

文章编号: 0258-7025(2009)01-0115-04

Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪

王洪建¹ 肖沙里¹ 施 军¹ 黄显宾² 杨礼兵² 蔡红春² 周少彤² 张思群² 钱家渝¹

(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流体物理研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 为了测量 Z 箍缩等离子体 X 射线的空间分辨光谱, 利用椭圆聚焦原理, 研制了一种椭圆晶体谱仪。以 Si(111) 椭圆弯晶作为色散分析元件, 椭圆的离心率为 0.9480, 焦距为 1348 mm, 布拉格角范围为 30°~54°, 谱线探测角范围为 54°~103°, 探测的波长范围为 0.31~0.51 nm。设计了半径为 50 mm 的半圆型胶片暗盒, 内装胶片接收光谱信号。分析了椭圆的弥散度对光谱分辨率的影响。在“阳”加速器装置上进行摄谱实验, 胶片成功获取了氩喷气等离子体 X 射线的跃迁光谱, 实测谱线分辨率 ($\lambda/\Delta\lambda$) 达 300~500, 波长与理论值吻合。

关键词 光学器件; 等离子体光谱学; 椭圆弯晶谱仪; Z 箍缩; X 射线

中图分类号 TH744.15; O434.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0115

Elliptically Bent Crystal Spectrometer for Z-Pinch Plasma X-Ray

Wang Hongjian¹ Xiao Shali¹ Shi Jun¹ Huang Xianbin² Yang Libing²
Cai Hongchun² Zhou Shaotong² Zhang Siqun² Qian Jiayu¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and System,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

²Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract An elliptical crystal spectrometer has been developed based on elliptical focusing principle to diagnose spatial spectrum of X-ray of Z-pinch plasma. An elliptically bent Si(111) crystal was employed with 1348 mm focal length, 0.9480 eccentricity, 30°~54° Bragg angel, 54°~103° viewing angle and 0.31~0.51 nm spectral range. A semicircle film carrier with 50 mm radius was designed to receive spectral signals. The influence of elliptical dispersion on spectral resolution was analyzed. The first experiment was carried out on the Yang accelerator. The transition spectrum of Ar jet plasma X-ray was recorded. The measured wavelength is accorded with the theoretical value with spectral resolution $\lambda/\Delta\lambda$ of 300~500.

Key words optical devices; plasma spectroscopy; elliptically bent crystal spectrometer; Z-pinch; X-ray

1 引 言

X 射线光谱仪是高温等离子体诊断的关键设备^[1]。由于等离子体发射光谱中含有大量的关于等离子体温度、尺寸、密度和电离状态等参量, 通过 X 射线能谱强度及其分布的诊断可推断等离子体的辐射总量、电子温度、电子密度和等离子体不透明度等参数^[2]。研究 Z 箍缩等离子体辐射软 X 射线能谱分布, 有助于加深对该等离子体的物理过程及其辐射特性的理解^[3]。自 20 世纪 90 年代以来, Z 箍缩

研究工作取得了重大进展, 如美国 Sandia 国家实验室 Z 装置驱动的 Z 箍缩所产生的高强度 X 射线环境可应用于惯性约束聚变(ICF)和武器物理实验研究^[4], 驱动电流达 20 MA, X 射线辐射功率为 280±40 TW^[5]。

Heeter 等^[6]用邻苯二酸氢铷(RAP)椭圆弯晶在 Omega 激光装置上获得的光谱分辨为 300~500。Lake 等^[7]利用 PET 椭圆弯晶在 Z 装置上测量高能量密度等离子体研究中, 光谱分辨率约为

收稿日期: 2007-11-26; 收到修改稿日期: 2008-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(10576041)和国家 863 计划资助项目。

作者简介: 王洪建(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等的研究。E-mail: whj_cqu@163.com

导师简介: 肖沙里(1953—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等的研究。

800。高洁等^[8]用季戊四醇(PET)椭圆弯晶和平面 CCD 探测器在“神光 II”靶室上测试了 Au 靶激光实验,验证了测量光谱与理论波长相吻合。本文在中国工程物理研究院“阳”加速器上完成,对氩喷气 Z 箍缩辐射的 X 射线作了测量,选用 Si(111)作为色散元件,晶格常数 $2d = 0.6271 \text{ nm}$,设计半径为 50 mm 的半圆形感光胶片获得了等离子体 X 射线谱线。光谱分辨率为 300~500,适合 Z 箍缩等离子体诊断。

2 椭圆弯晶设计原理及结构

椭圆弯晶谱仪的工作特点是从椭圆一个焦点光源发出的光线经椭圆晶体面反射必会聚于另一焦点上。后焦处设置一条狭缝,通过狭缝的射线射到探测胶片上被记录下来。光学系统原理如图 1 所示。椭圆的几何关系可以推导出设计光路的几个关键数^[9]

$$\begin{cases} x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1 \\ c = \sqrt{a^2 - b^2} \\ e = c/a \end{cases}, \quad (1)$$

式中 a 为椭圆长半轴, b 为短半轴, c 为半焦距, e 为离心率。图 1 中各参数的含义为: θ 为布拉格角, β 为谱线探测角。这里忽略了晶体折射效应, Bragg 方程为

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

式中 n 为衍射阶数。利用(1),(2)式,得到谱线探测角 β 的函数

$$\beta = \theta + \arccos\left(\frac{\cos \theta}{e}\right). \quad (3)$$

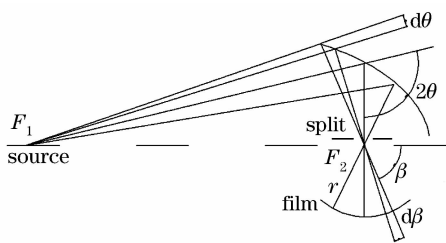


图 1 椭圆弯晶谱仪的几何示意图

Fig. 1 Geometry of the elliptically bent crystal spectrometer

由于半圆形胶片圆心与椭圆的后焦点重合,所以该谱仪还具有等光程的优点。光线经椭圆后焦点(散射狭缝)在圆形胶片上感光成像,而成像位置与胶片起点的弧长 l 为

$$l = r\beta, \quad (4)$$

这里 r 为半圆形胶片半径。当 $\beta = \pi/2$ 时,入射光垂直通过后焦点,成像在胶片的正中。当实际光路大于设计光路,即远离椭圆中心时,则 X 射线经晶体反射后的交点在后焦点上方,光谱在胶片上的间距大;反之,光谱间距小。待标记光谱在胶片上与已知光谱的弧长差 $\Delta l = l - l_0$,由(4)式推出椭圆几何对应的观测角 β ,再由三角函数关系,推出分析器上 θ 为

$$\theta = \arctan\left(\frac{1 - \epsilon \cos \beta}{\epsilon \sin \beta}\right), \quad (5)$$

式中 $d\beta$ 和 $d\theta$ 的关系为^[9]

$$\frac{d\beta}{d\theta} = \frac{e^2 + 1 - 2e \cos \beta}{e(e - \cos \beta)}, \quad (6)$$

则波长沿探测圆的弥散度为

$$\frac{\lambda}{2d} = \sin \theta = \frac{1 - \epsilon \cos \beta}{\sqrt{1 + \epsilon^2 - 2\epsilon \cos \beta}}. \quad (7)$$

椭圆弯晶探测光谱,波长沿探测圆的弥散度与离心率密切相关,如图 2 所示。从图中可以看出,离心率确定后,对同一种晶体而言,测量的波长随探测角增大而增大,而分辨率随探测角增大而减小^[10]。

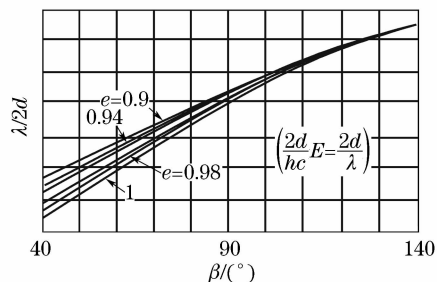


图 2 波长沿探测圆的弥散度曲线

Fig. 2 Wavelength dispersion along the detection circle

3 实验数据及分析

3.1 实验

“阳”加速器是一台太瓦级的脉冲功率装置^[11],在 $\pm 50 \text{ kV}$ 的工作电压下,负载电流约 623 kA,从 10%~90% 的上升时间约为 79 ns,靶室的真空度为 $1.2 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ 。当电磁阀开启后,高压储气室内的气体通过拉瓦尔喷嘴产生沿轴心对称的圆环形气柱。实验中利用两个同型面不同出口宽度的喷嘴进行了氩气 Z 箍缩实验,其中储气室压力为 $4.05 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

实验时用 Si(111)椭圆晶体分析器作色散元件,只有满足(2)式的光才能发生掠入衍射,得到对应的波长 λ 。为了保证固定椭圆基底上的分析晶体弯曲半径接近理想的椭圆半径,实现 X 射线的自聚焦,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显

得非常重要。用微米级误差精度的数控机床加工处理椭圆不锈钢基底，表面粗糙度 $R_a = 1.6$ ，其他参数 $2c = 1348 \text{ mm}$ ， $e = 0.9480$ ， $a = 711 \text{ mm}$ ， $b = 226 \text{ mm}$ 。在常温下将 Si 薄片 ($125 \text{ mm} \times 7.8 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$) 弯曲后，用环氧树脂平整粘贴在椭圆基底上。谱仪安装在“阳”加速器上，如图 3 所示， $\theta = 30^\circ \sim 54^\circ$ ， $\beta = 54^\circ \sim 103^\circ$ ，探测波长 λ 范围为 $0.31 \sim 0.51 \text{ nm}$ 。设计光谱分辨率为 800，主要峰值的软 X 射线脉冲半峰全宽 (FWHM) 为几皮米。在胶片盒的狭缝，采用蒸镀或其他方法制作一层很薄的铝膜 (如 $80 \mu\text{m}$) 贴封，挡住低能 X 射线和杂散光。记录氩等离子体 X 射线的光谱图像如图 4 所示。

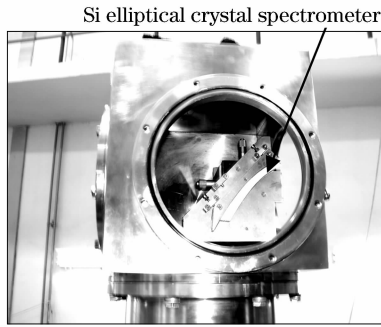


图 3 硅晶体谱仪安装在“阳”加速器上
Fig. 3 Photo of the elliptically bent Si crystal spectrometer on Yang accelerator



图 4 空间分辨光谱照片

Fig. 4 Photo for spatial resolved spectrum

3.2 结果分析

根据已知共振线波长和三点外推法原理，先利用 WinView32 软件对图谱进行数据处理，再用 Microcal Origin 6.0 和 Matlab7.0 软件，将像素与强度之间的关系转换为波长与相对强度之间的关系，计算峰值像素点对应的谱线波长，如图 5 所示。图 6 反映的是 $0.394 \sim 0.4 \text{ nm}$ 波长的类氢和类锂伴线，记录到了类氢拉曼 L_{y,α_1} 线 ($1s^2 S_{1/2} - 2p^2 P_{3/2}$)，

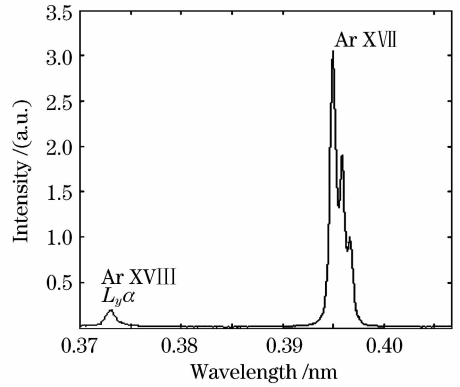


图 5 Si 晶体谱线强度分布图
Fig. 5 Si crystal spectrum intensity

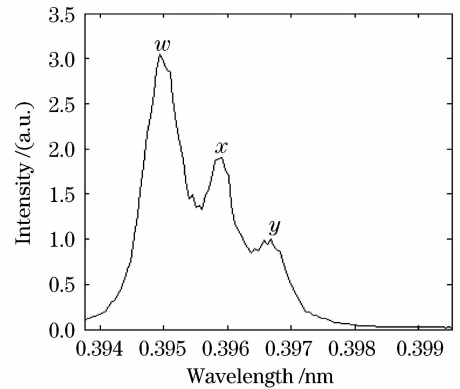


图 6 类氢线和伴线

Fig. 6 Spectrum of He-like and satellites

相对强度低，只有 0.2，峰值波长与 Peacock 等^[12]所测的 L_{y,α_1} 线波长相差 0.0001 nm ，而该“拉曼系”线半峰全宽在 $0.3725 \sim 0.3737 \text{ nm}$ ，已包含了 L_{y,α_2} 线 ($1s^2 S_{1/2} - 2p^2 P_{1/2}$)。类氢共振线 $w(1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1)$ ，磁四极线 $x(1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_2)$ 和互组合线 $y(1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_1)$ 强度较强，峰值波长与 Peacock 等^[12]和 Weinheimer 等^[13]所测的结果数据相比误差在 $0.0001 \sim 0.0007 \text{ nm}$ 之间，误差率在 $0.025\% \sim 0.21\%$ 。主要峰值数据及跃迁过程和特征如表 1 所示。

在研究 Z 箍缩内爆实验光谱中，观察到类氢和类氦光谱^[14]。类氢共振线 w 强度最强，FWHM 较小，信噪比高，分辨率较高 ($\lambda/\Delta\lambda = 493$)。 x 和 y 线

表 1 谱线波长及相对误差

Table 1 Wavelength of spectra and relative error

Label	Transition	Ion ^[12]	Theory λ/nm ^[12]	Theory λ/nm ^[13]	Measurement λ/nm	Comparison error /nm	$\theta/(^\circ)$
L_{y,α_1}	$1s^2 S_{1/2} - 2p^2 P_{3/2}$	X VIII	0.3731	—	0.3732	+0.0001	36.52
w	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^1P_1$	X VII	0.3949	0.3949	0.3950	+0.0001	39.04
x	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_2$	X VII	0.3965	0.3966	0.3959	-0.0007	39.15
y	$1s^2 \ ^1S_0 - 1s2p \ ^3P_1$	X VII	0.3969	0.3970	0.3967	-0.0003	39.24

因能级宽度有限,谱线的形状不锋锐和急促,加之伴线 s, t, m, r, a 等谱线影响^[15],分辨率($\lambda/\Delta\lambda$) 分别为 438 和 367。由于谱仪实际安装误差和受弥散度影响,没有获取禁戒线信号。

4 结 论

研制的椭圆晶体谱仪能够用于测量 Z 箍缩等离子体 X 射线的光谱分辨,是一种新型、价廉、实用的箍缩实验研究诊断仪器。用 Si(111)椭圆晶体分析器和配备的半圆型胶片在“阳”加速器靶室上成功地获取了氦等离子体 X 射线的谱线,实验结果表明,该谱仪的实测主要谱线波长与理论值相吻合。

该椭圆弯晶谱仪谱分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 达 300~500,比设计分辨率低,故还需要对光路、晶体分光计材料(如衍射空间中心对称性)、椭圆基面加工等设计改进,以及采用精准定位安装技术,进一步提高空间分辨率和灵敏度,更好地应用于 Z 箍缩等离子体 X 射线光谱诊断。在晶体内同时安装相互垂直的椭圆分析器,也可用于等离子体射线极化光谱学研究。

致谢 感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 108 室电磁内爆及阳加速器运行组大力协助。

参 考 文 献

- 1 S. G. Anderson, R. F. Heeter, R. Booth *et al.*. Broadband high-resolution elliptical crystal x-ray spectrometer for high energy density physics experiments [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(6):063115
- 2 Li Fengping, Den Jianjun, Zou Xiaobing *et al.*. X-ray radiation of neon gas puff Z-pinch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8):1405~1408
李丰平,邓建军,邹晓兵等. 喷气 Z 箍缩 X 光辐射信号分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(8):1405~1408
- 3 Zou Xiaobing, Wang Xinxin, Zhang Guixin *et al.*. Study of soft X-ray energy spectra from gas-puff Z-pinch plasma [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(3):1289~1294
邹晓兵,王新新,张贵新等. 喷气式 Z 箍缩等离子体辐射软 X

- 射线能谱的研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(3):1289~1294
- 4 Yang Jianlun, Li Zhenghong, Xu Rongkun *et al.*. Time-space-resolved diagnostic technique for Z-pinch plasma investigation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2):234~240
杨建伦,李正宏,徐荣昆等. Z-pinch 内爆等离子体时空分辨诊断技术[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(2):234~240
- 5 C. Deeney, M. R. Douglas, R. B. Spielman *et al.*. Enhancement of X-ray power from a z pinch using nested-wire arrays [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1998, **81**(22):4883~4886
- 6 R. F. Heeter, J. A. Emig, K. B. Fournier *et al.*. X-ray spectroscopy with elliptical crystals and face-on framing cameras [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, **75**(10):3762~3764
- 7 P. W. Lake, J. E. Bailey, G. A. Rochau *et al.*. Twin-elliptical-crystal time- and space-resolved soft x-ray spectrometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**:10F315
- 8 Gao Jie, Zhong Xianxin, Xiong Xiancai *et al.*. Elliptical crystal spectrometer designed for laser-produced plasma X-ray [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(2):180~183
高洁,钟先信,熊先才等. 激光等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪的设计[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2):180~183
- 9 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):1311~1330
- 10 Xiao Shali, Shi Jun, Lei Xiaoming *et al.*. Characteristic and application of elliptical curved LiF crystal analyzer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(6):824~828
肖沙里,施军,雷小明等. 氟化锂椭圆弯晶分析器的特性及应用[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(6):824~828
- 11 Huang Xianbin, Yang Libing, Gu Yuanchao *et al.*. Experimental studies of the argon-puff Z-pinch implosion process [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(4):1900~1906
黄显宾,杨礼兵,顾元朝等. 氩气 Z 箍缩内爆动力学过程实验研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(4):1900~1906
- 12 N. J. Peacock, R. Barnsley, M. G. O. Mullane. Ionization balance in EBIT and Tokamak plasmas [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1):1250~1255
- 13 J. Weinheimer, I. Ahmad, O. Herzog *et al.*. High-resolution x-ray crystal spectrometer/polarimeter at torus experiment for technology oriented research-94 [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(6):2566~2574
- 14 C. A. Coverdale, C. Deeney, A. L. Velikovich *et al.*. Neutron production and implosion characteristics of a deuterium gas-puff Z pinch [J]. *Physics of Plasmas*, 2007, **14**(2):022706
- 15 TFR Group, M. Cornille, J. Dubau *et al.*. Charge-dependent wavelength shifts and line intensities in the dielectronic satellite spectrum of heliumlike ions [J]. *Phys. Rev. A*, 1985, **32**(5):3000~3004