

基于 Angel 型龙虾眼 X 射线透镜的数值模拟

金戈^{1*}, 黎龙辉¹, 张臣², 杨雪², 张诗鲲¹, 张智勇¹, 毛汉祺¹, 徐昭¹, 张振¹, 姜博文¹

¹北方夜视技术股份有限公司南京分公司, 江苏 南京 211106;

²中国科学院国家天文台, 北京 100012

摘要 为了研究 Angel 型龙虾眼 X 射线透镜的聚焦成像特性, 基于 X 射线全反射原理和旋转坐标系方法, 建立 X 射线在方孔内壁的数值模型。通过求解 X 射线在方孔内壁的交点, 得到所有光线的传输路径。为了验证模型的准确性, 对透镜的焦距和传输效率分别进行实验测试和模拟。在 365 mm 焦距处, 参与反射的 X 射线会被会聚为十字线, 中心焦斑光强最大, 与模拟所得结果相符。在能量 4.5 keV 下, 透镜镀金属 Ir 膜前、后的传输效率分别为 1.23% 和 9.18%, 模拟结果的传输效率分别为 1.44% 和 10.14%。结果表明: 构建的数值模型是合理的, 可为龙虾眼透镜的研制提供理论基础。

关键词 X 射线光学; Angel 型龙虾眼; X 射线全反射; 传输效率; 聚焦成像

中图分类号 O434.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0934001

Numerical Simulation of Angel Lobster Eye X-ray Micro Pore Optic Lens

Jin Ge^{1*}, Li Longhui¹, Zhang Chen², Yang Xue², Zhang Shikun¹, Zhang Zhiyong¹,
Mao Hanqi¹, Xu Zhao¹, Zhang Zhen¹, Jiang Bowen¹

¹Nanjing Branch, North Night Vision Technology Co., Ltd, Nanjing, Jiangsu 211106, China;

²National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract In order to study the focusing and imaging performance of Angel lobster eye X-ray micro pore optic lens, the numerical model of the X-ray in the square channel is established based on X-ray reflection principle and rotating coordinate system. By solving the intersection, the transmission path of all the rays is obtained. In order to verify the accuracy of the model, the focal length and transmission efficiency of the lens are both simulated and tested. At the focal length of 365 mm, the reflected X-rays are focused into cross line, and the center focal spot intensity is the largest, which is consistent with the simulation results. As for the transmission efficiency of the lens before and after coating Ir, the simulation results are 1.23% and 9.18%, respectively, at the energy of 4.5 keV. Accordingly, the experimental results are 1.44% and 10.14%, respectively, which is consistent with the above data. The results show that the numerical model is reasonable and provides the theoretical and simulation basis for the fabrication of the lens.

Key words X-ray optics; Angel lobster eye; X-ray reflection; transmission efficiency; focusing and imaging

OCIS codes 340.7470; 220.3630

1 引 言

1979 年, Angel 根据龙虾眼结构, 提出基于正方形阵列结构来研制龙虾眼型(LE)X 射线天文望远镜^[1]。LE 系统具有视野大、焦距短、体积小、重量轻、灵敏度高、装调简单、聚焦效率高等优点, 符合未来卫星载荷 X 射线天文观测发展的需求, 在 X 射

线聚焦成像领域拥有巨大的应用前景^[2-7]。受限于当时的制作工艺和加工水平, 直到 20 世纪 90 年代, 随着一种新型微孔光学技术(MPO)的日渐成熟, Angel 型 LE 系统才得以实现和推广^[8-9]。MPO 透镜由数百万个指向球心的方孔通道构成, 通过模拟 X 射线在方孔中的传输规律来改进 MPO 的制造工艺, 正成为 LE 光学系统的一个重要研究方向^[10]。

收稿日期: 2017-12-07; 修回日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(Y713021V01)

* E-mail: jgtm@sina.com

关于 X 射线在龙虾眼微孔内壁的模拟有几种典型的方法。Chapman 等^[11]提出了几何光学数值模型,但未考虑透射光线的影响。Tichý 等^[12]和 Peele 等^[13]提出了迭代数值模型,但忽略了 X 射线反射率的影响。Putkunz 等^[14]和 Zhao 等^[15]基于光线追踪软件进行成像模拟,但构建模型复杂、耗时太长。本文根据 X 射线全反射原理和旋转坐标系方法^[16],建立 X 射线在方孔通道传输的数值模型,通过直接求解方程组得到所有光线在方孔内部的传输路径,大大提高了运算效率,缩短了模拟时间,并通过实验验证了构建数值模型的准确性。

2 MPO 透镜数值模型

2.1 X 射线全反射

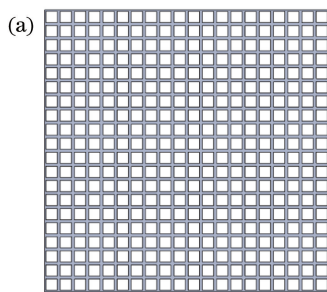
X 射线是短波长、高能量的电磁波,当以一定角度入射至光滑表面时存在全反射临界角 θ_c 。当 X 射线入射角度小于 θ_c 时,会在物质表面全反射。临界角 θ_c 通常与入射 X 射线能量和材料相关^[17],可表示为

$$\theta_c = 20\sqrt{\rho}/E, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料的密度(g/cm^3); E 为入射 X 射线的能量(keV); θ_c 为掠入射临界角(mrad)。可以看出,X 射线临界角与入射光子能量成反比,与材料密度成正比。为了提高掠入射临界角和 X 射线反射率,通常在 X 射线微孔内壁镀上金属反射膜^[18]。

在实际情况下,方孔内壁表面也存在一定的粗糙度,会引起 X 射线的漫散射,导致反射率以指数形式下降。当掠入射角 $\theta < \theta_c$ 时,Nevo-Croce (NC)模型的计算过程更为准确^[19],在理想反射率公式右侧乘以一个 Nevo-Croce 因子,X 射线在表面有粗糙度的反射率 R 可表示为

$$R = R_0 \exp\left[-\frac{(4\pi\sigma \sin \theta)^2 n_1 n_2}{\lambda^2}\right], \quad (2)$$



式中: R_0 为理想光滑表面的反射率, n_1 为 X 射线在空气中的折射率; n_2 为 X 射线在材料中的折射率; σ 为表面粗糙度均方根参数; θ 为 X 射线掠入射角; λ 为 X 射线波长。图 1 给出了在粗糙度 $\sigma = 1 \text{ nm}$ 情况下,不同能量下 X 射线入射角与相对反射率的关系,可以看出,X 射线反射率与光线能量和入射角成反比。

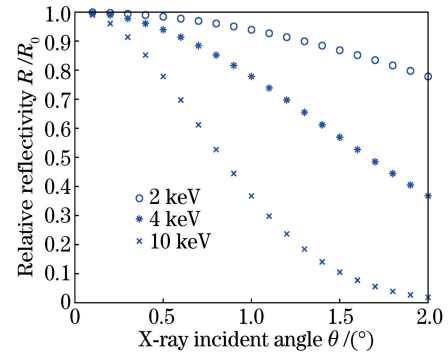


图 1 不同能量下 X 射线入射角与相对反射率的关系
Fig. 1 Relationship between X-ray incident angle and relative reflectivity under different energies

2.2 数值模型

MPO 透镜是一种基于掠入射原理对 X 射线进行会聚的光学器件,开口面积 A_{open} 约 60%,方孔分布为轴对称性结构,如图 2 所示。对第一象限内的方孔结构[图 2(b)]进行建模,再将其他象限的方孔旋转至第一象限进行计算,即可得到 MPO 镜片所有方孔的分布情况。由于每个方孔通道中心都指向球心,其最外层曲线方程可构建为

$$f(z) = k_0 z + b_0, \quad (3)$$

则在第 i 行、第 j 列个方孔位置处的上壁方程为

$$k_u(i, j)z + b_u(i, j) = y, \quad (4)$$

式中: $k_u(i, j) = \frac{j+a}{n+0.5}k_0$; $b_u(i, j) = \frac{j+a}{n+0.5}b_0$; 系

数 a 与通道的开口面积有关,可表征为 $a = \frac{\sqrt{A_{\text{open}}}}{2}$ 。

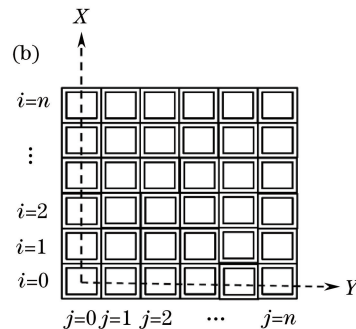


图 2 (a) MPO 透镜截面图;(b)第一象限方形通道

Fig. 2 (a) Cross-section of MPO lens; (b) area of interest of square channel

同理,可以将方形微通道下侧、左侧和右侧内壁方程分别简化为

$$k_d(i, j)z + b_d(i, j) = y, \quad (5)$$

$$k_l(i, j)z + b_l(i, j) = x, \quad (6)$$

$$k_r(i, j)z + b_r(i, j) = x, \quad (7)$$

式中: $k_d(i, j) = \frac{j-a}{n-0.5}k_0$; $b_d(i, j) = \frac{j-a}{n-0.5}b_0$;

$k_l(i, j) = \frac{i-a}{n-0.5}k_0$; $b_l(i, j) = \frac{i-a}{n-0.5}b_0$; $k_r(i, j) =$

$\frac{i+a}{n+0.5}k_0$; $b_r(i, j) = \frac{i+a}{n+0.5}b_0$ 。

假设光源的位置为 $p_s(x_s, y_s, z_s)$, 随机生成透镜 (i, j) 的入口坐标为 $p_{in}(x_{in}, y_{in}, z_{in})$, 则入射光子的方向向量 \mathbf{u} 为

$$\mathbf{u} = (u_x, u_y, u_z) = \left(\frac{x_{in} - x_s}{d_0}, \frac{y_{in} - y_s}{d_0}, \frac{z_{in} - z_s}{d_0} \right), \quad (8)$$

式中 $d_0 = \sqrt{(x_{in} - x_s)^2 + (y_{in} - y_s)^2 + (z_{in} - z_s)^2}$ 。

入射光子所在的直线方程可以表示为

$$\frac{x_{in} - x_s}{u_x} = \frac{y_{in} - y_s}{u_y} = \frac{z_{in} - z_s}{u_z}. \quad (9)$$

通过联立方程组,可以得到 X 射线与方孔上壁的交点 z_u 为

$$z_u = \frac{y_s - \frac{u_x}{u_z}z_s - b_u(i, j)}{k_u(i, j) - \frac{u_y}{u_z}}. \quad (10)$$

同理,可以求得方形微通道下侧、左侧和右侧交点坐标分别为

$$z_d = \frac{y_s - \frac{u_x}{u_z}z_s - b_d(i, j)}{k_d(i, j) - \frac{u_y}{u_z}}, \quad (11)$$

$$z_l = \frac{x_s - \frac{u_y}{u_z}z_s - b_l(i, j)}{k_l(i, j) - \frac{u_x}{u_z}}, \quad (12)$$

$$z_r = \frac{x_s - \frac{u_y}{u_z}z_s - b_r(i, j)}{k_r(i, j) - \frac{u_x}{u_z}}. \quad (13)$$

在上述 z 坐标值中 $z = z_{min}$, 认为对应的 z 坐标值为入射 X 射线光子与方形微通道内壁的实际交点, 则入射法向量 \mathbf{n} 方程为

$$\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z) =$$

$$\left(\frac{m_x}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}, \frac{m_y}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}}, \frac{m_z}{\sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}} \right). \quad (14)$$

对于方形微通道上侧内壁, 外法向量在 X 轴上的分量为 0, Y 轴上的分量为正。因此, 任意 z 位置的 mu_x, mu_y, mu_z 可以分别表示为

$$mu_x = 0; mu_y = 1; mu_z = k_u(i, j). \quad (15)$$

同理, 方形微通道下侧、左侧和右侧法线方程分别为

$$md_x = 0; md_y = -1; md_z = k_d(i, j), \quad (16)$$

$$ml_x = -1; ml_y = 0; ml_z = k_l(i, j), \quad (17)$$

$$mr_x = 1; mr_y = 0; mr_z = k_r(i, j). \quad (18)$$

若满足全反射条件 $\theta \leq \theta_c$, 则入射 X 射线会发生全反射, 且作为下一次反射的入射 X 射线。反射 X 射线的方向向量 \mathbf{r} 可以表示为

$$\mathbf{r} = (u_x - 2n_x \times \mathbf{u} \times \mathbf{n}, u_y - 2n_y \times \mathbf{u} \times \mathbf{n}, u_z - 2n_z \times \mathbf{u} \times \mathbf{n}). \quad (19)$$

把 \mathbf{r} 作为入射光线, 迭代运算, 可得到光线在 MPO 通道内部的传输路径, 实现光线追踪。假设接探测器的焦平面距离 MPO 镜片的距离为 f , 出射 X 射线光子最后一次全反射与方形微通道内壁的交点为 $p_f(x_f, y_f, z_f)$, 则在焦平面上的交点可以表示为 (x_f, y_f) :

$$x_f = x_s + \frac{r_x}{r_z}(f - z_f), \quad (20)$$

$$y_f = y_s + \frac{r_y}{r_z}(f - z_f). \quad (21)$$

MPO 透镜具有中心对称的结构, 因此可将其余 3 个象限内的方形微通道均旋转至第一象限内进行计算。由于入射 X 射线光源的空间位置是随意设置的, 因此在旋转其他象限内方形微通的同时, 还须将 X 射线光源旋转相同的角度。以第二象限内的一点 $p_0(x_0, y_0)$ 为例, 经过坐标旋转之后的位置 $p'(x', y')$ 可表示为

$$x' = q \cos \varphi, \quad (22)$$

$$y' = q \sin \varphi, \quad (23)$$

式中 $q = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$, $\varphi = \tan^{-1}(\frac{y_0}{x_0}) - \frac{\pi}{2}$ 。

假设 MPO 球面曲率半径为 R_m , X 射线点光源物距为 S , 则焦距 f 可以根据龙虾眼物像公式^[10]可得:

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{S} = \frac{2}{R_m}. \quad (24)$$

如果龙虾眼 MPO 应用于天文 X 射线领域, 物距默认为 $S = \infty$, 则平行 X 射线聚焦成像在焦距 $f =$

$R_m/2$ 探测器焦平面上。

表 1 MPO 透镜参数

Table 1 Parameters of MPO

Parameter	Experiment /Simulation
Dimension / (mm×mm)	40×40
Channel dimension / μm	20
Wall thickness of channel / μm	6
Length of channel /mm	1.25
Radius of MPO /mm	750
Distance of MPO /mm	13300

3 实验装置

由于透镜几何参数的限制,常规光学检测手段会产生干涉和衍射现象而无法使用。目前,检测透镜质量最有效的方法是使用准平行 X 射线光束。为了研究 MPO 透镜的微孔统计特性,在国家天文台 X 射线成像实验室,对镀金属反射膜 Ir 前、后的 MPO 透镜分别进行 X 射线聚焦成像测试。该 X 射线束流系统主要由 50 kV 的高压电源、50 W 的 Ti 靶 X 射线管(能量为 4.5 keV,微焦斑为 50 μm)、六维精密装置台、大型真空腔体(长为 13300 mm,真空度为 10^{-3} Pa)、MPO 透镜(参数见表 1),以及互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器(图像分辨率为 2048 pixel×2040 pixel,成像像素为 11 μm)组成,如图 3 所示。

首先,通过六维精密装置台和激光发生器将 X 射线光源、MPO 透镜及 CMOS 探测器调整为一个共轴光学系统;然后,经真空腔体约束的准平行 X 射线束照射到 MPO 透镜的凸面,进而会聚成十字图像;最终,被放置在焦距处的 CMOS 探测器接收。测试均在电压为 8 kV、电流为 200 μA 的条件下进行,曝光时间为 512 ms。

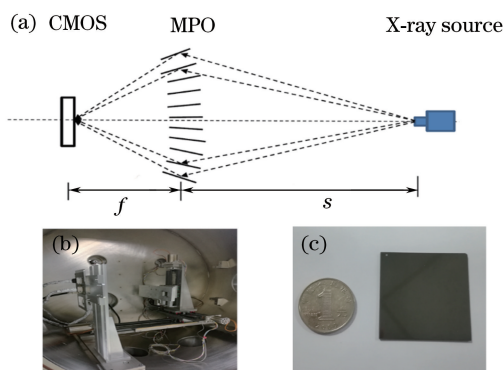


图 3 MPO 透镜的测试系统。(a)测试平台示意图;(b)测试平台实物图;(c)镀膜 MPO 透镜

Fig. 3 Measuring system for MPO lens. (a) Schematic of experimental setup; (b) photograph of system; (c) physical map of coating MPO lens

4 结果与讨论

4.1 焦 距

MPO 透镜的模拟参数见表 1,方孔数目约 2.6×10^7 ,光线约为 10^9 根,方孔内壁粗糙度为 1 nm,光源能量为 4.5 keV。MPO 透镜相对于 CMOS 探测器的距离与成像质量直接关联,未镀 Ir 膜的 MPO 透镜在不同位置处的模拟与实验成像结果如图 4 所示。可以看出,X 射线聚焦成像结果与模拟图像变化趋势一致,少数光线透射形成背景噪声,大部分参与反射的光线被 MPO 透镜聚焦为十字线。在焦距为 365 mm 处,聚焦图像最清晰,焦斑亮度最大。偏离焦距位置处,焦斑光强迅速衰减,十字臂由 2 条变成了 4 条,中心亮斑分裂成 4 个,像质恶化十分明显,与理论模拟结果相吻合。模拟运算时间约 15 min。该数值模型大幅度提高了运算效率,节约了模拟时间。

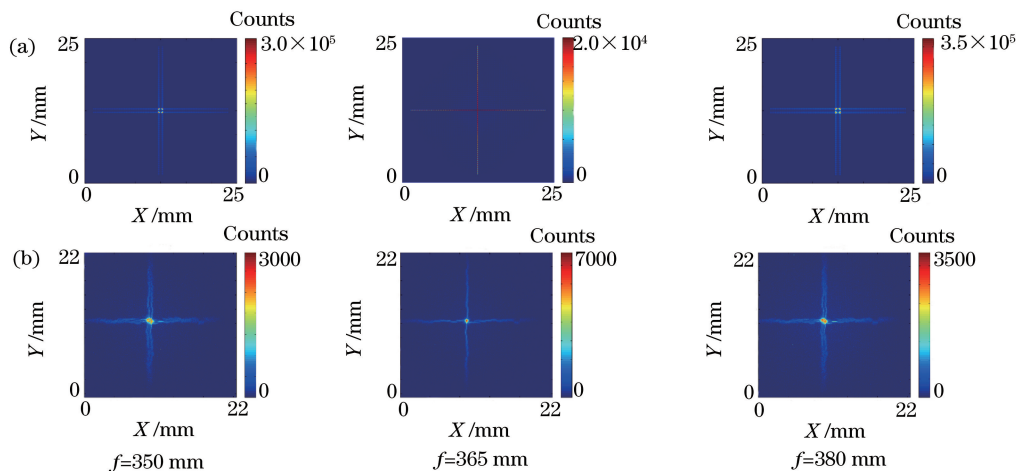


图 4 不同位置处的 MPO 聚焦成像结果。(a)模拟;(b)实验

Fig. 4 Focused imaging results at different positions. (a) Simulation; (b) experiment

图 5 为未镀 Ir 膜的 MPO 透镜在焦距处的光强立体分布图,可以看出,实验与模拟结果相吻合,都服从高斯分布。MPO 聚焦成像的十字线长度约 22 mm,从中心位置到镜片边缘由强逐渐变弱。主要来自于两方面:一方面是 X 射线在微孔通道内壁

反射时,需满足掠入射全反射条件,距离坐标中心的距离越远,全反射角度越大,X 射线反射效率越低;另一方面是由于通道角的限制,阻挡比例与中心位置呈线性相关,距离越远,阻挡比例越大,参与反射的 X 射线由全部变为部分。

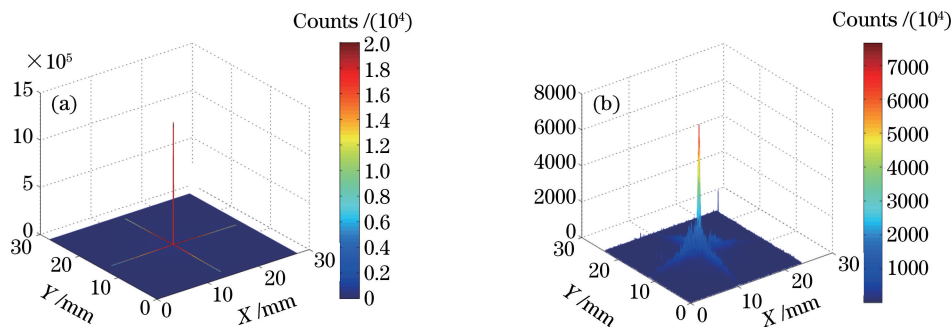


图 5 MPO 透镜聚焦光斑分布立体图。(a)模拟;(b)实验

Fig. 5 Space diagram of focal spot distribution. (a) Simulation; (b) experiment

4.2 传输效率

为了提高 MPO 透镜的传输效率,采用原子沉积技术(ALD)^[20]在方孔内壁表面沉积一层 20 nm 的金属反射膜 Ir。反射膜的覆盖完整性与一致性对 MPO 的各项性能都有影响,使用扫描电子显微镜(SEM)对沉积膜层进行测试,在同一条通道随机抽选 3 个位置处的膜厚进行测试,图 6 是方孔通道 SEM 剖面图。测试厚度分别为 20.4, 21.8, 20.6 nm,测试膜厚差别已经与测试设备的测试精度相当。SEM 测试结果表明,采用 ALD 技术在微孔内壁镀制金属反射膜的完整性和一致性较好。

拟结果与实验结果基本吻合。实验结果表明 MPO 透镜镀 Ir 膜后,掠入射临界角增大,X 射线反射率提高,能够会聚到焦斑中心的 X 射线光子数目增多,焦斑的强度增大,传输效率提高。

为了验证模拟的准确性,对镀膜前、后透镜的传输效率进行测试,实验结果如图 7 所示。透镜镀膜前、后的传输效率分别为 1.23% 和 9.18%,模拟结果的传输效率分别为 1.44% 和 10.14%。可以看出,模

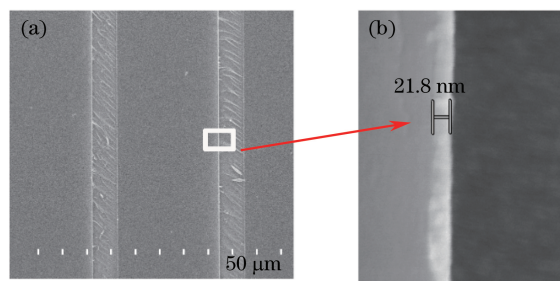


图 6 方孔内壁 Ir 膜扫描电子显微镜图。

(a) MPO 方孔通道剖面图;(b)所选区域的放大图

Fig. 6 SEM images of MPO square channel with coating Ir. (a) Cross section of MPO square channel; (b) enlarged view of selected area

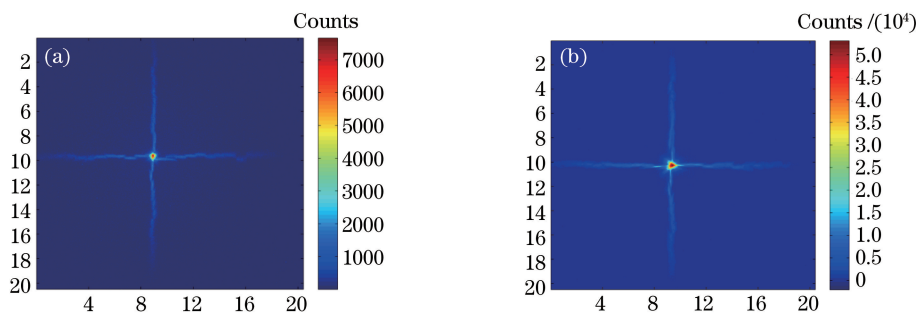


图 7 X 射线聚焦成像结果。(a)未镀 Ir 膜;(b)镀 Ir 膜

Fig. 7 Focused imaging results of X-ray. (a) Glass; (b) coating Ir

4.3 角分辨率

MPO 透镜应用于 X 射线聚焦成像, 需要考虑透镜的空间分辨能力, 通常采用角分辨率来表征 MPO 透镜的空间成像分辨能力。理想情况下 MPO 透镜的半高宽(FWHM)为 0.02 mm, 成像角分辨率为 11"。图 8 为 MPO 透镜中心焦斑光强分布曲线, 未镀 Ir 膜的 MPO 曲线最强峰右侧有不弱的伴峰, 可能是因为 MPO 透镜测试区域存在一定比例的方孔通道指向偏差, 导致焦斑高斯曲线右侧存在伴峰, 镀膜后中心焦斑光强增益提高约 7 倍。经计算得到镀 Ir 膜前、后的 FWHM 分别为 0.44 mm 和 0.64 mm, 对应的角分辨率为 4.14' 和 6.02', 与理论值存在偏差。这是因为 MPO 透镜在制作过程中存在很多工艺缺陷^[21-22], 导致方孔结构发生畸变。镀膜后透镜角分辨率变差, 可能是因为 MPO 透镜经过镀膜高温过程(约 300 °C), 球面面型发生畸变, 微孔统计特性变差, 导致十字线弥散、角分辨率增大。

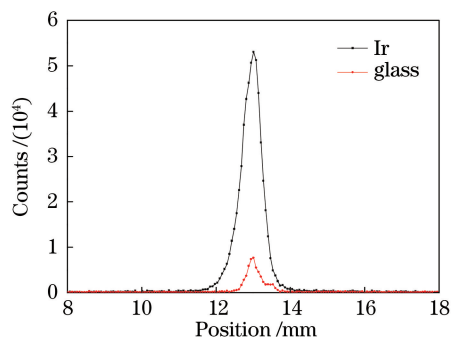


图 8 MPO 透镜中心焦斑光强分布曲线

Fig. 8 X-ray intensity distribution curve of focal spot

5 结 论

基于 X 射线全反射原理和旋转坐标系的方法, 建立了 X 射线在方孔内壁的传输模型, 并利用国家天文台 X 射线束流成像装置, 在能量为 4.5 keV 下, 对镀 Ir 膜前、后的 MPO 透镜进行了聚焦成像测试。实验结果表明, MPO 透镜的焦距和 X 射线传输效率与模拟结果相吻合, 表明构建的数值模型合理。镀 Ir 膜有助于提高掠入射临界角和 X 射线反射率, 中心焦斑增益增大约 7 倍, 传输效率由 1.23% 提升至 9.18%。但镀膜工艺也可能会引起球面面型产生畸变, 角分辨率由 4.14' 增大为 6.02', 降低成像质量。该数值模型可推广应用于 X 射线在任何形状的微孔传输特性模拟, 有助于指导 MPO 透镜的研制。

参 考 文 献

- [1] Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes[J]. The Astrophysical Journal, 1979, 233: 364-373.
- [2] Ables J G. Fourier transform photography: a new method for X-ray astronomy[J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1968, 1(4): 172-173.
- [3] Wang F X, Deng B, Wang Y D, *et al.* Synchrotron radiation X-ray stereo imaging based on capillary beam splitting[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0834004.
王飞翔, 邓彪, 王玉丹, 等. 基于毛细管分光的同步辐射 X 射线立体成像[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834004.
- [4] Petre R, Serlemitsos P J. Conical imaging mirrors for high-speed X-ray telescopes[J]. Applied Optics, 1985, 24(12): 1833-1837.
- [5] Li L, Wang L Y, Cai A L, *et al.* Projection decomposition algorithm for X-ray dual-energy computed tomography based on isotransmission line fitting [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36 (8): 0834001.
李磊, 王林元, 蔡爱龙, 等. 基于等值线拟合的 X 射线双能 CT 快速投影分解算法[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0834001.
- [6] Gondoin P, Aschenbach B, Brauning H W, *et al.* X-ray performance of a qualification model of an XMM mirror module [J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2808: 390-401.
- [7] Priedhorsky W C, Peele A G, Nugent K A. An X-ray all-sky monitor with extraordinary sensitivity[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1996, 279(3): 733-750.
- [8] Brunton A N, Fraser G W, Lees J E, *et al.* Metrology and modeling of microchannel plate x-ray optics[J]. Applied Optics, 1997, 36 (22): 5461-5470.
- [9] Peele A G. Investigation of etched silicon wafers for lobster-eye optics [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(2): 1268-1273.
- [10] Beijersbergen M, Kraft S, Bavdaz M, *et al.* Development of X-ray pore optics: novel high-resolution silicon millipore optics for XEUS and ultra-low mass glass micropore optics for imaging and timing[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5539: 104-115.
- [11] Chapman H N, Nugent K A, Wilkins S W. X-ray focusing using square channel-capillary arrays [J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62 (6): 1542-1561.

- [12] Tich ý V, Hudec R, N ěmcová Š. Effective algorithm for ray-tracing simulations of lobster eye and similar reflective optical systems [J]. *Experimental Astronomy*, 2016, 41(3): 377-392.
- [13] Peele A G, Lyngsjø H, Crocker R M, *et al.* Modeling of the Lobster-ISS X-ray telescope in orbit [J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5488: 232-241.
- [14] Putkunz C T, Peele A G. Detailed simulation of a Lobster-eye telescope[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14156-14165.
- [15] Zhao D H, Zhang C, Yuan W M, *et al.* Ray tracing simulations for the wide-field X-ray telescope of the einstein probe mission based on Geant4 and XRTG4 [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9144: 91444E.
- [16] Peng S Q, Liu Z G, Sun T X, *et al.* Numerical simulation of polycapillary X-ray lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0234001.
彭诗棋, 刘志国, 孙天希, 等. 基于多毛细管 X 光透镜的数值模拟 [J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0234001.
- [17] Pantell R H, Chung P. Transmission of X-rays through curved waveguides [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1978, 14(9): 694-697.
- [18] Mitsuighi I, Ezoe Y, Takgi U, *et al.* Novel ultralightweight and high-resolution MEMS X-ray optics [J]. *Proceedings of SPIE*, 2009, 7360: 73600C.
- [19] Spiller E A. Soft X-ray optics [J]. *Optics & Photonics News*, 1993, 7(2): 60-64.
- [20] Windover D, Armstrong N, Cline J P, *et al.* Characterization of atomic layer deposition using X-Ray reflectometry[J]. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 2005, 788(1/2/3): 144-146.
- [21] Li X, He F, Li D, *et al.* Influence of structural defect of square-hole micro channel plate on imaging quality [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1011001.
李旭, 何飞, 李达, 等. 方孔微通道板结构缺陷对成像质量的影响 [J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1011001.
- [22] Willingale R, Pearson J F, Martindale A, *et al.* Aberrations in square pore micro-channel optics used for X-ray lobster eye telescopes [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9905: 99051Y.