

极紫外光刻掩模缺陷暗场检测系统优化设计

刘馨泽, 匡尚奇, 刁金玉, 林景全*

长春理工大学理学院, 吉林 长春

Email: *linjingquan@cust.edu.cn

收稿日期: 2021年2月2日; 录用日期: 2021年3月8日; 发布日期: 2021年3月16日

摘要

为了确保基于Schwarzschild结构的极紫外光刻掩模缺陷检测系统的成像质量, 本文应用等效工作面法对其进行了优化设计。将传统光学设计方法得到的Schwarzschild放大系统的优化设计反射面视为由多层膜和裸镜面形共同构成, 应用多层膜的等效工作面法反演出最佳裸镜面形。设计结果表明, 考虑多层膜的Schwarzschild非球面系统全视场调制传递函数达到衍射极限水平, 系统两裸镜的最大面形梯度分别为 $5.9 \mu\text{m}$ 和 $10.2 \mu\text{m}$, 适合检测和加工。本文为添加多层膜的光学成像系统能够达到衍射极限水平提供了一种具有较强实用性的设计方法, 避免了多层膜严重降低系统成像质量的问题。

关键词

光学系统设计, 等效工作面, 极紫外, 多层膜

Optimization Design of Dark Field Detection System for Mask Defects of Extreme Ultraviolet Lithography

Xinze Liu, Shangqi Kuang, Jinyu Diao, Jingquan Lin*

School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun Jilin

Email: *linjingquan@cust.edu.cn

Received: Feb. 2nd, 2021; accepted: Mar. 8th, 2021; published: Mar. 16th, 2021

Abstract

In order to ensure the image quality of mask defects detection system based on Schwarzschild

*通讯作者。

文章引用: 刘馨泽, 匡尚奇, 刁金玉, 林景全. 极紫外光刻掩模缺陷暗场检测系统优化设计[J]. 应用物理, 2021, 11(3): 146-157. DOI: 10.12677/app.2021.113017

structure for extreme ultraviolet lithography, the equivalent working surface model is used to optimize the optical design. The optimal reflector of Schwarzschild amplification system obtained by traditional optical design method is regarded as the combination of multilayers and bare mirror surface, and the optimal bare mirror surface is obtained by using equivalent working surface model of multilayers. The design results show that the full field modulation transfer function of the Schwarzschild aspheric system with multilayers reaches the diffraction limit level, and the maximum surface gradient of the two bare mirrors is $5.9 \mu\text{m}$ and $10.2 \mu\text{m}$, respectively, which is suitable for the system detection and processing. We provided a practical design method for the optical imaging system with multilayers to reach the diffraction limit level, and our method avoids the problem that the imaging quality of the ideal system is seriously reduced by the multilayers.

Keywords

Optical System Design, Equivalent Working Surface Model, Extreme Ultraviolet, Multilayer

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多层膜光学元件被广泛应用于天文观测[1]、同步辐射[2]、半导体[3]、显微成像[4]、等离子体诊断[5]和极紫外(EUV)光刻[6]等诸多领域。随着光刻技术的快速发展, EUV 光刻已进入 7 nm 和 5 nm 技术节点电子器件大规模生产的时代[7]。EUV 光刻采用的 13.5 nm 光辐射极易被绝大多数材料吸收, 因此 EUV 光刻采用反射式光学系统和反射式掩模结构, 反射式光学系统的物镜和反射式掩模表面镀有周期厚度纳米级的多层膜, 可实现较高的光反射率[8] [9]。多层膜缺陷是 EUV 光刻掩模特有的缺陷, 对光刻工艺的良好率影响极大, 由于设备与工艺水平的限制, 目前无法制造无缺陷掩模, 于是掩模缺陷的及时检测至关重要[10]。由于多层膜材料的穿透深度和多层膜的光反射率很大程度上取决于波长, 因此, 在波长掩模缺陷检测工具是不可或缺的[11]。

EUV 多层膜由高低原子序数的材料交替组成, 如 Mo/Si 多层膜就是 EUV 波段最为成功的一种多层膜, 其几何周期厚度具有良好的时间稳定性, 而且可使 13.5 nm 附近的 EUV 光实现近 70% 的最高反射率[12] [13] [14] [15]。Mo/Si 多层膜由实验测得的实际反射率远低于理想结构的理论值, 这是由于在 Mo 层和 Si 层的界面处形成了硅化物[16]。有研究表明, Mo/Si 多层膜的高反射率特性受到多层膜界面的巨大影响, 尤其取决于界面膜层的厚度和化学组分[17]。因此, 多层膜的实际应用必须考虑膜层间的扩散, 而 Mo/Si 多层膜的膜系结构可分为两种, 一种是二层模型, 即仅考虑 Mo 层和 Si 层; 另外一种是四层模型, 该模型不仅考虑 Mo 层和 Si 层, 还考虑两层之间的 MoSi_2 扩散层[18]。

由于多层膜的反射是由各膜层反射光线干涉形成, 因此现有的光学设计软件无法模拟多层膜的反射特性, 这意味着光学设计软件无法分析由多层膜引入的相位和振幅变化, 相位的变化会引起反射光的波前变化和传播方向的相应偏移, 进而影响系统的成像质量, 因此在成像系统的优化过程中必须考虑多层膜的影响。Bal 等人[19]基于此提出了有效入射深度模型, 即用位于一定深度的单个有效入射表面替代多层膜, 推导了有效入射深度与入射角、膜层参数的函数关系, 但是当入射角较大时, p 偏振光和 s 偏振光的有效入射深度差别很大。王君等人[20]基于能量守恒定律构造了等效工作界面模型, 将多层膜等效为一个与之有相同光学性能的单表面, 使基于多层膜引入相位变化的等效工作面模型适用

于大角度入射。但是, 已有研究运用的多层膜未考虑膜层界面处原子间的扩散和化合反应, 这意味着成像系统考虑多层膜的优化结果与实际存在较大的偏差。同时, 基于传统光学设计方法获得的最佳反射面应该是多层膜和裸镜面形共同作用的结果, 而对于此的 EUV 光刻掩模缺陷检测系统的优化设计还有待进一步研究。

为了保证基于 Schwarzschild 结构的 EUV 光刻掩模缺陷检测系统的成像质量, 本文提出了分别优化设计多层膜和裸镜面形的方法。基于多层膜等效工作界面模型[20], 首先介绍了四层模型的等效工作界面计算方法; 然后设计优化了非球面 Schwarzschild 放大成像系统考虑多层膜的初始结构; 通过分析多层膜反射镜的光线入射角范围, 设计反射镜的多层膜周期厚度分布; 最后计算得出适合多层膜系统的裸镜面形。

2. 等效工作面模型

2.1. 光学薄膜特性理论

薄膜的特征矩阵可以方便地表示光学多层膜系统的特性, 对于多层膜系而言, 基于每个界面运用电磁场的边界条件, 并在同一膜层中, 采用光波传播过程中的相位关系, 得到含有 k 个膜层的多层膜系矩阵方程[21] [22]

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^k M_j \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & i \frac{\sin \delta_j}{\eta_j} \\ i \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\delta_j = \frac{2\pi \eta_j d_j \cos \theta_j}{\lambda} \quad (3)$$

其中, M_j 为第 j 层薄膜的特征矩阵, η_{k+1} 为基底的光学导纳, δ_j 是光波在第 j 层薄膜中的有效相位厚度, i 为虚数单位, η_j 是光波在第 j 层膜的有效光学导纳, d_j 为膜层的几何厚度, θ_j 为入射角, λ 为工作波长。通过式(1), 求解多层膜膜系的等效光学导纳 Y 及相应波长处的多层膜表面反射率 R 为:

$$Y = \frac{C}{B} \quad (4)$$

$$R = \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right) \left(\frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \right)^* \quad (5)$$

其中 η_0 是入射介质的导纳。多层膜透射率 T 为:

$$T = \frac{4\eta_0 \operatorname{Re}(\eta_{k+1})}{(\eta_0 B + C)(\eta_0 B + C)^*} \quad (6)$$

2.2. 等效工作面理论

Mo/Si 多层膜在 13.5 nm 附近波段可实现较高的反射率, 研究表明, 反射率受 Mo 膜层和 Si 膜层之间扩散层的影响较大, 所以一般采用如图 1 所示的一周期 Mo/Si 多层膜的四层模型结构。Mo 层在 Si 层上的 MoSi₂ 扩散层厚度与 Si 层在 Mo 层上的 MoSi₂ 扩散层厚度相比, 前者的厚度较大, 这归因于 Mo 的表面自由能比 Si 高, Mo 原子向 Si 层的扩散比 Si 原子向 Mo 层的扩散率高。

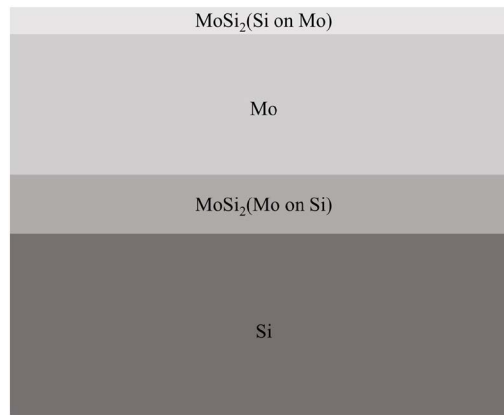


Figure 1. Schematic diagram of the four-layer model structure of a one-period Mo/Si multilayer
图 1. 一周期 Mo/Si 多层膜的四层模型结构示意图

图 2 为多层膜等效工作面示意图, 基于能量守恒原理将多层膜等效为单一表面, 该表面与多层膜具有相同的光学特性(反射率、透射率及吸收), 多层膜顶部与等效工作面的距离为多层膜有效入射深度, 因此等效工作面与反射镜表面的距离为多层膜附加厚度。设处于有效入射深度内的膜层对光强的衰减系数为 C_{att} [20], 其可计算为:

$$C_{att} = \frac{T + \sqrt{T^2 + 4R}}{2} \quad (7)$$

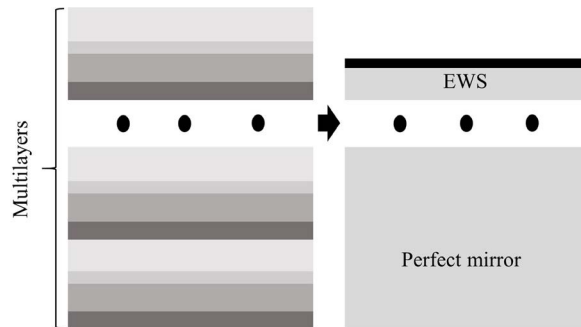


Figure 2. Schematic diagram of equivalent working surface model
图 2. 等效工作面模型示意图

同时根据电磁场理论有[20]

$$C_{att} = \exp\left[-\frac{4\pi}{\lambda} \int_0^{D'} k(z, \theta_j) dz\right] \quad (8)$$

式中 D' 为等效工作面距多层膜表面的垂直厚度, 即有效入射深度, z 为原点位于多层膜表面, 并垂直于多层膜表面的坐标, k 为光学薄膜中经入射角 θ_j 调制后的消光系数分布。根据式(7)和式(8), 求解得到有效入射深度 D' 。考虑膜层间多次反射情况下的等效入射界面更准确的位置

$$D'' = D' \exp(-R') \quad (9)$$

式中 R' 为膜层间的反射率。

$$D = (1 - R_0) D'' \quad (10)$$

式中 R_0 为多层膜表面介质在入射介质中的反射率。 D 即所求的光在多层膜中的有效入射深度。

3. 考虑多层膜的系統裸鏡面形計算

裸鏡系統面形的計算流程如圖 3 所示，首先基於傳統光學設計方法，在不考慮多層膜效應的前提下，對基於 Schwarzschild 結構的 EUV 光刻掩模暗場檢測系統進行設計優化，獲取理想成像面形，即多層膜反射鏡的等效最佳工作面；然後獲取反射鏡的入射角範圍，根據入射角分布進行主次鏡多層膜設計；根據能量守恒原理計算多層膜附加厚度，即等效工作面到裸鏡的距離；最後通過最小二乘法獲取裸鏡面形。

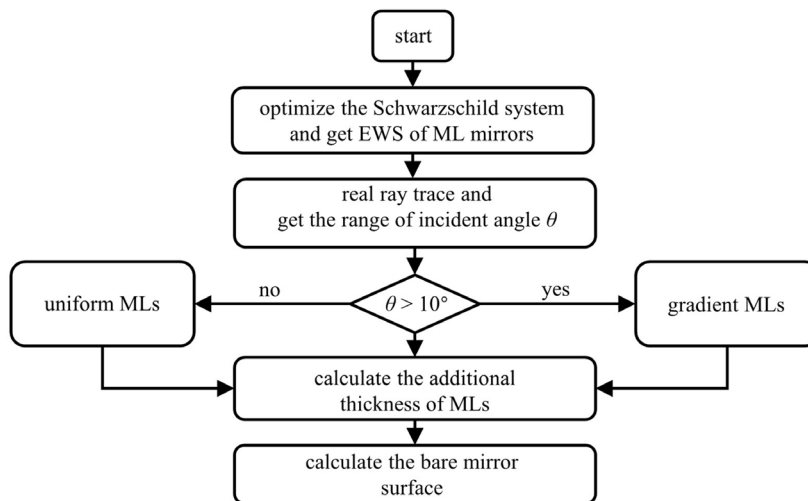


Figure 3. Flow chart of bare mirror shape calculation
圖 3. 裸鏡面形計算流程圖

3.1. 考慮多層膜的光學系統設計優化

EUV 光刻掩模缺陷暗場檢測系統採用如圖 4 所示的 Schwarzschild 結構，系統採用全反射式結構。反射鏡均採用 8 階偶次非球面，主鏡 M1 為凹面反射鏡，次鏡 M2 為凸面反射鏡，反射鏡關於光軸旋轉對稱。系統的具體參數如表 1 所示。

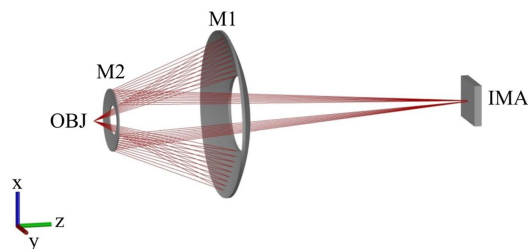


Figure 4. Dark-field detection system for extreme ultraviolet lithography mask defects
圖 4. EUV 光刻掩模缺陷暗場檢測系統

Table 1. System resulting data of standard experiment
表 1. Schwarzschild 放大系統主要參數

Parameter	Value
Wavelength / nm	13.5
NA	0.5
Field of view / mm ²	0.5 × 0.5
Magnification	26

基于光学设计理论,对系统进行优化,针对典型视场调制传递函数(MTF)进行优化,以保证全视场具备良好的像质。调整结构,优化布局,将系统光阑设置在主镜前端,反射镜的口径决定系统的外形尺寸,控制主镜与次镜的间隔和口径,协调光路折叠方式,使结构合理。优化后的反射镜面形为考虑多层膜的理想成像面形,即为多层膜与裸镜面形共同作用的结果。从图5所示的全视场RMS波像差可以看出,全视场的波像差优于 $\lambda/14$ ($\lambda = 13.5 \text{ nm}$),波像差满足成像要求。MTF是成像质量评价的重要参数之一,系统经过优化后的MTF曲线如图6所示,可见全视场MTF曲线均达到衍射极限水平。

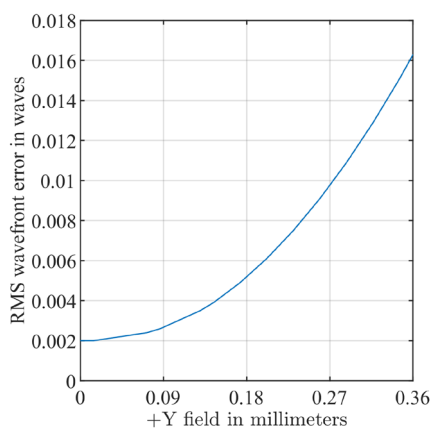


Figure 5. RMS wave aberration of Schwarzschild system
图 5. Schwarzschild 系统的 RMS 波像差

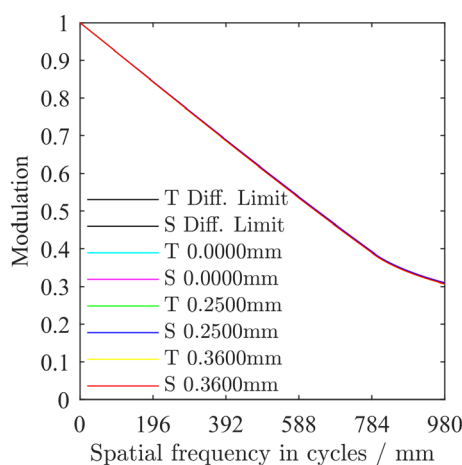


Figure 6. MTF curve of Schwarzschild system
图 6. Schwarzschild 系统的 MTF 曲线

3.2. 对比分析二层模型与四层模型对系统成像质量的影响

以 3.1 节 Schwarzschild 系统为例,量化四层模型与二层模型对系统成像质量影响的差异。在图 7 中,图 7(a)和图 7(b)分别为系统镀制二层模型和四层模型多层膜后的 MTF 曲线,可以看到成像质量均下降很大。系统镀制不同膜系结构多层膜优化后的 MTF 曲线如图 8 所示,在镀制二层模型多层膜时,仅优化物像距系统成像质量便可恢复衍射极限水平;而镀制四层模型多层膜时,同等优化条件下,系统成像质量不能恢复到衍射极限水平。因此,考虑到四层模型更接近实际膜系结构,分析多层膜对系统成像质量的影响时,应用四层模型是必要的。

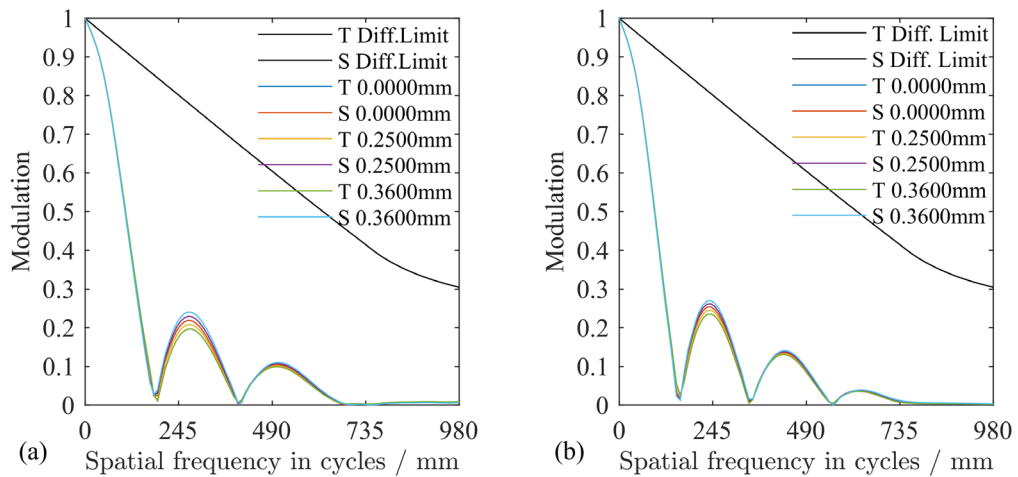


Figure 7. The MTF curve of the system after coating the multilayers with different film structure. (a) Two-layer model; (b) Four-layer model
图 7. 系统镀制不同膜系结构多层膜后的 MTF 曲线。(a) 二层模型; (b) 四层模型

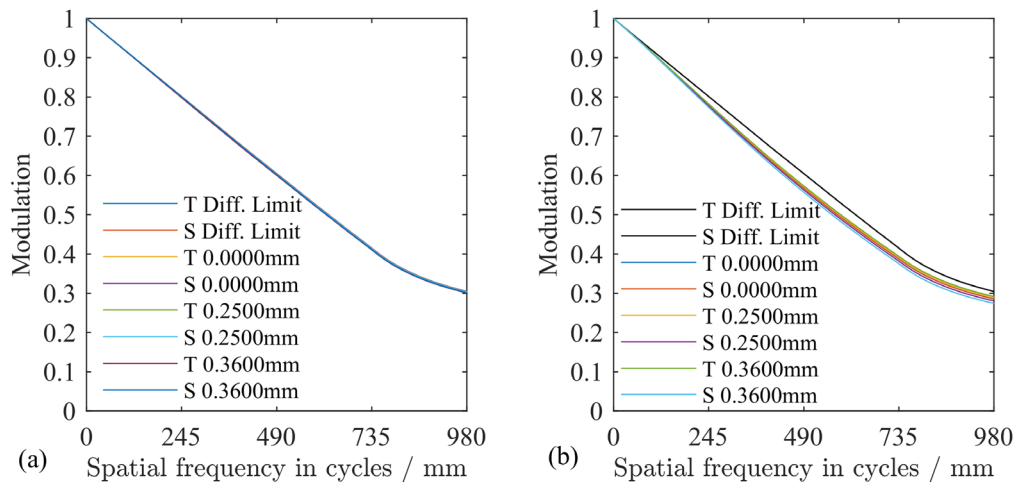


Figure 8. The optimized MTF curve of the multilayers system with different film structure. (a) Two-layer model; (b) Four-layer model
图 8. 系统镀制不同膜系结构多层膜优化后的 MTF 曲线。(a) 二层模型; (b) 四层模型

3.3. 主次镜多层膜设计

为进行系统中主次镜多层膜设计，对光学系统采用光线追迹方法进一步分析，得到主次镜的光线入射角分布为 $2.04^{\circ}\sim 3.81^{\circ}$ 和 $5.16^{\circ}\sim 11.86^{\circ}$ ，次镜光线入射角范围超过 10° 。为了保证多层膜反射镜在超过 10° 入射角范围内对 13.5 nm 的 EUV 光达到高反射率，在主镜上设计均匀多层膜，在次镜上设计梯度多层膜。Mo/Si 多层膜共 40 个周期，在设计梯度多层膜时，由于 MoSi_2 扩散层厚度很薄，并且不依赖于 Mo 层或 Si 层的厚度，因此将扩散层的几何厚度理想化处理，近似认为扩散层的厚度不变，令 Mo 层在 Si 层上和 Si 层在 Mo 层上的 MoSi_2 扩散层厚度分别为 1 nm 和 0.5 nm 。固定两个 MoSi_2 膜层厚度，改变四层模型中 Mo 层和 Si 层的几何厚度，其中 Mo 层的几何厚度分布范围为 $2.27\text{ nm}\sim 2.31\text{ nm}$ ，Si 层的几何厚度分布范围为 $3.15\text{ nm}\sim 3.21\text{ nm}$ 。多层膜膜厚分布如图 9 所示，分别给出了主次镜多层膜膜厚随物镜口径的变化。

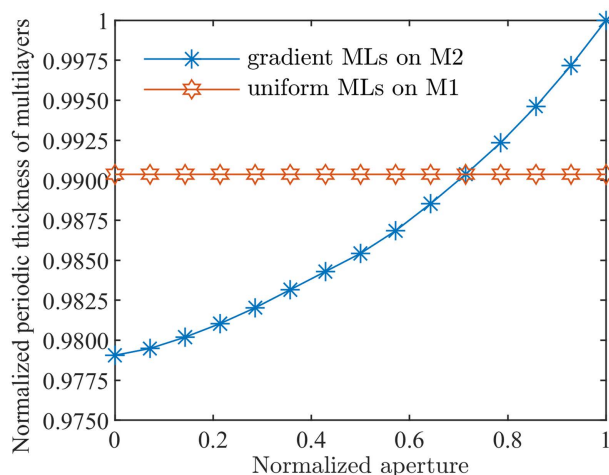


Figure 9. The change curve of the period thickness of the normalized multilayers with the diameter of the normalized mirror
图 9. 归一化多层膜周期厚度随归一化反射镜口径的变化曲线

3.4. 主次镜多层膜附加厚度计算

基于式(7)和式(8), 对多层膜等效工作面附加厚度进行计算, 主镜的均匀多层膜附加厚度为 231.65 nm; 次镜的梯度多层膜附加厚度分布如图 10 所示, 彩色条给出了沿光轴的附加厚度大小, 正负代表多层膜附加厚度在全局坐标中相对等效工作面位置的走向。

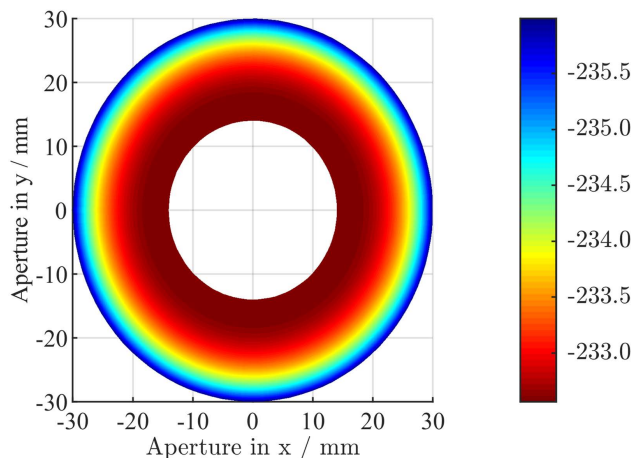


Figure 10. Additional thickness distribution of gradient multilayers of secondary mirror M2
图 10. 次镜 M2 的梯度多层膜附加厚度分布

4. 裸镜面形结果分析

系统两裸镜的表面类型均选用 8 阶偶次非球面, 利用最小二乘法对由多层膜反射镜反演得到的裸镜面形进行拟合。表 2 展示了拟合所获得的两裸镜的中心曲率半径、二次曲面常数和高次非球面系数, 以及传统设计方法得到的裸镜面形信息, 对比两种方法获得的裸镜面形, 可知主镜 M1 的裸镜面形相同, 次镜 M2 的裸镜面形不同, 产生这种结果的原因是主镜 M1 镀制均匀膜后面形不发生改变, 而次镜 M2 镀制梯度膜后面形发生了改变。另外拟合精度对结果也有重要影响, 主次镜的裸镜面形拟合误差(Root mean square error-RMSE)分别为 2.0697×10^{-14} mm 和 3.3263×10^{-8} mm, 拟合精度较理想。

Table 2. Fitting results of bare mirror surface of the system with multilayers
表 2. 考虑多层膜的系统裸镜面形拟合结果

Parameter	Traditional design method		Inverse method	
	Bare mirror of M1	Bare mirror of M2	Bare mirror of M1	Bare mirror of M2
Radius/mm	-171.6621	-177.2363	-171.6621	-177.2363
Conic	0.1695	5.3664	0.1695	5.3664
2th order term	0	0	0	0
4th order term	2.5708×10^{-10}	-3.4308×10^{-8}	2.5708×10^{-10}	-3.4320×10^{-8}
6th order term	9.1691×10^{-16}	-3.3662×10^{-12}	9.1691×10^{-16}	-3.3574×10^{-12}
8th order term	-7.2417×10^{-19}	-1.5888×10^{-15}	-7.2417×10^{-19}	-1.5948×10^{-15}

图 11 给出了按照偶次非球面方程拟合得到的系统两裸镜的三维面形图, 如图所示, 两裸镜均为中心挖孔的旋转对称非球面镜。以表面中心点为坐标原点, 彩色条给出了各点的矢高值, 可以得出主镜的裸镜边缘矢高为 -19.9947 mm, 次镜的裸镜边缘矢高为 -2.6982 mm。

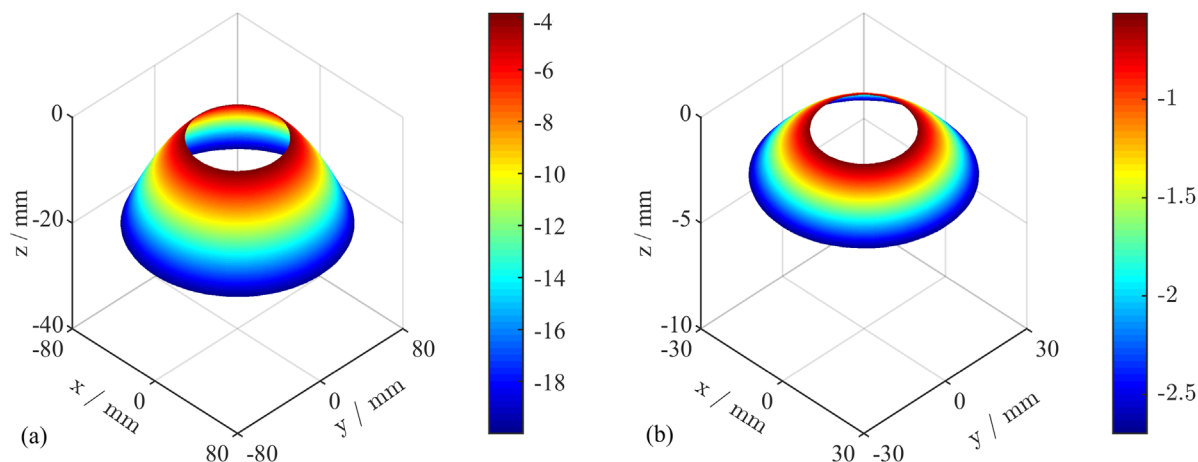


Figure 11. The three-dimensional surface figure of the primary mirror and the secondary mirror of the system with multilayers. (a) The naked mirror shape of the primary mirror (M1); (b) The naked mirror shape of the secondary mirror (M2)

图 11. 考虑多层膜的系统主次镜的裸镜三维面形图。(a) 主镜(M1)的裸镜面形; (b) 次镜(M2)的裸镜面形

非球面光学表面是通过多个加工、检测、再加工的循环完成的, 以子午曲面方程所决定的表面类型和制造精度为基础, 判断设计的非球面镜是否适用于目前的加工检测[23]。非球面最主要的特性是非球面度, 非球面度是非球面与最佳比较球面的偏离量, 即精加工需要去除的量, 这个值决定了加工非球面的方法。非球面的面形梯度即非球面与最佳比较球面偏离量的切线斜率值, 主要反映加工和检测的难度[24]。在子午面内, 对不同裸镜沿 y 轴方向的偏离量每隔 0.1 mm 采样, 计算得到考虑多层膜的系统两裸镜的面形梯度曲线如图 12 所示, 主镜的裸镜最大面形梯度为 $5.9 \mu\text{m}$, 次镜的裸镜最大面形梯度为 $10.2 \mu\text{m}$, 表示主次镜的裸镜非球面对于最佳比较球面的偏离量在子午曲线上 1 mm 弧长内分别增大 $5.9 \mu\text{m}$ 、 $10.2 \mu\text{m}$, 适用于目前的加工检测。将图 12 中次镜 M2 的面形梯度与图 13 中未考虑多层膜得到的裸镜面形梯度进行对比, 发现两者的面形梯度在微米量级上数值相同。

在图 14 中, 通过表面矢高的差别, 分析传统设计方法和多层膜反射镜反演方法获得的次镜 M2 的裸镜面形之差别, 可以看出, 两者的矢高差随反射镜口径的增大而增大, 最大差别约为 7 nm。

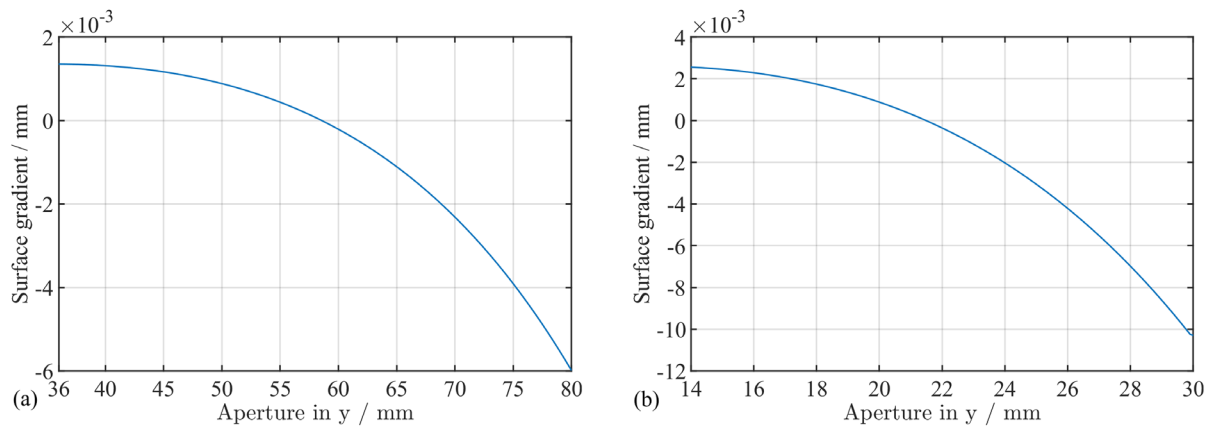


Figure 12. The surface gradient of the bare mirror of the primary and secondary mirrors of the system with multilayers. (a) The surface gradient of the primary mirror (M1); (b) The surface gradient of the secondary mirror (M2)

图 12. 考虑多层膜的系统主次镜的裸镜面形梯度。(a) 主镜(M1)的裸镜面形梯度; (b) 次镜(M2)的裸镜面形梯度

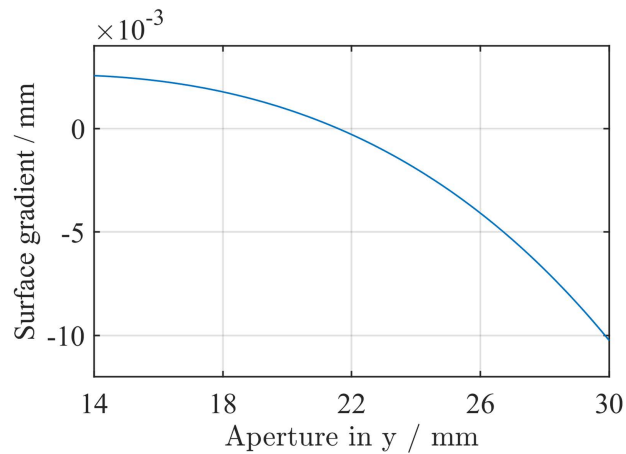


Figure 13. The surface gradient of the secondary mirror (M2) of the system without multilayers

图 13. 不考虑多层膜的系统次镜(M2)的面形梯度

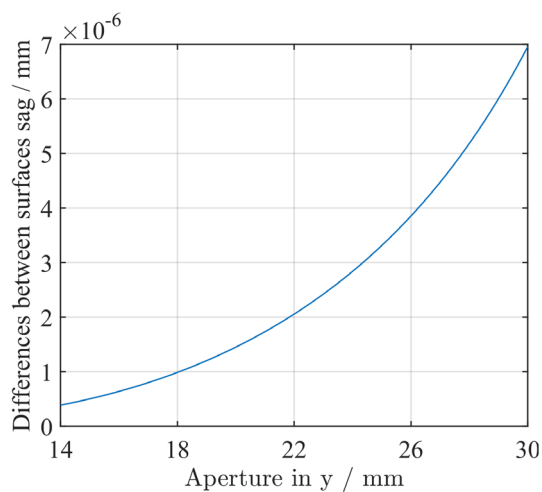


Figure 14. The difference between the secondary mirror (M2) of the system with multilayers and without multilayers changes with the diameter of the mirror

图 14. 考虑多层膜与不考虑多层膜的系统次镜(M2)裸镜面形之差随反射镜口径的变化

5. 结论

本文介绍了综合分析多层膜等效工作面 and 裸镜基底面形的光学系统设计方法, 首先设计优化了基于 Schwarzschild 结构的 EUV 光刻掩模缺陷暗场检测系统, 系统采用双非球面反射镜, 数值孔径 NA 为 0.5, 全视场 MTF 曲线达到衍射极限水平。然后利用等效工作面原理, 对考虑了 MoSi₂ 扩散层的 Mo/Si 多层膜进行等效工作面计算, 获得不同反射镜的多层膜附加厚度。最后通过最小二乘法拟合得到裸镜面形, 其中主镜的裸镜面形拟合误差(RMSE)为 2.0697×10^{-14} mm, 次镜的裸镜面形拟合误差为 3.3263×10^{-8} mm, 拟合精度理想。通过计算不同裸镜面形梯度, 得到主镜的裸镜最大面形梯度为 5.9 μm, 次镜的裸镜最大面形梯度为 10.2 μm, 适合加工检测。这种通过理想系统多层膜反射镜推算裸镜面形的方法具有较强的实用性和良好的应用前景。

基金项目

吉林省科技发展计划项目(No.20200401052GX)。

参考文献

- [1] Polkovnikov, V.N., Chkhalo, N.I., Pleshkov, R.S., *et al.* (2019) Stable High-Reflection Be/Mg Multilayer Mirrors for Solar Astronomy at 30.4 nm. *Optics Letters*, **44**, 263-266. <https://doi.org/10.1364/OL.44.000263>
- [2] Feng, J., Huang, Q., Qi, R., *et al.* (2019) Stability of Cr/C Multilayer during Synchrotron Radiation Exposure and Thermal Annealing. *Optics Express*, **27**, 38493-38508. <https://doi.org/10.1364/OE.27.038493>
- [3] Rasulov, R.Y., Rasulov, V., Mamadaliyeva, N., *et al.* (2020) Subbarrier and Overbarrier Electron Transfer through Multilayer Semiconductor Structures. *Russian Physics Journal*, **63**, 537-546. <https://doi.org/10.1007/s11182-020-02067-7>
- [4] 姚广宇, 李艳丽, 孔祥东, 等. 聚焦离子束切割法制备多层膜 X 射线波带片[J]. 微纳电子技术, 2019, 56(4): 314-318.
- [5] Chang, W.S., Yook, Y.G., You, H.S., *et al.* (2020) A Unified Semi-Global Surface Reaction Model of Polymer Deposition and SiO₂ Etching in Fluorocarbon Plasma. *Applied Surface Science*, **515**, Article ID: 145975. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145975>
- [6] Saedi, M., Sfiligoj, C., Verhoeven, J., *et al.* (2020) Effect of Rubidium Incorporation on the Optical Properties and Intermixing in Mo/Si Multilayer Mirrors for EUV Lithography Applications. *Applied Surface Science*, **507**, Article ID: 144951. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144951>
- [7] 刘陌, 李艳秋. 组合倍率极紫外光刻物镜系统梯度膜设计方法[J]. 光学学报, 2020, 40(5): 0522001.
- [8] 李冠楠, 刘立拓, 周维虎, 等. 缺陷对极紫外掩模多层结构反射场的扰动研究[J]. 半导体光电, 2020, 41(2): 217-222.
- [9] 宋源, 卢启鹏, 龚学鹏, 等. 极紫外光刻机多层膜反射镜表面碳污染的清洗[J]. 光学精密工程, 2017, 25(11): 2835-2844.
- [10] 成维, 李思坤, 王向朝, 等. 极紫外光刻掩模相位型缺陷的形貌重建方法[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1005001.
- [11] Weiss, M.R., Hellweg, D., Peters, J.H., *et al.* (2014) Actinic Review of EUV Masks: First Results from the AIMS EUV System Integration. *Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography V*, San Jose, 24-27 February 2014, 90480X. <https://doi.org/10.1117/12.2046302>
- [12] Kumar, N., Nezhdanov, A.V., Smertin, R.M., *et al.* (2020) Phase-Microstructure of Mo/Si Nanoscale Multilayer and Intermetallic Compound Formation in Interfaces. *Intermetallics*, **125**, Article ID: 106872. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106872>
- [13] Suman, M., Pelizzo, M.G., Windt, D.L., *et al.* (2008) Innovative Design of EUV Multilayer Reflective Coating for Improved Spectral Filtering in Solar Imaging. *International Conference on Space Optics—ICSO*, Volume 10566, Article ID: 1056667.
- [14] 梅雪峰, 匡尚奇, 谢耀. 量子进化算法在极紫外多层膜表征和设计中的应用[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2016, 39(4): 1-7.
- [15] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42.
- [16] Abharana, N., Biswas, A., Sarkar, P., *et al.* (2019) Interface Studies of Mo/Si Multilayers with Carbon Diffusion Bar-

-
- rier by Grazing Incidence Extended X-Ray Absorption Fine Structure. *Thin Solid Films*, **673**, 126-135. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2019.01.033>
- [17] Sakhonenkov, S.S., Filatova, E.O., Gaisin, A.U., *et al.* (2019) Angle Resolved Photoelectron Spectroscopy as Applied to X-Ray Mirrors: An in Depth Study of Mo/Si Multilayer Systems. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **21**, 25002-25010. <https://doi.org/10.1039/C9CP04582A>
- [18] 张超, 张杰瑞, 王一名, 等. 基于量子进化算法的宽角度极紫外多层膜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0631001.
- [19] Bal, M.F., Singh, M. and Braat, J.J. (2004) Optimization of Multilayer Reflectors for Extreme Ultraviolet Lithography. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, **3**, 537-545. <https://doi.org/10.1117/1.1793171>
- [20] 王君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻投影物镜中多层膜分析模型的建立及应用[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0811002.
- [21] 李向阳. 金属/介质膜系光电特性的研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2012.
- [22] 蒙庆华, 梁志铭, 郑荣江. Matlab 环境下多层光学薄膜的数值计算[J]. 广西师范学院学报(自然科学版), 2010, 27(3): 37-39.
- [23] 巩盾, 王红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- [24] 谷茜茜, 崔占刚, 亓波. 基于离轴自由曲面的激光通信光学天线设计[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 547-557.