

文章编号: 1000-582X(2013)04-099-04

## 超环面弯晶在 X 射线单色背光成像中的应用

毋玉芬<sup>1</sup>, 肖沙里<sup>1</sup>, 刘利锋<sup>1</sup>, 施 军<sup>1</sup>, 钱家渝<sup>1</sup>, 刘慎业<sup>2</sup>, 韦敏习<sup>2</sup>, 陈伯伦<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 基于 Bragg 衍射理论, 分析了超环面晶体分析器实现等离子体在子午和弧矢 2 个方向等比例放大成像的原理, 采用云母作为衍射晶体, 研制了对激光等离子体进行二维成像的超环面晶体分析器, 其子午和弧矢曲率半径分别为 290 mm 和 196 mm, 用于衍射成像时的 Bragg 角度为  $54^\circ$ 。采用铬靶 X 射线源辐照金属网格目标, 网格的网孔尺寸为  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$ , 通过超环面晶体分析器对铬靶  $K\alpha$  谱线的衍射, 在 X 射线 IP 板上得到了网格的二维背光衍射图像, 并与球面晶体分析器成像效果进行了对比。实验结果表明, 与球面晶体分析器相比, 超环面晶体分析器可实现在子午和弧矢 2 个方向等放大比的 X 射线背光成像, 且分析器具有较高的空间分辨力, 当光源尺寸为  $500\ \mu\text{m}$ , 成像放大倍数为 1.86 倍时, 其空间分辨力达到  $67\ \mu\text{m}$ 。

**关键词:** 超环面弯曲晶体; 二维等比例成像; 空间分辨力; 激光等离子体诊断

中图分类号: TL651

文献标志码: A

## Application of toroidally curved crystal to monochromatic X-ray backlighting imaging

WU Yufen<sup>1</sup>, XIAO Shali<sup>1</sup>, LIU Lifeng<sup>1</sup>, SHI Jun<sup>1</sup>, QIAN Jiayu<sup>1</sup>, LIU Shenye<sup>2</sup>, WEI Minxi<sup>2</sup>, CHEN Bolun<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Optoelectronic Technology &amp; Systems, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The reflection type toroidally curved crystal analyzer is investigated based on the Bragg diffraction to diagnose laser plasma X-ray. The dispersive element of crystal analyzer is mica. The bent radiuses of the crystal analyzer in meridian plane and sagittal plane are 290 mm and 196 mm respectively, and the corresponding Bragg angle is  $54^\circ$ . The imaging experiment is carried out at the X-ray diffractometer facility by using Cr target. Two-dimensional monochromatic image of a mesh interval of  $0.2\ \text{mm} \times 0.2\ \text{mm}$  is obtained by the toroidally curved crystal. The experimental result indicates that 2D monochromatic image with equal magnification in the meridian and sagittal planes can be obtained by using the toroidally curved crystal analyzer. Furthermore, the spatial resolution of the toroidally curved crystal analyzer achieves  $67\ \mu\text{m}$  when the size of the X-ray source is  $500\ \mu\text{m}$  and magnifying ratio is 1.86.

**Key words:** toroidally curved crystal; 2D imaging with equal magnification; spatial resolution; laser plasma diagnosis

收稿日期: 2012-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSAF10976033); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11122219)

作者简介: 毋玉芬(1982-), 女, 重庆大学博士研究生, 研究方向为 X 射线光学及弯晶成像谱学。

肖沙里(联系人), 男, 重庆大学教授, 博士生导师, (E-mail) xiaoshali@cqu.edu.cn.

受控聚变可为人类提供几乎无限的清洁能源,缓解人类日益增长的能源资源矛盾,其中,惯性约束核聚变(ICF)又称靶丸聚变<sup>[1]</sup>,是实现受控核聚变的一种途径。在惯性约束聚变的研究中,聚变靶丸在高强度激光束或 X 射线激发下的聚爆稳定性是重要内容之一,同时,惯性约束聚变过程中束-靶耦合及爆聚-燃烧都是发生在极短时间、极小空间中的物理现象,而且会产生超高密度的高温等离子体,这些特性要求惯性约束聚变的诊断应有相当苛刻的参量测量性能,因此,需要发展各种具有高时空及能谱分辨能力的等离子体诊断技术<sup>[2-3]</sup>。

对聚爆过程中的等离子体进行成像能显示出聚变材料的尺寸、形状和分布情况<sup>[4-6]</sup>,能深入研究等离子体状态及辐射的时空特性。利用晶体谱仪,可以对等离子体 X 射线进行衍射成像<sup>[7-8]</sup>,为聚变点火提供重要验证依据,是一种理想的等离子体诊断工具。与平面晶体或者柱面凸晶谱仪相比,相同尺寸的球面<sup>[9-11]</sup>和超环面弯晶<sup>[12-14]</sup>诊断 X 射线时能有效降低空间尺寸对谱线宽度的影响,获得更高的能谱分辨力;此外,球面及超环面弯晶的成像性能使其能够对激光等离子体进行成像,同时记录等离子体 X 射线的能量和空间分布信息。球面弯晶衍射成像时需要 X 射线近垂直入射,当 X 射线偏离垂直方向入射时,球面弯晶得到的 X 射线衍射图像在子午和弧矢方向的放大比将不同,为得到等放大比的图像,需要精确选定成像板的位置,该原理限制了球面弯晶的使用范围。当布拉格角偏离直角时,超环面弯晶可利用其不同的子午面和弧矢面曲率半径来消除像散,从而实现在子午和弧矢方向等放大比的不失真等离子体 X 射线衍射图像。

在前期研制的椭圆及球面晶体分析器<sup>[15-16]</sup>的基础上,文中基于 X 射线 Bragg 衍射原理研制了子午和弧矢曲率半径分别为 290 mm 和 196 mm 的超环面晶体分析器。采用云母作为衍射晶体, X 射线 IP 板作为等离子体 X 射线成像器件,利用 X 射线衍射仪铬靶 K $\alpha$  单色谱成像,对所研制的晶体分析器进行了网格的二维背光成像。

## 1 超环面晶体分析器

超环面晶体分析器利用 X 射线在晶体中的布拉格衍射和球面几何光学原理,实现对目标物体的单色成像。在用超环面晶体分析器对物体进行背光衍射成像时,用于照明的背光光源位于罗兰圆附近,被成像物体位于光源和晶体之间。背光成像原理图如图 1 所示。

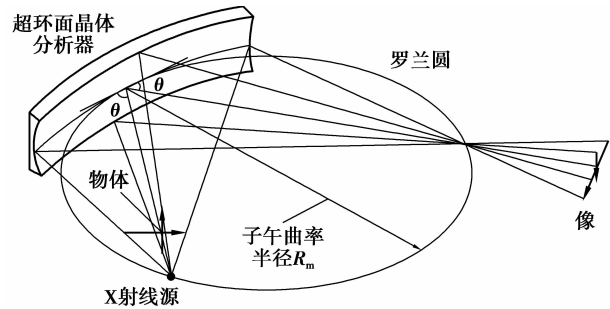


图 1 超环面晶体背光成像原理

假设光源与晶体中心所成的布拉格角为  $\theta$ ,该角度由布拉格衍射条件确定。

$$2d\sin\theta = n\lambda, \quad (1)$$

式中: $d$  是晶体的晶面间距; $\theta$  是入射光与晶面的夹角; $\lambda$  是入射 X 射线波长; $n$  是衍射级次。用超环面晶体进行背光成像时,光源在子午和弧矢 2 个方向分别满足如下透镜成像公式,在子午面上

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R_m \sin\theta}, \quad (2)$$

在弧矢面上

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2\sin\theta}{R_s}, \quad (3)$$

式中: $p$  是光源到超环面晶体中心的距离,当成像器件为球面弯晶时,光源在子午和弧矢面的成像聚焦位置不同,分别为  $q$  和  $q'$ <sup>[14]</sup>,对于超环面,调节其子午和弧矢面的曲率半径  $R_m$  和  $R_s$ ,使  $R_s = R_m \sin^2\theta$ ,则子午平面和弧矢平面的像将在同一位置聚焦,即  $q = q'$ 。记物体距晶体中心距离为  $a$ ,若将成像板置于距晶体中心  $d$  的位置,则系统的成像放大率可简单的表示为

$$M = \frac{p}{q} \times \frac{d-q}{p-a}. \quad (4)$$

该公式对子午和弧矢方向都适用。

## 2 超环面晶体分析器研制

由于云母晶体的衍射效率较高,且材料弹性好,因此,采用云母材料作为衍射晶体。目前能够使用的晶体最大尺寸在 80 mm 左右。将云母晶体解理成 0.2 mm 的薄片,这些薄片置于一定温度条件下,在凹凸折弯机上进行塑性弯曲,凹面和凸面超环面形的模具精确地决定了晶体的曲率半径。在凹面模具表面和云母晶体片之间放置了橡胶垫圈,以减少压力过大可能导致的晶体损坏。弯曲成型后的云母晶体片贴于已经做好的超环面玻璃基底表面,制成用于 X 射线背光成像的超环面晶体分析器。超环面的表面形状应符合设计的理论数据,晶体分析器

子午和弧矢面的焦距分别为 290 mm 和 196 mm,借助于三坐标仪测得超环面曲线最大误差为  $5 \mu\text{m}$ 。目前已进行的超环面晶体分析器背光成像实验结果证明,该晶体分析器具有高光谱分辨力和灵敏度,对波长范围为  $0.2 \sim 0.4 \text{ nm}$  的 X 射线其谱分辨力  $(\lambda/\Delta\lambda)$  可达 1 000,因此超环面弯曲晶体特别适用于研究等离子体 X 射线光谱学及其光谱成像。

### 3 背光成像实验

#### 3.1 实验条件

制成的超环面晶体分析器在 X 射线衍射仪装置上进行了 X 光背光成像实验,采用铬靶 X 射线源作为背光源,其  $K\alpha$  特征谱线波长为  $2.29 \text{ \AA}$  ( $5.406 \text{ keV}$ ),负载电流为  $10 \text{ mA}$ ,电压为  $50 \text{ kV}$ ,曝光时间  $180 \text{ s}$ 。为对超环面晶体分析器的成像空间分辨力进行验证,在线状铬靶射线源前加  $500 \mu\text{m}$  小孔,使实验所用射线源尺寸接近实际激光等离子体尺寸。云母晶体分析器的晶格常数  $2d=19.8 \text{ \AA}$ ,将云母 7 阶作为衍射面,铬靶与晶体中心线成  $54^\circ$  角,以满足 Bragg 衍射条件。

以 X 射线源作为背光源,在射线源与晶体之间放置网孔尺寸为  $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$  的金属网格,光源发出的射线经晶体衍射并聚焦后,将金属网格的像成在 IP 板上,其中射线源、金属网格到晶体的距离及晶体与成像板的距离分别为  $250$ 、 $125$ 、 $460 \text{ mm}$ ,实验装置如图 2 所示。为了比较球面晶体和超环面晶体的成像效果,在相同成像角度条件下,用球面晶体分析器也进行了二维衍射成像,表 1 列出了实验所用超环面晶体分析器和球面晶体分析器的各项指标及实验参数。

表 1 晶体分析器背光成像实验参数

	超环面	球面
X 射线源	Cr $K\alpha$	Cr $K\alpha$
光子能量/keV	5.406	5.406
晶体材料	云母	云母
晶格常数/ $\text{\AA}$	19.8	19.8
布拉格角/ $^\circ$	54	54
曲率半径/mm	290/196	143.3
光源到晶体距离/mm	250	195
网格到晶体距离/mm	125	115
晶体到成像板距离/mm	460	300

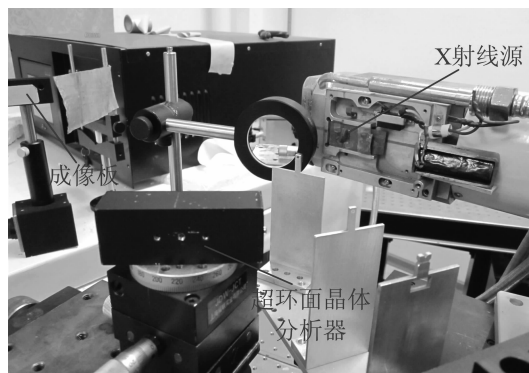


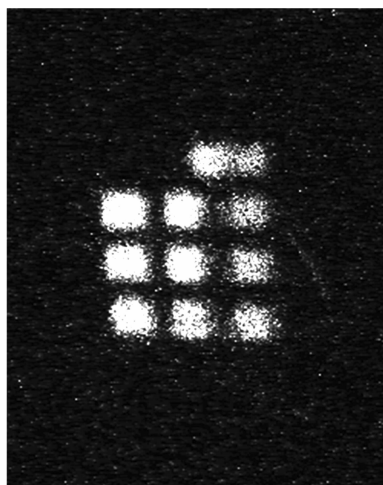
图 2 背光成像实验装置图

#### 3.2 实验结果及分析

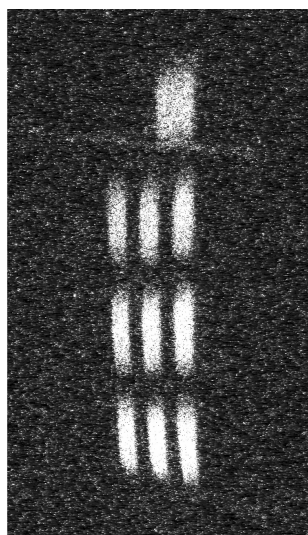
图 3 是超环面晶体和球面晶体分析器的衍射图像,被成像网格的网孔呈  $3 \times 3$  阵列排布,外加最上方尺寸稍大的定位孔。对比图 3(a)和 3(b)可以看出,当布拉格角偏离  $90^\circ$  时,相同成像角度条件下,超环面晶体分析器得到的衍射图像在子午和弧矢 2 个方向具有相同的放大倍数,能够更直观地反映被测物体的状态信息,而相同成像角度条件下,由于成像板偏离最佳成像位置,球面晶体分析器得到的衍射图像在子午和弧矢方向的放大倍数不同,图像产生变形,在这种情况下,不能直接通过衍射图像获得被测等离子体状态信息,而需要根据成像条件做额外的分析。

用 WinView 软件对图 3(a)所示超环面晶体分析器衍射图像进行分析,得到图像的三维像素强度分布如图 4 所示。图 4 中靠近 Y 轴一侧的图像像素强度值较低,是因为实验时射线源中心出光孔位置的偏差。另外,对比图 4 中网格衍射图像在 X 轴和 Y 轴的坐标可知,图像在 X 轴和 Y 轴的像素尺寸相当,证明当 Bragg 角为  $54^\circ$  时,超环面晶体分析器得到的衍射图像在子午和弧矢 2 个方向的放大倍数相当。

为得到超环面晶体分析器的空间分辨力,图 5 给出了图 3(a)所示衍射图像的二维局部像素强度分布图。由图 5 可知,图像的半高宽(FWHM)约为 5 个像素点,成像板每个像素点对应的实际尺寸为  $25 \mu\text{m}$ 。将实验时的距离参数带入式(2)或式(3),求得光源聚焦距离  $q=238 \text{ mm}$ ,再将各参数连同求得的  $q$  值带入式(4),得到上述实验条件下,系统成像放大倍数为 1.86 倍。结合图像半高宽为 5 个像素点,当光源尺寸为  $500 \mu\text{m}$  时,超环面晶体分析的空间分辨力(由衍射图像半高宽尺寸与图像放大倍数的比值决定)约为  $67 \mu\text{m}$ 。



(a) 超环面晶体分析器得到的衍射图像



(b) 球面晶体分析器得到的衍射图像

图 3 网格目标 X 射线背光衍射二维单能像

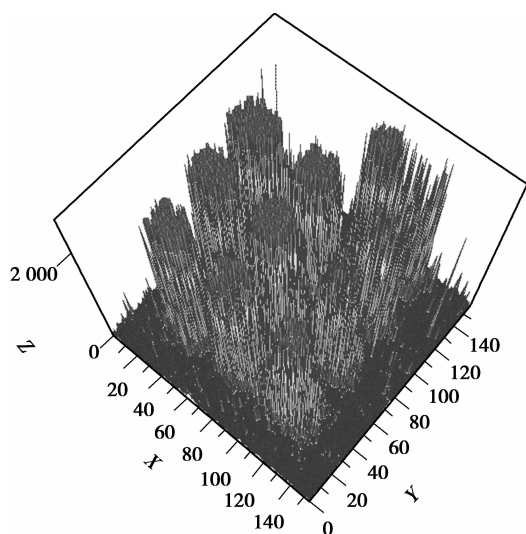


图 4 衍射图像的三维像素强度图

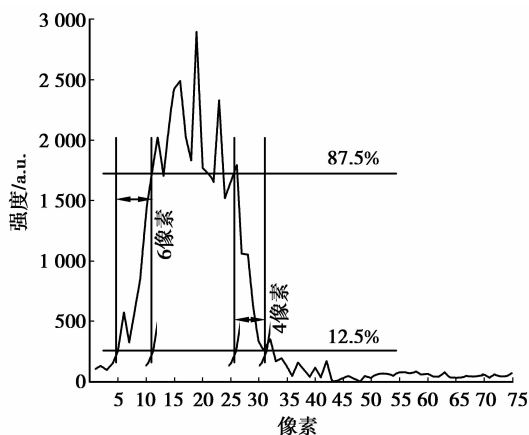


图 5 衍射图像的像素强度分布图

### 4 结 论

基于 X 射线布拉格衍射原理,研制了子午和弧矢曲率半径分别为 290 mm 和 196 mm 的云母超环面晶体分析器,在 X 射线衍射仪上进行了  $200\ \mu\text{m} \times 200\ \mu\text{m}$  网孔间隔金属网格的背光成像实验,获得了在子午和弧矢 2 个方向上等放大倍数的二维单能衍射图像。实验结果验证了超环面晶体分析器对等离子体 X 射线的等放大比单能成像能力,通过对网格的二维单能像进行分析,得出当光源尺寸为  $500\ \mu\text{m}$  时,所研制超环面晶体分析器用于成像时的空间分辨力为  $67\ \mu\text{m}$ 。目前超环面晶体分析器的成像分辨力受限于光源尺寸,当光源尺寸进一步减小时,分析器空间分辨力有望达到微米量级<sup>[12]</sup>。

### 参考文献:

[1] Yan X, Zhang J Y. A requirement for diagnosis of the ionization state in opacity measurements[J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(5):052705.

[2] Lee S G, Bak J G, Nam, et al. The first experimental results from x-ray imaging crystal spectrometer for KSTAR[J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 506-508.

[3] 王瑞荣, 陈伟民, 王伟. 椭圆弯晶谱仪波长分辨能力的改进[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1303-1308. WANG Rui-rong, CHEN Wei-min, WANG Wei. Improvement of spectral resolution power for an elliptically curved crystal spectrometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(6): 1303-1308.

[4] Sinars D B, Slutz S A, Herrmann M C, et al. Measurements of Magneto-Rayleigh-Taylor instability growth during the implosion of initially solid Al tubes driven by the 20-MA, 100-ns Z facility[J]. Physical Review Letters, 2010, 105(18): 185001.

- rock heat [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 23-28.
- [11] 秦跃平, 党海政, 刘爱明. 用边界单元法求解巷道围岩的散热量[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(4): 403-406.
- QIN Yueping, DANG Haizheng, LIU Aiming. Calculation of heat quantity from rocks around roadways with boundary element method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(4): 403-406.
- [12] 吴强, 秦跃平, 郭亮, 等. 巷道围岩非稳态温度场有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 604-607.
- WU Qiang, QIN Yueping, GUO Liang, et al. Analysis of unsteady temperature field in wall rock by finite element method [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 604-607.
- [13] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [14] McPherson M J. Subsurface ventilation and environmental engineering[M]. Berlin: Springer, 1993.
- [15] 曾丹苓, 敖越, 张新铭, 等. 工程热力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2005, 5: 185.
- [16] 张荣立, 何国纬, 李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- (编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 102 页)

- [5] Barnsley R, Peacock N J, Dunn J, et al. Versatile high resolution crystal spectrometer with x-ray charge coupled device detector [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(4): 2388-22408.
- [6] Marshall F J, McKenty P W, Delettretz J A, et al. Plasma-density determination from x-ray radiography of laser-driven spherical implosions[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(18): 185004.
- [7] 王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 用于激光等离子体 X 射线诊断的谱仪[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(8): 864-868.
- WANG Hongjian, XIAO Shali, SHI Jun, et al. X-ray diagnosis spectroscopy of laser-produced plasma [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(8): 864-868.
- [8] Fujioka S, Fujiwara T, Tanabe M, et al. Monochromatic x-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 509-511.
- [9] 阳庆国, 李泽仁, 彭其先, 等. 激光驱动 X 射线单色背光照相系统优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1983-1988.
- YANG Qingguo, LI Zeren, PENG Qixian, et al. Optimum design of laser-driven-monochromatic x-ray backlighting system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 1983-1988.
- [10] Bennett G R, Smith I C, Shores J E, et al. 2-20 ns interframe time 2-frame 6.151 keV x-ray imaging on the recently upgraded Z accelerator; a progress report [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 914-916.
- [11] Sinars D B, Cuneo M E, Bennett G R, et al. Monochromatic x-ray backlighting of wire-array z-pinch plasmas using spherically bent quartz crystals [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 2202-2206.
- [12] Pisani F, Koenig M, Batani D, et al. Toroidal crystal spectrometer for time-resolved x-ray absorption diagnostic in dense plasmas [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(8): 3314-3318.
- [13] Tanabe M, Fujiwara T, Fujioka S, et al. Monochromatic x-ray sampling streak imager for fast-ignitor plasma observation [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 908-910.
- [14] Fujita K, Nishimura H, Niki I, et al. Monochromatic x-ray imaging with bent crystals for laser fusion research [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 744-747.
- [15] 施军, 肖沙里, 王洪建, 等. 球面弯晶分析器研制[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(4): 397-400.
- SHI Jun, XIAO Shali, WANG Hongjian, et al. Research and development of a spherical bent crystal analyzer [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(4): 397-400.
- [16] Xiao S L, Wang H J, Shi J, et al. High resolution x-ray spherically bent crystal spectrometer for laser-produced plasma diagnostics [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(1): 92-94.
- (编辑 陈移峰)