

## 子午型龙虾眼透镜 X 射线聚焦特性的研究

韩业明<sup>1</sup>, 付跃刚<sup>1</sup>, 欧阳名钊<sup>1\*</sup>, 胡源<sup>1</sup>, 秦天令<sup>1</sup>, 李洋<sup>2</sup><sup>1</sup> 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup> 中国移动通信集团吉林有限公司政企事业部, 吉林 长春 130033

**摘要** 子午型龙虾眼透镜较方孔型龙虾眼透镜具有更好的聚焦能力,为了研究子午型龙虾眼透镜反射表面的特征对 X 射线聚焦成像特性的影响,基于棱镜展开原理,建立了子午型龙虾眼透镜的光线追迹算法,并基于菲涅耳反射原理,分析了膜层材料、膜层厚度及膜层表面粗糙度对不同能量 X 射线聚焦特性的影响。研究结果表明,子午型龙虾眼透镜对 X 射线的聚焦能力主要取决于反射表面的传递效率,传递效率由选用的膜层厚度与粗糙度决定,同时受到通道锥顶角的调制。同时,X 射线的能量决定了子午型龙虾眼透镜的有效物方孔径角,透镜视场与有效物方孔径角的匹配也会影响子午型龙虾眼透镜的聚焦能力和焦斑分布。

**关键词** X 射线光学; 子午型龙虾眼透镜; 棱镜展开原理

中图分类号 TH743

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0634001

## X-Ray Focusing Characteristics of Meridional Lobster-Eye Lens

Han Yeming<sup>1</sup>, Fu Yuegang<sup>1</sup>, Ouyang Mingzhao<sup>1\*</sup>, Hu Yuan<sup>1</sup>, Qin Tianling<sup>1</sup>, Li Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>2</sup> Ministry of Enterprise and Business, China Mobile Communications Group Jilin Co., Ltd., Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** The meridional lobster-eye lens has a better focusing ability than the square-channel lobster-eye lens. In order to study the influence of the characteristics of the reflective surface of the meridional lobster-eye lens on the X-ray focusing imaging characteristics, one ray tracing algorithm for the meridional lobster-eye lens is established based on the principle of prism expansion. In addition, the effects of coating material, coating thickness and surface roughness on the focusing characteristics of X-rays with different energies are analyzed based on the Fresnel reflection principle. The research results show that the X-ray focusing ability of the meridional lobster-eye lens is mainly determined by the transfer efficiency of the reflective surface, and the transfer efficiency is determined by the chosen coating thickness and coating roughness and simultaneously modulated by the channel-cone apex angle. The X-ray energy determines the effective object aperture angle of the meridional lobster eye lens, and the matching of the lens field of view with the effective object aperture angle also influences its focusing ability and focal spot distribution.

**Key words** X-ray optics; meridional lobster-eye lens; prism expansion principle

**OCIS codes** 340.7470; 080.1753

## 1 引言

龙虾眼聚焦光学透镜是生物龙虾眼球形微通道

阵列结构的仿生设计,基于 X 射线谱段的全反射原理<sup>[1-2]</sup>,可以实现高能射线谱段内的大视场聚焦<sup>[3-4]</sup>,在宇宙射线暴的周天监视、X 射线天空探测、太阳风

收稿日期: 2020-09-18; 修回日期: 2020-10-15; 录用日期: 2020-11-05

\* E-mail: 4667615@qq.com

地磁成像领域有广泛的应用前景<sup>[5-7]</sup>。根据微通道沿通道轴线截面的不同,龙虾眼透镜可以分为子午型和方孔型龙虾眼透镜<sup>[8]</sup>。子午型龙虾眼透镜在空间结构上具有更好的对称性,相比于方孔型龙虾眼透镜具有更好的成像聚焦性能<sup>[9]</sup>。

关于龙虾眼微通道阵列的模拟分析,研究者提出了多种方案。Chapman 等<sup>[10]</sup>提出了几何光学数值模型, Tichy 等<sup>[11-12]</sup>提出了迭代数值模型, Putkunz 等<sup>[13-14]</sup>基于光线追踪软件进行了成像模拟,金戈等<sup>[15]</sup>提出了旋转坐标方法,胡慧君等<sup>[16]</sup>提出了一种计算有效探测面积的方法。但以上研究均是基于方孔型龙虾眼球形微通道阵列进行分析,中国科学院韦飞研究团队基于光线追迹方法提出了龙虾眼透镜仿真数学模型并开发了相关光学成像软件<sup>[17]</sup>,可实现微通道结构的球面龙虾眼透镜的精确仿真计算,但计算量巨大。本文基于棱镜分析方法,建立了子午型龙虾眼透镜的光线追迹算法,简化了光线在通道内多次反射的模型,提高了仿真效率。

基于菲涅耳反射原理,在不同特征的反射表面下,建立了反射率随入射角变化的数值模型,分析了龙虾眼透镜的反射表面特征对 X 射线聚焦特性的影响,并通过建立能量分布模型,验证了数值模型的准确性。

## 2 龙虾眼透镜棱镜的展开分析模型

子午型龙虾眼透镜的微通道反射壁与通道轴线共同指向球心位置,如图 1(a)所示,子午型龙虾眼透镜的球心为原点  $O$ ,中心对称光轴与  $Z$  轴重合,其微通道阵列是中心对称结构。从正面观察子午型龙虾眼透镜,其可以分成完全对称的四个象限,图 1(b)为透镜在  $Z$ - $Y$  方向的截面图。所有长度为  $t$ 、开口角为  $\alpha$  的微通道分布在视场角为  $\theta$  透镜球面上,通道的轴线都指向球心,通道截面为锥形,所有的微通道反射表面都指向球心。通道中心到球心的距离为  $R$ ,探测器平面垂直于中心对称光轴并位于距球心  $R/2$  的位置处。

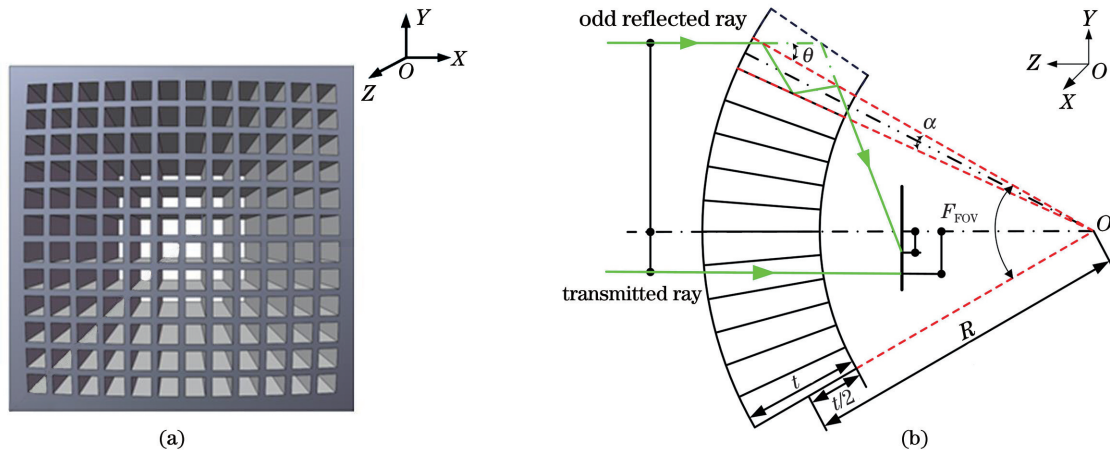


图 1 子午型龙虾眼透镜的结构示意图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 1 Structural diagram of meridional lobster-eye lens. (a) Front view; (b) side view

当光线经过龙虾眼透镜的微通道阵列时,光线将在微通道内部反射,反射后的光线从微通道阵列末端出射,根据不同的反射次数,出射光线将在焦平面上形成不同的入射焦点和焦臂,形成背景辐射分布<sup>[18]</sup>。

龙虾眼透镜是完美的球对称结构,每一个微通道的轴线都可以作为主光轴。当目标位于某个微通道的轴线上时,龙虾眼透镜可视作沿主轴展开的二维正交结构,此时目标光线在两个正交主截面上的轨迹方向可以完全分离。在  $Y$ - $Z$  主截面上,当其入射光线在空间角为  $\varphi$  的微通道内壁上发生单次反射时,物距  $L$  与像距  $L'$  完全满足高斯成像公式,即

$$\frac{1}{L'} - \frac{1}{L} = \frac{1}{f'}, \quad (1)$$

式中: $f'$ 为像方焦距。

利用横截面内的成像公式  $L' = r + r \frac{\sin I}{\sin U'}$  求得像方截距,其中  $U'$  为像方孔径角,  $U' = I + \varphi$ ,  $I$  为反射平面的掠入射角,作用球面的曲率半径  $r$  与通道内壁上的反射点有关,可表示为  $r = R + \Delta'$ ,  $\Delta'$  为球面与反射面的交点到入射点的距离,  $\Delta' \in \left(-\frac{t}{2}, \frac{t}{2}\right)$ ,  $t$  为微通道的长度。因此,由物点  $A$  发出的孔径角为  $U$  的光线经过微通道反射面反射后在任意像平面上的交点位置完全解析<sup>[19]</sup>。图 2 所

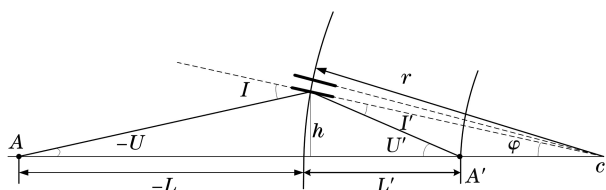


图 2 子午型龙虾眼透镜的单次反射成像原理示意图

Fig. 2 Schematic of single reflection imaging mechanism of meridional lobster-eye lens

示为子午型龙虾眼透镜的单次反射成像原理示意图,其中  $h$  为入射点到中心光轴的距离,  $I'$  为反射角,  $c$  为龙虾眼透镜反射曲面的球心,  $A'$  为像方焦点。

当入射光线在微通道内部发生多次反射时,龙虾眼透镜微通道内壁为反射表面,可以将其视为反射棱镜。利用棱镜展开原理,即反射微通道沿着第一入射表面展开,虚拟光线沿着实际光线入射方向前进且不发生偏折,实际光线与通道反射壁的关系可以等效为虚拟光线与展开虚拟棱镜的关系。如图 3 所示,虚拟光线在虚拟展开棱镜内与虚拟反射壁相交的次数等于实际光线与微通道反射壁相交的次数,多次反射被等效为在  $S'$  点的一次反射,其中  $S$  为入射点,  $L_0$  为微通道的下反射壁,  $L_1$  为微通道的上反射壁,  $L'_0$  为第一次展开棱镜的上反射壁,  $L'_1$

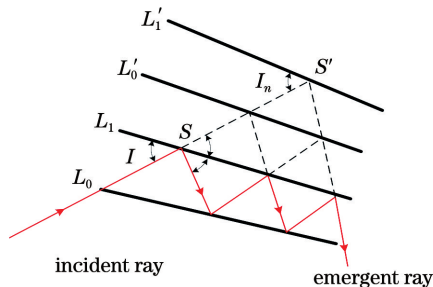
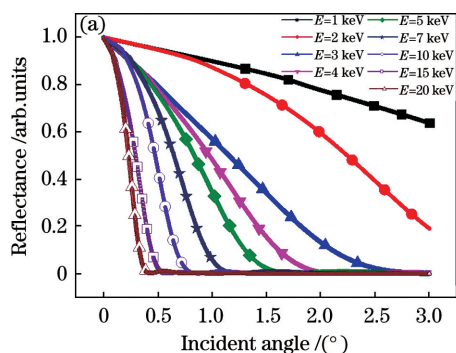


图 3 子午型龙虾眼透镜的棱镜展开方法

Fig. 3 Prism expansion method of meridional lobster-eye lens



为第二次展开棱镜的上反射壁。

第  $n$  次反射后的反射角为

$$I_n = I + (n - 1)\alpha, \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为微通道相对于球心的开口角。第  $n$  次实际反射等效为第  $n$  个虚拟反射壁上的反射,利用单次反射计算方法可以求得入射光线经微通道反射后在探测器平面上的像点位置。由于龙虾眼透镜两个正交方向上的轴上点物可以独立计算,因此轴上点  $A$  通过子午型龙虾眼透镜在轴向位置为  $d$  的像平面上的位置可以表示为

$$P(x, y) = f(L, d, R, t, \alpha), \quad (3)$$

式中:  $x$  为  $XOY$  平面内的入射点到  $Y$  轴的距离;  $y$  为  $XOY$  平面内的入射点到  $X$  轴的距离。

### 3 子午型龙虾眼透镜成像能量的数值分析

$X$  射线经微通道反射后的能量与反射表面的反射率有关,而反射率会随着入射角  $\theta$  改变,  $X$  射线在子午型龙虾眼透镜微通道内多次反射,每次反射的入射角都会发生变化。龙虾眼透镜的微通道内壁要求在工作谱段内具有较高的反射率,当内表面为理想反射平面时,反射率  $R_{\text{ref}}^{[20]}$  可表示为

$$R_{\text{ref}} = f'(E, \theta, \rho, \mu), \quad (4)$$

式中:  $E$  为入射的  $X$  射线能量;  $\rho$  为材料的电子密度;  $\mu$  为材料的衰减系数。为了提高反射表面的反射率,通常在易于处理的子午型龙虾眼透镜的微通道内壁镀上金属反射膜<sup>[21]</sup>。

通过 Matlab 仿真软件绘制了不同参数下膜层对不同能量  $X$  射线的传递效率曲线。根据(4)式可知,反射率  $R_{\text{ref}}$  不仅与膜层材料相关,还与  $X$  射线能量相关。图 4 是不同膜层材料和不同  $X$  射线能量下反射率  $R_{\text{ref}}$  随入射角  $\theta$  的变化曲线。可以看

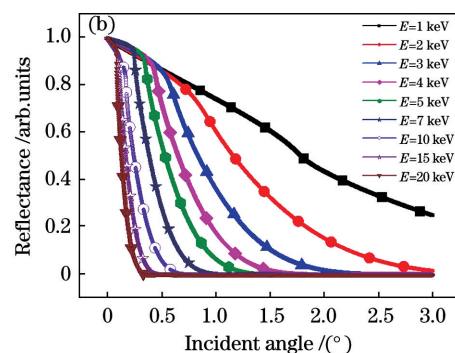


图 4 当  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m,  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m 时,不同膜层材料下  $R_{\text{ref}}$  与  $\theta$  的关系曲线。(a) Ir; (b) Ni

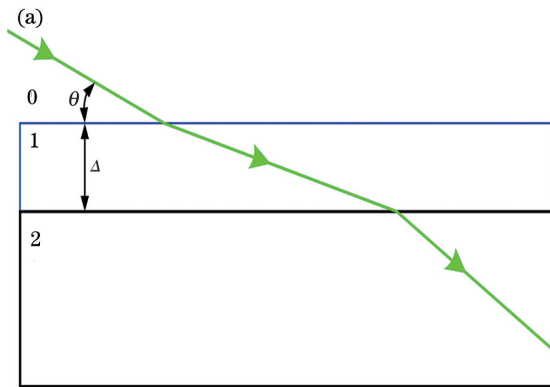
Fig. 4 Relationship between  $R_{\text{ref}}$  and  $\theta$  for different coating materials when  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m and  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m.

(a) Ir; (b) Ni

出,反射率  $R_{\text{ref}}$  随入射角  $\theta$  的增大而减小。X 射线的能量越低,反射表面的传递效率越高。因此,在粗糙度  $\sigma=1\times 10^{-10}$  m,膜层厚度  $\Delta=5\times 10^{-9}$  m 的条件下,当 X 射线能量  $E\leq 3$  keV 时,传递效率较高。对于理想反射表面,真实界面的反射率公式需要添加一个粗糙度因子以描述表面的粗糙程度。对于粗糙的真实反射表面,其反射率  $R_{\text{real}}$  可表示为

$$R_{\text{real}} = |r_{\text{plane}} \exp(-Q_0^2 \sigma^2 / 2)|^2, \quad (5)$$

式中: $\sigma$  为真实反射表面的粗糙度; $Q_0$  为传递波矢大小, $Q_0 = 2k \sin \theta$ ,其中  $k$  为波矢大小; $r_{\text{plane}}$  为 X



射线经平板反射后的振幅反射率,可表示为

$$r_{\text{plane}} = \frac{r_{01} + r_{12} p^2}{1 + r_{01} + r_{12} p^2}, \quad (6)$$

式中: $r_{01}$  为从介质 0 到 1 界面的反射幅度; $r_{12}$  为从介质 1 到 2 界面的反射幅度; $p^2$  为从膜层顶部和底部反射的光束的相位因子, $p^2 = \exp(iQ_1 \Delta)$ ,如图 5 所示,其中  $Q_1$  为新的传递波矢大小, $Q_1 = \sqrt{Q_0^2 - 8k^2 \delta_1 + i8k^2 \beta_1}$ ,需要通过 Pattatt 严格迭代法进行运算, $\delta_1$  为折射率的实部, $\beta_1$  为折射率的虚部。

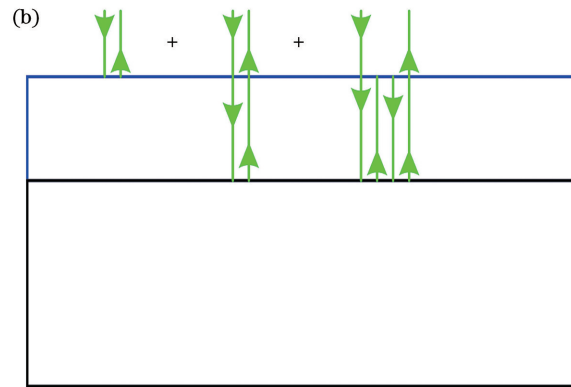


图 5 理想表面平板反射示意图。(a)正视图;(b)侧视图

Fig. 5 Schematic of ideal surface plate reflection. (a) Front view; (b) side view

根据(5)式可知,反射率  $R_{\text{ref}}$  与膜层表面粗糙度  $\sigma$  相关。图 6 是入射能量分别为 10 keV 和 1 keV 时,不同膜层表面粗糙度下反射率  $R_{\text{ref}}$  随入射角  $\theta$  的变化曲线。可以看到,膜层表面粗糙

度越小,反射表面的传递效率越高。因此,在 X 射线能量  $E=1$  keV,膜层厚度  $\Delta=5\times 10^{-9}$  m 的条件下,当膜层粗糙度  $\sigma\leq 1\times 10^{-9}$  m 时,传递效率较高。

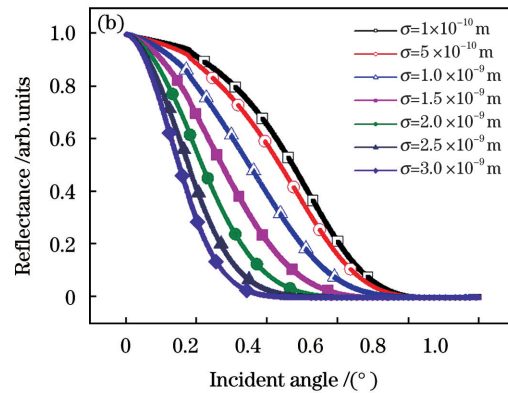
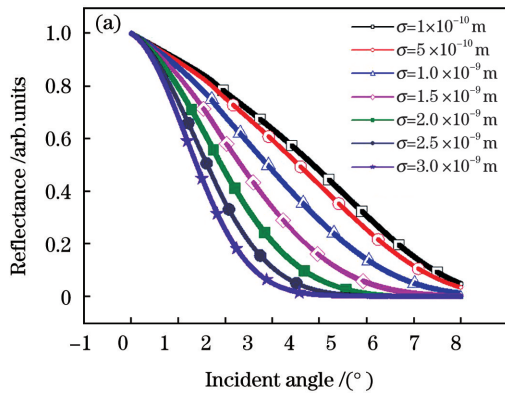


图 6 当膜层材料为 Ir, $\Delta=5\times 10^{-9}$  m 时,不同 X 射线能量下  $R_{\text{ref}}$  与  $\theta$  的关系曲线。(a) $E=1$  keV;(b) $E=10$  keV

Fig. 6 Relationship between  $R_{\text{ref}}$  and  $\theta$  for different X-ray energies when coating material is Ir and  $\Delta=5\times 10^{-9}$  m.

(a)  $E=1$  keV; (b)  $E=10$  keV

根据(6)式可知,反射率  $R_{\text{ref}}$  与相位因子  $p$  相关,而相位因子  $p$  是由膜层厚度  $\Delta$  决定的。图 7 为入射能量分别为 10 keV 和 1 keV 时,不同膜层厚度下反射率  $R_{\text{ref}}$  随入射角  $\theta$  的变化曲线。可以看出,膜层厚度越大,反射表面的传递效率越高。因此,在

X 射线能量  $E=1$  keV,膜层粗糙度  $\sigma=1\times 10^{-10}$  m 的条件下,当膜层厚度  $\sigma\geq 4\times 10^{-9}$  m 时,传递效率较高。同时,当 X 射线能量变小时,掠入射临界角变大,透镜的物方有效视场角也会变大,进而能量收集效率得到提高。



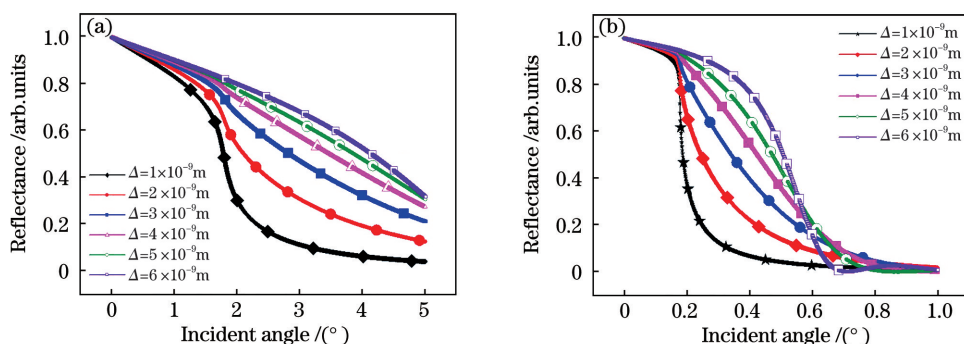


图 7 当膜层材料为 Ir 时,不同 X 射线能量下  $R_{ref}$  与  $\theta$  的关系曲线。(a)  $E=1$  keV;(b)  $E=10$  keV

Fig. 7 Relationship between  $R_{ref}$  and  $\theta$  for different X-ray energies when coating material is Ir . (a)  $E=1$  keV ; (b)  $E=10$  keV

#### 4 子午型龙虾眼透镜的聚焦性能分析

根据反射率的数值分析结果,可以推算出每条 X 射线经过子午型龙虾眼透镜后的强度为

$$I' = I_0 \cdot \prod_{i=1}^{n'} R_i(\theta_i), \quad (7)$$

式中: $R_i$  为反射效率; $\theta_i$  为掠入射角度; $i$  为反射次数; $I_0$  为初始射线强度; $n'$  为反射次数。结合子午

型龙虾眼透镜的棱镜展开光线追迹模型,可以精确得到像平面上焦点的能量分布情况。分析过程中的关键参数有以下几个:透镜的视场角、X 射线能量  $E$ 、膜层厚度  $\Delta$ 、膜层平面粗糙度  $\sigma$  和膜层材料。

利用 Matlab 仿真软件,建立平行入射的 X 射线经过子午型龙虾眼透镜聚焦在像平面上的能量分布模型,更直观分析上述参数对透镜聚焦能力的影响。如图 8(a)所示,在视场角  $F_{FOV}=2^\circ$ ,粗糙度  $\sigma=$

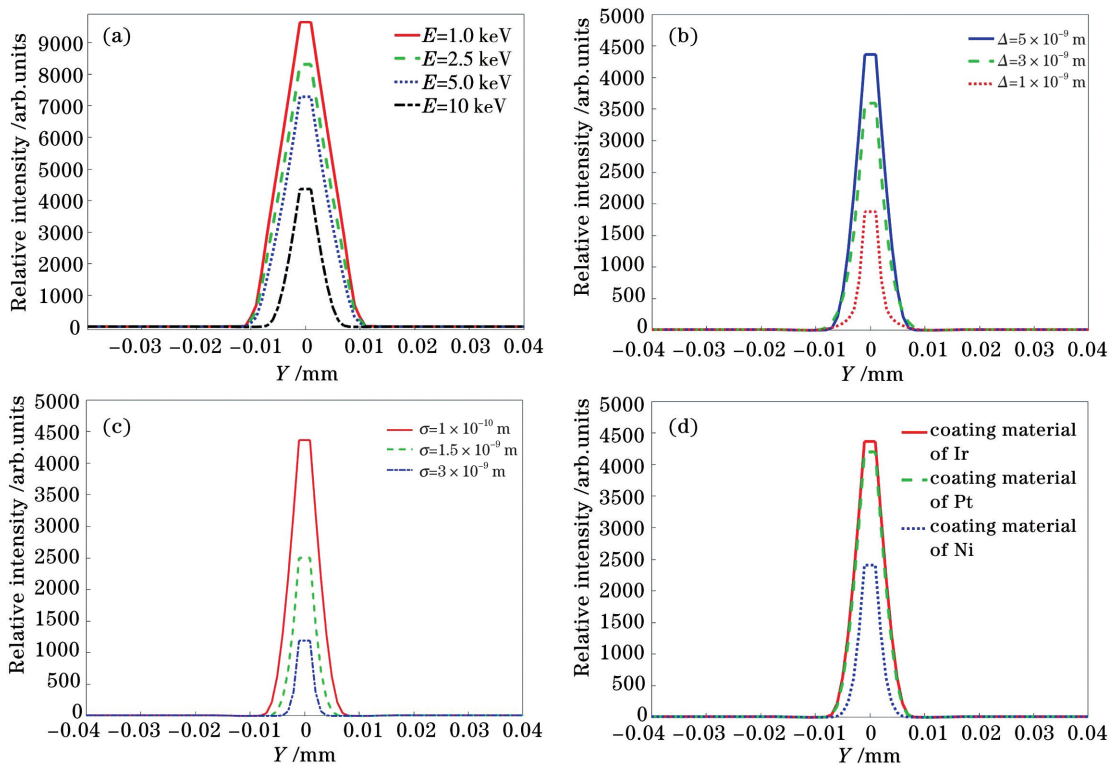


图 8 不同膜层特征下的中心焦斑光强分布图。(a)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m, 膜层材料为 Ir; (b)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $E=10$  keV, 膜层材料为 Ir; (c)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m,  $E=10$  keV, 膜层材料为 Ir; (d)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $E=10$  keV,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m

Fig. 8 Intensity distributions of focal spot under different coating characteristics. (a)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m, and coating material of Ir; (b)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $E=10$  keV, and coating material of Ir; (c)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m,  $E=10$  keV, and coating material of Ir; (d)  $F_{FOV}=2^\circ$ ,  $\sigma=1 \times 10^{-10}$  m,  $E=10$  keV,  $\Delta=5 \times 10^{-9}$  m

$1 \times 10^{-10}$  m, 膜层厚度  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m, 膜层材料为铱的条件下, 当 X 射线能量由 10 keV 减小到 1 keV 时, 焦点能量由  $4.5 \times 10^3$  提高至  $10 \times 10^3$ , 表明 X 射线能量  $E$  越低, 反射表面的传递效率越高, 透镜的聚焦能力越强。如图 8(b) 所示, 在视场角  $F_{FOV} = 2^\circ$ , 粗糙度  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m, X 射线能量为 10 keV, 膜层材料为铱的条件下, 当膜层厚度  $\Delta$  由  $1 \times 10^{-9}$  m 增大到  $5 \times 10^{-9}$  m 时, 焦点能量由  $2.0 \times 10^3$  提高至  $4.5 \times 10^3$ , 表明膜层厚度  $\Delta$  越大, 反射表面的传递效率越高, 透镜的聚焦能力越强。如图 8(c) 所示, 在视场角  $F_{FOV} = 2^\circ$ , 膜层厚度  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m, X 射线能量为 10 keV, 膜层材料为铱的条件下, 当膜层粗糙度  $\sigma$  由  $3 \times 10^{-9}$  m 降低到  $1 \times 10^{-10}$  m 时, 焦点能量由  $1.0 \times 10^3$  提高至  $4.5 \times 10^3$ , 表明膜层粗糙度  $\sigma$  越小, 反射表面的传递效率越高, 透镜的聚焦

能力越强。如图 8(d) 所示, 在视场角  $F_{FOV} = 2^\circ$ , 粗糙度  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m, X 射线能量为 10 keV, 膜层厚度  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m 的条件下, 当膜层材料由铱换为铂时, 透镜的聚焦能力变化不大, 但换为镍时, 透镜的聚焦能力明显变弱。

同时, 龙虾眼透镜的有效物方孔径角受 X 射线能量的影响, 如图 9、10 所示, 像平面上的能量分布由纵坐标的相对强度表征。其中, 相对强度为光线经过通道反射后的相对能量在像平面采样点上的累加。在粗糙度  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m, 膜层厚度  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m, 膜层材料为铱的条件下: 当 X 射线能量为 5 keV,  $F_{FOV} \geq 3^\circ$  时, 焦点能量几乎不再变化; 当 X 射线能量为 10 keV,  $F_{FOV} \geq 2^\circ$  时, 焦点能量几乎不再变化。因此, 当龙虾眼透镜在 高能 X 射线光谱下工作时, 采用视场与之匹配的透镜可以提高其分辨率。

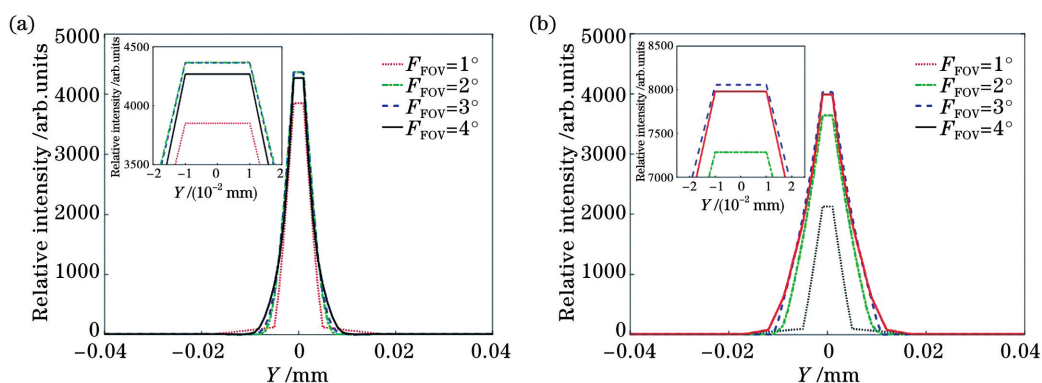


图 9 当  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m,  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m, 膜层材料为铱时, 不同 X 射线能量下的中心焦斑光强分布图。(a)  $E = 10$  keV; (b)  $E = 5$  keV

Fig. 9 Intensity distributions of focal spot for different X-ray energies when  $\sigma = 1 \times 10^{-10}$  m,  $\Delta = 5 \times 10^{-9}$  m and coating material is Ir. (a)  $E = 10$  keV; (b)  $E = 5$  keV

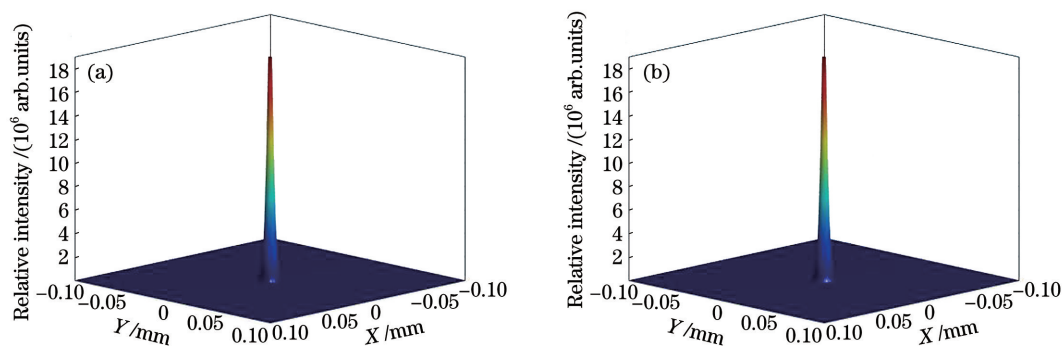


图 10 透镜聚焦光斑的 3D 分布图。(a)  $F_{FOV} = 2^\circ, E = 10$  keV; (b)  $F_{FOV} = 3^\circ, E = 10$  keV

Fig. 10 3D distribution of lens focusing spot. (a)  $F_{FOV} = 2^\circ, E = 10$  keV; (b)  $F_{FOV} = 3^\circ, E = 10$  keV

## 5 结 论

在棱镜分析的基础上, 建立了子午型龙虾眼透镜的 X 射线追迹算法。结合基于菲涅耳反射原理

的反射率数值模型, 建立了 X 射线经过子午型龙虾眼透镜聚焦在像平面上的能量分布模型, 更直观地认识了各种影响子午型龙虾眼透镜对 X 射线聚焦能力的因素。分析可知, 影响子午型龙虾眼透镜聚

焦能力的根本因素是其反射表面的传递效率和有效物方孔径角。因此,在龙虾眼透镜的研制过程中,正确选用膜层材料、提高膜层厚度和降低膜层表面粗糙度是提高反射表面传递效率的关键;在龙虾眼透镜的使用过程中,选用适当的视场角和与之匹配的 X 射线能量是保障其收集效率的关键。

### 参 考 文 献

- [1] Zhao L L, Sun D L, Wang L L, et al. Ray-tracing program for grazing incident X-ray microscope system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0401002.  
赵玲玲, 孙德林, 王丽丽, 等. 掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0401002.
- [2] Zhou W M, Yu M H, Zhang T K, et al. High-resolution X-ray backlight radiography using picosecond petawatt laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500010.  
周维民, 于明海, 张天奎, 等. 基于皮秒拍瓦激光的高分辨 X 射线背光照相研究[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500010.
- [3] Kaaret P E, Geissbuehler P. Lobster-eye X-ray optics using microchannel plates [J]. Proceedings of SPIE, 1992, 1546: 82-90.
- [4] Hudec R, Pina L, Inneman A, et al. Innovative technologies for future astronomical X-ray mirrors [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5488: 875-885.
- [5] Gao Z F, Deng H X, Liu B, et al. Polarization control of Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500015.  
高张峰, 邓海啸, 刘波, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置的偏振控制[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500015.
- [6] Guo J, Feng P, Deng L Z, et al. Optimization of detection angle for pinhole X-ray fluorescence computed tomography[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111017.  
郭静, 冯鹏, 邓露珍, 等. 针孔 X 射线荧光 CT 探测角度优化研究[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111017.
- [7] Hudec R, van Inneman A, Pina L, et al. Lobster-eye X-ray telescopes: recent progress[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4851: 578-586.
- [8] 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.  
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.
- [9] Zhao X, Ouyang M Z, Fu Y G, et al. Improved lobster eye lens based on micro-deformation of reflective wall[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(3): 0310002.  
赵玄, 欧阳名钊, 付跃刚, 等. 反射表面微变形的改进型龙虾眼透镜[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0310002.
- [10] 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.
- [11] Tichý V, Hudec R, Němcová Š. Effective algorithm for ray-tracing simulations of lobster eye and similar reflective optical systems [J]. Experimental Astronomy, 2016, 41(3): 377-392.
- [12] Peele A G, Lyngsjo H, Crocker R M, et al. Modeling of the Lobster-ISS X-ray telescope in orbit [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5488: 232-241.
- [13] Putkunz C T, Peele A G. Detailed simulation of a Lobster-eye telescope[J]. Optics Express, 2009, 17(16): 14156-14165.
- [14] 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.
- [15] Jin G, Li L H, Zhang C, et al. Numerical simulation of Angel lobster eye X-ray micro pore optic lens[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(9): 0934001.  
金戈, 黎龙辉, 张臣, 等. 基于 Angel 型龙虾眼 X 射线透镜的数值模拟[J]. 光学学报, 2018, 38(9): 0934001.
- [16] Hu H J, Song J, Li W B, et al. Research on Angel lobster-eye focusing optical system applied in soft X-ray detection [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(4): 0422005.  
胡慧君, 宋娟, 李文彬, 等. 应用于软 X 射线成像探测的 Angel 型龙虾眼光学系统研究[J]. 光子学报, 2017, 46(4): 0422005.
- [17] Peng S W. Simulation of the optics design of the wide field of view soft X-ray imager and analysis of its imaging performance [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.  
彭松武. 宽视场软 X 射线成像仪光学设计仿真与成像分析研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.
- [18] Ouyang M, Zhao X, He W, et al. Structural design method of the meridional lobster-eye lens with optimal efficiency [J]. Applied Optics, 2019, 58(33): 9033-9038.
- [19] Ouyang M Z, Zhu W B, Fu Y G, et al. Improved lobster eye lens based on Schmidt geometry [J].

Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(12): 3610-3614.

欧阳名钊, 朱万彬, 付跃刚, 等. Schmidt 结构的改进型龙虾眼光学透镜研究 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3610-3614.

[20] Als-Nielsen J, McMorrow D. Elements of modern X-

ray physics [M]. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011.

[21] Mitsuishi I, Ezoe Y, Ishizu K, et al. Novel ultralightweight and high-resolution MEMS X-ray optics for space astronomy [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 188: 411-416.