

文章编号 1004-924X(2011)09-2023-06

球面弯曲晶体在 X 射线背光成像的应用

刘利锋^{1*}, 肖沙里¹, 毋玉芬¹, 钱家渝¹, 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:基于 X 射线布喇格衍射理论, 研制了球面弯曲晶体分析器, 用于研究和诊断惯性约束聚变的聚爆靶等离子体的形状、分布及稳定性。分析器的核心器件是石英球面弯晶, 弯曲晶体半径为 143.3 mm。首次利用石英球面弯曲晶体进行了单色 X 射线背光成像实验。采用接收面积为 40 mm×30 mm 的磷屏成像板作为接收装置, 得到了清晰的铬靶单色 X 射线二维背光聚焦成像。对所得实验弧矢方向区域谱线的分析显示, 石英球面弯曲晶体得到的 X 射线背光成像的空间分辨率约为 83.3 μm。实验结果表明该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; 球面弯曲晶体; X 射线成像; 空间分辨率

中图分类号: O434.13; TL65 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111909.2023

Application of spherically bent crystal to X-ray backlight imaging experiment

LIU Li-feng^{1*}, XIAO Sha-li¹, WU Yu-fen¹, QIAN Jia-yu¹, WEI Min-xi², CHEN Bo-lun²

(1. *Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of the Ministry of Education of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)*

* *Corresponding author, E-mail: liulf1305@yahoo.com*

Abstract: A novel spherically bent crystal analyzer was developed based on the X-ray Bragg diffraction theory to study and diagnose the distribution, stability and the shape of a plasma of pellet implosion in the Inertial Confinement Fusion (ICF). The key component of the crystal analyzer is a spherically bent α -quartz crystal with a radius of 143.3 mm. The spherically bent α -quartz crystal was used to carried out a monochromatic X-ray backlighting imaging experiment in the Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics(CAEP). The clear two-dimensional monochrome X-ray backlighting image of a chrome target was obtained on an imaging plane of 40 mm×30 mm. By analyzing the spectral information of a sagittal direction in the experiment, it is demonstrated that the spherically bent α -quartz crystal shows his spatial resolution to be 83.3 μm and it could be used for

收稿日期: 2011-01-31; 修订日期: 2011-03-08.

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资助项目(No. 10976033); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. CDJXS11122219)

research of the monochromatic X-ray backlighting imaging.

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

1 引言

激光约束聚变和箍缩聚爆过程都会产生大量等离子体 X 射线, X 射线中含有丰富的信息^[1-5]。要真实了解高温等离子体内部的状态及各种过程, 对高温等离子体 X 射线进行成像诊断具有重要意义。常用的 X 射线针孔成像收光立体角小, 对低通量 X 光辐射成像效果不好, 掠入射反射装置如 Wolter 显微镜、K-B 显微镜可以提高收光效率, 获得高分辨率和高信噪比, 但这类装置调配安装难度较大, 而且使用成本高。随着晶体生长工艺和微纳米精密技术迅速发展, 二维聚焦晶体成像已经广泛应用于惯性约束聚变(ICF)的 X 射线诊断, 该项技术具有单色性好、成像效率高以及较大的视场和较高的空间分辨力等优点, 而且安装使用也方便。弯曲晶体成像能够获得激光约束聚变和箍缩聚爆过程中聚爆靶发射的 X 射线二维空间分辨信息^[6-7], 既可用于 X 射线能谱诊断^[8-10], 也可显示出等离子体的形状和分布情况。通过对不同时间段的成像分析, 能够进行等离子体稳定性研究。这是一种针对低能 X 射线的重要背光成像诊断方法。

球面弯晶成像主要是利用 X 射线衍射效应来实现 X 射线二维聚焦成像。Uschmann 等利用 Si 和 Ge 的双曲面晶体阵列组合得到了 Ar 等离子体 ArLy_β 和 ArHe_β 辐射 X 射线的二维成像^[11]。Aglitskiy 等利用球面晶体在美国海军实验室 Nike 激光装置上使用 SiHe_α X 射线源得到了 CH 平面靶背光成像, 在数个毫米的视场中得到 2~3 μm 像空间分辨率^[12-13]。本文研制的球面弯晶分析器, 主要由 α-石英晶体(2*d*=0.2749 nm)和晶体底座组成, 球面弯曲半径为 143.3 mm。作者在中国工程物理研究院激光聚变研究中心首次进行了光子能量为 5.4 keV Cr 靶的单色 X 射线背光成像实验, 接收装置磷屏 IP 成像板得到了清晰的 X 射线二维成像。

2 背光成像的理论

球面弯曲晶体背光成像系统利用晶体 X 射线布喇格衍射特性。当 X 射线以 θ 角方向射入晶体, 晶面间衍射线的光程差为 X 射线波长的整数倍时, 相邻晶面的衍射线之间相互干涉, 衍射线可看成是晶面按照反射定律对入射线反射。所以当 X 射线满足下面布喇格条件时才被晶体反射^[14]:

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

式中 λ 为入射 X 射线波长, d 为晶面间的距离, θ 为布喇格角, n 为反射级次。

此外, 球面弯晶背光成像原理主要利用“罗兰圆”的结构。罗兰圆直径与晶体的弯曲半径相等, 来自罗兰圆上的 X 射线源发射出 X 射线经过球面弯曲晶体, 满足晶体布喇格衍射后仍在罗兰环上另一侧相应处聚焦。罗兰圆平面即子午平面, 所有器件按约翰光谱摄制仪原理工作, 由布喇格条件将 X 射线沿罗兰圆散开。在垂直罗兰圆平面即弧矢面上, 弯曲晶体如一凹面镜将 X 射线聚焦在此平面上(见图 1)。球面弯曲晶体可同时在子午面上探测光谱信息, 而在弧矢面上可得到等离子体的空间信息^[15]。

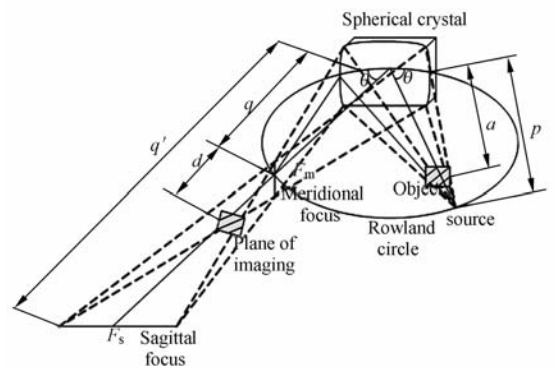


图 1 球面弯晶背光成像原理

Fig. 1 Backlight imaging principle of spherically bent crystal

图 1 中 p 为光源到球面晶体的距离, q 为球面晶体到子午面焦点的距离, q' 为球面晶体到弧矢面焦点的距离, θ 为 X 射线布喇格角, R 为球面晶体的弯曲半径。

物体放置在光源到球面晶体的光路中, 到球

面晶体的距离是 a 。那么 a 满足:

$$\frac{R}{2} \sin \theta < a < R \sin \theta, \quad (2)$$

在子午平面和弧矢面上分别可以得到^[3]:

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

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q'} = \frac{2 \sin \theta}{R}. \quad (4)$$

当 X 射线源在罗兰圆上时,子午面的聚焦点也在罗兰圆上,那么:

$$p = q = R \sin \theta, \quad (5)$$

同样,弧矢面的聚焦点为:

$$q' = -\frac{R \sin \theta}{\cos 2\theta}. \quad (6)$$

式(6)中,对于弧矢面聚焦点,要想 X 射线在焦点处聚焦就必须满足, $\theta > 45^\circ$ 。如果 $\theta < 45^\circ$,弧矢面的 X 射线在焦点处发散;如果 $\theta = 45^\circ$,弧矢面的 X 射线是平行出射不聚焦。

一般所得最佳成像是指子午面和弧矢面两个方向的放大率相同 ($M_m = M_s$),所成像不失真并且与物体本身具有相同的纵横比。如果探测器置于距离子午面焦距为 d 处,可以得到最佳成像,那么距离 d 为^[15]:

$$d = \frac{q'q - q^2}{q' + q}, \quad (7)$$

子午面上的放大率为^[16]:

$$M_m = \frac{p}{q} \frac{d}{(p-a)}, \quad (8)$$

同样在弧矢面上的放大率为:

$$M_s = \frac{p q' - (q+d)}{q' (p-a)}. \quad (9)$$

此外,可以得到球面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^[4]:

$$\sigma = \frac{L_s (M+1) (1 - \sin \theta)}{M}, \quad (10)$$

式中 L_s 为球面晶体上孔径, M 为成像系统放大率,收集立体角 Ω 一般决定孔径大小。在球面弯曲晶体背光成像中,可以得到孔径 L_s :

$$L_s = \frac{(\Delta x) a}{(p-a)}, \quad (11)$$

式中 Δx 为 X 射线源的尺寸,距离 a 为网格到晶体的距离, $p-a$ 为 X 射线源到网格的距离。由空间分辨率相关公式(10,11)可知,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,那么空间分辨率增大;此外,分辨率还受到成像系统的衍射极限和几何像差的限制。上面所得到的空间分辨率只是一个近似估算值,而实际测得的空间分辨率要高于理论估算的空间分辨率^[4]。

3 单色背光实验

3.1 X 射线背光成像实验

X 射线单色背光成像实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心进行的。本次实验中所用的 X 射线源是经过改装的高功率 X 射线管,靶材是 Cr; X 射线的光源尺寸约为 $500 \mu\text{m}$; 焦点尺寸为 $1 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。提供给射线管的电压为 20 kV, 电流为 30 mA, 曝光时间为 5 min。球面弯晶分析器的色散元件为厚度 0.25 mm 的 α -石英球面晶体, 弯曲半径为 143.3 mm; 根据晶体布喇格衍射条件, 球面弯晶分析器放置在与靶点到晶体中心线成 56.4° 的位置。成像物体不锈钢网格为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的 3×3 阵列。采用接收面积 $40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 的 IP 成像板作为接收装置。经过光路的瞄准对中调整, X 射线源、球面弯晶中心与接收装置的中心保持在一个平面。背光成像如图 2 所示。

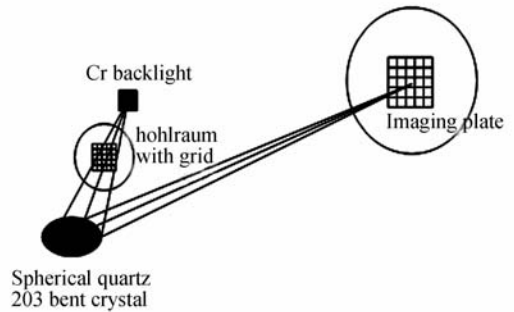


图2 实验中简易球面弯晶背光成像

Fig. 2 Backlight imaging of spherically bent crystal in this experiment

网格到晶体中心的距离为 92 mm,光源到晶体中心距离为 192 mm,晶体中心到 IP 成像板距离为 300 mm。最后,Cr 靶发射出的 X 射线经过 α -石英球面弯晶衍射后,IP 成像板得到清晰 Cr 靶的 $K\alpha$ 辐射单色 X 射线聚焦网格成像,如图 3 所示。



图 3 Cr 靶 X 射线二维背光成像

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

3.2 实验结果与分析

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 及入射布喇格角 θ 等,得到子午平面和弧矢面的放大率,其放大率分别为: $M_m=4.7$, $M_s=1.8$ 。利用 Winview32 软件对所得 X 射线聚焦单色背光二维图像进行数据处理,得到沿弧矢方向的截面图。图 4 为弧矢方向 Cr 的 $K\alpha$ 辐射 X 射线谱线相对强度与像素点位置的相应关系。

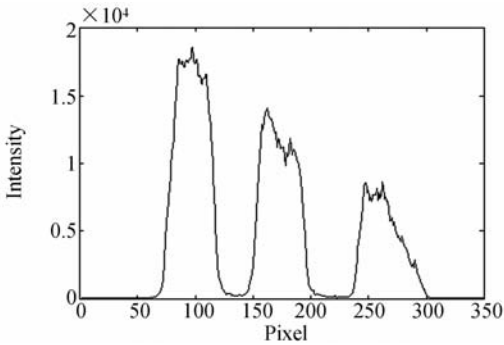


图 4 弧矢方向谱线强度与像素点相应分布

Fig. 4 Distribution of spectral intensity and pixel in the sagittal direction

评价一个成像系统最重要的参数,就是成像的空间分辨率,即两个相距很近的点源刚好能被分辨开时的两点源之间的距离。通常可以用单位

长度内包含可分辨的黑白“线对”数表示(l/mm);也可以用线源伸展函数的上升沿半高宽(FWHM)来表示。国外球面弯曲晶体在很小的视场下空间分辨率已经达到 $3 \mu m^{[12]}$, 本文实验是首次验证自主研发的 α -石英球面弯曲晶体,工程上可通过计算背光成像实验中所得网格成像上升沿半峰值全宽(FWHM)来估算 X 射线二维成像的空间分辨率。通过对图 4 的分析,得到弧矢方向物体成像的上升沿半峰值全宽(FWHM)约为 6 个像素,而探测器所用 IP 成像板的每个像素可分辨的固有大小(尺寸)为 $25 \mu m$ 。根据背光成像光路映射的对应关系和弧矢面的放大率,得到弧矢方向的 X 射线空间分辨率约为 $83.3 \mu m$,而本实验 Cr 靶射线源尺寸约为 $500 \mu m$ 。此外,利用弧矢方向空间分辨率估算公式,即式(10,11),得到弧矢方向的空间分辨率约为 $93 \mu m$,其实际所得的空间分辨率高于估算空间分辨率。实验结果表明, α -球面弯曲晶体得到的空间分辨率可以应用于 X 射线背光诊断。

4 结 论

利用球面弯曲晶体器件获取 X 射线的单色二维成像信息,是判断激光约束聚变和箍缩聚爆过程聚爆靶丸等离子体的形状和分布情况的一种重要的 X 射线背光诊断方法。本文进行了首次单色 X 射线背光成像实验,IP 成像板获得清晰的 X 射线二维聚焦网格成像。Cr 靶的光源尺寸约为 $500 \mu m$,通过对所得二维网格成像弧矢方向谱线的分析,石英球面弯晶得到 Cr 的 X 射线的空间分辨率约为 $83.3 \mu m$ 。在实际激光约束聚变装置中,靶丸大小约为 $200 \mu m$,石英球面弯晶可达到的空间分辨率估计约为 $30 \sim 35 \mu m$,可以达到 X 射线背光诊断的实际应用要求。

参考文献:

[1] SORGE S, WIERTING A, ROEPKE G, et al.. Diagnostics of a laser-induced dense plasma by hydrogen-like carbon spectra[J]. *Phys B.*, 2000, 33 (16):2983-3000.

[2] ROSMEJA O N, WIESERA J, GEISSELA M, 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.

[3] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, et al.. Monochromatic x-ray imaging experiments on the Sandia National Laboratories Z facility (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10):3672-3677.

- [4] SINARS D B, BENNETT G R, WENGER D F, *et al.*. Evaluation of bent-crystal X-ray backlighting and microscopy techniques for the Sandia Z machine [J]. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 4059-4071.
- [5] BITTER M, HILL K W, STRATTON B, *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75 (10): 3660-3665.
- [6] HAMMEL B A, KEANE C J, CABLE M D, *et al.*. X-ray spectroscopic measurements of high densities and temperatures from indirectly driven inertial confinement fusion capsules [J]. *Physical Review Letter*, 1993, 70(9): 1263-1266.
- [7] BENNETT G R, SINARS D B, WENGER D F, *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]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77 (10): 10E322-1-10E322-8.
- [8] 施军, 肖沙里, 王洪建, 等. 氩气 Z 箍缩内爆等离子体温度诊断 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 1819-1824.
- SHI J, XIAO SH L, WANG H J, *et al.*. Argon-puff Z-pinch implosion plasma temperature diagnosis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1819-1824. (in Chinese)
- [9] 王瑞荣, 陈伟氏. 椭圆型晶体谱仪谱测量的解谱 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 274-279.
- WANG R R, CHEN W M. Unfolded study on spectra by elliptical crystal spectrometer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 274-279. (in Chinese)
- [10] 王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 激光等离子体 X 射线极化光谱研究 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(5): 822-826.
- WANG H J, XIAO SH L, SHI J, *et al.*. X-ray polarization spectroscopy in laser-produced plasmas [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 822-826. (in Chinese)
- [11] USCHMANN I, FUJITA K, NIKI I, *et al.*. Time-resolved ten-channel monochromatic imaging of inertial confinement fusion plasmas [J]. *Applied Optics*, 2000, 39(31): 5865-5871.
- [12] AGLITSKIY Y, LEHECKA T, OBENSCHAIN S, *et al.*. High-resolution monochromatic x-ray imaging system based on spherically bent crystals [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5253-5261.
- [13] AGLITSKIY Y, LEHECKA T, OBENSCHAIN S, *et al.*. X-ray crystal imagers for inertial confinement fusion experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 530-535.
- [14] TURNER D C, KNIGHT L V, MENA A R, *et al.*. Focusing crystal von hamos spectrometers for XRF applications [J]. *Advances in X-ray analysis*, 2001, 44: 329-335.
- [15] JOURNAL L, KHOURY L E, MARIN T, *et al.*. Performances of a bent-crystal spectrometer adapted to resonant x-ray emission measurements on gas-phase samples [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80(09): 093105-1-093105-6.
- [16] FLORA F, BOLLANTI S, LAI A, *et al.*. A novel portable, high-luminosity monochromatically tuneable X-ray microscope [J]. *SPIE*, 2001, 4504: 240-252.

作者简介:



刘利锋(1981—),男,山西忻州人,博士研究生,2009年于重庆大学获得硕士学位,主要从事 X 射线探测等方面的研究。E-mail:liulif1305@yahoo.cn



毋玉芬(1982—),女,河南焦作人,博士研究生,2008年于重庆大学获得硕士学位,主要从事 X 射线成像等方面的研究。E-mail:yoyuanff@yahoo.com.cn



钱家渝(1957—),男,重庆人,技师,主要从事仪器加工制作的研究。E-mail: qianjiayucqu@163.com



韦敏习(1980—),男,广西柳州人,研究实习员,2006年于中国工程物理研究院激光聚变研究中心获得硕士学位,主要从事晶体谱仪的研究。E-mail: wmx17@sina.com



陈伯伦(1979—),男,河北石家庄人,副研究员,2003年、2008年于中国科学技术大学分别获得学士、博士学位,主要从事弯曲晶体成像技术和 ICF 内爆物理学实验的研究。E-mail: blchen@mail.ustc.edu.cn

导师简介:



肖沙里(1953—),男,重庆人,教授,博士生导师,在重庆大学光电工程学院分别获得工学硕士、工学博士学位,主要从事光电探测、X射线探测等方面的研究。E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

● 下期预告

变焦跟踪曲线在对焦中的应用

罗 钧,孙 力,闵志盛

(重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400030)

提出了一种计算变焦跟踪曲线的策略。首先,采用基于 RAW 格式图像的梯度算子计算实时图像清晰度值;然后,拟合记录的变焦电机和对焦电机的位置关系,得到远物距端和近物距端的两条跟踪曲线,构成变焦跟踪曲线的上下边界;最后,将几何法和自适应法结合起来,应用获取的变焦跟踪曲线上下边界,计算得到系统所处物距下的跟踪曲线。在自主开发的变焦成像系统中采用梯度算子获取了变焦曲线的上下边界,并通过上述策略实现变焦跟踪,得到了变焦过程中的图像。实验结果表明,使用所述算法的变焦成像系统图像清晰度比只用自动对焦算法提高了 30% 以上,变焦跟踪曲线应用在对焦中能够提高变焦过程的图像对焦质量。