

玻璃基底 Wolter-1 型 X 射线聚焦镜研制及测试

李林森 强鹏飞 盛立志 刘哲 周晓红 赵宝升 张淳民

Development and testing of glass substrate Wolter-1 X-ray focusing mirror

Li Lin-Sen Qiang Peng-Fei Sheng Li-Zhi Liu Zhe Zhou Xiao-Hong Zhao Bao-Sheng Zhang Chun-Min

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 200701 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20181330

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20181330>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[一种聚焦型 X 射线探测器在轨性能标定方法](#)

A method of calibrating effective area of focusing X-ray detector by using normal spectrum of Crab pulsar
物理学报.2018, 67(5): 050701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172352>

[基于空间应用的透射式微型微束调制 X 射线源](#)

Transmission-type miniature micro-beam modulated X-ray source based on space application
物理学报.2016, 65(14): 140703 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140703>

[X 射线通信系统的误码率分析](#)

Bit error rate analysis of X-ray communication system

物理学报.2015, 64(12): 120701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.120701>

[一种设计环形汇聚光栅反射镜的新方法](#)

A new approach to designing circular grating focusing reflector

物理学报.2014, 63(24): 240702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240702>

[用于空间 X 射线通信的栅极控制脉冲发射源研究](#)

Grid-controlled emission source for space X-ray communication

物理学报.2014, 63(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.160701>

玻璃基底 Wolter-1 型 X 射线聚焦镜研制及测试*

李林森¹⁾²⁾³⁾ 强鹏飞^{1)3)†} 盛立志³⁾ 刘哲³⁾ 周晓红³⁾
赵宝升³⁾ 张淳民²⁾

1) (中国科学院大学, 北京 100049)

2) (西安交通大学理学院, 西安 710049)

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

(2018年7月9日收到; 2018年7月25日收到修改稿)

Wolter-1 型 X 射线聚焦镜可将掠入射的 X 射线反射至焦平面处, 具有较强的成像探测能力, 在天文探测等领域中具有重要作用. 通过建立几何模型对反射镜面及反射光线方程进行理论计算, 推导出了适用于以玻璃为基底材料的聚焦镜设计参数方程, 可用于对此类聚焦镜进行理论设计, 依据理论设计, 采用具有极高表面光洁度的超薄肖特 D263T 玻璃经热弯成型后作为反射镜基底, 在反射镜表面制备金属超薄膜作为反射膜研制了 Wolter-1 型反射镜组, 并使用激光三维扫描仪对所研制的聚焦镜片面型进行了测试. 测试结果显示, 实际镜片面型与理想镜片面型公差在 $10\ \mu\text{m}$ 以内的测试点占总测试点的 50%. 通过搭建可见光条件下的焦斑测试系统, 使用图像采集相机采集焦斑的灰度图像, 通过图像分析软件分析计算该灰度图像的灰度分布来定量分析焦斑的能量分布情况, 从而确定焦斑特性参数. 实验结果显示: 研制出的聚焦镜片焦距为 1.6 m, 焦斑的半能量包围直径为 0.33 mm, 对应角分辨率为 0.7 角分.

关键词: Wolter, X 射线聚焦, 掠入射光学

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.67.20181330

1 引言

在深空探测领域中, 对于中子星和黑洞的研究一直是该领域中最前沿的科学热点, 通过长期高频次的在轨观测, 理解中子星和黑洞的活动及演化机制, 旨在对中子星及黑洞的基本性质做出新的测量, 进而对宇宙深处大质量恒星的死亡及中子星合并等天文现象进行理论研究. 而捕捉并详尽地观测天体的 X 射线辐射是进行此类研究的重要手段, 其中 X 射线聚焦镜是研究中不可或缺的重要仪器. 近年来, 国外已有多颗搭载 X 射线聚焦镜的探测卫星发射升空. 其中, 2017 年 6 月 3 日由 NASA 发射的 NICER (The Neutron star Interior Composition Explore R) 探测卫星上搭载有 56 个

X 射线聚焦镜, 用于对中子星的 X 射线辐射进行探测研究^[1-4]; 2012 年 6 月 13 日发射的 NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) 探测卫星上搭载有两个 X 射线聚焦镜, 用于对黑洞等高能天体的 X 射线辐射进行探测研究^[5-8]. 国内也已开展了此类探测卫星的研制计划, 主要包括: “十三五”空间科学任务中的爱因斯坦探针卫星 EP (Einstein Probe)^[9-11] 以及由中国科学家发起和主导的重大国际合作空间科学项目: 增强型 X 射线时变与偏振空间天文台 eXTP (enhanced X-ray Timing and Polarization mission)^[12,13]. 其中, EP 卫星将搭载一台 X 射线聚焦望远镜, 用于在软 X 射线波段发现和探索各类已知或未知的 X 射线暂现源和瞬变源, 检测天体的 X 射线光变; eXTP 则将搭载 13 个 X 射线聚焦镜, 用于对黑洞、中子星和夸克星的 X 射线

* 国家自然科学基金 (批准号: 61471357) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: qiangpengfei@opt.ac.cn

辐射进行探测研究. 这一系列科研计划的实施对提高我国天文探测研究的地位, 使我国的空间科学进入国际最先进的行列具有非常重要的意义.

目前对于X射线聚焦镜的研制普遍采用掠入射式 Wolter-1 型设计, 根据选用不同的镜片基底材料, 采用相应的研制路线进行聚焦镜镜片研制. 用于聚焦镜镜片研制的基底材料主要有金属和玻璃两种, 由于玻璃基底镜片重量轻, 理论角分辨率高, 国内已有利用玻璃镜片进行X射线聚焦镜的相关研究 [14-16]. 本文主要研究以超薄玻璃为基底的聚焦镜片的设计、研制及其光学性能测试. 玻璃镜片在设计上与金属镜片的不同之处在于: 由于工艺原因, Wolter-1 型镜片必须分为两段进行设计, 设计中需考虑两段镜片的间隙对光路的影响.

2 聚焦镜研制

2.1 聚焦镜设计

基于掠入射条件下的反射原理设计的 Wolter-1 型 X 射线聚焦镜经过多层嵌套, 可显著增加聚焦镜头整体集光面积. 在单层聚焦镜片设计中需重点考虑镜片反射率, X 射线在镜片表面的反射率如 (1) 式所示:

$$R = R_0 e - (4\pi\sigma \sin \theta / \lambda)^2, \quad (1)$$

其中 R_0 为理想表面对 X 射线的反射率; σ 为实际反射面表面粗糙度; θ 为掠入射角. 由 (1) 式知, 掠入射角越小, 反射率越高, 镜片设计中需综合考虑镜头焦距等因素进行合理设计. 聚焦镜可将视场内的入射 X 射线聚焦至焦点位置, 从而实现对目标源的探测, 其探测原理图如图 1 所示.

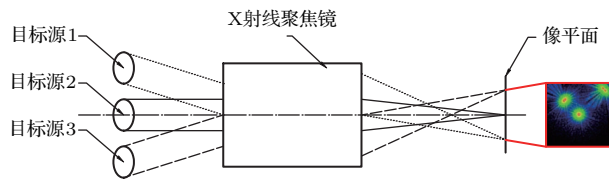


图 1 X 射线聚焦镜探测原理图

Fig. 1. Detecting schematic diagram of X-ray focusing mirror.

Wolter-1 型聚焦镜由同轴的抛物面反射镜和双曲面反射镜组成, 其聚焦原理图如图 2 所示, 在掠入射条件下, 当抛物面镜焦点与双曲面右焦点重合时, 入射 X 射线先后经过抛物面镜和双曲面镜两次反射后聚焦于双曲面左焦点处. 聚焦镜设计参数如图 3 所示, r 为聚焦镜口径, θ 为掠入射角, f 为焦

距, L 为镜长, d 为两段镜片的间隙. 在图 3 所示的坐标系下, 抛物面镜方程式为

$$y^2 = -2p(x - m). \quad (2)$$

双曲面镜方程式为

$$\frac{(x - n)^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (3)$$

聚焦镜设计就是根据应用要求建立数学模型, 求解上述方程中的未知系数 (a, b, m, n, p).

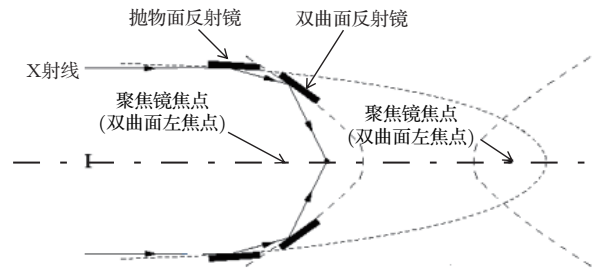


图 2 Wolter-1 型聚焦镜原理图

Fig. 2. Schematic diagram of Wolter-1 focusing lens.

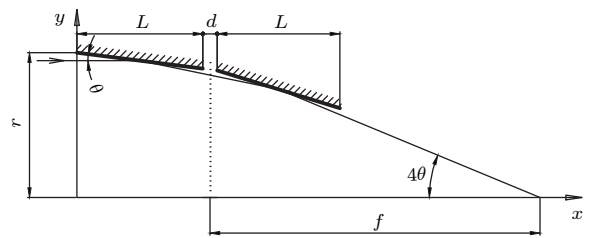


图 3 Wolter-1 型聚焦镜设计参数图

Fig. 3. Design parameter diagram of Wolter-1 focusing lens.

在图 3 所示坐标系中, 根据曲线方程求得抛物面镜焦点横坐标为 $m - p/2$. 双曲线左焦点横坐标为 $n - \sqrt{a^2 + b^2}$; 双曲线右焦点横坐标为 $n + \sqrt{a^2 + b^2}$. 根据 Wolter-1 型聚焦镜设计原理, 抛物面镜焦点应与双曲面镜右焦点重合, 聚焦镜最终焦点位置与双曲面左焦点重合, 因此有以下方程成立:

$$n - \sqrt{a^2 + b^2} = f, \quad (4)$$

$$n + \sqrt{a^2 + b^2} = m - \frac{p}{2}. \quad (5)$$

根据几何关系, 抛物面镜口径应满足抛物线方程, 即

$$r^2 = 2pm. \quad (6)$$

此外, 在聚焦镜设计中, 考虑到双曲面镜应将抛物面镜的所有反射光线接收, 要求入射至抛物面镜末端的光线恰好被双曲面镜入射端接收, 通过推导反射光线方程, 得到镜片设计参数应满足下述方程:

$$\frac{(L + d - n)^2}{a^2} - \frac{\left[\frac{(2dm - 2dL - 3dp)\sqrt{2pm} - (dp + 2dm)\sqrt{-2p(L - m)}}{p(5L - 4m) + 6L(L - m) - 4p\sqrt{m(m - L)}} + \sqrt{-2p(L - m)} \right]^2}{b^2} = 1. \quad (7)$$

入射光线掠入射角 θ 由实际应用需要根据 X 射线反射理论进行计算确定. 抛物面镜入口处的切线斜率由掠入射角确定, 因此有以下方程成立:

$$\frac{p}{\sqrt{2pm}} = \text{tg } \theta. \quad (8)$$

联立 (4), (5), (6), (7), (8) 式通过设置镜长 L 和镜片间距 d , 可求解出聚焦镜各设计参数.

2.2 聚焦镜制备

以玻璃为基底材料的反射镜可采用热弯工艺进行制备 [17-19], 其工艺原理图如图 4 所示, 将平片玻璃镜片放置于成型模具上, 成型模具表面通过精密加工, 其表面面型为聚焦镜设计面型, 通过加热使平片玻璃软化, 在重力作用下发生弯曲形变, 最终将成型模具表面面型复制在镜片上, 为了提高镜片对 X 射线的反射率, 需在完成热弯工艺的曲面镜片表面制备反射膜 [20,21], 本文中采用真空热蒸发工艺在镜片反射面上制备了金属铱膜, 镜片实物如图 5 所示.

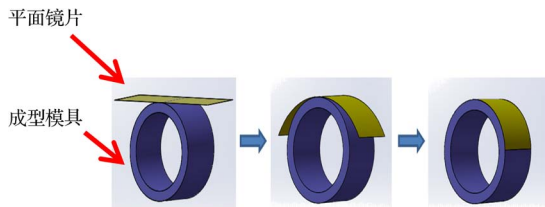


图 4 玻璃热弯过程

Fig. 4. Thermal bending process of flat glass.

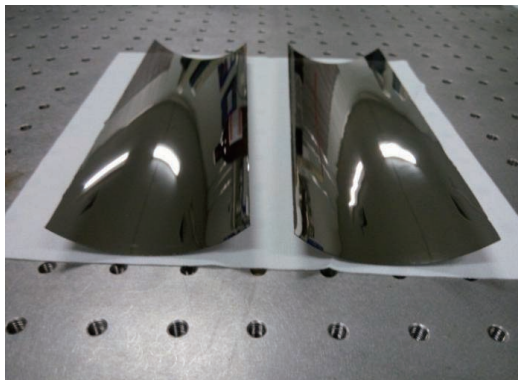


图 5 聚焦镜片实物

Fig. 5. Picture of focusing mirror.

3 聚焦镜光学性能测试

聚焦镜光学性能测试系统如图 6 所示, 实验中将聚焦镜组 (包括抛物面反射镜和双曲面反射镜) 分别放置于六维调节架上, 使用调节架调整镜片相对位置与形态, 焦斑采集相机安装于焦点位置来采集焦斑的灰度图像, 该图像中各像元的灰度等级正比于该处接收到的光子数量, 将此图像上传至图像处理软件进行灰度分析, 通过提取并统计不同半径范围内的灰度值, 可定量测试得到焦斑的中心位置和半能量包围直径 (half energy encircling diameter, HPD). 利用图像灰度值测试图像能量分布的方法已被应用于空间粒子探测领域 [22]. 焦斑测试结果显示研制出的聚焦镜组焦斑半能量包围直径 0.33 mm, 对应角分辨率为 0.7 角分 (图 7).

理想 Wolter-1 型聚焦镜的焦斑是一个理想点, 由于在镜片实际制备过程中存在多种公差, 实际镜片面型与理想面型有所差异, 导致了聚焦镜片焦斑的扩散, 镜片面型导致焦斑扩散的光路图如图 8 所示.

利用三维激光扫描仪对所研制的聚焦镜片面型进行了测试, 测试结果如图 9 所示, 其中图 9 (a) 为实际镜片面型与理想面型的拟合效果图, 可看出实际面型与理想面型公差在 60 μm 以内. 图 9 (b) 为拟合后统计出的面型公差分布图, 统计结果显示面型公差在 10 μm 以内的测试点占总测试点的 50%.

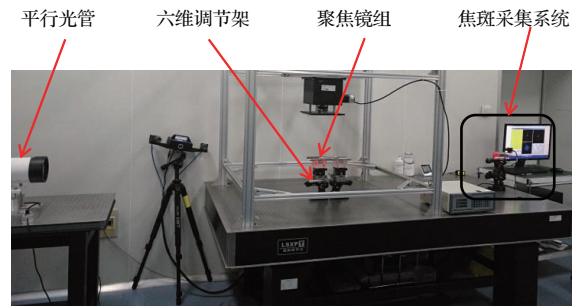


图 6 测试系统实物图

Fig. 6. Physical picture of testing system.

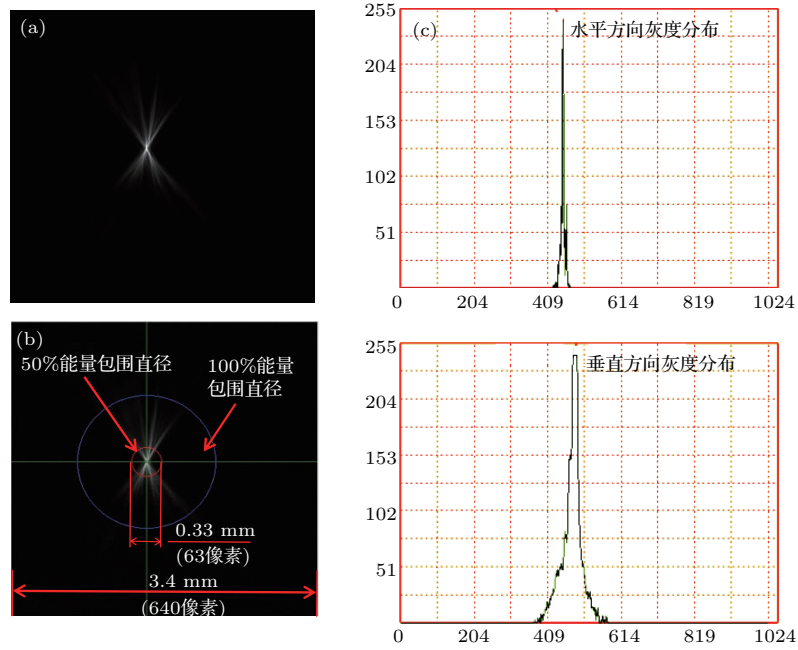


图7 焦斑测试结果 (a) 焦斑原始图像; (b) 焦斑能量分布; (c) 焦斑图像灰度分布
 Fig. 7. Testing result of focusing mirror: (a) Picture of focusing spot; (b) energy distribution of focusing spot image; (c) gray scale distribution of focusing spot image.

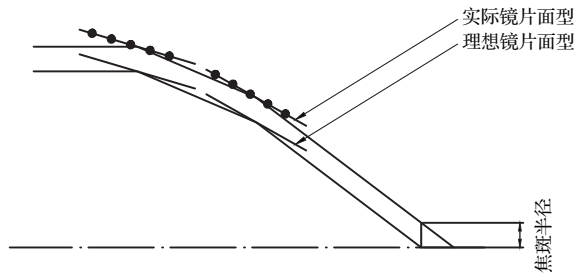


图8 焦斑扩散光路图
 Fig. 8. Spreading of focusing spot.

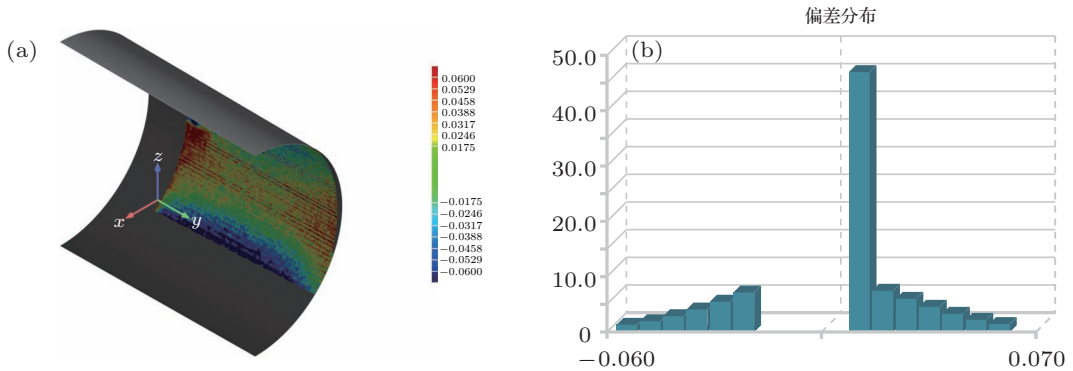


图9 聚焦镜面型测试结果 (a) 拟合效果图; (b) 面型公差统计
 Fig. 9. Test results of focusing mirror type: (a) Fitting effect diagram; (b) statistical tolerance of face type.

4 结 论

通过理论计算推导得出了适用于以玻璃为基底材料的 wolter-1 型聚焦镜的设计方程, 在此基础

上进行了聚焦镜的研制, 并在可见光条件下进行了焦斑特性测试, 得到了较为理想的测试结果, 结合镜片面型测试结果, 可定量了解镜片面型精度对聚焦镜片光斑性能的影响, 更为细致的分析将在下一步研究中进行. 此外, 将开展多层嵌套式聚焦镜头

的研制工作, 将多组聚焦镜组进行精密装调, 研究多层嵌套结构与单层镜片组的性能差异.

参考文献

- [1] Keith C G, Zaven A, Takanshi O 2016 *Proc. SPIE* **9905** 49
- [2] Gregory P, Keith G, John P D, Richard F, Ronald R, Andrew M, Beverly L, Michael V, Mark E, Jesus V, Zaven A, Wayne B, Frank S, Christian L, Michael K, Alan H 2016 *Proc. SPIE* **9905** 50
- [3] Beverly L, Gregory P, Ronald R, Andrew M, Keith C G, Zaven A, Craig B M, Wayne H B 2016 *Proc. SPIE* **9905** 228
- [4] Takashi O, Yang S, Erin R B, Teruaki E, Larry O, Richard K, Larry L, John K, Sean F, Ai N, Steven J K, Zaven A, Keith G 2016 *Proc. SPIE* **9905** 99054X-1
- [5] Jason E K, Hongjun A, Kenneth L B, Nicolai F B, Finn E C, William W C, Todd A D, Charles J H, Layton C H, Fiona A H, Carsten P J, Kristin K M, Kaya M, Michael J P, Gordon T, William W Z 2009 *Proc. SPIE* **7437** 74370C-1
- [6] Jason E K, Finn E C, William W C, Todd R D, Charles J H, Fiona A H, Colin H, Carsten P J, Kristin K M, Marcela S, Gordon T, Michael D T 2005 *Proc. SPIE* **5900** 79000X
- [7] Jensen C P, Christensen F E, Jensen A, Madsen K K 2005 *Proc. SPIE* **5900** 5900-07
- [8] Koglin J E, Chen C M H, Christensen F E, Chonko J, Craig W W, Decker T R, Gunderson K S, Hailey C J, Harrison F A, Jensen C P, Madsen M, Stern M, Windt D L, Ziegler H Y 2004 *Proc. SPIE* **5168** 100
- [9] Yuan W M, Zhang C, Chen Y, et al. 2018 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **48** 039502
- [10] Li Z Y 2018 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **48** 039512
- [11] Xue Y Q, Shu X W, Zhou X L, Zhang J, Wu X B, Wang J X, Wang T G, Yuan F, Luo B, Pan H W 2018 *Sci. Sin.: Phys. Mech. Astron.* **48** 039508
- [12] Zhang S N 2017 *Academic Annual Conference Wulumuqi* August 8 2017 p5
- [13] Li C Y 2018 *Chinese J. Space Science* **3** 273
- [14] Liu D, Qiang P F, Li L S, Su T, Sheng L Z, Liu Y A, Zhao B S 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 010703 (in Chinese) [刘舵, 强鹏飞, 李林森, 苏桐, 盛立志, 刘永安, 赵宝升 2016 物理学报 **65** 010703]
- [15] Liu D, Qiang P F, Li L S, Liu Z, Sheng L Z, Liu Y A, Zhao B S 2016 *Acta Opt. Sin.* **36** 0834002 (in Chinese) [刘舵, 强鹏飞, 李林森, 刘哲, 盛立志, 刘永安, 赵宝升 2016 光学学报 **36** 0834002]
- [16] Li L S, Qiang P F, Sheng L Z, Liu Y A, Liu Z, Liu D, Zhao B S, Zhang C M 2017 *Chin. Phys. B* **26** 100703
- [17] William W C, Hong J A, Kenneth L B, Finn E C, Todd A D, Anne F, Jeff G, Charles J H, Layton H, Carsten B J, Jason E K, Kaya M, Melanie N, Michael J P, Marton V S, Marcela S, Gordon T, William W Z 2011 *Proc. SPIE* **8147** 81470H
- [18] William W Z 2009 *Proc. SPIE* **7437** 74370N
- [19] William W Z, David A C, John P L, Robert P, Timo T S, Mikhail G, William D J, Stephen L O 2005 *Proc. SPIE* **5900** 59000V
- [20] Finn E C, Anders C J, Nicolai F B, Kristin K M, Allan H, Niels J W, Joan M, Jason K, Anne M F, Marcela S, William W C, Michael J P, David W 2011 *Proc. SPIE* **8147** 81470U
- [21] Vikram R R, Walter R C, Fiona A H, Peter H M, Hiro-masa M 2009 *Proc. SPIE* **7435** 743503
- [22] Li L S, Liu Y A, Kong L G, Liu D, Qiang P F, Zhao B S 2016 *Acta Photonic Sin.* **45** 41 (in Chinese) [李林森, 刘永安, 孔令高, 刘舵, 强鹏飞, 赵宝升 2016 光子学报 **45** 41]

Development and testing of glass substrate Wolter-1 X-ray focusing mirror*

Li Lin-Sen¹⁾²⁾³⁾ Qiang Peng-Fei¹⁾³⁾† Sheng Li-Zhi³⁾ Liu Zhe³⁾ Zhou Xiao-Hong³⁾
Zhao Bao-Sheng³⁾ Zhang Chun-Min²⁾

1) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

2) (*School of Science, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

3) (*State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(Received 9 July 2018; revised manuscript received 25 July 2018)

Abstract

The Wolter-1 X-ray focusing mirror can reflect grazing incidence X-ray to the focal plane, which plays an important role in the astronomical detection and other fields due to its good image detecting capability. A geometric model of the optical system is established for theoretically deriving the optical path equations which is useful in this glass based focusing mirror designing, all the design parameters of the focusing mirror can be obtained by solving these equations. In the manufacturing process, the D263T glass is chosen to be the structural material of the focusing mirror due to its light weight and super smooth surface, after a slumping process, the flat glass mirror will have the shape of Wolter-1 X-ray focusing mirror. This slumping process has been used successfully in the manufacturing process of an American mission named The Nuclear Spectroscopic Telescope Array, which was launched in 2012. According to X-ray reflecting theory, the reflectivity of the Wolter-1 mirror can be improved significantly by coating metal film on the surface of the mirror. In this work, an iridium film is coated on the surface of the glass mirror through a vacuum evaporating process. In order to learn the influence of the focal spot caused by the mirror shape tolerance, the morphology of the mirror is tested by using a 3-D laser scan instrument. The results show that 50% of the total test points are located in the tolerance range of $-10-10\ \mu\text{m}$, in which the tolerance represents the difference between the actual lens profile and the ideal lens profile. Then the focal spot test is carried out with the help of a visible light test system: a laser collimator is installed in front of focusing mirror as an incidence light source, and a charge coupled device (CCD) is placed in the focal plane to gather the image of the focal spot, by calculating the gray level distribution of the focal spot image taken by the CCD, the energy distribution characteristic of focal spot can be obtained. The experimental results show that the focal length of the focusing mirror is 1.6 m, and the half-power surrounding diameter of the focal spot is 0.33 mm, corresponding to the angular resolution of 0.7 arc min.

Keywords: Wolter, X-ray focusing mirror, grazing incidence optics

PACS: 07.85.Fv, 07.60.-j

DOI: 10.7498/aps.67.20181330

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61471357).

† Corresponding author. E-mail: qiangpengfei@opt.ac.cn