第 42 卷 第 9 期/2022 年 5 月/光学学报 研究论文

光学学报

龙虾眼 X 射线光学器件有效面积模拟仿真及测试

黎龙辉[1,2]，顾燕[1,2]，张振[1,2**]，徐昭[1,2]，张臣[3,4*]，凌志兴[3,4]，贾振卿[3,4]，赵冬华[3,4]，金戈[1,2]，李玉飞[1,2]，姜博文[1,2]，吴超[1,2]，杨晓明[1,2]，宋淳[1,2]，周新[1,2]，廖亦戴[1,2]，郭燕[1,2]，李婧雯[1,2]，韩晓明[1,2]，刘建强[1,2]

[1]北方夜视技术股份有限公司，江苏 南京 211106；

[2]北方夜视科技(南京)研究院有限公司，江苏 南京 211106；

[3]中国科学院国家天文台，中国科学院空间天文与技术重点实验室，北京 100012；

[4]中国科学院大学天文与空间科学学院，北京 100049

摘要 龙虾眼 X 射线聚焦望远镜是未来 X 射线空间天文观测的重要设备之一，这种设备将成为在各种太阳风条件下研究地球空间环境的有力工具。针对龙虾眼型 X 射线微孔光学器件有效面积的设计与仿真工作，研究了结构参数与几何收集面积的关系，并基于菲涅耳公式计算了不同膜层材料和表面粗糙度对 X 射线反射率的影响。利用 X 射线束流测试设备并采用单光子采集模式完成了有效面积 X 射线的性能测试。结果表明，龙虾眼型光学器件的有效面积主要由膜层材料与内壁粗糙度共同决定，同时沉积 Ir 膜后在能量为 1 keV 的情况下有效面积能从 2.15 cm^2 增大至 2.47 cm^2。

关键词 散射；龙虾眼；X 射线；聚焦成像；有效面积

中图分类号 O434.1 **文献标志码** A **DOI**：10.3788/AOS202242.0934001

Simulation and Test of Effective Area of Lobster Eye X-Ray Optical Device

Li Longhui[1,2], Gu Yan[1,2], Zhang Zhen[1,2**], Xu Zhao[1,2], Zhang Chen[3,4*], Lin Zhixing[3,4], Jia Zhenqing[3,4], Zhao Donghua[3,4], Jin Ge[1,2], Li Yufei[1,2], Jiang Bowen[1,2], Wu Chao[1,2], Yang Xiaoming[1,2], Song Chun[1,2], Zhou Xin[1,2], Liao Yidai[1,2], Guo Yan[1,2], Li Jingwen[1,2], Han Xiaoming[1,2], Liu Jianqiang[1,2]

[1] *North Night Vision Technology Lo., Ltd., Nanjing* 211106, *Jiangsu, China*;

[2] *North Night Vision Science & Technology (Nanjing) Research Institute, Lo., Ltd., Nanjing* 211106, *Jiangsu, China*;

[3] *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100012, *China*;

[4] *College of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract Lobster eye X-ray focusing telescope is one of the important equipment for X-ray space astronomical observation in the future. This equipment will become a powerful tool to study the Earth's space environment under various solar wind conditions. Aiming at the design and simulation of the effective area of lobster eye X-ray microporous optical devices, the relationship between structural parameters and geometric collection area is studied, and the effects of different film materials and surface roughness on X-ray reflectivity are calculated based on Fresnel formula. The performance test of effective area X-ray is completed by using X-ray beam test equipment and single-

收稿日期：2021-10-26；**修回日期**：2021-11-19；**录用日期**：2021-12-06

基金项目：国家自然科学基金(12003010)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA15310101-01)

通信作者：*chzhang@bao.ac.cn；**zhangzhen4417@163.com

photon acquisition mode. The results show that the effective area of lobster eye optics is mainly determined by the material of the film and the roughness of the inner wall. At the same time, the effective area of Ir film can be increased from 2.15 cm^2 to 2.47 cm^2 when the energy is 1 keV.

Key words scattering; lobster eye; X-ray; focusing and imaging; effective area

1 引 言

龙虾眼型 X 射线光学系统是近年来一种基于龙虾眼仿生复眼结构的新型 X 射线掠入射聚焦成像系统[1-5]。光线通过微通道内的表面时会发生反射并会聚在焦点位置处，这种奇特的微孔阵列结构给予了龙虾眼不同的探测能力，理论上视野能达到 4π 的空间角，而且在各个方向上的聚焦成像能力都相同，这是其他掠入射光学系统无法实现的，因此该系统是未来最具有运用前景的 X 射线聚焦光学系统之一[6-9]。

1979 年，Angel 根据龙虾眼结构设计了基于正方形阵列结构的龙虾眼型 X 射线天文望远镜[10]。2004 年，Libor 等设计了龙虾眼装置模型，模拟论证了龙虾眼望远镜应用于太空领域的可行性[11]。2011 年，Tichý 等[12]使用镀金的平面玻璃板作为反射基底制作了三种龙虾眼原型样机，并在可见光波段进行了聚焦成像测试。2017 年，中国科学院国家天文台成功研制出了龙虾眼 X 射线望远镜的光学组件。中国科学院空间科学先导专项 II 期已完成基于龙虾眼微孔光学技术的爱因斯坦探针(EP)卫星项目的立项[13]。2018 年，欧洲航天局(ESA)和日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)研制并发射了水星探测器，其上的 X 射线准直仪(MIXS-C)采用了 4 片 X 射线微孔光学(MPO)器件作为准直光学系统[14]。在中国和法国合作的天基波段空间变源监视器(SVOM)天文卫星项目中，用于后随定点观测的窄视场 X 射线望远镜(MXT)也采用了该技术[15]。此外，国外 NASA (National Aeronautics and Space Administration)和 ESA 最近基于该技术设计了宽视场 X 射线卫星，如 TAO 卫星和 Theseus 卫星[16-17]。

新型龙虾眼 X 射线微孔成像系统是一种具有光谱分辨能力的宽视场软 X 射线望远镜，未来即将发射的 SMILE 卫星(视场为 16°×27°)[18]和微纳立方卫星 CuPID 任务(视场为 5°×5°)也搭载了该类新型光学系统，这种新型 X 射线聚焦成像系统也将成为在各种太阳风条件下研究地球空间环境的有力工具[19-20]。有效面积是描述该类 X 射线系统收集光子能力的关键技术指标之一，有效面积越大，观测时间越短，成像质量越高，即光学系统会观察得越准、越灵敏。在轴龙虾眼 MPO 器件的有效面积为几何收集面积与光子反射率的乘积，其综合反映了微通道开口的占空比、内壁的粗糙度与不同能量光线在微孔内的反射特性等信息。本文对研制的龙虾眼型 MPO 光学器件的光学原理、结构参数以及结构参数与有效面积的关系进行了数值计算和仿真设计，利用有限点 X 射线束流检测设备完成了 MPO 器件有效面积的测试。

2 龙虾眼 X 射线光学器件的参数设计

龙虾眼 X 射线光学器件是一种基于掠入射反射原理对 X 射线进行会聚的光学器件，由数百万个同时指向球心的方形微通道(微米尺度)阵列构成。每个方形微通道主要由微通道在平行和竖直两个方向的正交侧壁组成，从而构成 X 射线反射镜面，如图 1 所示。

依据入射光线在方形微通道内壁的反射次数，一般可以将其划分为三类，即直通光线、一次反射光

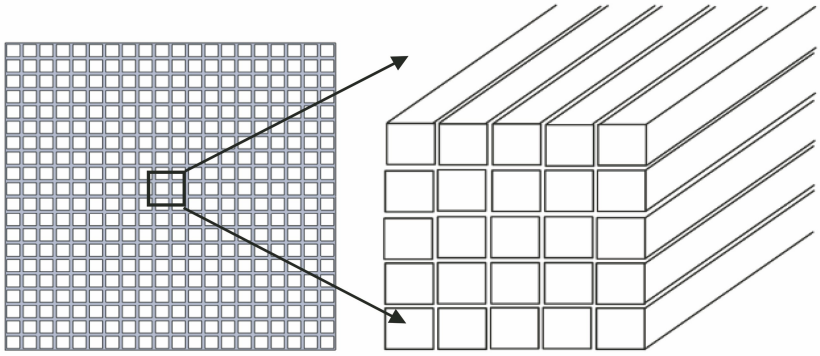

图 1 MPO 器件示意图及微区放大图

Fig. 1 Schematic diagram and micro-area magnification diagram of MPO devices

线和二次反射光线，如图 2 所示。不参与反射的直通光线直接透射到探测器上；只参与 x 方向或 y 方向一次反射的光线分别聚焦在十字臂的横线和竖线上；同时参与 x 方向和 y 方向二次反射的光线聚焦在焦斑中心位置处，形成二次中心亮斑。

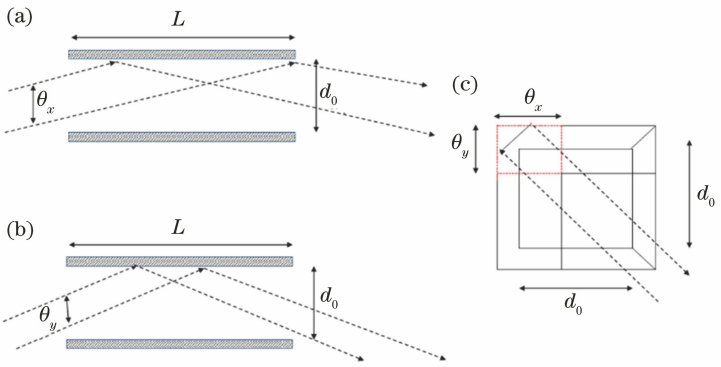

图 2 单个方形光线的反射区域图。(a) x 方向的剖面图；(b) y 方向的剖面图；(c) xy 剖面图

Fig. 2 Reflection area diagrams of single square ray. (a) Cross-sectional view in x direction; (b) cross-sectional view in y direction; (c) xy cross-sectional view

以 x 方向为横向，垂直于 y 轴剖开方形光线，截面如图 2(c)所示。由图 2(c)可知，参与内壁反射的有效区域与方形通道的直径 d_0 和光学器件的厚度 L 有关，根据几何关系可以得到参与反射的有效长度 d_x 和 d_y 分别为

$$d_x=\begin{cases}L\theta_x, & \theta_x<\dfrac{d_0}{L}\\ 2d_0-L\theta_x, & \theta_x\geqslant\dfrac{d_0}{L}\end{cases},\tag{1}$$

$$d_y=\begin{cases}L\theta_y, & \theta_x<\dfrac{d_0}{L}\\ 2d_0-L\theta_y, & \theta_x\geqslant\dfrac{d_0}{L}\end{cases}。\tag{2}$$

在 x 方向或 y 方向的有效反射概率 p_x 和 p_y 分别为

$$p_x=\frac{d_x}{d_0},\tag{3}$$

$$p_y=\frac{d_y}{d_0}。\tag{4}$$

令 $t=d_0/L$，则式(1)和式(2)可化简为

$$p_x=\begin{cases}\dfrac{\theta_x}{t}, & \theta_x<t\\ 2-\dfrac{\theta_x}{t}, & t\leqslant\theta_x\leqslant 2t\end{cases},\tag{5}$$

$$p_y=\begin{cases}\dfrac{\theta_y}{t}, & \theta_y<t\\ 2-\dfrac{\theta_y}{t}, & t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\end{cases}。\tag{6}$$

由于 MPO 器件为球面蜂窝结构，θ_x 和 θ_y 与方形微通道所在的空间位置(x,y)、曲率半径 R 和宽度 F 均相关，其数学关系可表示为

$$\begin{cases}\theta_x=\dfrac{x}{R}, & x\in\left(-\dfrac{F}{2},\dfrac{F}{2}\right)\\ \theta_y=\dfrac{y}{R}, & y\in\left(-\dfrac{F}{2},\dfrac{F}{2}\right)\end{cases}。\tag{7}$$

假定通道内壁 X 射线的反射率为 1，在 x 和 y 两个方向上进行乘积，则可以分别得到直通光、一次反射光和二次反射光的探测效率 η_b、η_x、η_y 和 η_{xy}，即几何收集面积。η_b、η_x、η_y 和 η_{xy} 的表达式为

$$\eta_b=(1-p_x)\times(1-p_y)=\begin{cases}\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_y}{t}+1, & \theta_x\leqslant t,\ \theta_y<t\\ \dfrac{\theta_x}{t}+\dfrac{\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-1, & \theta_x\leqslant t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\\ \dfrac{\theta_x}{t}+\dfrac{\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-1, & t\leqslant\theta_x\leqslant 2t,\ \theta_y<t\\ \dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_y}{t}+1, & t\leqslant\theta_x\leqslant 2t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\end{cases},\tag{8}$$

$$\eta_x=(1-p_x)\times p_y=\begin{cases}\dfrac{\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & \theta_x\leqslant t,\ \theta_y<t\\ \dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_y}{t}+2, & \theta_x\leqslant t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\\ \dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_y}{t}, & t<\theta_x\leqslant 2t,\ \theta_y<t\\ \dfrac{2\theta_x}{t}+\dfrac{2\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-2, & t<\theta_x\leqslant 2t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\end{cases},\tag{9}$$

$$\eta_y=(1-p_y)\times p_x=\begin{cases}\dfrac{\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & \theta_y\leqslant t,\ \theta_x<t\\ \dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_y}{t}+2, & \theta_y\leqslant t,\ t\leqslant\theta_x\leqslant 2t\\ \dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-\dfrac{\theta_x}{t}, & t<\theta_y\leqslant 2t,\ \theta_x<t\\ \dfrac{2\theta_x}{t}+\dfrac{2\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}-2, & t<\theta_x\leqslant 2t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\end{cases},\tag{10}$$

$$\eta_{xy}=p_x\times p_y=\begin{cases}\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & \theta_y\leqslant t,\ \theta_x<t\\ \dfrac{2\theta_x}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & \theta_y\leqslant t,\ t\leqslant\theta_x\leqslant 2t\\ \dfrac{2\theta_y}{t}-\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & t<\theta_y\leqslant 2t,\ \theta_x<t\\ 4-\dfrac{2\theta_x}{t}-\dfrac{2\theta_y}{t}+\dfrac{\theta_x\theta_y}{t^2}, & t<\theta_x\leqslant 2t,\ t\leqslant\theta_y\leqslant 2t\end{cases}。\tag{11}$$

X 射线的反射率主要由膜层材料和内壁粗糙度等特性共同决定，因此在 MPO 结构参数的设计中通常只针对几何的有效面积进行优化，即对通道的长径比进行设计。图 3 为长径比与探测效率的关系。从图 3 可以看到，在长径比 $L/d_0\approx 55$ 时，二次焦斑的探测效率达到最大，约为 0.34。实际上，X 射线的反射率与入射光子的能量、曲率半径、掠入射临界角以及结构强度等因素有关。本文根据爱因斯坦探针卫星宽视场望远镜的接口需求，确定 MPO 器件的长径比为 62.5，厚度为 2.5 mm，孔径为 40 μm，孔间距为 8 μm，口径为 42.5 mm×42.5 mm，以及曲率半径为 750 mm。在该结构参数的设计下，二次焦斑的探测效率约为 0.32，球面蜂窝结构强度能有较大的提升，可满足空间环境适应性的要求。

基于式(8)～(11)可以得到该类 MPO 器件在不同区域的几何收集面积，如图 4 所示。由图 4 可知：直射的 X 射线主要分布在方形样片的中心区域处，越接近中心，发生直射的 X 射线光子越多，且 MPO 器件的中心菱形区域基本以直射为主；一次反射的 X 射线主要分布在以中心菱形区域周围的一圈，呈现轴对称分布的现象；二次反射的 X 射线主要分布在 MPO 器件的 4 个顶角，且 4 个象限内的二次反射区域分别独立；直射的 X 射线在焦距位置处未聚焦，而会透射在焦平面上形成本底；一次反射的 X 射线在焦距位置处会聚焦成一个长度约为 20 mm 的十字斑，其与一次反射区域的大小一致；二次反射在理论上全部会聚在一个区域约为 20 μm×20 μm 的方形区域，中心亮斑处的强度会远高于十字线和透射光的强度，而且服从高斯分布。

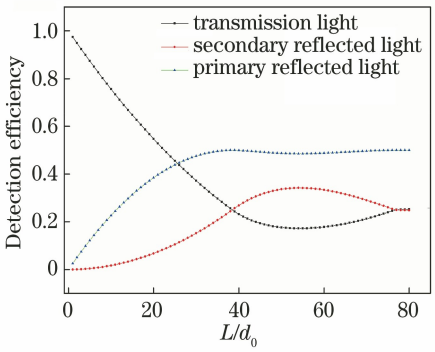

图 3 不同长径比下的探测效率

Fig. 3 Detection efficiency under different aspect ratio

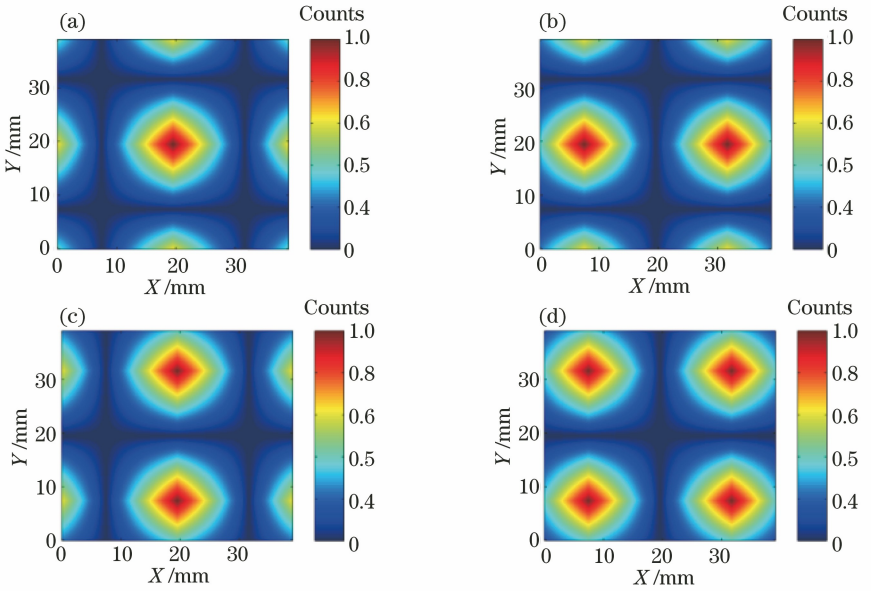

图 4 反射光线的效率分布图。(a)透射光;(b) x 方向的一次反射光线;(c) y 方向的一次反射光线;(d) 在 x 和 y 方向各反射一次的二次光线

Fig. 4 Efficiency distributions of reflected light. (a) Transmitted light; (b) primary reflected light in x direction; (c) primary reflected light in y direction; (d) secondary light reflected once in each direction of x and y directions

3 龙虾眼 X 射线微孔光学器件有效面积的模拟及测试

3.1 模拟仿真

对于 X 射线来说,任何固体材料相对空气均为光疏介质,因此掠入射条件下 X 射线的全反射是可能发生的。根据菲涅耳反射率公式[18],可以推导出 X 射线入射光的反射率 $R_{\text{reflectivity}}$ 表达式为

$$R_{\text{reflectivity}}=\frac{(\theta-A)^2+B^2}{(\theta+A)^2+B^2}\times\exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta}{\lambda}\right)^2\right]9,\quad(12)$$

式中:θ 为入射角度;σ 为内壁粗糙度;λ 为 X 射线波长;$A=\sqrt{\frac{\{[\theta^2-(2\delta)^2]+(2\beta)^2\}^{1/2}+\theta^2-(2\delta)^2}{2}}$,$B=\sqrt{\frac{\{[\theta^2-(2\delta)^2]^2+(2\beta)^2\}^{1/2}-\theta^2+(2\delta)^2}{2}}$,其中 δ 为介质的极化特性系数,β 为介质对 X 射线的吸收系数,可分别表示为

$$\begin{cases}\delta=\dfrac{r_e\lambda^2Nf_1}{2\pi}=\dfrac{e^2\lambda^2N_ef_1}{2\pi m_ec^2}\\ \beta=\dfrac{r_e\lambda^2Nf_2}{2\pi}=\dfrac{e^2\lambda^2N_ef_2}{2\pi m_ec^2}\end{cases},\quad(13)$$

式中:r_e 为电子的经典半径;N 为原子数密度;N_e 为介质中单位体积的自由电子数;m_e 为电子的静质量;e 为电子电量;c 为真空中的光速;f_1 和 f_2 为原子散射因子。在轴龙虾眼 MPO 的有效面积为整个器件的几何收集面积与微通道内壁二次反射率的乘积,龙虾眼光学器件在不同位置(θ_x,θ_y)处的反射率 $\eta_{xy}(\theta_x,\theta_y)$为

$$\eta_{xy}(\theta_x,\theta_y)=p_x\times p_y\times R_{\text{reflectivity}}(\theta_x)\times R_{\text{reflectivity}}(\theta_y)。\quad(14)$$

在轴龙虾眼光学器件的有效面积可表示为

$$A_{\text{eff}}=\int_0^{2d_0/L}\int_0^{2d_0/L}\eta_{xy}(\theta_x,\theta_y)\mathrm{d}\theta_x\mathrm{d}\theta_y=\left\{2\left[\int_0^{d_0/L}\frac{LR\theta}{d}R_{\text{reflectivity}}\mathrm{d}\theta+\int_{d_0/L}^{2d_0/L}\frac{(2d_0-L\theta)R}{d}R_{\text{reflectivity}}\mathrm{d}\theta\right]\right\}^2=$$
$$\left\{2\left[\int_0^{d_0/L}\frac{LR\theta}{d}\times\frac{(\theta-A)^2+B^2}{(\theta+A)^2+B^2}\times\exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta}{\lambda}\right)^2\right]\mathrm{d}\theta+\int_{d_0/L}^{2d_0/L}\frac{(2d_0-L\theta)R}{d}\times\frac{(\theta-A)^2+B^2}{(\theta+A)^2+B^2}\times\exp\left[-\left(\frac{4\pi\sigma\sin\theta}{\lambda}\right)^2\right]\mathrm{d}\theta\right]\right\}^2。\quad(15)$$

MPO 器件的基底选用重铅玻璃,X 射线掠入射的临界角远小于金属材料,这会导致更少的光子参

与反射。由于 X 射线的反射能力有限，通常在 MPO 器件的微通道内壁镀制一层金属反射膜，如 Ni、Ir 和 Au，用于提高 X 射线的反射率[21-23]。图 5 为方孔内壁粗糙度的均方根(RMS)为 0 时，不同膜层的基底材料与有效面积随 X 射线能量的变化曲线。由图 5 可知：在不同 X 射线能量下，不同金属材料的 X 射线反射截面存在较大的差异性；在 0.4～1.8 keV 的能量下，金属 Ni 的 X 射线反射截面大于金属 Au 和 Ir；在能量为 1.0 keV 的情况下，金属 Ni 的 X 射线反射截面(3.39 cm^2)远大于金属 Au(2.91 cm^2)和 Ir(2.96 cm^2)；在能量为 3.0 keV 的情况下，金属 Ir(X 射线反射截面为 1.89 cm^2)和 Au(X 射线反射截面为 1.71 cm^2)的 X 射线反射能力较金属 Ni(X 射线反射截面为 0.89 cm^2)更佳。本文基于 EP 卫星的科学目标，主要研究的软 X 射线能量为 0.4～4.0 keV，利用原子层沉积技术在 MPO 器件微孔内壁表面镀制一层厚度约为 20 nm 的金属反射 Ir 膜，镀 Ir 膜后 X 射线的反射率明显大于玻璃基底的反射率。在 2.04，2.11，2.55，2.91，3.17 keV 的能量下，X 射线的有效面积突然降低，这是因为 X 射线能量靠近金属 Ir 的 M 系吸收限。

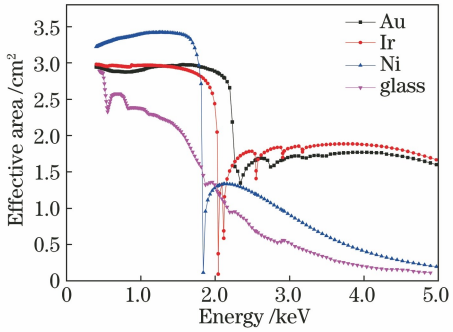

图 5 膜层材料与有效面积的关系

Fig. 5 Relationship between effective area and material of film layers

图 6 为内壁膜层材料选用 Ir，不同内壁的粗糙度 RMS 下，有效面积随 X 射线能量的变化曲线。真实的粗糙表面会引起 X 射线的漫散射，导致 X 射线的反射率以指数的形式下降。从图 6 可以看出：随着内壁粗糙度的增大，X 射线的反射率逐渐减小；当内壁的粗糙度 RMS 值为 1 nm、X 射线能量为 1.0，2.0，3.0，4.0，5.0 keV 时，有效面积分别为理论值(RMS 值为 0)的 95.3%、64.4%、48.3% 和 37.5%；当内壁的粗糙度 RMS 值为 2 nm 时，有效面积分别为理论值的 88.2%、39.8%、23.5% 和 14.9%。结果表明，X 射线的能量越高，粗糙度对有效面积的影响越大。

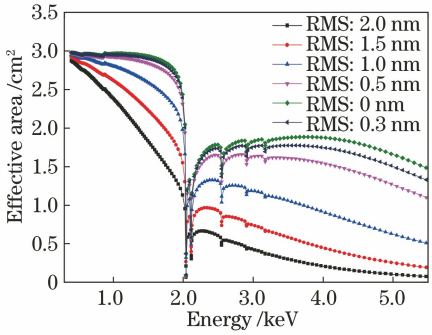

图 6 内壁粗糙度与有效面积的关系

Fig. 6 Relationship between inner wall roughness and effective area

3.2 X 射线的性能测试

龙虾眼型 MPO 器件中有限点源的 X 射线束流测试系统如图 7 所示，实验中将 MPO 器件分别放在六轴位移台(空间定位精度优于 5 μm)上，使用光学仪器经纬仪来调整光学器件的位置与姿态，使微焦斑 Ti 靶光源(无 Be 窗，焦斑直径优于 35 μm)、龙虾眼 MPO 器件(厚度为 2.5 mm，孔径为 40 μm，孔间距为 8 μm，口径为 42.5 mm×42.5 mm，曲率半径为 750 mm)以及科学级 CMOS 探测器(图像分辨率为 2048 pixel × 2040 pixel，单个像素大小为 11 μm，在能量为 5.9 keV 的情况下分辨率优于 150 eV)三者的中心在同一光轴上。

X 射线光源需放在距离 MPO 器件凸面前端 15159 mm 附近。CMOS 探测器位于 MPO 器件凹面后端，用于收集和聚焦 X 射线。使用 X 射线光源的连续谱照射 MPO 器件，通过 CMOS 探测器的能量分辨率来区分入射光子能量，测量透射谱和聚焦能谱，即可获得有效面积。一次测量即可获得一段能量内的有效面积曲线。所有测试均需在真空腔体(真空度<10^{-3} Pa)内，测试管电压设置为 5.5 kV，电流为 90 μA，单光子采集时间为 1.5 ms，累积时间为 90 min。由于 X 射线光源为有限远点，准平行光束下的测试焦距会略小于 X 射线焦距。

镀 Ir 膜前后，MPO 器件在 367 mm 焦距处的有效面积如图 8 所示，其中内壁的粗糙度 RMS 值为 1 nm，膜层材料为 Ir。从图 8 可以看出：随着 X 射线能量的升高，X 射线的反射率逐渐降低，而且在能量为 1.0 keV 的情况下，镀 Ir 膜(X 射线反射截面为 2.47 cm^2)后的反射率明显大于玻璃基底 (X 射线反射截面为 2.15 cm^2)的反射率，并且 Ir 膜层

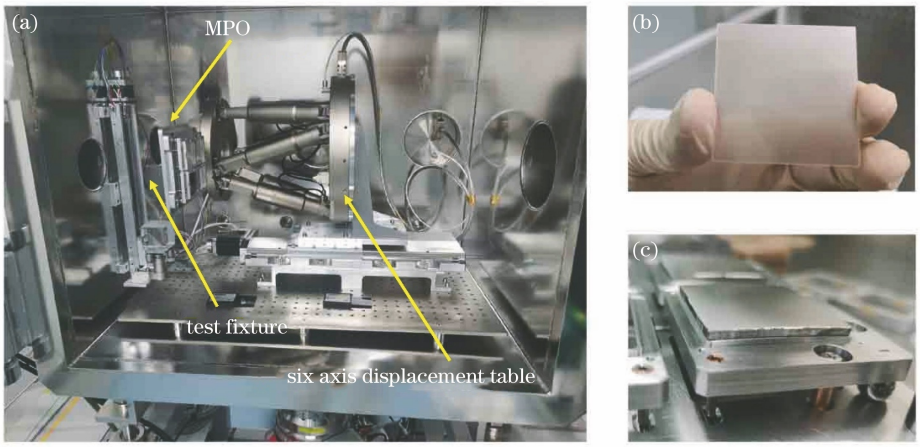

图 7 测试腔体及实物图。(a)测试腔体;(b)玻璃基底的镜片;(c)镀 Ir 膜后的器件

Fig. 7 Test cavity and actual picture. (a) Test chamber; (b) glass-based lens; (c) device coated with Ir film

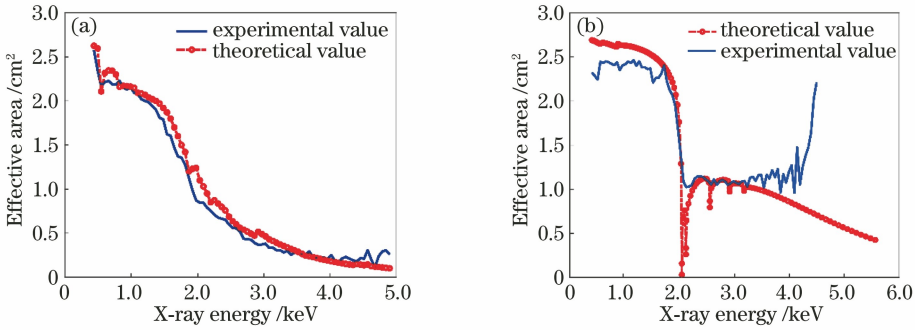

图 8 MPO 光学器件在不同基底下的有效面积。(a)玻璃基底;(b)金属 Ir

Fig. 8 Effective area of MPO optical devices on different substrates. (a) Glass; (b) metal Ir

能有效减弱玻璃基底在 0.57 keV 能量处的吸收作用,遮光膜 Al 基底对于 2.0 keV 能量以内的低能光子起到一定的遮挡吸收作用;镀 Ir 膜后的 MPO 器件在能量为 0.2～2.0 keV 之间,反射率随能量的增加而下降迅速,在 2.2～5.0 keV 能量之间反射率变化较为缓慢;在能量为 1.0,3.0,4.0 keV 时,镀 Ir 膜前有效面积与模拟值的吻合程度分别为 93.5%、85.3%和 104.2%,镀 Ir 膜后有效面积与模拟值的吻合程度分别为 91.3%、88.3%和 130.4%;镀 Ir 膜后光学器件的有效面积在 3.0～5.0 keV 能量之间偏离模拟值且呈上升趋势,这是因为 X 射线光子的能量靠近 3.0～5.0 keV,当有效面积超过 0.5 cm^2 时,CMOS 探测器的能量响应曲线会趋于饱和,最终导致测量结果失真。

4 结 论

本文对龙虾眼型 MPO 器件的结构参数进行数值计算,分析结构参数对有效面积与内壁粗糙度和膜层材料的影响,所得结果为未来龙虾眼型 X 射线聚焦望远镜的设计工作提供了理论基础。在 X 射线束流设备中,对 MPO 器件进行单光子测试,镀膜后 MPO 器件在能量为 1.0 keV 的情况下的有效面积为 2.47 cm^2。未来还需通过设置对照实验,明确影响龙虾眼型光学器件有效面积的工艺参数,并提出可能造成这样变化的原因,以便于理论模型完善和工艺改进。

参 考 文 献

[1] Peele A G, Nugent K A, Rode A V, et al. X-ray focusing with lobster-eye optics: a comparison of theory with experiment[J]. Applied Optics, 1996, 35(22): 4420-4425.

[2] Martindale A, Pearson J F, Whitford C, et al. The mercury imaging X-ray spectrometer: instrument overview[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7441: 744115.

[3] Collon M J, Beijersbergen M W, Wallace K, et al. X-ray imaging glass micro-pore optics [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6688: 668812.

[4] Peele A G, Irving T H K, Nugent K A, et al. LIGA for lobster: first observation of lobster-eye focusing from lithographically produced optics[J]. Review of

Scientific Instruments, 2001, 72(3): 1843-1849.

[5] Zhao D H, Zhang C, Yuan W M, et al. Geant4 simulations of a wide-angle X-ray focusing telescope [J]. Experimental Astronomy, 2017, 43(3): 267-283.

[6] Su L N, Li W, Wu M X, et al. Modeling the focusing efficiency of lobster-eye optics for image shifting depending on the soft X-ray wavelength[J]. Applied Optics, 2017, 56(22): 6267-6271.

[7] Hudec R, Inneman A V, Pina L, et al. Lobster-eye X-ray telescopes: recent progress[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4851: 578-586.

[8] Ulmer M P, Graham M E, Vaynman S, et al. Deformable mirrors for X-ray astronomy and beyond [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8076: 807605.

[9] Aschenbach B, Briel U G, Haberl F, et al. Imaging performance of the XMM-Newton X-ray telescopes [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4012: 731-739.

[10] Li L H, Zhang C, Jin G, et al. Study on the optical properties of Angel Lobster eye X-ray flat micro pore optical device [J]. Optics Communications, 2021, 483: 126656.

[11] Amati L, Frontera F, Auricchio N, et al. The gamma-ray burst monitor for Lobster-ISS [J]. Advances in Space Research, 2006, 38(7): 1333-1337.

[12] Tichý V, Barbera M, Collura A, et al. Lobster eye optics for nano-satellite X-ray monitor [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8076: 80760C.

[13] 袁为民. 爱因斯坦探针: 探索变幻多姿的 X 射线宇宙专题[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(3): 5.
Yuan W M. Special topic of Einstein probe: exploring the dynamic X-ray universe[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2018, 48(3): 5.

[14] Gotz D, Adami C, Basa S, et al. The Microchannel X-ray Telescope on board the SVOM satellite[C]// Proceedings of Swift: 10 Years of Discovery: PoS (SWIFT 10), December 2-5, 2014, La Sapienza University, Rome, Italy. Trieste: Sissa Medialab, 2014.

[15] Feroci M, Stella L, Klis M, et al. The large observatory for X-ray timing (loft)[J]. Experimental Astronomy, 2012, 34(2): 415-444.

[16] Ghirlanda G, Salvaterra R, Toffano M, et al. Gamma ray burst studies with THESEUS [J]. Experimental Astronomy, 2021, 52: 277-308.

[17] Peng S W, Wei F, Guo Y H, et al. Preliminary geometric parameters optimization of lobster-eye-type wide field of view soft X-ray imager [J]. Optical Engineering, 2019, 58(9): 093101.

[18] Peng S, Ye Y, Wei F, et al. Numerical model built for the simulation of the earth magnetopause by lobster-eye-type soft X-ray imager onboard SMILE satellite[J]. Optics Express, 2018, 26(12): 15138-15152.

[19] 郭亦鸿, 彭松武, 韦飞, 等. SMILE 卫星载荷宽视场软 X 射线成像仪设计与仿真[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4348-4355.
Guo Y H, Peng S W, Wei F, et al. Design and simulation of soft X-ray imager on SMILE satellite [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4348-4355.

[20] Wang C, Guo X C, Peng Z, et al. Magnetohydrodynamics (MHD) numerical simulations on the interaction of the solar wind with the magnetosphere: a review[J]. Science China Earth Sciences, 2013, 56(7): 1141-1157.

[21] 张诗鲲, 黎龙辉, 孙建宁, 等. 基于条纹反射方法的 Angel 型龙虾眼 X 射线镜片面型测试[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0934001.
Zhang S K, Li L H, Sun J N, et al. Surface measurement of Angel Lobster eye X-ray lens based on fringe reflection[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0934001.

[22] 刘舵, 强鹏飞, 李林森, 等. 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834002.
Liu D, Qiang P F, Li L S, et al. Multilayer nested X-ray focusing optical device[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0834002.

[23] 乐孜纯, 梁静秋. 高能 X 射线聚焦组合透镜的理论研究[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 572-576.
Le Z C, Liang J Q. Theory of the compound X-ray lenses for focusing high energy X-ray radiation[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 572-576.