

多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件

刘 舵^{1,2} 强鹏飞¹ 李林森^{1,2} 刘 哲¹ 盛立志^{1,3*} 刘永安¹ 赵宝升¹

¹中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光子学与光子技术国家重点实验室, 陕西 西安 710119

²中国科学院大学, 北京 100049

³地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054

摘要 针对 X 射线脉冲星导航与 X 射线空间通信的需求, 对多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件进行研制与实验标定。根据掠入射原理, 对聚焦透镜进行理论设计, 确定聚焦透镜的关键参数。讨论聚焦透镜的材料、镀膜等研制工艺。分别在可见光与 X 射线条件下测试了聚焦透镜的性能参数。结果表明测得可见光焦斑直径为 14 mm, X 射线焦斑直径为 20 mm, 在 10 m 真空管道中测得光子能量为 1.5 keV 时聚焦效率为 30.2%, 有效面积为 2400 mm²。

关键词 X 射线光学; X 射线聚焦光学器件; X 射线掠入射; X 射线脉冲星导航; 有效面积; 聚焦效率

中图分类号 O434 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0834002

Multilayer Nested X-Ray Focusing Optical Device

Liu Duo^{1,2} Qiang Pengfei¹ Li Linsen^{1,2} Liu Zhe¹ Sheng Lizhi^{1,3}

Liu Yong'an¹ Zhao Baosheng¹

¹State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract Aiming at the demand on X-ray pulsar navigation and X-ray space communication, the multilayer nested X-ray focusing optical device is developed and tested. Theoretical design of focusing lenses is carried out according to the principle of grazing incidence, and key parameters of the focusing lenses are determined. The materials of focusing lenses and the preparation technologies such as the coating process are discussed. The performance parameters of the focusing lenses are tested respectively under the conditions of visible light and X-ray. The results show that the spot diameter of visible light is 14 mm, the spot diameter of X-ray is 20 mm, and the focusing efficiency is 30.2%. The effective area is 2400 mm² in a 10 m vacuum pipe when the photon energy is 1.5 keV.

Key words X-ray optics; X-ray focusing optical device; X-ray grazing incidence; X-ray pulsar navigation; effective area; focusing efficiency

OCIS codes 340.7470; 340.7480

1 引 言

近年来,随着 X 射线脉冲星导航^[1-4]与 X 射线空间通信^[5-7]等技术的兴起,对大面积、高信噪比的 X 射线探测器提出了重大需求^[8],采用聚焦型探测器可以有效解决这一问题,而聚焦型探测器的核心即为多层嵌套式 X 射线聚焦光学。

收稿日期: 2016-02-02; 收到修改稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金(61471357)、中国科学院“西部之光”基金

作者简介: 刘 舵(1986—),男,博士研究生,主要从事 X 射线聚焦光学及 X 射线通信方面的研究。

E-mail: liuduo8610@163.com

导师简介: 赵宝升(1959—),男,研究员,博士生导师,主要从事 X 射线脉冲星导航及 X 射线通信方面的研究。

E-mail: open@opt.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: lizhi_sheng@opt.ac.cn

X 射线聚焦光学利用 X 射线掠入射原理使入射 X 射线聚焦在一定面积上。X 射线的聚焦与准直一直以来都是研究的难点,各国学者采用多种方法对 X 射线进行聚焦与准直^[9-13],如毛细管透镜、Wolter 透镜、复合折射透镜及波带片等。不同的聚焦方法应用于不同的领域,如同步辐射、空间 X 射线观测、X 射线光刻及 X 射线显微成像等。空间 X 射线观测要求聚焦方法具有大面积、高效率 and 轻量化的特点,在轻量化方面波带片具有很大优势,然而考虑到大面积与高效率的要求,Wolter 透镜更为合适^[14-15]。国内 Wolter 透镜的研究尚处于初步阶段。

研制的多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件基于 Wolter 透镜原理,根据应用需求对其进行设计与工艺上的简化,由 Wolter 透镜的两次反射简化为一次反射,用多片平面反射镜近似圆锥反射镜。X 射线脉冲星导航与 X 射线空间通信的聚焦光学器件对成像、角分辨率等不作要求,只对透镜的聚焦效率与有效面积有要求,因此,采用单次反射的多层嵌套式设计可以实现更高的聚焦效率、更小的重量及更好的经济性^[16]。

本文介绍了多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件的理论基础与器件结构,提出了具体设计参数,并介绍了具体制造工艺。测定聚焦光学器件的聚焦效率等参数,并分析了影响测试结果的因素。

2 工作原理与器件结构

2.1 多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件工作原理

X 射线波长极短、光子能量大、穿透能力强,传统光学聚焦手段并不适用于 X 射线波段。X 射线在介质中的折射率略小于 1,因此,当入射的 X 射线与光滑介质表面接近平行时会发生全反射,全反射临界角 θ_c 是入射角的余角。多层嵌套式聚焦光学器件是基于 X 射线掠射原理将较大面积的入射 X 射线光子汇聚到焦点处。为了增大反射率,常在反射镜表面镀金属膜,临界角 θ_c 可以表示为^[17]

$$\theta_c = (n_e r_e \lambda^2 / \pi)^{1/2}, \quad (1)$$

$$n_e = \frac{\rho}{A_r} \cdot N_A \cdot Z, \quad (2)$$

$$r_e = e^2 / 4\pi\epsilon_0 m_e c^2, \quad (3)$$

式中 n_e 为介质电子密度, r_e 为经典电子半径, λ 为入射波长, ρ 为物质密度, N_A 为阿伏伽德罗常数, Z 为原子序数, A_r 为相对原子质量, e 是电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, m_e 为电子质量, c 是光速。对于重金属元素, $Z/A_r \approx 0.5$, 因此, (1) 式可简化为

$$\theta_c = 3.26 \times 10^{-21} \rho^{1/2} / E. \quad (4)$$

式中 $E = hc/\lambda$, 是入射光子能量。由 (4) 式可知, X 射线的临界掠射角与反射面的材料密度正相关, Au、Ir 等高 Z 值金属元素一般密度较大, 因此常选择这些金属材料作为 X 射线的反射膜, 另外需要注意的是, 每一种金属材料对应一定能量范围的吸收边, 在吸收边能量范围的 X 射线光子被材料大量吸收, 造成反射率的迅速下降, 因此, 选择的镀膜材料应该在所需能量范围内避开材料的吸收边。X 射线临界掠射角还与入射光子能量成反比, 对于能量在几千电子伏的光子来说, 临界掠射角一般在 1° 左右。对于金属 Ir, $\rho = 22.5 \text{ g/cm}^3$, 5 keV 的 X 射线光子在 Ir 膜上的掠射临界角为 1.1° 。

由于反射镜片掠射角很小, 单层镜片的有效集光面积非常小, 因此需要将 X 射线聚焦光学器件设计为多层嵌套结构。多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件的设计原则为: 1) 掠射角足够小, 一般小于临界掠射角 θ_c ; 2) 掠射角逐层渐变, 使各层镜片共焦点, 如图 1 所示。

2.2 X 射线聚焦光学器件参数设计

进行每层镜片掠射角度渐变设计前, 根据应用, 要求聚焦透镜口径 $\Phi = 100 \text{ mm}$, 管长 $L = 150 \text{ mm}$, 焦距 $F = 1050 \text{ nm}$ 。为使所有镜片的反射光线会聚一处, 应使每层镜片与镜筒轴心间的角度发生渐变, 设计每层镜片的掠射角从 1.245° 到 0.25° 渐变。多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件具体设计依据为

$$\begin{cases} \tan 2\alpha = \frac{50 - D/2}{1050} \\ \sin \alpha = \frac{D}{150} \end{cases}, \quad (5)$$

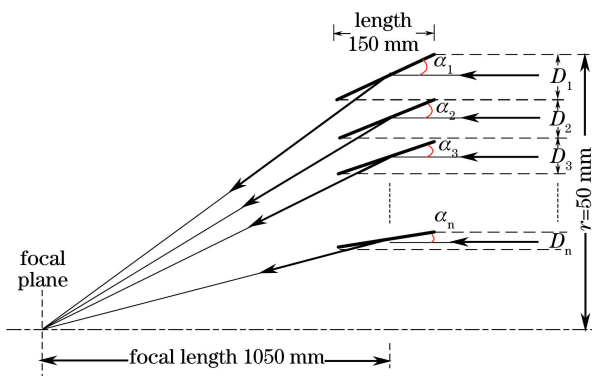


图 1 多层嵌套结构聚焦原理图

Fig. 1 Focusing principle of multilayer nested structure

式中 α 为掠入射角, D 为两层镜片间距, 最外层镜片所在位置由聚焦透镜的口径 ϕ 决定, 由外向内逐层计算每层镜片角度与镜片间距。经设计计算, X 射线聚焦光学器件最终由 18 个扇形模块组成, 每个模块包括 24 层角度渐变的反射镜片, 掠射角范围为 $0.25^\circ \sim 1.245^\circ$, 由内向外逐层增大, 设计效果图如图 2 所示。

几何收集面积为相邻两层镜片所围成的圆环面积之和, 总的几何收集面积为

$$A_n = \sum_{n=1}^{24} \pi(R_n^2 - r_n^2), \quad (6)$$

式中 R_n 为圆环外半径, r_n 为圆环内半径。计算得到聚焦光学器件总的几何收集面积为 4960 mm^2 。

根据理论设计, 利用软件建立聚焦光学模型, 进行光线追迹。图 3 用可见光的光线追迹来对聚焦光学器件的聚焦性能及焦斑形状做出定性分析, 左侧横纵坐标为长度, 描述了焦斑尺寸, 右侧纵坐标为焦斑亮度的标尺, 表明了焦斑的亮度分布, 中心最亮, 边缘逐渐减弱, 单位是亮度单位 lux, 这个单位只是作为一个对比, 没有绝对的意义, 取决于光线追迹时光源亮度参数的设定。由图 3 可以看到, 光斑为圆形, 亮度中心强边缘弱, 呈环状均匀分布。光斑直径约为 14 mm 。

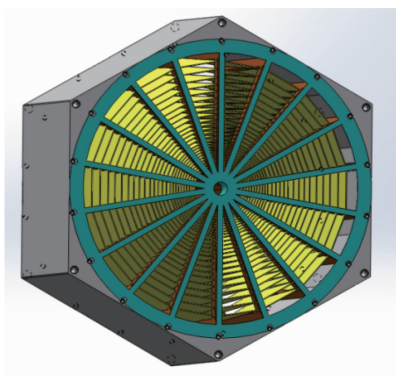


图 2 X 射线聚焦光学器件效果图

Fig. 2 Design sketch of X-ray focusing optical device

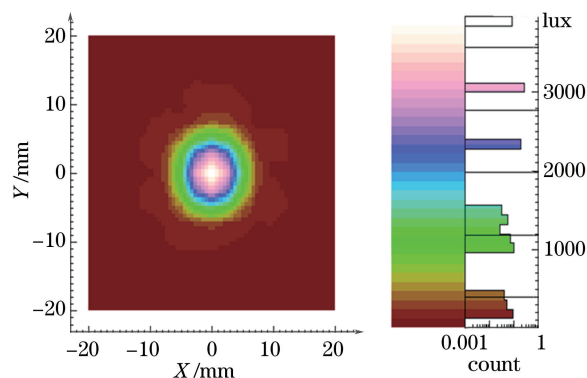


图 3 焦斑亮度模拟图

Fig. 3 Simulation diagram of focal spot brightness

2.3 聚焦效率与有效面积

聚焦效率 η 与有效面积 S_e 是描述聚焦光学性能的指标, 两者之间存在关联, 聚焦效率即为聚焦光学器件出射光功率与入射光功率的比值, 有效面积为几何收集面积 S_c 与镜片反射率 R 的乘积。有效面积与几何面积的比值即为聚焦效率, 计算公式为

$$S_e = S_c \cdot \eta. \quad (7)$$

设计聚焦光学器件的几何面积为 7854 mm^2 , 几何收集面积为 4960 mm^2 , 实际反射率计算公式为^[18]。

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \sin \theta}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (8)$$

式中 R_0 为表面绝对光滑时的理想反射率, σ 为粗糙度的均方根值。聚焦光学器件的有效面积为各层几何收

集面积与其反射率乘积的总和,利用(7)、(8)式计算聚焦透镜有效面积 A_E 。给出聚焦光学器件在不同能量入射光下的理论有效面积,由图 4 可见,设计聚焦光学器件在 1.5 keV 能量的 X 射线下有效面积为 4000 mm^2 ;在 4.5 keV 能量的 X 射线下有效面积为 2100 mm^2 。事实上,由于聚焦光学器件制作工程中装配误差等因素的影响,实际应用中有效面积会小于理论值。

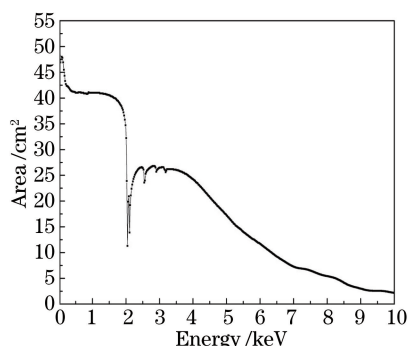


图 4 X 射线聚焦光学器件理论有效面积

Fig. 4 Theoretical effective area of X-ray focusing optical device

3 制作工艺

反射镜片的基底材料不仅要有良好的机械性能,还要具备轻质与高稳定性特点,综合衡量金属、复合材料、玻璃等材料的性能与经济性后,最终选择玻璃作为反射镜片基底。选择玻璃型号时需要考虑的主要因素有:1) 厚度,选用厚度为 $0.2 \sim 0.4 \text{ mm}$ 的玻璃;2) 表面粗糙度,由于玻璃基底一定程度上会影响镀膜的表面粗糙度,应尽量选择表面粗糙度低的玻璃;3) 转变温度,应选用转变温度较低的玻璃,不仅节能而且能够减少升降温时间,提高效率;4) 经济性,在满足要求的前提下,选择价格相对较低的玻璃型号。综合考虑以上因素,选用德国肖特 D263T 浮法玻璃。几种玻璃的参数对比如表 1 所示。

表 1 几种玻璃参数对比

Table 1 Parameters comparison of several glasses

Parameter	Type		
	Schott AF 32	Corning gorilla	Schott D263T
Thermal expansion / K^{-1}	3.2×10^{-6}	8.1×10^{-6}	7.2×10^{-6}
Strain point / $^{\circ}\text{C}$	686	523	529
Annealing point / $^{\circ}\text{C}$	717	663	557
Softening point / $^{\circ}\text{C}$	969	852	736

X 射线聚焦光学镜片切割方法有金刚石切割、激光切割、热线切割等。热线切割的截面最平整,对玻璃基板性能影响最小,但是综合考虑加工条件与加工精度,选择激光切割。将采购的 D263T 玻璃精确切割为设计中所需要的尺寸,然后用无碱清洗剂超声清洗,烘干待用。为了增加镜面反射率、增大有效集光面积,往往选用基底材料表面加镀高 Z 值金属薄膜的方式,如 Au、Ni、Pt、Ir 等。

由图 5 可见,在几种镀膜材料中,Ir 在所需能量范围($0.1 \sim 10 \text{ keV}$)内的反射率最高,因此选用 Ir 作为镀膜材料,采用电子束热蒸发镀膜方法。与理想表面反射率对比[表面粗糙度均方根(RMS)为 0],当 RMS 为 0.5 nm 时,Ir 膜反射率几乎没有下降,随后当表面粗糙度逐渐增大时,Ir 膜反射率下降幅度越来越大,若表面粗糙度提高到 RMS 小于 0.5 nm ,反射率仍可继续提高,但是提高的幅度非常微小,如图 6 所示,且镀膜工艺的难度和对设备的要求会大大提高,所以表面粗糙度选择 0.5 nm 较合适。图 7 为装配完成的聚焦光学器件实物图。

4 实验过程与测试结果

4.1 焦距的测量

由于加工及装配引入的误差,可能会发生焦点位置的变化与焦斑畸变,因此在整体装配完毕之后,需重

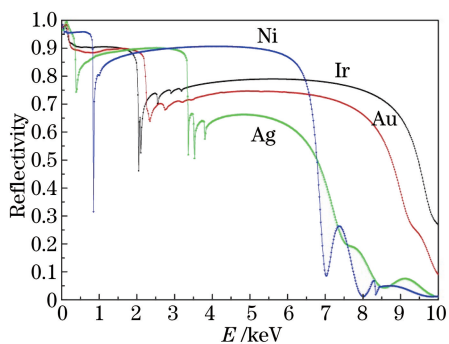


图 5 不同金属膜的反射率曲线

Fig. 5 Reflectivity curves of different metal films

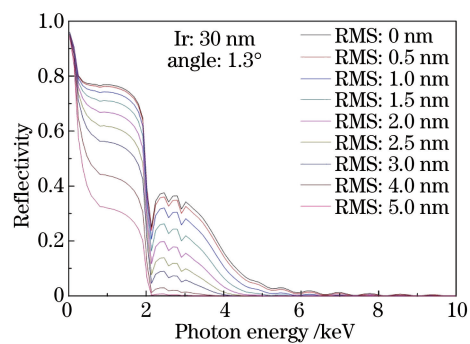


图 6 不同表面粗糙度镜片的反射率

Fig. 6 Reflectivities of mirrors with different surface roughnesses

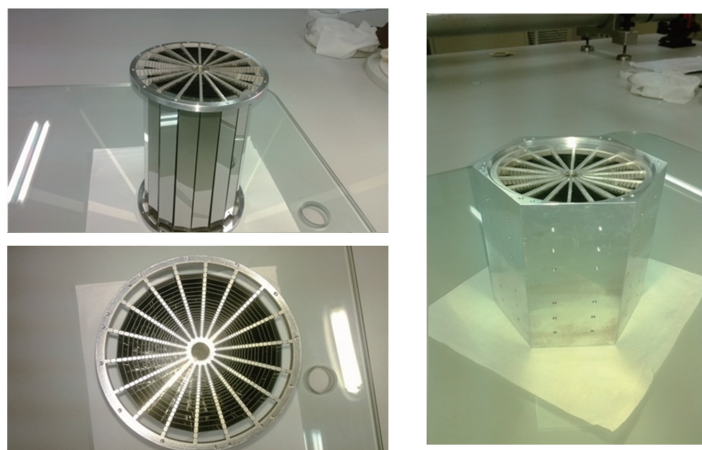


图 7 X 射线聚焦光学器件装配实物图

Fig. 7 Photographs of assembled X-ray focusing optical device

新确定实际焦点位置。X 射线在掠射条件下的光路传播与可见光遵循相同原则，满足掠入射条件时，利用可见光测定聚焦光学焦距是可取的。

在实验台上固定平行光管与聚焦光学，使两者同轴，平行光管发出的平行光经过聚焦光学器件后会聚于焦点处，在理论焦点位置附近放置光屏，微调聚焦光学器件角度并前后移动光屏，找到光斑形状最佳时光屏的位置，此位置与聚焦光学器件入射端的距离即为聚焦光学器件的实际焦距 f 。经测量，焦距为 114 cm，焦斑直径为 14 mm。实验装置示意图如图 8 所示。

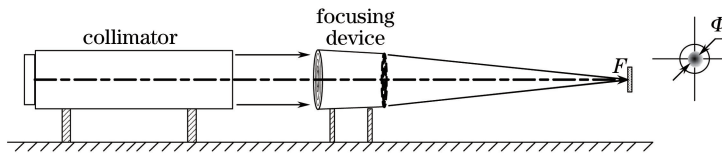


图 8 聚焦光学器件的可见光测量装置图

Fig. 8 Measurement equipment diagram of focusing optical device under visible light condition

4.2 真空中用 X 射线光源测量焦距 F

X 射线是波长极短的电磁波，在掠入射条件下同样遵循光的反射定律，因此可用可见光测量聚焦光学的焦距；然而对于焦斑形状，聚焦光学器件的多层嵌套式结构决定了入射 X 射线在每一层反射镜片的掠射角不同，因此每层镜片的反射率不同，导致 X 射线光斑强度分布与可见光焦斑不同，因此仍需在 X 射线光源条件下测量焦斑。X 射线焦斑的测量方法如图 9 所示，测量装置实物图如图 10 所示。

X 射线源发出 X 射线光束后，光束经 9 m 真空管以准平行角度进入 X 射线聚焦光学器件，在聚焦光学器件焦平面上利用 X 射线单光子计数成像仪进行焦斑成像。X 射线单光子计数成像仪的工作原理如图 11 所示，入射 X 射线由于光电效应在 CsI 光电阴极上产生光电子，电子在外加电场的作用下经微通道板

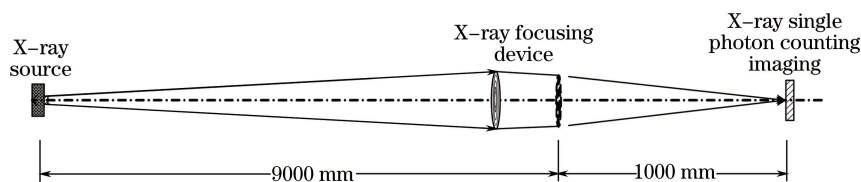


图 9 聚焦光学器件的 X 射线测量装置原理图

Fig. 9 Measurement equipment schematic diagram of focusing optical device under X-ray condition



图 10 聚焦光学器件装置实物图

Fig. 10 Photographs of focusing optical device

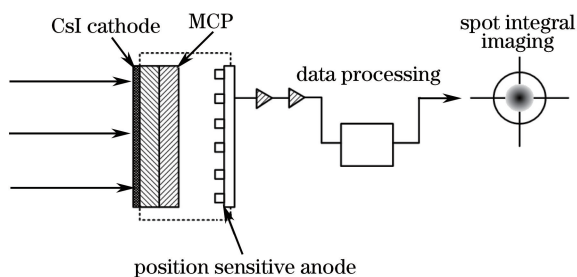


图 11 X 射线单光子计数成像仪原理图

Fig. 11 Schematic diagram of X-ray single photon counting imager

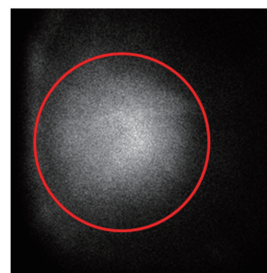


图 12 X 射线焦斑图像

Fig. 12 Image of X-ray focal spot

(MCP)倍增,到达位敏阳极,经一定的算法与后端电子学处理后获得 X 射线的焦斑形状。如图 12 所示,测试得到 X 射线焦斑直径为 20 mm 左右比理论值稍大,这是因为入射 X 射线有一定的发散角(5 mrad)。

4.3 聚焦效率测量

利用 X 射线单光子计数成像仪测试 X 射线聚焦光斑可以定性说明 X 射线聚焦光学器件的聚焦能力,若要定量说明此能力,则需测量 X 射线聚焦光学器件的聚焦效率。聚焦效率的测试装置与图 9 所示实验装置基本相同,只是将 X 射线单光子计数成像仪换为具有能量分辨和高计数功能的硅漂移探测器(SDD)。

X 射线光子的测试过程如下。首先在不加 X 射线聚焦光学器件时,由 SDD 对光源产生的 X 射线光子进行计数率测试,以此结果作为对比。图 13 为一定条件下 X 射线光源能谱分布及相同条件下经过聚焦光学器件聚焦之后各自对应的 X 射线能谱分布。可以看出经 X 射线聚焦光学器件聚焦之后的谱线高度远大于未被聚焦时的谱线高度,说明 X 射线聚焦光学器件对 X 射线有明显的聚焦作用。

图 14 为测得的平片型多层嵌套式聚焦光学器件的聚焦效率,可以看到,光子能量为 1~2 keV 时实测的聚焦效率约为 30%,与理论值 52%有一定的差距,这是由机械加工与装配误差造成的。光子能量为 2 keV 左右时,聚焦效率突然下降,对应 Ir 的一个吸收限,光子能量为 2.5~4 keV 时,聚焦效率稳定在 20%左右,之后缓慢下降。求得聚焦效率后,由(7)式可知聚焦光学器件的有效面积为 2400 mm² (1~2 keV)和 1700 mm² (2.5~4 keV)。

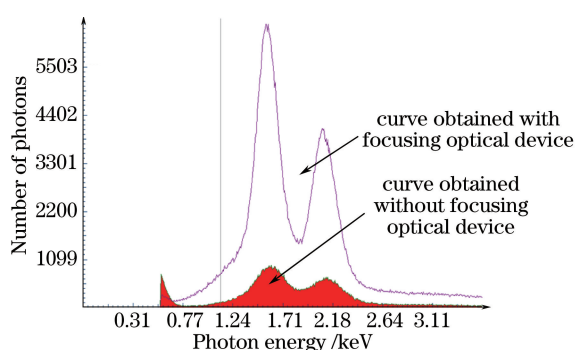


图 13 聚焦前后能谱对比图

Fig. 13 Comparison of energy spectra before and after focusing

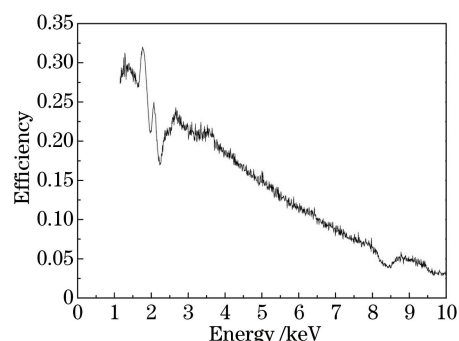


图 14 X 射线聚焦光学器件的聚焦效率

Fig. 14 Focusing efficiency of X-ray focusing device

5 结 论

分析了多层嵌套式 X 射线聚焦光学器件的理论基础和器件结构设计,并讨论了聚焦光学器件的具体设计参数及制作工艺,实验测定了多层嵌套式聚焦光学器件的焦距为 1.15 m,聚焦效率为 30.2%,有效面积为 2400 mm^2 (1~2 keV) 和 1700 mm^2 (2.5~4 keV)。对聚焦光学器件的性能测试表明,X 射线聚焦光学器件性能较好,可以应用于 X 射线脉冲星导航和 X 射线通信中。但实际聚焦效率与理论聚焦效率之间差距较大,下一步计划采用玻璃热坍塌成型的方法,每层镜面由热坍塌成型的圆锥曲面玻璃构成,这种方法可以进一步减小光斑尺寸,提高聚焦效率。

参 考 文 献

- Chen Baomei, Zhao Baosheng, Hu Huijun, *et al.* Detection and fitting of pulse profile for X-ray pulsar navigation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0534002.
陈宝梅, 赵宝升, 胡慧君, 等. X 射线脉冲星导航系统中脉冲轮廓的探测与拟合[J]. *光学学报*, 2011, 31(5): 0534002.
- Hanson J E. Principles of X-ray navigation[D]. Stanford: Stanford University, 1996.
- Sheikh S I. The use of variable celestial X-ray sources for spacecraft navigation[D]. Maryland: University of Maryland, 2005.
- Shuai Ping, Li Ming, Chen Shaolong, *et al.* Principle and method of the X-ray pulsar navigation system[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009.
帅平, 李明, 陈绍龙, 等. X 射线脉冲星导航系统原理与方法[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- Zhao Baosheng, Wu Chuanxing, Sheng Lizhi, *et al.* Next generation of space wireless communication technology based on X-ray[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(7): 801-804.
赵宝升, 吴川行, 盛立志, 等. 基于 X 射线的新一代深空无线通信[J]. *光子学报*, 2013, 42(7): 801-804.
- Deng Ningqin, Zhao Baosheng, Sheng Lizhi, *et al.* A space audio communication system based on X-ray[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 060705.
邓宁勤, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 X 射线的空间语音通信系统[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 060705.
- Wang Lüqiang, Su Tong, Zhao Baosheng, *et al.* Bit error rate analysis of X-ray communication system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(12): 120701.
王律强, 苏桐, 赵宝升, 等. X 射线通信系统的误码率分析[J]. *物理学报*, 2015, 64(12): 120701.
- Song Juan, Zhao Baosheng, Sheng Lizhi, *et al.* Research on shared anode used for the large area array MCP detector[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0823002.
宋娟, 赵宝升, 盛立志, 等. 基于 MCP 大面阵 X 射线探测器共享阳极的研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 0823002.
- Sun Tianxi, Liu Hehe, Liu Zhiguo, *et al.* Application of confocal micro X-ray fluorescence technique based on polycapillary X-ray lens in analyzing medicine with capsule[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0134001.
孙天希, 刘鹤贺, 刘志国, 等. 毛细管 X 光透镜共聚焦微束 X 射线荧光技术在胶囊类药品分析中的应用[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0134001.
- Peng Shiqi, Liu Zhiguo, Sun Tianxi, *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.
- 11 Zhao Dachun, Chen Bo, Liu Peng, *et al.* Theoretical prediction of flat circular-channel MCP performance for focusing X-rays[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(9): 0934002.
赵大春, 陈 波, 刘 鹏, 等. 平面圆孔微通道板用于 X 射线聚光的理论预测[J]. 光学学报, 2015, 35(9): 0934002.
- 12 Zhang Y C, Xie C Q. Differential-interference-contrast digital in-line holography microscopy based on a single-optical-element[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 5015-5018.
- 13 Xie Changqing, Zhu Xiaoli, Niu Jiebin, *et al.* Micro-and nano-metal structures fabrication technology and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(9): 0900128.
谢常青, 朱效立, 牛洁斌, 等. 微纳金属光学结构制备技术及应用[J]. 光学学报, 2011, 31(9): 0900128.
- 14 Wolter H. Mirror systems with glancing incidence on image producing optics for X-rays[J]. Ann Phys, 1952, 94(10): 866-875.
- 15 Zhang W W. Manufacture of mirror glass substrates for the NuSTAR mission[C]. SPIE, 2009, 7437: 74370N.
- 16 Balsamo E, Gendreau K, Arzoumanian Z, *et al.* Concept study X-ray testing for NICER's X-ray concentrators[C]. SPIE, 2013, 8861: 88611M.
- 17 Sun Kexu, Yi Rongqing, Yang Guohong, *et al.* The reflectance calibration of soft X-ray planar mirror with different grazing angle[J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(4): 1099-1104.
孙可煦, 易荣清, 杨国洪, 等. 软 X 射线平面镜不同掠射角下的反射率标定[J]. 物理学报, 2004, 53(4): 1099-1104.
- 18 Hu Jiasheng, Zhao Lingling, Li Xiang. Design and analysis of X-ray microscope of four mirrors working at grazing incidence[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2005, 16(5): 534-537.
胡家升, 赵玲玲, 李 祥. 非共轴掠入射 X 射线显微镜的设计与分析[J]. 光电子 • 激光, 2005, 16(5): 534-537.