

一种基于方形多毛细管透镜的 X 射线探测系统设计

易龙涛, 孙天希, 王 锴, 彭诗棋, 韩 悦, 张 爽, 刘志国

(北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875)

摘 要: 设计了一种基于方形多毛细管 X 射线透镜的 X 射线探测系统, 该系统具有较小的 X 射线收集角。方形多毛细管 X 射线透镜是一种基于 X 射线全反射的 X 射线调控器件, 可将大面积范围内的 X 射线汇聚至 X 射线 CCD 探测器。通过测定 X 射线在方形多毛细管 X 射线透镜中的传输特性、建立数据模型, 可校正 X 射线 CCD 所测数据并还原透镜入口端的入射 X 射线信息。通过光线轨迹追踪方法模拟了方形多毛细管 X 射线透镜的传输特性。结果表明, 该系统适合探测能量低于 21.5 keV 的 X 射线, 用于大面积成像; 也适合探测能量低于 14.6 keV 的 X 射线, 用于提高探测效率。该系统不仅可用于诸如 X 射线脉冲星导航等特殊应用, 也可用于常规 X 射线探测。

关键词: X 射线; 方形多毛细管 X 射线透镜; 大面积探测; X 射线脉冲星导航

中图分类号: O434.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S117001

Design of an X-ray detecting system based on square polycapillary X-ray lens

Yi Longtao, Sun Tianxi, Wang Kai, Peng Shiqi, Han Yue, Zhang Shuang, Liu Zhiguo

(College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: An X-ray detecting system based on square polycapillary X-ray lens was designed, which had a very small X-ray collection angle. The square polycapillary X-ray lens is an X-ray control device based on total X-ray reflection. The X-ray in large range can be focused on an X-ray CCD detector by the square polycapillary X-ray lens. By measuring the transmission characteristic of the square polycapillary X-ray lens and creating the data modelling, the data detected by the X-ray CCD detector could be corrected and the information of the X-ray in the entry end of the square polycapillary X-ray lens could be restored. The transmission characteristic of the square polycapillary X-ray lens was simulated by the light trajectory tracking method. The results show that this system is suitable for large area X-ray imaging when the energy of the X-ray is lower than 20 keV. It is also suitable for collecting X-ray to improve the detection efficiency when the energy of the X-ray is lower than 14.6 keV. The above characteristics show that this system is not only suitable for some special detecting such as pulsar navigation, but also suitable for normal X-ray detecting.

Key words: X-ray; square polycapillary X-ray lens; large area detection; X-ray pulsar navigation

收稿日期: 2016-02-11; 修订日期: 2016-03-09

基金项目: 北京师范大学自主科研基金(2012LZD07)

作者简介: 易龙涛(1988-), 男, 博士生, 主要从事 X 射线光学、X 射线荧光、数据分析等方面的研究。Email: yilt2008@163.com

导师简介: 刘志国(1970-), 男, 教授级高工, 主要从事 X 射线光学器件研发和应用、核电子学与自动控制等方面的研究。

Email: liuzhiguo512@hotmail.com

0 引言

X 射线是一种短波长、高能量的电磁波,在物理、生物、医学等领域有着广泛的应用。在天文领域,利用宇宙 X 射线对天体进行研究已发展成为一门独立的学科—X 射线天文学^[1-2]。自 1962 年发现天蝎座方向的 X 射线源以来,已有上千个宇宙 X 射线源被发现,包含了 100 多颗 X 射线脉冲星。这使得利用 X 射线脉冲星进行导航成为可能。但 X 射线脉冲星发射的 X 射线信号极弱,不易探测。因此,宇宙 X 射线探测成为脉冲星导航的主要研究方向之一。

1990 年,由德国、美国和英国联合研制的搭载了 4 层沃尔特 I 型掠射式望远镜的 ROSAT X 射线天文卫星发射升空,用于 X 射线的巡天观测。1993 年,日本发射了 ASCA 探测卫星,首次将 X 射线 CCD 用于 X 射线天文学中。1995 年,美国发射了搭载正比计数器阵列、高能 X 射线时变试验装置和全天监视器的 RXTE 卫星用于 X 射线源的探测。1996 年,意大利和荷兰共同研制了搭载正比计数器、闪烁探测器和光谱仪等探测设备的 BeppoSAX 天文卫星。2008 年,欧洲航天局、日本宇宙航空研究开发机构和美国国家航空航天局联合开展了一项包括光视场成像仪、硬 X 射线成像仪、X 射线微热量谱仪、高时间分辨率光谱仪、X 射线偏振计和 X 射线光栅谱仪 6 类探测设备的国际 X 射线天文台项目。国内随对正比探测器、微通道板探测器、闪烁探测器、X 射线 CCD 探测器等探测手段均有研究。但相比于国外,国内研究尚处于起始阶段^[3-6]。

多毛细管 X 射线透镜^[7-8]是一种利用 X 射线全反射原理对 X 射线进行调控的 X 射线光学器件,具有广角、宽带传输的优点。多毛细管 X 射线透镜是由玻璃材料制成,具有间隔低廉、工艺简单的优点。将玻璃导管按一定规律排列,再反复拉制,即可得到有一定外形曲线的多毛细管 X 射线透镜。多毛细管 X 射线透镜有聚束功能,可将大面积范围内的 X 射线传输到较小面积上。若能利用多毛细管 X 射线透镜将大面积范围内的 X 射线聚焦到一个较小区域内,再由半导体探测器探测,便可以有效解决半导体探测器探测面积不足的问题。

文中提出了一种将方形多毛细管 X 射线透镜与

X 射线 CCD 探测器相结合的 X 射线探测系统。该系统利用方形多毛细管 X 射线透镜的聚焦效果,将较大面积范围内的 X 射线聚焦至 X 射线 CCD 探测器上,实现大面积的 X 射线探测。通过数据校正可还原方形多毛细管 X 射线透镜入口端的 X 射线分布,强度等信息,实现 X 射线成像。由于 X 射线全反射临界角的限制,该探测系统还具有较小的探测视野。

1 设计原理

1.1 多毛细管 X 射线透镜的原理

X 射线是一种特殊的电磁波,其在物质表面的折射率^[9]可以表示为:

$$n=1-\delta=1-\frac{r_e Z N_A}{2\pi A} \rho \lambda^2 \quad (1)$$

当 Z/A 取 0.5 的时候, δ 可以近似表示为:

$$\delta=2.72 \times 10^{-6} \frac{Z}{A} \rho \lambda^2 \approx 1.3 \times 10^{-6} \rho \lambda^2 \quad (2)$$

可见 X 射线不同于可见光,其折射率接近且小于 1。由折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3)$$

可知,当光从光疏介质向光密介质传播时会发生全反射。当 X 射线由真空或者空气掠入射到玻璃表面的时候,会在玻璃表面发生全反射。多毛细管 X 射线透镜正是基于这一原理的一种 X 射线调控器件。

毛细管是一根中空且内径很小的玻璃管。如图 1 所示,当 X 射线以小于玻璃的全反射临界角的角度掠入射入毛细管时,X 射线会在毛细管的内壁表面发生全反射。空心的毛细管起波导作用,X 射线经多次全反射从输入端传输到输出端。若弯曲毛细管且同时保持 X 射线在毛细管内的全反射条件时,便可以改变 X 射线的传播方向。

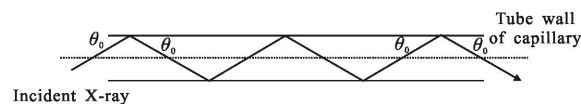


图 1 X 射线在单毛细管中的传播示意图

Fig.1 Diagram of X-ray transmission process in the single capillary

多毛细管 X 射线透镜是一种由大量单毛细管构成的大功率宽波段 X 射线聚束系统。20 世纪 80 年代末,前苏联科学家库马霍夫提出使用大量 X 射线导管组合 X 射线聚束系统。这种聚束系统中的所有导管都满足或部分满足入射 X 射线的全反射条件,

可大幅度提高 X 光的收集立体角, 形成高功率密度的 X 射线束斑, 实现 X 射线的聚束。但因其体积大、效率低、制造加工复杂且易损坏等很少使用。不同于组合式的 X 射线聚束系统, 整体式的多毛细管 X 射线透镜是将单 X 射线导管控制成复合管, 再由复合管的组合按照一定的外形尺寸经过一次或多次控制而成, 内部包含数十万至上百万根单毛细管。

1.2 新型探测系统的设计原理

X 射线 CCD 探测器具有良好的空间分辨能力, 已经广泛用于 X 射线检测和成像研究中。但由于工艺等因素的限制, X 射线 CCD 探测器无法将面积做的很大。若能利用多毛细管 X 射线透镜的汇聚功能将大范围内的 X 射线汇聚到一个较小范围, 再经 X 射线 CCD 探测成像, 便可实现大面积 X 射线成像研究。

实现这一目标的关键是 X 射线透镜毛细子管与 X 射线 CCD 像元排列需要一致。传统的多毛细管 X 射线透镜均由圆玻璃管控制而成的, 毛细子管按照六边形排列, 如图 2(a) 所示。这种排列方式与 X 射线 CCD 像元整齐的方形排列完全不同。因此, 提出了一种新的方形多毛细管 X 射线透镜。如图 2(b) 所示, 方形透镜子管排列不同于传统透镜, 而是整齐的方

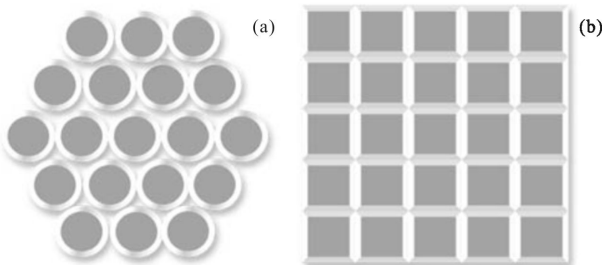


图 2 (a) 传统多毛细管 X 射线透镜子管排列示意图; (b) 方形多毛细管 X 射线透镜子管(方形子管)排列示意图

Fig.2 (a) Sub-tube arrangement diagram of traditional polycapillary X-ray lens (b) Sub-tube arrangement diagram of square polycapillary X-ray lens

形排列。这种子管排列方式与 X 射线 CCD 像元排列一致, 可用于构建新的 X 射线探测系统。方形透镜的 n_2 个子管相当于一个探测微元, X 射线 CCD 探测器像元仅能接收对应毛细子管出射的 X 射线。假设单根毛细管入射的 X 射线光子数为 N_0 , 方形多毛细管 X 射线透镜第 (i, j) 个子管的传输效率为 $\eta(i, j)$, 则新型探测系统第 (i', j') 个探测像元可接收到的 X 射线光子数 $N(i', j')$ 可表示为:

$$N(i', j') = \sum_1^n \sum_1^n N_0 \cdot \eta(i, j) \quad (4)$$

新型探测系统第 (i', j') 个探测像元对应的传输效率 $\eta'(i', j')$ 则可以表示为:

$$\eta'(i', j') = \frac{N(i', j')}{N_0 \cdot n^2} \quad (5)$$

若能获取新型探测系统每一个探测像元的传递函数, 则可以通过数据校准还原透镜入口端的 X 射线强度信息, 获取对应的 X 射线图像、强度等信息。利用一个入口端面积 (S_{in}) 大于出口端面积 (S_{out}) 的透镜采集 X 射线, 便可将更大面积范围内的 X 射线传输至一个很小的面积中。出口处 X 射线的成像也与入口处的一致, 图像面积变为了原来的 $\frac{S_{out}}{S_{in}}$ 倍。

根据经验公式, X 射线在硅酸盐玻璃材料表面的全反射临界角 θ 可以表示为^[10]:

$$\theta = \frac{30}{E} \text{ (mrad)} \quad (6)$$

式中: E 为入射 X 射线的能量, 单位 keV。

只有满足全反射条件的入射 X 射线才能被方形多毛细管 X 射线透镜传递, 因此探测系统本身具限束作用。探测系统的视野角可以表示为 2 倍的 X 射线全反射临界角。以能量为 3keV 的入射 X 射线为例, 全反射临界角仅为 10mrad, 即该探测系统的视角对于能量 3keV 的 X 射线为。相比于 1999 年美国发射的 USA 实验设备, 视角和探测面积均可以有所提高。若用于探测更高能量的 X 射线, 对应的视角将更小。

2 探测系统的设计

如图 3 所示, X 射线探测系统由方形多毛细管 X 射线透镜和 X 射线 CCD 探测器两部分组成。其中, 方形多毛细管 X 射线透镜由前端的平行段和后端的二次曲线段构成, 参数如表 1 所示。入射 X 射线经方形多毛细管 X 射线透镜汇聚至 X 射线 CCD。

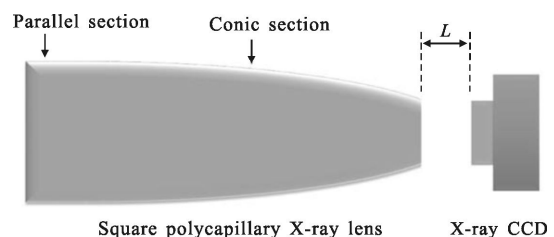


图 3 新型 X 射线探测系统结构示意图

Fig.3 Diagram of the new X-ray detecting system

表 1 方形多毛细管 X 射线透镜参数

Tab.1 Parameters of the square polycapillary X-ray lens

Length of parallel section /mm	Length of conic section/mm	Size of entry end /mm ²	Size of exit end /mm ²	Number of sub-tubes /mm ²
30	260	60×60	20.48×20.48	2 048×2 048

为消除各探测间的相互干扰,需将方形多毛细管 X 射线透镜各个毛细子管出射的 X 射线严格限制在对应的 X 射线 CCD 像元区域。理论上,将方形多毛细管 X 射线透镜紧贴 X 射线 CCD 像元即可。但是实际的毛细子管具有一定的壁厚,采用紧贴方式则不能充分利用 X 射线 CCD 像元。因此,可将透镜出口与 X 射线 CCD 之间留出一个距离 L ,使 X 射线以最大角度出射到达 X 射线 CCD,其位置不超出对应像元的区域。 L 的大小由方形多毛细管 X 射线透镜的参数确定,可表示为:

$$L = \frac{(a_1 - a_2)}{4 \tan \theta} \quad (7)$$

式中: a_1, a_2 分别为毛细子管的外径和内径; θ 为入射 X 射线的全反射临界角。

3 探测系统传输特性的模拟

由探测系统的工作原理可知,方形多毛细管 X 射线透镜在整个探测系统中负责 X 射线的采集及汇聚。系统中 X 射线 CCD 所能探测到的 X 射线强度及光强分布均取决于系统前段的方形多毛细管 X 射线透镜。因此,方形多毛细管 X 射线透镜的传输特性等决定了整个探测系统的探测性能。文中用光线轨迹追踪方法模拟了文中方形多毛细管 X 射线透镜的传输特性。

3.1 毛细子管传输特性

由方形多毛细管 X 射线透镜的结构可知,方形多毛细管 X 射线透镜每层子管的外形及尺寸均有所差别。由透镜轴线中心往外,每一层毛细子管的外形变化逐渐增大。而 X 射线在毛细子管中传播必须满足 X 射线全反射条件,因此每层子管对 X 射线的传输效果不尽相同。要想通过出口端的 X 射线准确还原入口端的入射 X 射线的强度,分布情况等信息,就必须研究方形多毛细管 X 射线透镜每一根子管对入射 X 射线的传输特性。图 4 分别给出当入射

X 射线能量 3、15、21.5、25 keV 时,方形多毛细管 X 射线透镜不同位置子管对均匀分布的平行入射 X 射线的传输效率模拟结果。

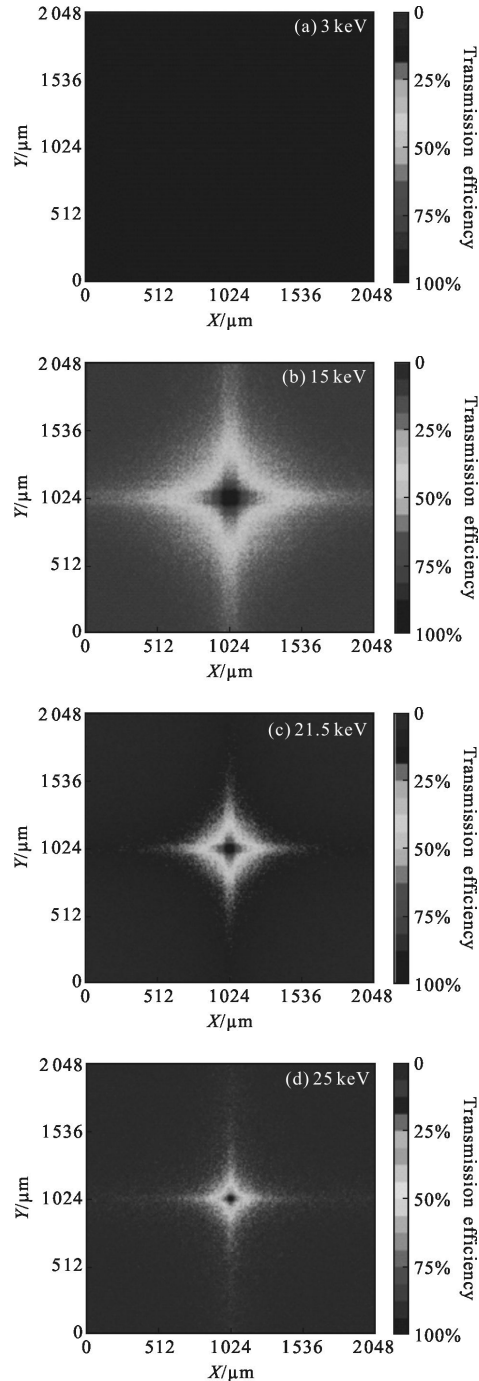


图 4 方形多毛细管 X 射线透镜子管对均匀分布平行入射 X 射线的传输效率

Fig.4 Transmission efficiency of the sub-tube of square polycapillary X-ray lens for evenly distributed X-ray

从图中可以看出:有透镜中心至边缘,子管的传

输效率逐渐越低。这是由于越靠近透镜边缘,子管的外形尺寸变化越大。子管也有完全满足 X 射线全反射变为部分满足甚至不满足 X 射线全反射条件。随着入射 X 射线能量的增大,中心区域子管的传输效率基本不变,但边缘区域子管的传输效率则逐渐减小。越靠近透镜边缘,传输效率变化越快。这是由于 X 射线全反射临界角随着能量的增大而逐渐减小。随着全反射临界角的减小,X 射线的传输对毛细子管的外形及尺寸变化将更加敏感。因此,这种趋势会随着能量的增加而更加明显。当入射 X 射线的能量为 21.5 keV 时,透镜边缘子管的传输效率变为 0,无法传输 X 射线。因此,当该探测系统用于大面积成像时,适合探测能量低于 21.5 keV 的 X 射线。

3.2 整体传输效率

图 5 给出了方多毛细管 X 射线透镜的整体传输效率随 X 射线能量变化的模拟结果。当入射 X 射线能量低于 4 keV 时,方形多毛细管 X 射线透镜的整体传输效率保持不变。当能量高于 4 keV 时,整体传输效率随着能量的增加而逐渐减小。这是由于当 X 射线的能量低于 4 keV 时,全反射临界角较大,方形多毛细管 X 射线透镜的外形及尺寸变化对 X 射线的传输基本没有影响。当 X 射线的能量高于 4 keV 时,方形多毛细管 X 射线透镜的外形及尺寸变化开始影响 X 射线的传输。随着入射 X 射线能量的增加,影响越发明显。

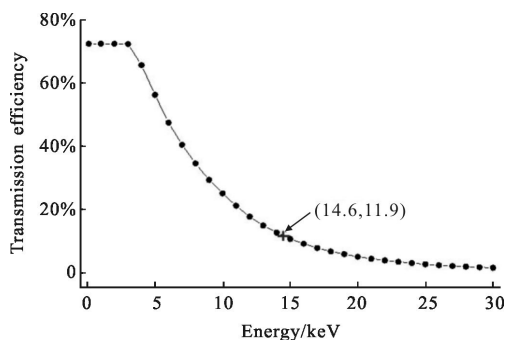


图 5 方形多毛细管 X 射线透镜整体传输效率随 X 射线能量变化的模拟结果

Fig.5 Simulation result of the transmission efficiency of square polycapillary X-ray lens changing with X-ray energy

为了缩短宇宙 X 射线等弱 X 射线信号的探测时间,需要增大探测面积,面积越大则时间越短。方形多毛细管 X 射线透镜的入口面积为 CCD 探测器

面积 8.4 倍,因此文中方形多毛细管 X 射线透镜的整体传输效率必需高于 11.9%。由图 5 可知,只有当入射 X 射线的能量低于 14.6 keV 时,方多毛细管 X 射线透镜的整体传输效率才高于 11.9%。即该探测系统用于收集大面积范围内的 X 射线时,适合探测能量低于 14.6 keV 的 X 射线。

4 结论

设计了一种方形多毛细管 X 射线透镜和 X 射线 CCD 探测器相结合的新型 X 射线探测系统。该探测系统可将大面积范围内的 X 射线汇聚至 X 射线 CCD,通过建立的 X 射线传输特性模型可校正并还原入射 X 射线信息,实现大面积 X 射线探测及成像分析。同时,该探测系统还具有较小的 X 射线收集角,不仅能用于诸如 X 射线脉冲星导航等特殊场合,也可以用于常规的 X 射线探测。

参考文献:

- [1] Zhang Weicheng. Booming X-ray astronomy [J]. *Knowledge is Power*, 2009(8): 64-66. (in Chinese)
张唯诚. 蓬勃发展的 X 射线天文学 [J]. 知识就是力量, 2009(8): 64-66.
- [2] Giacconi R, Gursky H. X-ray astronomy [C]//X-ray Astronomy, 1974: 43.
- [3] Quan Lin, Ouyang Xiaoping. Review on development of X-ray detection technologies for pulsar navigation [J]. *Modern Applied Physics*, 2014, 5(2): 98-103. (in Chinese)
全林, 欧阳晓平. 脉冲星导航 X 射线探测技术综述 [J]. 现代应用物理, 2014, 5(2): 98-103.
- [4] Liang Dongsheng, Liu Chaohui, Liu Wen, et al. Aerial vehicle astronomy autonomous navigation technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3020-3025. (in Chinese)
梁冬生, 刘朝晖, 刘文, 等. 航空飞行器天文自主导航定位技术 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3020-3025.
- [5] Wei Bin. Study of the ground verification technology of X-ray pulsar detection [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
魏彬. X 射线脉冲星信号探测的地面验证技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [6] Shuai Ping, Li Ming, Chen Shaolong, et al. Principle and Method of X-ray Pulsars Navigation System [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009: 14-22. (in Chinese)

- 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: 14-22.
- [7] MacDonald C A. Applications and measurements of polycapillary x-ray optics[J]. *Journal of X-ray Science and Technology*, 1996, 6(1): 32-47.
- [8] Yan Yiming, He Yejun, Ding Xunliang, et al. New achievements of X-ray optics-X-ray lens and its application [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(11): 37-42. (in Chinses)
- 颜一鸣, 赫业军, 丁训良, 等. X 射线光学的新成就-X 光透镜及其应用[J]. *自然科学进展*, 2000, 10(11): 37-42.
- [9] Ioanna Mantouvalou. Quantitative 3D Micro X-ray fluorescence spectroscopy [D]. Berlin:Technische Universität, 2009.
- [10] Sun Tianxi, Ding Xunliang, Liu Zhiguo, et al. Experimental investigation of properties of polycapillary X-ray lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(10): 1436-1440. (in Chinese)
- 孙天希, 丁训良, 刘志国, 等. 整体 X 光透镜性能实验研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(10): 1436-1440.