

高精度成像系统膜层引入的波像差

王庆国 赵尚男 张纪鹏 吴庆 史广维

Wavefront aberrations induced by coatings in high-precision imaging systems

WANG Qing-guo, ZHAO Shang-nan, ZHANG Ji-peng, WU Qing, SHI Guang-wei

引用本文:

王庆国, 赵尚男, 张纪鹏, 吴庆, 史广维. 高精度成像系统膜层引入的波像差[J]. 中国光学, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2025-0136

WANG Qing-guo, ZHAO Shang-nan, ZHANG Ji-peng, WU Qing, SHI Guang-wei. Wavefront aberrations induced by coatings in high-precision imaging systems[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2025-0136

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0136>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大孔径太赫兹波成像光学系统设计

Design of terahertz wave imaging optical system with large aperture

中国光学 (中英文). 2024, 17(2): 374 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0129>

基于矢量衍射的光学系统设计与偏振像差补偿

Optical system design and polarization aberration compensation based on vector diffraction

中国光学 (中英文). 2025, 18(4): 839 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0006>

红外双波段制冷型变焦Offner型光谱成像系统设计

Design of an infrared dual-band cooled zoom focal Offner-type spectral imaging optical system

中国光学 (中英文). 2025, 18(6): 1327 <https://doi.org/10.37188/CO.2025-0080>

折反式变形光学系统偏振像差分析及其对点扩散函数的影响

Polarization aberration analysis of catadioptric anamorphic optical systems and its effect on the point spread function

中国光学 (中英文). 2024, 17(6): 1408 <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0010>

折反式变形光学系统设计

Design of catadioptric anamorphic optical system

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0035>

低灵敏度空间引力波望远镜光学系统设计

Design of optical system for low-sensitivity space gravitational wave telescope

中国光学 (中英文). 2023, 16(6): 1384 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0006>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-13

高精密成像系统膜层引入的波像差

王庆国^{1,2,3}, 赵尚男^{1,3*}, 张纪鹏^{1,2,3}, 吴庆^{1,3}, 史广维^{1,3}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 光学系统先进制造全国重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为提高系统透过率, 高精密成像光学系统表面常需镀制多层膜。然而在短波段光学系统中, 多层膜不仅改变表面透过率, 还会引入显著的相位效应和横向位移, 从而导致系统产生额外的波像差。本文针对短波段小入射角系统, 系统分析了多层膜对全视场成像质量的影响。首先, 利用膜层断点追迹算法, 将膜层效应与光线追迹过程相结合, 比较了可见光、红外及极紫外(EUV)波段系统的膜层引起的波像差。而后, 以数值孔径为 0.25 的六反 EUV 投影系统为例, 分析了均匀的 40 层 Mo/Si 多层膜引入的波前变化。在此基础上, 提出一种基于 Gram-Schmidt 正交化(GSO)的 EUV 系统波前全视场分析方法, 对弧形视场下的 Zernike 像差分布进行分析。结果表明, 膜层引起的波像差在长波段系统中确实可忽略, 而在短波段系统中则十分显著; 膜层对 EUV 引入明显的倾斜和离焦, 使得波前 RMS 由 0.016λ 增至 0.842λ ; 全视场分析表明, 膜层引入了 0.727λ 全视场倾斜和 0.034λ 视场无关的离焦, 倾斜主要引起平移、倍率和低阶畸变等视场相关波前变化。研究表明, 膜层引起 EUV 系统剧烈的像面变形, 应在设计阶段将膜层影响纳入考虑范围。

关键词: 多层膜; 波像差; 横向位移; 极紫外 (EUV) 光学系统; Gram-Schmidt 正交化 (GSO); 光学设计

中图分类号: TP394.1; TH691.9 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2025-0136 CSTR: 32171.14.CO.2025-0136

Wavefront aberrations induced by coatings in high-precision imaging systems

WANG Qing-guo^{1,2,3}, ZHAO Shang-nan^{1,3*}, ZHANG Ji-peng^{1,2,3}, WU Qing^{1,3}, SHI Guang-wei^{1,3}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences;

2. University of Chinese Academy of Sciences;

3. State Key Laboratory of Advanced Manufacturing for Optical Systems)

* Corresponding author, E-mail: 18810575846@163.com

Abstract: Multilayer coatings are widely applied to high-precision imaging optics to improve throughput. In short-wavelength systems, however, coatings not only alter transmittance/reflectance but also introduce pro-

收稿日期: 2025-10-27; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所青年科学基金项目 (No. 62005271); 自平衡多模内力/力矩纵弯复合变形驱动式大口径空间主动反射镜设计方法研究 (No. 12473084); 国家自然科学基金 (No. 62475122) Youth Science Fund Project of Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences (No. 62005271); Research on the Design Methodology of a Self-Balanced, Multimodal Internal-Force/Moment-Driven, Axial-Bending Compound-Deformation Actuation Scheme for Large-Aperture Space Active Reflectors (No. 12473084); National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 62475122)

nounced phase effects and coating-induced lateral shifts, which collectively manifest as additional wavefront aberrations at the system level. This work systematically investigates coating-induced full-field degradation in short-wavelength imaging systems operated at small angles of incidence. A multilayer-coating break-point ray-tracing algorithm is used to incorporate coating-induced phase and lateral-shift effects into the geometrical ray-tracing workflow, enabling a comparative evaluation of coating-induced wavefront aberrations in the visible, infrared, and extreme ultraviolet (EUV) bands. A six-mirror EUV projection system ($NA = 0.25$) is then analyzed to quantify the wavefront changes introduced by a uniform 40-bilayer Mo/Si multilayer coating. Furthermore, a full-field wavefront analysis method based on Gram–Schmidt orthogonalization (GSO) is developed to characterize the field dependence of Fringe-Zernike aberration coefficients over a curved image field. The results indicate that coating-induced wavefront aberrations are negligible for long-wavelength systems but become significant in the short-wavelength regime. In the EUV example, the coating introduces strong tilt and defocus, increasing the RMS wavefront error from 0.016λ to 0.842λ . Full-field analysis shows a 0.727λ field-dependent tilt component and a 0.034λ field-independent defocus component; the tilt terms primarily correspond to image translation, magnification variation, and low-order distortion. These results demonstrate that multilayer coatings can induce severe image-plane deformation in EUV systems and therefore must be accounted for during the optical design stage.

Key words: multilayer coating; wavefront aberration; lateral displacement; extreme ultraviolet (EUV) projection optics; Gram–Schmidt orthogonalization (GSO); optical system design

1 引言

光学系统需要镀膜来提高系统透过率,根据薄膜光学^[1-2]的理论,膜层带来的分别会影响光辐射的透射或反射系数以及产生额外的相位效应。对于大多数成像系统而言,通常仅认为膜层影响系统的透射率或反射率,而不考虑膜层的相位效应^[3];对于某些需要严格考虑偏振效应的系统,设计者往往也只更关注于膜层相位效应中的偏振特性,考虑膜层作为弱偏振器件^[4-7]而引起相位延迟和二向衰减,而不考虑薄膜产生的标量波像差的影响。多数镀膜系统的膜层数量很少,同时厚度也很薄,因此忽略相位影响对成像质量不会产生太大影响。但对于一些工作在短波段,要求成像质量很高的系统,如 EUV 和 DUV 投影系统,为了实现高透过率通常需要镀数十乃至上百层的多层膜,导致相位效应不可忽视,忽略偏振的影响下,体现为 s 光和 p 光的平均相位,等效于标量波像差^[8]。此外,由于多层膜厚度非常大,不能再简单认为光线在系统入射位置不变,必然会存在一段沿表面方向的一段位移,称为横向位移。横移的存在,会使系统对光线的折反效应产生影响,使

得光线在系统表面的位置发生改变,从而影响后续的光线追迹过程,最终影响系统的成像质量^[9]。膜层的相位效应和横向位移都会使系统产生额外的像差,特别在成像质量要求非常严格的系统中,二者共同作用将会造成严重的像质退化,对此不得不进行额外的补偿工作,造成设计难度的加大。

许多研究人员已经分析过膜层的效应会对系统产生怎样影响。Reiley 和 Chipman^[10]从薄膜的相位效应出发,分析了镀有 4 层膜层无限共轭的卡塞格林系统产生的影响,发现镀膜后会产生像散、离焦以及色差,像散是由相位延迟引起的,离焦则与 s 和 p 分量的平均相位相关。Chen^[11]研究了 13.5 nm 波长下倾斜的平面镜镀膜的影响,推导了多层膜平面反射镜引入的相位与数值孔径、归一化光瞳和视场坐标的关系,得到了膜层引入波像差的解析形式,发现镀膜会引入像散、离焦以及会产生放大变形。商业设计软件 CODEV 在开启偏振光线追迹功能会考虑膜层的厚度影响,通过几何光学的方式附加了额外的光程;ZEMAX 则是将膜层的影响以类似的方式体现在相位像差中。它们都未曾考虑横向位移的影响,同时,多层膜反射镜也被称作布拉格反射器^[12-13],现有理论

已经证明波在其中具有的一定穿透深度, 该距离并不等于多层膜的实际物理厚度, 特别是对多层膜层数非常多的系统, 采用这些设计软件的处理方式会产生难以预估的额外影响。Matthieu F. Bal^[9]首次利用有效反射深度模型来分析横向位移的影响, 假设存在多层膜内部存在一个有效反射面, Bal 通过多层膜引入的相位计算有效深度和横向位移, 得到的有效深度正比于相位对入射角的二阶导数的结果。利用有效深度模型, 他分析了数值孔径 0.3 和 0.5 的单个镜面镀膜的 EUV 系统的 PSF, 发现镀膜会产生离焦并造成 PSF 的明显下降。王君^[14]根据能量守恒定律, 从膜层的能量调制角度出发求解了等效工作界面。他据此构建了表面的等效面型, 分析了 Schwarzschild 物镜镀膜的 MTF, 发现均匀膜会造成成像质量的严重下降且仅调整物距和像距无法恢复到接近衍射极限, 而梯度膜虽然也造成 MTF 一定的下降, 但通过调整物距像距即可恢复到衍射极限水平。

前述研究中存在几个方面的问题: 一是等效模型并不完全遵循物理图景, 多层膜是通过不同界面反射光的相长干涉来实现增强反射率的作用, 客观上不会存在一个明确的反射界面; 等效模型是将膜层的影响转换为光线入射到各种偏离原始面型的等效非球面系统的光线追迹效果, 这种等效效果准确性并无明确的研究来证明, 同时等效效果无法与传统的光学设计过程相结合, 因为等效之后的结果无法对等效面型的曲率和间隔进行优化。二是未能综合考虑横向位移和膜层相位变化的综合效果。三是未能给出镀膜后系统全视场波像差变化。

准确分析膜层给高精度光学系统带来的波像差变化是本文研究的主要目的。研究的主要内容是利用了一种膜层效应的高效算法, 将膜层引入的综合效应与光线追迹过程结合, 对镀膜系统进行综合分析。首先通过对不同波段镀膜系统进行对比, 分析镀膜对不同波段完美成像系统的影响, 之后选择受膜层影响更明显的 EUV 系统进行分析, 通过 Gram-Schmidt 正交化(GSO)方法分析了具有弧形视场的镀膜前后系统波像差的变化, 全面反映了镀膜系统的成像情况, 将膜层影响纳入前期系统设计过程, 为后续系统优化提供了新方向。

2 镀膜系统模型与理论分析

2.1 EUV 多层膜模型和系统模型

选择 Mo\Si 作为 13.4 nm 波长下的多层膜材料, 为了分析的充分表征膜层产生的波像差, 采取均匀膜的镀膜形式, 均匀膜会对系统造成更明显的像质衰退^[9, 11, 14-15]。标准膜层是针对特定入射角进行设计的, 由 40 层 Mo-Si 膜对组成, 总物理厚度约 280 nm, 周期 Λ 为 7 nm, Mo 是吸收层, 厚度 d_{Mo} 为 2.8 nm, Si 是间隔层, 厚度 d_{Si} 为 4.2 nm, Mo 层占空比 $\Gamma=d_{Mo}/\Lambda=0.4$ 。根据 Henke^[16]给出的计算公式, 材料光学常数可根据下列公式计算得出:

$$N = n + ik = 1 + \delta + i\beta,$$

$$\delta = \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{M} \cdot f_1, \beta = \frac{r_e \lambda^2}{2\pi} \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{M} \cdot f_2, \quad (1)$$

根据 CXRO 提供的原子散射因子 f_1 、 f_2 和材料密度 ρ 和摩尔质量 M , 可以计算出 13.4 nm 下 Mo\Si 折射率 n 和吸收系数 k 如下:

$$N_{Si} = 0.999\ 59 + i1.821\ 3 \times 10^{-3}$$

$$N_{Mo} = 0.925\ 35 + i6.220\ 4 \times 10^{-3}$$

$$N_{SiO_2} = 0.978\ 56 + i1.057\ 0 \times 10^{-2}, \quad (2)$$

图 1 所示为选取用于分析和优化的 EUV 系统, 数值孔径为 0.25, 具有六个共轴非球面反射镜, 光线在每个表面最大入射角不超过 20° 。系统缩小比 0.25, 总长约 1500 mm, 像方视场为弦长 26 mm, 宽 2 mm 的弧形视场。

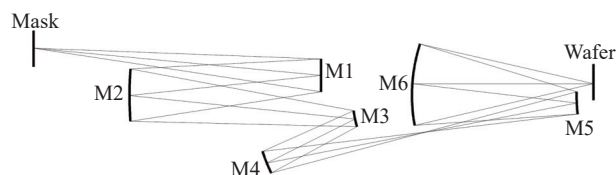


图 1 EUV 投影系统结构, 物方离轴视场高度 134 mm-142 mm

Fig. 1 Optical layout of the EUV projection system; the object-side off-axis field height ranges from 134 mm to 142 mm.

对于反射镜而言, 每个表面的光束入射角并非是以膜层设计角度 i_{design} 入射的, 采用标准

膜系会造成反射率的衰减,因此需针对每个表面修正膜层属性,根据光线在每个表面的平均入射角 i_{mean} 对膜层周期厚度进行修正并保持 Γ 不变:

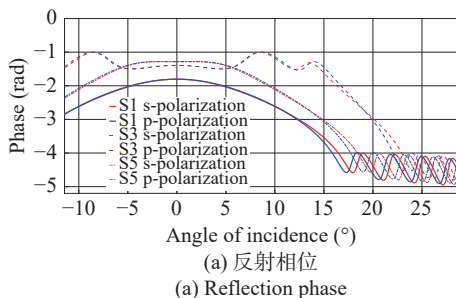
$$\Lambda(i_{mean}) = \frac{\Lambda(i_{design})}{\cos i_{mean}}, \quad (3)$$

修正后的膜层适应每个表面,保证每个表面都可以获得接近标准膜层设计的反射率。每个表面入射角和修正后的多层膜厚度如表 1 所示。不同视场光线在 EUV 各表面的最大入射角不同,入射角最大值出现在第三个镜面上,为 19.3° ,该表面平均入射角也最大,为 17.6° ,因此该表面的反射率与标准膜层的反射率分布差异最大。不同表面的膜层折射率和相位如图 2 所示,表面 6 的平均入射角接近标准膜系设计角度,表面 1 和 2 的平均入射角相近,因此为了便于区分,只绘制了表面 1、3、5 的膜层信息。可以看出在入射角增大时相位变化会迅速增加,即使不考虑偏振效应,也会引入与入射角度相关的平均相位,在系统中体现为不同光瞳位置下产生额外的波前变形。

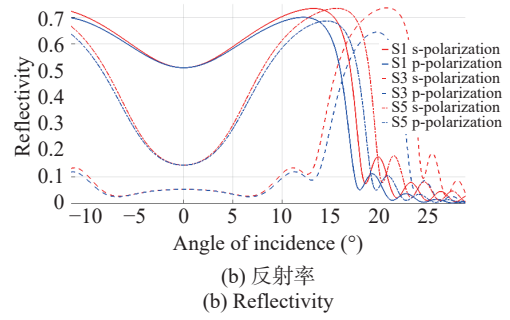
表 1 EUV 系统各表面平均入射角和膜层厚度

Tab. 1 Average incidence angle and coating thickness of each surface in the EUV system

表面序号	平均入射角/ $^\circ$	Si/nm	Mo/nm
1	6.5034	4.2272	2.8181
2	6.5397	4.2275	2.8183
3	17.6011	4.4063	2.9375
4	8.3387	4.2449	2.8299
5	10.6555	4.2737	2.8491
6	3.7275	4.2089	2.8059



(a) 反射相位
(a) Reflection phase



(b) 反射率
(b) Reflectivity

图 2 修正均匀膜层的反射相位和反射率随入射角的变化,实线、虚线和点划线分别表示表面 1、3、5 膜层反射特性

Fig. 2 Reflection phase and reflectivity of the corrected uniform multilayer coating versus angle of incidence; the solid, dashed, and dash-dotted curves correspond to surfaces 1, 3, and 5, respectively.

2.2 膜层相位和横向位移计算方式

膜层会产生额外的波像差变化并使入射到镀膜表面的光线产生横向位移,本文基于 Zhang Ying 提出一种快速计算横向位移的方式^[17],该方法与设计软件结合,可以在设计阶段分析过程中考虑膜层的影响,下面将对算法进行简单介绍。

矩阵法或非涅尔系数递推方式^[1]计算膜层的反射系数基于平面波入射到无限大平面表面这一假设,将光在薄膜内部的传播过程忽略,只研究在膜层两侧光的分布情况。计算公式为:

$$E_0 \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{1}{i\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix} E_{K+1},$$

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{1}{i\eta_j} \sin \delta_j \\ i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{K+1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 E_0 表示入射方电场切向分量, E_{K+1} 表示基底方的电场切向分量, $Y=C/B$ 是等效的组合导纳, η_j 是第 j 层的有效导纳,定义为每一介质中的磁场强度和电场强度的切向分量之比。反射系数 r 计算公式为:

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y}, \quad (5)$$

这是最常用的平面波反射系数的计算方式,它的相位部分即是求解的反射相位。Zhang Ying 提出的方法中,不再假设入射为平面波的情形。根据平面波角谱理论^[18],在各向同性的均匀介质中,任意电磁波都可以分解为无穷多平面波的线

性叠加,膜层反射系数的求解完全可以先通过求解空间频域的反射系数 $\tilde{r}(k_x, k_y)$,最后逆变换到空间域得到真实反射波电场强度,变换后的空域电场与入射电场的比值就是真实空间域的反射系数 $r(x, y)$,透射系数的计算同理。这种方法不需要对入射波假设平面波近似,但是膜层反射和透射系数的计算方式又类似于传统的矩阵方法,既保证了原理上的准确(更少的假设),又不会复杂化计算方式。假设空间频域反射系数为 $\tilde{r}(k_x)$ (只考虑入射面, k_x 对应平面波角谱),则空间域反射电场为

$$E^r(x') = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{r}(k_x)\tilde{E}^i(k_x)\} = \mathcal{F}^{-1}\{\tilde{r}(k_x)\mathcal{F}\{E^i(x)\}\} \quad (6)$$

其中, $E^r(x')$ 是反射场, $E^i(x)$ 是入射场。入射电场写作振幅 $U(x)$ 和相位 $\psi(x)$ 相乘形式: $E^i(x) = U(x)\exp[i\psi(x)]$,在傅里叶变换过程中存在积分项:

$$\tilde{E}^i(k_x) \propto \int_{-\infty}^{\infty} U(x)\exp[-i(k_x x - \psi(x))]dx \quad (7)$$

考虑计算速度和计算精度,Zhang Ying 利用稳相(stationary phase)积分渐近^[19]方法将积分过程转化为简单的乘积过程:

$$\tilde{E}^i(k_x) \propto \frac{U(x)}{\sqrt{\left|\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2}\right|}} \exp[i\{\psi(x) - k_x x\}] \quad (8)$$

上述求傅里叶变换的方式称为同胚傅里叶变换(homeomorphic Fourier transform^[20])。注意,这里的 k_x 不再是全空间频域分布的平面波角谱,而是特指满足稳相条件下的角谱分量。稳相条件为:

$$\nabla[k_x x - \psi(x)] = 0 \quad (9)$$

经过正逆变换后,得到实际反射光的结果,

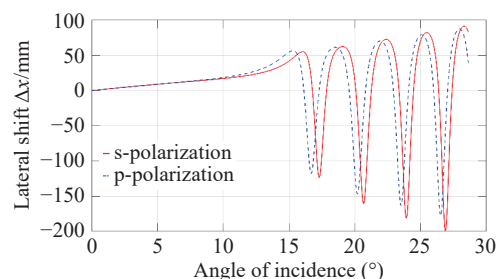
$$E^r(x') = \alpha \tilde{r}(k_x(x))E^i(x)\exp(ik_x \Delta x) \quad (10)$$

α 是振幅调制因子,并不会影响成像质量,只会引起反射率的轻微变化; Δx 是横向位移, $e^{ik_x \Delta x}$ 是额外引入的相位。公式(10)说明满足稳相条件的光场可以近似认为空间位置与空间频率一一对应,此处 k_x 实际上是通过局部空间频率来近似的,这也是为什么全空域分布的空间频率能够近似为空间与空间频率单点映射——局部空间频率

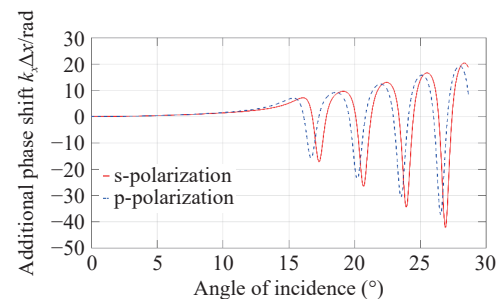
是相位对空间坐标的偏导,它是依赖空间位置的,同时 k_x 也是实际波前波矢的横向分量(稳相条件等效程函方程),也就是实际光线传播的方向,实际也就是形成了入射角度和空间位置的一一对应。这个结果与传统方法求反射系数时的平面波假设一致,这样在空间频域中计算的反射系数可以直接作用到空间域分布的电场上,换言之,仍然建立起空间中反射系数与入射角度的关系。横向位移与空间位置对应关系为:

$$\Delta x = -\nabla_{k_x}(\Delta\tilde{\psi}(k_x)) \quad (11)$$

$\Delta\tilde{\psi}$ 是从空间频域膜层引入的相位,在稳相条件下等价于矩阵方式计算的反射相位。横向位移实际上就是古斯汉森位移,基于该算法得到的横向位移公式与古斯汉森位移公式也高度一致。可以看出横向位移除了改变光线追迹过程外,还引入同反射相位类似的额外相位变化,三者共同作用下将会对像质产生难以预估的变化,图3中给出了表面3膜层的横向位移、额外相移随入射角度的典型变化,在入射角度较大时,横向位移可达上百纳米。



(a) 横向位移 Δx 随入射角的变化
(a) Lateral shift Δx versus angle of incidence



(b) 额外相移 $k_x \Delta x$ 随入射角的变化
(b) Additional phase shift $k_x \Delta x$ versus angle of incidence

图3 横向位移和额外相移随入射角的变化,入射角范围0~28°

Fig. 3 Coating-induced lateral shift and the associated additional phase versus angle of incidence (AOI = 0~28°).

3 镀膜系统波像差分析

对于成像系统而言,等相位面是球面加上一些像差扰动,因此是符合稳相条件的。为了证明算法有效性和系统级分析的可行性,验证算法与 Bal^[9] 有效深度算法计算得到的横向位移来证明分析的可靠性。在 Bal 的算法中,横向位移为

$$\Delta x = -\frac{\sin \theta}{k \cos^2 \theta} \frac{\partial^2 \Delta \tilde{\psi}}{\partial \theta^2}, \quad (12)$$

θ 为入射角, k 为波数。图 4 反映了膜层断点追迹算法和有效反射深度算法的差异,膜层参数选用 2.1 小节表面 3 的膜层,相位为 s 和 p 的平均相位。可以看出,由于 Bal 利用了低阶近似的方式,因此求解的横向位移在只有在较小入射角时会接近真实横向位移大小;本文算法结果与古斯汉森位移的表达一致,在原理上任意入射角度范围都可以准确计算。

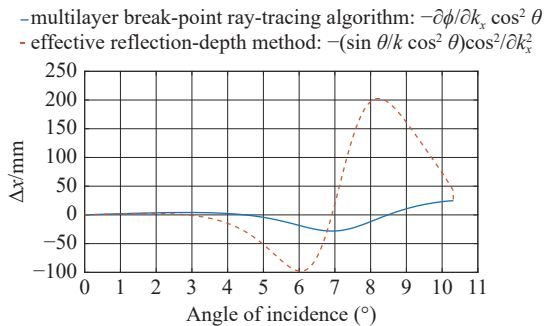
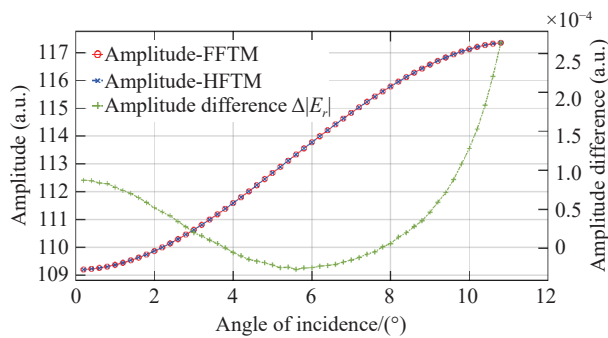


图 4 膜层断点追迹算法与有效反射深度算法计算的横向位移比较,二者在小角度下具有良好的 consistency

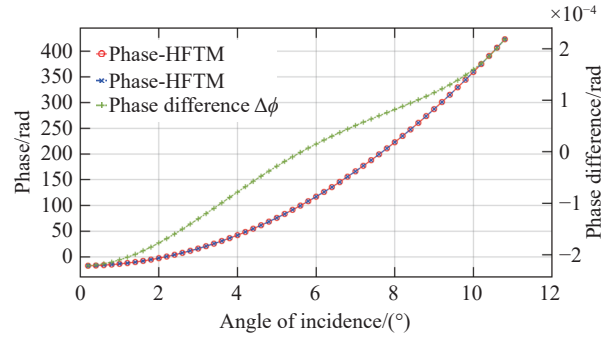
Fig. 4 Comparison of the lateral shift computed by the multilayer break-point ray-tracing method and the effective reflection-depth method; the two approaches agree well at small angles of incidence.

图 5 比较了傅里叶变换方法(FFT)和同胚



(a) 反射场振幅随入射角分布

(a) Reflected-field amplitude versus angle of incidence



(b) 反射场相位随入射角分布

(b) Reflected-field phase versus angle of incidence

图 5 FFT 与 HFT 计算的反射场振幅与相位随入射角分布,振幅、相位曲线对应左 y 轴,差值曲线对应右 y 轴

Fig. 5 Reflected-field amplitude and phase versus angle of incidence calculated using FFTM and the (HFTM): the amplitude/phase curves correspond to the left y-axis, and the difference curves correspond to the right y-axis.

傅里叶变换方法(HFTM)计算的柱面波反射电场振幅和相位(以及两种方法计算的振幅差和相位差)分布,两者结果基本一致,振幅差标准差为 $6.330E-5$,相位差标准差为 $1.306E-4$,证明 HFTM 算法的有效性。

3.1 不同波段镀膜系统的波像差比较

基于上述的原理,利用国产光学设计软件 GODAS 进行镀膜系统的分析,上述算法已经集成到软件中。对于一般成像系统,由于膜系总厚度小,工作波长长,膜系引入的标量波像差往往对系统不会带来太大的影响。如图 6 为了直观反应不同工作波段下的膜系影响,选择对三个工作波段下的反射系统进行对比分析,系统由一抛物面反射镜和倾斜平面镜(倾斜角为 45°)组成,视场选择为轴上 0° 视场。

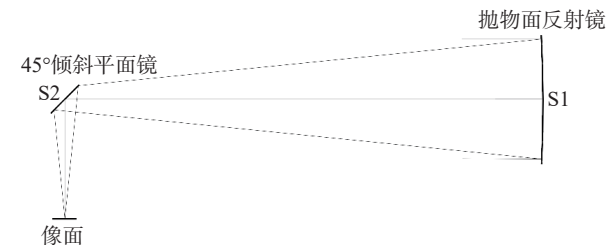


图 6 比较不同波段膜层影响的反射系统

Fig. 6 Test reflective system used to compare coating-induced effects at different wavelength bands.

由于膜层影响受制于表面入射角,为了放大膜层的影响,选择倾斜平面镜作为镀膜表面,波

前 RMS 结果如表 2 所示, 单位 λ 为系统工作波长, 分别为 13.4 nm、600 nm 及 1100 nm。应用于可见光和红外波段成像系统的反射膜通常为具有保护层的金属膜, 这种多层膜结构通常层数很少, 整体的物理厚度只有数百纳米, 往往不足 1λ ; 而对于此波段的多层介质膜, 也只有几个波长的厚度; 而深极紫外波段由于吸收效应很强, 为了达到所需的反射率往往使用数十乃至数百层的多层介质膜结构。为了体现膜层厚度的影响, 选取了 2 种多层膜结构用于可见光和红外系统, 表 2 括号中的数据是镀有 5 层镀膜 ($\text{TiO}_2/\text{SiO}_2/\text{Al}$, 膜系一) 系统的波前 RMS, 总厚度只有 480 nm, 另一数据为 22 层 ($\text{TaO}_5/\text{SiO}_2/\text{Ag}$, 膜系二) 反射膜, 总厚度达到 $2\ \mu\text{m}$ 。根据 Marechal Criterion^[21], 对于可见光和红外波段下的系统而言, 此量级的波像差下仍可认为系统完美成像; 对于极紫外波段而言, 波前 RMS 已急剧增加。

表 2 倾斜平面镜镀膜前后波前 RMS, 对 600 nm 和 1100 nm 采取 2 种膜层形式, 括号中数据是镀有膜系一的波前 RMS

Tab. 2 RMS wavefront error of a tilted plane mirror before and after coating. Two alternative multilayer designs are used for the 600-nm and 1100-nm cases; values in parentheses correspond to the alternative design.

波长/nm	镀膜前RMS(λ)	镀膜后RMS(λ)
13.4	0.0000	0.1691
600	0.0000	0.0440(0.0069)
1100	0.0000	0.0203(0.0038)

可以看出, 镀膜引入的波像差影响对短波段成像质量要求高的系统更值得关注, 对短波段高成像要求的光学系统而言, 膜层引起的波像差效应已不能忽视, 因此, 下一章节将选择 EUV 镀膜系统作为代表性的系统进行膜层引起的波像差分析。

3.2 EUV 镀膜系统波像差分析

本实例 EUV 系统是弦长 104 mm, 宽 8 mm 的弧形扫描视场, 放大倍率 0.25, 工作波长 13.4 nm, 关于 yOz 平面对称, 出于对称性以及减少采样点数的考虑, 选择沿 x 正方向进行采样, 负方向与正方向采样值相同。如图 7 所示, 共计 25×11 个采样点。

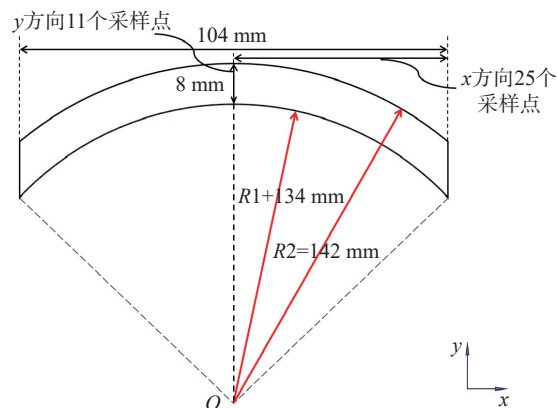
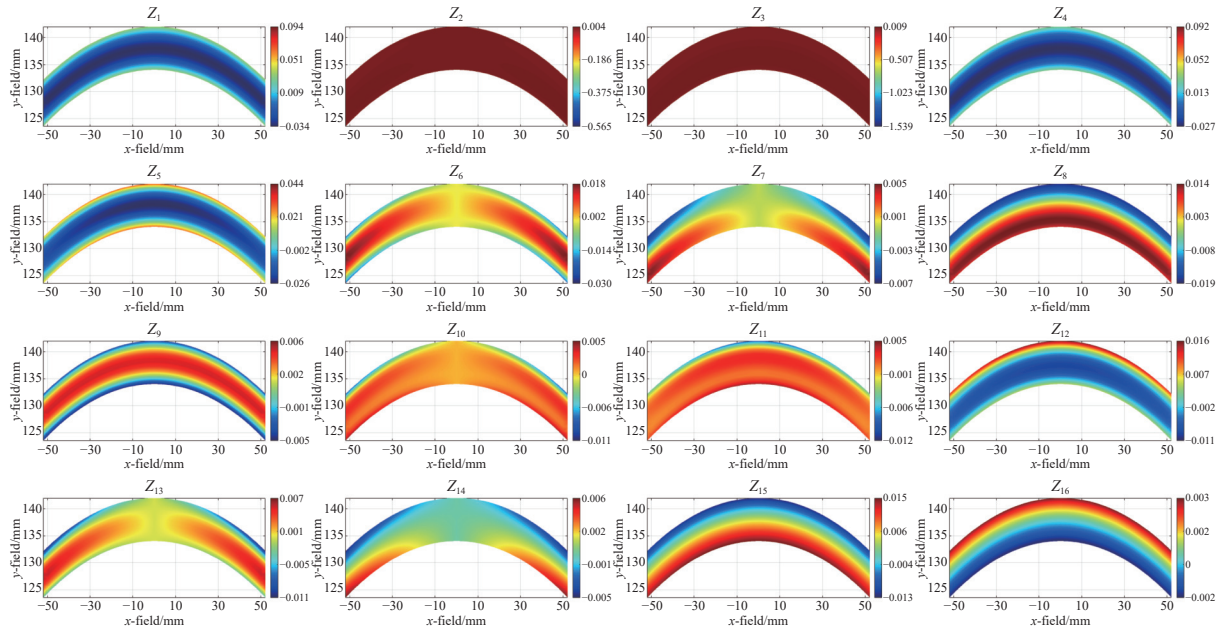


图 7 弧形视场形状及视场采样数

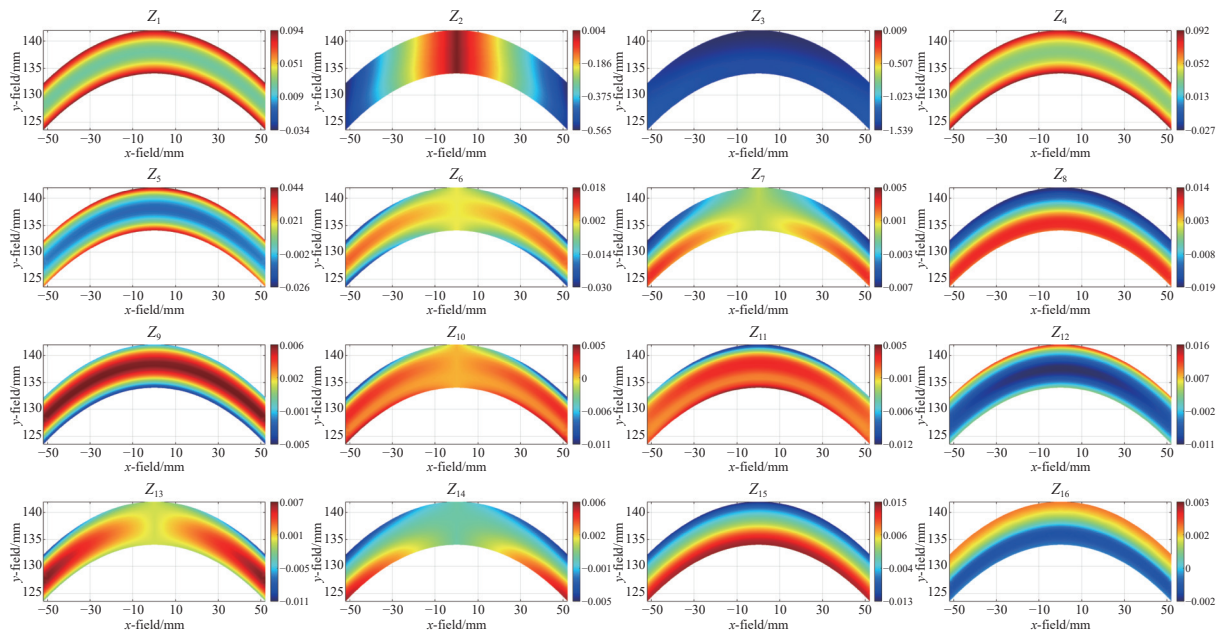
Fig. 7 Curved scanning field and the corresponding field-sampling grid.

图 8 反应的是 EUV 全视场波像差的分布情况, 三幅图绘制的都是 Fringe Zernike 系数在弧形视场的分布(后续描述的 Zernike 系数均指 Fringe Zernike 类型, 不再额外说明), 由于高阶项镀膜前后都很小, 因此只给出前 16 项的情形, 其中 (a) 表示裸系统情况下波像差, (b) 表示镀膜系统的波像差, 而 (c) 则表示膜层给系统附加的波像差。各 Zernike 项沿视场的变化通过对全视场 Zernike 求 RMS 可以得出, 单位 λ 为 13.4 nm(此后单位 λ 均为 13.4 nm), 参见表 3 可以看出 Z2-Z4 项有显著的增加, 而其余的像差项 RMS 变化则小很多。这说明对单个视场点而言, 镀膜之后产生了非常大的波前倾斜项和显著的离焦项, 这一结果与 Duddles 和 Bal 的研究结果相似, 不同的是, 根据本研究得到的波前倾斜量比之前研究中的结果要大得多, RMS 高达 0.727λ , 会使像点严重偏离理想位置, 造成放大率明显变化。这个结果很大程度上是由于前文提到的横向位移效应引起的, 横向位移累计可达数百纳米乃至微米, 它改变光线离开镀膜表面的位置, 在均匀介质中传播后入射到下一表面的空间路径和位置会发生改变, 进而影响后续的光线追迹过程; 同时, 横向位移也会产生额外相移, 由于在非法向入射时横向波矢 k_x 很大, 即使横向位移非常小, 也会引入明显的相位变化, 经过多个表面的累积效应, 在出瞳面产生显著的波前倾斜, 而离焦可以视作由于光束关于主光线具有一定的对称性, 算法计算得到的相位以及横向位移也由此具有一定的对称性, 这种对称性造成的成像缺陷更多体现为离焦, 根据下文分析可知, 离焦 RMS 为 0.034λ 。



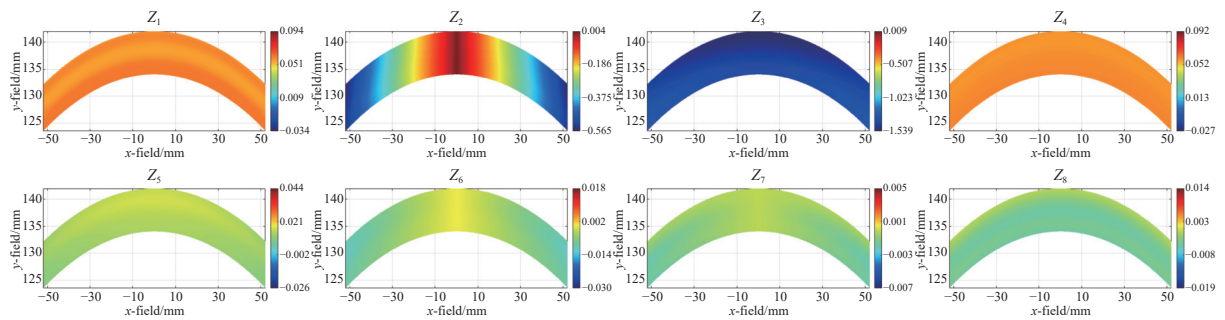
(a) 裸系统全视场波像差

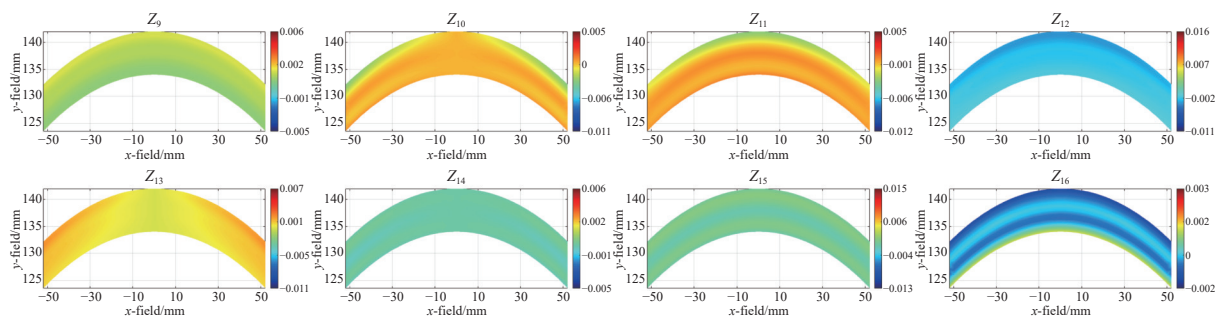
(a) Full-field wavefront aberration of the uncoated system



(b) 镀膜系统全视场波像差

(b) Full-field wavefront aberration of the coated system





(c) 膜层引入的全视场波像差
(c) Coating-induced full-field wavefront aberrations.

图 8 裸系统、镀膜系统及膜层引入波像差的前 16 项 Zernike 系数全视场分布, (a)、(b)、(c)中相同 Zernike 项绘制范围一致

Fig. 8 Full-field maps of the first 16 Fringe-Zernike coefficients for (a) the uncoated system, (b) the coated system, and (c) the coating-induced aberration (coated minus uncoated); for each Zernike term, the color scale limits are kept identical in (a)–(c).

表 3 裸系统和镀膜系统的各 Zernike 项沿视场变化的 RMS (单位: $\lambda@13.4 \text{ nm}$)

Tab. 3 Field-dependent RMS of each Fringe-Zernike term for the uncoated and coated systems (unit: $\lambda@13.4 \text{ nm}$).

Zernike项	未镀膜	镀膜
Z2	0.00121	0.31954
Z3	0.00537	1.41882
Z4	0.01855	0.05474
Z5	0.01623	0.01565
Z6	0.00752	0.00727
Z7	0.00242	0.00223
Z8	0.01071	0.00995
Z9	0.00323	0.00387
Z10	0.00165	0.00213
Z11	0.00225	0.00296
Z12	0.00605	0.00660
Z13	0.00278	0.00304
Z14	0.00184	0.00181
Z15	0.00806	0.00790
Z16	0.00143	0.00111

3.3 膜层引入波像差的视场相关性分析

上述分析过程仅仅分析了每一项系数的视场分布的 RMS, 没有考虑像差关于视场的分布类型。在之前的研究中, 也未有对像差的视场分布类型做出很好的评估, 为了全面的反映 EUV 系统全视场波像差变化, 采取了以下方法进行分析: 用 Zernike 系数来表征单个视场各种波像差的大

小, 之后对全视场 Zernike 系数采样, 然后用正交多项式来拟合系数分布, 表征像差沿视场的分布情况。采用正交多项式的优势是普通多项式各项之间系数是耦合的, 在加入膜层后, 某些与视场有关波前项可能会出现巨大的变化, 拟合系数自然应该变得比较大, 而其余项可能并未产生显著变化, 但由于耦合它们的系数仍然会产生改变, 造成像差分析的误判。对于 EUV 系统, 幂级数多项式有很好的物理解释性, 但由于视场是弧形视场, 幂级数解析多项式在该区域并不正交, GSO 理论上可以对任意区域构建正交多项式, 同时保留了与幂级数多项式相似的物理解释性。由于系统沿 yoz 平面对称, 因此 x 方向的分布一定是对称的, 因此选择的原始基函数是 $x^2m y^n$, 利用 Gram-Schmidt 正交化(GSO)^[22-24]方法得到在弧形域内正交的多项式。新的多项式集 X' 由原始的幂级数多项式集 X 组成,

$$X' = DX \quad , \quad (13)$$

D 是系数矩阵, 其中元素 d_{ij} 是用于表示组成第 i 项正交多项式 V_i 的第 j 项原始多项式 U_j 的系数,

$$V_i = \sum_{j=1}^i d_{ij} U_j \quad , \quad (14)$$

经过上述方法对 Zernike 系数进行分解, 发现系统每种像差(Zernike 项)沿视场的低阶分量是主要的, 本研究选择的原始多项式阶数为 $m=3$, $n=3$, 总计 16 项, 表 4 仅列出了组成 1-9 项正交多

项式的原始基函数的系数, 对应原始基底为: (1, $y, y^2, y^3, x^2, x^2y, x^2y^2, x^2y^3$), 根据 GSO 方法的原理, 第 i 项多项式正交化只与原函数集的前 i 项有关, 因此矩阵 D 是个下三角矩阵。

表 4 对 $x^{2m}y^n$ 正交化的前 8 项系数矩阵

Tab. 4 Coefficient matrix of the first eight terms in the orthogonalization of $x^{2m}y^n$

1	y	y^2	y^3	y^4	x^2	x^2y	x^2y^2
1.000	0	0	0	0	0	0	0
-34.910	36.832	0	0	0	0	0	0
1.015E3	-2.153E3	1.142E3	0	0	0	0	0
-2.993E4	9.555E5	-1.016E5	3.600E4	0	0	0	0
4.701E3	-1.531E4	1.654E4	-5.934E3	5.5765	0	0	0
6.466E3	-1.799E4	1.646E4	-4.941E3	-301.235	319.7468	0	0
-8.479E4	2.652E5	-2.763E5	9.594E4	1.101E4	-2.341E4	1.244E4	0
4.543E4	-1.434E5	1.509E5	-5.291E4	-1.167E5	3.743E5	-4.001E5	1.425E5

利用 GSO 得到的正交多项式对这些 Zernike 系数进行拟合, 可以得到波像差随视场的变化规律。

$$Z_i(x,y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N c_{i_m_n} P_{mn}(x,y) \quad (15)$$

其中 $c_{i_m_n}$ 是第 i 项 Zernike 项在弧形视场内的正

交多项式系数, $P_{mn}(x,y)$ 是对 $x^{2m}y^n$ 正交化后的多项式, 这样拟合后的每项与像差中的 $W_{mnpq}h_x^m h_y^n \rho_x^p \rho_y^q$ 相对应。为直观反映膜层引入的变化, 选择对镀膜与裸系统波前相减之后的结果进行拟合, 结合表 3 各项 RMS, 忽略波前的 Piston 项, 首先选择变化明显的 $Z_2 \sim Z_4$ 项进行分析, 三者的拟合结果和拟合误差如图 9 所示。

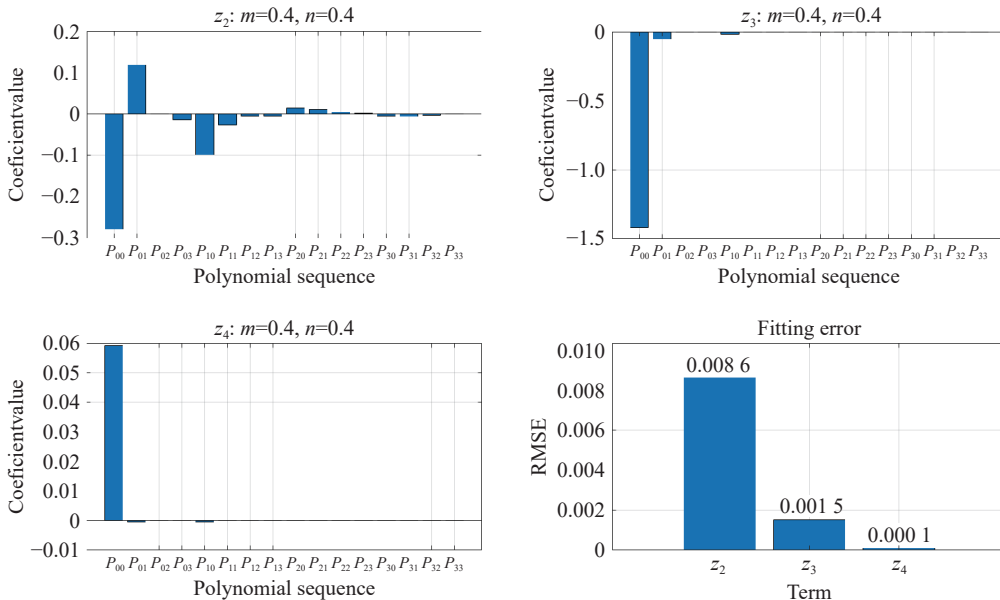


图 9 Z2 ~ Z4 拟合系数及拟合误差

Fig. 9 Fitting coefficients and fitting errors of Z2-Z4

图 9 表明膜层给系统带来的影响多为视场低阶项的变化。从图中可以看出膜层对 Z2 项的影响主要有(系数绝对值>0.02): -0.278λ 的 Z2_0_0

(x 方向平移, 整个方形网格沿某一方向产生同一大小的移动)、0.0118λ 的 Z2_0_1(x 方向的剪切, 网格沿 x 方向变为对称平行四边形)、-0.099λ 的

Z2_1_0(网格变为 x 方向边长不一的矩形, 越靠近中心视场网格长度越小并且不对称)、 -0.027λ 的 Z2_1_1; 对 Z3 项的主要影响有: -1.419λ 的 Z3_0_0(y 方向平移)、 -0.053λ 的 Z3_0_1(y 方向倍率, 方形网格变为同一大小矩形, 最大视场倍率由 0.2500001 变为 0.25000112); 对 Z4 项的主要影响有: 0.059λ 的 Z4_0_0(离焦, 引入的波像差 RMS 为 0.034λ)。表 5 展示了镀膜后各低阶像差

项的拟合系数, 单位: 波长。膜层引入的高阶像差项几乎为 0, 因此不再分析, 其中红色代表正值, 绿色代表负值。可以看出, 膜层引入的波像差 (Z5~Z9) 量级很小, RMS 只有 $3.608E-5\lambda$, 不会引起像质的明显退化。这些波像差主要造成像的变形, 需要进行后续畸变的优化, 而成像清晰度的劣化主要是像面离焦引起, 通过简单调整像面离焦量成像质量得到良好恢复。

表 5 正交多项式拟合的 Zernike 系数的视场分布 (单位: $\lambda@13.4\text{ nm}$)

Tab. 5 Field dependence of Zernike coefficients described by the orthogonal polynomial fitting (unit: $\lambda@13.4\text{ nm}$).

m	n	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9
0	0	-0.278	-1.419	0.059	0.012	-0.005	-0.001	-0.004	0.001
0	1	0.118	-0.053	-0.001	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
0	2	0.000	-0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0	3	-0.014	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	0	-0.099	-0.016	0.000	0.000	-0.002	0.000	0.001	0.000
1	1	-0.027	-0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	2	-0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1	3	-0.005	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0	0.014	-0.004	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	1	0.011	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	2	0.005	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	3	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0	-0.005	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	1	-0.006	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	2	-0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3	3	-0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	RMS	0.320	1.420	0.059	0.013	0.006	0.001	0.004	0.001
	RMSE	0.0086	0.0015	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

表 6 展示了镀膜前后以及调整离焦后全视场的波前 RMS, 一般 EUV 波前 RMS 需要小于 0.02λ , 而镀膜后即使去除倾斜, RMS 也出现明显的增大。经过调整离焦量, 可以使对比度恢复到接近衍射极限的水平。

目前有关膜层引起的像质退化, 更多的是采取梯度膜设计来降低膜层引入的像差影响, 而采用本论文建立的分析方法, 可实现直接对曲率、间隔、非球面系数等光学系统本身的参数优化进行系统性能恢复。优化时着重考虑控制畸变, 此外适当约束光线的平均入射角和入射角度范围不

要过大, 中间像面两侧的反射镜由于上下光线在镜面位置互易, 也有利于膜层像差的补偿。

表 6 EUV 裸系统和镀膜后的波前 RMS (单位: $\lambda@13.4\text{ nm}$)

Tab. 6 Full-field RMS wavefront error of the EUV system before and after coating (unit: λ at 13.4 nm).

	RMS	RMS(去除倾斜)
裸系统	0.01619	0.01588
镀膜	0.8422	0.04486
镀膜后离焦	0.6576	0.01707

4 结 论

本研究利用膜层断点追迹算法,结合传统光线追迹的方式,从完整的光学系统角度分析了膜层引入的标量波像差分布,并通过 GSO 方法对弧形视场膜层引入的波像差类型和大小进行分析。结果表明:对高精成像系统而言,多层膜对短波段系统影响显著,对于数值孔径 0.25 的六反 EUV 系统,均匀的 40 层 Mo/Si 膜对系统波前引入了非常显著的倾斜,通过全视场波前分析,发现膜层对

系统的主要影响是引起像面变形和像的移动,导致全视场波前产生 0.727λ 的倾斜,主要引起像平移(占最主要部分)、倍率和少量高阶的畸变。对于成像清晰度的影响是微弱的,主要产生 0.034λ 的离焦,通过调整离焦可以显著恢复;对于畸变的影响可通过控制质心位置与理想位置的偏差进行约束。本研究实现了包含膜层影响的高精度全系统分析,提供一种可以在设计阶段纳入膜层影响的系统分析方法,为后续高精镀膜系统的优化提供一种新的思路。

参考文献:

- [1] CIESIELSKI R, SAADEH Q, PHILIPSEN V, *et al.*. Determination of optical constants of thin films in the EUV[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(8): 2060-2078.
- [2] MACLEOD H A. *Thin-Film Optical Filters*[M]. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- [3] MA J Y, REN J L, ZHANG J H, *et al.*. Quantum imaging using spatially entangled photon pairs from a nonlinear metasurface[J]. *eLight*, 2025, 5(1): 2.
- [4] MA SH J, YAN L, YE H K, *et al.*. Polarization aberration in catadioptric anamorphic optical system[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12765: 127651S.
- [5] HE CH, ANTONELLO J, BOOTH M J. Vectorial adaptive optics[J]. *eLight*, 2023, 3(1): 23.
- [6] 吕金锦, 祝青霞, 路易, 等. 正交线偏振光成像制导镜头的设计与仿真[J]. *飞控与探测*, 2023, 6(2): 23-28.
LYU J J, ZHU Q X, LU Y, *et al.*. Design and simulation of orthogonal linearly polarized imaging guidance lens[J]. *Flight Control & Detection*, 2023, 6(2): 23-28. (in Chinese).
- [7] 罗敬, 陈兴达, 吕凝睿, 等. 光学系统偏振特性影响抑制方法综述[J]. *中国光学(中英文)*, 2025, 18(5): 979-1015.
LUO J, CHEN X D, LV N R, *et al.*. A review of methods for suppressing the influence of polarization characteristics in optical systems[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(5): 979-1015. (in Chinese).
- [8] LIU X L, HUANG Y, YAN X, *et al.*. The correction method for wavefront aberration caused by spectrum-splitting filters in multi-modal optical imaging system[J]. *Photonics*, 2024, 11(9): 876.
- [9] BAL M F, SINGH M, BRAAT J J M. Optimization of multilayer reflectors for extreme ultraviolet lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2004, 3(4): 537-544.
- [10] REILEY D J, CHIPMAN R A. Coating-induced wavefront aberrations[J]. *Proceedings of SPIE*, 1992, 1746: 139-146.
- [11] LIANG CH, 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.
- [12] SMITH B W. Optical considerations of EUVL wavelength, NA, and multilayers at large angles[J]. *Proceedings of SPIE*, 2025, 13424: 1342402.
- [13] BROVELLI L R, KELLER U. Simple analytical expressions for the reflectivity and the penetration depth of a Bragg mirror between arbitrary media[J]. *Optics Communications*, 1995, 116(4-6): 343-350.
- [14] 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.
WANG J, JIN CH SH, WANG L P, *et al.*. Foundation and application of model for multilayers analysis in extreme ultraviolet lithography projection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0811002. (in Chinese).
- [15] 来搏, 蒋励, 齐润泽, 等. 40~90 nm 波段极紫外多层膜研究进展[J]. *光学精密工程*, 2024, 32(9): 1293-1306.
LAI B, JIANG L, QI R Z, *et al.*. Research developments of extreme ultra-violet multilayers for 40-90 nm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2024, 32(9): 1293-1306. (in Chinese).
- [16] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50-30,000$ eV, $Z = 1-92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 54(2): 181-342.

- [17] ZHANG Y, ZHANG S T, ZHENG Y H, *et al.*. Algorithm for accurate and efficient calculation of coating-induced effects[J]. *Optics Express*, 2024, 32(17): 29279-29290.
- [18] GOODMAN J W. *Introduction to Fourier Optics*[M]. 3rd ed. Englewood: Roberts & Co. Publishers, 2005.
- [19] MANSURIPUR M. *Classical Optics and its Applications*[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.
- [20] WANG Z ZH, BALADRON-ZORITA O, HELLMANN C, *et al.*. Theory and algorithm of the homeomorphic Fourier transform for optical simulations[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10552-10571.
- [21] SASIÁN J. *Introduction to Aberrations in Optical Imaging Systems*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012.
- [22] CHAI X Y, ZHANG H B, LIN X Y, *et al.*. Method for orthogonal fitting of arbitrary shaped aperture wavefront and aberration removal[J]. *Optical Engineering*, 2024, 63(5): 054112.
- [23] BAUER A, TAKAKI N, ROLLAND J P. Design methods for imaging with freeform optics[J]. *Optica*, 2025, 12(11): 1775-1793.
- [24] CHAI X Y, LIN X Y, CHEN H T, *et al.*. Zernike polynomials fitting of arbitrary shape wavefront[J]. *Proceedings of SPIE*, 2024, 13069: 1306912.

作者简介:



王庆国(2001—), 男, 山东淄博人, 硕士研究生, 2023年于东北石油大学获得学士学位, 主要从事光学系统设计研究。E-mail:1733641607@qq.com



赵尚男(1993—), 女, 吉林长春人, 博士, 副研究员, 主要从事光学设计仿真、超构表面设计的研究。E-mail:18810575846@163.com