

基于对数螺线晶体 Z 箍缩铝等离子体单色成像研究

毋玉芬¹ 肖沙里¹ 阳庆国² 黄显斌² 蔡红春²

(¹重庆大学光电工程学院 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 研究了一种对数螺线柱面晶体配接针孔对 Z 箍缩铝等离子体进行单色谱成像的摄谱成像仪, 摄谱仪具有结构简单、外形尺寸紧凑的特点。由于对数螺线晶体的保角特性, 摄谱成像仪可在较大视场范围内对 Z 箍缩内爆等离子体进行单色谱成像。在“阳”加速器上, 针对 Z 箍缩铝等离子体 K 壳层的 X 射线辐射进行了成像实验, 得到了铝丝阵内爆等离子体的类氢(1727.7 eV)和类氦线(1588.3 eV)单色图像。在箍缩单色图像上观察到了磁瑞利-泰勒不稳定性引起的“热点”及内爆不稳定性造成的螺旋形结构, 反映了等离子体的内爆形态, 为进一步理解 Z 箍缩物理过程和确定等离子体的辐射特性提供了参考。

关键词 X 射线光学; 摄谱成像仪; 对数螺线晶体; Z 箍缩; 铝等离子体; 单色谱成像

中图分类号 O434.13; TL65 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0215003

Monochromatic Imaging of Z-Pinch Al Plasma Based on the Logarithmic Spiral Crystal

Wu Yufen¹ Xiao Shali¹ Yang Qingguo² Huang Xianbin² Cai Hongchun²

¹Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System, Ministry of Education, Optoelectronic Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400030, China

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

Abstract A new type monochromatic X-ray crystal spectrograph which can be used to catch the K-shell line images of the imploding aluminum wire arrays was developed. The core component of the spectrograph is the crystal analyzer which was designed to the shape of logarithmic spiral in meridian plane. By taking advantages of the logarithmic spiral, monochromatic X-ray image of Z-pinch plasma can be obtained with the imager system in large field of view. Experiments have been carried on the "Yang" accelerator. In experiment, the hydrogenlike line (1727.7 eV) and heliumlike line (1588.3 eV) images of the imploding Al wire arrays were obtained. The results showed that the spectrograph can reflect the exploding modality of Z-pinch Al plasma, and multi-hot spots due to magnetic Rayleigh-Taylor instability also appeared on the images.

Key words X-ray optics; X-ray spectrograph; logarithmic spiral crystal; Z-pinch; Al plasma; monochromatic spectrum imaging

OCIS codes 300.6560; 340.7440; 340.7480; 350.5400

1 引言

电磁内爆驱动的 Z 箍缩是一个有广阔应用前景的等离子体辐射源。近年来, 兆安培量级强流加速器上的箍缩研究引起了极大的兴趣, 这既是解决

受控热核聚变问题的途径之一, 也是高功率 X 射线和中子辐射源。为了进一步理解快速 Z 箍缩物理过程和确定等离子体的辐射特性, 需要靶箍缩过程中的等离子体辐射谱信息。Z 箍缩内爆实验形成高

收稿日期: 2011-10-20; 收到修改稿日期: 2011-11-10

基金项目: 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金(10976033)资助课题。

作者简介: 毋玉芬(1982—), 女, 博士研究生, 主要从事 X 射线光学及弯晶成像谱学方面的研究。

E-mail: youyuanff@yahoo.com.cn

导师简介: 肖沙里(1953—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事软 X 射线光谱诊断与分析等方面的研究。

E-mail: xiaoshali@cqu.edu.cn(通信联系人)

温等离子体, 辐射出大量类 H 及类 He 离子 X 射线, 这些 X 射线部分可用于诊断等离子体的形态以及各种状态参数, 如等离子体的电子密度、温度、等离子体的膨胀速度等^[1,2]。在高温高密度等离子体研究中, 确定等离子体电子温度、电子密度等参数的诊断方法包括可见光或者紫外激光探针干涉法^[3,4]、汤姆逊散射法^[5]以及 X 光谱法^[6,7]。与前两种方法相比, X 射线光谱学诊断方法可以获得更高密度区的等离子体状态参数^[8,9], 并且由于采用等离子体自身发射的 X 射线作为诊断工具, 可以避免对等离子体产生干扰, 诊断结果更精确。

弯曲晶体是研究高温高密度等离子体 X 射线光谱强有力的工具^[10~12], 广泛地应用于 X 射线光谱测量和成像技术^[13]。由于 Z 箍缩等离子体的轴向尺寸较大, 通常在十多毫米量级, 采用其他曲面晶体单色成像不能保证整个视场内入射 X 射线的布拉格角一致。已有的参考文献中^[14,15], 多用对数螺线晶体来进行 X 射线衍射分光, 从而进行 X 射线光谱分析, 而其应用在等离子体分光成像中的研究未见相关报道。本文利用对数螺线晶体在大视场范围内的保角特性, 研究了一种对数螺线柱面弯曲晶体配合针孔对 Z 箍缩等离子体进行单色光谱成像的摄谱成像仪, 在“阳”加速器上, 针对 Z 箍缩铝等离子体 K 壳层的 X 射线辐射, 瞄准铝等离子体 K 壳层类氢线 Al Ly α 2(2p $_{1/2}$ -1s $_{1/2}$)和类氦互组合跃迁线 Al He ϵ (1s2p 3 P $_{1-1}$ -1s2 1 S $_0$)分别进行了成像实验。

2 摄谱成像仪成像原理

研究的单色摄谱成像仪采用反射型对数螺线柱面晶体(晶体的晶面在子午平面内被弯曲成对数螺线形, 以下简称对数螺线晶体)作为 X 射线的单色分光与成像器件。对数螺线的几何特性是: 极点和曲线上任一点的连线与该点处曲线切线的夹角都为定值。利用对数螺线的这一性质, 将该夹角取为布拉格角 θ , 则由极点照射到晶体上的每一条光线都与晶体成布拉格角, 若将针孔位置设定在对数螺线晶体的几何原点, 则从光源发出且经过针孔后入射在晶面上的 X 射线, 经晶体衍射后, 受布拉格衍射条件 $n\lambda = 2d \sin \theta$ (λ 为 X 射线波长, d 为晶面间距, θ 为布拉格衍射角, n 为衍射级次) 限制, 成为单色 X 光, 此时若将成像板置于衍射光线的光学路径上, 即可在成像板上得到光源经针孔及晶面衍射后的单色像。成像原理如图 1 所示。

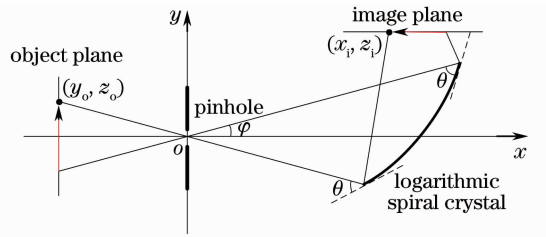


图 1 摄谱成像仪成像原理

Fig. 1 Sketch map of the logarithmic spiral crystal spectrograph

空间极坐标系下, 对数螺线晶体的表面方程可描述为

$$r(\varphi, \delta) = d_c \exp(\varphi \cot \theta) \arccos \delta, \quad (-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0, \quad -W/2 \leq r(\varphi, \delta) \sin \delta \leq W/2), \quad (1)$$

式中 $\varphi_0 = \tan \theta \lg \{ (2d_c)^{-1} [L \cos \theta + (4d_c^2 + L^2 \cos^2 \theta)^{1/2}] \}$, θ 是布拉格入射角, d_c 是针孔到晶面中心的距离, L 是晶体分析器子午方向的弧长, W 是晶体分析器的宽度, δ 是入射光线与 xOy 平面的夹角。为使设计的成像仪结构简单化, 考虑如图 1 所示物平面与 y 轴平行而像平面与 x 轴平行时的情况, 此时, 通过光学追迹计算得到, 物平面上点 (y_0, z_0) 及其对应的像平面上点 (x_i, z_i) 的表达式为

$$\begin{cases} y_0 = -d_0 \tan \varphi \\ z_0 = -d_0 \sec \varphi \tan \delta \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_i = d_c \exp(\varphi \cot \theta) \csc(2\theta + \varphi) \times \\ \quad \sin 2\theta + d_i \cot(2\theta + \varphi) \\ z_i = \csc(2\theta + \varphi) [2d_c \exp(\varphi \cot \theta) \times \\ \quad \cos(\theta + \varphi) \sin \theta + d_i] \tan \delta \end{cases}, \quad (3)$$

式中的 d_0 和 d_i 分别是物平面到 y 轴以及像平面到 x 轴的距离。通过(2)式和(3)式可以得到晶体分析器子午方向和弧矢方向的成像放大倍数分别为

$$M_m(\varphi) = \frac{dx_i}{dy_0} = \frac{dx_i}{d\varphi} \left(\frac{dy_0}{d\varphi} \right)^{-1} = d_0^{-1} \cos^2 \varphi \csc^2(2\theta + \varphi) [d_i - 2d_c \exp(\varphi \cot \theta) \cos \theta \sin(\theta + \varphi)], \quad (4)$$

$$M_s(\varphi) = \frac{dz_i}{dz_0} = \frac{dz_i}{d\varphi} \left(\frac{dz_0}{d\varphi} \right)^{-1} = -d_0^{-1} \cos \varphi \csc(2\theta + \varphi) [d_i + 2d_c \exp(\varphi \cot \theta) \sin \theta \cos(\theta + \varphi)]. \quad (5)$$

根据(4)和(5)式可知, 放大倍数和物距 d_0 、像距 d_i 、针孔到晶体中心距离 d_c 、布拉格角 θ 以及极角 φ 有关。当实验条件确定后, 各距离参数和布拉格角 θ 即选定, 为常数, 故成像放大倍数主要随极角 φ 变化。图 2 是 Quartz1010 对数螺线晶体分析器子午和弧矢方向放大倍数曲线, 各参数见表 1。

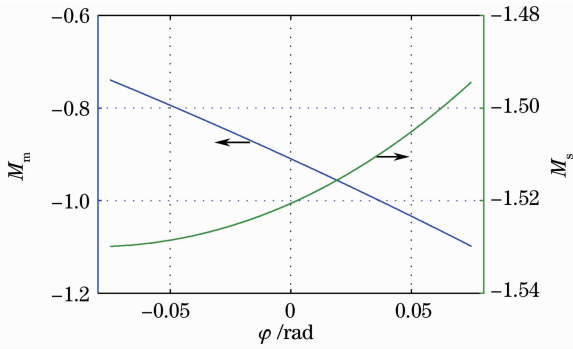


图 2 Quartz1010 对数螺旋晶体分析器放大倍数
Fig. 2 Magnifications of Quartz1010 logarithmic spiral crystal analyzer

表 1 成像实验参数

Table 1 Parameters of the experiment setup

		System A	System B
X-ray source parameters			
Emission line		Al Ly _{α2}	Al He _α
Source wavelength /nm		0. 7176	0. 7806
Source diameters /mm	Height	15	15
	Width	3	3
Pinhole parameters			
Diameter /mm		0. 1	0. 3
Thickness /mm		0. 5	0. 5
Imaging hardware parameters			
Crystal		Quartz1010	Mica002
2d /nm		0. 8512	1. 984
Reflection order		1	2
Bragg angle /(°)		57. 463	51. 896
Crystal aperture /mm	Length	40	40
	Width	15	15
System magnification	Meridian	-0. 9515	-0. 6784
	Sagittal	-1. 5379	-1. 1323
Object to pinhole distance /mm		100	134
Pinhole to crystal distance /mm		120	120
Crystal to image distance /mm		31	31
Field of view /mm	Meridian	28. 250	35. 288
	Sagittal	6. 244	8. 366

由图 2 可以看出,对数螺旋晶体分析器子午和弧矢两个方向的成像放大倍数不同,且两方向的放大倍数是极角 φ 的函数。子午方向的放大倍数随极角增大而增大,弧矢方向放大倍数随极角增大而减小,弧矢方向整体放大倍数高于子午方向放大

倍数。由于晶体分析器子午和弧矢方向的放大倍数存在差异,实验得到的原始图像将存在像差,可将图像根据(4)式和(5)式并结合图 2 所示曲线进行消像差处理,即得到消像差图像。

成像系统的视场由晶体分析器的几何尺寸决定,在子午和弧矢方向分别为

$$F_m = 2d_o \tan \varphi_0, \quad (6)$$

$$F_s = d_o W d_c^{-1} \exp(-\varphi \cot \theta). \quad (7)$$

3 实 验

3.1 X 射线单色摄谱成像仪组成

摄谱成像仪由对数螺旋晶体分析器、成像板、针孔,以及机械部件组成,对数螺旋晶体分析器是成像器的核心部件。可用于制作晶体分析器的晶体材料有云母和石英晶体等,目前能够使用的晶体最大尺寸在 80 mm 左右。制作对数螺旋晶体分析器时,将晶体解理成薄片,这些薄片置于一定温度条件下,在凹凸折弯机上进行塑性弯曲,凹面和凸面对数螺旋形的模具精确地决定了晶体的面形。弯曲成型后的晶体片贴于已经做好的对数螺旋柱面不锈钢基底表面,制成用于 X 射线背光成像的对数螺旋晶体分析器。对数螺旋形的表面形状应符合设计的理论数据,借助于三坐标仪测得对数螺旋曲线的最大误差为 5 μm 。摄谱成像仪整体结构如图 3 所示。

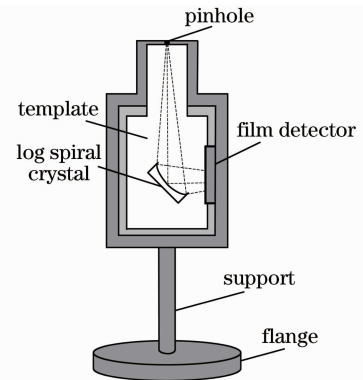


图 3 X 射线单色摄谱成像仪的组成

Fig. 3 Setup of the monochromatic X-ray spectrograph

3.2 实验参数

成像实验在中国工程物理研究院流体物理研究所的“阳”加速器上进行,“阳”加速器主要由 Marx 发生器、水介质 Blumlein 脉冲传输线、高压同步触发系统和磁绝缘真空传输线等组成。加速器驱动电流约 850 kA,电压 60 kV,负载为 8 根长 15 mm、直径 25 μm 的铝丝围成的直径 6 mm 的圆形丝阵。

针对 Z 箍缩铝丝阵内爆等离子体,用 Quartz1010

对数螺线晶体分析器瞄准铝等离子体 K 壳层类氢线 Al Ly α 2(2p $_{1/2}$ -1s $_{1/2}$), Mica002 对数螺线晶体分析器瞄准类氢互组组合跃迁线 Al He α (1s2p 3 P $_1$ -1s2 1 S $_0$)分别进行了实验,具体实验参数见表 1。

4 结果与分析

图 4(a)是 Quartz1010X 射线单色摄谱成像仪获取的类氢线单色图像,图像由 20 μ m 厚镀膜保护的 Kadark BioMax MS 胶片探测器记录并经扫描后转换为数字图像,图 4(b)是根据图 2 所示对数螺线晶体分析器放大倍数及表 1 实验参数进行消像差处理后的图像。图 5 是采用 Mica 晶体摄谱成像仪获取的类氢线单色图像。

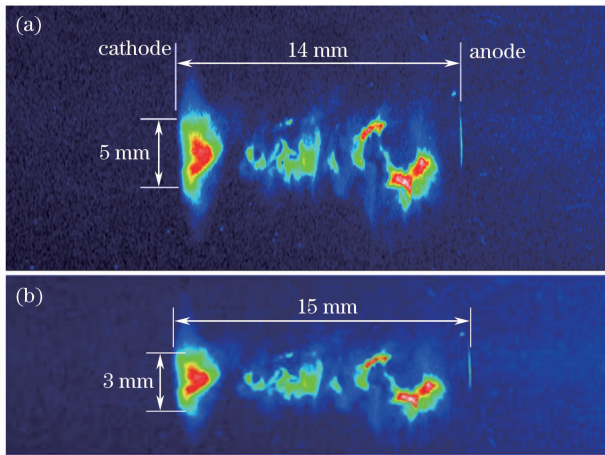


图 4 消像差处理前(a)和后(b)的类氢线单色图
Fig. 4 Hydrogenlike line image (a) without and (b) with eliminating discrepancy

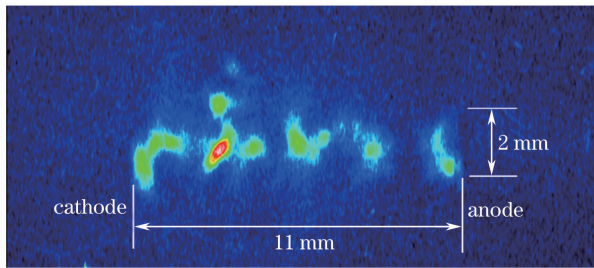


图 5 类氢线单色图像
Fig. 5 Heliumlike line image

对比以往得到的丝阵 Z 箍缩等离子体 X 射线针孔图像^[16],由图 4 和图 5 可以看出,单色图像较好地反映了等离子体的内爆形态。从图像上看,由于磁瑞利-泰勒不稳定性的存在,Z 箍缩内爆等离子体在轴向和径向的 X 射线辐射强度分布不均匀,并且存在多个热点。此外,图 5 类氢单色图像还反映出内爆过程中丝阵阵列出现了类似螺旋形的结构,说明箍缩过程产生了冻结于膨胀等离子体中的轴向磁场。

5 结 论

报道了一种采用针孔配接对数螺线晶体的 X 射线单色摄谱成像仪,用于获取 Z 箍缩等离子体 K 壳层自发辐射的单色图像。摄谱成像仪结构简单、外形尺寸紧凑且在大视场范围内具有优异的单色性能。摄谱仪在“阳”加速器上成功地获取了铝丝阵 Z 箍缩内爆等离子体的类氢线(1727.7 eV)和类氢线(1588.3 eV)单色图像。由箍缩单色图像可以看出,由于磁瑞利-泰勒不稳定性的存在,Z 箍缩内爆等离子体在轴向和径向的 X 射线辐射强度分布不均匀,并且存在多个热点。此外,图像反映出内爆过程中丝阵阵列形成了类似螺旋形的结构,证明箍缩过程产生了冻结于膨胀等离子体中的轴向磁场。进一步工作中,将摄谱成像仪配接时间分辨的 MCP 或 X 射线分幅相机,可实现对箍缩等离子体的时间分辨成像。

参 考 文 献

- 1 Xiao Delong, Ding Ning, Ning Cheng *et al.*. Numerical investigation on the X-ray production of aluminum-wire-array Z-pinch implosion [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, **39**(2): 686~694
- 2 S. H. Glenzer, K. B. Fournier, C. Decker *et al.*. Accuracy of K-shell spectra modeling in high-density plasmas[J]. *Phys. Rev. E*, 2000, **62**(2): 2728~2738
- 3 Wang Zhen, Yang Jianlun, Xu Rongkun *et al.*. Framing shadowgraphy of 266 nm laser probing for the diagnosis of Z-pinch plasmas [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55** (11): 5942~5946
- 4 王 真, 杨建伦, 徐荣昆 等. 用于 Z-pinch 诊断的 266 nm 激光探针分幅阴影成像系统[J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5942~5946
- 5 V. V. Aleksandrov, G. S. Volkov, E. V. Grabovskii *et al.*. Interferometric measurements of the plasma density at the Z-pinch periphery in the Angara-5-1 facility[J]. *Plasma Physics Reports*, 2004, **30**(3): 218~227
- 6 S. H. Glenzer, T. L. Weiland, J. Bower *et al.*. High-energy 4 ω probe laser for laser-plasma experiments at Nova[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1999, **70**: 1089~1092
- 7 Alexander L. Velikovich, John P. Apruzese, Jack Davis *et al.*. Theory of high-energy-photon K-shell recombination continuum radiation from Z-pinch plasmas [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, **38**(4): 618~625
- 8 Cui Mingqi, Zhao Yidong, Zheng Lei *et al.*. Construction and applications of soft X-ray experimental platform on synchrotron radiation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2271~2277
- 9 崔明启, 赵屹东, 郑 雷 等. 同步辐射软 X 射线光学实验平台的建立及其应用[J]. *中国激光*, 2010, **37**(9): 2271~2277
- 10 N. Shiga, F. Anderegg, D. H. E. Dubin *et al.*. Thermally excited fluctuations as a pure electron plasma temperature diagnostic[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, **13**(2): 022109
- 11 J. E. Bailey, G. A. Rochau, C. A. Iglesias *et al.*. Iron-plasma transmission measurements at temperatures above 150 eV[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, **99**(26): 265002
- 12 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
- 11 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. X-ray polarization spectrum diagnosis of laser-produced plasmas[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1710~1713
- 王洪建, 肖沙里, 施 军等. 激光等离子体 X 射线极化光谱诊断[J]. 光学学报, 2009, **29**(6): 1710~1713
- 12 Wang Hongjian, Xiao Shali, Shi Jun *et al.*. Elliptical crystal spectrometer researched for Z-pinch plasma X-ray by using Au-wire arrays[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 685~688
- 王洪建, 肖沙里, 施 军等. 金丝 Z 箍缩等离子体 X 射线椭圆弯晶谱仪研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 685~688
- 13 Liu Lifeng, Xiao Shali, Wu Yufen *et al.*. Application of spherically bent crystal to X-ray backlight imaging experiment [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(9): 2023~2028
- 刘利锋, 肖沙里, 毋玉芬等. 球面弯曲晶体在 X 射线背光成像的应用[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(9): 2023~2028
- 14 G. Khelashvili, I. Ivanov, T. I. Morrison *et al.*. A novel method of bending crystals to log spiral shape[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(3): 1534~1536
- 15 N. G. Kujala, C. Karanfil, R. A. Barrea. High resolution short focal distance bent crystal laue analyzer for copper K edge X-ray absorption spectroscopy[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2011, **82**(6): 063106
- 16 Sheng Liang, Qiu Mengtong, Hei Dongwei *et al.*. Research of implosion dynamics for wire array Z-pinch[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(5): 055205
- 盛 亮, 邱孟通, 黑东炜等. 丝阵负载 Z 箍缩内爆动力学研究 [J]. 物理学报, 2011, **60**(5): 055205

栏目编辑: 李文喆