithography XXXVII: SPIE, 2024, 12953:252—257.
- [13] 李艳秋, 南雁北, 陈雨情, 等. 极紫外光刻机曝光系统光学设计研究与进展[J]. 光学学报, 2023, 43(15):1522002-1522002—16.
Li Yanqiu, Nan Yanbei, Chen Yuqing, et al. Research and progress on optical design of exposure systems in extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(15): 1522002-1522002—16.
- [14] 金春水, 王占山, 曹健林. 软 X 射线投影光刻原理装置的设计[J]. 光学精密工程, 2000, 8(1):66—70.
Jin Chunshui, Wang Zhanshan, Cao Jianlin. Soft X-ray projection lithography technology[J]. Optics and Precision Engineering, 2000, 8(1):66—70.
- [15] 金春水. 极紫外投影光刻中若干关键技术研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2003.
Jin Chunshui. Research on some key technologies in extreme ultraviolet projection lithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [16] 王君. 极紫外光刻物镜系统光学设计研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015:109—112.
Wang Jun. Optical design of extreme ultra-violet lithography (EUVL) objective system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015:109—112.
- [17] Wu Y E, Wang L P, Yu J E, et al. Design method for off-axis aspheric reflective optical system with extremely low aberration and large field of view[J]. Applied Optics, 2020, 59(32):10185—10193.
- [18] Li Y Q, Ota K, Murakami K. Thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2003, 21(1):127—129.
- [19] 李艳秋. 50 nm 分辨力极端紫外光刻物镜光学性能研究[J]. 光学学报, 2004, 24(7):865—868.
Li Yanqiu. Optical performance of extreme ultraviolet lithography for 50 nm generation[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 865—868.
- [20] Liu F, Li Y Q. Grouping design of eight-mirror projection objective for high-numerical aperture EUV lithography[J]. Applied Optics, 2013, 52(29):7137—7144.
- [21] Liu F, Li Y Q. Design of multi-mirror optics for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. Optical Review, 2013, 20(2): 120—126.
- [22] 刘菲, 李艳秋. 大数值孔径产业化极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(2):222003.
Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2):222003.
- [23] Li Y Q, Liu F. Design method of extreme ultraviolet lithography projection objective: US20140368805[P]. 2014-12-18.
- [24] Cao Z, Li Y Q, Liu F. Grouping design method with real ray tracing model for extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Optical Engineering, 2013, 52(12):125102.
- [25] 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):0822005.
Cao Zhen, Li Yanqiu, Liu Fei. Manufacturable design of 16-22 nm extreme ultraviolet lithographic objective[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9):0922005.
- [26] 毛姗姗, 李艳秋, 刘克, 等. 高数值孔径自由曲面极紫外光刻物镜光学设计[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(8):814002-0814002(7).
Mao Shanshan, Li Yanqiu, Liu Ke, et al. Optical design of high numerical aperture extreme ultraviolet lithography objective with freeform surfaces[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(8):814002—814002(7).
- [27] Yan X, Li Y Q, Li Y H, et al. Design of an extreme ultraviolet lithography projection objective with a grouping design method through forward and reverse real ray tracing[J]. Applied Optics, 2022, 61(25):7449—7454.
- [28] Levinson H J. Principles of Lithography[M]. Bellingham: SPIE Press, 2001:19—22.
- [29] 曹振. 高数值孔径共轴光刻物镜系统光学设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.
Cao Zhen. Optical design of high-NA coaxial objective system for lithography[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [30] Zernike F. Inflection theory of the cutting method and its improved form, the phase contrast method[J]. Physica, 1934, 1(7): 689-704.
- [31] Synopsys Inc, CODE V Documentation Library[S]. Synopsys, 2018.
- [32] 杨通, 段瓌哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1):0108001.
Yang Tong, Duan Yingzhe, Chen Dewen, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development and application[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1):0108001.
- [33] C. Supranowitz, P. Dumas, T. Nitzsche, et al. Fabrication and metrology of highprecision freeform surfaces[J]. Proc. SPIE, 2013, 8884:888411.
- [34] 许伟才, 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.
Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11):1122003.