

16~22 nm 极紫外光刻物镜工程化设计

曹 振 李艳秋 刘 菲

(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 极紫外光刻是 16~22 nm 光刻技术节点的候选技术之一, 其投影物镜设计需在满足像质和分辨率要求的前提下, 兼顾工程可实现性。在考虑加工、检测和制造约束的情况下, 设计了像方数值孔径分别为 0.3 和 0.32、曝光视场为 26 mm×1.5 mm 的极紫外光刻投影物镜。详细分析和比较了两套物镜的光学性能和可制造性。结果表明, 两套物镜结合分辨率增强技术可分别满足 22 nm 和 16 nm 光刻技术节点的性能要求。

关键词 光学设计; 投影物镜; 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/AOS201333.0922005

Manufacturable Design of 16~22 nm Extreme Ultraviolet Lithographic Objective

Cao Zhen Li Yanqiu Liu Fei

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

Abstract Extreme ultraviolet lithography is one of the promising technologies for 16~22 nm node of lithography. Design of the extreme ultraviolet lithographic projection objective needs not only to meet the demand of imaging quality and resolution but also to consider the manufacturability. Two projection objectives with numerical apertures of 0.3 and 0.32, respectively, are designed in the 26 mm×1.5 mm exposure area to meet the demands of manufacture, measurement and fabrication. The optical performance and manufacturability of the two projection objectives are analyzed and compared in detail. Combining with the resolution enhancement technology, the two projection objectives can meet the requirements of 22 nm and 16 nm node of lithography.

Key words optical design; projection objective; catoptric system; extreme ultraviolet lithography

OCIS codes 220.2740; 220.4830; 140.7240; 340.7480

1 引 言

极紫外光刻(EUVL)是 16~22 nm 光刻技术节点的候选技术之一, 因曝光波长为 13.5 nm, 其投影物镜优化设计和制造面临较大的挑战。国外极紫外光刻物镜研制时间较早, Carl Zeiss、Nikon 均设计和研制了六面反射镜构成的极紫外光刻物镜^[1-2]。2006 年, 荷兰 ASML 开发了世界上第一台数值孔径(NA)为 0.25 的 EUVL 样机 ADT, 其投影物镜包含六个非球面反射镜^[3]。2009 年, 用 ADT 曝光

实现了 28 nm 特征结构^[4]。此后, ASML 计划在其 NXE 光刻机平台上使用数值孔径为 0.32 的六反射镜极紫外光刻物镜, 结合离轴照明等分辨率增强技术实现 16~22 nm 的光刻分辨率^[5]。近年来国内一些单位也积极投入到高分辨率极紫外光刻物镜的研究工作中。2004 年, 李艳秋^[6]报道的 NA 为 0.25 六反射镜极紫外光刻物镜的分辨率达到了 50 nm。2009 年, 杨雄等^[7]报道了 NA 为 0.25 的极紫外光刻物镜。2011 年, 刘菲等^[8]报道了 NA 为 0.3 的极

收稿日期: 2013-03-27; **收到修改稿日期**: 2013-05-28

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, 主要从事极紫外光刻光学系统设计方面的研究。

E-mail: feifei4150@yahoo.com.cn

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)

紫外光刻物镜,详细分析了物镜的光学性能,并初步分析了物镜的公差。在不考虑加工、检测和制造约束的情况下,该物镜结合分辨率增强技术可满足 22 nm 节点需求。但是,国内外关于极紫外光刻物镜设计的文献很少介绍加工、检测和制造约束情况下的工程设计及其优化。极紫外光刻物镜的可制造性设计(或工程化设计),需要在设计阶段考虑如下约束条件:1)系统结构,如控制物像之间总的长度、镜片厚度和诸面之间隔;2)所用非球面反射镜的加工和检测能力,如控制非球面度、非球面梯度、反射镜口径、物镜的制造公差;3)控制反射镜上光线入射角,使经过反射镜上多层膜反射的光具有较高的均匀性。这些约束及其对设计和制造的影响均未被详细研究和报道。另外,能够满足 16 nm 光刻技术节点性能要求的工程化极紫外光刻物镜设计(NA 为 0.32)尚未见报道。

参照国外加工、检测和制造能力,本文首先明确并考虑了工程化极紫外光刻物镜设计要求及上述约束条件,据此设计了 NA 为 0.3 和 0.32,由六面非球面反射镜构成的两套投影物镜。分析和比较了两套物镜的光学性能和可制造性。针对 NA 为 0.3 的物镜,在 26 mm×1.5 mm 曝光视场内,该物镜系统波像差均方根(RMS)值小于 0.030 λ ($\lambda=13.5$ nm),畸变小于 1.7 nm,不采用任何分辨率增强技术的情况下光学成像分辨率可达到 22 nm。针对 NA 为 0.32 的物镜,在 26 mm×1.5 mm 曝光视场内,该物镜系统波像差 RMS 值小于 0.031 λ ($\lambda=13.5$ nm),畸变小于 1.7 nm,不采用任何分辨率增强技术的情况下光学成像分辨率可达到 20 nm。两套物镜结合分辨率增强技术(如离轴照明和相移掩模)可满足 16~22 nm 光刻技术节点需求。

2 极紫外光刻物镜性能要求

极紫外光刻物镜设计首先要满足分辨率和成像质量的要求。六反射镜物镜可实现约 0.3 的数值孔径,1~2 mm 的像方视场。由光刻系统的理论可知,分辨率

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

式中 k_1 为工艺因子, λ 为曝光波长。当曝光波长为 13.5 nm,采用分辨率增强技术使得工艺因子 $0.38 < k_1 < 0.48$ 时^[9],NA 为 0.3 的投影物镜可达到 18~22 nm 的分辨率,NA 为 0.32 的投影物镜可达到 16~20 nm 的分辨率。极紫外光刻要求投影物镜的成像

质量接近衍射极限,同时保证极小的畸变。此外,为配合掩模和硅片的扫描速率,物镜的微缩比通常为 4 倍或 5 倍。系统应实现像方远心,从而在像面有微小移动的情况下保持物镜的放大倍率不变。掩模面上主光线与光轴的夹角一般应小于 6°,角度过大将破坏物方近似远心性,角度过小将使照明系统产生遮拦。角度的选取应配合反射式掩模的使用和照明系统的设计。所涉及的 16~22 nm 极紫外光刻物镜的性能要求如表 1 所示。

表 1 物镜性能要求

Table 1 Performance of the projection objective

Parameters	Specification
Wavelength /nm	13.5
Numerical aperture	0.3/0.32
Reduction ratio	4:1
Single field /mm	26×1.5
RMS wavefront error / λ	≤ 0.05
Distortion /nm	≤ 2
Chief ray angle of incidence on mask /($^\circ$)	≤ 6
Image telecentricity /mrad	≤ 2

3 极紫外光刻物镜可制造性约束

物镜设计在实现高像质和高分辨率的同时,应兼顾工程可制造性。如引言所述,物镜的加工、检测和制造对物镜设计提出的约束主要包括系统结构、非球面反射镜的加工和检测、反射镜上光线入射角控制以及制造公差等方面的诸多约束。在物镜优化设计中必须综合考虑上述约束条件,以保证物镜良好的工程可制造性。

3.1 系统结构

为保证系统结构稳定,投影物镜空间尺寸(即物像之间总的长度)不宜过长。反射镜需要一定的厚度以限制重力变形和热变形,因此设计时反射镜之间应留有足够的间隔。物镜的前后工作距离不宜过小以保证掩模、硅片的安放和机械扫描。

3.2 非球面反射镜加工和检测

极紫外光刻物镜通常采用大口径,高阶非球面系数的非球面反射镜。反射镜的口径、非球面系数的阶数、非球面度以及非球面梯度是制约非球面反射镜加工和检测的关键因素。反射镜的口径过大会给反射镜的加工和检测带来困难。通常非球面系数的阶数越高,反射镜加工的难度越大。非球面度反映非球面与基准球面的偏差,非球面梯度是非球面度沿径向的变化率,如图 1 所示。

增大非球面度和非球面梯度能够在一定程度上

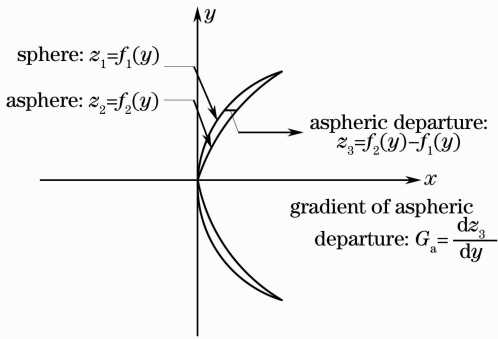


图 1 非球面度和非球面梯度

Fig. 1 Aspheric departure and gradient of aspheric departure

增加反射镜校正像差的能力。但是,非球面度越大表明基准球面上的去除量越大,非球面梯度变化越快表明要使用越小的磨头,这些都会带来镜片中频粗糙度增大的风险。因此,物镜设计在实现良好的像差校正的同时,要合理控制反射镜口径、非球面系数的阶数以及非球面度和非球面梯度,从而保证反射镜加工和检测的精度。

3.3 光线入射角控制

极紫外光刻物镜通常镀有 Mo/Si 多层反射薄膜,从而实现对极紫外照明光源的反射。正入射时 Mo/Si 多层膜的反射率相对波长的变化曲线如

图 2(a)所示,反射率在 13.5 nm 处达到最大值。此外,Mo/Si 多层膜在波长 13.5 nm 处的反射率还会随着光线入射角度的变化而变化。图 2(b)为针对不同入射角度范围设计的 Mo/Si 多层膜的反射率随光线入射角度的变化曲线。由图 2(b)可知,入射角度的平均值(即反射带中心对应的入射角度)越大,则薄膜反射带所覆盖的入射角度范围越小。为实现物镜设计和多层反射薄膜的匹配,应保证反射镜上的光线入射角范围在薄膜反射带能够覆盖的入射角范围之内,从而使入射到镜片各处的光线获得均匀的反射率。这就要求将反射镜光线入射角的平均值和光线入射角的范围都尽可能地控制在较小的水平。控制反射镜光线入射角的平均值是为了保证薄膜反射带覆盖尽可能大的入射角范围、控制反射镜光线入射角范围是为了将其限制在薄膜反射带覆盖的入射角范围之内。上述 Mo/Si 多层膜为均匀膜系,周期数为 40,采用膜系设计软件进行仿真。材料的光学参数来源 Lawrence Berkeley 实验室^[10]。多层膜周期厚度选择的依据是:针对平均入射角度,薄膜在波长 13.5 nm 处的反射率达到极大值。

针对 16~22 nm 技术节点,由于产业化极紫外光刻物镜的 NA 较大,导致镜片不同位置上入射角的变化范围很大,如图 3 所示。

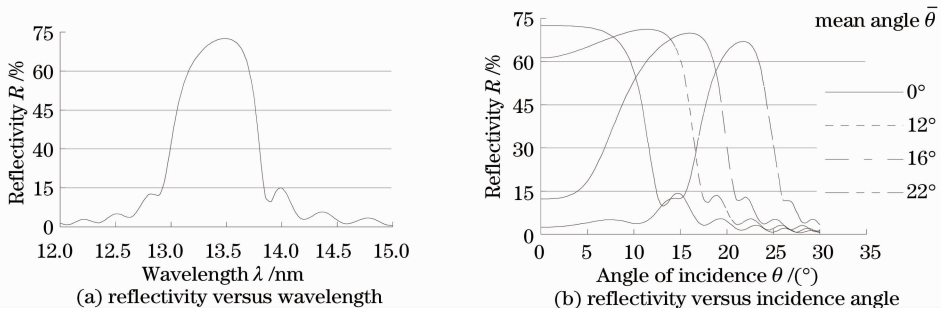


图 2 周期数为 40 的 Mo/Si 多层膜曲线图

Fig. 2 Mo/Si multilayer with 40 periods

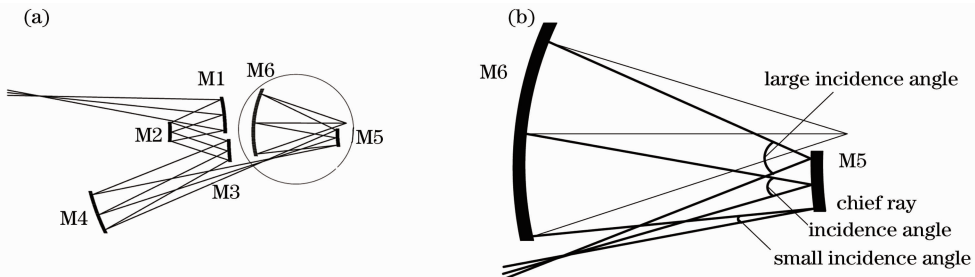


图 3 (a)六反射镜投影物镜结构与(b)第 5 反射镜上光线入射角的变化

Fig. 3 (a) Six-mirror projection objective structure and (b) variation of incidence angle on M5

极紫外光刻物镜中,反射镜的主光线入射角可近似认为是镜片光线入射角的平均值。主光线入射角的增大表明薄膜入射角度平均值的增大,从而会导致薄膜反射带所覆盖的入射角范围减小。因此,若镜片的光线入射角范围超出薄膜反射带所覆盖的入射角范围,将会造成镜片不同位置反射的光线光强不均匀,严重时甚至会减小物镜的数值孔径。因此,反射镜的主光线入射角和光线入射角范围在物镜设计时都要加以约束,以保证入射到镜片各处的光线获得均匀的反射率。光线入射角范围过大的反射镜需要镀制梯度膜。工程化极紫外光刻物镜设计必须协同反射薄膜设计。

3.4 物镜制造公差

实现极紫外光刻物镜的高分辨率成像,不仅需要光学设计过程中尽可能降低物镜的残余波像差,还需要考虑到物镜制造所引入的各类误差对成像质量的影响,合理地分配物镜各项公差。极紫外光刻物镜对离轴非球面反射镜的面型误差 RMS 值的要求约为 0.2 nm,对反射镜间隔和倾斜的定位精度要求在纳米和纳弧度量级,如此高的精度要求对光刻物镜的加工、检测和装调提出挑战^[11]。

3.5 可制造性约束条件

依据上述讨论,参照国外加工、检测和制造能力确定极紫外光刻物镜的可制造性约束条件如表 2 所示^[11-14]。

表 2 可制造性约束条件

Table 2 Manufacturable restrictions

Parameters	Specification
Distance between lens /mm	≥ 50
Back working distance /mm	≥ 30
Front working distance /mm	≥ 100
Total track length /mm	≤ 1500
Diameter of mirror /mm	≤ 500
Aspheric departure / μm	≤ 40
Gradient of aspheric departure /($\mu\text{m}/\text{mm}$)	≤ 4
Chief ray angle of incidence /($^\circ$)	≤ 24

4 极紫外光刻投影物镜工程化设计

为保证系统的旋转对称和有利于像差校正,极紫外光刻物镜通常采用离轴弓形视场,如图 4 所示。

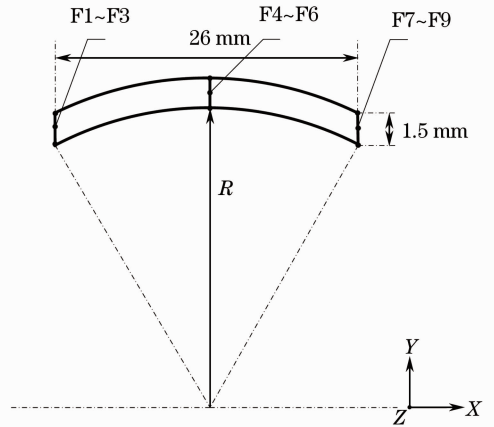


图 4 像方离轴弓形视场上的 9 个视场点

Fig. 4 9 points on the off-axis image arc field

物镜通常设置有中间像以防止光路遮拦和控制反射镜口径。相比较 NA 为 0.25 的投影物镜,NA 为 0.3 和 0.32 的投影物镜需要在更大的 NA 下校正像差,增大了物镜的优化设计难度。在考虑可制造性约束的情况下,更不易获得满足性能要求的物镜结构。因此,物镜设计所选用的初始结构必须有良好的像差校正能力以及增大数值孔径且不产生光路遮拦的潜力。在物镜优化设计过程中必须平衡像质和可制造性约束,最终在满足可制造性约束条件的情况下实现预期像质。

4.1 投影物镜初始结构选择

利用现有初始结构搜索方法能够获得大量的由六片球面反射镜构成的极紫外光刻物镜初始结构^[15-16]。但并不是所有初始结构都能够保证大数值孔径和大视场下良好的像差校正能力以及结构的工程可实现性。极紫外光刻物镜可按照反射镜光焦度的空间排布进行分类(例如用 P 表示凹镜,N 表示凸镜,则 PPNPNP 可表示物镜六个反射镜光焦度的空间排布)。在六镜结构中 PPNPNP 型和 PNNPNP

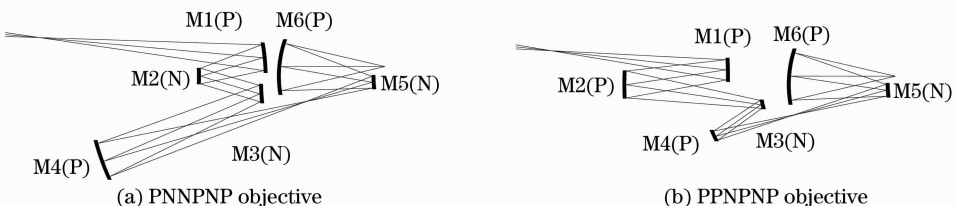


图 5 六镜极紫外光刻物镜结构图

Fig. 5 Layout of six-mirror EUVL projection objective

型六镜结构具有良好的像差校正能力,如图 5 所示。

PNNPNP 型物镜结构有着相同数目的凹镜和凸镜。初始球面结构具有很强的像差校正能力,能够很好地平衡低阶像差,在优化设计过程只需要引入较小的非球面度就能实现高阶像差的校正。主镜承担较大的像差用于像差平衡,使得系统的残余波像差最小。物镜有着较大的后工作距离。第 4 反射镜 M4 远离中间像,从而减小了第 3 反射镜 M3 上的光线入射角。

鉴于凸非球面镜的检测难度远大于凹非球面镜,PPNPNP 型物镜结构采用了尽可能少的凸镜。物镜系统通过反射镜正负光焦度相分离校正场曲,主镜和次镜承担了正光焦度。设置在 M2 上的光阑,使该面对畸变的贡献为零。M4 位置更靠近中间像,这使得 M4 的口径得到了很好的控制,更有利于反射镜的加工和镀膜。

上述两种初始结构都具有良好的像差校正能力和增大数值孔径但不产生光路遮拦的潜力。鉴于 PPNPNP 型结构凹镜多,各反射镜口径较小利于加工检测,且各反射镜间隔较大利于系统装调,因此选择该结构为物镜设计的初始结构。

4.2 物镜优化设计和光学性能分析

极紫外光刻物镜设计采用非球面以增加优化自

由度,非球面的引入可以使像差得到良好的校正。但是,优化自由度增多会使物镜优化过程中评价函数容易陷入局部极值。同时,在可制造性约束条件的限制下,满足像质要求的物镜结构的解空间缩小,进一步增加了物镜的优化设计难度。

采用 Code V 软件在全球面 PPNPNP 型初始结构的基础上,由小数值孔径开始,逐渐增加数值孔径和非球面系数对物镜进行渐进优化。同时,采用 Macro 软件编写高效的非球面度、非球面梯度等可制造性约束的优化控制函数,在优化过程中控制可制造性约束条件。进行渐进优化的目的是为了充分利用初始结构的像差校正能力,使设计在初始结构的基础上进行优化和改进。在渐进优化过程中,评价函数不再持续收敛且此时物镜性能尚未达到要求,需要对物镜结构进行扰动从而使评价函数跳出局部极值。对于六反射镜极紫外光刻物镜的优化,可能有效的扰动包括:增减非球面系数,改变视场宽度,改变数值孔径及改变物像距等。扰动的步长需合理设置,步长过大会导致设计较大地偏离初始结构甚至导致光线追迹出错,步长过小则起不到对物镜结构的扰动作用。

应用上述设计方法得到 NA 为 0.3 的物镜一(PO1)和 NA 为 0.32 的物镜二(PO2),如图 6 所示。

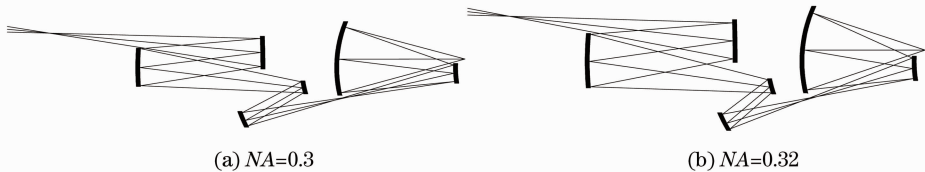


图 6 物镜结构图

Fig. 6 Layout of the projection objective

物镜一的微缩比为 4 倍,在 $26\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ 的弓形曝光视场内,全视场 RMS 波像差的平均值

为 0.0193λ ,最大值为 0.030λ ,如图 7 所示。物镜一的畸变如图 8 所示,全视场畸变小于 1.7 nm 。

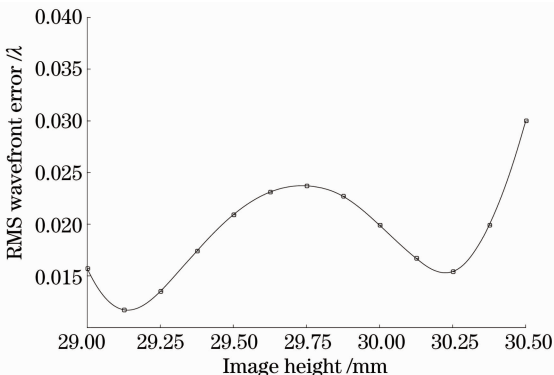


图 7 物镜一的波像差

Fig. 7 Wavefront error of PO1

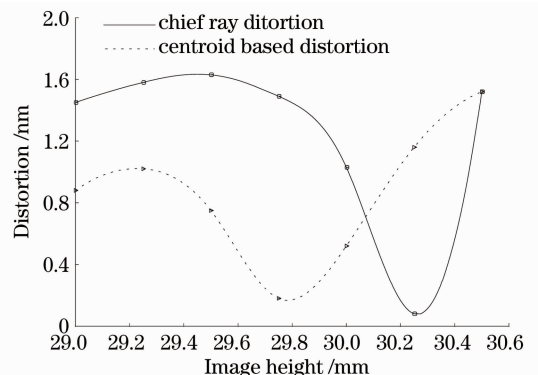


图 8 物镜一的畸变

Fig. 8 Distortion of PO1

如图 9(a) 所示, 物镜一的光学调制传递函数 (MTF) 贴近衍射分辨极限, MTF 值为 45% 时对应 22 nm 线宽 (22475 lp/mm) 的分辨率。物镜一在

22475 lp/mm 处的离焦 MTF 如图 9(b) 所示, 在 80 nm 的焦深范围内 MTF 值大于 40%, 因此在光刻胶中的成像有较好的对比度。

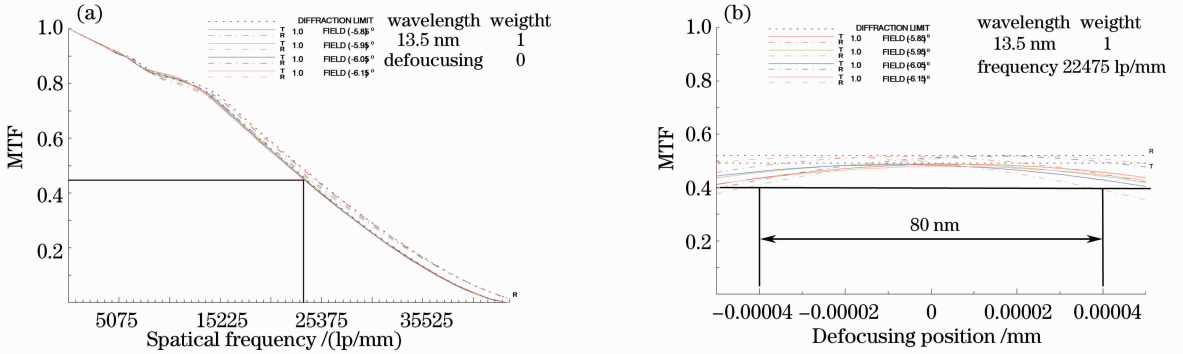


图 9 物镜一的调制传递函数。(a) 调制传递函数相对空间频率的变化; (b) 空间频率为 22475 lp/mm 的离焦调制传递函数
Fig. 9 MTF of PO1. (a) MTF versus spatial frequency; (b) MTF versus depth of focus at spatial frequency of 22475 lp/mm

物镜二的微缩比为 4 倍, 在 26 mm × 1.5 mm 的弓形曝光视场内, 全视场 RMS 波像差的平均值为 0.0214λ, 最大值为 0.031λ, 如图 10 所示。物镜二的畸变如图 11 所示, 全视场畸变小于 1.7 nm。

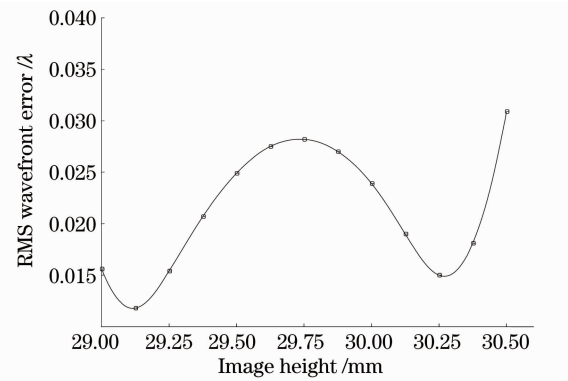


图 10 物镜二的波像差
Fig. 10 Wavefront error of PO2

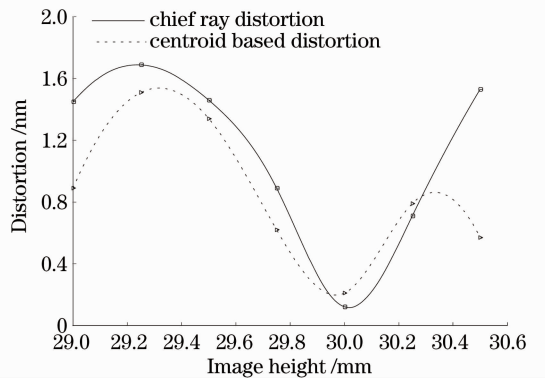


图 11 物镜二的畸变
Fig. 11 Distortion of PO2

如图 12(a) 所示, 物镜二的 MTF 贴近衍射分辨极限, MTF 值为 45% 时对应 20 nm 线宽 (24800 lp/mm) 的分辨率。物镜二在 24800 lp/mm 处的离焦 MTF 如图 12(b) 所示, 在 70 nm 的焦深范围内 MTF 值大于等

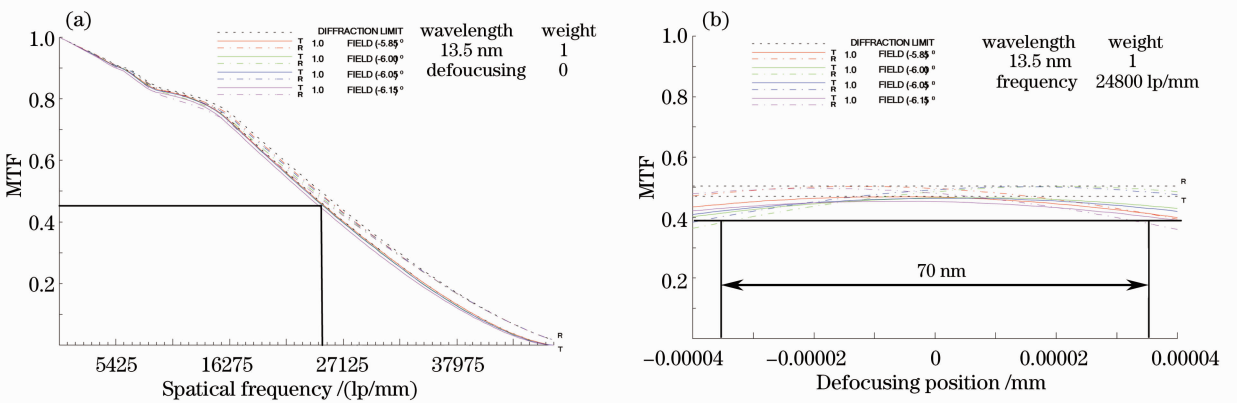


图 12 物镜二的调制传递函数。(a) 调制传递函数相对空间频率的变化; (b) 空间频率为 24800 lp/mm 的离焦调制传递函数
Fig. 12 MTF of PO2. (a) MTF versus spatial frequency; (b) MTF versus depth of focus at spatial frequency of 24800 lp/mm

于 40%。

4.3 物镜结构参数

两套物镜结构紧凑,系统总长均小于 1500 mm。镜面间隔均大于 50 mm,后工作距离均大于 30 mm,有足够的装调余量。掩模面上主光线与光轴的夹角设置为 6° ,像方远心。两套物镜反射镜的非球面度和非球面梯度都得到良好的控制,物镜一的数值孔径为 0.3,其最大非球面度和最大非球面梯度与 ASML 数值孔径为 0.25 的光刻样机所用物镜的最大非球面度和最大非球面梯度数值相当^[11]。由于数值孔径的增大使得物镜二需要更大的非球面度和非球面梯度来校正像差。两套物镜结构参数如表 3 所示。

表 3 物镜结构参数

Table 3 Structural parameters of the projection objective

Parameters	PO1	PO2
Numerical aperture	0.3	0.32
Distance between lens /mm	≥ 50	≥ 50
Back working distance /mm	35	36
Total track length /mm	1250	1160
Chief ray angle of incidence on mask /($^\circ$)	6	6
Image telecentricity /mrad	0.006	0.041
Order of aspheric coefficient	≤ 12 th	≤ 16 th
Diameter of mirror /mm	≤ 410	≤ 400
Aspheric departure / μm	≤ 30	≤ 40
Gradient of aspheric departure /($\mu\text{m}/\text{mm}$)	≤ 2.4	≤ 3.8

表 4 为物镜各反射镜上的主光线入射角度。物镜二为避免数值孔径增大导致的光路遮拦,反射镜上的主光线入射角度较物镜一有所增大。

表 4 物镜主光线入射角(中心视场点)

Table 4 Chief ray angle of incidence (central field point)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
PO1 /($^\circ$)	7.1	8.1	20.9	9.6	11.4	4.1
PO2 /($^\circ$)	6.8	7.6	23.0	11.4	12.5	4.6

5 公差分析

由 Marechal 判据,接近衍射极限的光学系统的 RMS 波像差应小于 $\lambda/14$ 。针对照明波长为 13.5 nm 的极紫外光刻物镜,系统的 RMS 波像差应小于 1 nm。如此高的像质对投影物镜加工以及装调公差的要求非常苛刻,因此需要有效的像质补偿元件来降低投影物镜苛刻的制造公差^[17]。在此不详述 EUVL 投影物镜公差分析方法,仅给出两套物镜的公差分析结果。

使用 Code V 软件,以 RMS 波像差值小于 1 nm 为公差分析标准对物镜进行公差分析。物镜离轴弓形视场上 9 个视场点(F1~F9)的波像差累积概率分布如图 13 所示。在 97.7% 的概率下物镜一和物镜二的最大波像差均小于 1 nm,在此分析标准下两物镜的制造公差如表 5 所示。

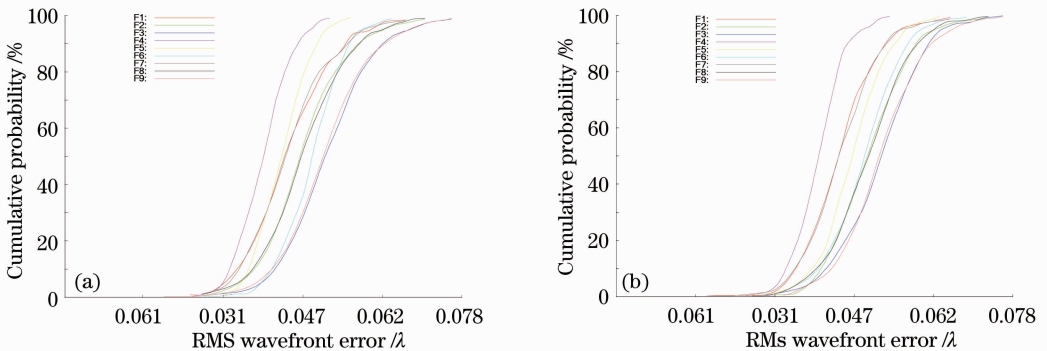


图 13 波像差的累积概率分布。(a) 物镜一; (b) 物镜二

Fig. 13 Cumulative probability of wavefront error. (a) PO1; (b) PO2

表 5 制造公差

Table 5 Fabrication tolerances

Name	Thickness / μm	Decentration / μm	Tilt /rad	Figure error (RMS) /nm
PO1	3~25	3~10	$4 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-4}$	0.24~4.51
PO2	2~20	3~10	$1 \times 10^{-6} \sim 1.3 \times 10^{-4}$	0.22~4.12

公差分析结果表明,两套物镜反射镜间隔公差和偏心公差在微米量级,倾斜公差在微弧度量级,面型公差 RMS 值在亚纳米量级。在相同波像差标准下物镜二的公差比物镜一稍严。物镜二由于非球面度和非球面梯度的增大,使得在保证面型公差的前提下反射镜的加工难度增大。另外,单一的面型误差不足以描述反射镜的加工误差对光刻性能的影响,还需要对反射镜的中/高频粗糙度做相应分析。

6 结 论

详细论述了工程化极紫外光刻物镜的性能要求和可制造性约束条件。选择 PPNPNP 初始结构设计了 NA 为 0.3 和 0.32、满足可制造性约束条件的两套投影物镜。分析和比较了两套物镜的光学性能、结构参数以及公差数据,为评估两套物镜的性能和制造难度提供依据。参照国外同类设计、加工和检测数据,其结构参数和公差分配具有可制造性。设计结果表明,两套物镜结合分辨率增强技术可分别满足 22 nm 和 16 nm 光刻技术节点对极紫外光刻物镜的性能要求。

参 考 文 献

- 1 Hans Meiling, Vadim Banine, Noreen Harned, *et al.*. Development of the ASML EUV alpha demo tool [C]. SPIE, 2005, 5751: 90–98.
- 2 Katsuhiko Murakami, Tetsuya Oshino, Hiroyuki Kondo, *et al.*. Development of optics for EUV lithography tools [C]. SPIE, 2008, 6517: 65170J.
- 3 Hans Meiling, Henk Meijer, Vadim Banine, *et al.*. First performance results of the ASML alpha demo tool [C]. SPIE, 2006, 6151: 615108.
- 4 Hans Meiling, Nico Buzing, Kevin Cummings, *et al.*. EUVL system moving towards production [C]. SPIE, 2009, 7271: 727102.
- 5 Christian Wagner, Noreen Harned, Peter Kuerz, *et al.*. EUV into production with AMSL's NXE platform [C]. SPIE, 2010, 7636: 76361H.

- 6 Li Yanqiu. Optical performance of extreme ultraviolet lithography for 50 nm generation [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 865–868.
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.
- 7 Yang Xiong, Xing Tingwen. Design of extreme-ultraviolet lithographic objectives [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(9): 2520–2523.
杨 雄, 邢廷文. 极紫外投影光刻物镜设计[J]. 光学学报, 2009, 29(9): 2520–2523.
- 8 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.
- 9 Takaharu Miura, Katsuhiko Murakami, Hidemi Kawai, *et al.*. Nikon EUVL development progress update [C]. SPIE, 2010, 7636: 76361G.
- 10 Lawrence Berkeley National Laboratory's Center for X-Ray Optics. Interactions with Matter: The Index of Refraction of a Compound Material [DB/OL]. [2013-03-20]. http://henke.lbl.gov/optical_constants/.
- 11 Hans Meiling, Jos Benschop, Rob Hartman, *et al.*. EXTATIC: ASML's α -tool development for EUVL [C]. SPIE, 2002, 4688: 59–62.
- 12 Takahiro Sasaki. Projection Optical System Exposure Apparatus and Device Fabricating Method; U. S., 7554649 [P]. 2009-06-30.
- 13 Rusell Hudyma, Hans-Jurgen Mann, Udo Dinger. Projection System for EUV Lithography; U. S., 7375798B2 [P]. 2008-05-20.
- 14 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.
- 15 Matthieu F Bal, Florian Bociort, Joseph J M Braat. Analysis search and classification for reflective ring-field projection systems [J]. Appl Opt, 2003, 42(13): 2301–2311.
- 16 Oana Elena Marinescu. Novel Design Methods for High-Quality Lithographic Objectives [D]. Delft: Delft University of Technology, 2006, 81–86.
- 17 Xu Weicai, Huang Wei, Yang Wang. Magnification tolerancing and compensation for the lithographic projection lens [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(11): 1122003.
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.

栏目编辑: 张 腾