

文章编号: 0258-7025(2010)03-0685-04

金丝 Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究

王洪建^{1,2} 肖沙里¹ 施 军¹ 黄显宾³ 蔡红春³ 徐道连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 重庆工商大学重庆市发展信息管理工程技术研究中心, 重庆 400067
³ 中国工程物理研究院流体物理研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了测量波长在 0.2~2 nm 范围内的金丝内爆 X 射线的空间分辨光谱, 利用椭圆自聚焦原理, 研制了一种椭圆晶体谱仪。季戊四醇(PET)(002)椭圆弯晶作为色散分析元件, 其离心率为 0.9480, 焦距为 1348 mm, 布拉格角范围为 30°~67.5°。设计了半径为 50 mm 的半圆型胶片暗盒, 内装 X 光胶片接收光谱信号。在“阳”加速器装置上先沿 X 射线水平方向进行摄谱实验, 然后将谱仪沿 X 射线轴旋转 90°, 再进行金丝内爆实验。两次实测金丝内爆等离子体 X 射线的跃迁光谱相符, 谱线分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)达 300~600。实验结果表明该谱仪适合金丝内爆等离子体 X 射线的光谱学研究。

关键词 光谱学; 等离子体光谱学; 椭圆弯晶谱仪; 丝阵 Z 箍缩; X 射线诊断

中图分类号 TH 744.15, O434.13 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103703.0685

Elliptical Crystal Spectrometer Researched for Z-Pinch Plasma X-Ray by Using Au-Wire Arrays

Wang Hongjian^{1,2} Xiao Shali¹ Shi Jun¹ Huang Xianbin³ Cai Hongchun³ Xu Daolian¹

¹ Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China
² Chongqing Engineering Technology Research Center for Information Management in Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
³ Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract To diagnose the presence of electron beams in Z-pinch plasma in spectral range of 0.2~2 nm, two channel X-ray spectrometers respectively using have desirable properties for applications requiring broad spectral coverage, good spectral resolution, and minimized source broadening. A new space resolved focusing elliptical curved crystal spectrometer has been developed and applied to diagnose X-ray of Z-pinch plasma based on focusing spectrograph spatial resolution (FSSR). An elliptical PET(002) crystal was employed with 1348 mm focal length, 0.9480 eccentricity and 30°~67.5° Bragg angle. The first experiment was carried out on the Yang accelerator and aimed to investigate the characteristics of high-density plasma and the second did with the spectrometer rotated 90°. X-ray spectra in an absolute intensity scale were obtained from Au-wire Z-pinch plasmas recorded by half-circle X-ray film with radius of 50 mm. It was demonstrated experimentally that the two measured wavelength were same, with spectral resolution $\lambda/\Delta\lambda$ of 300~600, and that spectrograph of elliptically bent PET crystal was a good tool for diagnosing Z-pinch plasmas.

Key words spectroscopy; plasma spectroscopy; elliptically bent crystal spectrometer; wire array Z-pinch; X-ray diagnosis

收稿日期: 2009-04-17; 收到修改稿日期: 2009-07-02

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

作者简介: 王洪建(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事光学精密仪器、测试及控制等方面的研究。

E-mail: whj_cqu@163.com

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

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn

1 引 言

电磁驱动的快速 Z 箍缩^[1~3]等离子体是一个具有广阔应用前景的强 X 射线辐射源。由于等离子体 X 射线光谱中含有大量的关于等离子体温度、密度、尺寸和电离状态等信息,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 80 年代以来,先后建成了俄罗斯的 Angara-5-1 装置(6 MA)、美国 Sandia 实验室的 Saturn 装置(10 MA),以及 PBFA-Z (18~20 MA,1996 年改成 Z 装置)装置。20 世纪 80 年代后期,出现了丝阵内爆负载新物理思想,1992~1994 年美俄通过联合实验验证。1997 年美国 Sandia 实验室在脉冲功率装置 PBFA-Z 的丝阵实验中,取得了 18 MA 电流, X 光功率 290 TW, X 光能量 1.8 MJ,能量转换效率大于 15%,黑腔辐射场温度高于 155 eV 的新水平。国内有中国工程物理研究院“阳”加速器(0.5~1.0 MA),西北核技术所强光一号装置(1~2 MA)。利用 Z 箍缩内爆等离子体物理研究,可创造更好的实验室环境,有利于开展武器库存管理计划、高能密度物理、动力学材料特性、辐射输运及辐射效应和惯性约束聚变(ICF)等研究。

Lake 等^[4]利用季戊四醇(PET)椭圆弯晶在 Sandia 实验室 Z 装置上测量高能密度等离子体研究中,光谱分辨率约为 800,信噪比大于 10。熊先才等^[5]用 PET 椭圆弯晶和 CCD 在“神光 II”靶室上测试了 Au 靶激光实验,谱分辨达到了 0.002 nm,此外熊先才等还上下对称布置 KAP 椭圆晶体测量。本实验在中国工程物理研究院“阳”加速器上完成,在水平和垂直相互正交的方向,安装 PET(002)椭圆弯晶对金丝内爆辐射的 X 射线做了两次测量,其弯晶晶格常数 $2d = 0.8742 \text{ nm}$,采用半径为 50 mm 的半圆型感光胶片获得了等离子体 X 射线谱线。光谱分辨率为 300~600,适合丝阵 Z 箍缩等离子体诊断。

2 测量原理

2.1 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^[6]。弯晶谱仪的光路布置如图 1 所示。软 X 射线源位于真空靶室的球心上(即两个椭圆的同一个前焦点),在软 X 射线入射到相互正交的两个通道的椭圆晶体上发生衍射,并分别会聚到两个椭圆的后焦点,最后经胶片盒的滤光膜(如 $80 \mu\text{m}$ 铝膜),

截止 2 nm 以上的软 X 射线并挡住杂散光,通过狭缝到达软 X 射线胶片相机,这样在两个通道上分别进行软 X 射线的空间分辨测量。

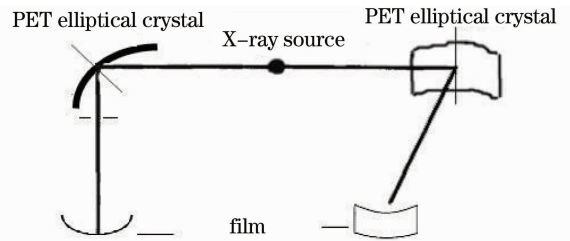


图 1 双通道 X 射线诊断实验方案

Fig. 1 Scheme for experimental analysis of two channel crystal for X-ray line profiles

2.2 晶体分光法

晶体分光法是一种经典而又精密的分解 X 射线谱的方法。在高温等离子体 X 射线能谱诊断过程以及闪光 X 射线频谱的测量过程中,用晶体作为分光元件是相当方便的,因为晶体中原子间距与 X 射线波长相近,故可作为 X 射线谱的分光光栅。投射到晶体上的多色 X 射线束,受到晶体中原子的散射,由于晶体点阵中原子的排列规则有周期,因而它们所散射的 X 射线之间具有一定的相位和光程差关系,在某一确定方向上便会产生相加的干涉,形成衍射光束。这种干涉的结果使得不同入射角的连续谱在不同方向上形成不同波长的单色 X 射线。在某一给定方向的衍射光束也可以定义为相互加强的大量同波长平行散射光线所组成的光束。由此可见,衍射在实质上仍是一种分立的而非均匀分布的特定方向上的散射现象,可由晶体布拉格(Bragg)衍射定律描述,满足条件^[7]

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

式中 n 为衍射阶数(正整数,满足 $n \geq 1$), λ 为被衍射的波长, d 为晶面的面距离, θ 为入射 X 射线与晶面的夹角。给定结构的晶体,不同的 θ 角对应不同的波长。

根据分析器 θ 与观察角 β 的几何关系,可以推出

$$\theta = \arctan[(1 - \cos\beta)/(\cos\beta)], \quad (2)$$

$$\beta = \theta + \arccos(\cos\theta/e), \quad (3)$$

式中 e 是椭圆晶体的离心率。运用(2)式和(3)式可以根据已知谱线和对应位置(观测角)推导出其他谱线的波长或者光子能量。

3 实验数据及分析

3.1 实 验

“阳”加速器是一台大电流脉冲功率装置,其主要

部件包括 Marx 发生器、布鲁姆林(Blumlein)脉冲形成线、主开关、传输线、磁绝缘传输线(MITL)和负载区。其最大短路电流约 1 MA, 上升时间 85 ns, 匹配阻抗 0.5 Ω, 可作为快 Z 箍缩实验脉冲驱动源^[8,9]。实验中设计了 3 丝的金丝负载, 如图 2 所示。金属丝阵平行地安装在阴阳电极上, 以减小负载初始电感和阻抗。另外, 在负载的阳极端设计了可自调节的压簧片, 很好地解决了实验中金属丝弯曲或折断问题, 使各金属丝能够平行地紧绷在阴阳电极之间, 保证了平行面多金属丝负载的初始一致性。

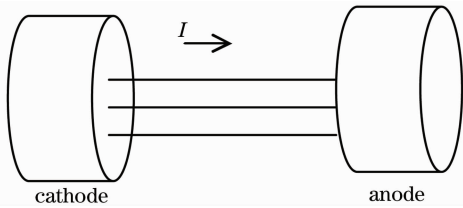


图 2 平行的金丝负载示意图

Fig. 2 Schematic of parallel Au wire load

实验用 PET(002)($2d = 0.8742 \text{ nm}$)椭圆晶体分析器作色散元件, 只有满足(1)式的射线才能发生掠入衍射, 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就显得非常重要。采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 $R_a = 1.6$, 其参数 $2c = 1348 \text{ mm}$, $e = 0.9480$, $a = 711 \text{ mm}$, $b = 226 \text{ mm}$ 。在常温下将 PET 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, 保证晶体与椭圆基座同面。谱仪安装在“阳”加速器上如图 3 所示, Bragg 角 $\theta = 30^\circ \sim 67.5^\circ$, $\beta = 54^\circ \sim 120^\circ$, 探测波长 λ 范围为 $0.44 \sim 0.81 \text{ nm}$ 。在水平方向采用 PET 晶体, 丝阵内爆后取出胶片显影, 再将晶体谱仪旋转 90° , 即晶体谱仪由沿 X 射线水平方向变成垂直方向, 然后再进行金丝内爆实验。两次都用 X 射线胶片接收信号, 记录水平和垂直方向的丝爆等离子体 X 射线的光谱图像如图 4 所示。

3.2 实验结果分析

实验结果利用 WinView32 软件对图谱进行数据处理, 得到沿 X 方向的截面图。图 5 反映的是 PET 弯晶获取的谱线光子能量与光强的关系, 波长范围为 $0.6 \sim 0.8 \text{ nm}$ 。进行寻峰处理, 得到谱线峰值的像素位置。图 5(a)为金等离子体 X 射线的水

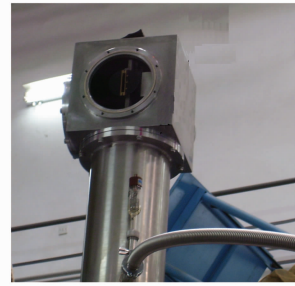


图 3 “阳”加速器上的 PET 弯晶谱仪

Fig. 3 Photo of the elliptical PET bent crystal spectrometer on Yang accelerator

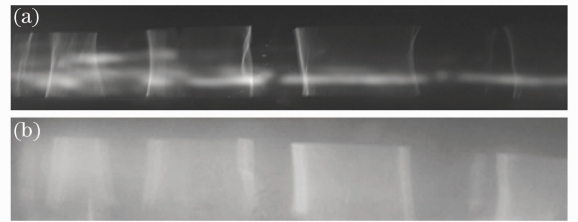


图 4 金丝空间分辨光谱照片。(a)PET 晶体水平方向获取的信号;(b)PET 晶体垂直方向获取的信号

Fig. 4 Photo for spatial resolved spectrum of Au arrays

(a) spectrum obtained with the parallel PET; (b) with the perpendicular PET

平的光谱分布图, 最高峰值为 148, 信噪比高于垂直方向的信号, 半峰全宽(FWHM)较低, 光谱分辨率^[10]为 $\lambda/\Delta\lambda = 580$ 。而图 5(b)为等离子体垂直方向的信号, 由于胶片显影时间不一致, 胶片图像存在背光干涉, 信噪比差。利用最小二乘法拟合算法^[11], 先将谱线的基底拟合一条曲线, 然后将光谱信号减去这条曲线得到光谱的实际曲线, 最后计算其光谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda = 315$), 比水平方向的光谱分辨率低, 见表 1。

表 1 水平和垂直方向金丝光谱信号的光子能量及分辨率

Table 1 Data for Au-array plasmas energy and resolution of two perpendiculars PET crystals

Number of pixel point	1	2	3	4	5	6	7
Parallel photo energy /eV	1532	1566	1614	1695	1740	1834	1919
Parallel resolution /($\lambda/\Delta\lambda$)	437	348	358	580	541	557	504
Perpendicular photo energy /eV	1543	1575	1624	1700	1747	1830	1917
Perpendicular resolution /($\lambda/\Delta\lambda$)	/	/	315	372	359	427	423

由于两次打靶实验时金丝内爆箍缩的驱动能量、

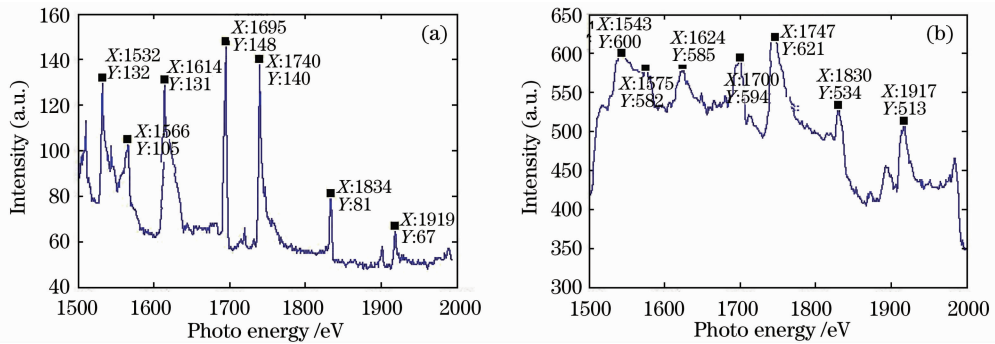


图 5 谱线强度分布图。(a)PET 晶体水平方向获取的谱线;(b)PET 晶体垂直方向获取的谱线

Fig. 5 PET crystal spectrum intensity. (a) obtained with the parallel PET; (b) with the perpendicular PET

真空环境、光程长等参数视为不变,因此产生的等离子体参数不变,发出的 X 射线范围一致。通过实验后对比,两者对应的光子能量位置相符。从光源经晶体到胶片的光程长为 1475 mm,扫描步进精度 35 μm ,可以计算得到其空间分辨率^[12]为 0.018 nm。此外,可以根据水平和垂直方向的光强,以及对应的 Bragg 角,计算箍缩等离子体 X 射线的极化度参数^[13]。

4 结 论

由于 Z 箍缩能量转换效率高,可达 15%~20%,可进行大样品(mm, cm) 和较长持续时间的惯性约束聚变研究,因此 Z 箍缩研究是开展高能密度物理研究的重要手段。研制的椭圆晶体谱仪能够用于测量激光、箍缩等离子体 X 射线的光谱分辨,是一种新型、价廉、适用的箍缩实验研究的诊断仪器^[14,15]。用 PET(002)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波长范围在 0.6~0.8 nm 的金丝内爆等离子体 X 射线的谱线,分辨率 $\lambda/\Delta\lambda$ 达 300~600,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。如果在两通道同时诊断箍缩等离子体 X 射线,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的大力协助。

参 考 文 献

- 1 T. A. Mehlhorn, J. E. Bailey, G. Bennett *et al.*. Recent experimental results on ICF target implosions by Z-pinch radiation sources and their relevance to ICF ignition studies[J]. *Plasma Phys. Control Fusion*, 2003, **45**: A325~A334
- 2 X. J. Peng, X. S. Hua, Z. H. Li *et al.*. Physical studies on fast Z-pinch implosion of the multi-wire liners in CAEP[C]. 15th Conference High-Power Particle Beams. St. Petersburg, 2004
- 3 C. L. Olson. Z-pinch IFE team. Progress on Z-pinch inertial fusion energy (SNL) [C]. 20th IAEA Fusion Energy

- Conference. Vilamoura, 2004
- 4 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
- 5 Xiancai Xiong, Xianxin Zhong, Shali Xiao *et al.*. Elliptically-bent crystal spectrograph for X-ray diagnosis of laser-produced plasmas [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(1): 27~29
- 6 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptically bent crystal spectrometer for Z-pinch plasma X-ray[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 115~118
王洪建,肖沙里,施 军等. Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 115~118
- 7 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
- 8 J. J. Deng, L. B. Yang, Y. C. Gu *et al.*. Puff-gas Z-pinch experiment on “Yang” accelerator [C]. AIP Conference Proceedings, 2002, **651**(1): 135~138
- 9 Huang Xianbin, Lin Libin, Yang Libing *et al.*. Experimental study of parallel multi-tungsten wire Z-pinch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(5): 793~796
黄显宾,林理彬,杨礼兵等. 平行面多金属钨丝 Z 箍缩实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5): 793~796
- 10 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
- 11 Peng Guanghan, Yang Xueheng, Han Zhong *et al.*. Beam hardening fitting correction method for X-ray TICT [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(11): 137~141
彭光含,杨学恒,韩 忠等. X 射线 TICT 中射束硬化拟合校正研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(11): 137~141
- 12 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
- 13 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
- 14 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
- 15 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