

## 高数值孔径自由曲面极紫外光刻物镜光学设计

毛姗姗,李艳秋,刘克,刘丽辉,郑猛,闫旭

(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:** 高分辨率需求牵引极紫外光刻(EUVL)投影物镜向高数值孔径(NA)、自由曲面设计形式发展。传统的非球面 EUVL 物镜设计难以在高数值孔径下兼顾校正像差的需求,往往造成遮拦,破坏成像对比度。提出了一种高 NA 无遮拦自由曲面 EUVL 物镜设计方法。依据物镜形态参数判别引入自由曲面的最佳位置,能够有效校正系统像差,在不影响成像性能的情况下增大系统 NA。应用该方法设计了一套高 NA 自由曲面 EUVL 投影物镜(PO)。与初始非球面物镜相比,通过增加四面自由曲面,将物镜数值孔径从 0.3 增大至 0.35,波像差均方根(RMS)值从 1 nm 减小至 0.4 nm,整个系统光路无遮拦。设计结果表明:该方法有效提高了自由曲面 EUVL 物镜设计效率,在不产生遮拦的情况下,不但增大了系统 NA 且减小了系统波像差,提高了物镜整体性能。

**关键词:** 物镜系统设计; 几何光学设计; 自由曲面; 极紫外

**中图分类号:** TN305.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0814002

## Optical design of high numerical aperture extreme ultraviolet lithography objective with freeform surfaces

Mao Shanshan, Li Yanqiu, Liu Ke, Liu Lihui, Zheng Meng, Yan Xu

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

**Abstract:** High numerical aperture (NA) projection objectives with freeform surfaces are demanded for extreme ultraviolet lithography (EUVL) with high resolution. The traditional aspherical EUVL lens design is difficult to meet the need of correcting aberrations under a large NA, which often causes obscuration and destroys the imaging contrast. A design method of a high NA EUVL objective with freeform surfaces and without obscurations was proposed. Lens-form parameters were used to determine the best position to insert freeform surface, which could effectively correct aberrations and increase NA of the system without affecting the imaging performance. A set of high NA EUVL projection objective (PO) with freeform surfaces was designed by this method. Compared with the initial aspherical objective, by adding four

收稿日期:2019-03-05; 修订日期:2019-04-03

基金项目:国家科技重大专项(ZX02702001-002);国家自然科学基金(61675026);国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11627808)

作者简介:毛姗姗(1985-),女,博士生,主要从事紫外光刻系统光学设计方面的研究。Email:mss\_lion@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、微纳检测技术和精密光学仪器方面的研究。Email:liyanqiu@bit.edu.cn

freeform surfaces, the objective NA was increased from 0.3 to 0.35 and wavefront error RMS was reduced from 1 nm to 0.6 nm, and there was no obscuration in the entire optical path. The design results indicate that the proposed method effectively improves the design efficiency of the freeform surfaces EUVL objective. In the case of no obscuration, the system not only increases the NA, but also reduces the wavefront error, which greatly improves the overall performance of the objective.

**Key words:** lens system design; geometric optical design; freeform surface; extreme ultraviolet

## 0 引言

极紫外光刻(EUVL)是集成电路制造实现 10 nm 及以下节点的候选技术之一。EUVL 系统曝光波长为 13.5 nm,与深紫外光刻相比,波长的缩短有利于在相对较小的数值孔径(NA)下实现高分辨率,因此极紫外光刻是更具潜力的下一代光刻技术<sup>[1]</sup>。

国外对于 EUVL 系统研究较早,2006 年 ASML 公司研制出世界第一台 NA 为 0.25 的 EUVL 样机, Alpha Demo Tool(ADT)<sup>[2]</sup>。2016 年,该公司研制的 NXE 3400B 采用 NA 为 0.33 的投影物镜,通过离轴照明等分辨率增强技术实现 13 nm 光刻分辨率。国内许多单位也逐渐开展 EUVL 的研究。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所从 2002 年至今,致力于光刻物镜的设计与制造,取得了显著成绩<sup>[3-4]</sup>。2011~2013 年,刘菲和曹振等分别设计了 NA 为 0.3 和 0.33 的六反非球面 EUVL 物镜,各自对物镜的光学性能和可制造性进行了详细分析,能够实现 16~22 nm 光刻分辨率<sup>[5-6]</sup>。2015~2016 年,刘岩等使用直接倾斜法和曲率组合法分别设计了六反自由曲面 EUVL 物镜和六反组合倍率 EUVL 物镜,在离轴结构下 NA 分别达到 0.4 和 0.5,结合分辨率增强技术可实现 10 nm 以下光刻分辨率<sup>[7-8]</sup>。提高光刻分辨率的光学方法一般包括减小曝光波长和增大投影物镜 NA,对于 EUVL 系统可以通过以下四种途径增大 NA:增加反射镜数量、使用中心遮拦式结构、使用离轴结构、使用复杂面形。由于膜层反射率限制,反射镜的数量增多会减小系统透过率,因此 EUVL 系统应使用尽可能少的反射元件。使用存在中心遮拦的 EUVL 物镜会降低系统在一定空间频率的对比度,离轴结构不利于系统的加工与装调,容易引起更多

的装配误差。因此,使用自由曲面成为提高 NA 最具潜力的方案。自由曲面广泛应用于照明和成像系统设计<sup>[9-11]</sup>,国内王涌天课题组采用自由曲面设计头盔显示系统,不但增加了物镜视场角且减轻了系统重量,具有重要的应用价值<sup>[12-13]</sup>。将自由曲面用于共轴 EUVL 投影物镜设计中,在不产生遮拦的情况下提高系统 NA,确保系统成像对比度,避免了采用离轴结构而引入过多的装调误差。

文中利用物镜形态参数分析判别的方法设计自由曲面 EUVL 投影物镜<sup>[14]</sup>,通过物镜形态参数有效识别当前结构下对像差贡献大的光学元件,作为替换自由曲面的最佳位置,能够最大限度发挥自由曲面的作用,避免逐表面尝试替换优化的耗时及优化设计的盲目性。应用该方法设计了一套高 NA 自由曲面 EUVL 投影物镜,并参照国外加工、制造能力对该光学系统进行了公差等工程化分析,验证了该设计方法的可行性。

## 1 极紫外光刻投影物镜设计要求

极紫外光刻物镜的设计与制造需要满足高像质和高分辨率的要求。分辨本领是衡量光刻系统先进性的重要指标,光刻物镜分辨率公式为:

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

式中: $R$ 为光刻最小特征尺寸(分辨率); $k_1$ 为工艺因子; $\lambda$ 为曝光波长。极紫外光刻物镜曝光波长为 13.5 nm,采用分辨率增强技术,单次曝光时  $k_1$  可取得最小值为 0.25。因此,当 NA 为 0.35 时投影物镜可以实现 10 nm 分辨率。

EUVL 物镜要求在 1~2 mm 的弧形视场下实现极小的波像差和畸变。物镜倍率通常为 1/4 或 1/5 缩小倍率。物镜光学性能要求如表 1 所示。

表 1 EUVL 物镜光学性能要求

Tab.1 Optical characteristic of the EUVL projection objective

| Parameters                   | Specification |
|------------------------------|---------------|
| Wavelength/nm                | 13.5          |
| Numerical aperture           | 0.35          |
| Single field/mm <sup>2</sup> | 26×1.5        |
| Magnification                | 0.25          |
| RMS wavefront error/nm       | ≤1            |
| Distortion/nm                | ≤1            |
| Image telecentricity/mrad    | ≤6            |
| Front working distance/mm    | ≥100          |
| Back working distance/mm     | ≥30           |
| Total track length/mm        | ≤1 500        |
| Aspheric departure/μm        | ≤45           |

## 2 面形替换策略

在一个物镜系统中，决定物镜光学性能和成像质量的重要因素为系统光焦度的分布和系统的对称性。正负光焦度元件组合可以校正场曲，不同光焦度组合构成了物镜的基本形状。对称结构有利于形成更好像质的系统。Sasian 等提出的形态参数( $W$  和  $S$ ) 量化了系统光焦度分布和对称性<sup>[14]</sup>。物镜形态参数基于近轴光线追迹和主光线追迹，不受物镜尺寸、孔径、共轭距离、视场角和表面类型的影响。第一个参数  $W$  用来评价系统中光焦度分布，其定义为：

$$W = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{j=N} w_j^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中： $N$  为光学表面总数； $w_j$  表示第  $j$  个光学面的折射能力，如下式：

$$w_j = -\frac{1}{1-t} \frac{y_j}{n' u_N'} \frac{n_j' - n_j}{R_j} \quad (3)$$

式中： $t$  为整个系统的放大倍率； $y_j$  为边缘光线高； $n' u_N'$  为像空间折射率和近轴边缘光线与光轴夹角的乘积； $n_j$  和  $n_j'$  为第  $j$  个表面前后的折射率； $R_j$  是第  $j$  个表面的曲率半径。通过  $w_j$  的定义可以得出：

$$\sum_{j=1}^{j=N} w_j = 1 \quad (4)$$

结果显示，具有大  $w_j$  值的表面对系统总光焦度贡献大。当  $w_j$  都相等时， $W$  最小，即所有的光学表面对系统总光焦度贡献相同。

第二个参数  $S$  评价系统对称程度。它评价系统

中一个表面关于孔径光阑的对称程度或满足等光程条件的程度。此参数定义为：

$$S = \left( \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{j=N} s_j^2 \right)^{1/2} \quad (5)$$

$s_j$  表示为：

$$s_j = \frac{1}{1-t} \frac{1}{\bar{A}_{\text{stop}}(n' u_N')} \bar{A}_j \left( \frac{u_j'}{n_j'} \frac{u_j}{n_j} \right) \quad (6)$$

式中： $\bar{A}_j$  为第  $j$  个表面前介质折射率  $n_j$  与近轴主光线在该面上入射角  $i_j$  的乘积； $\bar{A}_{\text{stop}}$  为  $\bar{A}_j$  在孔径光阑的值； $u_j$  和  $u_j'$  表示第  $j$  个表面前和后的近轴边缘光线与光轴的夹角。

通过这些参数，可以判断单个元件或者表面对系统总光焦度的贡献量以及系统对称程度。 $w_j$ 、 $s_j$  值较小的元件或者表面对系统总光焦度和对称度贡献小，当这个位置的元件移除时不会严重破坏成像质量。 $w_j$ 、 $s_j$  值较大的元件或者表面对系统光焦度和对称度贡献大，具有过紧的应力和较大像差，在这个位置增加光学元件或者新的面形可以缓解此处过紧的光焦度提高像质。通过形态参数可以高效地识别增加新元件或者面形的位置或者去除冗余元件。程雪岷等以形态参数作为判据，建立了优化中自动增减元件机制，充分发挥光学元件特性，提高优化效率<sup>[15]</sup>。系统光焦度分布对光线的偏折具有重要影响，决定光线是否能够追迹优化。文中主要以光焦度的形态参数  $w_j$  作为判据选择增加自由曲面的位置。EUVL 系统为全反射式结构，计算单个反射镜光焦度贡献时，令公式(3)中的  $n'=1, n_j'-n_j=1$ ；计算每个反射镜对称特性时，令公式(6)中  $n'=1, n_j'=n_j=1$ 。通过 CODE V 编写宏程序计算非球面 EUVL 物镜结构中各个表面光焦度的贡献和对称特性，首先选择光焦度贡献大的表面替换为自由曲面。

## 3 自由曲面极紫外光刻投影物镜设计

自由曲面 EUVL 投影物镜设计过程分为以下部分：首先，通过实验室前期建立的分组设计法获得球面六反 EUVL 投影物镜初始结构<sup>[16]</sup>，通过逐渐增加非球面系数进行渐进优化，获得满足光刻像质要求的非球面 EUVL 物镜结构；然后，对该投影物镜逐渐优化并增大 NA，考察当前优化自由度下该物镜结构能否满足光刻物镜性能要求。当不能满足像质需求

时,通过单个表面的形态参数  $w_j, s_j$  值判断对系统光焦度和对称度贡献较大的表面,即存在过紧的应力和较大像差的表面,在此位置增加自由曲面可以增强此处的像差校正能力,缓解过紧的光焦度压力并提高像质<sup>[14-15]</sup>。最后,将非球面替换成自由曲面增加优化自由度提高像质。以物镜形态参数作为判据挑选面形最佳替换位置,能够最大限度地发挥自由曲面的作用,避免逐表面尝试替换优化的耗时及优化设计的盲目性。

### 3.1 投影物镜初始结构选择

通过实验室前期建立的分组设计法获得球面 EUVL 物镜初始结构。该投影物镜关于光轴旋转对称,对于弧形视场可以仅取 Y 轴视场代表整个系统视场,在 Y 轴选择 7 个视场 (F1~F7 像方视场 29~30.5 mm)。通过 CODE V 编写高效的非球面度优化控制函数,结合渐进优化获得一套像质较好的非球面 EUVL 物镜结构,作为增大 NA 的设计起点。其物镜结构和光学特性参数分别如图 1 和表 2 所示。

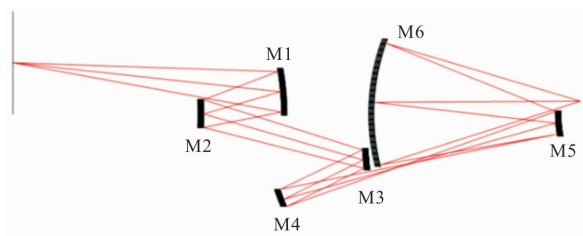


图 1 非球面投影物镜结构  
Fig.1 Layout of aspheric PO

表 2 非球面投影物镜光学特性参数

Tab.2 Optical characteristic parameters of the aspheric PO

| Parameters                       | Specification |
|----------------------------------|---------------|
| Wavelength/nm                    | 13.5          |
| Numerical aperture               | 0.3           |
| Single field/mm <sup>2</sup>     | 26×1.5        |
| Magnification                    | 0.25          |
| RMS wavefront error/nm           | ≤1            |
| Distortion/nm                    | ≤1            |
| Chief ray angle of incidence/(°) | ≤6.2          |
| Image telecentricity/mrad        | ≤6            |
| Front working distance/mm        | ≥450          |
| Back working distance/mm         | ≥55           |
| Total track length/mm            | ≤1 355        |
| Aspheric departure/μm            | ≤45           |
| Number of aspheric surfaces      | 6             |

### 3.2 自由曲面 EUVL 投影物镜设计

为了研究六反 EUVL 投影物镜提高 NA 的潜力,对图 1 中物镜结构逐渐增大数值孔径。在严苛的像差要求和结构约束下,当 NA 增大到一定程度时,某些反射镜的边缘会产生遮拦,如图 2 所示,当 NA 由 0.3 增大到 0.35 时,光束口径变宽, M2、M5、M6 反射镜的边缘产生了遮拦。此时物镜波像差 RMS 值约 3 nm,畸变约 1 nm。虽然在高 NA 下像质退化并不是很严重,却迫使光刻物镜产生遮拦。光刻物镜遮拦会造成对比度下降,影响关键线条均匀性(CDU)和光刻效率,因此,有必要增加优化自由度消除遮拦。

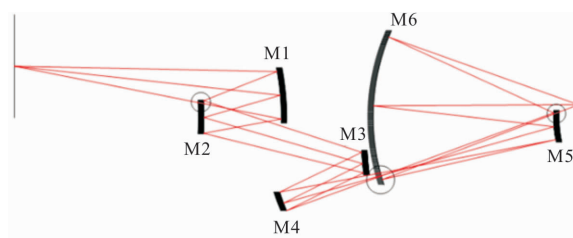


图 2 NA0.35 非球面物镜结构

Fig.2 Layout of NA0.35 aspheric PO

为增加优化自由度,对该投影物镜添加自由曲面,选择对减小畸变和降低剩余像差具有更强校正能力的 XY-多项式自由曲面<sup>[17-18]</sup>,其面形表达式如公式(7)所示:

$$z(x, y) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{j=2}^{66} c_j x^m y^n$$

$$j = 1 + \frac{(m+n)^2 + m + 3n}{2}$$

$$(m=0, 1, 2, \dots, 10 \quad n=0, 1, 2, \dots, 10) \quad (7)$$

式中: $z(x, y)$ 表示光学表面矢高; $c$ 为顶点曲率; $k$ 为圆锥系数; $r$ 为垂直于光轴方向的半径高度; $r^2 = x^2 + y^2$ ; $c_j$ 为单项式  $x^m y^n$  系数。为了提高优化效率,笔者仅选取了 XY-多项式自由曲面中 X 偶次项系数为变量,因此,自由曲面关于 YOZ 面对称,第一象限内视场可以代表整个系统视场。物镜采样视场如图 3 所示。同时,自由曲面的位置严重影响像差校正效果,即使使用相同数量的自由曲面,自由曲面的位置不同其作用也不同。通过 CODE V 编写的物镜形态参数计算程序,评价 NA0.35 的非球面投影物镜每个表面光焦度贡献和对称度贡献。计算结果见表 3,可以看出 M6 镜光焦度贡献最大,  $w_6=0.770 0$ ,其次为 M5 镜。对称度特性中, M5 镜对系统对称度影响大  $s_5=$

0.8299。首先考虑元件光焦度对系统影响,因为光焦度对系统结构影响很大,决定光线是否能够继续追迹。光焦度参数  $w_j$  大的表面通常具有较大的曲率,光线在反射镜表面大角度偏折而产生较大的高级像差,在此处增加自由曲面可以减小物镜表面像差,缓解过紧的光焦度和减小遮拦。因此,首先将 M6 镜替换为自由曲面进行渐进优化,当像差减小到极限程度再运行形态参数计算程序,判断下一个转换为自由曲面的反射镜。通过交替进行面形替换和渐进优化,依次将 M6、M5、M2、M3 镜替换为自由曲面,最终获得高 NA 无遮拦自由曲面 EUVL 投影物镜。

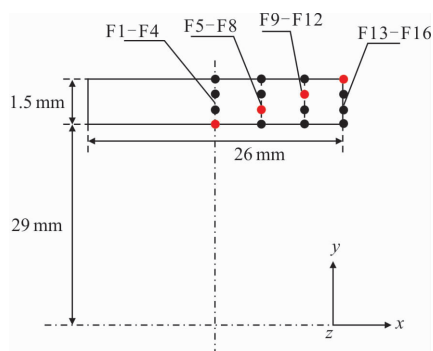


图 3 自由曲面投影物镜视场  
Fig.3 Freeform surfaces PO sampled fields

表 3 非球面投影物镜形态参数值

Tab.3 Lens-form parameter values of aspheric PO

| Mirror | $w_j$   | $s_j$   |
|--------|---------|---------|
| M1     | 0.211 4 | 0.162 6 |
| M2     | 0.077 8 | 0.077 8 |
| M3     | 0.050 7 | 0.023 2 |
| M4     | 0.121 2 | 0.039 8 |
| M5     | 0.265 9 | 0.829 9 |
| M6     | 0.77    | 0.163 9 |

### 3.3 自由曲面 EUVL 投影物镜像质分析

自由曲面 EUVL 投影物镜结构如图 4 所示,物镜结构紧凑且消除遮拦,光学特性参数如表 4 所示。图 5 为该物镜角线上 4 个视场点(图 3 中红色视场点)的光学调制传递函数(MTF)曲线,如图所示已接近衍射极限,其它视场 MTF 曲线均接近衍射极限。如图 6(a)所示,物镜波像差 RMS 值小于 0.4 nm;图 6(b)为物镜畸变图,全视场畸变控制在 0.7 nm 范围内。同时,也评价了自由曲面的可制造性,自由曲面局部曲

率越平滑越易于加工,如图 7(a)~(d)为自由曲面反射镜 M2、M3、M5、M6 在 X 方向和 Y 方向的局部曲率差。图中显示 M5 镜的局部曲率差最大,为 -0.0004,局部曲率比较平滑,满足可制造性要求,自由曲面加工一般使用五轴超精密机床<sup>[19]</sup>,各自由曲面中最大局部曲率为 0.0047,梯度变化较小,易于检测<sup>[20]</sup>。

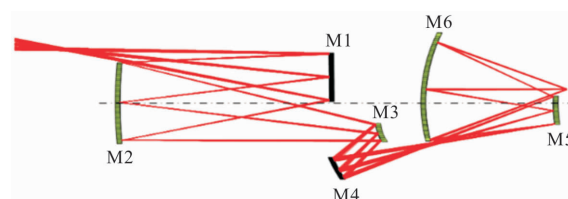


图 4 NA0.35 自由曲面物镜结构

Fig.4 Layout of NA0.35 freeform surfaces PO

表 4 自由曲面投影物镜光学特性参数

Tab.4 Optical characteristic parameters of freeform surfaces PO

| Parameters                       | Specification |
|----------------------------------|---------------|
| Wavelength /nm                   | 13.5          |
| Numerical aperture               | 0.35          |
| Single field/mm <sup>2</sup>     | 26×1.5        |
| Magnification                    | 0.25          |
| RMS wavefront error/nm           | ≤ 0.4         |
| Distortion/nm                    | ≤ 0.7         |
| Chief ray angle of incidence/(°) | ≤ 6.2         |
| Image telecentricity/mrad        | ≤ 6           |
| Front working distance/mm        | ≥ 140         |
| Back working distance/mm         | ≥ 30          |
| Total track length/mm            | ≤ 1100        |
| Aspheric departure/μm            | ≤ 45          |
| Number of aspheric surfaces      | 2             |
| Number of freeform surfaces      | 4             |

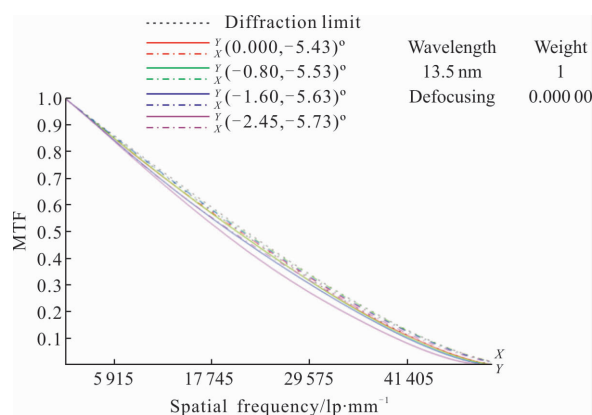
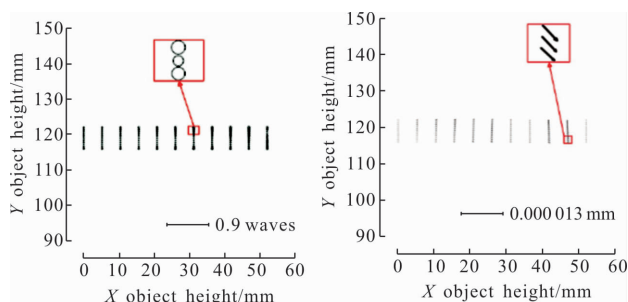


图 5 自由曲面投影物镜调制传递函数

Fig.5 MTF of freeform surfaces PO



(a) 波像差 (b) 畸变  
(a) Wavefront error (b) Distortion

图 6 自由曲面投影物镜波像差和畸变

Fig.6 Wavefront error and distortion of freeform surfaces PO

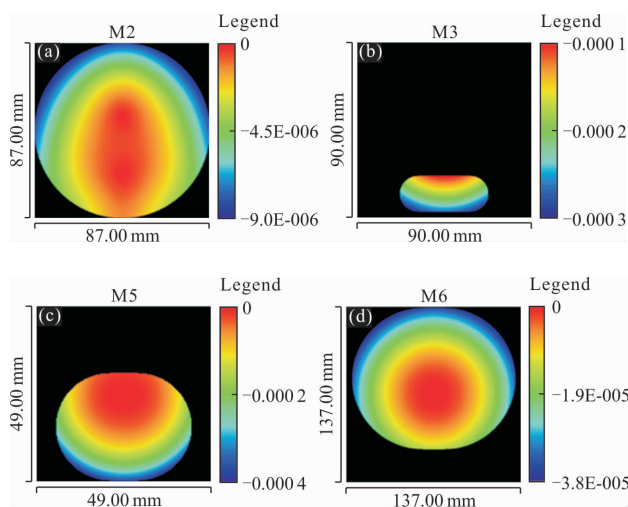


图 7 自由曲面局部曲率差

Fig.7 Local curvature difference of freeform surfaces

### 4 公差分析

极紫外光刻物镜作为高精精密光学系统，对加工和装配公差要求非常严苛，元件间隔和倾斜检测精度在纳米和纳弧度量级，对元件面形误差要求在亚纳米量级。为了满足光刻物镜高像质的需求，不但要严格控制加工和装配公差，而且要选择合理的补偿器来提高物镜集成性能，放松苛刻的公差要求。

在像方全视场范围内选择 9 个视场点对投影物镜进行公差分析。首先，通过像差灵敏度分析，确定了元件 3、元件 5 作为轴向补偿元件，补偿半径、间隔误差引起的球差；根据元件径向移动引起的 Zernike 像差变化，确定了元件 6、元件 5 等作为径向补偿元件、补偿倾斜和偏心误差。面形误差可以通过离子束面形精修技术部分补偿<sup>[21]</sup>。其次，将距离光轴

较远、使像差敏感的 M4 镜作为装调基准。由 Marechal 判据，RMS 波像差小于  $\lambda/14$  时可认为系统成完善像，调制传递函数接近衍射极限。对于该自由曲面 EUVL 投影物镜，以波像差 RMS 值小于 1 nm 为标准进行公差分析。结合择选的补偿元件，进行公差分析，获得该投影物镜加工公差和装调公差，如表 5 所示。表 5 中 DLT 代表元件间隔公差，DLX、DLY 分别代表元件在 X 方向、Y 方向偏心公差，DLA、DLB 分别代表元件绕 x 轴、y 轴倾斜公差。

表 5 补偿后的制造公差范围

Tab.5 Compensated fabrication tolerances

| Mirrors | DLT/ $\mu\text{m}$ | DLX/ $\mu\text{m}$ | DLY/ $\mu\text{m}$ | DLA/ $\mu\text{rad}$ | DLB/ $\mu\text{rad}$ |
|---------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|----------------------|
| M1      | 5.0                | 1.0                | 1.0                | 1.3                  | 1.0                  |
| M2      | 1.0                | 1.2                | 1.0                | 1.0                  | 1.0                  |
| M3      | -                  | -                  | 1.0                | 1.0                  | 1.0                  |
| M4      | Alignment datum    |                    |                    |                      |                      |
| M5      | -                  | -                  | 1.0                | 1.0                  | 1.0                  |
| M6      | -                  | -                  | -                  | 1.0                  | 1.0                  |

Note: ‘-’ represents compensator.

分析面形公差在 1.4~3.2 nm。由表 5 可以看出：元件偏心 and 倾斜公差较为严格，间隔公差放宽为 1~5  $\mu\text{m}$ 。在上述公差内，得到该 EUVL 投影物镜全视场波像差累计概率分布曲线，如图 8 所示，90% 的概率可以使加工装调后的物镜波像差小于  $0.044\lambda$  ( $\lambda=13.5\text{ nm}$ )，基本满足光刻需求。

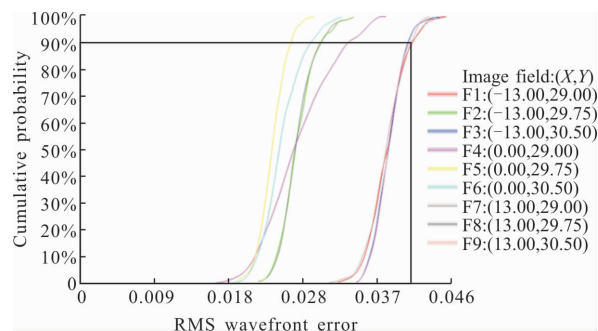


图 8 波像差的累积概率分布

Fig.8 Cumulative probability of wavefront error

上述结果表明：自由曲面 EUVL 投影物镜对元件加工和系统装调要求都十分严格。系统在实际加工和装配过程中，可以结合复算、面形精修和计算机辅助装调等多种像质补偿方案，进一步补偿制造误

差、降低装配难度,确保光刻物镜的成像性能。

## 5 结 论

针对光刻投影物镜高数值孔径高分辨率需求,文中研究了高 NA 自由曲面 EUVL 投影物镜设计方法。依据物镜形态参数有效识别光焦度过紧像差较大的表面,将其替换为自由曲面最大限度减小系统像差。通过增加四面自由曲面将 EUVL 投影物镜数值孔径从 0.3 增大至 0.35,波像差从 1 nm 减小至 0.4 nm,整个系统光路无遮拦,具有良好的成像对比度。进一步详细分析了该投影物镜的制造约束条件。结果表明:在现有国际加工和检测能力下具有可制造性。综上,证明了该高 NA 自由曲面 EUVL 投影物镜设计方法的可行性,为 10 nm 以下技术节点 EUVL 投影物镜设计及工程应用提供重要技术支持。

## 参考文献:

- [1] Liu Fei, Li Yanqiu. Initial structure design of coaxial six-ten mirror central-obscured extreme ultraviolet lithographic objective[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(28): 6444-6451.
- [2] Hans Meiling, Henk Meijer, Vadim Banine, et al. First performance results of the ASML alpha demo tool [C]// SPIE, 2006, 6151: 615108.
- [3] Jin Chunshui. Investigation on extreme ultraviolet lithography [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [4] Ni Mingyang, Gong Yan. Design and analysis of kinematic lens positioning structure in lithographic projection objective [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(5): 476-484. (in Chinese)
- [5] Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31 (2): 0222003. (in Chinese)
- [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. (in Chinese)
- [7] Liu Yan, Li Yanqiu, Cao Zhen. Design method of off-axis extreme ultraviolet lithographic objective system with a direct tilt process[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 075102.
- [8] Liu Yan, Li Yanqiu, Cao Zhen. Design of anamorphic magnification high-numerical aperture objective for extreme ultraviolet lithography by curvatures combination method[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(18): 4917-4923.
- [9] Liu Jun, Huang Wei. Optical system design of reflective head mounted display using freeform surfaces [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018001. (in Chinese)
- [10] Wang Hong, Wang Lijun, Ye Feifei, et al. Design of LED headlight low-beam freeform lens based on projector system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2463-2467. (in Chinese)
- [11] Xu Mingfei, Pang Wubin, Xu Xiangru, et al. Optical design of high-numerical aperture lithographic lenses[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(4): 740-746. (in Chinese)
- [12] Wang Yongtian, Cheng Dewen, Xu Chen. The optical display technology of virtual reality [J]. *Science China*, 2016, 46 (12): 1694-1710. (in Chinese)
- [13] Cheng Dewen, Wang Yongtian, Xu Chen, et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20705.
- [14] Jose M Sasian, Michael R Descour. Power distribution and symmetry in lens systems[J]. *Optical Engineering*, 1998, 37 (3): 1001-1004.
- [15] Cheng Xuemin, Wang Yongtian, Hao Qun, et al. Automatic element addition and deletion in lens optimization [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(7): 1309-1317.
- [16] Liu Fei, Li Yanqiu. Design of multi-mirror optics for industrial extreme ultraviolet lithography [J]. *Optical Review*, 2013, 20(2): 120-126.
- [17] Fabian Duerr, Youri Meuret, Hugo Thienpont. Potential benefits of free-form optics in on-axis imaging applications with high aspect ratio [J]. *Optics Express*, 2013, 21 (25): 31072-31081.
- [18] Cheng Dewen, Wang Yongtian, Hua Hong, et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low  $f$ -number and large field of view using a freeform prism[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [19] Li Rongbin, Zhang Zhihui, Du Xue, et al. Ultra-precision machining technology of freeform optics and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39 (1): 110-115. (in Chinese)
- [20] Shen Hua. Research on key techniques of tilted-wave-interferometer used in the measurement of freeform surfaces [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014. (in Chinese)
- [21] Xu Xiangru. Research on imaging quality compensation and polarization aberration of hyper numerical aperture lithographic lens [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)