

文章编号: 0253-2239(2006)02-0317-4

高能 X 射线组合透镜聚焦性能的实验结果*

乐孜纯¹ 梁静秋² 董文¹ 王维彪² 朱佩平³ 黄万霞³ 袁清习³
王越³ 彭良强³ 全必胜¹ 姚劲松²

{ 1 浙江工业大学信息工程学院, 杭州 310032
2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130022
3 中国科学院高能物理研究所, 北京 100080 }

摘要: 高能 X 射线组合透镜是一种基于折射效应的新型 X 射线光学元件。报道了这种新型 X 射线光学元件聚焦性能的最新实验结果。设计的高能 X 射线组合透镜为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料, 包括 40 个相同的、顺序排布的平凹折射单元, 折射单元的球面半径为 200 μm , 组合透镜的几何口径约为 500 μm , 长度约为 8 mm, 焦距约为 1.3 m。简要描述了 PMMA 材料 X 射线组合透镜的制作技术和制作过程。并给出了 X 射线组合透镜聚焦性能测试实验系统和实验条件。最后给出 8 keV 单色 X 射线辐射下, PMMA 材料 X 射线组合透镜的聚焦性能的测试结果, 对实际测试结果进行了分析和讨论, 得出结论, 焦距等参量与理论计算结果基本吻合。

关键词: X 射线光学; X 射线组合透镜; 聚焦性能; 同步辐射

中图分类号: O434.19; O435.1 文献标识码: A

Experimental Results of Focusing Performance for the Compound High-Energy X-Ray Refractive Lenses

Le Zichun¹ Liang Jingqiu² Dong Wen¹ Wang Weibiao² Zhu Peiping³ Huang Wanxia³
Yuan Qingxi³ Wang Junyue³ Peng Liangqiang³ Quan Bisheng¹ Yao Jinsong²

{ 1 College of information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032
2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022
3 Institute of High-Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 }

Abstract: The compound high-energy X-ray lens is a kind of novel refractive X-ray optical device. The latest experimental results of the focusing performance of the compound high-energy X-ray lens is designed with PMMA with the parameters of 40 plano-concave elementary lenses positioned in line with axial symmetry, 200 μm radius of the concave surface, 0.15 nm working wavelength, 0.5 mm geometrical aperture and 8 mm length of the compound lens and 1.3 m focus length, are briefly introduced. Then the experimental setup for the focusing performance is described, and the focusing performance of the PMMA compound high-energy X-ray lens is tested under the irradiation of the 8 keV monochromatic X-ray. The experimental results are in general coincident with the calculated results.

Key words: X-ray optics; compound X-ray refractive lens; focusing performance; synchrotron radiation

1 引 言

X 射线组合透镜是一种利用折射效应的新型 X 射线光学元件, 由 Snigirev^[1] 在 1996 年提出并首先研制成功。X 射线组合透镜采用多个单片折射单元

组合的方法来缩短该元件的焦距, 并采用低原子序数材料以便减小其 X 射线辐射吸收损耗。与其他类型的 X 射线光学元器件[如掠入射 X 射线全反射镜、透射式 X 射线波带片、X 射线多层膜反射镜、X

* 国家自然科学基金(10174079)、浙江省自然科学基金(Y104203)和 BEPC 国家实验室开放课题(sr-03062)资助课题。

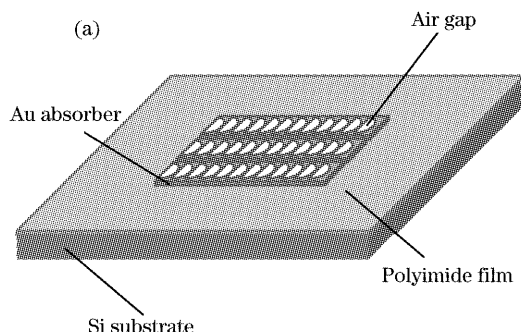
作者简介: 乐孜纯(1965~), 女, 浙江杭州人, 教授, 理学博士, 主要从事 X 射线光学器件和系统、光信息传输与存储方面的研究。E-mail: lzc@zjut.edu.cn

收稿日期: 2005-04-05; 收到修改稿日期: 2005-05-31

射线晶体聚焦元件、多层膜及晶体 X 射线布拉格-菲涅耳(Bragg-Fresnel)元件]相比, X 射线组合透镜有许多优点。主要表现在它不需要折转光路、高温稳定性好且容易冷却、结构简单紧凑、对透镜表面粗糙度要求低等等, 特别适合应用于高能(大于 5 keV) X 射线波段。在与同步辐射相关的基础物理研究(如同步辐射束预聚焦、成像系统、校准装置、低发射同步辐射源的电子束诊断), 以及 X 射线诊断技术(如 X 射线衍射技术、X 射线荧光分析、高分辨率 X 射线微探针技术)等领域有广泛的应用前景。由于 X 射线组合透镜所具有的上述优点, 1996 年以来国外对 X 射线组合透镜的研究一直非常活跃, 对该组合透镜的理论方法以及制作技术的研究报道相继出现^[2~4]。并于近几年构建了一些基于 X 射线组合透镜的高能 X 射线实验诊断系统, 如高能 X 射线成像和光刻实验系统^[5]、用于样品元素分布状态测量的高能 X 射线荧光微层析实验系统^[6], 分辨率都达到了亚微米量级。还有基于金属材料高能 X 射线组合透镜的中子显微镜^[7]、用于单细胞检测、化学微分析、早期胸部肿瘤检测等的高能 X 射线实验系统^[8,9]。这些实验系统的成功构建已经显示出了高能 X 射线组合透镜在众多科学和技术领域的诱人的应用前景。我们于 2001 年在国家自然科学基金的资助下开始了高能 X 射线组合透镜的研究工作, 已经在 X 射线组合透镜的设计理论和制作技术方面取得了一些研究结果^[10~12], 本文主要报道我们研制的高能 X 射线组合透镜的聚焦性能的实验结果。

2 实 验

图 1 为高能 X 射线组合透镜聚焦性能测试的实验系统图, 主要由同步辐射 X 射线源、两块晶体



(晶体 I 和晶体 II)、被测的聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材料 X 射线组合透镜以及记录焦斑的 X 射线 CCD 组成。晶体 I 起单色器作用, 晶体 II 起到偏折 X 射线的作用。X 射线辐射经过晶体 I 后, 射出能量为 8 keV 的单色 X 射线。再经过晶体 II 的反射, 将 X 射线偏折并射向置于晶体 II 后的 PMMA 材料高能 X 射线组合透镜, 聚焦焦斑由可沿光轴步进移动的 X 射线 CCD 纪录。

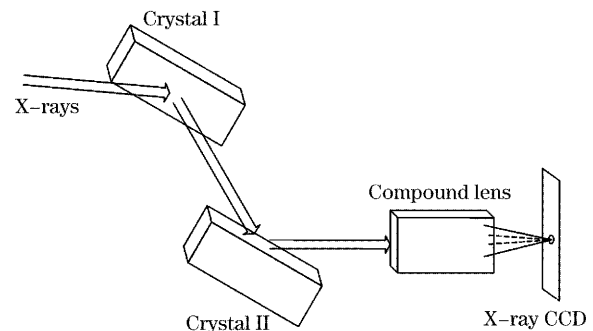


图 1 高能 X 射线组合透镜聚焦性能测试实验系统图
Fig. 1 Experimental setup for the focusing performance of the compound X-ray refractive lens

PMMA 材料高能 X 射线组合透镜包括 40 个相同的、顺序排布的平凹折射单元, 使焦距减小到可实用的范围。折射单元的球面半径为 200 μm , 为了减小 X 射线辐射吸收并考虑到采用平面制作技术来制作 X 射线组合透镜, 折射单元的中心厚度设计为零。X 射线组合透镜的几何口径约为 500 μm , 长度约为 8 mm, 焦距约为 1.3 m。

组合透镜由深度 X 射线光刻技术制作完成。先用准 X 射线深度光刻、微电铸和微塑铸技术(LIGA)制作了金材料厚吸收体 X 射线光刻掩模, 金材料厚度大于 10 μm 。图 2(a)给出了高能 X 射线聚焦组合透镜的 X 射线光刻掩模示意图。

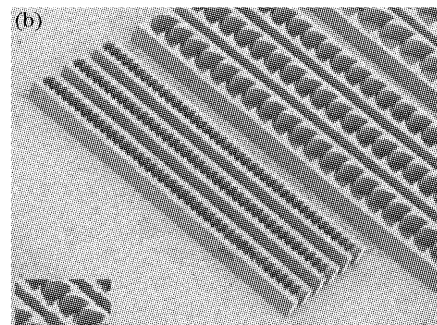


图 2 (a) 用于制作 X 射线组合透镜的 X 射线掩模, (b) 透镜厚度为 500 μm 的 PMMA 材料 X 射线组合透镜
Fig. 2 (a) The X-ray mask for fabricating the compound X-ray refractive lenses, (b) PMMA compound X-ray refractive lenses with a structure height of 500 μm

利用上述 X 射线光刻掩模,采用接近式光刻方法,经过软 X 射线光刻、显影后得到 PMMA 材料的高能 X 射线组合透镜,图 2(b)给出了 PMMA 材料高能 X 射线组合透镜的扫描电镜照片,透镜结构高度为 $500\ \mu\text{m}$ 。扫描电镜照片中显示了三组不同的 X 射线组合透镜,折射单元的球面半径分别为 $200\ \mu\text{m}$ 、 $500\ \mu\text{m}$ 和 $700\ \mu\text{m}$ 。其中图形完整的就是实验中进行聚焦性能测试的、折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的 PMMA 高能 X 射线组合透镜。在图 2(b)的左下角还给出了折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的 PMMA 高能 X 射线组合透镜的局部放大图。可以看出由

于实际制作过程中工艺技术不完善,组合透镜的中心刻蚀过度,全部刻透,留下了约 $80\ \mu\text{m}$ 的通孔。实验中测试的是一组阵列 X 射线组合透镜,包括三个结构参量完全相同的 X 射线组合透镜,两个组合透镜之间间隔着尺寸为 $400\ \mu\text{m}$ 的空气隙。

X 射线组合透镜聚焦性能实验在北京同步辐射 4W1A 形貌站上完成。储存环电子能量为 $2.2\ \text{GeV}$,束流强度 $50\sim 70\ \text{mA}$,单色 X 射线能量 $8\ \text{keV}$ 。聚焦焦斑用 X 光 CCD 纪录,曝光时间为 $4.5\ \text{s}$,纪录距离(实测焦距)为 $1.25\ \text{m}$,测得的结果如图 3 所示。

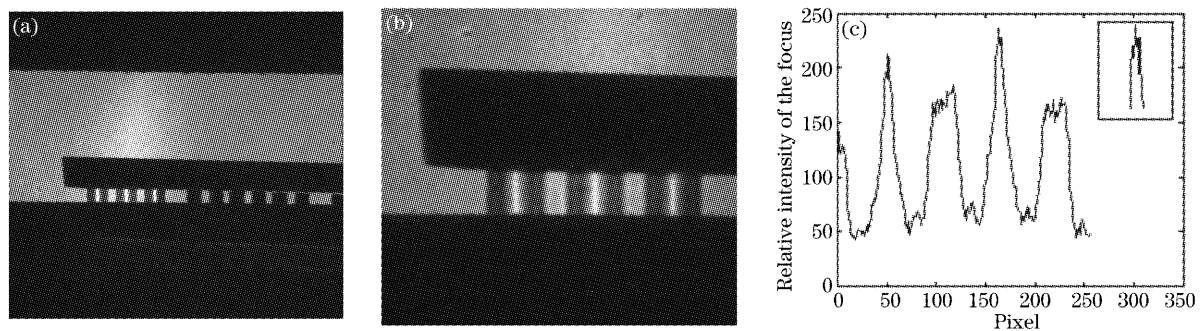


图 3 (a) 针对折射单元半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的 PMMA 材料 X 射线组合透镜,在像距为 $1.25\ \text{m}$ 处记录得到的聚焦图像, (b) 图 3(a) 的局部放大图, (c) 焦斑强度分布曲线

Fig. 3 (a) The focal spots taken at the distance of $1.25\ \text{m}$ from the PMMA compound X-ray lens with refractive cell radius $200\ \mu\text{m}$, (b) local magnified image from Fig. 3(a), (c) the intensity distribution of the focus

在一块基片上制作了五组不同结构参量的组合透镜,图 3(a)中既包括了折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ [图 3(a)左半部分]的三个组合透镜的聚焦性能测试结果,也可以看到折射单元球面半径为 $500\ \mu\text{m}$ [图 3(a)右半部分]的三个组合透镜的情况。但是折射单元球面半径为 $500\ \mu\text{m}$ 的 X 射线组合透镜具有不同的焦距,因此图像纪录位置并不是其焦平面,图中显示的光斑是很宽的。本实验实际测量的是折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的组合透镜的聚焦性能,图 3(b)给出其测量结果的局部放大图。

从图 3(b)中可以看到三条细的亮线,分别对应三个折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的 X 射线组合透镜的聚焦焦斑。X 射线聚焦组合透镜是一维聚焦的,所以图中显示的是焦线。两焦线之间的宽亮斑,是 X 射线直接通过两个组合透镜之间的宽度为 $400\ \mu\text{m}$ 的空气隙而形成的。将此未经聚焦的宽亮斑与经 X 射线组合透镜聚焦后的焦斑相比较,可以看出组合透镜的聚焦效果是非常明显的。

图 3(c)是根据图 3(b)所示的测量结果画出的焦斑强度分布曲线,其中最高的峰值对应图 3(b)中

中间的细亮线。前面已经提到,由于实际制作过程中工艺技术不完善,组合透镜的中心部位留下了约 $80\ \mu\text{m}$ 的通孔。这使得在焦平面处测量到的焦斑强度分布中有很强的背底噪声。针对位于中间的折射单元球面半径为 $200\ \mu\text{m}$ 的 X 射线组合透镜,在图 3(c)的右上角给出了经去噪处理后的焦斑的强度分布,根据 X 射线 CCD 的像素尺寸估算,焦斑的尺寸约为 $11\ \mu\text{m}$ 。

3 结 论

上述实验结果表明,我们设计制作的高能 X 射线组合透镜有良好的聚焦效果,焦距等参量的设计结果与实验结果吻合。这一结果为高能 X 射线组合透镜在 X 射线诊断技术领域的应用提供了有力的技术基础。

参 考 文 献

- 1 A. Snigirev, V. Kohn, I. Snigireva *et al.*. A compound refractive lens for focusing high-energy X-ray[J]. *Nature*, 1996, **384**(7021): 49~51

- 2 V. Aristov, M. Grigoriev, S. Kuznetsov *et al.*. X-ray refractive planar lens with minimized absorption[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(24): 4058~4060
- 3 N. R. Pereira, E. M. Dufresne, R. Clarke *et al.*. Parabolic lithium refractive optics for X-rays[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(1): 37~41
- 4 J. T. Cremer, M. A. Piestrup, H. R. Beguiristain *et al.*. Large aperture compound lenses made of lithium [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2003, **74**(4): 2262~2266
- 5 C. G. Schroer, B. Benner, T. F. Günzler *et al.*. High resolution imaging and lithography with hard X-rays using parabolic compound refractive lenses[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(3): 1640~1642
- 6 Christian G. Schroer. Reconstructing X-ray fluorescence microtomograms[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **79**(12): 1912~1914
- 7 H. R. Beguiristain, I. S. Anderson, C. D. Dewhurst *et al.*. A simple neutron microscope using a compound refractive lens[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(22): 4290~4292
- 8 S. Bohic, A. Simionovici, A. Snigirev *et al.*. Synchrontron hard X-ray microprobe: Fluorescence imaging of single cells[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(22): 3544~3546
- 9 Michael Drakopoulos, Jorg Zegenhagen, Anatoly Snigirev *et al.*. X-ray standing wave microscopy: Chemical microanalysis with atomic resolution [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, **81**(12): 2279~2281
- 10 Le Zichun, Liang Jingqiu. Theory of the compound X-ray lenses for focusing high energy X-ray radiation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 572~576 (in Chinese)
乐孜纯, 梁静秋. 高能 X 射线聚焦组合透镜的理论研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 572~576
- 11 Zichun Le, Kai Liu, Jingqiu Liang. A method based on diffraction theory for predicting 3-D focusing performance of compound refractive X-ray lenses[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(3): 184~186
- 12 Jingqiu Liang, Zichun Le, Liangqiang Peng *et al.*. The study on the compound X-ray refractive lens using LIGA technology[C]. *Proc. SPIE*, 2004, **5641**: 48~55