

# 组合倍率极紫外光刻物镜系统梯度膜设计方法

刘陌<sup>1</sup>, 李艳秋<sup>2\*</sup>

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** 随着极紫外(EUV)光刻物镜的设计朝着组合倍率物镜系统的方向发展,物镜系统需要同时具有大视场和高数值孔径(NA),因而产生了物镜的光线入射角及入射角范围急剧增大的问题,需要研究适用于组合倍率极紫外光刻物镜系统的膜层设计的新方法。提出了渐进优化膜层的设计方法,该方法提高了镀制膜层的物镜系统的反射率,保证了组合倍率物镜系统的成像质量。利用该方法对 NA 为 0.6 的组合倍率物镜系统进行了膜层设计,设计结果表明,含膜极紫外光刻物镜系统的平均反射率大于 65%,各反射镜的反射率峰谷值均小于 3.35%,反射率均匀性良好。

**关键词** 光学设计; 薄膜; 组合倍率; 极紫外光刻

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0522001

## Graded Multilayer Film Design Method of Anamorphic Magnification Extreme Ultraviolet Lithography Objective System

Liu Mo<sup>1</sup>, Li Yanqiu<sup>2\*</sup>

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

**Abstract** The development of extreme ultraviolet(EUV) lithographic objective design is toward the direction of an anamorphic magnification objective system, and large field of view and high numerical aperture (NA) for projection objectives are both needed, which cause an extreme increase of incident angle and incident angle range of an objective lens system, so new methods for multilayer film design of anamorphic magnification EUV lithography objective systems are needed to explore. A progressive optimization multilayer film design method is presented to increase the reflectivity but not to change the imaging performance. This method is successfully applied to design the multilayer films of an anamorphic magnification EUV lithography objective system with NA=0.6. The results show that the average reflectivity of each mirror is higher than 65% and the reflectivity peak-to-valley value of each mirror is less than 3.35%, meanwhile, a good uniformity of reflectivity is maintained.

**Key words** optical design; films; anamorphic magnification; extreme ultraviolet lithography

**OCIS codes** 220.2740; 310.4165; 140.7240

## 1 引 言

极紫外(EUV)光刻物镜系统采用反射式设计,为了保证较高的反射率,需要在物镜表面镀制膜层。当前组合倍率光刻物镜的研究朝着极紫外光刻物镜的方向发展<sup>[1]</sup>,其可以同时保证较大视场和高数值孔径(NA),但会导致物镜的光线入射角及入射角范围急剧增大,因此需要研究适用于组合倍率极紫外光刻物镜系统的膜层设计方法。

Chapman 等<sup>[2]</sup>给出了 NA 为 0.10 的 EUV 光

刻四反物镜系统的多层膜设计方案,各反射镜的平均入射角和入射角范围均很小,因此镀规整膜即可满足要求。在具有小视场且 NA 为 0.50 的曝光两反非球面物镜系统 MET5 中,技术节点为 11 nm。其中镜面 M1 和 M2 的入射角范围分别为 4°~14°和 1°~4°,所有镜面都镀制了横向梯度膜。由于像方视场仅为 0.03 mm×0.2 mm,物镜系统为两反系统,因此镜面的入射角很小,添加横向梯度膜不会引入很大的像差<sup>[3]</sup>。针对 NA 为 0.25 的极紫外光刻物镜系统,曹振<sup>[4]</sup>给出了多层膜设计方案。其中

收稿日期: 2019-09-19; 修回日期: 2019-10-28; 录用日期: 2019-11-26

基金项目: 国家科技重大专项(2012ZX02702001-002)

\* E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn

M1, M2, M4, M6 镀制规整膜, M3 和 M5 镀制横向梯度膜。与未镀制膜层相比, 镀制膜层后物镜系统的波像差增大了  $0.001\lambda$  ( $\lambda$  为波长), 且各个视场反射率峰谷(PV)值均低于 1.7%, 含膜物镜系统的反射率均匀性良好。蔡司公司发布了 NA 为 0.55 的组合倍率投影物镜系统的设计方案并给出了物镜系统的反射率, 各个镜面反射率均高于 62%, 但是此物镜系统的四片反射镜是小角度入射, 其余 4 片反射镜是掠入射, 给物镜的膜层设计增添了难度, 因此难以用于实际工程设备<sup>[5]</sup>。Meisels 等<sup>[6]</sup>在传统的 Mo/Si 膜层中, 用 Si 层周期性地替换某些 Mo 层, 让反射镜的高反射率带宽更大。沈诗欢<sup>[7]</sup>对 NA 为 0.5、横向放大倍率  $M_H$  为 4、纵向放大倍率  $M_L$  为 8 的组合倍率极紫外光刻物镜的多层膜设计进行了研究, 提出了纵横梯度膜设计法。设计结果表明, 各面反射镜的平均反射率超过 60%, 反射率 PV 值最大不超过 3.5%。Svechnikov 等<sup>[8]</sup>对极紫外光刻物镜的多种膜层结构进行了研究, 发现 Mo/Be 反射膜在垂直入射时显示出最大反射率, 而 Mo/Be/Si 反射膜显示出最大结构完整性。

当前的极紫外光刻机已经在 7 nm 和 5 nm 节点实现量产, 未来为实现 3 nm 以下技术节点, 将采用组合倍率物镜系统设计(即横向放大倍率不等于纵向放大倍率), 超大数值孔径内的光线入射到物镜表面的角范围急剧增大, 导致全视场范围内反射光的反射率不均匀<sup>[9]</sup>。目前, 关于组合倍率极紫外光

刻物镜膜层设计方法的研究鲜有报道。因此需要研究高性能组合倍率极紫外光刻物镜的膜层设计方法<sup>[10]</sup>。本文针对组合倍率极紫外光刻物镜系统的膜层设计要求(即每面反射镜的反射率大于 60%, 同时保证物镜系统分辨率达到衍射极限, 综合波像差低于  $0.0714\lambda$ ), 建立了渐进优化梯度膜设计法, 对设计规整膜之后反射率较低的镜面, 利用横向梯度膜进行了替换; 为了进一步提高镀制梯度膜后镜面的反射率, 对膜层参数进行优化, 直至将反射率优化至最佳值。应用此方法对 NA 为 0.6 的组合倍率极紫外光刻物镜系统进行了膜层设计, 并对设计结果包括镜面反射率和物镜系统光学性能进行了评价。

## 2 基本原理

### 2.1 膜层设计理论基础

光学材料对极紫外辐射有很强的吸收性, 因此在极紫外光学系统中无法应用折射镜, 应使用反射镜。在反射镜上镀制 Mo/Si 多层膜, 实现极紫外反射光的相长干涉, 可使物镜系统的反射率理论极限值高达 74%<sup>[11]</sup>。

本文针对实验室前期设计的 NA 为 0.6、横向放大倍率为 4、纵向放大倍率为 8 的组合倍率物镜系统<sup>[10]</sup>, 研究了规整膜和横向梯度膜中 Mo/Si 多层膜的性能。这两种 Mo/Si 多层膜的特点如图 1 所示, 其中  $y$  方向为扫描方向,  $x$  方向为垂直于扫描方向,  $z$  方向为光轴方向。

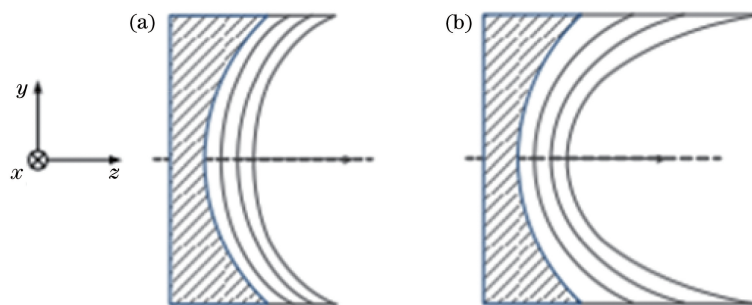


图 1 多层膜厚度分布规律示意图。(a)规整膜;(b)横向梯度膜

Fig. 1 Thickness distribution of multilayer films. (a) Regular multilayer films; (b) laterally graded multilayer films

规整膜示意图如图 1(a)所示, 它是最为常见的类型。目前广泛应用于极紫外光刻物镜中的规整膜, 每一层厚度是  $\lambda/4$  ( $\lambda$  是 13.5 nm), 膜层的周期厚度  $\Delta$  固定不变, 正入射条件下约为 7 nm。其中, 周期厚度参数值, 即 Mo 层厚度与多层膜周期厚度的比值  $\Gamma=0.4$  (Mo 层厚度为 2.8 nm, Si 层厚度为 4.2 nm)。周期数通常是 40~60, 多层膜总厚度会超过 280 nm。但在膜层周期数大于 40 后, 随着膜

层厚度的增加, 反射率的增加开始减慢且多层膜制备难度上升, 因此, 本文设计和研究的规整膜周期数选定为 40<sup>[12-13]</sup>。在正入射的条件下, 膜系反射率随波长的增大先增后减, 在波长为 13.5 nm 时, 反射率达到理论最大值, 约为 74%<sup>[11]</sup>。帽层材料为 Ru, 折射率为 0.8898, 消光系数为 0.0165; 吸收层为 Mo, 折射率为 0.9227, 消光系数为 0.0062; 间隔层为 Si, 折射率为 0.9999, 消光系数为 0.0018; 基底为  $\text{SiO}_2$ ,

折射率为 0.9787,消光系数为 0.0106,这四种材料的参数来自 Lawrence Berkeley 实验室<sup>[14]</sup>。

上述介绍的规整膜只能在较小的入射角范围内对 13.5 nm 极紫外辐射达到高反射率。为了在指定的角度范围内实现高反射率,可改变规整膜的周期厚度。规整膜的周期厚度确定方法是:在指定平均入射角条件下,使反射率达到峰值。规整膜反射带所对应的平均入射角  $i_{\text{avg}}$  和规整膜周期厚度  $\Lambda_{\text{avg}}$  的关系<sup>[4]</sup>为

$$\Lambda_{\text{avg}} = \frac{\Lambda}{\cos(i_{\text{avg}})} \quad (1)$$

当从膜系设计软件中计算得出的平均入射角不同时,多层膜的反射率与光线入射角的关系曲线图如图 2 所示。可以看出,光线平均入射角越大,规整膜的反射带越窄。假定极紫外光刻物镜要求的反射率大于 60%,由图 2 可知,在光线正入射条件下,光线入射角范围为 0~10°时对应高反射率。随着入射角的变大,在平均入射角超过 22°的条件下,光线入射角范围为 0~4°时对应高反射率。从上述分析可知,对于平均入射角较高的物镜,入射角范围可能超过高反射率对应的角度范围,造成入射角范围外的部分反射率急剧下降,物镜上各点处的反射率变化很大,反射率和像质无法满足光学设计要求。当入射角的平均值超过 10°时,规整膜反射率大于 60%对应的入射角范围变小,这时规整膜无法满足设计要求。

横向梯度膜厚度分布特性如图 1(b)。横向梯度膜的特点是多层膜在不一样的径向位置,周期厚度也不一样。通过改变反射镜上膜层不同位置处的周期厚度,使镜面上各点的反射率趋于一致,并优化提高反射率,使整体光学性能更佳。

镜面上任意一点与光轴的间距  $r$  决定了周期厚度的梯度变化因子  $p$ ,即

$$p(r) = C_0 + C_2 r^2 + C_4 r^4 + \dots + C_{20} r^{20}, \quad (2)$$

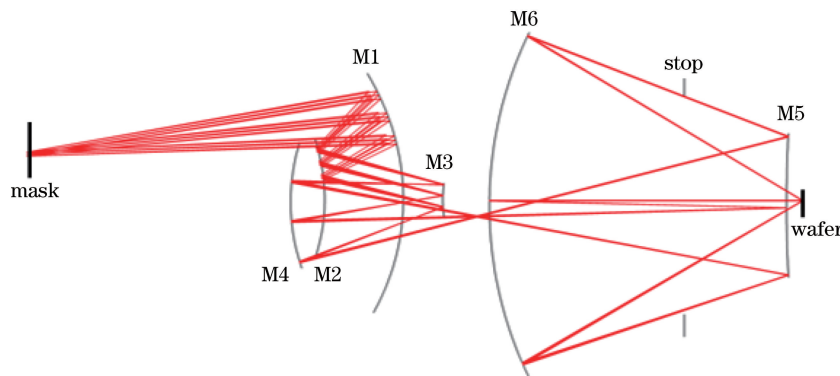


图 3  $M_H=4, M_L=8$  时组合倍率极紫外光刻物镜系统在  $yz$  平面的光路图

Fig. 3 Optical path of anamorphic magnification EUV lithography objective system in  $yz$  plane when  $M_H=4$  and  $M_L=8$

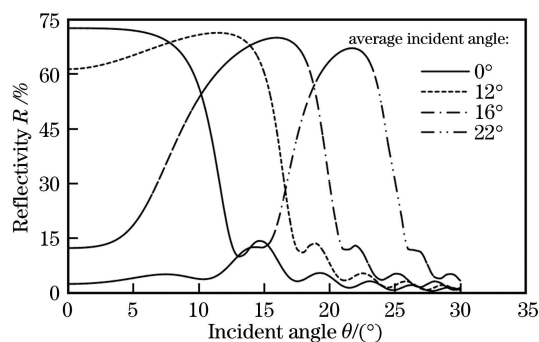


图 2 Mo/Si 规整膜反射率与光线入射角的关系<sup>[4]</sup>

Fig. 2 Mo/Si regular film reflectivity versus incident angle<sup>[4]</sup>

式中:  $C_0, C_2, \dots, C_{20}$  为梯度变化参数。

为了更好地进行制备,本文使用二次多项式对周期厚度的梯度变化因子  $p$  进行拟合。所研究的 NA 为 0.6 的组合倍率物镜系统的反射镜关于子午面对称,因此多层膜的对称轴与反射镜的光轴间仅存在  $y$  方向上的平移  $Y_0$ ,即

$$p(x, y) = C_0 + C_2 x^2 + C_2 (y - Y_0)^2, \quad (3)$$

式中,  $x$  为镜片上某点在垂直扫描方向上相对光轴的平移,  $y$  为镜片上某点在扫描方向上相对光轴的平移。

所以,物镜镜面膜层厚度的改变量为

$$\Delta(x, y) = \Lambda [C_0 + C_2 x^2 + C_2 (y - Y_0)^2]. \quad (4)$$

横向梯度膜可以保证物镜镜面上各点反射率基本一致,即反射率均匀性很好。

## 2.2 物镜系统

本课题组前期设计的 NA 为 0.6、横向放大倍率为 4、纵向放大倍率为 8 的组合倍率物镜系统如图 3 所示, M1~M6 为 6 面反射镜。主要设计指标如表 1 所示,物镜系统的综合波像差方均差(RMS)值为  $0.05670\lambda$ <sup>[10]</sup>。

本文所研究的物镜关于子午面对称,因此对其半视场进行研究即可知道整个视场的情况。本文所取的视场点是中心视场及边缘视场的六个视场点。

表 1 优化后组合倍率极紫外光刻物镜系统的性能指标

Table 1 Performance indexes of anamorphic magnification EUV lithography objective system after optimization

Parameter	Specification
Wavefront aberration/ $\lambda$	0.05670
Wavelength /nm	13.5
Field of view /(mm $\times$ mm)	26 $\times$ 1
$M_H$	4
$M_L$	8
NA	0.6
Range of incident angle	$<6^\circ$

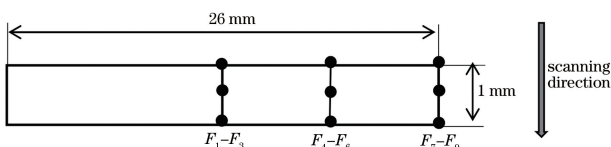


图 4 像方视场和视场点  $F_1 \sim F_9$

Fig. 4 Image field and field points  $F_1 \sim F_9$

EUUV 物镜系统的成像质量要求极高,综合波像差要求控制在  $0.0714\lambda$  以下。在含膜物镜系统中,最重要的评价指标为物镜的反射率和反射率均匀性。要求物镜系统中每面反射镜的反射率应高于 60%,反射率 PV 值尽可能小,以提高反射率均匀性<sup>[4]</sup>。

### 2.3 设计流程

本文首先编写了 codev 宏程序,计算出各个镜面上的入射角范围及平均入射角,结果如表 2 所示。通过数据分析可知,反射镜 M1、M2、M3、M5 的平均入射角均超过  $10^\circ$ ,入射角带宽相对较大。根据前文的结论可知,这四面反射镜的入射角度范围很有可能超过高反射率对应的入射角范围。

参考表 2 中的平均入射角数据和(1)式,设计六面反射镜的规整膜。当单个反射镜加入规整膜,其

表 2 NA 为 0.6 的组合倍率物镜系统各反射镜入射角范围及平均入射角

Table 2 Range of incident angle and average incident angle of anamorphic magnification EUV lithography objective system with NA=0.6

Mirror	Diameter / mm	Incident angle range / $^\circ$	Average incident angle / $^\circ$
M1	483.29	11.56–19.46	15.94
M2	229.61	20.58–35.11	27.38
M3	65.77	9.34–19.08	13.76
M4	252.32	4.32–7.18	5.30
M5	288.56	1.36–17.92	10.71
M6	700.88	0.60–6.13	3.85

他反射镜均为裸镜(假设为理想反射),通过在 codev 中查看光瞳图,利用光刻系统的出瞳强度可以表示各物镜镜面上的反射率分布。对镀制横向梯度膜的镜面进行膜层渐进优化后,单个反射镜添加膜层,其他镜面均为裸镜时的镜面最低反射率如表 3 所示。当 M1 反射镜添加规整膜,其余反射镜为裸镜时,M1 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 7.34%;当 M2 添加规整膜,其他物镜均为理想反射时,M2 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 0.17%;当 M3 添加规整膜,其他物镜均为理想反射时,M3 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 7.34%;当 M4 添加规整膜,其他物镜均为理想反射时,M4 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 72.31%;当 M5 添加规整膜,其他物镜均为理想反射时,M5 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 7.35%;当 M6 添加规整膜,其他物镜均为理想反射时,M6 在中心视场点  $F_2(0,78)$  处的最低反射率为 71.48%。

表 3 M1~M6 反射镜的最低反射率分布

Table 3 Minimum reflectivity distribution of M1–M6 mirrors

Mirror	Minimum reflectivity /%	
	Optimized M1, M2, M3, M5 with laterally graded multilayer films	Optimized M1, M2, M3, M5 with progressively optimized graded multilayer films
M1	70.44	70.50
M2	46.53	47.18
M3	67.31	71.89
M4	72.31	72.31
M5	71.62	71.89
M6	71.48	71.48

加入规整膜后, M4、M6 反射镜的反射率可达到 70% 以上, 反射率 PV 值低于 2.5%, 说明这两面物镜的反射率及其均匀性良好, 膜层设计较为合理。M1、M2、M3、M5 反射率 PV 值很大, 且中心视场点  $F_2$  处最低反射率极低, 分别为 7.34%、0.17%、7.34% 和 7.35%, 说明这四面反射镜的反射率均匀性极差, 膜层设计不合理。结合前文论述可知, 这四面反射镜的平均入射角均大于  $10^\circ$ , 极有可能超出规整膜反射带, 因此, 应对这四面反射镜设计横向梯度膜。

为了设计出横向梯度膜, 本文编写了 codev 宏程序, 利用该程序模拟获取各镜面入射角范围和平均入射角。拟合出平均入射角和膜层周期厚度的关系式, 将求得平均入射角转换为厚度信息。用 matlab 拟合获取横向梯度膜的梯度变化参数  $C_0, C_1, C_2$ , 结果如表 4 所示。将获取的梯度变化参数输入 codev, 生成对应镜面的横向梯度膜。

表 4 反射镜 M1、M2、M3、M5 的横向梯度膜的梯度变化参数

Table 4 Laterally graded multilayer film parameters of mirrors M1, M2, M3, M5

Mirror	$C_0$	$C_2$	$Y_0$
M1	1.010	$5.964 \times 10^{-7}$	-32.15
M2	1.068	$8.549 \times 10^{-6}$	-10.20
M3	1.201	$-1.299 \times 10^{-6}$	-355.30
M5	0.987	$2.148 \times 10^{-6}$	-16.98

表 3 第 3 列所示为当 M1、M2、M3、M5 反射镜添加横向梯度膜, 其余反射镜为裸镜时, 含膜反射镜在中心视场  $F_2(0, 78)$  处的最低反射率。可以看出, 将 M1、M2、M3、M5 反射镜上的规整膜替换成横向梯度膜后, M1、M2、M3、M5 反射镜在中心视场  $F_2$  处的最低反射率以及反射率 PV 值水平都有了很大的改进。M1 的最低反射率从 7.34% 提高到 70.44%, 反射率 PV 值从 56.81% 下降到 1.68%; M2 的最低反射率从 0.17% 提高到 47.18%, 反射率 PV 值从 5.04% 上升到 9.35%; M3 的最低反射率从 7.34% 提高到 71.89%, 反射率 PV 值从 67.20% 下降到 2.81%; M5 的最低反射率从 7.35% 提高到 71.62%, 反射率 PV 值从 67.19% 下降到 3.09%。从上述数据可以看出, 将规整膜替换成横向梯度膜后, 单个镜面的反射率及其均匀性均有了很大提高。

为了进一步提高膜层的反射率, 利用 codev 光学设计软件对横向梯度膜的参数进行渐进优化, 提高镀膜后各个视场观测下的最低反射率, 使镀膜后镜面上的反射率达到最大值。优化后的参数值如表 3 第 4 列所示。

梯度膜渐进优化设计流程如图 5 所示, 首先按照之前的膜层设计方案对所有镜面镀制膜层, 接着对梯度膜参数值进行优化, 每轮优化后计算各个视场下的物镜反射率, 观察每片镜面在不同视场中的最低反射率是否相同, 如果不相同则继续进行优化, 直至单个镜面在各视场中的最低反射率值相等或差值达到最小值。

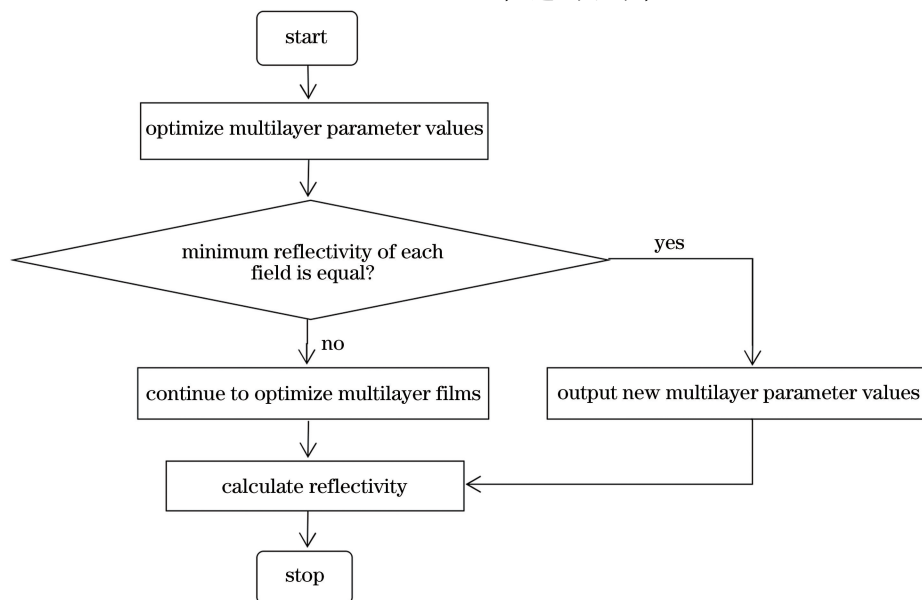


图 5 梯度膜渐进优化设计流程图

Fig. 5 Flow chart of progressive optimization design for graded multilayer films

### 3 分析与讨论

对横向梯度膜进行渐进优化后的膜层梯度变化参数如表 5 所示。可以看到,镀制渐进优化后的膜层的镜面,反射率比优化前均有所提高,其中 M5 的反射率提高得最多,其反射率为 71.89%,比镀制横向梯度膜时的 67.31%提高了 4.58%。

对镀制横向梯度膜的镜面进行膜层渐进优化后,当单个反射镜添加膜层,其他镜面均为裸镜时,镜面 M1, M2, M3 和 M5 的反射率分布如图 6 所示。可以看到,这四面添加了渐进优化反射膜的镜面的

反射率 PV 值均小于 3.36%,反射率均匀性良好。六面反射镜的平均反射率大于 65%,表明添加膜层的物镜系统有良好的反射率。

表 5 渐进优化后横向梯度膜的梯度变化参数

Table 5 Gradient variation parameters of laterally graded multilayer films with progressive optimization design

Mirror	$C_0$	$C_2$	$Y_0$
M1	1.0101700	$5.964 \times 10^{-7}$	-32.15
M2	1.0676230	$8.549 \times 10^{-7}$	-10.20
M3	1.1920615	$-1.299 \times 10^{-7}$	-355.30
M5	0.9824070	$2.148 \times 10^{-7}$	-16.98

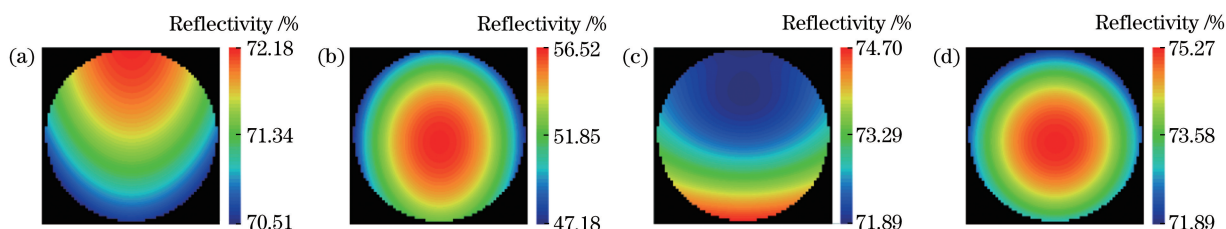


图 6 当单个反射镜加入渐进优化后的横向梯度膜,其余反射镜均为裸镜(假设为理想反射)时 M1、M2、M3、M5 反射镜的反射率分布。(a) M1;(b) M2;(c) M3;(d) M5

Fig. 6 Reflectivity distribution of M1, M2, M3, and M5 mirrors when single mirror is added with progressively optimized laterally graded multilayer films, and remaining mirrors are all bare mirrors (assuming ideal reflection). (a) M1; (b) M2; (c) M3; (d) M5

NA 为 0.6 的组合倍率系统在进行物镜系统与膜层的协同优化后,不同膜层设计方案得到的综合波像差仅为  $0.0672\lambda$ ,可以得知所提设计方案对综合波像差的控制作用良好。

在综合考虑光刻系统的综合波像差,反射镜的反射率和反射率均匀性后,给出了最终的膜层设计方案(规整膜: M4, M6; 横向梯度膜: M1, M2, M3, M5)。此方案与 M1~M6 均为规整膜的设计方案相比,综合波像差有所降低,反射镜的反射率及反射率均匀性均有所提高。最终的膜层设计方案的综合波像差与未添加膜层的物镜相比,只增大了  $0.01\lambda$ ,像质水平良好。图 7 所示为含膜光刻物镜系统在中心视场  $F_2$  和边缘视场  $F_9$  处的反射率分布和波像差分布情况。可以看出,  $F_2$  视场点处物镜系统的反射率最低值是 9.43%,PV 值是 2.16%,波像差 RMS 值是  $0.0598\lambda$ ;  $F_9$  视场点处光刻物镜的反射率最低值是 6.70%,PV 值是 3.36%,波像差 RMS 值是  $0.0819\lambda$ 。全部 6 个视场点的分析结果表明,添加膜层后的物镜系统在全视场点处的反射率均大于 6.70%,反射率 PV 值均小于 3.36%;系统全部反射镜的平均反射率大于 65%。

相同光阑直径下实际光学系统(有像差)所成的

像与理想完美光学系统(无像差)理想高斯像点之间的光强度之比称为 Strehl,其能反映光学系统的像差对所成像的中心点光强度的影响,是一个评价光学系统成像质量的指标。 $F_2$  和  $F_9$  视场点处不含膜的物镜系统和添加多层膜的物镜系统的波像差和 Strehl 如表 6 所示。可以看出,含膜物镜系统引入了一定的附加波像差。但镀制了多层膜的系统的综合波像差为  $0.0672\lambda$ ,与不含膜物镜系统的综合波像差  $0.05670\lambda$  相比,仅增加了  $0.01\lambda$ ,仍能满足物镜系统的成像质量要求<sup>[10]</sup>。

目前有关 NA 为 0.6 的极紫外组合倍率光刻物镜系统设计的研究鲜有报道。本文所设计的含膜物镜与蔡司公司设计的 NA 为 0.55 的组合倍率物镜系统相比,前者系统平均反射率为 68%,低于后者的反射率(74%),但前者的系统数值孔径较大,分辨率更高<sup>[15]</sup>,且镜面的入射角均在  $40^\circ$  以下,便于实际应用。本文对 NA 为 0.6 的极紫外组合倍率光刻物镜系统进行了膜层设计,并建立了渐进优化设计方法。通过 NA 为 0.6 的组合倍率光刻物镜和膜层的渐进优化设计,物镜系统的反射镜反射率、反射率均匀性和像质都达到较好水平,但引入了一定的波像差,综合波像差增大到  $0.0672\lambda$ 。

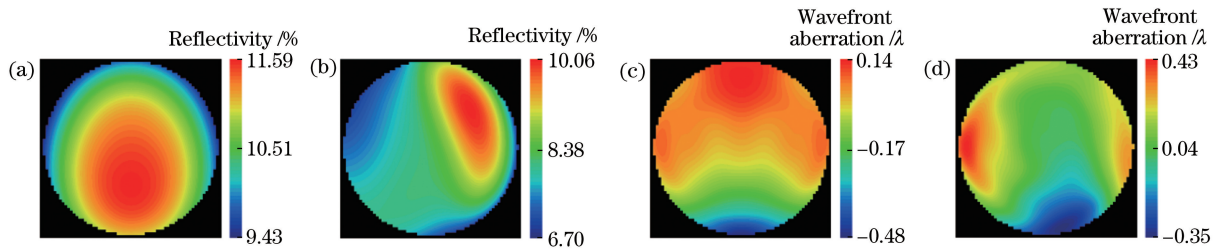


图 7 最终膜层设计方案下含膜物镜系统的反射率分布和波像差分布情况。(a)  $F_2$ , 反射率; (b)  $F_9$ , 反射率; (c)  $F_2$ , 波像差; (d)  $F_9$ , 波像差

Fig. 7 Reflectivity distribution and wavefront aberration distribution of film-containing objective system in final multilayer film design scheme. (a)  $F_2$ , reflectivity; (b)  $F_9$ , reflectivity; (c)  $F_2$ , wavefront aberration; (d)  $F_9$ , wavefront aberration

表 6 裸镜系统和含膜物镜系统在中心和边缘视场点处的波像差和 Strehl

Table 6 Wavefront aberrations and Strehl of bare mirror system and film-containing objective system at center and edge field points

Field point	Condition	Wavefront aberration/ $\lambda$	Strehl
$F_2$	System without coating	0.0307	0.964
	System with coating	0.0598	0.868
$F_9$	System without coating	0.0559	0.884
	System with coating	0.0872	0.741

## 4 结 论

提出了膜层设计渐进优化法,对极紫外光刻物镜系统的多层膜设计理论基础、膜层特性和设计方法进行了详细研究,并针对 NA 为 0.6 的组合倍率光刻物镜给出了多层膜设计方案。用规整膜和横向梯度膜进行设计,并对横向梯度膜的参数进行渐进优化,设计出的膜层使物镜系统所有反射镜的平均反射率高于 65%,反射率 PV 值低于 3.4%,性能良好。与仅利用横向梯度膜公式进行拟合的方法相比,利用所提的膜层设计渐进优化法,反射率得到一定提高,膜层的合理设计可以使物镜系统在极紫外波段获得高反射率,提高了物镜系统的实际应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Y, Li Y Q. Aspherical surfaces design for extreme ultraviolet lithographic objective with correction of thermal aberration [J]. Optical Engineering, 2016, 55(9): 095108.
- [2] Chapman H N, Hudyma R M, Shafer D R, et al. Reflective optical imaging system with balanced distortion: US5973826[P/OL]. 1999-10-26[2019-09-18]. <https://patents.google.com/patent/US5973826/en>.
- [3] Glatzel H, Ashworth D, Bremer M, et al. Projection optics for extreme ultraviolet lithography (EUVL) micro-field exposure tools (METs) with a numerical aperture of 0.5 [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8679: 867917.
- [4] Cao Z. Optical design of high-NA Coaxial objective system for lithography[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 48-57. 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: 48-57.
- [5] Markus S, Ralf M. Optical subsystem for projection lithography and illumination optical unit for projection lithography: WO2016078818A1[P/OL]. 2016-05-26 [2019-09-18]. <https://patents.google.com/patent/WO2016078818A1/ar>.
- [6] Meisels R, Kuchar F. EUV Bragg reflectors with photonic superlattices[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32215-32226.
- [7] Shen S H. Graded multilayer coating design for sub 11 nm resolution EUV lithographic projection lens [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017: 29-38. 沈诗欢. 11 nm 及以下技术节点极紫外光刻物镜梯度膜设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2017: 29-38.
- [8] Svechnikov M V, Chkhalo N I, Gusev S A, et al. Influence of barrier interlayers on the performance of Mo/Be multilayer mirrors for next-generation EUV lithography [J]. Optics Express, 2018, 26(26): 33718-33731.
- [9] van Setten E, Bottiglieri G, McNamara J, et al. High NA EUV lithography: next step in EUV imaging [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10957: 1095709.
- [10] Liu Y. Design of Off-axis extreme ultraviolet lithographic objective [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 33-34.

- 刘岩. 离轴极紫外投影光刻物镜设计研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 33-34.
- [11] Zhang L C. Progress in EUV multilayer coating technologies [J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2010, 3(6): 554-565.  
张立超. 极紫外多层膜技术研究进展[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(6): 554-565.
- [12] Liang C, Descour M R, Sasian J M, et al. Multilayer-coating-induced aberrations in extreme-ultraviolet lithography optics [J]. Applied Optics, 2001, 40(1): 129-135.
- [13] Duddles N J. Effects of Mo/Si multilayer coatings on the imaging characteristics of an extreme-ultraviolet lithography system [J]. Applied Optics, 1998, 37(16): 3533-3538.
- [14] Cao Z, Li Y Q, Liu F. 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.
- [15] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.  
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0922001.