

文章编号 1004-924X(2011)11-2565-08

基于反射镜表面粗糙度计算极紫外望远镜分辨率

杨 林^{1,2*}, 郑贤良^{1,2}, 陈 波²

(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 研究生院, 北京 100039)

摘要:针对短波段成像系统中的散射问题,提出了一种基于反射镜表面粗糙度来计算极紫外太阳望远镜工作波段分辨率的方法。首先分析了两镜系统中散射光线的传播,讨论了反射镜表面粗糙度相对波长的比值与像面光强分布的关系。分频段测量了反射镜的表面粗糙度,利用 k -相关模型拟合出全频段的一维功率谱密度(PSD)。数值计算结果表明:在 $1/D$ 到 $1/\lambda$ (λ 为入射光波长)的空间频率范围内,主次镜的有效均方根表面粗糙度分别为 0.59 nm 和 0.77 nm。利用 Zemax 光学设计软件,建立了包含反射镜表面粗糙度测量数据的极紫外(EUV)望远镜非序列模型,该计算模型能够反映出反射镜表面散射对像面分辨率的影响,结果显示,在 30.4 nm 波段,包含 80% 的能量半径从 3.9 μm 增大到 4.3 μm ,望远镜在工作波段相应的分辨率为 0.25",满足设计要求。

关键词: EUV 太阳望远镜;反射镜;表面粗糙度;功率谱密度;分辨率

中图分类号: TH745;P111.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111911.2565

Calculation of resolution for EUV telescope based on surface roughness of mirrors

YANG Lin^{1,2*}, ZHENG Xian-liang^{1,2}, CHEN Bo¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

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

Abstract: According to the surface scattering of a mirror surface at the short wavelength band, a resolution calculation method based on the surface roughness of mirror was presented for an Extreme Ultraviolet(EUV) telescope. First, the propagation of scatter light in two mirror systems was analyzed in details, and the relationship between the distribution of light energy on focal plane and the ratio of mirror surface roughness to wavelength was discussed. The surface roughness of the mirror was measured in different wavelength bands and the one-dimensional Power Spectral Densities(PSDs) on all relative spatial frequency ranges were fitted by a k -relevant model. The numerical results show that the effective RMS surface roughnesses of primary and secondary mirrors are 0.59 nm and 0.77 nm in

收稿日期:2010-09-13;修订日期:2010-11-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.10878004, 40774098)

the spatial frequency from $1/D$ (D is the diameter of the mirror) to $1/\lambda$ (λ is an incident wavelength). The optical design software Zemax was used to build a non-sequence model of EUV telescope which contains the information about mirror surface roughness. This model can reveal the behavior of scatter light on the mirror surface and can calculate the resolution of the image plane. The results indicate that the radius of 80% energy changes from $3.9\ \mu\text{m}$ to $4.3\ \mu\text{m}$ and the corresponding angular resolution of the telescope is $0.25''$. This method is convenient, effective and suitable for imaging evaluation.

Key words: Extreme Ultraviolet(EUV) solar telescope; mirror; surface roughness; Power Spectrum Density (PSD); resolution

1 引言

长期以来,表面散射现象在科学和工程领域一直是一个重要的研究内容。在分析粗糙表面引起散射的各种理论中,Rayleigh-Rice 提出将矢量微扰法的表面散射理论用于“光滑表面”,要求粗糙度与波长比值小;Beckman-Kirchhoff 标量散射理论用于“更为粗糙的表面”,但是受近轴假设和小角度散射的限制。Harvey 和 Krywonos 结合二者优点,从线性系统理论出发给出了不受散射角度和表面粗糙度限制的表面散射理论^[1-2]。对短波光学(X-ray 和 EUV)成像系统而言,反射镜表面粗糙度引起的散射是影响成像质量的重要因素之一,其主要影响表现在:(1)一些散射光无法传播到焦平面,减小了到达像面的光通量,降低了光学系统的能量传输效率。(2)大角度散射会产生杂光,降低像面的对比度或者信噪比。(3)小角度散射会使图像变模糊,降低光学系统的分辨率。这类仪器的检测方法主要以间接检测为主,在地面上利用可见光进行成像检测,然后利用干涉仪测量光学元件的面型误差,由此计算出工作波段的点扩散函数来判断在工作波段下的角分辨率,例如 SOHO、MSSTA 和 Hi-LiTE 等均采用这种办法^[3-5]。面型误差作为低频段的误差主要产生球差、彗差、像散等标准像差,因此上述方法是在考虑设计的几何残差、装调误差及面型误差的情况下得到的仪器几何分辨率,未能体现出短波段的散射带来的影响。

极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)太阳望远镜^[6-7]是用于太阳观测的空间仪器,工作波段为 30.4, 19.5, 17.1 和 13.0 nm,设计工作分辨率为 $0.8''$ 。这些工作波段的成像检测开展起来十分困难,很难全面地获知散射对成像的影响。高亮在

博士论文^[8]中给出了单面反射镜散射引起的像面分辨率变化的分析和计算方法,但对于两镜的正入射反射式光学系统,该方法并不适用。因此为了获得 EUV 望远镜工作波段下包含散射影响的分辨率,本文提出了一种基于反射镜表面粗糙度的望远镜分辨率计算方法。主要分析了两镜系统中散射光线的传播,通过对反射镜表面粗糙度的实测和数值处理,利用光学设计软件 Zemax 的非序列功能建立了望远镜工作波段散射的分析模型,该模型能够对短波长下像面光强分布进行计算,为 EUV 望远镜的性能判断提供了一个新的方法。

2 两镜系统中的散射

由于 EUV 太阳望远镜工作波长短,散射是影响其成像质量的重要因素。粗糙表面对入射光的反射分为镜向反射和散射。散射造成镜向反射率的衰减和像面弥散斑的加大,减小了到达像面的光通量,降低了光学系统的分辨率。对于单反射面,光线经过其表面的反射用镜向反射系数 A 和散射系数 B 来描述,其中 A 表示镜向反射光强占反射光的比值, B 是散射光强在反射光强中的比值^[9]:

$$A = \exp[-(4\pi\cos\theta_i\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2], \quad (1)$$

$$B = 1 - A = 1 - \exp[-(4\pi\cos\theta_i\sigma_{\text{eff}}/\lambda)^2], \quad (2)$$

式(2)中 B 又被称为总体积分散射(TIS),是描述表面散射的一个重要参数。 θ_i 是光线的入射角, λ 是入射光波长, σ_{eff} 是整个相关频段内的有效 RMS 表面粗糙度^[10]。该粗糙度的平方等于测量表面的二维功率谱密度在全频段里面的积分。

EUV 望远镜是正入射的两反结构望远镜,其光线传播也应当遵循单反射镜的性质,因此也能

像单面反射镜那样定义出两反结构的反射系数和散射系数。图 1 是光线在两反结构望远镜中的传播示意图,入射光线经过主镜反射后,分为镜向反射光线 A_p 和散射光线 B_p 。这两类光线到达次镜

再次反射,其传播也分为镜向反射和散射,所以入射光线依次通过主次镜后根据传播的路线分成 4 个部分:镜向-镜向光线、镜向-散射光线、散射-镜向光线和散射-散射光线。

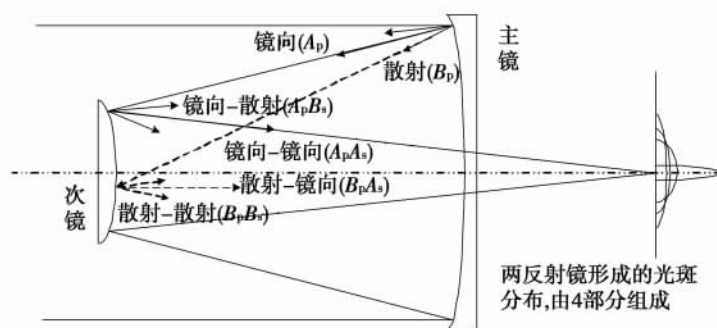


图 1 两反射镜系统望远镜的散射示意图

Fig. 1 Illustration of scattering in a two-mirror telescope

若忽略视场外的散射光强,即假设图 1 中所有光线最终都能到达像面,两镜系统望远镜的像面光强则正是上述 4 个部分的总和。设入射总光强为 P_{total} ,那么各部分在总光强中所占比重为:

$$\text{镜向-镜向部分: } P_{dd}/P_{total} = A_p A_s,$$

$$\text{散射-镜向部分: } P_{sd}/P_{total} = B_p A_s,$$

$$\text{镜向-散射部分: } P_{ds}/P_{total} = A_p B_s,$$

$$\text{散射-散射部分: } P_{ss}/P_{total} = B_p B_s.$$

上面 A_p, A_s, B_p 和 B_s 是主次镜的反射系数和散射系数,下标 p, s 分别代表主镜、次镜。在已知反射镜的表面粗糙度的情况下可以通过式(1)和式(2)计算得到上述 4 个系数,从而求出各部分光强所占比重。图 2 是两镜系统望远镜像面光强关于均方根粗糙度和入射光波长比值 (σ/λ) 的函数示意图,从图中可以看出,随着 σ/λ 的增大,镜向-镜向部分光强减小,能量开始向散射部分转移。当 $\sigma/\lambda = 0.066$ 时,上述 4 个部分分别占总光强的 1/4, σ/λ 继续增大至 0.14 时,镜向反射光强 ($A_p A_s$) 部分接近零,此时光强全部转移到散射部分。这种情况表示对于粗糙的反射表面,反射光主要以散射为主,几乎没有镜向的反射。在这种情况下,望远镜像面上全是散射的光强,不能成像。因此对应用于短波段的望远镜而言,散射对成像质量的影响有可能远远大于设计的几何像差和衍射的影响。E. M. Gullikson 利用 Born 的近似表达式,在近正入射角的条件下计算了多层膜反射镜的散射光强分布^[12],发现在小于 10° 的散射角范

围内计算结果和动力学理论结算结果一致,理论上证明了表征反射镜表面粗糙度的功率谱密度函数可以用来评价成像影响。因此,为了确定散射对成像质量的影响,需要 σ/λ 中的 σ 值来对反射镜引起散射性质进行准确的描述。在各种光学设计软件中,均提供了散射分析的功能组件,要求对引起散射的物体表面建立具体的物理模型来进行光线追迹以获得该散射面反射光线的空间分布。Nicodemus^[11] 提出的双向反射分布函数 (BRDF),其定义为反射面的反射(散射)光强与入射光强的比值,该函数和反射面的表面粗糙度有着内在的联系。大多数的光学设计软件都支持使用 BRDF 数据来定义散射面,因此使用基于反射镜表面粗糙度的测量结果可以用来计算望远镜像面光强的分布。

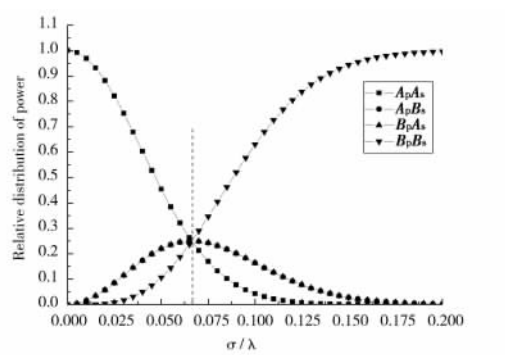


图 2 像面上光强的分布

Fig. 2 Energy distribution on focal plane determined by various σ/λ

3 表面粗糙度的测量

任何光滑表面在微观上都表现为三维的高低起伏,表面粗糙度就是对这种表面的高低起伏在 Z 方向上的统计描述 $Z(x, y)$ 。早在 20 世纪 80 年代,Stover 和 Elson 就在进行光学散射的量化及光学散射与光学元件表面的粗糙度的研究中,奠定了光学表面元件的频谱分析的基础。Church 还第一次明确提出了光学表面功率谱密度的公式,利用功率谱密度(PSD)来表征光学元件表面粗糙度。PSD 是用频率域来描述表面轮廓幅度和间距特性的一个重要函数,是对光学元件空间域上的表面轮廓函数做傅里叶变换的结果,一维 PSD 的数学定义^[13]为

$$PSD(f) = \frac{1}{2l} \left| \int_{-l}^l z(x) \exp(-i2\pi fx) dx \right|^2, \quad (3)$$

其中 f 为空间频率, l 是采样长度, $z(x)$ 是表面轮廓高度函数。尽管在特定的频率范围内一维的表面功率谱密度函数可以直观地表征光学表面形态,提供完整的表面粗糙度信息。但是在一些情况下,利用更为直观的表面粗糙度参数来描述表面可能更为有效。在文献[10]中 Church 定义表面粗糙度为

$$\sigma^2(f) = 2\pi \int_0^{\infty} PSD(f) f df. \quad (4)$$

如果积分上下限取特定的最大空间频率 $f_{\max}$ 和最小空间频率 $f_{\min}$, 则得到的是在特定频段内的有效表面粗糙度均方根 σ_{eff} 。当 $f_{\max}$ 和 $f_{\min} \rightarrow 0$ 的时候, σ_{eff} 趋近于数值精度的均方根粗糙度 σ 。对于反射镜来说,有效表面粗糙度的频段范围分别为 $1/D$ 和 $1/\lambda$, D 是反射镜的直径, λ 是入射光波长。式 4 表明求得感兴趣的全频段下 PSD, 就可以得到有效 rms 表面粗糙度,能够对工作波段下反射镜的散射进行描述。

3.1 功率谱密度的测量

全频段的 PSD 不能由一种仪器直接测量得到。现实中不同的粗糙度测试仪器的测量结果只对应一部分空间频率,不同仪器测出的粗糙度只是 PSD 在相应空间频率范围的积分,其频率范围由测量的面积和仪器分辨率决定。为了获取式

(1) 中有效 rms 粗糙度 σ_{eff} , 需要得到特定的频域范围($1/D \sim 1/\lambda$) 的 PSD 数据。本文分别使用了 Zygo 干涉仪、Wyko 轮廓仪和原子力显微镜 (AFM) 对反射镜进行粗糙度测试,得到的是 3 个不连续频段的 PSD,图 3 是利用上述仪器测量得到的主次镜的一维 PSD 图,采用了 log-log 坐标绘图。每个仪器都有内在的频段限制,其中 Zygo 干涉仪测量面积覆盖了反射镜的全口径,使用 $11.4 \times$ 物镜的 wyko 测量面积是 $603 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, AFM 的测量面积是 $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$, 分别对应的空间频率是 $8.7 \times 10^{-3} \sim 1.295 \text{ mm}^{-1}$, $1.65 \sim 304.8 \text{ mm}^{-1}$ 和 $500 \sim 6.4 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$ 。尽管 3 种仪器的测量结果是不连续的,却覆盖了高中低的频率范围,为后续的拟合提供了分布合理的数据。

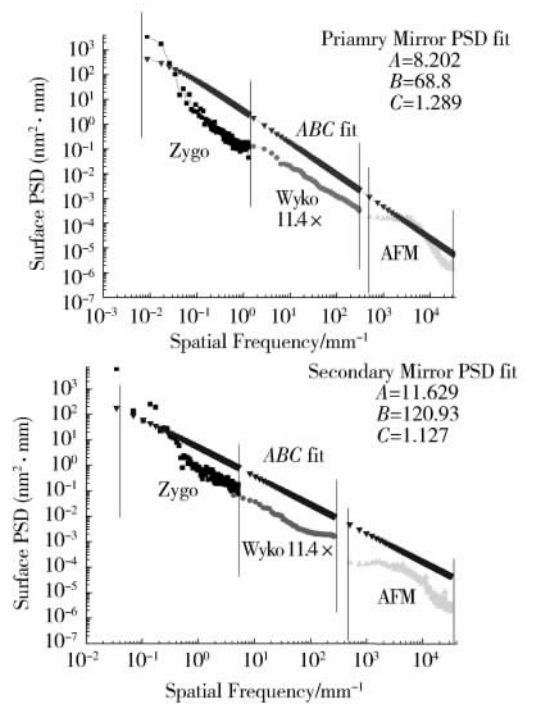


图 3 实际分频段测量的 PSD 和 k -相关模型 PSD 拟合曲线

Fig. 3 Measured PSDs at different frequency ranges and fitted PSD curves by k -correlation mode

3.2 有效 rms 粗糙度 σ_{eff} 的计算

对于许多抛光表面,利用测量得到的表面参数通过拟合的方法可以得到 PSD。图 3 中的 ABC fit 曲线就是对不同仪器分段测量得到的 PSD 结果,利用 k -相关模型(ABC 方程)进行拟合,外推至未知频率范围得到全频段的 PSD 方程曲线^[14]。拟合方程如式(5)所示,其中 ABC 是拟

合得到的系数:

$$PSD_{1D}(f_x) = \frac{A}{[1 + (Bf_x)^2]^{C/2}}. \quad (5)$$

图 3 显示的实际测量结果在数值上跨度很大,高达 10 个数量级,在较低的频率范围($f \leq 0.06 \text{ mm}^{-1}$),PSD 数值远远大于中高频范围的 PSD 值。为了照顾这个频段,拟合时适当地将曲线整体向上平移处理。假设反射镜是各向同性的表面,一维 PSD_{1D} 可以转换成更能直接描述表面散射的二维表面 PSD_{2D} ,具体的表达式可以在文献[14]中找到,其中的 ABC 与式(5)中的 ABC 系数相同,且 $f = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$,

$$PSD_{2D}(f) = K \frac{AB}{[1 + (Bf)^2]^{(C+1)/2}}, \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma((C+1)/2)}{\Gamma(C/2)}. \quad (7)$$

EUV 望远镜的主次镜直径分别为 120 mm 和 30 mm,相应的工作波长为 30.4 nm。两条拟合曲线对应的空间频率范围分别为 $8.3 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1} \leq f_p \leq 3.2894 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$ 和 $0.033 \text{ mm}^{-1} \leq f_p \leq 3.2894 \times 10^4 \text{ mm}^{-1}$ 。利用式(4)对拟合出的主次镜二维 PSD 积分,得到主镜 $\sigma_{\text{eff}} = 0.59 \text{ nm}$,次镜 $\sigma_{\text{eff}} = 0.77 \text{ nm}$ 。将二者带入式(1)得到主次镜的反射系数 A_p 和 A_s ,计算出反射镜表面粗糙度引起的望远镜像面散射光强为 $TIS = 1 - A_p A_s = 0.1485$,这也是入射光强的损失量。

4 工作波段分辨率计算

上节计算显示主次镜散射的光强能量占总反射光强的 14.8%。尽管由于散射角度的原因,实际到达像核的散射光强会比这个值要小,散射也是一个不可忽略的问题。从光学系统的杂散光观点来看,这一部分的散射光强正好充当了 EUV 望远镜在工作波段中的杂散光角色,可以预见的是对整个系统造成的影响除了降低系统的能量传递效率外,还可能降低系统的分辨率。为了确定这个影响,本文考虑使用光学系统杂散光的分析方法,首先建立望远镜的散射模型,由模型计算出像面光强分布以此分析工作波段下散射杂散光对系统分辨率的影响。

4.1 EUV 望远镜的散射模型

大多数的光学设计软件都提供了杂散光分析

功能模块,利用这些模块能够精确地计算光线在光学系统中包括反射、散射和吸收的各种传播路径。Zemax 的非序列功能可以分析成像系统中的杂散光和鬼像。在非序列空间,对于给定表面粗糙度的物体表面,每个入射光线在表面交点上都可以分裂成设定数目的光线,沿着实际光学路径传播。通过计算到达像面的光线的数目可判断像面的杂散光的能量分布。Zemax 提供了多种的散射面模型,包括 Lambertian, Gaussian, ABg 和通过编写 DLL 文件的用户自定义模型。

本文利用 Zemax 建立了包含了反射镜面型 Zernike 系数的 EUV 望远镜的非序列模型,反射镜面型 Zernike 系数的引入是为了使计算结果含有面型误差带来的几何像差影响。为了和先前测量 PSD 的拟合数据保持一致,选择 k -相关模型来建立反射镜的散射面。散射面的加入可以使表面的光线被分裂成镜像反射和散射两个部分进行追迹,其计算结果必然包含了散射对像面的影响。该模型的 dll 文件在 08 版以后的 Zemax 用户库可以找到。要求设定的参数为有效 rms 粗糙度 sigma、测量波长 ref. wave、 2π 倍的表面相关长度 B 、二维 PSD 的斜率 s 和反射面的折射率变化(对反射镜取 2)SFV1,参考文献[15-16]对这些参数有详尽的介绍和说明。模型的计算波长是 30.4 nm,探测器面大小设置为 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,像元数为 $200 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$ 。像元分辨率为 $0.2 \mu\text{m}/\text{pixel}$,可以很好地显示像面上的光强分布的细微变化。图 4 是利用 Zemax 建模的计算结果经过处理得到的像面上光斑的能量集中度(Encircled

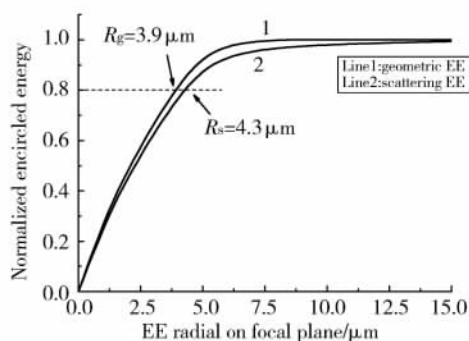


图 4 0° 视场下 EUV 望远镜的散射像面弥散斑能量集中度计算结果

Fig. 4 Encircled energy calculation for EUV telescope based on measured PSDs of mirrors at FOV of 0°

Energy, EE), 实线 1 是只包含面型误差的计算结果, 实线 2 是包含面型系数的 k -相关散射模型计算结果, 二者都进行了归一化。从图中可以看到, 散射模型计算得到的包含 80% 的能量半径从 $3.9 \mu\text{m}$ 增大到 $4.3 \mu\text{m}$ 。

4.2 工作波段分辨率的计算

EUV 望远镜角分辨率由下式计算得到:

$$\delta = \frac{d}{f} \times 206\ 265'', \quad (8)$$

式中, δ 是望远镜的角分辨率, d 是包含 80% 能量的弥散斑直径, f 是望远镜的焦距。图 4 中仅有面型误差的弥散斑直径 $2R_g$ 为 $7.8 \mu\text{m}$, 对应的角分辨率为 $0.23''$; 散射模型计算的弥散斑直径 $2R_s$ 为 $8.6 \mu\text{m}$, 相应的角分辨率为 $0.25''$ 。分析可知散射模型计算得到的分辨率由几何像差分辨率误差 δ_g 、衍射分辨率误差 δ_d 和散射分辨率误差 δ_s 组成, 根据误差传递的高斯函数得散射模型的分辨率 $\delta_i^2 = \delta_g^2 + \delta_d^2 + \delta_s^2$, 30.4 nm 光散射引起的分辨率误差为 $\delta_s = \sqrt{\delta_i^2 - \delta_g^2 - \delta_d^2} = 0.08''$ 。这里表面粗糙度对反射镜的反射率影响很大, 本文讨论的重点在于表面散射对成像分辨率的影响来考虑像面对比度的降低。因此利用该散射模型, 本文计算了另外两个波长的散射情况, 使用的参数是图 3 所示实测 30.4 nm 反射镜的参数, 可以对比在相同粗糙度的条件下像面散射引起角分辨率的变化。图 5 是 3 个工作波长的像面弥散斑的能量集中度的曲线图, 数据曲线的平滑是因半径积分造成的。因为粗糙度对反射率的影响, 3 个波长下不同的反射率使得最终到达像面的光强大小不同。但是

相对每一个波长来讲, 都可以用包含 80% 能量的半径作为分辨率的判据。因此把每个波长结果相对自己总能量进行归一化的处理, 所得到的 3 个波长的结果放在同一个 EE 和半径的坐标系中, 反映的是各自像面上光斑半径与能量的变化, 不代表 3 种波长之间相对光强的关系。可以看到在表面粗糙度参数不变的情况下, 图 5 中显示的能量集中度的半径随着波长的变小而增大, 表明短波段的散射对分辨率的影响更加明显。

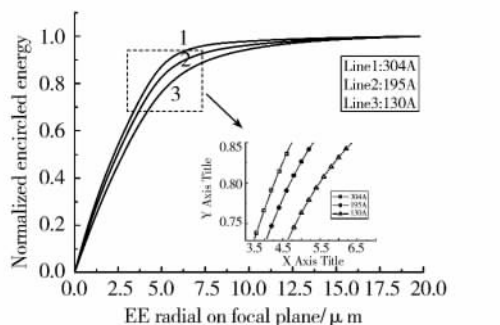


图 5 利用相同粗糙度参数计算的不同波长下望远镜的能量集中度分布

Fig. 5 encircled energy calculation for EUV telescope in various wavelengths based on the same PSD parameters

EUV 望远镜设计达到了衍射极限, 短波段下各个波长的几何设计残差对分辨率的影响几乎相等, 衍射影响略有不同。利用图 5 计算结果进一步分析如表 1 所示, 其中每个波段几何像差引起的角分辨率 δ_g 取相同值 $0.23''$, 衍射引起的角分辨率 δ_d 为 $1.22\lambda/D$ 。

表 1 3 个工作波长的角分辨率比较

Tab. 1 Angular resolution for three different wavelengths

波长/nm	80%EE 的直径 $d/\mu\text{m}$	对应角分辨率 $\delta_i/('')$	几何像差引起的分辨率误差 $\delta_g/('')$	衍射引起的分辨率误差 $\delta_d/('')$	散射引起的角分辨率误差 $\delta_s/('')$	TIS=1-A _p A _s /(%) ($\sigma_{\text{eff}}=0.59 \text{ nm}$ $\sigma_{\text{eff}}=0.77 \text{ nm}$)
30.4	8.6	0.25	0.23	0.06	0.08	14.8
19.5	9.4	0.28	0.23''	0.04	0.15	32.3
13.0	10.8	0.32	0.23	0.02	0.22	58.5

从表(1)可以看出, 随着波长向短波段方向偏移, 像面上包含 80% 能量的弥散斑直径变大, 散射引起的角分辨率 δ_s 也越来越大。在 13.0 nm 波段, 散射的角分辨率与几何残差的角分辨率几

乎相等, 主次镜的粗糙度所对应的 TIS=0.585, 到达像面的镜向光强为 0.415, 说明有一半的光强变成了散射光强, 这些光强降低了像面的对比度, 并作为系统的杂散光使得角分辨率严重下降。

这个变化趋势与第二节讨论的两镜系统中像面光强分布与 σ/λ 的关系是相符合的,同时也说明对于 13.0 nm 波段的反射镜需要进行要求更高的超光滑抛光来减小散射。在 MSSTA 的报道中^[17-18],17.1 nm 波段的 Cassegrain 望远镜首次获得了太阳的高分辨率 EUV 图像,在该波段散射对分辨率影响为 $1\sim 0.5''$,该望远镜的主次镜表面 rms 粗糙度水平在 0.5 nm,焦距为 2 000 mm,对应的弥散斑为 $9.6\sim 4.8\ \mu\text{m}$ 。2008 年的太阳动力学观测站(SDO)中焦距为 3 750 mm 的 AIA 望远镜上 0.44 nm 表面粗糙度的反射镜在 13.1~30.4 nm 波段因为散射产生了约 $0.42''$ 的分辨率误差^[19],对应的弥散斑为 $7.6\ \mu\text{m}$ 。本文设计的系统在 13.0 nm 波段的分辨率误差为 $0.22''$,但是焦距相对前面两个系统长一些,6 917 mm 的焦距相对于 $0.22''$ 的弥散斑为 $7.4\ \mu\text{m}$ 。和上述两个已发表的结果相比较,本文方法的计算结果处在一个合理的范围之内。值得一提的是,表 1 中 TIS 作为一个重要参数,反映了散射光强的大小,是由第二节的分析中基于两镜系统散射系数得到的,这个数值大于像面上实际散射光强比重,其原因是在光学系统反射镜实际的散射光

线中,只有散射角度不大于视场的散射光能够到达像面,大角度散射的散射光不可能达像面,到达像面的只是 TIS 中的一部分。尽管如此,可以得出结论,短波段散射对望远镜带来的直接影响有两个,即分辨率的降低和光通量的减少。

5 结 论

本文针对 EUV 望远镜工作波段的散射问题,提出了一种基于反射镜表面粗糙度计算望远镜工作波段分辨率的方法。主要分析了两镜系统中散射光强的传播路径,推导了望远镜的散射系数。根据实测的反射镜表面粗糙度数据,拟合出 PSD 的方程,以此为基础建立了包含散射面的 EUV 望远镜散射计算模型,通过模型计算得出了望远镜在 30.4 nm 波长的散射对望远镜的角分辨率改变为 $0.08''$,不影响望远镜的工作。结果证明,在考虑散射的情况下 EUV 望远镜的工作波段 30.4 nm 的角分辨率为 $0.25''$,小于 $0.8''$ 设计要求。该模型的建立提供了一种简单有效的 EUV 仪器工作波段分辨率计算方法,可以定量确定散射带来的影响。

参考文献:

- [1] STOVER J C. *Optical Scattering-measurement and Analysis*[M]. SPIE Press,1995.
- [2] HARVEY J E, KRYWONONS A, STOVER J C. Unified scatter model for rough surface at large incident and scattered angles[J]. *SPIE*, 2007, 6672: 66720C1-C8.
- [3] MARTINEZ-GALARCE D S, BOERNER P, SOUFLI R, *et al.*. The high-resolution lightweight telescope for the EUV (HiLiTE) [J]. *SPIE*, 2008, 7011:70113k-1-12.
- [4] MARTINEZ-GALARCE D S, WALKER A B C, GORE D B, *et al.*. High resolution imaging with multilayer telescope: resolution performance of the MSSTA II telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,39(4): 1063-1079.
- [5] DEFISE J M, MOSES J D,CATURA R C. Calibration of EIT instrument for the SOHO mission[J]. *SPIE*,1995,2517: 29-39.
- [6] 陈波,尼启良,曹建林等,空间软 X 射线/极紫外波段正入射望远镜研究[J]*光学精密工程*,1997,7(5): 89-94.
- [7] CHEN B, NI Q L, CAO J H, *et al.*. Development of a space soft X-ray and EUV normal incidence telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999,7(5): 89-94. (in Chinese)
- [8] 陈波,尼启良,王建林. 长春光机所软 X 射线一极紫外波段光学研究[J]. *光学精密工程*,2007,15(12): 1862-1868
- [9] CHEN B, NI Q L, WANG J L. Soft X-ray and extreme ultraviolet optics in CIOMP[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(12): 1862-1868.
- [10] 高亮. 极紫外太阳望远镜装调与检测技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2009:24-34
- [11] GAO L. *Study on the technique of alignment and imaging performance test of EUV solar telescope* [D]. Beijing:Chinese Academy of Sciences, 2009: 24-34. (in Chinese)
- [12] THOMPSON P L, HARVEY J E. System engineering analysis of aplanatic Wolter type[X-ray telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000,39:1677-1691.

- [10] LCHURCH E, TAKACS P Z. Light scattering from non-Gaussian surface [J]. *SPIE*, 1995, 2541:91-107.
- [11] NICODEMUS F E. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity[J]. *Applied Optics*, 1970, 9:1474-1475.
- [12] GULLIKSON E M. Scattering from normal incidence EUV optics[J]. *SPIE*, 1998, 3331:72-80.
- [13] CHURCH E L. Fractal surface finish parameters [J]. *Applied Optics*, 1988, 27:1518-1526.
- [14] HARVEY J E, CHOI N, KRYWONONS A. Calculation BRDFs from surface PSDs for moderately rough optical surface [J]. *SPIE*, 2010, 7426: 7426011-7426019.
- [15] DITTMAN M G. K-correlation power spectral density & surface scatter model [J]. *SPIE*, 2010, 6291:62910R1-R12.
- [16] GANGADHARA S. How to model surface scattering via the K-correlation distribution[R]. <http://www.Zemax.com/KB>
- [17] HARVERY J E, ZMEK W P, FTACLAS C. Imaging capabilities of normal-incidence X-ray telescope[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1990, 29: 603-608.
- [18] WALKER B C, LINDBLOM J F, O'NEAL R H, *et al.*. Multi-spectral solar telescope array [J]. *Optical Engineering*, 1990, 29: 581-591.
- [19] PODGORSKI W A, CHEIMETS P N, BOERNER P. *et al.*. SDO-AIA mirror performance[J]. *SPIE*, 2009, 7438:74380F1-F13.

作者简介:



杨 林(1983—),男,重庆人,博士研究生,主要从事光学设计及系统检测的研究。E-mail: pieroyang@163.com



郑贤良(1986—),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事短波光光学镀膜方面的研究。

导师简介:



陈 波(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984 于吉林大学获得学士学位,2003 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事软 X 射线极紫外波段光学和空间光学的研究。E-mail: chenb@ciomp.ac.cn