

## 轻量化扇形 X 射线微孔器件研制及性能测试

徐昭<sup>1</sup>, 顾燕<sup>1</sup>, 姜博文<sup>1</sup>, 张振<sup>1</sup>, 黎龙辉<sup>1</sup>, 王健<sup>1\*</sup>, 金戈<sup>1</sup>, 张臣<sup>2,3</sup>,  
邱祥彪<sup>1</sup>, 李玉飞<sup>1</sup>, 吴超<sup>1</sup>, 杨晓明<sup>1</sup>, 贾振卿<sup>2,3</sup>, 赵冬华<sup>2,3</sup>, 宋淳<sup>1</sup>, 周新<sup>1</sup>,  
廖亦戴<sup>1</sup>, 李婧雯<sup>1</sup>, 郭燕<sup>1</sup>, 韩晓明<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北方夜视技术股份有限公司, 江苏 南京 211106;

<sup>2</sup>中国科学院国家天文台空间天文与技术重点实验室, 北京 100012;

<sup>3</sup>中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

**摘要** 扇形 X 射线微孔器件(MPOS)是一种新型的 X 射线聚焦器件。相较传统微孔聚焦器件,其具有集成度高、轻量化等优势,在空间 X 射线探测方面具有应用前景。基于 MPOS 聚焦理论,设计并研制出 MPOS 聚焦器件,其微孔内壁粗糙度为 0.4~0.5 nm,微孔排列精度约为 5.5%。使用点对点 X 射线测试平台对器件的聚焦能力进行检测,结果表明,在工作电压为 5.0 kV,电流为 0.1 mA 条件下,聚焦焦斑形貌为清晰的类六角星形,角分辨率为 7.7'@1 keV。

**关键词** X 射线光学; X 射线微孔聚焦器件; 扇形; 轻量化; X 射线聚焦; 角分辨率

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134020

## Development and Performance Test of Lightweight X-ray Micro Pore Optic with Sector

Xu Zhao<sup>1</sup>, Gu Yan<sup>1</sup>, Jiang Bowen<sup>1</sup>, Zhang Zhen<sup>1</sup>, Li Longhui<sup>1</sup>, Wang Jian<sup>1\*</sup>, Jin Ge<sup>1</sup>,  
Zhang Chen<sup>2,3</sup>, Qiu Xiangbiao<sup>1</sup>, Li Yufei<sup>1</sup>, Wu Chao<sup>1</sup>, Yang Xiaoming<sup>1</sup>,  
Jia Zhenqing<sup>2,3</sup>, Zhao Donghua<sup>2,3</sup>, Song Chun<sup>1</sup>, Zhou Xin<sup>1</sup>, Liao Yidai<sup>1</sup>,  
Li Jingwen<sup>1</sup>, Guo Yan<sup>1</sup>, Han Xiaoming<sup>1</sup>

<sup>1</sup>North Night Vision Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Space Astronomy and Technology, National Astronomical Observatories,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

<sup>3</sup>College of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The X-ray micro pore optic with sector (MPOS) is a new type of X-ray focusing device. Compared with the traditional micro pore focusing devices, MPOS has application prospects in space X-ray detection with the advantages of high integration and lightweight. The MPOS focusing device is designed and developed based on the focusing theorem. The roughness of the inner wall of the micro pore is 0.4–0.5 nm, and the precision of array distribution is about 5.5%. The focusing performance of the device is tested with a point-to-point X-ray test platform. The results show that the focal spot shape is a clear hexagonal star, and the angular resolution is 7.7'@1 keV with operating voltage of 5.0 kV and current of 0.1 mA.

**Key words** X-ray optics; X-ray micro pore focusing optics; sector; lightweight; X-ray focusing; angular resolution

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-02-28; 录用日期: 2022-03-30

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: \*wangjian0106211@163.com

## 1 引言

近年来,随着空间天文科学的不断发展和深空探测的大力推进,聚焦性能好且质量轻的聚焦镜头已成为软 X 射线探测工程化实现的研究热点<sup>[1-2]</sup>。Wolter-I 型望远镜已被广泛应用于 X 射线天文探测中<sup>[3]</sup>,它由数百个金属镜片嵌套而成<sup>[4-5]</sup>,可实现对 X 射线的高性能聚焦,角分辨率达到角秒级。为实现更大的集光面积,需要增加嵌套层数,若使用金属材料制作,则会导致望远镜质量成倍增加,这将是极大的工程难题<sup>[6]</sup>。1998 年,Willigale 等<sup>[7]</sup>提出了采用具有微孔结构的硅基或玻璃基薄片制作高集成度 Wolter-I 型聚焦镜的方案,包括硅微孔技术(SPO)、硅微缝技术(MSO)和扇形微孔器件(MPOS)玻璃微孔技术<sup>[8]</sup>。其中,SPO 和 MSO 受限于现阶段工艺水平,制作相对困难。SPO 角分辨率能达到角秒级,其制作涉及多项半导体加工工艺,对加工和装配精度要求极高<sup>[9-10]</sup>。MSO 是一体化成形的,角分辨率达到角分级,但存在热弯成的球面结构精度不足、微缝内壁粗糙度大等问题<sup>[11-12]</sup>。MPOS 由玻璃微孔技术制得,具有高集成度、大开口面积比和低粗糙度的优势<sup>[13-14]</sup>,制作工艺相对简单,具有一定成本优势,更适合工程化实现。

国际上,Leicester 大学在 1999 年提出并成功研制了用于水星表面物质探测的 MPOS 空间载荷<sup>[15]</sup>。目前,国内相关技术缺失,开展 MPOS 研制

具有重要的科学和工程价值。本文基于 MPOS 的 X 射线聚焦原理进行器件设计,成功研制出了 MPOS 样品。在结构上,制作的 MPOS 样品在通道粗糙度和微阵列结构精度方面满足设计要求。使用点对点 X 射线测试平台对 MPOS 样品的聚焦性能进行表征,实现聚焦理论验证。

## 2 原理及设计

### 2.1 聚焦原理

实现角分级聚焦的核心在于 MPOS 微阵列结构的精度和反射率,评判 MPOS 聚焦性能的直接手段为采用点对点 X 射线测试其聚焦投影的角分辨率<sup>[16]</sup>。如图 1(a)所示,基于掠入射全反射原理,MPOS 镜头由多片 MPOS 环形排列构成,实现对 X 射线的聚焦。如图 1(b)所示,单片 MPOS 呈扇形外形,包含数百万个排列规整的方形微孔,单个微孔尺寸为数十微米,内壁粗糙度为亚纳米级,根据应用能量需求可在微孔内壁均匀镀制相应膜层,提高聚焦性能。图 2 为单片 MPOS 对点光源的聚焦光路。X 射线光源、MPOS 几何中心和探测器共轴( $OO'$ ),点光源发射的 X 射线在微孔内壁发生全反射,最终在焦点处实现会聚,理想焦斑形貌为类六角星形<sup>[17]</sup>。图 2 中,射线  $OU$ 、 $OD$  分别入射至微孔的上壁和下壁,并聚焦为弧线。 $OL$ 、 $OR$  分别为光源入射至微孔左侧壁和右侧壁并聚焦至图像的两条相交直线,夹角与扇形圆心角一致。 $OT$  为直通光,对应图像的背景噪声。

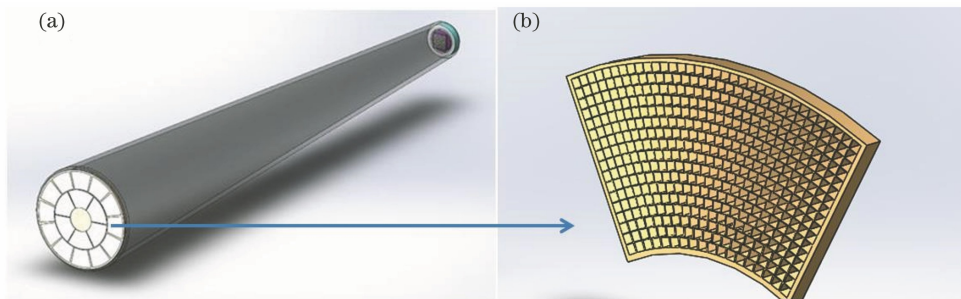


图 1 MPOS 镜头和 MPOS 的示意图。(a) MPOS 镜头;(b) MPOS

Fig. 1 Schematic diagrams of MPOS lens and MPOS. (a) MPOS lens; (b) MPOS

### 2.2 参数设计

处于 MPOS 同一半径的微阵列均匀分布,这些微阵列作为同一层 Wolter-I 的有效区域发生反射,如图 3 所示。微阵列由包含上千方形微孔的复丝组成,内圆部分复丝互相接触,外圆部分存在等腰三角形间隙,同一曲率半径的复丝间隙完全相同,且随着曲率半径的增大,间隙逐渐减小。

理想微阵列结构符合的空间位置关系为

$$\theta_{\text{sec}} R_{n+1} = N_{n+1} d_{\text{mul}}, \quad (1)$$

$$\theta_{\text{sec}} R_n = N_n d_{\text{mul}}, \quad (2)$$

式中: $d_{\text{mul}}$  为复丝尺寸; $N_n$  为第  $n$  排的复丝数量; $R_n$  为第  $n$  排的内半径; $\theta_{\text{sec}}$  为扇形圆心角。

每层的间隙最大尺寸  $l_n$  和间隙角度  $\alpha_n$  的表达式为

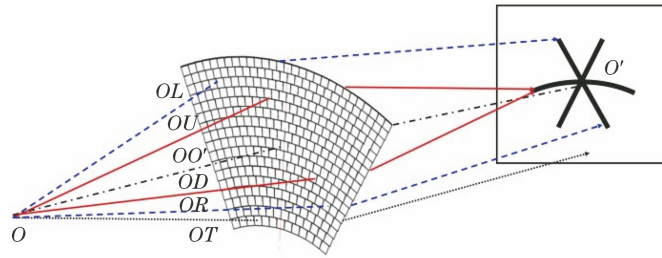


图 2 MPOS 聚焦原理

Fig. 2 Principles of MPOS focusing

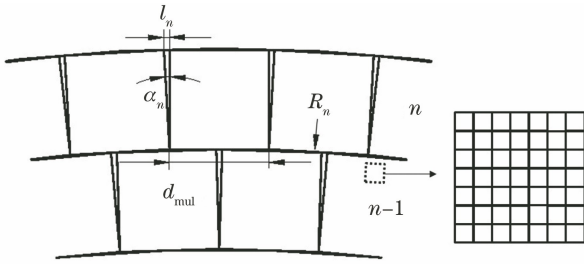


图 3 MPOS 复丝排列设计

Fig. 3 Arrangement design of MPOS multifibers

$$l_n = \frac{\theta_{\text{sec}} R_{n+1} - \theta_{\text{sec}} R_n}{N_n} = \frac{(N_{n+1} - N_n) d_{\text{mul}}}{N_n}, \quad (3)$$

$$\alpha_n = \frac{l_n}{d_{\text{mul}}} = \frac{N_{n+1} - N_n}{N_n}. \quad (4)$$

对于单个微孔,发生奇数次掠入射全反射的光线为有效光线。考虑微孔内壁粗糙度对 X 射线反射效率的影响,以发生一次反射为主,如图 4 所示,包含单孔内所有入射光线发生反射和部分光线发生反射两种情况。其中,  $\theta$  为掠入射角,  $t$  为微孔长度,

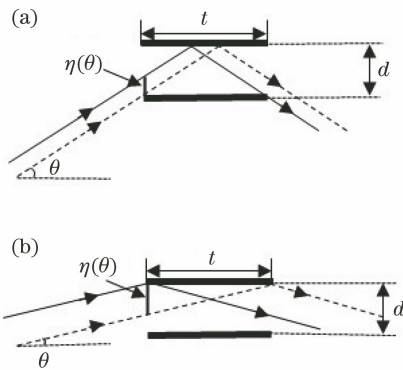


图 4 微孔内光线路径示意图。(a)所有入射光线发生反射;(b)部分光线发生反射

Fig. 4 Schematic diagram of ray path in micropore. (a) All incident rays are reflected; (b) part of incident rays are reflected

$d$  为微孔尺寸。

孔内发生反射的有效区域  $\eta(\theta)$  可表示为

$$\eta(\theta) = \begin{cases} t\theta, & 0 < \theta < \frac{d}{t} \\ 2d - t\theta, & \frac{d}{t} \leq \theta < 2\frac{d}{t} \end{cases}. \quad (5)$$

发生掠入射全反射的条件为掠入射角小于该能量  $E$  下的掠入射临界角  $\theta_c$ , 玻璃材质情况下<sup>[18]</sup>一般可表示为

$$\theta < \theta_c \approx \frac{30}{E}. \quad (6)$$

X 射线在微孔内壁发生全反射,粗糙的通道内表面将引起 X 射线发生漫反射,进而导致反射率以指数形式下降<sup>[19]</sup>。采用 Nevot-Croce(NC)模型, X 射线在粗糙表面的反射率为  $R(\theta)$ , 对于掠入射聚焦光学器件来说,要求粗糙度小于  $1 \text{ nm}$ <sup>[20]</sup>。  $R(\theta)$  的表达式为

$$R(\theta) = R_0 \exp \left[ - \frac{(4\pi n_1 \sigma \sin \theta)^2 n_1 n_2}{\lambda^2} \right], \quad (7)$$

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;  $\sigma$  为表面粗糙度的均方根值;  $n_2$  为 X 射线在反射材料中的折射率;  $\lambda \approx 1.24/E$  为 X 射线的波长。

结合整体结构设计, MPOS 截面反射效率  $A$  可表示为

$$A = \sum R(\theta) \eta(\theta). \quad (8)$$

孔径参考 Leicester 大学研制的 MPOS 设计<sup>[21]</sup>。当  $1 \text{ keV}$  能量入射时,截面反射效率  $A$  随着微孔长度  $t$  的变化先上升后下降,存在最佳长度 ( $1.0 \text{ mm}$ ),如图 5 所示。综合考虑扩大开口面积至  $70\%$  (面积占比)所面临的冲击振动等环境适应性因素,将微孔长度适当增加至  $1.25 \text{ mm}$ 。MPOS 的结构参数如表 1 所示。

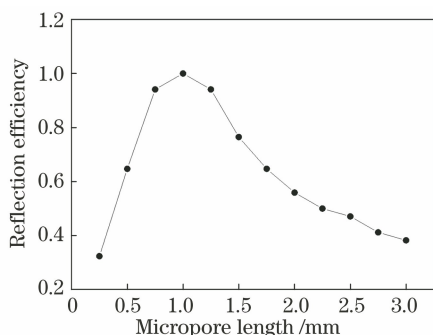


图 5 截面反射效率与微孔长度对应关系

Fig. 5 Relationship between cross-section reflection efficiency and micropore length

表 1 MPOS 结构参数

Table 1 Structural parameters of MPOS

| Parameter  | Value          |
|--|----------------|
| Inner radius /mm                                     | 24             |
| Outer radius /mm                                     | 45             |
| Sector center angle /( $^{\circ}$ )                  | 57             |
| Micropore size /( $\mu\text{m} \times \mu\text{m}$ ) | $20 \times 20$ |
| Micropore wall thickness / $\mu\text{m}$             | 4              |
| Micropore length /mm                                 | 1.25           |
| Length to diameter ratio                             | 62.5           |
| Inner wall roughness /nm                             | $<1$           |

### 3 器件制备与测试

#### 3.1 器件制备

MPOS 基于微通道板制作技术<sup>[22]</sup>实现方形微阵列制作,如图 6 所示。根据材料的热力学性能和化学特性,选取软化温度、黏度和膨胀系数相匹配的两种玻璃材料,分别加工为方形芯料棒和方形皮料管,芯料易溶于酸。二者组合经由拉丝机高温热熔,拉制成含两种材料的方形单丝,一定数量的单丝规则组合为方形复丝棒,再由拉丝机二次拉制成方形复丝,复丝内部规整排列上千个微米级小单元。方形复丝按照设计的扇形逐层排列至合适的模具内,经压屏炉高温加压规整熔合为扇形屏段。将扇形屏段切片、抛光,采用酸碱交替的化学腐蚀工艺将芯料去除干净,得到图 7 所示的具有光滑内壁的 MPOS。

#### 3.2 聚焦性能测试平台

采用点对点 X 射线束流检测系统进行聚焦性能测试,以评判微阵列结构的质量。束流总长度为  $7\text{ m}$ <sup>[23]</sup>,装置处于真空腔体内,腔体真空度低于  $1 \times 10^{-3}\text{ Pa}$ 。检测系统主要包括 X 射线光源、镜片位移系统、互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器,三者同光轴,如图 8 所示。X 射线光源为微焦斑尺寸为

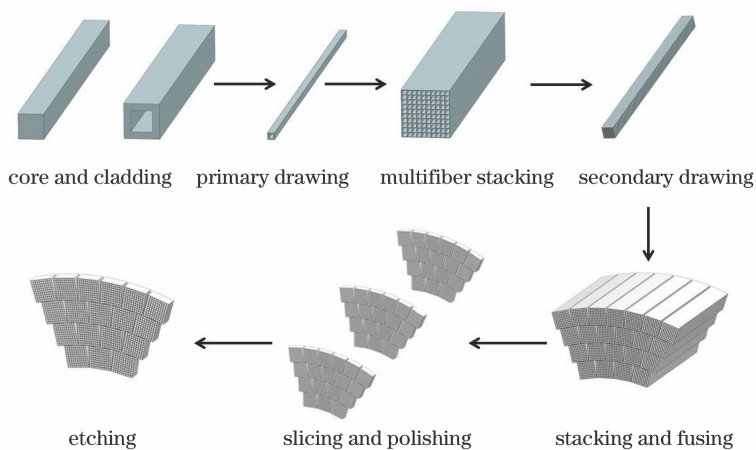


图 6 MPOS 制备流程图

Fig. 6 Flow chart of MPOS preparation

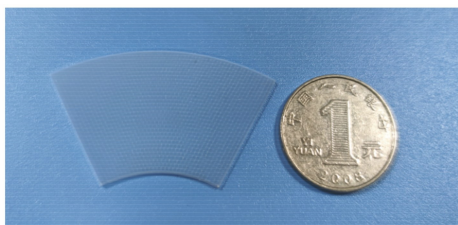


图 7 MPOS 实物图

Fig. 7 Physical diagram of MPOS

$35\ \mu\text{m}$  的 Ti 靶光管,可提供 Ti 的特征峰和韧致辐射所产生的连续谱。探测器选用长春光辰芯光电技术有限公司生产的 GSENSE400,利用 X 射线光电效应照射硅材质产生光电子,探测器尺寸为  $2040\text{ pixel} \times 2048\text{ pixel}$ ,像素尺寸为  $11\ \mu\text{m} \times 11\ \mu\text{m}$ 。镜片位移系统为 PI H-850 六轴位移台,调节精度优于  $5\ \mu\text{m}$ 。将 MPOS 固定在六轴位移台上,距离光源、探测器的距离均设置为

3500 mm。设置光源工作电压为 5 kV, 电流为 0.1 mA, 单帧采集时间为 205 ms, 调整六轴位移

台来实现 MPOS 的姿态调节, 使得探测器实时测得聚焦图像。

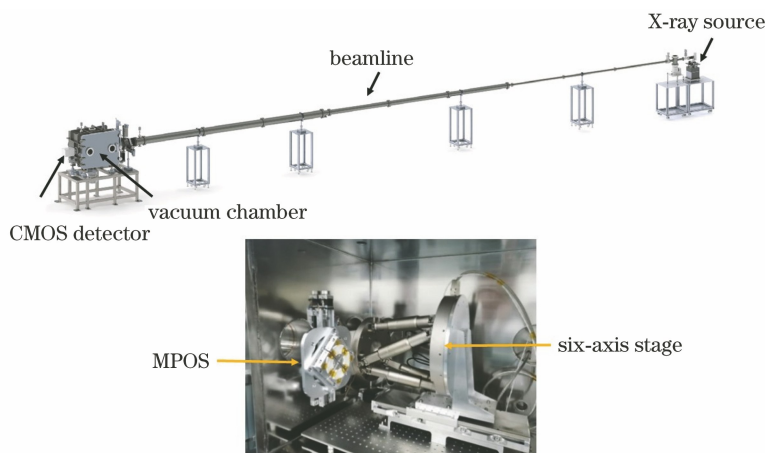


图 8 点对点 X 射线束流检测系统测试图

Fig. 8 Test diagram of point-to-point X-ray beam detection system

## 4 结果与讨论

### 4.1 结构测试

采用 Bruker Dimension ICON 型原子力显微镜 (AFM) 对图 7 样品中心区域一通道内表面形貌进行扫描, 测试精度为 0.1 nm。扫描位置选取分布

在通道边缘和中心的三处, 扫描面积设定为  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  和  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ , 采用均方根计算方式处理所测形貌数据来表达粗糙度水平, 中心区域测试形貌如图 9 所示。测试结果表明, 通道三处区域粗糙度为 0.4~0.5 nm, 且在厚度方向上的一致性优于测试精度, 满足设计要求。

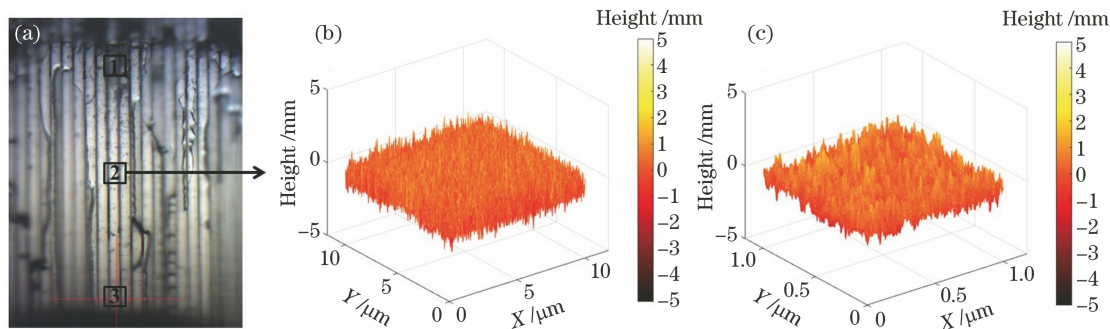


图 9 AFM 测试结果。(a) 测试区域; (b) 区域 2 中  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  面积内的形貌; (c) 区域 2 中  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  面积内的形貌

Fig. 9 AFM test results. (a) Test zone; (b) morphology in area of  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  in zone 2; (c) morphology in area of  $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$  in zone 2

采用 HITACHI Regulus 8200 型扫描电子显微镜 (SEM) 对 MPOS 进行微观结构测试评价, 测试精度为  $0.1\ \mu\text{m}$ 。如图 10 所示, 在样片表面均匀选取 9 个区域, 复丝间隙理论值由外环到内环依次为 12.4, 15.1, 18.8  $\mu\text{m}$ 。测试结果表明, 最大误差值为  $1\ \mu\text{m}$ , 原因为位于相同曲率半径的复丝尺寸精度为  $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ 。相对误差分布如图 11 所示。测试结果表明, 结构精度控制在 5.5% 以内, 最大误差值出现在内环区域, 原因为内环复丝间隙较大, 热熔压工艺中内环复丝易发生形变。

### 4.2 聚焦性能表征

如图 12(a) 所示, 焦距 3510 mm 处呈现较为清晰的类六角星形点扩散函数, 基本符合理论点扩散函数的形状, 弧线由 X 射线入射至微孔的上壁和下壁聚焦而成, 两条相交直线由 X 射线入射至微孔左侧壁和右侧壁聚焦而成。角分辨率是使用数据处理软件对 CMOS 探测器收集到的数据进行处理得到的。挑选聚焦焦斑并使用重心法求得焦斑重心位置, 并绘制光斑强度分布的等高线图得到焦斑半峰全宽 (FWHM) 包围的直径及其对应的角分辨率。

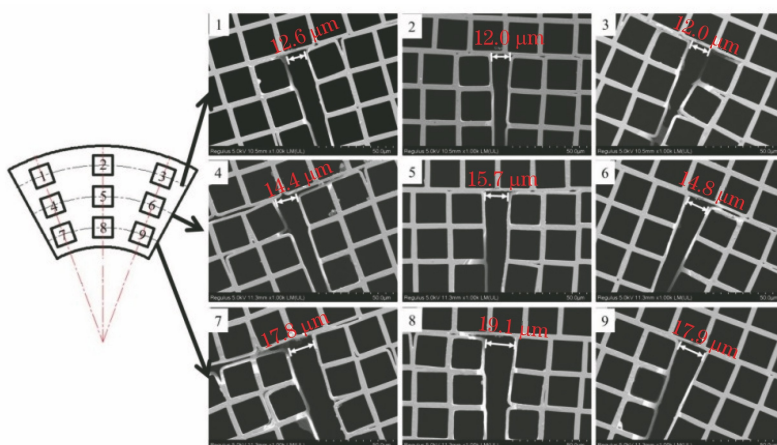


图 10 SEM 区域扫描微观结构

Fig. 10 Area scanning microstructures tested by SEM

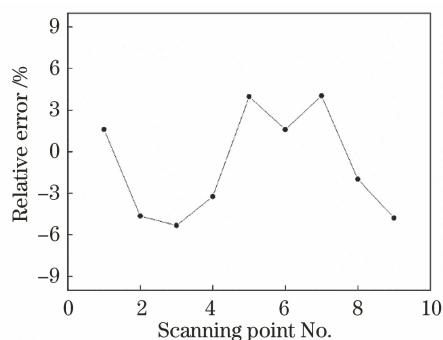


图 11 复丝间隙误差分布图

Fig. 11 Distribution of multifiber gap errors

对图 12(a) 测试数据中每 30 pixel 进行合并, 图 12(b) 中点划线区域为拟合的 FWHM 的椭圆范围, 长轴角分辨率为  $6.07'$ , 短轴角分辨率为  $5.13'$ , 虚线区域为以 FWHM 最远距离为直径的圆形范围, 聚焦光斑的角分辨率为  $7.70'$ , 实现了 MPOS 聚焦的理论验证。

从图 12(a) 中可以观察到点扩散函数存在较明显的错位等差异, 进而相交线的夹角难以计算。图 13 中弧线光强分布不均匀, 原因为微阵列结构精细复杂, 复丝间隙存在一定工艺误差, 大量统计情况下发生光路错位, 进而造成光斑弥散现象的出现。图 12(b) 中存在少量杂散光, 这是右上区域的部分微结构存在工艺误差造成的, 光路偏离理论位置约  $4.00'$ 。严格控制拉丝、熔压等热过程带来的微阵列形变, 提高结构均匀性<sup>[8]</sup>, 进而提高聚焦图像质量, 是聚焦性能提升的关键。

## 5 结 论

完成了对 MPOS 器件的理论设计, 基于微通道板玻璃微阵列制作技术, 开展了 MPOS 的研制。采

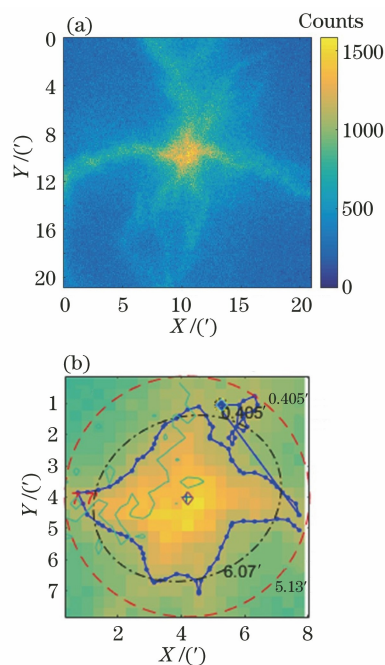


图 12 MPOS 聚焦测试结果。(a) MPOS 点扩散函数; (b) MPOS 角分辨率

Fig. 12 MPOS focus test results. (a) Point spread function of MPOS; (b) angular resolution of MPOS

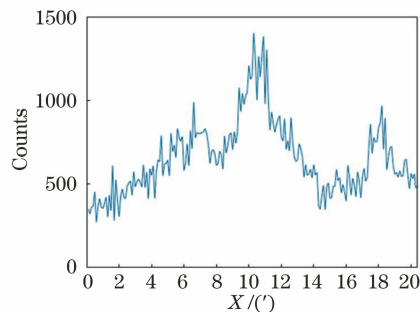


图 13 MPOS 点扩散函数 X 向强度分布图

Fig. 13 Intensity distribution of point spread function of MPOS in X direction

用原子力显微镜和扫描电子显微镜对通道内壁粗糙度和微观结构进行检测。采用点对点 X 射线束流检测系统对 MPOS 的聚焦性能进行测试, 聚焦图像呈现清晰的类六角星形点扩散函数形貌, 成功地研制了 MPOS 扇形 X 射线微孔聚焦器件。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 金戈, 张臣, 黎龙辉, 等. Angel 型龙虾眼 X 射线光学器件的研制及性能测试[J]. 光学学报, 2021, 41(6): 0634001.  
Jin G, Zhang C, Li L H, et al. Fabrication and performance testing of Angel lobster-eye X-ray micro-pore optics [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(6): 0634001.
- [3] Fraser G W, Carpenter J D, Rothery D A, et al. The mercury imaging X-ray spectrometer (MIXS) on bepicolombo[J]. Planetary and Space Science, 2010, 58(1/2): 79-95.
- [4] Lider V V. Kirkpatrick-Baez and Wolter X-ray focusing optics (review) [J]. Journal of Surface Investigation, 2019, 13(4): 670-682.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Willingale R, Fraser G W, Brunton A N, et al. Hard X-ray imaging with microchannel plate optics [J]. Experimental Astronomy, 1998, 8(4): 281-296.
- [8] Willingale R, Fraser G W, Pearson J F. Optimization of square pore optics for the X-ray spectrometer on Bepi-Columbo [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5900: 590012.
- [9] Wille E, Bavdaz M. European X-ray optics for next generation space observatories [J]. Acta Astronautica, 2015, 116: 50-55.
- [10] Bavdaz M, Collon M, Beijersbergen M, et al. X-ray pore optics technologies and their application in space telescopes [J]. X-ray Optics and Instrumentation, 2010, 2010: 295095.
- [11] Zhang T C, Yi F T, Wang B, et al. Fabrication of micro-slot optics on curved substrate by X-ray lithography and electroplating [J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(5): 1895-1900.
- [12] Ogawa T, Ezo Y, Kakiuchi T, et al. First X-ray imaging with a micromachined Wolter type-I telescope [J]. Microsystem Technologies, 2017, 23(4): 1101-1116.
- [13] Collon M J, Beijersbergen M W, Wallace K, et al. X-ray imaging glass micro-pore optics [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6688: 668812.
- [14] Price G J, Brunton A N, Beijersbergen M W, et al. X-ray focusing with Wolter microchannel plate optics [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors, and Associated Equipment, 2002, 490(1/2): 276-289.
- [15] Beijersbergen M W, Bavdaz M, Peacock A J, et al. Microchannel-plate-based X-ray optics [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3765: 452-458.
- [16] Bunce E J, Martindale A, Lindsay S, et al. The BepiColombo Mercury Imaging X-ray Spectrometer: science goals, instrument performance and operations [J]. Space Science Reviews, 2020, 216: 126.
- [17] Chapman H N, Rodé A, Nugent K A, et al. X-ray focusing using cylindrical-channel capillary arrays. II. Experiments [J]. Applied Optics, 1993, 32(31): 6333-6340.
- [18] 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.  
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.
- [19] 孙天希, 徐光瑜, 刘志国, 等. 整体毛细管 X 光透镜在大气颗粒物单颗粒分析中的应用 [J]. 光学学报, 2008, 29(9): 1833-1836.  
Sun T X, Xu G Y, Liu Z G, et al. Application of monolithic capillary X-ray lens in analysis of single aerosol particles [J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(9): 1833-1836.
- [20] Kaaret P, Geissbühler P, Chen A, et al. X-ray focusing using microchannel plates [J]. Applied Optics, 1992, 31(34): 7339-7343.
- [21] Martindale A, Pearson J F, Whitford C, et al. The Mercury Imaging X-ray Spectrometer: instrument overview [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7441: 744115.
- [22] 丛晓庆, 邱祥彪, 孙建宁, 等. 原子层沉积法制备微通道板发射层的性能 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0916002.

Cong X Q, Qiu X B, Sun J N, et al. Properties of microchannel plate emission layer deposited by atomic layer deposition[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0916002.

[23] 黎龙辉, 张臣, 金戈, 等. Angel 型平面龙虾眼光学器件微孔统计特性测试和分析[J]. *光学学报*, 2021,

41(3): 0322001.

Li L H, Zhang C, Jin G, et al. Test and analysis of micropore statistical characteristics of Angel type planar lobster eye optical device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(3): 0322001.