

doi: 10.3788/gzxb20174608.0811003

# 用于 X 射线诊断的晶体布喇格成像系统

刘利锋<sup>1</sup>, 肖沙里<sup>2</sup>, 钱家渝<sup>2</sup>

(1 山西大同大学 物理与电子科学学院, 山西 大同 037009)

(2 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 为了评估惯性约束聚变实验中激光辐射驱动的对称性和均匀性, 分析靶丸的运动过程, 设计一种新型诊断单色 X 射线的弯曲晶体布喇格成像系统, 该系统核心部件由色散元件球面弯曲晶体和探测装置组成. 利用光线追踪软件对该成像系统进行模拟验证, 并搭建了晶体布喇格成像系统进行 X 射线背光成像测试实验. 实验获得了清晰的 Cr 靶单色 X 射线背光二维网格信息, 石英球面晶体布喇格成像系统空间分辨率为 83  $\mu\text{m}$ , 表明该成像系统可以用于等离子体 X 射线的背光成像诊断.

**关键词:** 球面弯曲晶体; 布喇格成像; X 射线成像; 空间分辨率; 背光成像诊断

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0811003-5

## X-ray Backlighting Imaging Bragg Spectrometer for X-ray Diagnosis

LIU Li-feng<sup>1</sup>, XIAO Sha-li<sup>2</sup>, QIAN Jia-yu<sup>2</sup>

(1 School of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Shanxi Datong 037009, China)

(2 Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A novel X-ray backlighting imaging Bragg spectrometer was developed based on the Bragg diffraction theory to study and diagnose the driven symmetry and uniformity of laser radiation, analyse the promote layer motor process of target implosion of Inertial Confinement Fusion. The key component of the imaging system was the spherically bent Quartz Bragg crystal. The imaging simulation of the X-ray backlighting imaging Bragg spectrometer was studied with the ray tracing software SHADOW. The monochrome X-ray backlight imaging experiment using spherically bent Quartz Bragg crystal was used to carried out in the Chinese Academy of Engineering Physics. The imaging plate was obtained the two-dimensional, monochromatic backlight mesh imaging. By analyzing the imaging information of the experiment, the spatial resolution of the imaging Bragg spectrometer was 83  $\mu\text{m}$ . The experiment show that the imaging system was adequate for X-ray backlighting imaging diagnosis.

**Key words:** Spherically bent crystal; Bragg spectrometer; Backlighting imaging; Spatial resolution; Backlighting imaging diagnosis

**OCIS Codes:** 110.7440; 300.0300; 300.6360; 300.6560; 340.7440; 140.7240

## 0 引言

惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)过程中, 内爆中等离子体辐射的主要是 X 射线, 特征温度为 keV 量级. 为了研究惯性约束聚变过程, 需要了解内爆辐射高温等离子体内部的状态及相互作用过程, 就必须对高温等离子体中各种离子和电子的一些状态参数进行测量<sup>[1-3]</sup>. 辐射等离子体 X 射线中含有丰富的信息, 如温度梯度、密度梯度、电离分布等特征状态参数<sup>[4-6]</sup>. 所以, X 射线诊断是对 ICF 研究具有非常重

基金项目: 国家自然科学基金(No. 10976033)资助

第一作者: 刘利锋(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为 X 射线探测. Email: liulf1305@cqu.edu.cn

收稿日期: 2017-04-17; 录用日期: 2017-04-17

<http://www.photon.ac.cn>

要的意义。

目前, X 射线诊断主要技术有针孔成像、掠入射成像和球面晶体布喇格成像等。由于针孔成像容易受针孔的孔径等因素限制, 影响空间分辨率; 掠入射成像包括 K-B 成像, Wolter X 射线成像可以得到很高的空间分辨率, 但是系统调整难度大, 成像必须要掠入射; 而球面弯曲晶体布喇格成像效率高、具有较高的能谱分辨和空间分辨力, 它可以得到高温等离子体 X 射线能谱信息<sup>[7]</sup>, 用于激光等离子体 X 射线能谱诊断; 还可以得到 X 射线二维空间分辨信息<sup>[8]</sup>, 用于研究激光辐照靶丸过程及辐射对称性等。

本文根据晶体布喇格衍射理论, 研制了用于 X 射线成像诊断的新型晶体布喇格成像系统, 在中国工程物理研究院进行了单色 X 射线背光成像实验, 得到了清晰的铬靶单色 X 射线二维网格图像。

## 1 弯曲晶体布喇格成像原理

球面弯曲晶体布喇格成像主要基于晶体的 Bragg 衍射, 对于 X 射线衍射, 当光程差等于波长的整数倍时, 晶面的散射线将加强。只有满足 Bragg 衍射条件, X 射线会被晶体反射。

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

式中,  $\lambda$  是入射 X 射线波长,  $d$  是晶面距离,  $\theta$  是 Bragg 角,  $n$  是衍射级次。

球面弯曲晶体布喇格成像与柱面弯曲晶体成像结构相同, 满足“罗兰圆”特性, 罗兰圆直径与弯曲晶体的弯曲半径相等, 罗兰圆上的 X 射线源发出射线辐射到球面弯曲晶体, 满足 X 射线布喇格衍射, 在主要衍射面上(子午面)聚焦。与柱面晶体成像相比, 球面晶体是二维弯曲晶体, 可以得到二维的成像。在弧矢平面上(即垂直于子午面)如一聚光镜将 X 射线聚焦。球面弯曲晶体子午面焦点是  $F_m$ , 弧矢面焦点是  $F_s$ , 如图 1 所示。

子午面和弧矢面上的焦点分别满足<sup>[10]</sup>

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

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

式中,  $p$  是 X 射线源到球面晶体的距离;  $q_m$  是球面晶体到子午面焦点  $F_m$  的距离;  $q_s$  是球面晶体到弧矢面焦点  $F_s$  的距离;  $\theta$  是 X 射线布喇格角;  $R$  是球面晶体的弯曲半径。

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( $M_m = M_s$ ), 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  $d$  的地方, 可以得到最佳成像, 那么距离  $d$  为<sup>[11]</sup>

$$d = (q_s q_m - q_m^2) / (q_s + q_m) \quad (4)$$

子午面上成像的放大率为<sup>[12]</sup>

$$M_m = \frac{p}{q_m} \frac{d}{p - a} \quad (5)$$

同样弧矢面上的放大率为

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

当  $p = q = R\sin\theta$  时, 子午面放大率表示为

$$M_m = \cot^2\theta \frac{1}{1 - a/p} \quad (7)$$

式中,  $M_m$  是  $a/p$  和布喇格角  $\theta$  的函数。对于给定的布喇格角, 放大率取决于光源到成像物体距离  $a$ ; 如果物体位置固定(即  $a/p$  确定), 可以通过减小布喇格角来增大放大率。当  $p = q = R\sin\theta$  时, 根据式(4)可得, 成像

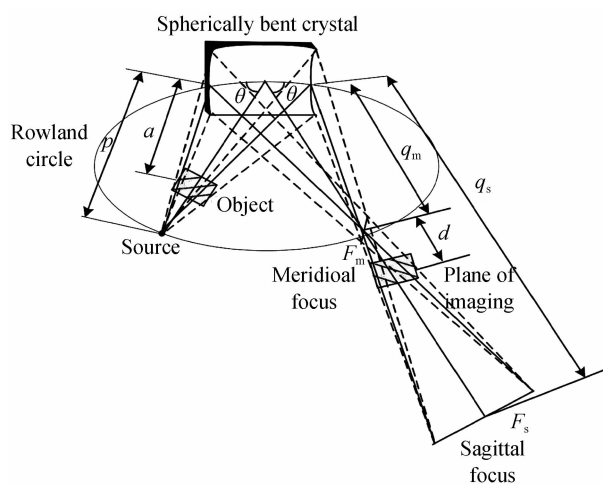


图 1 球面晶体布喇格成像原理

Fig. 1 Backlight imaging of spherically bent Bragg crystal

位置  $d$  不取决于物体的位置  $a$ , 而是取决于子午面和弧矢面的焦距  $q_m$  和  $q_s$ . 但是可以通过移动物体同时保持球面弯曲晶体和探测器位置固定, 来获得不同放大率<sup>[13]</sup>.

## 2 弯曲晶体布喇格成像系统的模拟

在几何光学中, 光线追踪可以用于描述光线经过透镜系统或者光学仪器后的传播过程, 并对成像光学系统进行建模, 可用于优化光学系统的设计. SHADOW 是用于光学系统的优化设计的一个光线追踪软件, 可模拟追踪光线在光学系统中光学元件传播的特性. 光线追踪 SHADOW 软件创建和运行产生的二进制文件, 辐射光束的二进制文件 `begin.dat`, 光学元件的二进制文件 `mirr.xx` 和成像二进制文件 `screen.xxyy` (`xx` 是光学元件, `yy` 是成像屏顺序). 其光学系统原理图如图 2 所示.

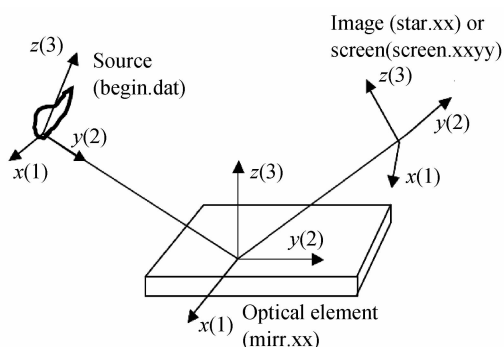


图 2 光学追踪软件的光学系统原理  
Fig. 2 The schematic diagram of the SHADOW

为了验证弯曲晶体布喇格成像系统, 利用模拟软件 SHADOW 对晶体布喇格成像进行模拟. 模拟过程中, 光源为各向同性辐射光; 球面弯曲晶体的 Bragg 角设置为  $57^\circ$ , 弯曲半径  $R$  为 200 mm. 成像满足“罗兰圆”结构, 光源到球面晶体的距离  $p$  和球面弯曲晶体到子午面聚焦点的距离  $q_m$  均为 167.7 mm; 球面晶体到弧矢面聚焦点距离  $q_s$  为 412.4 mm. 物体的最佳成像位置  $d$  为 70.74 mm. 当物体到弯曲晶体的距离  $a$  为 132 mm 时, 成像系统的子午面和弧矢面上放大率分别为  $M_m = M_s = 2$ . 成像物体设置为厚度为  $5 \mu\text{m}$ , 周期间隔为  $100 \mu\text{m}$  的网格阵列. 图 3 分别是成像物体和成像位置处, 得到的网格阵列的图像. 图 3(b) 是成像位置处得到的网格图像, 在子午和弧矢面两个方向上分别有 2 个完整的网格阵列, 与图 3(a) 网格面上得到的成像完全一致, 且两方向上网格分别约为  $10 \mu\text{m}$ , 是成像网格厚度的 2 倍. 所以, 光线追踪模拟结果完全符合理论的放大率.

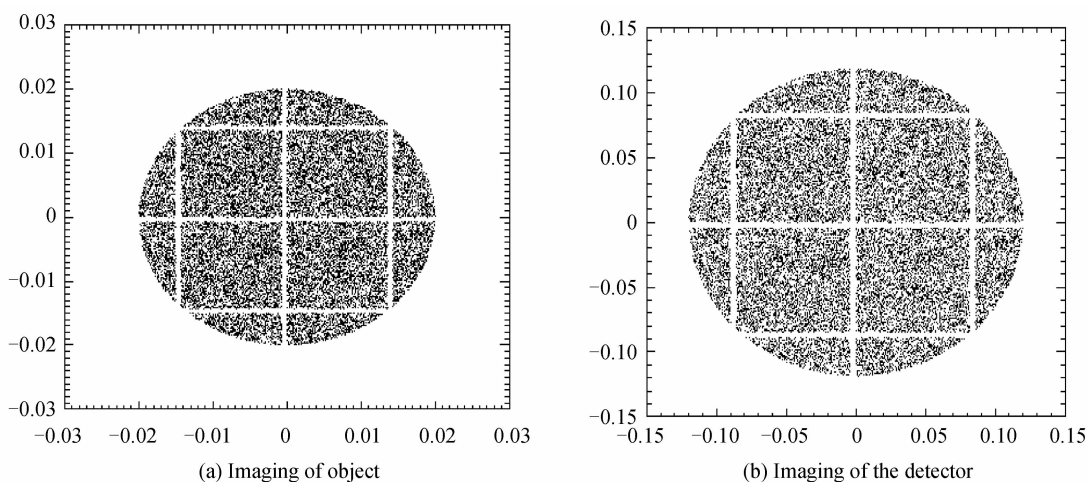


图 3 模拟结果

Fig. 3 The ray-tracing result for the imaging system

## 3 弯曲晶体布喇格成像实验结果与分析

### 3.1 晶体布喇格成像系统背光成像实验

为了测试晶体布喇格成像系统的空间分辨能力, 在中国工程物理研究院激光聚变研究中心进行了 X 射线背光成像实验, 实验系统见图 4. 实验中光源为 X 射线管, 靶材是 Cr, 靶的焦斑尺寸为  $500 \mu\text{m}$ ; 成像系统的核心色散元件是  $\alpha$ -石英(2023)球面弯曲晶体. 根据布喇格衍射条件, 石英球面弯曲晶体放置在与射线源窗口到弯曲晶体中心线成  $56.4^\circ$  角的位置. 成像物体为  $3 \times 3$  阵列不锈钢网格, 网格厚度为  $200 \mu\text{m}$ , 如图 5 所示. 接收装置为动态响应范围为  $10^5 \sim 10^6$  的 IP 成像板. 光源辐射出的 X 射线经过石英球面弯曲晶体衍射后, IP

成像板得到了清晰的 Cr K $\alpha$  X 射线二维网格图像,如图 6 所示.为了模拟激光装置靶腔内成像,成像实验参数设置见表 1.

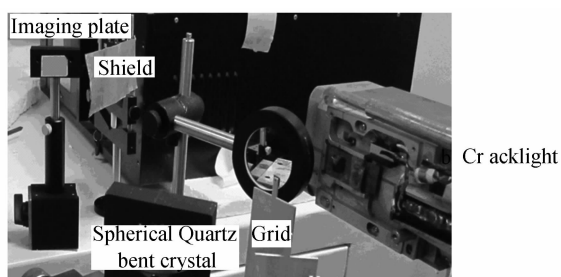


图 4 布喇格成像系统实验

Fig. 4 The layout of the Bragg imaging system experiment

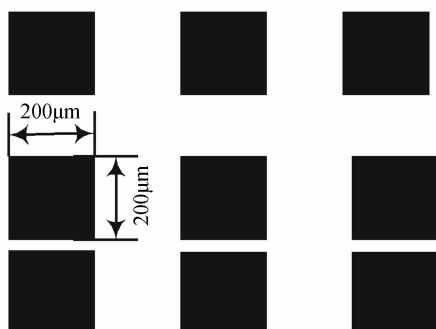


图 5 成像物体网格

Fig. 5 The grid of object

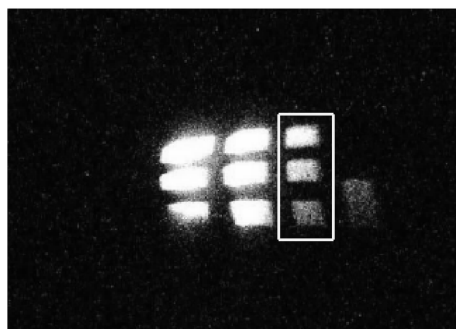


图 6 X 射线二维网格图像

Fig. 6 The two-dimensional X-ray backlight image

表 1 成像实验参数

Table 1 The parameters of imaging experiment

Spectral line	Photon energy/keV	crystal/ $2d/\text{nm}$	Bragg angle/ $(^\circ)$	spot size/ $\mu\text{m}$	$p-a/\text{mm}$	$p/\text{mm}$	$q_{m+d}/\text{mm}$
Cr K $\alpha$	4.47	Quartz2023/0.2749	56.4	500	92	192	300

### 3.2 实验结果分析

利用软件 Winview32 和 matlab 对实验得到 Cr K $\alpha$  X 射线二维网格图像(图 6)进行数据处理,得到网格成像沿弧矢面方向的截面图.图 7 是网格图像白色区域 X 射线谱线相对强度与像素点相对位置的相应关系.

根据 X 射线背光成像实验的实验参量,如射线源到球形晶体距离  $p$ ,网格位置  $p-a$ ,成像位置  $q_{m+d}$  和布喇格角  $\theta$ ,成像系统在子午面和弧矢面的放大率分别为: $M_m=4.7$ , $M_s=1.8$ ,与所得二维网格图像在子午面和弧矢面大小相一致,有不同的纵横比.通过图像弧矢面数据可以得到成像系统空间分辨信息,图 7 是弧矢面方向成像实验得到 X 射线谱线相对强度与像素点位置的相应关系,相当于背光成像实验网格的金属丝边缘成像在不同位置的边缘响应函数(Edge Response Function,ERF)<sup>[14-15]</sup>.测量 ERF 波峰到波谷强度的 20%到 80%所对应的距离,可以得到成像系统的空间分辨率.成像物体网格厚度为  $200\ \mu\text{m}$ ,根据图 7 中 ERF 波峰到波谷强度的 20%到 80%所对应的距离,得到网格空间分辨率约为  $83\ \mu\text{m}$ .

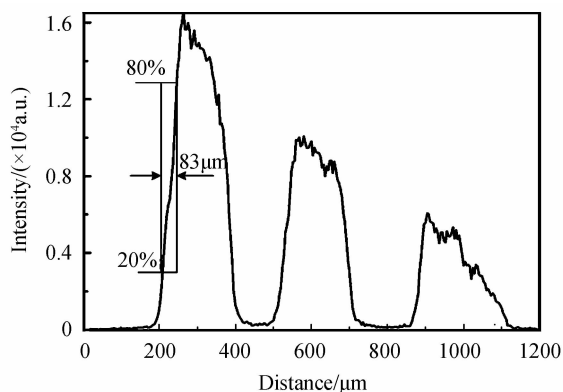


图 7 弧矢方向谱线强度与像素相对位置分布

Fig. 7 The distribution of spectral intensity and the pixel

## 4 结论

球形弯曲晶体布喇格成像系统是一种新型的等离子体 X 射线诊断技术,也是研究 ICF 物理过程的重要

诊断技术,它不仅可以得到等离子体内部能谱信息,也可以用来分析评估内爆靶丸运动过程及激光辐射对称性等.为了得到成像系统的空间分辨信息,进行了单色 X 射线背光成像实验,得到了 Cr K $\alpha$ X 射线二维网格图像.实验中 Cr 靶的焦斑尺寸为 500  $\mu\text{m}$ ,石英球面晶体布喇格成像系统得到的空间分辨率为 83  $\mu\text{m}$ .实验结果表明,本文设计的石英球面晶体成像系统具有很好的空间分辨能力,可以用于 ICF 等离子体 X 射线背光成像诊断.

## 参考文献

- [1] GLENZER S H, MACGOWAN B J, MEEZAN N B, *et al.* Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums[J]. *Physical Review Letter*, 2011, **106**(8): 085004.
- [2] 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): 10E529.
- [3] ALKHIMOVA M A, PIKUZ S A, SKOBLEV I Y, *et al.* Determination of the reflectivity curve of a spherically bent mica crystal used to diagnose X-ray radiation of relativistic laser plasma[J]. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2016, **43**(10): 291-294.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] AKLI K U, KEY M H, CHUNG H K, *et al.* Temperature sensitivity of Cu K $\alpha$  imaging efficiency using a spherical Bragg reflecting crystal[J]. *Physics of Plasma*, 2007, **14**(2): 023102.
- [8] HONKANEN A, VERBENI R, SIMONELLI I, *et al.* Study on the reflectivity properties of spherically bent analyser crystals[J]. *Corrigendum Journal of Synchrotron Rad*, 2017, **24**: 545-546.
- [9] 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.
- [10] PIKUZ T, FAENOV A, SKOBELEV I, *et al.* High efficient X-ray imaging and backlighting schemes based on the spherically bent crystals[C]. SPIE, 2004, **5196**: 362-374.
- [11] WU Xin-yi, XIAO Sha-li, LU Jian, *et al.* Simulation and experimental research of X-ray toroidally bent crystal imaging with laser-produced plasma[J]. *Laser Physics*, 2016, **26**(4): 045701.
- [12] FLORA F, BOLLANTI S, LAI A, *et al.* A novel portable, high-luminosity monochromatically tuneable X-ray microscope[C]. SPIE, 2001, **4504**: 240-252.
- [13] SCANDALE W, KOVALENKO A. D, TARATIN A M. Possibility of high efficient beam extraction from the CERN SPS with a bent crystal. Simulation results[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2017, **848**: 166-169.
- [14] MARSHALL F J, ALLEN M M, KNAUER J P, *et al.* A high-resolution X-ray microscope for laser-driven planar-foil experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, **5**(4): 1118-1124.
- [15] KNAPP P F, PIKUZ S A, SHELKOVENKO T A, *et al.* High resolution absorption spectroscopy of exploding wire plasmas using an X-pinch X-ray source and spherically bent crystal[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2011, **82**(6): 063501.