

# 用于超热电子诊断的单色 X 射线成像技术

张强强 魏 来 杨祖华 钱 凤 陈 勇 曹磊峰\*

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

**摘要** 基于球面弯晶设计了一套二维分辨的单色成像系统,使用光学仿真软件对系统进行了成像模拟。对金网格进行了背光成像,获得了 8.048 keV 的单色网格成像,空间分辨率可达  $9\ \mu\text{m}$ 。在神光 II(SG-II)升级激光装置上,利用该成像系统成功获取了二维锥靶的  $K\alpha$  自发光单色图像。结果表明,该成像系统能够胜任快点火物理实验中超热电子的诊断。

**关键词** X 射线光学; 单色成像; 球面弯晶; 超热电子; 激光等离子体

**中图分类号** O53 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.1234001

## Monochromatic X-ray Imaging Technology for Diagnostics of Hot Electrons

Zhang Qiangqiang Wei Lai Yang Zuhua Qian Feng Chen Yong Cao Leifeng

Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China  
Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

**Abstract** A monochromatic imaging system with two-dimensional resolution is designed based on spherically bent crystals. Ray tracing simulation to the imaging process is conducted with the usage of optical simulation software. The backlit imaging to the Au meshes is conducted and a monochromatic mesh image with an energy of 8.048 keV and a spatial resolution of  $9\ \mu\text{m}$  is acquired. On the SG-II updated laser facility, with this imaging system, the  $K\alpha$  self-luminous monochromatic image of two-dimensional cone target is successfully acquired. The results show that this imaging system is capable of hot electrons diagnostics in the fast ignition experiments.

**Key words** X-ray optics; monochromatic imaging; spherically bent crystals; hot electrons; laser-produced plasma

**OCIS codes** 340.7440; 110.7440; 260.1180

## 1 引 言

在快点火物理实验中,超短超强激光脉冲与物质相互作用产生了能量从千电子伏特到兆电子伏特量级的超热电子束,电子束传输并释放能量使得压缩氘氦燃料被加热<sup>[1-3]</sup>,所以研究超热电子在介质中的产生机制和传输过程对快点火物理研究具有重要意义。超热电子传输到介质内部时可与介质原子内层电子发生相互作用,使得原子处于激发状态,原子随后在退激发过程中释放出  $K\alpha$  光子。对超热电子产生的  $K\alpha$  光源进行成像可以定性和定量地获得超热电子传输信息,包括超热电子尺寸、发散角、 $K\alpha$  光子数、激光-超热电子转换效率等<sup>[4]</sup>。由于  $K\alpha$  光源的高质量成像要求,成像系统应具有高空间分辨率和很窄的能谱宽度,传统的针孔相机、KB 显微镜等技术不能满足这一要求。球面弯晶单色成像技术是利用 X 射线的布拉格衍射和球面几何光学成像来达到单能成像的效果,可获得超热电子产生的  $K\alpha$  光源二维分辨的单能图像<sup>[5-6]</sup>,具有空间分辨率高、单色性好、视场大等优点,受到了国内外学者的广泛关注<sup>[7-17]</sup>。Stoeckl 等<sup>[7-9]</sup>研制了一套可精确瞄准定位的球面弯晶单色成像系统,在激光装置上获得了平面靶的自发光图像,并由此推断快了电子的传输

收稿日期: 2016-06-30; 收到修改稿日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(11375160)、科技部国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ120125)

作者简介: 张强强(1988—),男,硕士,研究实习员,主要从事 X 射线光谱和成像方面的研究。

E-mail: qiangz0521@163.com

\* 通信联系人。E-mail: leifeng.cao@caep.cn

特性。在球面弯晶成像方面的研究工作,国内主要集中在背光成像测量等离子体密度方面<sup>[13-17]</sup>,目前关于将球面弯晶用于超热电子诊断方面的研究鲜有报道。

本文针对神光 II 升级激光装置设计了一套工作能点为铜 K $\alpha$  线的球面弯晶单色成像系统,并对其进行了理论分析和实验验证,成功获得了二维单色成像,为快点火中超热电子的诊断提供了一定的参考。

## 2 成像系统设计

### 2.1 成像原理

晶体是天然的 X 射线分光器,X 射线入射到晶体上,当满足布拉格晶体衍射方程时会发生干涉加强,即

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

式中  $d$  为晶体间隔, $\theta$  为衍射角, $n$  为整数, $\lambda$  为波长。

球面反射镜具有聚焦作用,其子午焦距可确定一个聚焦圆,即罗兰圆。将晶体弯曲,使其半径为罗兰圆半径的二倍,这样可以使罗兰圆上的发光点会聚于一点。球面弯晶成像原理如图 1 所示,成像时背光源发出的复色光穿透靶物体后携带靶物体的信息以  $\theta$  角入射到球面弯晶上,满足(1)式的 X 射线以  $\theta$  角反射,从而被探测器接收。成像满足下面的物像关系<sup>[6]</sup>

$$\begin{cases} \frac{1}{a} + \frac{1}{b_m} = \frac{2}{R \sin \theta} \\ \frac{1}{a} + \frac{1}{b_s} = \frac{2 \sin \theta}{R} \end{cases}, \quad (2)$$

式中  $R$  为球面弯晶的曲率半径, $\theta$  为布拉格角, $a$  为物体与晶体间的距离, $b_m$  和  $b_s$  分别为物体在子午方向和弧矢方向的像距。系统在子午方向和弧矢方向分别存在散焦线,由于这两条散焦线不重合,成像时会出现很大的像差。为了进行高质量的二维成像,要求物体在子午方向和弧矢方向的焦点基本重合。两条散焦线的距离随着布拉格角的增大而减小,故成像时布拉格角  $\theta$  一般位于  $80^\circ \sim 90^\circ$ ,即 X 射线近正入射。

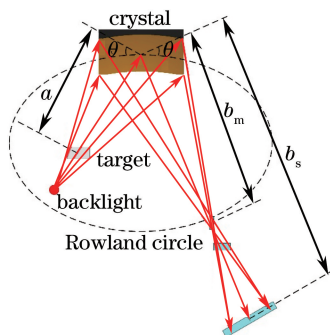


图 1 球面弯晶成像原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of imaging principle based on spherically bent crystals

### 2.2 成像系统设计

设计的球面弯晶单色成像系统工作能点为铜的 K $\alpha$  线(能量为 8.048 keV),针对这一能点,选用石英 2131 作为工作晶体,则晶体布拉格角为  $88.7^\circ$ ,X 射线入射接近正入射。该设计可以有效地抑制像差。实验中使用的是二级衍射。

成像系统结构如图 2 所示,背光源、待成像靶及探测器三者与球面弯晶法线方向的夹角均为布拉格角  $\theta$ ,待成像靶位于背光源和晶体之间。背光源可以是激光等离子体源,也可以是 X 射线管,位于罗兰圆上或者位于罗兰圆内部,其中将背光源置于罗兰圆内部时可增大成像系统的收集立体角,提高系统的探测效率。探测器使用日本 Fuji film 公司 BAS-SR 型成像板,其像素尺寸为  $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。球面弯晶的前面加  $100 \mu\text{m}$  厚的碳氢(CH)材料保护层以避免球面弯晶被打靶产生的等离子体和碎屑破坏。为提高信噪比,将 IP 板置于带准直筒的铅屏蔽盒以阻挡杂散光信号,并在 IP 板前放置  $20 \mu\text{m}$  厚的铜箔以屏蔽低能 X 射线的干扰。背光源、待成像靶与 IP 板之间放置铅屏蔽体以防止二者发射的 X 射线直接照射到 IP 板上掩盖有用

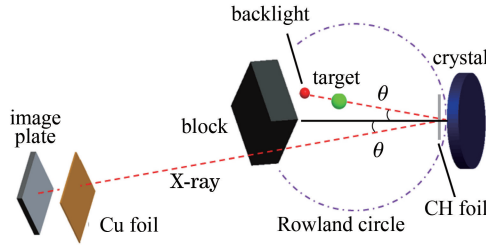


图 2 成像系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of imaging system

信号。系统工作模式有两种：背光模式和自发光模式，其中自发光模式中无背光源。

### 2.3 成像系统性能

一般考察的成像系统的性能参数包括放大倍数、视场大小、空间分辨率和能量分辨率(单色性)。其中放大倍数主要与背光源到晶体的距离  $p$ 、物体到晶体的距离  $a$ 、像距  $b$ 、布拉格角  $\theta$  和弯晶曲率半径  $R$  有关<sup>[15]</sup>，即

$$\begin{cases} M_m = \frac{p}{p-a} \times \frac{b-q_m}{q_m} = \frac{2pb - (p+b)R \sin \theta}{(p-a)R \sin \theta} \\ M_s = \frac{p}{p-a} \times \frac{b-q_s}{q_s} = \frac{2pb \sin \theta - (p+b)R}{(p-a)R} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $M_m$  和  $M_s$  分别为子午方向和弧矢方向的放大倍数， $q_m$  和  $q_s$  分别为背光源在子午方向和弧矢方向的理想像距。从(3)式可以看出，成像系统在子午方向和弧矢方向的放大倍数不相同，但在近正入射尤其是系统以  $88.7^\circ$  的布拉格角入射时，二维放大倍数差别极小。

成像系统的视场大小  $F$  主要由晶体有效直径  $d_c$ 、背光源直径  $d_s$ 、 $p$  和  $a$  决定<sup>[6]</sup>，即

$$F = \frac{p-a}{p} d_c + \frac{a}{p} d_s. \quad (4)$$

可以看出，增大背光源与晶体的距离或背光源直径均可增大系统的视场范围。

成像系统的单色性，主要由背光源直径  $d_s$ 、布拉格角  $\theta$ 、球面弯晶曲率半径  $R$  等参数决定，系统相对光谱带宽为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{(R \sin \theta - a) d_s}{(p-a) R \tan \theta}. \quad (5)$$

由于光源是离轴的，因此限制成像分辨率的因素主要是像散差，理论分辨率主要与布拉格角、球面弯晶曲率半径  $R$ 、背光源直径  $d_s$  等参数有关，可表示为<sup>[15]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_m = \left| \frac{aR \sin \theta - 2ab + bR \sin \theta}{2pb - (p+b)R \sin \theta} \right| d_s \\ \sigma_s = \left| \frac{aR - 2ab \sin \theta + bR}{2pb \sin \theta - (p+b)R} \right| d_s \end{cases}, \quad (6)$$

式中  $\sigma_m$  和  $\sigma_s$  分别为子午面和弧矢面的理论分辨率。

二维成像时一般要求成像在子午方向和弧矢方向的分辨能力相同，即令(6)式中  $\sigma_m = \sigma_s$ 。由(6)式可知，当其他参数不变时， $a$  越小，空间分辨率就越低； $p$  与  $a$  相差越大，空间分辨率就越高。而由(5)式可知，减小  $\frac{a}{p}$  可以提高能量分辨率。故在系统设计时，应当选择较小的  $a$  和较大的  $p$ 。但增大  $p$  会引起晶体的收集立体角变小，导致成像光强不足。 $a$  和  $p$  的选择还受到实验场地条件的限制，比如在神光 II 升级装置中为了避免成像系统和瞄靶装置的位置相冲突，要求  $a > 100$  mm 且  $p - a < 10$  mm。所以选择参数时必须考虑这些因素的影响。

## 3 系统成像的理论模拟

利用 X 射线仿真软件 X-LAB 模拟了球面弯晶单色成像系统背光成像实验。模拟中背光源直径为

200  $\mu\text{m}$ 、发散角为 5 mrad。待成像靶为周期网格, 网格周期为 25  $\mu\text{m}$ 、肋宽为 6  $\mu\text{m}$ 。背光源与待成像靶间的距离为 15 mm, 物距为 140 mm, 像距为 1166.7 mm, 放大倍数约为 8.3。以成像中心为原点, 以二维成像系统两个维度方向为  $X'$ 、 $Y'$  轴方向建立坐标系, 模拟结果如图 3 所示, 可以看出成像的网格清晰无畸变。

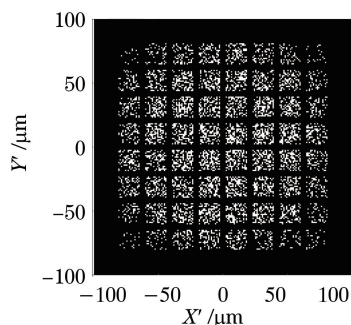


图 3 模拟成像结果

Fig. 3 Imaging result from simulation

#### 4 X 射线管演示实验

演示实验使用 Cu 靶 X 射线管作为背光源对周期金网格进行背光成像。待成像网格与晶体距离  $a$  为 140 mm, 等分辨成像像距  $b$  为 1166.7 mm。背光源直径  $d_s$  约为 3 mm, 与待成像靶间的距离为 300 mm, 位于罗兰圆外部。经计算, 在此参数下成像系统放大倍数约为 8.3, 视场大小为 4.3 mm, 成像系统能量分辨为  $1 \times 10^{-4}$ , 空间分辨率优于 6  $\mu\text{m}$ 。周期网格外轮廓直径为 200  $\mu\text{m}$ , 周期为 62  $\mu\text{m}$ , 肋宽为 25  $\mu\text{m}$ , 厚度为 10  $\mu\text{m}$ 。

以成像的左下角为原点, 以二维成像的两个方向为  $X$ 、 $Y$  轴方向。金网成像结果如图 4 所示。由图可以看到清晰的网格成像, 计算可得图像最佳空间分辨率为 9  $\mu\text{m}$ 。由(6)式可知, 成像的空间分辨率与背光源的尺寸成正比, 即背光源尺寸越大, 成像的空间分辨率就越差。演示实验使用的 X 射线管光源直径约为 3 mm, 远大于模拟中设置的光源直径 (200  $\mu\text{m}$ ) 以及激光打靶产生的背光源尺寸 (中心焦斑一般小于 500  $\mu\text{m}$ ), 由此可知 X 射线管实验成像的空间分辨率较模拟值有所下降。网格成像外的圆形轮廓是部分杂散光穿过铅屏蔽盒的准直筒到达成像板造成的。

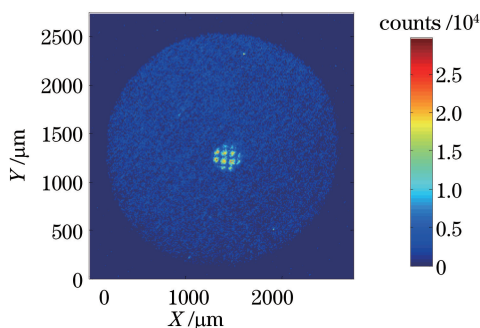


图 4 X 射线管金网成像结果

Fig. 4 Imaging result of Au mesh in X-ray tube

#### 5 神光 II 升级激光装置应用实验

在神光 II 升级激光装置上, 利用该成像系统测量了皮秒激光作用下的二维铜锥靶自发光单色  $K\alpha$  图像, 实验布局如图 5 所示。皮秒激光能量为 300 J, 脉冲宽度为 10 ps, 激光经过离轴抛物面镜(OAP)反射后聚焦到二维锥靶的锥顶并与之发生相互作用。二维锥靶尺寸为 1500  $\mu\text{m} \times 700 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ , 锥顶宽度为 35  $\mu\text{m}$ , 锥的张角为 40°。球面弯晶观察方位与二维锥靶靶面法线方向的夹角为 67.5°。

实验成功获得了二维锥靶的自发光单色  $K\alpha$  图像, 成像结果如图 6 所示, 其中图 6(a)为放大还原后的图

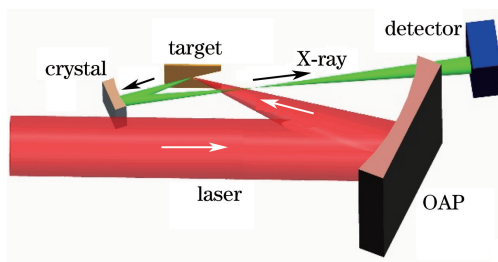


图 5 实验布局图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

像。成像显示  $K\alpha$  射线的发射主要集中在二维锥靶的锥的两翼,而且整个二维锥靶都在发射微弱的铜  $K\alpha$  射线。这表明激光打靶产生的快电子被约束在靶内,并在整个靶内传输,释放出  $K\alpha$  射线。

实验中,在子午面内,球面弯晶观察方位与二维锥靶靶面法线方向的夹角为  $67.5^\circ$ ,这使得球面弯晶视角内的子午方向二维锥靶长度缩短为原来的  $1/2.6$ ,而在弧矢方向无变化,导致二维锥靶张角在成像中的显示值  $\omega^*$  增大。显示值  $\omega^*$  与实际值  $\omega$  的关系为

$$\tan \frac{\omega}{2} = \frac{1}{2.6} \tan \frac{\omega^*}{2} \quad (7)$$

对图 6(a) 成像的子午方向(X 方向)的长度进行修正,得到图 6(b) 所示的重建后图像。图 6(a) 中的张角测量值为  $89^\circ$ ,与理论值  $86.8^\circ$  符合较好,图 6(b) 中的张角测量值约为  $41^\circ$ ,与实际值  $40^\circ$  符合较好。

由于有部分高能射线穿过屏蔽直接到达成像板,成像有不可忽略的噪声。实验中成像的信噪比约为 10,在后续研究工作中需要继续加强屏蔽措施以获得更高的信噪比。

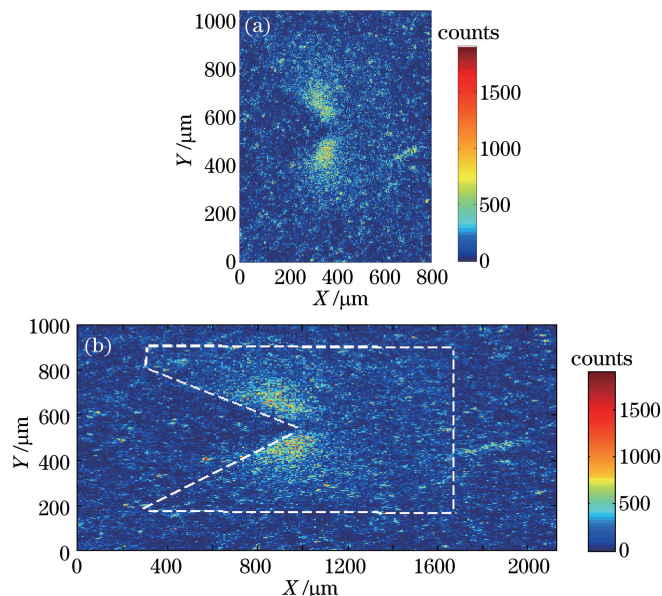


图 6 角度修正(a)前(b)后的二维锥靶实验成像结果

Fig. 6 Imaging results of two-dimensional cone target from experiments (a) before and (b) after viewing angle correction

## 6 结 论

针对超热电子的诊断需求设计了一套球面弯晶单色成像系统,在神光 II 升级激光装置实验中成功获得了二维锥靶的  $K\alpha$  自发光单色图像,并通过成像推测了超热电子的部分信息。研究结果为神光 II 升级激光装置快点火物理实验中超热电子的诊断提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- 1 Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, *et al.* Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(5): 1626-1634.
- 2 Kodama R, Norreys P A, Mima K, *et al.* Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition [J]. *Nature*, 2001, 412(23): 798-802.
- 3 Zhang Jiatai, He Bin, He Xiantu, *et al.* Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 921-925.  
张家泰, 何 斌, 贺贤士, 等. 激光聚变快点火机理研究[J]. *物理学报*, 2001, 50(5): 921-925.
- 4 Morace A, Batani D. Spherically bent crystal for X-ray imaging of laser produced plasmas[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 623(2): 797-800.
- 5 Koch J A, Landen O L, Barbee T W, *et al.* High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the National Ignition Facility[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1784-1795.
- 6 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.
- 7 Stoeckl C, Fiksel G, Guy D, *et al.* A spherical crystal imager for OMEGA EP[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 033107.
- 8 Theobald W, Solodov A A, Stoeckl C, *et al.* Time-resolved compression of a capsule with a cone to high density for fast-ignition laser fusion[J]. *Nature Communication*, 2014, 5: 5785.
- 9 Casey D T, Woods D T, Smalyuk V A, *et al.* Performance and mix measurements of indirect drive Cu-doped be implosions[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 114(20): 205002.
- 10 Chawla S, Wei M S, Mishra R, *et al.* Effect of target material on fast electron transport and resistive collimation[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(02): 025001.
- 11 Hall G N, Burdiak G C, Suttle L, *et al.* Monochromatic radiography of high energy density physics experiments on the MAGPIE generator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(11): 11D608.
- 12 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 Plasmas*, 2007, 14(2): 023102.
- 13 Chen B, Yang Z H, Wei M X, *et al.* Implosion dynamics measurements by monochromatic X-ray radiography in inertial confinement fusion[J]. *Review of Plasmas*, 2014, 21(12): 122705.
- 14 Liu L F, Xiao S L, Qian J Y, *et al.* X-ray backlight imaging in Z-pinch[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2012, 684(21): 93-96.
- 15 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.  
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.
- 16 Liu Lifeng, Xiao Shali, Wu Yufen, *et al.* Study of X-ray backlight imaging based on spherically bent quartz crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0815001.  
刘利锋, 肖沙里, 毋玉芬, 等. 基于石英球面弯曲晶体的 X 射线成像研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0815001.
- 17 Lu Jian, Xiao Shali, Yang Qingguo, *et al.* Electron temperature radial profile research of aluminum wire-array Z-pinch [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(8): 0815001.  
鲁 建, 肖沙里, 阳庆国, 等. 铝丝阵 Z 箍缩电子温度径向轮廓研究[J]. *中国激光*, 2012, 39(8): 0815001.