

# 用于 X 射线时空分辨测量的弯晶谱仪\*

熊先才<sup>1</sup> 钟先信<sup>2</sup> 肖沙里<sup>2</sup> 钱家渝<sup>2</sup>

(1 重庆大学测量工程系, 重庆 400030)

(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** 为了测量激光聚变产生的 0.2 ~ 0.37 nm 范围内的等离子体 X 射线, 设计了一种基于空间和时间分辨的聚焦型弯晶谱仪. 将在 700℃ 时弯曲后的 LiF ( $2d = 0.403$  nm) 晶体作为色散元件, 布喇格衍射角的变化范围为 30 ~ 67.5°, 弯晶粘贴在离心率和焦距分别为 0.9586 和 1350 mm 的椭圆形不锈钢基底上. 利用弯晶谱仪配 X 光 CCD 相机在星光 II 激光 (0.35 μm, 60 ~ 80 J, 700 ps) 装置上摄取了钛平面靶发射的 X 射线光谱, 实验结果表明它的光谱分辨率能达到 0.001 nm.

**关键词** 弯晶谱仪; 激光等离子体; X 射线光谱; 空间分辨率; 时间分辨率

**中图分类号** TH744.14 **文献标识码** A

## 0 引言

高功率短脉冲激光打靶形成的等离子体不但包含十分丰富的信息, 而且变化过程也非常快. 从高温等离子体发出的 X 射线携带了大量反映等离子体状态方面的信息, 如温度、密度、电离度和布居数等<sup>[1-4]</sup>. 在进行辐射不透明度的实验研究中, 由于辐射不透明度强烈依赖于物质状态, 而通过辐射加热物质达到的高温状态又随时间变化很快, 同时高温物质状态本身又要通过自发辐射发出 X 射线, 因此要进行辐射不透明度的准确定量研究, 就必须发展同时具有空间和时间分辨的 X 射线测量这一关键诊断技术<sup>[5]</sup>. 为了诊断等离子体 X 射线, 国内外研制了大量的光栅谱仪和晶体谱仪<sup>[6-10]</sup>, 但这些谱仪通常是配 X 光胶片相机或 CCD 相机进行空间分辨测量, 配 X 光条纹相机进行时间分辨测量, 而难以用同一台谱仪同时进行 X 射线的空间和时间分辨测量. 由于 LiF 晶体没有弹性, 很难弯曲成椭圆形. 另外, 要将两个通道上的弯晶同时进行瞄准对中, 难度也相当大, 所以国内尚未开展双通道椭圆弯晶谱仪的研制工作. 我们研制的椭圆弯晶谱仪有两个通道, 在一个通道上用 X 光 CCD 相机测量空间分辨光谱, 在另一个通道上用 X 光条纹相机测量时间分辨光谱, 从而可以同时获得 X 射线的空间和时间分辨率. 与平晶谱仪相比, 椭圆弯晶谱仪不但集光本领大, 而且还可以对衍射后的 X 射线进行聚焦.

## 1 弯晶谱仪的分光原理

弯晶谱仪的分光原理如图 1. 靶位于椭圆的第

一个焦点  $F_1$  上, 即位于真空靶室的中心; 一个宽度可调的狭缝位于椭圆的第二个焦点  $F_2$  上, 在狭缝上方放置一个滤光膜来挡住可见光. 激光打靶产生的等离子体 X 射线经椭圆弯晶反射后聚焦在第二个焦点  $F_2$  上, 然后穿过滤光膜和狭缝在探测器的阴极面上成像, 探测器采用 X 光 CCD 相机和条纹相机, 分别用于 X 射线的空间和时间分辨测量.

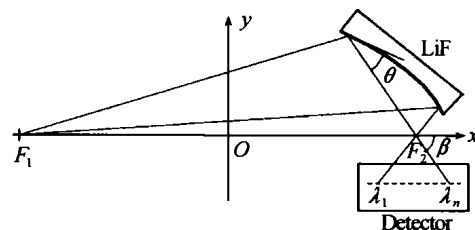


图 1 弯晶谱仪的分光原理

Fig. 1 Light-splitting principle of bent crystal spectrometer

弯晶谱仪采用 LiF 晶体作 X 射线的衍射元件, 晶体的晶面为 (200), 晶面间距为  $2d = 0.403$  nm, 晶体的尺寸是 125 mm × 8 mm × 2 mm. 由于 LiF 晶体只有塑性而没有弹性, 在常温下不能弯曲. 我们将上海光学仪器研究所提供的厚度为 2 mm 的 LiF 晶体片加热到 700℃, 然后用自制的专用模具进行弯曲并缓慢冷却到室温, LiF 弯晶用慢固化率的环氧树脂粘贴在椭圆形不锈钢基底上, 设计的椭圆离心率为 0.9586, 椭圆两个焦点之间的距离 (即靶到狭缝的距离) 为 1350 mm. 当 X 射线入射到晶体上时, 晶体点阵中的原子 (或离子) 就成为子波的波源, 向各个方向发出散射波, 两列散射波经相互干涉后发生衍射. 根据布拉格衍射原理, 得到衍射条纹的条件是

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

式中,  $m$  是衍射级数,  $\lambda$  是 X 射线的波长,  $d$  是晶面间距,  $\theta$  是布喇格衍射角. 在弯晶谱仪的设计中, 我们选用一级衍射光谱 ( $m = 1$ ), 则式 (1) 变成

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

\* 国家 863 高技术资助项目 (863-804-3)

Tel: 023-65103134 Email: xiongxc@cqu.edu.cn

收稿日期: 2004-03-23

设计的布喇格衍射角为 30 ~ 67.5°, 利用式(2)得到弯晶谱仪能够测量的 X 射线波长范围为 0.2 ~ 0.37 nm, 考虑到 X 光 CCD 相机阴极面的尺寸和狭缝的距离, 实际测量的有效波长范围是 0.24 ~ 0.34 nm.

对式(2)两边进行微分, 得到弯晶谱仪的角色散率

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{2d\cos\theta} \tag{3}$$

一般而言, 谱仪对 X 射线的角色散率越大, 其谱分辨能力就越强. 因此, 从式(3)可知, 采用晶面间距较小的晶体可以获得较高的光谱分辨率. 当然, 角色散率不是决定谱仪分辨率的唯一因素, 晶体本身的分辨率、光源的大小、探测器的空间分辨率等都会影响谱仪的实际分辨本领<sup>[11]</sup>.

另外, 根据椭圆的几何关系<sup>[12]</sup>, 可以得到谱线探测角的计算公式

$$\beta = \theta + \cos^{-1}\left(\frac{\cos\theta}{e}\right) \tag{4}$$

式中,  $\beta$  是谱线的探测角,  $e$  是椭圆的离心率, 利用式

(4) 得到谱线的探测角范围为 55.4 ~ 134°.

## 2 弯晶谱仪的结构设计

弯晶谱仪的结构如图 2, 主要由椭圆弯晶分析器、真空闸板阀、波纹管、测距仪、三维微调装置、X 光 CCD 相机和条纹相机的接口、狭缝、转接法兰等组成. 弯晶到靶心的距离为 1351.20 mm, 到狭缝的距离为 57.10 mm. X 光 CCD 相机阴极面中心到狭缝的距离是 35 mm, 靶心到 X 光 CCD 相机阴极面中心的距离为 1443.30 mm. 弯晶谱仪可以通过转接法兰安装在神光 II 或星光 II 靶室外面, 利用三维微调装置和激光测距仪进行瞄准对中和测距, 也就是使靶心、狭缝和弯晶三者之间满足设计的椭圆方程. 将两个完全相同的弯晶进行上下交叉和前后错开布置, 以减小谱仪的尺寸和减轻它的重量. 在上通道用 X 光 CCD 相机进行 X 射线的空间分辨测量, 在下通道用 X 光条纹相机进行时间分辨测量, 这样在一次打靶的情况下, 可以同时获得 X 射线的空间和时间分辨率.

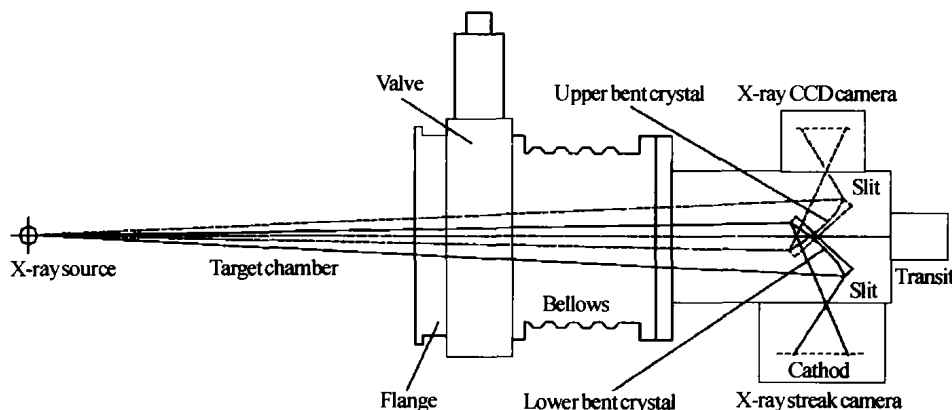


图 2 弯晶谱仪的结构示意图  
Fig. 2 Structural sketch of bent crystal spectrometer

## 3 空间分辨率的实验测量

实验测量是在星光 II 固体钕玻璃激光装置上进行的, 实验布局如图 3. 弯晶谱仪 (BCS) 安装在靶室外面的正北方向上, 将厚度为 100  $\mu\text{m}$  的钛平面靶东偏南 50° 方向放置. 三倍频激光由东向西入射, 激光束与靶面法线夹角约为 40°, 入射的激光波长为 0.35  $\mu\text{m}$ , 激光能量约 60 ~ 80 J, 激光脉宽约 700 ps, 焦斑直径约  $\varphi 250 \mu\text{m}$ , 靶面功率密度约  $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ . 激光点聚焦打靶产生高温等离子体, 用弯晶谱仪配 X 光 CCD 相机进行 X 射线发射谱的空间分辨测量, 该相机是一个 1340 pixels  $\times$  1300 pixels 的二维面阵 CCD, 每个像素的大小为 20  $\mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ , 阴极面的大小为 26.8 mm  $\times$  26 mm. 图 4 是用该 CCD 相机拍摄的钛激光等离子体 X 射线的光谱照片, 图 5 是谱线的强度分布. 对图 4 进行数据处理, 将像素点位置换算

成波长位置, 计算出的峰值波长如图 5 所示. 在图 5 中, 能将波长为 0.3218 nm 和 0.3229 nm 的两条谱线完全分开, 表明该谱仪的最高光谱分辨率可以达到 0.001 nm. 由于 LiF 晶体相当脆且容易断裂, 很难切出 0.2 mm 厚的晶片, 所以今后我们将把晶体基底的椭圆面切下 1 mm, 再粘贴厚度为 1 mm 的 LiF 晶体,

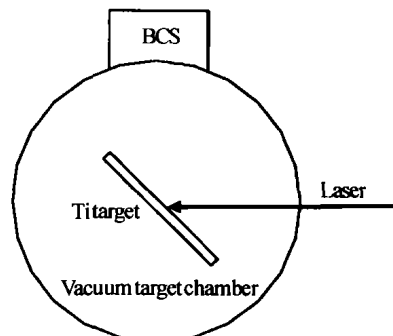


图 3 实验布局  
Fig. 3 Experimental setup

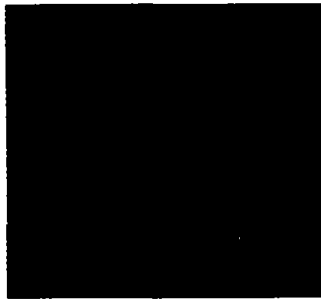


图4 钛平面靶的空间分辨光谱

Fig. 4 Space-resolved spectrum of titanium planar target

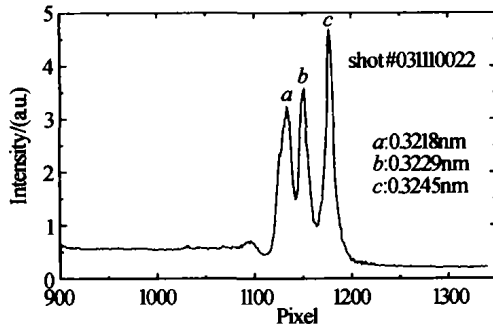


图5 钛平面靶的谱线强度分布

Fig. 5 Spectral intensity distribution of titanium planar target

这样就可以满足理想的椭圆方程,从而取得更好的实验效果.此外,我们还设计制作了PET、MiCa和KAP椭圆弯晶色散元件,分别用于测量0.44~0.81 nm, 0.99~1.83 nm和1.33~2.46 nm范围内的X射线.

## 4 结论

我们设计的椭圆弯晶谱仪配X光CCD相机和条纹相机可以在一次打靶的条件下,同时进行激光等离子体X射线的空间和时间分辨测量.本文给出了弯晶谱仪的设计参数,LiF晶体的弯曲工艺.由于晶体的晶面间距在纳米量级,所以能够测量短波X射线.另外,可以根据不同的X射线波段范围,选用不同的椭圆弯晶作色散元件.用LiF弯晶谱仪配X光CCD相机第一次在星光II激光装置上摄取了钛平面靶发射的X射线光谱,实验结果表明该谱仪的空间分辨率能够达到0.001 nm.在进行打靶实验时,由于条纹相机被其他实验小组占用,所以没有进行时间分辨测量,我们将在下次打靶实验时进行X射线的时间分辨测量.

## 参考文献

1 Hermann J, Thomann A L, Boulmer-Leborqne C, *et al.* Plasma diagnostics in pulsed laser TiN layer deposition. *J Appl Phys*, 1995, **77**(7): 2928~2936

- 2 Sorge S, Wierding 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
- 3 Rosmej F B, Hoffmann D H H, Geissel M, *et al.* Advanced x-ray diagnostics based on an observation of high-energy Rydberg transitions from autoionizing levels in dense laser-produced plasmas. *Phys Rev A*, 2001, **63**(6): 1~8
- 4 李三伟,陈波,丁耀南,等.铝靶电子温度空间分布实验诊断.原子与分子物理学报,1999,16(4):467~470  
Li S W, Chen B, Ding Y N, *et al.* Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics, 1999, **16**(4): 467~470
- 5 杨家敏,丁耀南,郑志坚,等.时空分辨软X射线谱诊断技术研究.物理学报,2003,52(6):1427~1431  
Yang J M, Ding Y N, Zheng Z J, *et al.* Acta Physica Sinica, 2003, **52**(6): 1427~1431
- 6 张继彦,杨国洪,张保汉,等.小型平焦场光栅光谱仪的研制.光学学报,2001,21(9):1099~1102  
Zhang J Y, Yang G H, Zhang B H, *et al.* Acta Optica Sinica, 2001, **21**(9): 1009~1102
- 7 范品忠,Fill E,关铁堂.软X射线晶体谱仪.光学学报,1995,15(7):923~926  
Fan P Z, Fill E, Guan T T. Acta Optica Sinica, 1995, **15**(7): 923~926
- 8 Hammel B A, Ruggles L E. Elliptical spectrograph gated microchannel-plate detector for time resolved spectral measurements in the x-ray region. *Rev Sci Instrum*, 1988, **59**(8): 1828~1830
- 9 Nagasawa H. Spherically bent crystal spectrometer for inelastic high-energy x-ray scattering experiments. *Rev Sci Instrum*, 1989, **60**(7): 2051~2053
- 10 Koenig M, Boudenne J M, Legriel P, *et al.* A computer driven crystal spectrometer with charge coupled device detectors for x-ray spectroscopy of laser plasmas. *Rev Sci Instrum*, 1997, **68**(6): 2387~2392
- 11 熊先才,钟先信,段绍光,等.软X射线分光晶体KAP的反射率特性.光子学报,2004,33(1):73~75  
Xiong X C, Zhong X X, Duan S G, *et al.* Acta Photonica Sinica, 2004, **33**(1): 73~75
- 12 Henke B L, Yamada H T, Tanaka T J. Pulsed plasma source spectrometry in the 80-8000eV X-ray region. *Rev Sci Instrum*, 1983, **54**(10): 1311~1319

## Bent Crystal Spectrometer for X-ray Space and Time Resolved Measurements

Xiong Xiancai<sup>1</sup>, Zhong Xianxin<sup>2</sup>, Xiao Shali<sup>2</sup>, Qian Jiayu<sup>2</sup>

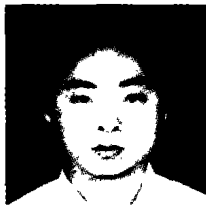
*1 Department of Measurement Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030*

*2 Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Chongqing University, Chongqing 400030*

Received date:2004-03-23

**Abstract** In order to measure plasma X-ray produced by laser fusion in the 0.2 ~ 0.37 nm range, a focusing bent crystal spectrometer has been designed for measuring the spatial and temporal resolutions. The LiF crystal with a  $2d$  spacing of 0.403 nm was elliptically bent at 700°C for the dispersive element, the Bragg diffractive angles vary from 30 to 67.5 degrees, the bent LiF crystal was fixed on the elliptical stainless-steel substrate with an eccentricity of 0.9586 and a focal distance of 1350 mm. The X-ray spectrum emitted from the planar titanium target was photographed by using the bent crystal spectrometer coupled with the X-ray CCD camera at the XG-2 laser facility, the experimental result shows that the spectral resolution is up to 0.001 nm.

**Keywords** Bent crystal spectrometer; Laser-produced plasmas; X-ray spectrum; Spatial resolution; Temporal resolution



Xiong Xiancai was born on October 7, 1973 in Chongqing, China. He received his B. S. and M. S. degrees from Henan Polytechnic University in 1997 and 2000, respectively. Now he works in the Department of Measurement Engineering and is a Ph. D candidate of the College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University. His current research interests include X-ray crystal spectrometer and measurement technology.