

文章编号: 0258-7025(2005)02-0180-04

# 激光等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪的设计

高 洁<sup>1</sup>, 钟先信<sup>1</sup>, 熊先才<sup>1</sup>, 肖沙里<sup>1</sup>, 杨国洪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)  
(<sup>2</sup> 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 0.2~2 nm 的激光等离子体 X 射线, 研制了一种新型的基于时间分辨和空间分辨的聚焦型椭圆弯晶谱仪, 采用两个完全相同且对称分布的通道可以同时获得谱线的空间和时间分辨率。给出了弯晶谱仪的设计参数, 采用了新颖的瞄准对中技术, 并对光源偏离椭圆轴线造成的误差进行了分析。在“神光II”靶室上进行打靶实验对该谱仪进行标定, 利用 X 射线 CCD 相机成功地获取了谱线的图像, 实验结果表明实测谱线波长与理论值吻合。

**关键词** X 射线光学; X 光光谱仪; 弯晶谱仪设计; 激光聚变; 等离子体 X 射线

**中图分类号** TH 744. 15 **文献标识码** A

## Elliptical Crystal Spectrometer Designed for Laser-Produced Plasma X-Ray

GAO Jie<sup>1</sup>, ZHONG Xian-xin<sup>1</sup>, XIONG Xian-cai<sup>1</sup>, XIAO Sha-li<sup>1</sup>, YANG Guo-hong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Chongqing University, Chongqing 400044, China)  
(<sup>2</sup> Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** A new space and time resolved focusing elliptical curved crystal spectrometer has been developed and applied to diagnose X-ray of laser-produced plasma in 0.2~2 nm region. Twin channels collocated symmetrically are utilized for simultaneous measurement of space and time resolved spectra. The design parameters of the spectrometer are presented, a novel aligning method is adopted, and the error due to off-axis of source is analyzed. The spectrometer has been calibrated for experiment on Shengguang-II target chamber in Shanghai. Photographs of spectra have been recorded by using X-ray CCD camera. It is demonstrated experimentally that the measured wavelength is accorded with the theoretical value.

**Key words** X-ray optics; X-ray spectrometer; design of curved crystal spectrometer; laser fusion; plasma X-ray

## 1 引 言

在激光惯性约束核聚变(ICF)的研究中, 高温高密度等离子体辐射出大量包含丰富信息的 X 射线, X 射线光谱诊断为获取激光等离子体的电子温度、密度和平均离化度等特征状态参数提供了一种重要的途径, 从而帮助人们更深入地了解惯性约束聚变中的能量耦合和不稳定性增长等物理过程<sup>[1]</sup>。双通道椭圆弯晶谱仪是用于 X 射线能谱分析的仪器。它利用晶体材料对 X 射线的衍射作用, 采用椭圆柱面弯晶作分光元件, 充分利用了椭圆几何光学具有自聚焦性且焦点固定和等光程的优良特性<sup>[2]</sup>,

从而使椭圆弯晶谱仪与平晶谱仪相比<sup>[3~5]</sup>, 具有更长的工作距离, 谱线展开得更宽, 能够获得较高的分辨率和灵敏度, 同时也给探测器位置固定带来了很大的方便。

## 2 椭圆弯晶谱仪的原理及结构

椭圆弯晶谱仪的工作原理是, 从椭圆的一个焦点射出的光线经椭圆面反射必汇聚于椭圆的另一个焦点上。为了同时获得 X 射线的空间和时间特性参数, 在一个通道上使用 X 射线胶片或 CCD 相机作空间分辨测量, 在另一个通道上用 X 射线条纹相

收稿日期: 2003-10-08; 收到修改稿日期: 2003-12-29

基金项目: 国家 863 计划(编号: 863-804-3)资助项目。

作者简介: 高 洁(1980—), 女, 河北人, 重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为光电精密仪器。E-mail: gaojie8016@163.com

机作时间分辨测量<sup>[6]</sup>。波长探测范围为 0.2~2 nm,设计的空间分辨率  $\lambda/\Delta\lambda$  和时间分辨率分别为 1000 和 20 ps。

2.1 光学系统

光学系统由光源、色散及聚焦系统、接收记录系统组成。图 1 给出了光学系统简图。在“神光 II”钕玻璃激光器装置上,聚焦三倍频激光束于真空靶室内的高纯固体微点靶表面(Al,Au 或 Ti),形成高剥离态等离子体 X 射线光源,靶直径小于 0.6 mm。该谱仪的色散元件为椭圆柱面弯晶,利用晶体对 X 射线的衍射把谱线展开。为了满足谱仪的工作波长范围 0.2~2 nm,采用 LiF,PET,MiCa,KAP 四种晶体。四种椭圆弯晶分析的波长范围如表 1 所示。根据晶体布拉格衍射定律:  $2d\sin\theta = n\lambda$  ( $n$  取 1),选取布拉格角覆盖  $30\sim 67.5^\circ$ 。晶体通过特殊工艺粘贴在椭圆基底上。两个完全相同的椭圆弯晶分析器在空间上错开布置,避免光路重叠。

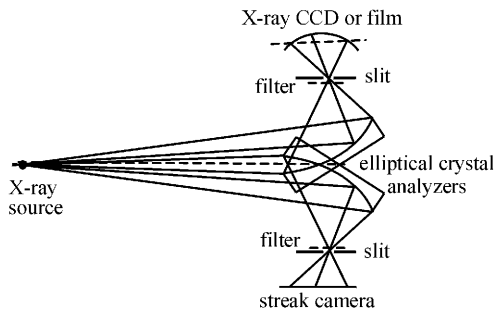


图 1 椭圆弯晶谱仪的光谱探测系统

Fig. 1 Spectral detection system of elliptical curved crystal spectrometer

表 1 四种椭圆弯晶分析的波长范围 ( $\theta=30\sim 67.5^\circ$ )

Table 1 Wavelength range for four elliptical curved crystal analyzers ( $\theta=30\sim 67.5^\circ$ )

Crystal	Molecular formula	Spacing of the diffracting planes /nm	Wavelength /nm
LiF	LiF	$2d(200) = 0.403$	0.20~0.37
PET	$C(CH_2OH)_4$	$2d(002) = 0.874$	0.44~0.81
MiCa	$H_2KAl_2(SiO_4)_3$	$2d(002) = 1.984$	0.99~1.83
KAP	$KHC_8H_4O_4$	$2d(1010) = 2.663$	1.33~2.46

2.2 椭圆弯晶基底的设计参数及结构

由椭圆的几何关系可以推导出设计光路的几个关键参数。

椭圆方程:  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, c = \sqrt{a^2 - b^2}, e = c/a$ 。

其中,  $e$  为椭圆的离心率。图 2 是椭圆弯晶参数示意

图。图中各参数的含义为:  $a$  为椭圆长半轴,  $b$  为椭圆短半轴,  $c$  为椭圆半焦距,  $\theta$  为布拉格角,  $\beta$  为谱线探测角,  $P_1$  为基底左端点,  $P_2$  为基底右端点,  $L$  为基底的弧长。

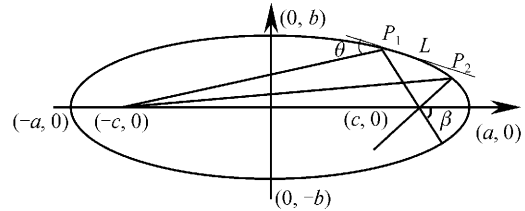


图 2 椭圆弯晶参数示意图

Fig. 2 The schematic of elliptical curved crystal parameters

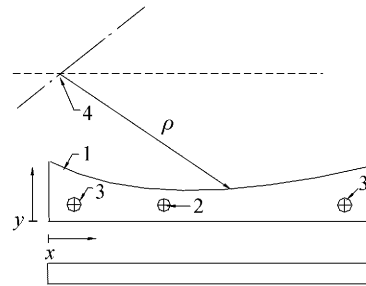


图 3 椭圆弯晶基底的结构参数示意图

1: 分析晶体粘贴面; 2: 定位销; 3: 安装孔; 4: 椭圆的后焦点

Fig. 3 Construction sketch of the elliptical curved crystal substrate

1: the surface affixing crystal; 2: locating pin; 3: fixing hole; 4: the back focus of ellipse

由于分析晶体是粘贴在基底上的,要使工作状态的晶格分布接近理想情况的椭圆轮廓实现光线的自聚焦,除了要求晶体粘贴平整外,作为谱仪的关键部件,椭圆晶体基底的设计参数的选择及加工精度就显得非常重要。综合考虑保证谱仪分辨率的前提下,降低椭圆基底的长度及加工制造难度等因素,选取椭圆焦距  $2c = 1350$  mm,  $e = 0.9586$ ,由椭圆方程可以得到  $a = 704.15$  mm,  $b = 200.5$  mm。在布拉格角为  $\theta = 30\sim 67.5^\circ$  的情况下,由以下公式可以得出弯晶基底的其他参数,如图 3 所示。

基底上点的坐标

$$y = \frac{b^2}{c \cdot \tan\theta}, x = a \cdot \sqrt{1 - \frac{y_0^2}{b^2}}$$

谱线探测角:  $\beta = \theta + \cos^{-1}\left(\frac{\cos\theta}{e}\right)$ ;

基底长度:  $L_{P_1P_2} = a \int_{\arccos\frac{x_1}{a}}^{\arccos\frac{x_2}{a}} \sqrt{1 - e^2 \cos^2 t} dt$ 。

由以上公式,可以计算得到基底长度  $L = 126$

mm;谱线探测角范围  $\beta = 55.4 \sim 133.0^\circ$ 。

基底材料采用不锈钢,切割加工后用三坐标测量机检验相对于理想椭圆轮廓的误差。椭圆工作面未经表面处理,用环氧树脂作粘结剂。将解理、定向切割后的厚度为 0.08~0.2 mm 不等的晶体薄片与基底粘贴牢固,根据不同的晶体种类控制粘结的时间、温度、湿度及压力等条件,保证粘贴晶体后的椭圆分析器工作面平整、无裂纹、无气泡。分析器通过定位销及螺钉与安装板连接,谱仪瞄准对中时分析器可绕销钉小范围转动。

### 3 谱线位置误差分析

影响椭圆弯晶谱仪分辨率的因素有很多,这里重点分析了当 X 射线源与椭圆前焦点不重合,射线源几何尺寸不能忽略时,未通过椭圆前焦点的 X 射线由理想椭圆面反射在椭圆后焦点附近造成的位置误差,从而可以对探测器上接收到的相对于理想情况有位移误差的谱线位置进行矫正,得到正确的波长分辨率。在  $\theta$  角一定的情况下,上述位置误差的计算过程如下。

由基底上点的坐标

$$y_0 = \frac{b^2}{c \cdot \tan\theta}, x_0 = a \sqrt{1 - \frac{y_0^2}{b^2}},$$

可以得到过  $(x_0, y_0)$  点的椭圆切线方程为:  $\frac{x_0 x}{a^2} +$

$\frac{y_0 y}{b^2} = 1$ , 它的斜率为  $k_1 = -\frac{b^2 x_0}{a^2 y_0}$ 。由椭圆的几何性质及布拉格反射性质,该切线平分夹角为  $2\theta$  的两条

直线  $L_1, L_2$ , 由两直线夹角公式得到  $L_1, L_2$  方程为

$$y - y_0 = k_2^{(1)}(x - x_0), y - y_0 = k_2^{(2)}(x - x_0),$$

其中

$$k_2^{(1)} = \frac{k_1 - \tan\theta}{\tan\theta \times k_1 + 1}, k_2^{(2)} = \frac{\tan\theta + k_1}{1 - \tan\theta \times k_1},$$

将  $|k_2|$  值较小的直线方程与  $x = -675$  联立解出偏离  $y$  值,  $|k_2|$  值较大的直线方程与  $y = 0$  联立解出直线  $L_2$  与  $x$  轴的交点,从而得出后焦点  $F_2$  附近偏离

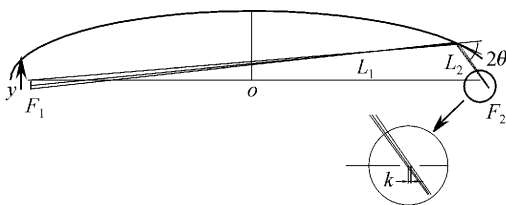


图 4 光源偏离轴线的示意图  
Fig. 4 The schematic of source off axis

值  $k$ 。对以上的计算结果分析得出,光源在  $y$  方向(如图 4)的偏离值越大,在椭圆后焦点附近造成的位置误差就越大,它们之间的关系见图 5。由于谱仪的工作距离很长,光源在  $x$  方向和  $z$  方向的偏离在探测器上引起的谱线位置误差很小。因此,在进行瞄准对中时要特别注意在  $y$  方向的精确对中。

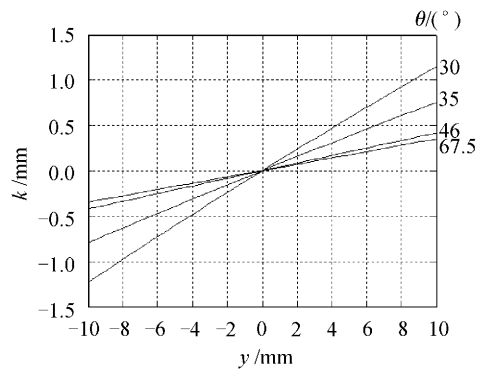


图 5 光源偏离轴线引起的误差  
Fig. 5 Error caused by off-axis of source

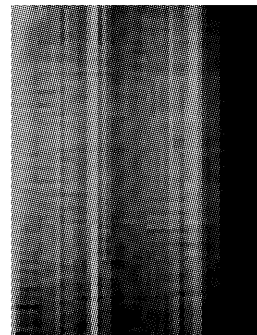


图 6 软 X 射线 CCD 接收到的谱线图  
Fig. 6 Spectrum photograph recorded by soft X-ray CCD

### 4 实验结果及分析

实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理国家实验室的“神光 II”靶室上进行的。聚焦 8 路三倍频激光束(260 J)于真空靶室内的双点背光 Au 靶表面,产生激光等离子体 X 射线光源。谱仪在相对于靶面法线成  $20^\circ$  的方向上进行观测。分析晶体为 PET,采用  $1340 \times 1300$  面阵软 X 射线 CCD 在空间分辨通道上进行接收。在 8 路超短脉冲激光辐照下,由 X 射线 CCD 记录的 Au 靶 X 射线发射谱信号见图 6,图中谱线条纹清晰可见。图 7(a)和(b)是用 Microcal Origin 软件处理过的谱线数据,采用三点外推法将像素与强度之间的关系转换为波长与强度之间的关系,图 7(b)标示出了波长范围在 0.6~0.7 nm 范围内的部分峰值波长。

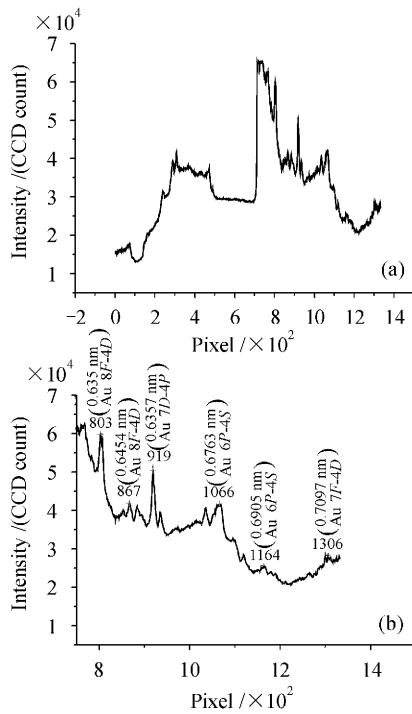


图 7 X 射线 CCD 接收到的 Au 靶发射谱  
(a) 全部谱线; (b) 波长在 0.6~0.7 nm 之间的谱线  
Fig. 7 Emission spectra from Au-target plasma

(a) the overall spectrum;  
(b) the spectrum in the range of 0.6~0.7 nm

计算结果表明实测值与理论值吻合得较好。

## 5 结 论

设计了用于激光等离子体 X 射线诊断的椭圆弯晶谱仪, 给出了弯晶谱仪的设计参数, 分析了光源偏离椭圆轴线造成的误差。通过在“神光 II”靶室上

进行打靶实验, 利用 X 射线 CCD 相机和 PET 椭圆晶体分析器获取了谱线图, 实验结果表明实测谱线波长与理论值相吻合。

该椭圆弯晶谱仪不但具有谱分辨率高、空间分辨率和灵敏度高、摄谱范围宽、无像差等优点, 还具有等光程而便于空间分辨测量的突出特点。因此, 特别适用于激光等离子体 X 射线的光谱学研究, 该仪器填补了国内 0.2~2 nm X 光光谱诊断的空白, 对我国能源利用领域和国防领域具有重要贡献。

## 参 考 文 献

- 1 X. Feng, M. H. Liu, S. Lee. A transmission grating spectrograph and its application in both laser plasma and plasma focus [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(8):3068~3073
- 2 B. L. Henke, H. T. Yamada, T. J. Tanaka. Pulsed plasma source spectrometry in the 80~8000 eV X-ray region [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**(10):1311~1315
- 3 Fan Pinzhong, Zhang Zhengquan. Dispersion curve and wavelength determination in flat-crystal X-ray spectrograph [J]. *Chinese J. Lasers*, 1991, **18**(2):88~93  
范品忠, 张正泉. X 射线平晶谱仪色散曲线和波长的确定 [J]. *中国激光*, 1991, **18**(2):88~93
- 4 Yang Guohong, Zhang Jiyan, Zhang Baohan *et al.*. Analysis of fine structure of X-ray spectra from laser-irradiated gold dot [J]. *Acta Physica Sinica*, 2000, **49**(12):2389~2393  
杨国洪, 张继彦, 张保汉 等. 金激光等离子体 X 射线精细结构谱研究 [J]. *物理学报*, 2000, **49**(12):2389~2393
- 5 Liu Zhi, Li Ruxin, Jia Tianqing *et al.*. New planar crystal X-ray spectrometer with independent wavelength calibration ability [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(2):167~170  
刘 智, 李儒新, 贾天卿 等. 平晶谱仪谱线波长的直接标定 [J]. *中国激光*, 2003, **30**(2):167~170
- 6 Xiong Xiancai, Zhong Xianxin, Xiao Shali *et al.*. Analysis of the transmission efficiency of a two-channel elliptical crystal spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **10**(6):592~596  
熊先才, 钟先信, 肖沙里 等. 双通道椭圆弯晶谱仪的传递效率分析 [J]. *光学精密工程*, 2002, **10**(6):592~596