

基于石英球面弯曲晶体的 X 射线成像研究

刘利锋¹ 肖沙里¹ 毋玉芬¹ 钱家渝¹ 施 军¹ 刘慎业² 韦敏习² 陈伯伦²

(¹重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)
(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 为了诊断惯性约束聚变的聚爆靶的尺寸、形状、分布和均匀性等情况, 利用 X 射线布拉格衍射理论, 搭建了基于球面弯曲晶体的 X 射线背光成像系统。其核心元件是 α -石英球面弯晶, α -石英晶体性质稳定, 结构完整, 反射率和分辨率高。弯曲晶体尺寸为 65 mm \times 20 mm, 弯曲半径为 143.3 mm。利用该背光成像系统进行了单色 X 射线背光成像实验。成像物体为 3 \times 3 阵列的正方形不锈钢网格, 利用接收装置磷屏成像板, 得到清晰的 Cr K α X 射线背光源二维空间分辨, 在 9.6 mm \times 28.7 mm 的视场范围内, 其像的空间分辨率大约为 83.3 μ m。实验结果表明 α -石英球面弯曲晶体适合于 X 射线的背光诊断研究。

关键词 光谱学; 等离子体诊断学; 球面弯曲晶体; X 射线成像; 空间分辨率

中图分类号 O434.13; TH744 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.0815001

Study of X-Ray Backlight Imaging Based on Spherically Bent Quartz Crystal

Liu Lifeng¹ Xiao Shali¹ Wu Yufen¹ Qian Jiayu¹ Shi Jun¹ Liu Shenye²
Wei Minxi² Chen Bolun²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to diagnose the distribution, stability, dimensions and plasma uniformity of pellet implosion in the inertial confinement fusion (ICF), an X-ray backlight imaging system based on spherically bent crystal has been set up using the X-ray Bragg diffraction theory. The primary component of the imaging system is the spherically bent α -quartz crystal which has characteristics of stability, complete structure, high reflectivity and resolution. The crystal dimension is 65 mm \times 20 mm and the curvature radius is 143.3 mm. Monochromatic X-ray backlight imaging experiment using the imaging system has been carried out. In the experiment, the object is a 3 \times 3 array square stainless steel grid. It obtains two-dimensional monochromatic X-ray backlight image of chrome in imaging plane. The X-ray backlight imaging system based on spherically bent crystal provides an approximate 83.3 μ m spatial resolution and a 9.6 mm \times 28.7 mm field of views. It is demonstrated that this backlight imaging system could be used for monochromatic X-ray backlighting imaging diagnosis.

Key words spectroscopy; plasma diagnostics; spherically bent crystal; X-ray imaging; spatial resolution

OCIS codes 300.6560; 280.5395; 340.7440; 330.6130

1 引 言

在惯性约束核聚变 (ICF) 中, 聚爆反应过程中

产生大量等离子体 X 射线, X 射线的连续谱和线谱都包含着等离子体参量和聚爆过程的大量信息^[1],

收稿日期: 2011-03-22; 收到修改稿日期: 2011-04-15

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金(10976033)、国家自然科学基金(11075226)和中央高校基本科研业务费(CDJXS11122219)资助课题。

作者简介: 刘利锋(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事 X 射线探测方面的研究。E-mail: liulf1305@yahoo.cn

导师简介: 肖沙里(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测和 X 射线探测等方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

包括等离子体温度、密度、离化度和各种输运特征等状态参数^[2~5]。因此,对高温等离子体 X 射线进行诊断是 ICF 诊断中极其重要的。此外,X 射线诊断是一种被动式诊断,不会对被测等离子体产生干扰;而且 X 射线光谱的发射强度与等离子体的离化度、能级布居数等有直接的关系。

球面弯曲晶体成像是 X 射线诊断的一种重要方法,不仅可以得到 ICF 聚爆过程中聚爆靶发射的 X 射线能谱信息^[6,7],也可得到 X 射线二维空间分辨信息^[8,9],用于研究聚爆靶等离子体的形状、分布和均匀性等。此成像系统的核心元件是衍射晶体,而三方晶系 α -石英晶体物理性质和化学性质稳定,晶体结构较完整,含孪晶、空穴、夹杂较少。晶体的自身结构决定其存在各向异性,其主要的物理性质(如压电性、导电弹性和温度特性等)在不同方向上均存在较大差异,不同切向的晶体有不同的晶面间距,可以适合不同能量的 X 射线。此外, α -石英晶体反射率和空间分辨率都较高。美国圣迪亚国家实验室 D. B. Sinars 等^[10,11]分别利用 α -石英球面弯曲晶体(1011)和(2023),在电流 20 MA,上升时间 100 ns 的脉冲能量驱动的 Z 箍缩上得到 SiHe α (1.865 keV)和 MnHe α (6.15 keV)背光源的二维空间分辨,在 5 mm \times 20 mm 的视场(FOV)范围,得到了像的空间分辨率为 5~10 μ m。此外,还利用 α -石英球面弯曲晶体对等离子体 Si 的 X 射线单色成像,得到高空间分辨率(9~10 μ m)和小于 0.5 eV 的窄光谱带宽。

本文利用晶体布拉格衍射原理搭建的球面弯晶背光成像系统,核心元件也是 α -石英晶体,弯晶尺寸为 65 mm \times 20 mm,弯曲半径为 143.3 mm。利用该系统对光子能量为 5.4 keV 铬靶进行了 X 射线背光成像实验,磷屏成像板(IP)在弧矢面得到放大率约 2 倍的清晰铬靶单色 X 射线二维物体聚焦成像。

2 球面弯曲晶体的 X 射线背光成像

2.1 球面弯曲晶体背光成像原理

球面弯曲晶体背光成像主要是基于如下特性:

1) 晶体 X 射线布拉格衍射特性。当 X 射线满足

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

布拉格条件时,会被晶体反射^[12]。式中 λ 为入射 X 射线波长, d 为晶面间的距离, θ 为布拉格角, n 为反射级次。

2) 球面弯晶背光成像的“罗兰圆”几何结构特性。罗兰圆直径与弯曲晶体的弯曲半径相等,放置

罗兰圆上某一点的光源发出的射线照射到球面弯曲晶体上,满足晶体布拉格衍射后,在罗兰圆上另一侧相应对称点聚焦,球面弯晶成像如图 1 所示。其中光源到物体的距离是 a ,光源到球面晶体的距离是 p ,球面晶体到子午面焦点的距离是 q_m ,球面晶体到弧矢面焦点的距离是 q_s 。球面晶体的弯曲半径是 R 。在子午面上(即罗兰圆平面),球面弯晶与约翰光谱仪一样,按晶体布拉格衍射条件将 X 射线沿罗兰圆散开;在弧矢平面上(即垂直于罗兰圆平面),弯曲晶体如一聚光镜将 X 射线聚焦在此平面上。球面弯曲晶体在子午面上探测得到光谱信息,而在弧矢面上得到等离子体 X 射线的空间分辨信息^[13]。图中 X 射线源为箍缩聚爆或激光轰击金属靶产生的等离子体点光源,成像物体可以为箍缩靶或激光聚爆靶,也可以是其他需要研究的生物大分子等。

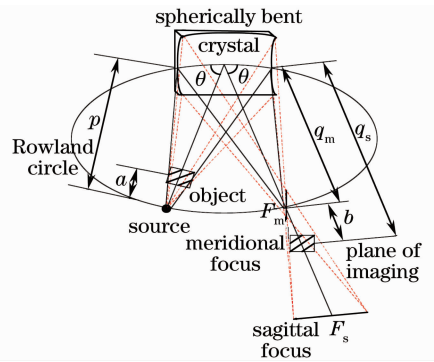


图 1 球面弯晶背光成像图

Fig. 1 Backlight image of spherically bent crystal

2.2 背光成像的重要成像参数

基于球面弯晶的背光成像系统,主要考查的成像参数有放大率、FOV 和空间分辨率等。利用球面镜原理,系统在子午面和弧矢面上分别可以得到

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

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2\sin\theta}{R}. \quad (3)$$

系统中最佳成像是指子午面和弧矢面两个方向的放大率相同,即 $M_m = M_s$,所成像不失真并且与物体本身具有相同的纵横比。如果探测器放置在距离子午面焦距为 b 的位置,可以得到最佳成像,那么距离 b 为^[13]

$$b = \frac{q_s q_m - q_m^2}{q_s + q_m}. \quad (4)$$

成像位置确定后,成像系统在子午面上的放大率为^[14]

$$M_m = \frac{p}{q_m} \frac{b}{a}, \quad (5)$$

同样在弧矢面上的放大率为

$$M_s = \frac{p}{q_s} \frac{q_s - (q_m + b)}{a} \quad (6)$$

此外,利用文献[15]光路映射形式,可以得到球面弯晶背光成像系统在子午和弧矢方向估算的空间分辨率。在弧矢面方向,空间分辨率约为^[11]

$$\sigma = \frac{L_s(M+1)(1-\sin\theta)}{M} \quad (7)$$

式中 L_s 为球面晶体上的孔径, M 为成像系统放大率。收集立体角 Ω 一般决定孔径的大小,而收集立体角 Ω 为

$$\Omega = \frac{(\pi/4)\Delta x}{a} \quad (8)$$

式中 Δx 为 X 射线光源的直径,在球面弯曲晶体背光成像中,可以得到孔径

$$L_s = \frac{\Delta x(p-a)}{a} \quad (9)$$

式中距离 $p-a$ 为物体到球面晶体的距离。(7)式所得的空间分辨率只是一个近似估算值,而实际得到的空间分辨率则高于估算的空间分辨率^[11]。同样在背光成像系统中,FOV 为

$$V_{\text{FOV}} = L_{\text{crystal}}(a/p) \quad (10)$$

式中 L_{crystal} 是子午面或弧矢面的晶体长度。背光成像系统中,空间分辨率取决于光源尺寸的大小,如果 Δx 减小,那么空间分辨率将增加,同时立体角也相应地减小,成像系统的系统效率将降低。与其他成像系统不同,自发光的背光成像系统,FOV 只是由镜面成像孔径和探测器的尺寸大小来决定的^[11]。

3 X 射线背光成像实验与分析

3.1 X 射线背光成像实验

X 射线源是高功率 X 射线管,光源尺寸为 $500 \mu\text{m}$,靶材为 Cr ($K\alpha$ 辐射线中心波长为 0.22897 nm);成像系统核心原件为 α -石英球面弯曲晶体 ($2d=0.2749 \text{ mm}$),球面弯晶晶体由色散元件和底座组成,色散元件为厚度 0.25 mm 的 α -石英球面晶体;三坐标测量仪测得底座弯曲半径为 143.3 mm ;利用凹凸折弯机对晶体进行塑性弯曲,弯曲后的晶体粘贴在弯曲底座上^[16];弯晶尺寸为 $65 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,弯曲半径为 143.3 mm ;成像物体不锈钢网格为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的 3×3 阵列;接收装置为磷屏 IP。根据成像光路的校准要求,X 射线源、球面弯曲晶体中心与 IP 的中心需要保持在一个平面上。背光成像实验装置如图 2 所示。实验中要满足晶体布拉格衍射条件, α -石英球面弯晶放置在

与靶点到晶体中心线成 56.4° 角的位置。光源 X 射线管到成像物体网格的距离为 92 mm ,到晶体中心距离为 192 mm ,晶体中心到 IP 距离为 300 mm 。最后,X 射线管发出的 X 射线经过 α -石英球面弯晶衍射后,IP 得到清晰的单色 X 射线背光成像,如图 3 所示。

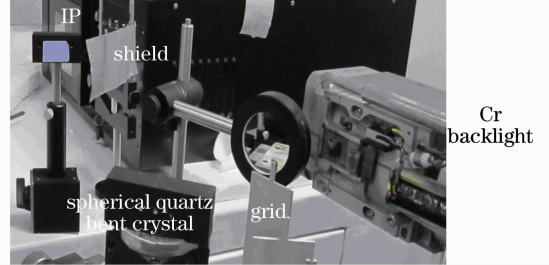


图 2 背光成像系统实验装置

Fig. 2 Experimental setup of backlight imaging system

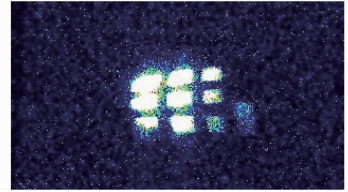


图 3 Cr 靶 X 射线二维背光成像

Fig. 3 Two-dimensional X-ray backlight image of Cr target

3.2 实验结果与分析

在 IP 得到的背光成像如图 3 所示,左边第一排变形比较厉害。网格放置、IP 放置、球面弯曲晶面型和弯曲晶体放置等都可能引起成像变形。网格放置位置没有垂直光路方向,而是有些向右倾斜,导致光源发出的 X 射线经过网格映射到晶体中心的像已经出现了变形;也可能是网格放置没有问题,IP 放置出现了问题,光路对中时只是要求 IP 中心是否在同一平面,而忽略了 IP 放置。由于 IP 放置出现偏差,成像的光程差就出现偏差,导致成像变形;网格和 IP 放置都没有问题,而球面晶体的面型畸变或弯曲晶体放置轻微俯仰导致光路方向偏离晶体中心,也可能出现成像的变形。

此外,利用相关软件对所得单色 X 射线背光图像进行数据处理,得到沿弧矢方向单色 X 射线谱线相对强度与像素点位置的相应关系,如图 4 所示。同时,也得到了 X 射线谱线相对强度与沿子午面和弧矢面二维像素点位置的相应关系,如图 5 所示。

在背光成像实验中,IP 没有放置在最佳成像位置 b ,根据背光成像实验中的各个参数,如源到晶体距离 p ,不锈钢网格的位置 a 及入射布拉格角 θ 等,

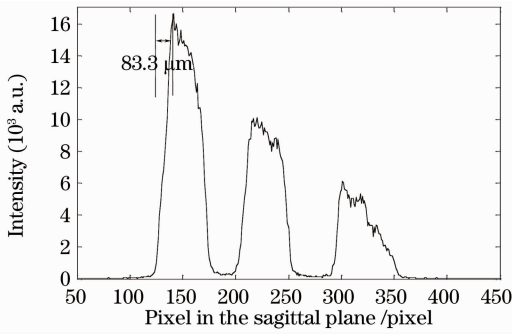


图4 弧矢方向谱线强度与像素点的相应分布
Fig. 4 Distribution of spectral intensity and pixel in the sagittal plane

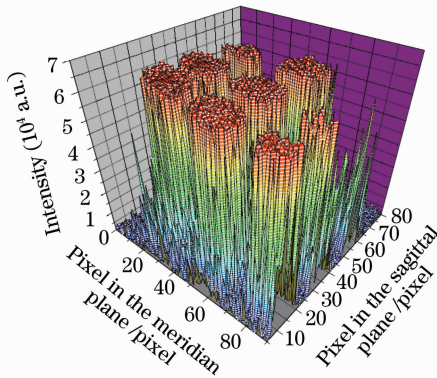


图5 谱线强度与子午和弧矢面二维像素点的相应分布
Fig. 5 Distribution of spectral intensity and pixel in the meridian and sagittal plane

利用成像系统放大率(5),(6)式,得到子午平面和弧矢面两个方向的放大率 $M_m = 4.7, M_s = 1.8$ 。所以得到的二维成像在子午方向变形比较厉害。此外,成像系统中,X射线管的光源尺寸约为 $500 \mu\text{m}$,核心器件石英球面弯晶的尺寸为 $65 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,成像网格到球面弯曲晶体的距离为 100 mm ,根据(8)~(10)式,可以得到背光成像的FOV和收集立体角等参数,如表1所示。空间分辨率通常可以用单位长度内包含可分辨的黑白“线对”数表示(lp/mm),也可以用线源伸展函数的上升沿半峰全宽(FWHM)来表示。工程上可利用背光成像实验所得成像上升沿FWHM来估算背光成像系统成像的空间分辨率。根据对图4的分析,弧矢方向光谱的上升沿FWHM约为6 pixel,而IP的每个像素固有大小(尺寸)为 $25 \mu\text{m}$ 。由背光成像光路及系统放大率等关系,得到背光成像的空间分辨率约为 $83.3 \mu\text{m}$ 。但是利用空间分辨率估算公式(7)式,得到成像的空间分辨率约为 $93 \mu\text{m}$ 。空间分辨率之间的误差为 $9.7 \mu\text{m}$,误差率约为10%,说明实际的空间分辨率确实高于估算的空间分辨率。实验结果表

明,基于 α -石英球面弯晶的背光成像系统可以应用于ICF的X射线背光诊断。

表1 背光成像系统的成像参数

Imaging parameters	Backlight imaging system
System magnification	$M_m = 4.7, M_s = 1.8$
Field of views / mm^2	9.6×28.7
Spatial resolution / μm	83.3
Collection solid angle /sr	0.0039

4 结 论

利用 α -石英球面弯晶搭建了X射线背光成像系统,与针孔成像系统(收光立体角小)和掠入射成像系统(安装调试复杂)等其他成像系统相比,具有单色性好、成像效率高以及较大的FOV和较高的空间分辨率等优点,而且安装使用方便。系统不仅可以得到X射线一维能谱信息,也可得到X射线二维空间分辨信息,用于研究判断聚爆靶聚变材料等离子体的形状、分布和均匀性等。利用背光成像系统进行了Cr靶X射线背光成像实验,得到清晰的Cr $K\alpha$ X射线背光源二维空间分辨,在 $9.6 \text{ mm} \times 28.7 \text{ mm}$ 的FOV范围,得到空间分辨率为 $83.3 \mu\text{m}$,能够满足X射线背光诊断的应用要求。但是现有X射线源装置所得背光成像存在变形,且导致成像变形的原因很多,这是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- Wang Ganchang, Yuan Zhishang. Inertial Confinement Fusion [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2005. 188~199
- 王淦昌,袁之尚. 惯性约束核聚变[M]. 北京:原子能出版社, 2005. 188~199
- O. N. Rosmeja, J. Wiesera, M. Geissela *et al.*. X-ray spectromicroscopy of fast heavy ions and target radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2002, **495**(8): 29~39
- S. Sorge, A. Wiering, G. Roepke *et al.*. Diagnostics of a laser-induced dense plasma by hydrogen-like carbon spectra[J]. *Phys. B.*, 2000, **33**(16): 2983~3000
- S. P. Regan, J. A. Delettrez, P. A. Jaanimagi *et al.*. Characterization of direct-drive-implosion core conditions on OMEGA with time-resolved Ar K-shell spectroscopy[R]/L. L. E. Review Quarterly Report. University of Rochester, 2001
- M. Bitter, K. W. Hill, B. Stratton *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles (invited) [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2004, **75**(10): 3660~3665
- Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. X-ray polarization spectrum diagnosis of laser-produced plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1710~1713
- 王洪建,肖沙里,施军等. 激光等离子体X射线极化光谱诊断[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1710~1713
- Shali Xiao, Hongjian Wang, Jun Shi *et al.*. High resolution X-ray spherically bent crystal spectrometer for laser-produced

- plasma diagnostics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 92~94
- 8 B. A. Hammel, C. J. Keane, M. D. Cable *et al.*. X-ray spectroscopic measurements of high densities and temperatures from indirectly driven inertial confinement fusion capsules[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(9): 1263~1266
- 9 G. R. Bennett, D. B. Sinars, D. F. Wenger *et al.*. High-brightness, high-spatial-resolution, 6.151 keV X-ray imaging of inertial confinement fusion capsule implosion and complex hydrodynamics experiments on Sandia's Z accelerator (invited) [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2006, **77**(10): 10E322
- 10 D. B. Sinars, G. R. Bennett, D. F. Wenger *et al.*. Monochromatic X-ray imaging experiments on the Sandia national laboratories Z facility (invited) [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2004, **75**(10): 3672~3677
- 11 D. B. Sinars, G. R. Bennett, D. F. Wenger *et al.*. Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(19): 4059~4071
- 12 D. C. Turner, L. V. Knight, A. R. Mena *et al.*. Focusing crystal von Hamos spectrometers for XRF applications [J]. *Advances in X-ray Analysis*, 2001, **44**: 329~335
- 13 L. Journal, L. E. Khoury, T. Marin *et al.*. Performances of a bent-crystal spectrometer adapted to resonant X-ray emission measurements on gas-phase samples[J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2009, **80**(9): 093105
- 14 F. Flora, S. Bollanti, A. Lai *et al.*. A novel portable, high-luminosity monochromatically tuneable X-ray microscope [C]. *SPIE*, 2001, **4504**: 240~252
- 15 T. Harada, T. Kita. Mechanically ruled aberration corrected concave gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1980, **19**(23): 3987~3993
- 16 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptical crystal spectrometer researched for Z-pinch plasma X-ray by using Au-wire arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 685~688
王洪建, 肖沙里, 施 军等. 金丝 Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 685~688