

组合倍率极紫外光刻物镜梯度膜设计

沈诗欢, 李艳秋, 姜家华, 刘 岩, 刘 克, 刘丽辉

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 10 nm 以下光刻技术牵引极紫外(EUV)光刻物镜向超高数值孔径(NA)、组合倍率设计形式发展,物镜系统的入射角和入射角范围因此急剧增大,传统规整膜和横向梯度膜难以满足该类物镜系统反射率及像质要求。为此,提出了纵横梯度膜组合法,用横向梯度膜提高反射率,用纵向梯度膜提高反射率均匀性,并补偿横向梯度膜引入的像差。应用该方法对一套 NA 为 0.50 的组合倍率 EUV 光刻物镜进行膜层设计,设计结果表明,在保证系统成像性能不变的情况下,平均每面反射镜的反射率大于 60%,各反射镜的反射峰谷值均小于 3.5%,满足光刻要求,验证了纵横梯度膜组合法的可行性。

关键词 光学设计; 多层膜; 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/AOS201737.0822002

Graded Multilayer Film Design for Anamorphic Magnification EUV Lithographic Objective

Shen Shihuan, Li Yanqiu, Jiang Jiahua, Liu Yan, Liu Ke, Liu Lihui

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

Abstract High numerical aperture (NA) projection objectives with anamorphic magnification are demanded for extreme ultraviolet (EUV) lithography down to 10 nm resolution, which results in extreme increase of incident angle and incident angle range of objective lens system. Traditional normalized multilayer film and laterally graded multilayer film cannot satisfy the requirement of reflectivity and image quality in the projection objectives. A method combining laterally graded multilayer film with depth graded multilayer film is presented. The laterally graded multilayer film is used to increase the reflectivity and the depth graded multilayer film is used to enhance the reflectivity uniformity and compensate the wavefront aberration introduced by the laterally graded multilayer film. The method is used to design the multilayer film of an anamorphic magnification EUV lithographic objective with NA of 0.50. The results show that the average reflectivity of each mirror is higher than 60% and the reflectivity peak-to-valley value of each mirror is less than 3.5% with imaging performance unchanged. Which satisfies the lithographic requirement, and verifies the feasibility of this method.

Key words optical design; multilayer film; catoptric system; extreme ultraviolet lithography

OCIS codes 220.2740; 310.4165; 140.7240; 340.7480

1 引 言

组合倍率(即纵横倍缩比不同)极紫外(EUV)光刻物镜能够在实现超高数值孔径(NA)的同时确保光刻效率,因此被业界普遍认为可应用于 10 nm 以下技术节点的光刻系统中。2015 年,Carl Zeiss 和 ASML 的

收稿日期: 2017-03-29; **收到修改稿日期:** 2017-04-23

基金项目: 国家科技重大专项、国家自然科学基金面上项目(61675026)、国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(11627808)

作者简介: 沈诗欢(1992—),女,硕士研究生,主要从事极紫外光刻光学设计和膜层方面的研究。

E-mail: shenshjh@163.com

导师简介: 李艳秋(1962—),女,博士,教授,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。E-mail: liyanqiu@bit.edu.cn(通信联系人)

研究人员^[1-2]提出 10 nm 以下 EUV 光刻需要采用组合倍率投影物镜,纵向 8:1 倍缩比使得物镜系统在减小掩模阴影效应的同时避免高 NA 下的入射光束重叠,横向 4:1 倍缩比则增大硅片上曝光视场的横向尺寸,提高产率。2016 年, Liu 等^[3]率先实现超高 NA 组合倍率 EUV 光刻物镜设计,促进了 EUV 光刻技术的发展。但是,由于系统的超高 NA、大视场、横纵放大倍率不同等因素,光线的入射角及入射角范围急剧增大,给反射镜膜层的设计提出新的挑战。传统规整膜无法保证系统高反射率及反射率均匀性^[4],横向梯度膜虽然可以提高系统的反射率,但在大视场情况下容易造成较大像差。因此,需要研究适合于超高 NA 组合倍率 EUV 光刻物镜的膜层设计方法。

早期, Chapman 等^[5-6]分别对 NA 为 0.10 的共轴 EUV 光刻四反物镜进行膜层设计,由于各反射镜上入射角及入射角范围足够小,仅镀制周期性规整膜就能满足系统要求。2016 年,李艳秋等^[7]对 NA 为 0.25 的共轴 EUV 光刻六反物镜系统设计膜层,引入横向梯度膜提高了反射率及其均匀性。2013 年, Glatzel 等^[8]对 NA 为 0.50 的 EUV 光刻小视场实验系统 MET5 设计横向梯度膜,但其像方视场仅有 0.03 mm × 0.2 mm,且仅包含两面反射镜,反射镜入射角及带宽较小($M_1: 4^\circ \sim 14^\circ; M_2: 1^\circ \sim 4^\circ$),因此加入横向梯度膜并未产生较大像差。目前,针对大视场(像方 26 mm × 0.25 mm)、超高 NA(0.50)、组合倍率 EUV 光刻物镜系统的膜层设计研究,未见公开报道。

针对超高 NA 组合倍率 EUV 光刻投影物镜结构特征及其性能需求,本文提出了横纵梯度膜组合法,当规整膜无法满足反射率及像质要求时,通过分析反射镜上各视场的光线入射角分布,在各视场入射角分布差异小的反射镜上设计横向梯度膜,在口径较小、各视场入射角分布差异大的反射镜上设计纵向梯度膜。应用该方法对 NA 为 0.50 组合倍率 EUV 光刻物镜进行了膜层设计,分析讨论了设计结果。与仅使用规整膜和横向梯度膜的结果对比发现,利用本文所提横纵梯度膜组合法设计的膜系能在保持高成像性能的同时提高物镜系统的反射率及均匀性,验证了本设计方法的可行性。

2 EUV 光刻系统多层膜设计理论

Mo/Si 多层膜在提高 EUV 光刻系统反射率方面已有广泛应用,近年来国内对于 EUV 波段 Mo/Si 多层膜制备研究也有很大的突破^[9-10]。

Mo/Si 多层膜根据膜层厚度分布不同,可分为规整膜、横向梯度膜和纵向梯度膜三种类型,如图 1 所示。

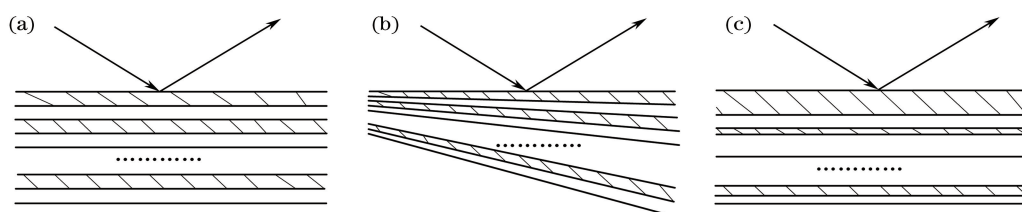


图 1 Mo/Si 多层膜示意图。(a)规整膜;(b)横向梯度膜;(c)纵向梯度膜

Fig. 1 Schematic of Mo/Si multilayer films. (a) Normalized multilayer film; (b) laterally graded multilayer film; (c) depth graded multilayer film

2.1 规整膜

规整膜如图 1(a)所示,其膜层周期厚度保持不变。本研究中的规整膜采用传统的 40 周期 2 层模型^[11-13],针对正入射,周期厚度 $\Lambda(0) = 7.0$ nm,周期厚度参数 $\Gamma = 0.4$,基底材料为 SiO_2 ,顶层材料为 Ru。

规整膜仅能在一定的入射角范围内实现对 13.5 nm 波长光的高反射。规整膜可以通过改变周期厚度来改变膜系的反射带。规整膜反射带对应的平均入射角 i_{mean} 与规整膜周期厚度 Λ_{mean} 的关系^[12]:

$$\Lambda_{\text{mean}} = \frac{\Lambda(0)}{\cos i_{\text{mean}}} \quad (1)$$

规整膜的反射带会随着平均入射角的增大而变窄。对于平均入射角大的反射镜,光线入射角范围有可能会超出规整膜的反射带,使得镜片不同位置上的反射率产生较大差异,无法满足系统反射率和波像差要求。

2.2 横向梯度膜

横向梯度膜如图 1(b)所示,多层膜在反射镜各处的周期厚度不同。横向梯度膜通过改变反射镜不同径

向位置处多层膜的周期厚度来提高反射率。

横向梯度膜的周期厚度梯度变化因子 p 与镜片某点离光轴距离 r 关系(其中 C 是 CODEV 软件中对应的厚度变化系数):

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

考虑制备工艺,梯度变化因子 p 应采用二次多项式进行拟合。由于系统反射镜关于子午面对称,膜层的轴与光轴之间仅存在 y 方向上的平移 Y_0 ,所以反射镜上梯度膜的厚度 $\Delta(x, y)$ 的变化为^[7]

$$\Delta(x, y) = \Delta_0 [C_0 + C_2 x^2 + C_2 (y - Y_0)^2] \quad (3)$$

横向梯度膜能够使反射镜上每一点都获得最高的反射率。但是随着入射角及入射角范围的增大,各视场间入射角差异增大,可能出现无法精确拟合横向梯度膜的情况,导致局部反射率下降,波像差增大。

2.3 纵向梯度膜

纵向梯度膜如图 1(c)所示,多层膜每层厚度不同。纵向梯度膜通过优化多层膜的每一层的厚度来提高反射率。纵向梯度膜的优化评价函数为

$$f_{MF} = \left(\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left| \frac{S_j - T_j}{N_j Z_j} \right|^k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4)$$

式中 m 为目标数, S 为反射率计算值, T 为反射率目标值, N 为目标归一化因子, Z 为目标公差, k 为方法的幂, k 值对优化结果有显著的影响,程序允许其值为:1、2、4、8、16 和极大值。

纵向梯度膜虽然不能使镜面上各点都得到最高反射率,但适合于反射镜上各点入射角差异较大的反射镜,它能够使反射镜上所有光线入射角度具有接近一致的反射率,有利于提高整个镜面反射率分布均匀性。

3 NA 为 0.50 组合倍率光刻物镜膜系设计

横纵梯度膜组合法的设计流程:首先获取和分析各视场光线在反射镜上的入射角分布,选择光线入射角及带宽处于规整膜反射带内的反射镜设计规整膜,在入射角超出规整膜反射带的反射镜上设计横向梯度膜;分析此时系统反射率均匀性和波像差是否满足要求,若不满足要求,则将口径较小、视场间光线入射角分布差异大的反射镜上的横向梯度膜替换为纵向梯度膜,以改善镜面反射率均匀性,并降低含膜物镜的波像差,其流程图如图 2 所示。

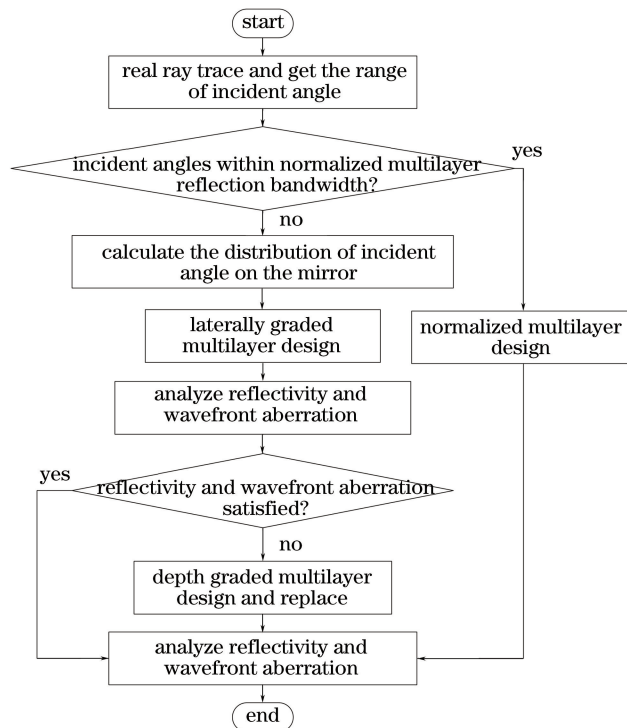


图 2 横纵梯度膜组合法设计流程图

Fig. 2 Flow chart of laterally and depth graded multilayers combined method

3.1 物镜系统

前期设计 NA 为 0.50 组合倍率 EUV 光刻物镜结构如图 3 所示,主要设计指标如表 1 所示,裸镜系统综合波像差均方差(RMS)值为 0.0565λ ^[3]。

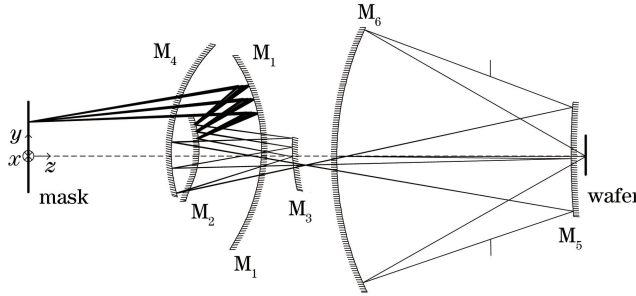


图 3 物镜结构图

Fig. 3 Layout of objective

表 1 投影物镜主要设计指标

Table 1 Main design specifications of projective objective

Item	Value
Wavelength/nm	13.5
NA	0.50
Magnification	4×8
Exposure field at wafer /mm	26×0.25

该物镜关于子午面对称,分析其半视场即可得到整个视场的信息。如图 4 所示,选择像方半视场上的 15 个视场点 $F_1 \sim F_{15}$ 用于评价物镜系统的反射率及像质。

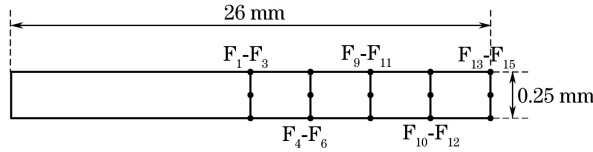


图 4 像方离轴视场图和视场点 $F_1 \sim F_{15}$

Fig. 4 Off-axis image field and F_1 - F_{15} field points

3.2 设计过程

为进行膜层设计,首先分析各视场光线在镜面上的入射角分布。对投影物镜进行实际光线追迹,得到各反射镜入射角范围如表 2 所示。

表 2 投影物镜入射角范围

Table 2 Incident angles of projection objective system

Parameter	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
Diameter /mm	249.05	108.62	63.90	201.17	145.69	341.39
Average incident angle /($^\circ$)	14.12	24.76	11.36	5.23	10.10	3.62
Incident angle range /($^\circ$)	10.37-19.37	16.62-33.60	4.62-16.81	2.54-7.66	0.93-16.67	0.29-5.98

从表中可以看出,反射镜 M_4 和 M_6 上的光线平均入射角和入射角范围都较小,而反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_5 上的光线平均入射角均大于 10° ,入射角范围较大,极有可能超出规整膜反射带范围。

分别采用各反射镜($M_1 \sim M_6$)的光线平均入射角按(1)式设计规整膜,得出反射率随入射角变化曲线如图 5 所示,反射镜 $M_1 \sim M_6$ 对应的规整膜反射率大于 60% 的入射角范围分别约为 $11^\circ \sim 17^\circ$, $21^\circ \sim 25^\circ$, $7^\circ \sim 16.5^\circ$, $0^\circ \sim 12^\circ$, $5^\circ \sim 16^\circ$, $0^\circ \sim 12^\circ$ 。结合表 2 可知,反射镜 M_4 和 M_6 上的光线入射角处于规整膜反射带范围内,而反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_5 的光线入射角远远超出了规整膜反射带的覆盖范围,在这 4 面反射镜上设计规整膜无法满足反射率及均匀性要求,因此需要在这 4 面反射镜上设计横向梯度膜来替换规整膜。

编写 CODEV 宏程序获取反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_5 上的光线入射角分布,通过(1)式将反射镜上各点

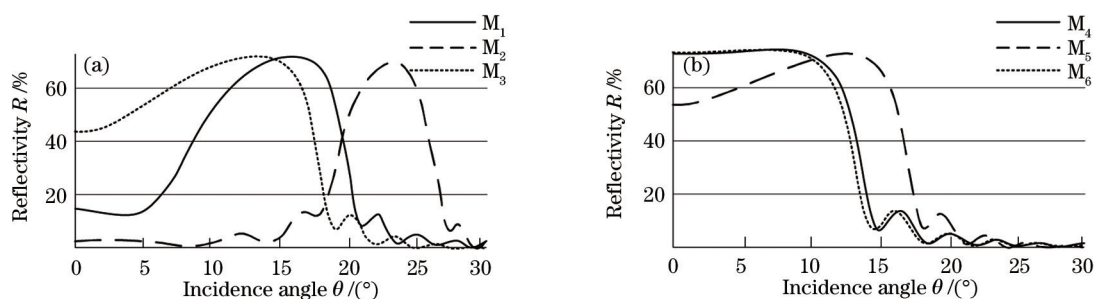


图 5 反射镜规整膜反射率相对入射角的变化曲线。(a) $M_1 \sim M_3$; (b) $M_4 \sim M_6$

Fig. 5 Reflectivity versus incidence angle of normalized multilayer film for mirrors. (a) $M_1 \sim M_3$; (b) $M_4 \sim M_6$

处的入射角信息转化为周期厚度信息,并根据(3)式用 MATLAB 进行拟合,得到反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_5 的横向梯度膜参数。反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_5 横向梯度膜的梯度变化参数如表 3 所示。

表 3 横向梯度膜梯度变化参数

Table 3 Gradient parameters of laterally graded multilayer films

Mirror	C_0	C_2	Y_0
M_1	1.008	1.025×10^{-6}	70.86
M_2	1.058	2.259×10^{-5}	49.06
M_3	1.066	-1.800×10^{-6}	-120.90
M_5	0.994	1.773×10^{-6}	-9.27

当在单面反射镜上加入膜层,其余反射镜均假设为理想反射时,系统的出瞳强度分布即可代表该反射镜上的光线反射率分布,图 6 为各含膜反射镜(M_4 、 M_6 :规整膜; M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_5 :横向梯度膜)在中心视场 F_2 的反射率分布。可以看到 M_1 、 M_4 、 M_5 和 M_6 的反射率均大于 70%,反射率峰谷(PV)值均小于 2.5%,表明这 4 面反射镜膜层设计合理,而反射镜 M_2 和 M_3 反射率 PV 值较大,反射率分布不均匀。

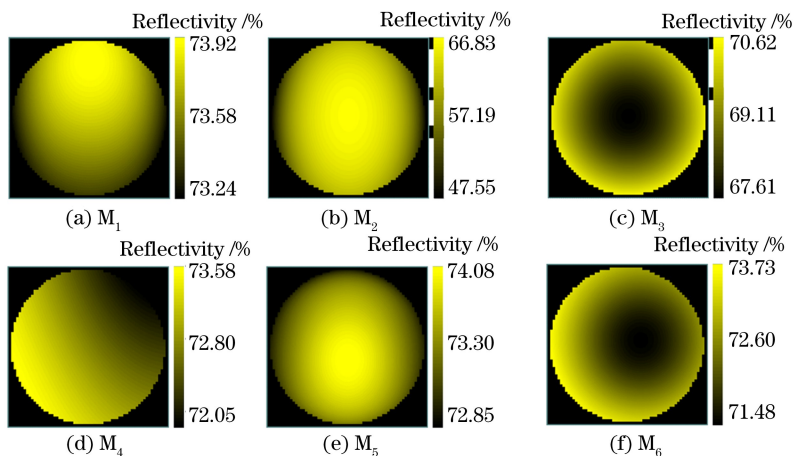


图 6 含膜反射镜($M_1 \sim M_6$)在中心视场 F_2 的反射率分布

Fig. 6 Reflectivity distribution of mirrors with coating ($M_1 \sim M_6$) in the center of the field of view F_2

图 7 为所有反射镜加入各自对应膜层后,系统在中心视场 F_2 和边缘视场 F_{15} 的反射率和波像差分布。此时,平均每面反射镜的反射率大于 60%,但反射率 PV 值较大,同时系统综合波像差 RMS 值为 0.1238λ ,较裸镜系统明显增大,已无法满足像质要求,表明仅使用规整膜和横向梯度膜的膜层设计方案无法满足超高 NA 组合倍率物镜的需求。

通过对各反射镜光线入射角和反射率分布分析可知,反射镜 M_2 和 M_3 光线入射角范围过大,各视场间入射角分布差异明显,导致横向梯度膜拟合精度不高,反射率分布不均,且引入较大系统波像差。而且反射镜 M_2 和 M_3 口径较小,不利于横向梯度膜的实际镀制,更适合使用纵向梯度膜。因此将 M_2 和 M_3 上的横向梯度膜替换为更适合于大入射角范围的纵向梯度膜以提高反射率均匀性,并降低膜层引入的波像差。

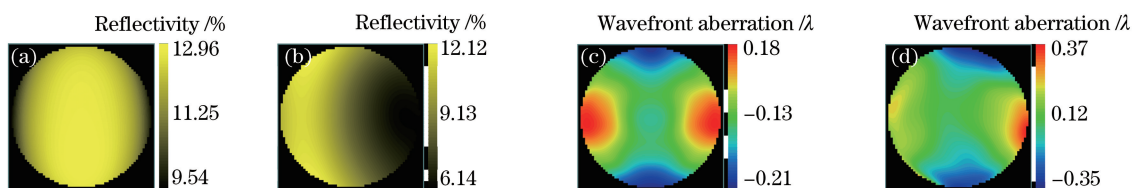


图 7 系统反射率和波像差分布。(a) F_2 , 反射率; (b) F_{15} , 反射率; (c) F_2 , 波像差; (d) F_{15} , 波像差
Fig. 7 Reflectivity distribution and wavefront aberration distribution of the system. (a) F_2 , reflectivity; (b) F_{15} , reflectivity; (c) F_2 , wavefront aberration; (d) F_{15} , wavefront aberration

使用商业膜层设计软件 TFCalc, 交替采用变尺度法和单纯形法优化膜层^[14-16]。变尺度法优化时使用评价函数的导数, 随着评价函数接近最小值, 其导数接近于零, 无法再进行优化, 而单纯形法不使用导数, 可以改善结果, 所以通过交替使用这两种方法来获得反射镜 M_2 和 M_3 的高反射纵向梯度膜。图 8 为反射镜 M_2 和 M_3 纵向梯度膜膜层厚度分布, 图 9 为反射镜 M_2 和 M_3 反射率随入射角变化曲线, 对应反射镜 M_2 和 M_3 上的入射角范围为 $16.62^\circ \sim 33.60^\circ, 4.62^\circ \sim 16.81^\circ$, 反射率分别大于 28%, 62%。

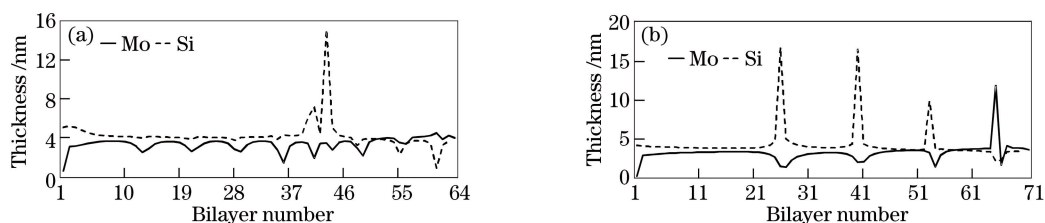


图 8 反射镜 M_2 和 M_3 纵向梯度膜膜层厚度分布。(a) M_2 ; (b) M_3

Fig. 8 Thickness distribution of mirrors M_2 and M_3 depth graded multilayer films. (a) M_2 ; (b) M_3

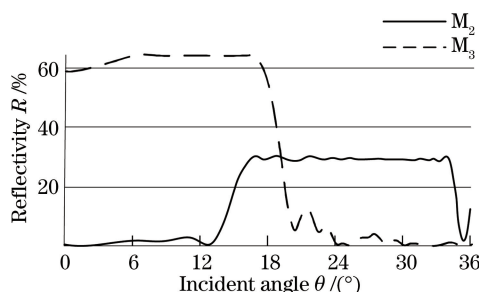


图 9 反射镜 M_2 和 M_3 纵向梯度膜反射率相对入射角的变化曲线

Fig. 9 Reflectivity versus incidence angle of depth graded multilayer film for mirrors M_2 and M_3

图 10(a)、(b)为反射镜 M_2 和 M_3 的膜层分别替换成纵向梯度膜、其余反射镜均为理想反射时, 系统在中心视场 F_2 的反射率分布。结合图 6(b)、(c)可知, 相比于横向梯度膜, 反射镜 M_2 上中心视场的最低反射率从 47.55% 下降到 28.95%, PV 值从 19% 减小到 1.7%, 反射镜 M_3 上的最低反射率从 67.61% 下降到 62.85%, PV 值从 3% 减小到 2.5%。纵向梯度膜的引入使单面反射镜反射率有所下降, 但反射率分布均匀性得到明显提高。

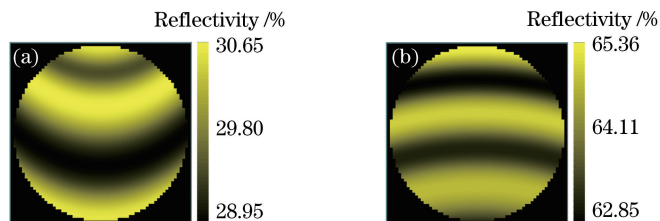


图 10 反射镜 M_2 和 M_3 的反射率分布。(a) M_2 ; (b) M_3

Fig. 10 Reflectivity distribution of mirrors M_2 and M_3 . (a) M_2 ; (b) M_3

4 横纵梯度膜组合设计结果分析

上述膜层设计策略(M_4 、 M_6 :规整膜; M_1 、 M_5 :横向梯度膜; M_2 、 M_3 :纵向梯度膜)是综合考虑系统反射率和波像差情况下的最优策略,横向梯度膜和纵向梯度膜参数均是各反射镜的最优参数。当物镜系统每面反射镜加入对应的最终膜层后,含膜物镜在中心视场点 F_2 和边缘视场点 F_{15} 的反射率和波像差分布如图 11 所示。系统在 F_2 视场点的反射率大于 5.18%,PV 值为 0.56%,波像差 RMS 值为 0.0712 λ ; F_{15} 视场点的反射率大于 5.05%,PV 值为 0.84%,波像差 RMS 值为 0.0645 λ 。对所有视场点分析结果表明,含膜物镜系统全视场点反射率均大于 5.03%,PV 值均小于 0.9%;平均每面反射镜的反射率大于 60%,每面反射镜的反射率 PV 值均小于 3.5%。

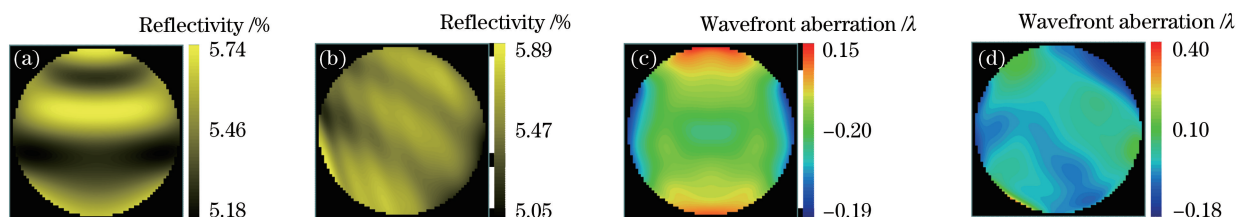


图 11 系统反射率和波像差分布。(a) F_2 , 反射率;(b) F_{15} , 反射率;(c) F_2 , 波像差;(d) F_{15} , 波像差

Fig. 11 Reflectivity distribution and wavefront aberration distribution of the system. (a) F_2 , reflectivity;

(b) F_{15} , reflectivity; (c) F_2 , wavefront aberration; (d) F_{15} , wavefront aberration

表 4 为裸镜系统与含膜物镜系统在 F_2 及 F_{15} 视场的波像差和斯特列尔比。可以看到,通过膜层设计对原系统中波像差过大的视场点进行补偿, F_{15} 视场点波像差比裸镜系统降低 0.0004 λ 。参考已有设计,NA 为 0.50 的 EUV 光刻物镜系统^[17]仅裸镜系统波像差就达到 0.062 λ ,EUV 物镜系统^[18]由膜层引入像差为 0.18 nm,该含膜物镜系统综合波像差 RMS 值为 0.0672 λ ,较裸镜系统仅增加了 0.011 λ (0.15 nm),满足像质要求。

表 4 裸镜系统与含膜系统 F_2 与 F_{15} 视场点波像差和斯特列尔比

Table 4 Wavefront aberration and Strehl ratio of the systems without coating and with coating

Field point	System without coating		System with coating	
	Wavefront aberration / λ	Strehl ratio	Wavefront aberration / λ	Strehl ratio
F_2	0.0363	0.941	0.0712	0.819
F_{15}	0.0649	0.847	0.0645	0.848

5 结 论

首先论述 EUV 光刻系统多层膜设计理论,然后提出适合于超高 NA 组合倍率 EUV 光刻物镜的横纵梯度膜组合法,并采用该方法对 NA 为 0.50 组合倍率 EUV 光刻物镜系统进行横纵梯度膜设计。与仅使用规整膜和横向梯度膜的结果对比,表明该方法设计的膜系能在保持裸镜系统成像性能不变的情况下,提高系统反射率及均匀性,证明横纵梯度膜法的可行性,为 10 nm 以下技术节点组合倍率 EUV 光刻物镜的工程应用提供重要的技术支持。

参 考 文 献

- [1] Kneer B, Migura S, Kaiser W, *et al.* EUV lithography optics for sub 9 nm resolution [C]. SPIE, 2015, 9422: 94221G.
 - [2] Neumann J T, Rösch M, Gräupner P, *et al.* Imaging performance of EUV lithography optics configuration for sub 9 nm resolution [C]. SPIE, 2015, 9422: 94221H.
 - [3] Liu Y, Li Y Q, Cao Z. Design of anamorphic magnification high-numerical aperture objective for extreme ultraviolet lithography by curvatures combination method [J]. Applied Optics, 2016, 55(18): 4917-4923.
 - [4] Tu Yuchun, Song Zhuqing, Huang Qiushi, *et al.* Fabrication of laterally graded periodic Mo/Si multilayer using magnetron sputtering technology [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(9): 2419-2422.
- 涂昱淳, 宋竹青, 黄秋实, 等. 磁控溅射制备横向梯度分布的 Mo/Si 周期多层膜 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(9):

2419-2422.

- [5] Chapman H N, Hudyma R M, Shafer D R, *et al.* Reflective optical imaging system with balanced distortion: US5973826 A[P]. 1999-10-26.
- [6] Shafer D R. Reflective optical imaging system: US6014252 A[P]. 2000-1-11.
- [7] Cao Zhen. Optical design of high-NA coaxial objective system for lithography [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 48-58.
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: 48-58.
- [8] Glatzel H, Ashworth D, Bremer M, *et al.* Projection optics for extreme ultraviolet lithography micro-field exposure tool with a numerical aperture of 0.5[C]. SPIE, 2013, 8679: 867917.
- [9] Yu B, Jin C S, Yao S. Control of lateral thickness gradients of EUV/soft x-ray multilayer on curved substrates[C]. SPIE, 2016, 9687: 96870A.
- [10] Yu Bo, Li Chun, Jin Chunshui, *et al.* Design and fabrication of broadband Mo/Si multilayer films for extreme ultraviolet lithography illumination system[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(4): 0407001.
喻 波, 李 春, 金春水, 等. 极紫外光刻照明系统宽带 Mo/Si 多层膜设计与制备[J]. 中国激光, 2016, 43(4): 0407001.
- [11] Bal M F. Next-generation extreme ultraviolet lithographic projection systems[D]. Delft: Technische Universiteit Delft, 2003: 97-125.
- [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] Singh M. Multilayer extreme ultraviolet mirrors with enhanced reflectivity: US6738188 B2[P]. 2004-5-18.
- [15] Wang Xuehua, Xue Yiyu, Zhao Li, *et al.* Application of the simplex method to optimum design of multi-layer optical thin films[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(5): 134-137.
王学华, 薛亦渝, 赵 利, 等. 单纯形调优法在多层膜系优化设计中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(5): 134-137.
- [16] Fu Xiuhua, Sun Yingjie, Liu Dongmei, *et al.* Study and fabrication of visible and infrared broadband antireflection coating[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0331002.
付秀华, 孙英杰, 刘冬梅, 等. 可见与近红外宽带减反膜的研制[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0331002.
- [17] Goldstein M, Hudyma R, Naulleau P, *et al.* Extreme-ultraviolet microexposure tool at 0.5 NA for sub-16 nm lithography[J]. Optics Letters, 2008, 33(24): 2995-2997.
- [18] Meiling H, Buzing N, Cummings K, *et al.* EUVL system: moving towards production[C]. SPIE, 2009, 7271: 727102.