

# 极紫外光刻物镜分组可视化界面设计优化

王 君 王丽萍 金春水 苗 亮 谢 耀

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** 高数值孔径(NA)、大视场极紫外光刻物镜光学系统是实现 22 nm 及以下技术节点产业化光刻系统的关键部件。通过对光刻物镜系统结构的分析,利用可视化对其初始结构进行分组构造。并在此基础上采用一种渐近式 NA 方法获得了弦长为 26 mm,宽 2 mm 的弧形视场内复合波像差优于均方根(RMS)为 $\lambda/50$ 的物镜系统。借助 Q 型多项式,使物镜光学元件非球面度低于 45  $\mu\text{m}$ ,最大口径小于 400 mm,全视场波像差优于 0.027  $\lambda$  RMS,畸变优于 1.5 nm。

**关键词** 光学设计;极紫外光刻;可视化界面;初始结构

中图分类号 0436 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1211001

## Extreme Ultraviolet Lithography Objective Design Based on Grouping and Graphical User Interface

Wang Jun Wang Liping Jin Chunshui Miao Liang Xie Yao

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

**Abstract** Extreme ultraviolet lithography(EUVL) objective with high NA and large exposure field is the core component of lithography equipments for high volume manufacture (HVM) aiming at 22 nm node and beyond. The visual generation of the initial construction of EUVL objectives is presented based on the analysis of the valid objectives and grouping strategy. With alternation of step by step increasing NA and optimizations,  $\lambda/50$  root mean square (RMS) composite wavefront error has been achieved in the 2 mm wide arc full field with a chord length of 26 mm. By the aids of Q-type polynomials, the maximum asphericity and diameter of mirrors have been optimized less than 45  $\mu\text{m}$  and 400 mm, respectively. And finally the full-field composite wavefront error is better than 0.027  $\lambda$  RMS and the distortion is less than 1.5 nm.

**Key words** optical design; extreme ultraviolet lithography; graphical user interface; initial construction

**OCIS Codes** 220.3740; 340.7480; 220.2740

## 1 引 言

极紫外光刻技术(EUVL)是取代 193 nm 浸没式光刻,实现下一代特征尺寸成像曝光的领跑者<sup>[1]</sup>。EUVL 物镜系统作为光刻整机的核心部件,其优劣直接决定了光刻能否实现,因此,EUVL 物镜光学系统设计优化方法研究则成为我们的首要任务之一。国际上,研究人员开发了包括近轴搜索法<sup>[2]</sup>、 $y-\bar{y}$ 法<sup>[3]</sup>、微分法<sup>[4]</sup>以及鞍点构建法<sup>[5]</sup>等 EUVL 物镜构造优化方法。在国内,EUVL 技术研究由于基础研究薄弱,前期投入不足等原因而鲜见其产业化物镜系统的设计研究报道。近年,依托于国家重大科技专项,北京理工大学等科研院校在高数值孔径(NA)产业化 EUVL 物镜的协同设计、优化及分析方面取得了重要进展,培养了一批光学设计人才<sup>[6-10]</sup>。

极紫外光刻采用 13.5 nm 的超短波长进行成像曝光,根据 Marechal 判据,处于工作状态下的极紫外光刻物镜,其全视场复合波像差需优于 1 nm 均方根(RMS),而光学设计残差则需优于 $\lambda/30$  RMS<sup>[11]</sup>。受工作波长和光源功率限制,要达到如此高的成像水平,目前国际上面向产业化的 EUVL 物镜均采用六枚非球面反射镜设计。

收稿日期: 2015-07-01; 收到修改稿日期: 2015-07-15

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX02501-008)

作者简介: 王 君(1988—),男,博士,助理研究员,主要从事光学设计仿真方面的研究。E-mail: Wangjun\_2100@163.com

本文在借鉴目前 EUVL 面向产业化物镜设计的基础上,对物镜系统初始结构的分组分析,并基于对其结构的解析、半解析表达,实现物镜系统初始结构的可视化构造;在此基础上,采用一种渐近式 NA 优化路线,对物镜系统全视场像质进行优化;借助于 Q 型多项式<sup>[12-14]</sup>,完成对系统的进一步优化,提升其可制造性。

## 2 设计指标

EUVL 物镜需要使用尽可能少的反射镜以提高光能利用率,因此需要采用高次非球面设计,以提供足够的优化自由度。目前,国际上面向产业化的 EUVL 物镜一般由六枚反射镜构成,除要达到衍射受限成像水平外,对于 EUVL 物镜的设计还需要满足畸变、远心条件等约束,如表 1 所示<sup>[7,11,15-16]</sup>。

表 1 产业化极紫外光刻物镜主要设计指标

Table 1 Primary design specifications of EUVL objective for manufacture

Item	Specification
Wavelength/nm	13.5
NA	0.3/0.33
Reduction	4×
Wavefront error RMS /λ	1/30
Distortion/nm	2 or 1/10 HP
Chief ray angle on mask/(°)	≤6
Image telecentricity /mrad	≤2

## 3 物镜系统初始结构可视化构造

如图 1 所示为目前国际上典型的面向产业化的 EUVL 物镜光学系统示意<sup>[6-7,11]</sup>。不同于传统的成像系统<sup>[17-19]</sup>,由于采用离轴视场反射式结构,其光线传播情况更为复杂,其初始结构的快速成功构造显得更为重要。因此,本节将在对 EUVL 物镜结构积累的基础上,根据其功能和结构特征将其分解为 3 个两两构成的子系统,并采用解析、半解析的方式实现各子系统变量数目的最小化,分别进行可视化构造。最终结合物镜设计指标完成整套物镜初始结构的可视化构造。

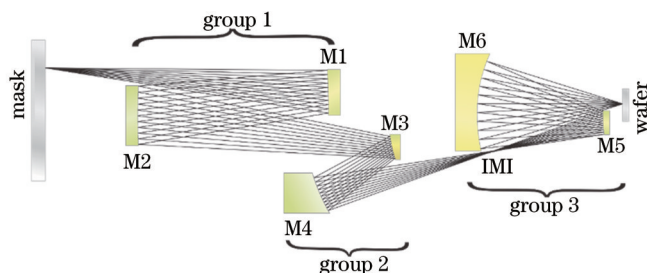


图 1 极紫外光刻物镜光学系统示意图

Fig.1 Schematic of EUVL objective optical system

在对六反物镜进行分组时,最为直观的是以中间像(IMI)为界将其分为前、后两组子成像系统,其中最为常见的分组方式为前组由 M1、M2、M3 和 M4 构成,后组由 M5 和 M6 两枚反射镜构成<sup>[15-17,20]</sup>。前组由于反射镜数目多,主要起着矫正像差的作用,其放大倍率分布于 0.8~1.2;而后组则主要提供较大的微缩倍率,一般为 0.3~0.2<sup>[16]</sup>。这样的分组方式虽然直观且功能分配明确,但其前组反射镜数目众多,难以缩减结构变量数目,构造难度相对于六反物镜无明显降低,严重降低结构生成效率和成功率。

在上述分组基础上,对前组进一步分析发现,M1 和 M2 由于受物镜系统物方参数及光瞳位置限制,其结构约束较为严格。因此,如图 1 所示,以光瞳 M2 为界将前组进一步分解为由 M1 和 M2 组成的 group1 和由 M3 和 M4 组成的 group2,而后组作为 group3 仍由 M5 和 M6 构成。以下将分别对各组进行分析求解。

### 3.1 Group1

如图 2 所示为由第一枚反射镜 M1 和第二枚反射镜 M2 组成的第一组子系统 group 1。经过对大量六反物镜设计的调研,其孔径光阑均设置于第二枚反射镜 M2 或其附近,因此,为简化结构解析过程,将物镜系统

的光阑设置于M2上,从而使得主光线与系统光轴相交于M2的顶点处,而孔径光阑实际位置可在后续的优化设计过程中进行适当调节。

对子系统 group1 进行如图所示的标识,其中物面距 M1 为  $-l_1$ ,两镜间距设为  $-\alpha l_1$ ,  $\alpha$  为一不大于 1 的比例系数,物方视场高度为  $V_{YOB}$ ,主光线入射角为  $V_{CA}$ ,物方数值孔径为  $NA_0$ ;当光束入射到 M1 镜时,主光线的入射高度为  $H_{z1}$ ,上、下边缘光线的入射高度分别为  $H_{um1}$  和  $H_{dm1}$ ;同理对入射到 M2 镜的光线进行类似的定义;为避免光线在反射过程中发生遮拦,分别定义  $C_{L1}$  和  $C_{L2}$ 。在此基础上,我们通过几何知识对典型光线在镜面上的坐标进行求解,将其表示为诸如镜间距、球面曲率半径、物点光束出射角等系统参数的函数,从而快速获取光线传播规律,实现光线的实时可视化。

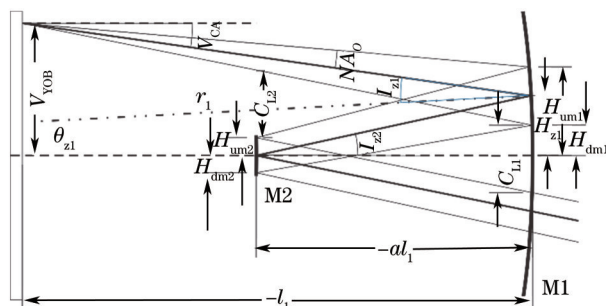


图2 子系统 group1 光线追迹示意及主要参数约定

Fig.2 Schematic of ray trace and specification for sub-system group1

对于主光线有:

$$\begin{cases} \sin \theta_{z1} = H_{z1}/r_1 \\ \theta_{z1} = (I_{z2} - V_{CA})/2 \\ H_{z1} = V_{YOB} - (-l_1)\tan V_{CA} \end{cases}, \quad (1)$$

求解(1)式可得到 M1 的曲率半径:

$$r_1 = \frac{V_{YOB} + l_1 \tan V_{CA}}{\sin \left\{ \frac{\arctan \left[ \frac{V_{YOB} - (-l_1)\tan V_{CA}}{-\alpha l_1} \right] - \frac{V_{CA}}{2}}{2} \right\}}. \quad (2)$$

对于面向产业化的典型极紫外光刻六反物镜系统,其物高  $V_{YOB}$ ,主光线入射角  $V_{CA}$  几乎为定值,可视为常数。可见,当两镜空间位置确定,并将光阑置于 M2 上时,反射镜 M1 的曲率半径唯一确定。

通过光线追迹,可进一步求得 M2 的曲率半径:

$$r_2 = \frac{H_{um2}}{\tan \left\{ \frac{-\arctan \left( \frac{H_{um1} - H_{um2}}{-\alpha l_1} \right) + \arctan \left[ \frac{H_{um2} - (H_{dm1} - C_{L1})}{-\alpha l_1} \right]}{2} \right\}}, \quad (3)$$

其中,  $H_{um1}, H_{um2}$  分别为上光线在 M1 和 M2 上的入射高度,  $H_{dm1}$  为下光线在 M1 上的入射高度,可通过图 2 中所示的几何关系求得。由(3)式可知,当  $r_1$  确定后,  $r_2$  仅由  $C_{L1}$  确定。

综上,可以发现,对于典型的面向产业化的 EUVL 物镜,其第一子系统 group1 的结构由  $l_1$ 、 $\alpha$  及  $C_{L1}$  等三个参数唯一确定。

### 3.2 Group3

如图 3 所示为 EUVL 物镜子系统 group3 的结构示意及主要参数定义。类似于 group1,由于 group3 处于物镜的像方,需要同时满足多项成像约束,如像方远心条件、数值孔径、像高  $V_{YIM}$  以及光线无遮拦条件等,因而其结构相对固定。

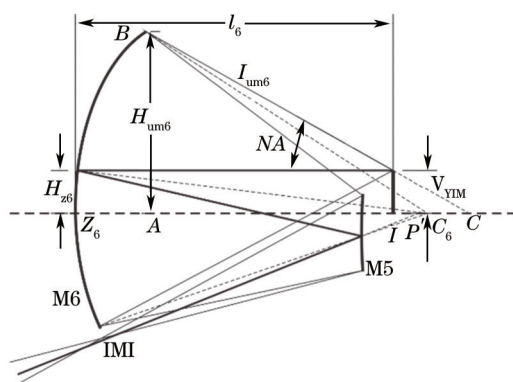


图3 子系统 Group3 光线追迹示意及主要参数约定

Fig.3 Schematic of ray trace and specification for sub-system Group3

当光束以数值孔径聚焦于像面时,受加工制造水平限制, M6 的通光口径  $\Phi_6$  必然受限,则 M6 与像面的距离  $l_6$  可表示为:

$$l_6 = |\overline{Z_6A}| + |\overline{AI}| = \left[ r_6 - \sqrt{r_6^2 - \left(\frac{\Phi_6}{2}\right)^2} \right] + \frac{\frac{\Phi_6}{2} - V_{YIM}}{\tan[\arcsin(NA)]}, \quad (4)$$

其中,  $r_6$  为 M6 的曲率半径,  $\Phi_6$  为 M6 的口径,  $V_{YIM}$  为物镜系统像高,  $NA$  为系统数值孔径设计值。可见,  $l_6$  主要由 M6 口径决定。

当  $l_6$  确定后,作上光线之延长线交光轴于点 C,欲满足光线无遮挡条件,则需  $|\overline{Z_6C_6}| < |\overline{Z_6C}|$ , 即:

$$r_{6_{max}} < l_6, \quad (5)$$

其中,  $C_6$  为 M6 的球心,如此便有效地缩小了  $r_6$  的搜索范围。在保证足够长的后工作距的前提下,通过调整  $r_6$ ,使得入射到 M5 与自 M6 出射的光束间不发生干涉,利用迭代算法获得 M5 的曲率半径,光线相交于中间像 IMI 处,如此便可最大限度地避免 M6 对光束的遮拦。

综上所述,group3 的构造始于对 M6 口径  $\Phi_6$  的控制,通过调节  $r_6$  及镜间距以保证后工作距和避免光束遮拦,最终通过迭代计算  $r_5$  聚焦于中间像点 IMI。

### 3.3 Group2

不同于 group1 与 group3,group2 由于远离物面和像面,其结构随机性较大,且参数的微小变化可能通过 group1 和 group3 得到放大,引起结构剧烈变化。因此,首先需要减少 group2 结构变量的数目。

当 group1 与 group3 结构确定后,group2 起着连接两组结构的作用,成为最终决定物镜系统指标的结构,因此,它需要同时满足特定的物像关系及光瞳匹配关系。

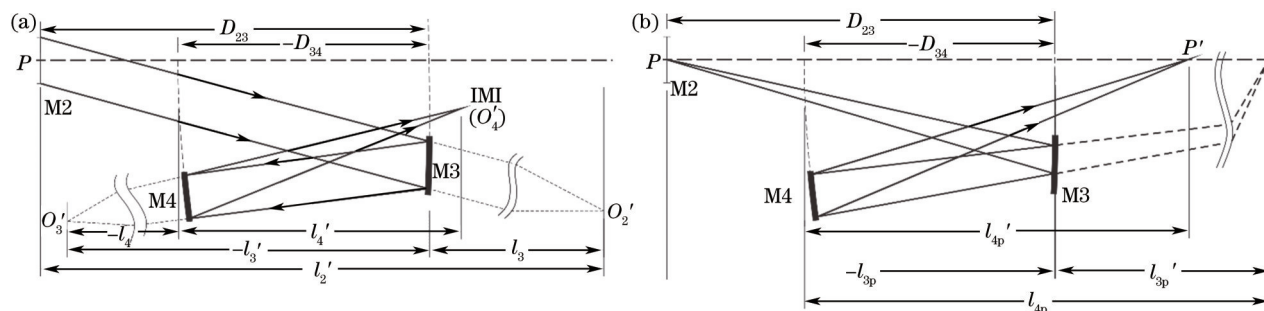


图4 子系统 group2 物像匹配和光瞳匹配关系示意及主要参数约定。(a)成像关系;(b)光瞳关系

Fig.4 Schematic of imaging conjugation and pupil conjugation and specification for sub-system group2.

(a)Imaging relationship;(b)pupil conjugation

如图 4 所示为 group2 所需满足的物像匹配关系与光瞳匹配关系示意,为表征清楚,部分光路作打断处理。作为 EUVL 物镜的一部分,group2 首先需要满足如图 4(a)所示的物像匹配关系:经 group1 后所成的像  $O_2'$

作为 group2 的物,经 M3 和 M4 后成像于中间像 IMI 处。主要结构参数如图所示,则针对该成像过程可得:

$$\begin{cases} \frac{1}{l_3} + \frac{1}{l'_3} = \frac{2}{r_3} \\ \frac{1}{l_4} + \frac{1}{l'_4} = \frac{2}{r_4} \\ l_4 = l'_3 + (-D_{34}) \end{cases}, \quad (6)$$

其中,  $l'_2$  由 group1 输出。

除满足成像关系外,group2 在功能上还需要与 group1 和 group3 进行配合,实现特定的系统放大倍率以及满足平场条件<sup>[15]</sup>,即:

$$\begin{cases} R_{\text{Mag}_1} \cdot R_{\text{Mag}_2} \cdot R_{\text{Mag}_3} = R_{\text{Mag}_\text{sys}} \\ P_s = \sum_{i=1}^6 n_i c_i = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

其中,  $R_{\text{Mag}}$  表示放大倍率,  $c_i$ 、 $n_i$  分别为各反射镜的曲率与介质折射率。对于 EUVL 光刻物镜,Petzval 平场条件可具体地表示为  $\sum_{i=1}^6 (-1)^{i-1} c_i = 0$ 。

光瞳作为成像系统的关键元素,直接决定了成像的正确性与清晰度。因此,group2 在 EUVL 物镜中的衔接作用还需在光瞳匹配上予以体现。如图 4(b)所示为 group2 的光瞳衔接关系示意,根据定义,光瞳及其像位于主光线与光轴的交点,则光瞳 M2 经 group2 后成像于 P' 点,P' 为 group2 出射的主光线与光轴的交点,可得到如下光瞳成像关系:

$$\begin{cases} -\frac{1}{l_{3p}} + \frac{1}{l'_{3p}} = \frac{2}{r_3} \\ \frac{1}{l_{4p}} + \frac{1}{l'_{4p}} = \frac{2}{r_4} \\ l_{4p} = l'_{3p} + (-D_{34}) \end{cases}, \quad (8)$$

其中,  $l'_{4p}$  为 M4 距 P' 的距离,可表示为:

$$l'_{4p} = l'_4 + (-l_5) + z_p, \quad (9)$$

其中,  $l_5$ ,  $z_p$  均由 group3 输出。

联立(6)~(9)式可得:

$$l_3 = l'_2 - D_{23}, \quad (10a)$$

$$r_3 = \frac{2R_{\text{Mag}_2} D_{23} l'_2 - R_{\text{Mag}_2}^2 l_2^2 + D_{23} z_p - R_{\text{Mag}_2} l'_2 z_p}{R_{\text{Mag}_2}^2 l'_2 + z_p + 2R_{\text{Mag}_2} P_s \cdot l'_2 z_p}, \quad (10b)$$

$$D_{34} = \frac{[R_{\text{Mag}_2} (D_{23} - l'_2) l'_2 + D_{23} z_p - R_{\text{Mag}_2} l'_2 z_p]^2}{R_{\text{Mag}_2} l'_2 z_p [R_{\text{Mag}_2} l'_2 (-1 - 2P_s \cdot D_{23} + 2P_s \cdot l'_2) - (1 + 2P_s \cdot D_{23}) z_p]}, \quad (10c)$$

$$r_4 = \frac{2R_{\text{Mag}_2}^2 l'_2 (-D_{23} + l'_2) - 2D_{23} z_p + 2R_{\text{Mag}_2} l'_2 z_p}{R_{\text{Mag}_2}^2 [1 + 2P_s (D_{23} - l'_2)] l'_2 + z_p + 2P_s \cdot D_{23} z_p}. \quad (10d)$$

可见,当 group1 和 group3 确定后,在既定的系统设计指标下,group2 的结构参数由 M2 与 M3 的间距  $D_{23}$  唯一确定。

### 3.4 初始结构可视化构造

在对 EUVL 物镜各子系统结构分析的基础上,运用几何光学,实现了物镜结构变量数目最小化。在此基础上,为了更加直观、实时地获悉初始结构的状态和性能,对其进行可视化是最为有效的方法之一。

如图 5 所示为利用 Matlab 可视化界面(GUI)和 CodeV 获得的 EUVL 物镜光学系统初始结构构造可视化界面,主要包括子系统构造区①、参数访问区②、系统合成区③及结构输出区④等 4 个功能区。子系统构造区主要包括子系统结构可视化和参数配置区两部分,通过移动滑块,并实时刷新结构状态,从而直观地知晓结构有效性,并积累构造经验。参数访问区则主要是对系统关键指标进行显示,并对部分不合格参数予以警



示。当各子系统结构合理时,可以在系统合成区合成物镜,并在输出区显示镜组参数,输出镜头文件,作为后续优化设计输入。

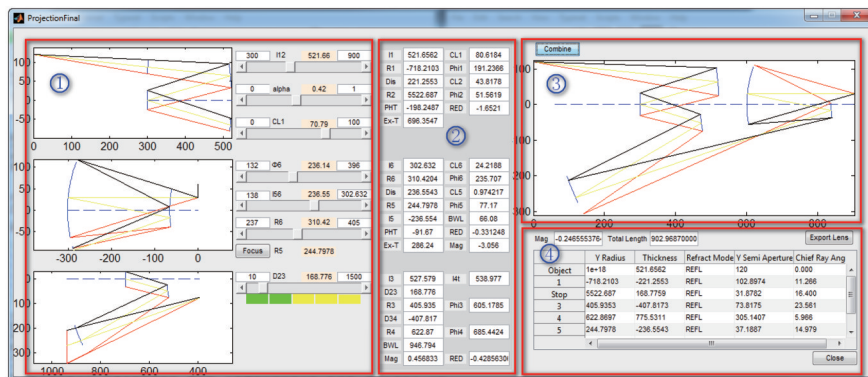


图 5 EUVL物镜光学系统初始结构生成可视化界面

Fig.5 GUI of generator of EUVL objective initial construction

利用上述可视化界面可以快速地得到满足口径限制、入射角约束及光线无遮拦等基本条件的初始结构,如图6所示为两种结构差异较大但均满足初始结构指标的物镜结构。前者所有镜面中心均未在光路中,意味着在整套系统研制过程中其中心均得以保留,极大地方便了镜面定位、加工检测和装配。后者有效地降低了主光线在M3上的入射角及M4的口径,然而却增大了M3的口径和M5上的主光线入射角。

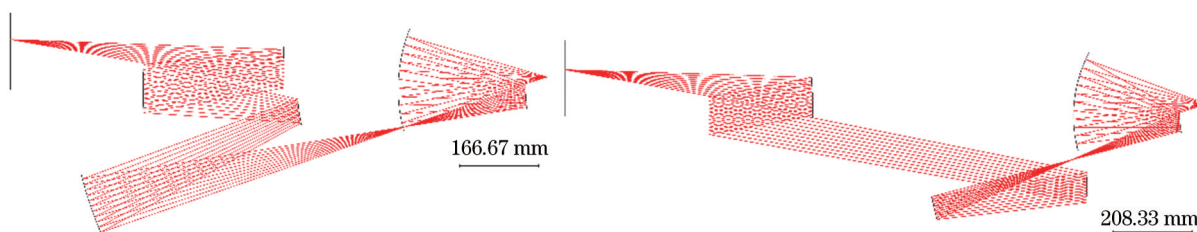


图 6 由可视化程序生成的典型 EUVL 物镜初始结构

Fig.6 Typical initial constructions of EUVL objective generated by GUI

#### 4 系统优化设计

以图6(a)所示结构作为优化输入,基于小孔径系统具有小像差的原理,采用一种渐近式数值孔径优化方法,以各视场点波像差为依据,不断调整各视场点权重,实现全视场波像差的综合优化。其优化结果如图7(a)所示,主要性能参数如表2中Set1所示,全视场复合波像差优于 $\lambda/50$  RMS,畸变优于2 nm。

然而,作为目前最先进的成像系统,除满足物镜波像差要求外,还需考虑系统的可实现性,其中最为重

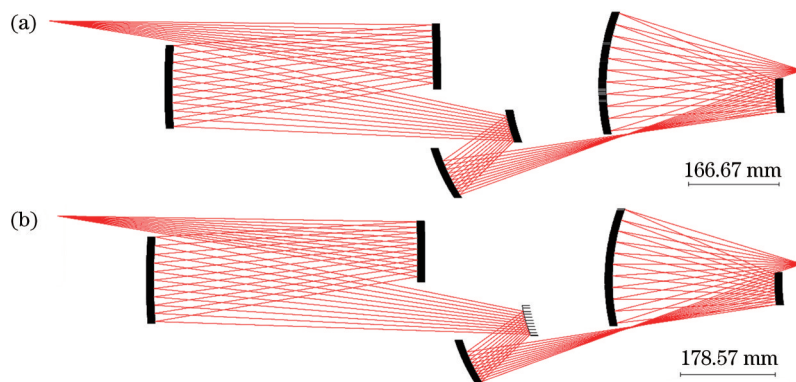


图 7 综合优化前后的物镜系统。(a) 仅对波像差进行优化后得到的物镜系统 Set1;  
(b) 对非球面度以及结构进一步优化后得到的物镜 Set2

Fig.7 Objectives with optimum wavefront error with and without optimization of construction and aspheres. (a) Optimum objective Set1 solely with wavefront optimization; (b) re-optimized objective Set2 with construction and asphere optimization

要的便是非球面的控制。非球面度及其梯度是衡量非球面元件能否实现的关键指标之一,前者关系到非球面加工过程中的去除量以及检测中干涉条纹的级次;后者决定了加工过程中所需要使用的最小磨头以及检测中干涉条纹的密度,它们的最大值直接决定了非球面加工检测能否实现。

传统的非球面多项式虽然结构简单、应用广泛,但其非球面系数没有明确的物理意义且各多项式间互不正交,高次非球面系数的微小改变可能会彻底破坏系统成像,使得优化过程不具备平滑性。因此,本节将借助于G W Forbes提出的两种Q型非球面多项式对物镜系统进一步优化<sup>[12, 13, 21]</sup>。各Q型多项式间相互正交,且过小的非球面系数可直接舍去而不参与优化。此外,其系数与非球面度及其梯度具有直接关系,可在优化过程中对非球面加以约束。

表2 EUVL物镜系统主要技术指标

Table 2 Primary technical index of optimum EUVL objectives

Item	Set1	Set2
NA		0.3
Field of view /mm		2 × 26 crc-shaped
WFE ( $\lambda$ @ 13.5 nm RMS)	0.019	0.027
Distortion /nm	$\leq 2$	$\leq 1.5$
Max chief ray angle /( $^\circ$ )	23.53@M3	23.94@M3
Max semi diameter /mm	201.6	194.2
Max asphericity / $\mu\text{m}$	57@M3	44.8@M3
Total track /mm	1384	1404
Back work length /mm	50	55
Image telecentricity /mrad	1.5	1.7

表3 Set2设计方案主要参数

Table 3 Primary specifications of set2

Item	M1	M2	M3	M4	M5	M6
Diameter/mm	222.2	164.3	205.6	387.5	93.1	265.8
Max chief ray angle /( $^\circ$ )	6.1	6.8	23.9	12.9	12.3	4.6
Max asphericity / $\mu\text{m}$	30.3	1.0	44.8	14.7	17.7	16.1
Max gradient of asphericity /( $\mu\text{m}/\text{mm}$ )	2.02	0.10	4.67	1.12	2.91	1.01

对Set1中的M3非球面度进行约束优化,得到如图7(b)所示的物镜系统Set2,可见,相比于Set1, M4的中心被移出光路而得以保留,后工作距增加至55 mm。各非球面的非球面度分布如图8(b)所示,最大非球面度降至45  $\mu\text{m}$ ,得到了较大改善,主要性能参数对照如表2所示,全视场复合波像差为0.027 $\lambda$  RMS,仍优于 $\lambda/30$  RMS的设计指标,畸变低于1.5 nm。表3列举了Set2中各反射镜的口径、最大主光线入射角、最大非球面度及其梯度等涉及物镜系统可制造性的关键参数。其中, M3的最大非球面度及其梯度是限制非球面加工和检测的主要因素。通过真实光线追迹, M3上的主光线入射角虽然最大,但其带宽分布极为有限,约为1 $^\circ$ ;而M5全口径内的光线的入射角分布带宽超过15 $^\circ$ ,将会对光学薄膜的设计和制备带来极大挑战。如图9所示为Set2的畸变及波像差分布曲线,视场内最大波像差为0.034  $\lambda$  RMS。其调制传递函数(MTF)曲线及焦深如图10所示,在22730 cycles/mm,即22nm特征线宽处,其MTF值仍高于0.45,在75 nm焦深范围内,MTF高于0.4。

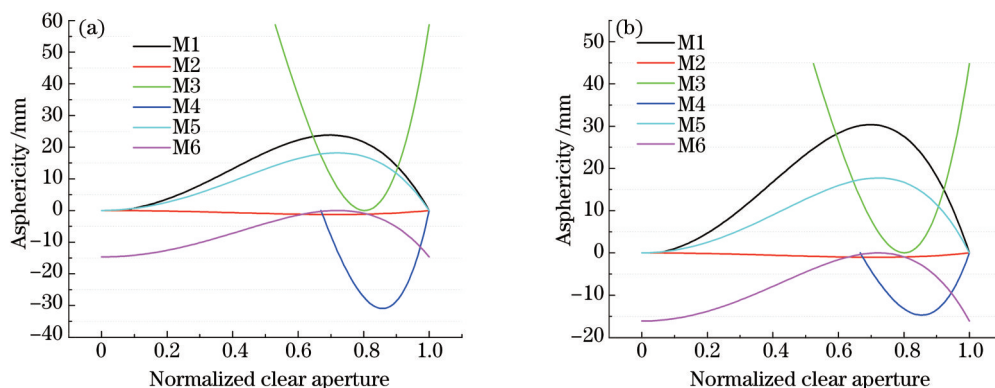


图8 物镜系统非球面优化前后的各光学元件非球面度分布。(a) Set1各镜面非球面度; (b) Set2各镜面非球面度分布

Fig.8 Asphericity of mirrors before and after optimization of asphere. (a) Asphericity of mirrors in Set1; (b) asphericity of mirrors in Set2

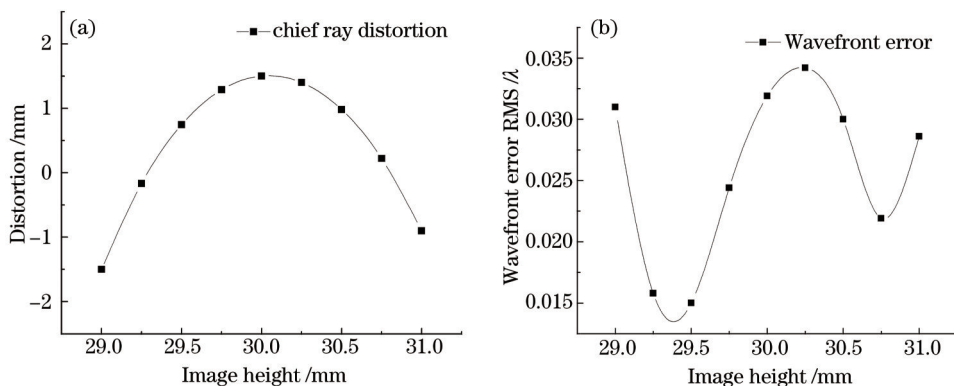


图9 Set2 畸变和波像差随视场的变化。(a)畸变随视场的变化;(b)波像差随视场的变化

Fig.9 Distribution of distortion and wavefront error in field of view of Set2.

(a) Distortion varies with field of view;(b) wavefront error varies with field of view

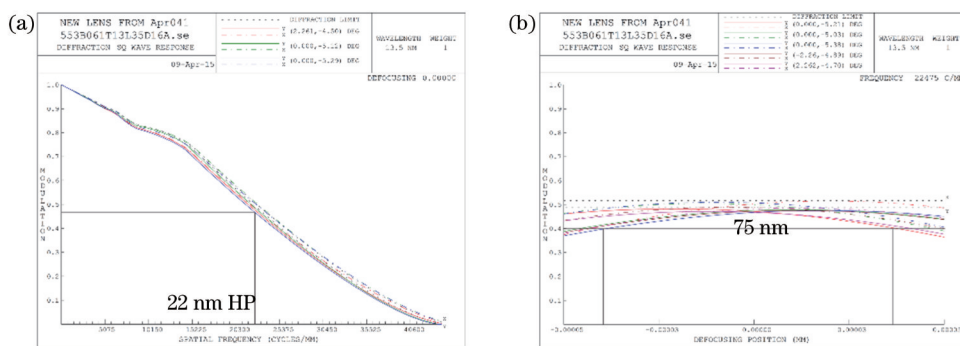


图10 Set2的调制传递函数特征。(a)MTF随空间频率的变化;(b)22 nm HP对应频率的MTF随离焦的变化

Fig.10 MTF of Set2. (a) MTF varies with spatial frequency; (b) MTF@22 nm HP (22730 cycles/mm) varies with defocus

## 5 结 论

在对极紫外光刻物镜光学系统进行分组分析的基础上,运用几何光学基本理论实现了各子系统结构的解析表达,尽可能地降低了决定物镜结构的变量数目。在此基础上,完成了物镜系统初始结构构造的可视化,为初始结构生成经验的积累提供了方便,提高了构造效率和成功率。利用小数值孔径系统具有小像差的光学系统基本特性,完成了物镜系统波像差优化,使得在 26 mm×2 mm 的弧形视场内复合波像差优于  $\lambda/50$  RMS,畸变优于 2 nm。采用新型的 Q 型多项式,对物镜系统非球面进一步优化,最终使得全视场复合波像差为 0.027  $\lambda$  RMS,畸变优于 1.5 nm,像方远心度为 1.7 mrad,各反射镜最大非球面度低于 45  $\mu\text{m}$ ,最大口径小于 400 mm,使得物镜系统更具工程可实现性。

## 参 考 文 献

- 1 A A Schafgans, D J Brown, I V Fomenkov, *et al.*. Performance optimization of MOPA pre-pulse LPP light source[C]. SPIE, 2015, 9422: 94220B.
- 2 M F Bal, F Bociort, J J M Braat. Analysis, search, and classification for reflective ring-Field projection systems[J]. Appl Opt, 2003, 42 (13): 2301-2311.
- 3 M Strojnik, R Flores-Hernandez, B F Andresen. AZTECA, a y-y diagram oriented interactive computer program for optical system design and optimization[C]. SPIE,1995, 2553: 400-415.
- 4 C Wang, D L Shealy. Differential equation design of finite-conjugate reflective systems[J]. Appl Opt, 1993, 32(7): 1179-88.
- 5 O Marinescu, F Bociort. Network search method in the design of extreme ultraviolet lithographic objectives[J]. Appl Opt, 2007, 46(35): 8385-8393.
- 6 Liu Fei, Li Yanqiu. Design of high numerical aperture projection objective for industrial extreme ultraviolet lithography[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0222003.

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):0222003.



- 7 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.
- 8 L Fei, L Yanqiu. Grouping design of eight-mirror projection objective for high-numerical aperture EUV lithography[J]. Appl Opt, 2013, 52(29): 7137-44.
- 9 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.
- 10 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
- 11 R Hudyma, H J Mann, U Dinger. Projection System for EUV Lithography[P]. U.S. patent: US6985210B2, 2006.
- 12 G W Forbes. Shape specification for axially symmetric optical surfaces[J]. Opt Express, 2007, 15(8): 5218-5226.
- 13 G W Forbes. Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres[J]. Opt Express, 2010, 18(19): 19700.
- 14 B Ma, L Li, K P Thompson, *et al.*. Applying slope constrained Q-type aspheres to develop higher performance lenses[J]. Opt Express, 2011, 19(22): 21174-21179.
- 15 R Hudyma. High Numerical Aperture Ring Field Projection System for Extreme Ultraviolet Lithography[P]. U.S. patent: US6033079A, 2000.
- 16 R Hudyma, H J Mann, U Dinger. Projection System for EUV Lithography[P]. U.S. patent: US7151592B2, 2003.
- 17 R Hudyma, H J Mann, U Dinger. Projection System for EUV Lithography[P]. U.S. patent: USRE42118 E, 2011.
- 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.
- 19 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.
- 20 Li Yanqiu, Cao Zhen, Liu Fei. An Extreme Ultraviolet Lithography Objective[P]. China patent: CN102608737A, 2012.  
李艳秋, 曹 振, 刘 菲. 一种极紫外光刻物镜[P]. 中国: CN102608737A, 2012.
- 21 G W Forbes. Manufacturability estimates for optical aspheres[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9923-9942.

栏目编辑: 韩 峰