

箍缩等离子体 X 射线能谱诊断

刘利锋¹ 肖沙里² 钱家渝² 韦敏习³ 陈伯伦³

¹山西大同大学物理与电子科学学院, 山西 大同 037009; ²重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030

³中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

摘要 为了研究和诊断箍缩聚变的聚爆靶高温等离子体内部的形状、分布及各种运动过程, 基于晶体布拉格衍射, 研制了新型球面弯曲晶体能谱成像系统。其核心元件是石英球面弯曲晶体(1010), 弯曲半径为 200 mm。在中国工程物理研究院“阳”加速器上利用能谱成像系统进行了 Z 箍缩等离子体 X 射线能谱成像实验。X 射线胶片得到了清晰的钛等离子体 X 射线能谱成像信息。对实验所得能谱信息进行分析, 石英球面弯曲晶体得到等离子体 X 射线的能谱分辨率约为 1092, 与 X 射线能谱分辨几何模型理论值比较吻合。实验结果表明石英球面弯曲晶体可以用于 X 射线的能谱诊断。

关键词 光谱学; 等离子体诊断学; X 射线成像; 能谱分辨

中图分类号 O433.1; TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.s130004

X-Ray Spectral Diagnosis for Z-Pinch Plasma

Liu Lifeng¹ Xiao Shali² Qian Jiayu² Wei Minxi³ Chen Bolun³

¹School of Physics and Electronics Science, Shanxi Datong University, Datong, Shanxi 037009, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China

³Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract In order to study and diagnose the distribution, movement process and shape of the high-temperature plasma of pellet implosion in the Z-pinch implosion, a novel spherically bent crystal imaging system has been developed based on the Bragg diffraction theory. The key component of the imaging system is the spherically bent α -quartz crystal with the radius of 200 mm. An X-ray spectral imaging experiment using spherically bent α -quartz crystal has been carried out in the “Yang” accelerator in the Chinese Academy of Engineering Physics (CAEP). The X-ray film obtains the X-ray spectral information of Ti plasma. By analyzing the spectral information, the diagnostic result shows that the spectral resolution of the imaging system is 1092, which is consistent with theoretical value of the spectral resolution model. The imaging system meets the demand of spectral diagnosis.

Key words spectroscopy; plasma diagnostics; X-ray imaging; spectral resolution

OCIS codes 300.6560; 280.5395; 340.7440; 300.6320

1 引 言

在高温高密度等离子体研究中,为了获得高温等离子体的内部状态及相互作用过程,需要对高温等离子体中各种离子和电子的一些状态参数进行测量^[1-6]。激光约束聚变和箍缩聚爆过程中,激光与靶丸相互作用产生大量等离子体 X 射线,对高温等离子体 X 射线进行能谱诊断具有重要意义。常用能谱诊断方法有探针干涉法,汤姆逊散射法及 X 射线光谱法等。前两种方法都需要 X 射线激光作为探针,但是探针光子能量有限,不适合用于高温高密度等离子体区域。对于 X 射线光谱法,主要有光栅分光法和晶体分光法,光栅具有准光和聚焦的优点,但是衍射效率低,且适用于百电子伏量级的 X 射线测量^[7]。晶体分光法可以测量千电

收稿日期: 2015-01-17; 收到修改稿日期: 2015-03-02

基金项目: 国家自然科学基金(10976033)

作者简介: 刘利锋(1981—),男,博士,讲师,主要从事 X 射线探测方面的研究。E-mail: liulf1305@cqu.edu.cn

子伏量级 X 射线光谱的形状及其精细结构。球面弯曲晶体具有成像效率高、大视场和空间分辨力较高等优点,且在激光装置中便于安装调试,不仅可以得到等离子体能谱信息^[8],还可以得到聚爆靶内部的二维空间分辨信息^[9],是研究激光约束聚变和箍缩聚爆过程与不稳定性的重要手段。

球面弯晶成像主要是利用 X 射线布拉格衍射来实现 X 射线能谱成像。Koch 等^[10-11]利用石英球面弯曲晶体(2023)在 Nova 激光装置上得到了 Ti K α 辐射 X 射线谱线,用于靶丸内爆烧蚀的探索。Bitter 等^[12]利用球面弯曲晶体在托卡马克装置上得到了 Ar 的类 He 辐射 X 射线,测量等离子体电子温度。Forster 等^[13]利用球面弯曲晶体得到掺杂 Ar 的氘靶丸的类 H 和类 He 辐射 X 射线,利用 X 射线强度得到了等离子体的电子温度。本文研制的球面弯曲晶体是 α -石英晶体(1010),弯曲半径为 200 mm;晶体的晶面间距 $2d$ 为 0.8512 nm。在中国工程物理研究院“阳”加速器上进行了钛丝阵等离子体 X 射线能谱成像实验,得到了钛等离子体 X 射线谱线信息。

2 等离子体 X 射线能谱分辨理论

为了得到等离子体 X 射线能谱分辨率,Young 等^[14]建立了基于球面弯曲晶体的 X 射线能谱分辨几何模型,如图 1 所示。文献[14]给出了详细的球面弯曲晶体能谱分辨理论,简述如下:子午面上,光源 S 与球面弯曲晶体 C 的距离为 a ;光源 X 射线的入射角为 φ ,能谱分辨几何模型中布拉格角 $\theta=90^\circ-\varphi$ 。球面弯曲晶体球心 O 与谱线位置的距离为

$$f = \frac{R \sin \theta}{\sin \gamma}, \quad (1)$$

$$\gamma = \pi - 2\varphi - \sin^{-1}(R \sin \varphi / s), \quad (2)$$

式中 R 为球面晶体的弯曲半径, s 为光源 S 到球面弯曲晶体球心 O 的距离,距离 s 为

$$s = (R^2 + a^2 - 2aR \cos \varphi)^{1/2}. \quad (3)$$

由于光源不是点光源,而是半径为 r 的柱形源,空间分布的光源辐射将引起成像板上 X 射线谱线的加宽。在图 1 中,沿着球心 O 旋转 $\triangle SCF$,满足光源发出的边缘 X 射线恰好沿着 FS 方向传输。在 $\triangle SCF$ 旋转过程中,可以得到

$$s \pm r = \frac{R \sin \varphi}{\cos(\beta \pm \delta_{\pm})}, \quad (4)$$

式中 $\sin \beta = (a - R \cos \varphi) / s$, δ_{\pm} 为 $\triangle SCF$ 顺时针和逆时针分别旋转的角度,当 $r \ll s$ 时,角度 δ_{\pm} 为

$$\delta_{\pm} = \delta = \frac{r}{s} \cot \beta. \quad (5)$$

光源边缘位置辐射 X 射线在成像板相应的谱线位置为

$$f^{\pm} = \frac{R \sin \varphi}{\sin(\gamma \mp \delta)}, \quad (6)$$

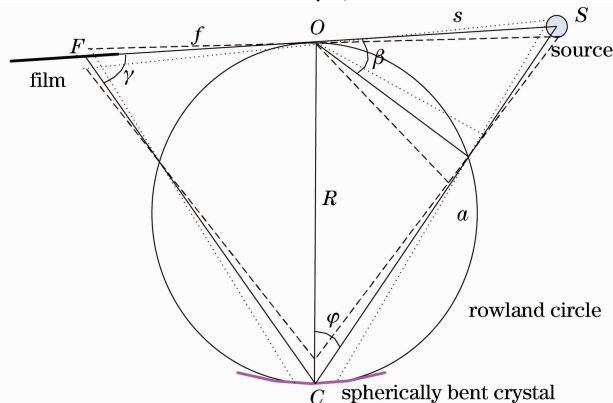


图 1 球面弯曲晶体能谱分辨原理

Fig. 1 Schematic of spectral resolving in spherically bent crystal

根据(6)式,辐射 X 射线在成像板上谱线展宽为

$$\Delta f_s = f^- - f^+ = 4R \sin \varphi \left(\frac{\cos \gamma \sin \delta}{\cos 2\delta - \cos 2\gamma} \right). \quad (7)$$

对于固定位置的点光源,即 $f = f(\lambda)$, X 射线的谱线展宽可以用波长的展宽来表示,两者之间关系为

$$\Delta f_\lambda = \left(\frac{df}{d\lambda} \right)_s \Delta \lambda = \left(\frac{df}{d\varphi} \right)_s \left(\frac{d\log \lambda}{d\varphi} \right)^{-1} \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right). \quad (8)$$

根据布拉格衍射理论($2d \sin \varphi = n\lambda$),可以得到

$$\frac{d\log \lambda}{d\varphi} = -\tan \varphi, \quad (9)$$

根据(8)式和(9)式,得到能谱分辨率为

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \left| \frac{\Delta f_\lambda \tan \varphi}{(df/d\varphi)_s} \right|. \quad (10)$$

根据(1)式,又可以得到

$$\left(\frac{df}{d\theta} \right)_s = R \frac{\cos \varphi - \sin \varphi \cot \gamma (d\gamma/d\varphi)_s}{\sin \gamma}. \quad (11)$$

将(7)、(8)、(11)式代入(10)式,得到光源尺寸为 r 的辐射源能谱分辨率为^[14]

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{2(a/R - \cos \varphi) \tan \varphi}{(a/R - \cos \varphi) \cot \varphi + (2a/R - \cot \varphi) \cot \gamma \cos 2\delta - \cos 2\gamma} \frac{\sin 2\gamma \sin \delta}{\cos 2\delta - \cos 2\gamma}. \quad (12)$$

当旋转角 $\delta \ll 1$ 时,能谱分辨率为

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{2rc \cot \beta \tan \varphi}{R[(a/R - \cos \varphi)(\cot \varphi \tan \gamma + 1) + a/R]}. \quad (13)$$

3 单色 X 射线能谱成像实验

3.1 X 射线能谱成像实验

等离子体 X 射线能谱成像实验在流体物理研究所“阳”加速器装置上进行。此次成像实验中,加速器工作峰值电压为 1.0~1.5 MV;负载电流峰值为 520 kA;上升时间(10%~90%)约为 110 ns;靶室内的真空压为 1.2×10^{-2} Pa。成像系统核心色散元件为石英球面晶体(1010),球面晶体由色散元件和底座组成,其 $2d$ 为 0.8512 nm,厚度为 0.25 mm 的石英晶体为色散元件;利用凹凸折弯机对晶体进行塑性弯曲,弯曲后的晶体粘贴在弯曲底座,弯曲半径为 200 mm。由于加速器负载为钛丝阵,根据布拉格衍射理论,石英球面弯曲晶体的布拉格角为 38° 。能谱成像系统装配在靶腔赤道平面的诊断窗口。成像系统示意图如图 2 所示。系统中光源到球面晶体距离 $a=400$ mm, X 射线入射角为 52° , 夹角 $\gamma=46^\circ$ 。探测装置为分辨率很高的 X 射线

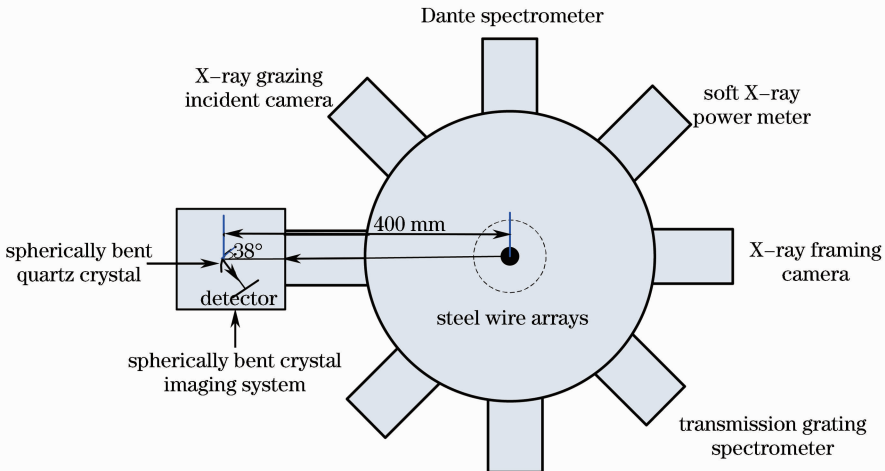


图 2 箍缩装置上的球面弯曲晶体成像系统

Fig. 2 Spherically bent crystal imaging system in Z-pinch

胶片,与球面弯曲晶体距离为 130 mm。探测器外侧放置铝膜,主要是防止其他杂散光影响成像效果。X 射线胶片得到钛丝阵聚爆的等离子体 X 射线谱线图像如图 3 所示。

3.2 能谱分辨率诊断结果分析

通过软件对等离子体能谱成像实验得到的 Ti 等离子体 X 射线谱线图像(图 3)进行处理,得到了 X 射线谱线沿横坐标的强度分布。根据已知 Ti 等离子体共振线波长,利用三点外推算法得到谱线强度与其相应波长的分布关系,如图 4 所示。

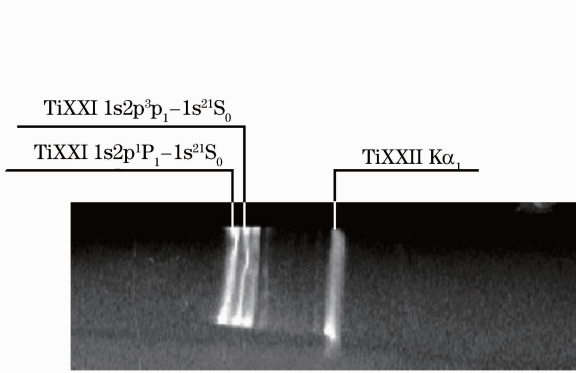


图 3 钛等离子 X 射线谱线

Fig. 3 X-ray spectra of Ti plasma

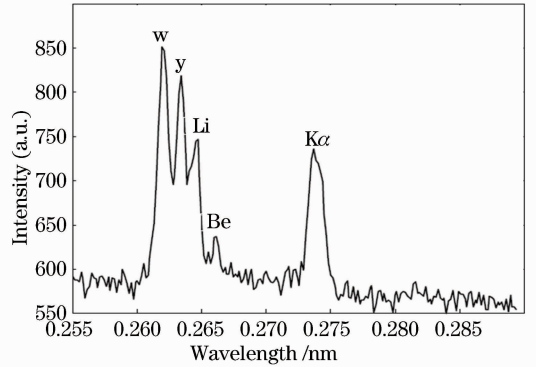


图 4 Ti 等离子体谱线强度与波长相应分布

Fig. 4 Relationship between spectral intensity and wavelength of Ti plasma

表 1 丝阵实验诊断结果

Table 1 Diagnostic result of wire arrays

Spectral line	Wavelength /nm	Wavelength in Ref. [15] /nm	Error	Error rate /%
He-like resonance line (w)	0.2620	0.2609	0.0011	0.41%
Intercombination He-like line (y)	0.2634	0.2622	0.0012	0.45%
K α line	0.2748	0.2744	0.0004	0.15%

实验所得为 Ti 等离子体 K 壳层的激发谱线,主要包括类 H 离子 $1s-np$ 的跃迁和类 He 离子 $1snp$ ($^1P_1, ^3P_1$) $-1s^2(^1S_0)$ 的跃迁以及类 Li, Be, B 等离子的伴线等。图 4 中激发谱线主要是类 He 离子跃迁共振线 $w(1s2p^1P_1-1s^2^1S_0)$, 互组合跃迁 y 线 ($1s2p^3P_1-1s^2^1S_0$), 类 Li 伴线, 类 Be 伴线和 Ti 的 $K\alpha$ 线。为了验证实验所得谱线信息,与文献[15]所得共振线 w 、组合跃迁 y 线、Ti 的 $K\alpha$ 线进行比较,结果如表 1 所示。结果表明,实验所得 Ti 等离子体 K 壳层激发谱线与文献[15]测得的谱线一致。所得谱线的相对强度分别为 851, 818, 746, 637 和 725, 得到较强类 Li 和类 Be 伴线。能谱成像实验中,钛丝阵聚爆焦斑半径 r 约为 $600 \mu\text{m}$, 根据成像实验的相关参量,光源到晶体中心距离 a , 球面晶体的弯曲半径 R , X 射线入射角 φ 和夹角 γ 等,利用能谱分辨率理论模型推导(13)式得到能谱分辨率的计算值为 1103。而以类 He 离子跃迁共振线 w 谱线为对象,得到成像系统的能谱分辨率($\lambda/\Delta\lambda$)约为 1092。实验得到的能谱分辨率基本符合能谱分辨率理论计算值。球面弯曲晶体摇摆曲线、谱线展宽等因素也可能会降低实验能谱分辨率。但是,石英球面弯曲晶体可以满足 X 射线能谱诊断的要求。

4 结 论

利用球面弯曲晶体可以获取等离子体 X 射线的能谱成像信息,是研究激光约束聚变和箍缩聚爆过程聚爆靶丸高温等离子体的内部状态及相互作用过程的一种重要诊断方法。在“阳”加速器上进行了等离子体 X 射线能谱成像实验,接收装置获得清晰的 Ti 等离子体 X 射线谱线。通过对 X 射线谱线的分析,得到石英球面弯曲晶体的能谱分辨率为 1092,与 X 射线能谱分辨几何模型理论值比较吻合,已经达到了美国和俄罗斯等实验室的球面弯曲晶体参数水平^[4,16]。结果表明,石英球面弯曲晶体具有较高的能谱分辨,可以用于等离子体 X 射线能谱诊断的研究。但是实际上,晶体本身物理特性、自身晶体结构、晶体加工塑性弯曲张力等因素都会影响能谱分辨率,这些因素都是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Bennett G R, Sinars D B, Wenger D F, *et al.*. High-brightness, high-spatial-resolution, 6.151 keV X-ray imaging of inertial confinement fusion capsule implosion and complex hydrodynamics experiments on Sandia's Z accelerator[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(10): 10E322.
- 2 Glenzer S H, MacGowan B J, Meezan N B, *et al.*. Demonstration of ignition radiation temperatures in indirect-drive inertial confinement fusion hohlraums [J]. *Physical Review Letters*, 2011, 106(8): 085004.
- 3 Fujioka S, Fujiwara T, Tanabe M, *et al.*. Monochromatic X-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E529.
- 4 Sinars D B, Bennett G R, Wenger D F, *et al.*. Monochromatic X-ray imaging experiments on the Sandia National Laboratories Z facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3672—3677.
- 5 Yi Rongqing, Zhao Yidong, Wang Qiuping, *et al.*. Characteristic study and application of the soft X-ray beam line 4B7B on BSRF[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1034002.
易荣清, 赵屹东, 王秋平, 等. 北京同步辐射装置 4B7B 软 X 射线标定束线的性能研究及应用[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1034002.
- 6 Bitter M, Hill K W, Stratton B, *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3660—3665.
- 7 Sun Jingwen. High Temperature Plasma X-Ray Spectroscopy [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
孙景文. 高温等离子体 X 射线谱学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- 8 Wu Yufen, Xiao Shali, Lu Jian, *et al.*. Logarithmic spiral bent Laue crystals for X-ray monochromatic imaging applications[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(6): 0615001.
毋玉芬, 肖沙里, 鲁建, 等. 对数螺旋型劳厄弯晶的 X 射线单色成像应用[J]. *中国激光*, 2013, 40(6): 0615001.
- 9 Liu Lifeng, Xiao Shali, Wu Yufen, *et al.*. X-ray backlight imaging using spherically bent quartz crystal[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(8): 0815001.
刘利锋, 肖沙里, 毋玉芬, 等. 基于石英球面弯曲晶体的 X 射线成像研究[J]. *中国激光*, 2011, 38(8): 0815001.
- 10 Yaakobi B, Craxton R S, Epstein R, *et al.*. Areal-density measurements of laser targets using absorption lines[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1997, 58(1): 75—83.
- 11 Koch J A, Landen O L, Hammel B A, *et al.*. Recent progress in high-energy, high-resolution X-ray imaging techniques for application to the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 525—530.
- 12 Bitter M, Hill K W, Stratton B, *et al.*. Spatially resolved spectra from a new X-ray imaging crystal spectrometer for measurements of ion and electron temperature profiles[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3660—3665.
- 13 Uschmann I, Forster E, Nishimura H, *et al.*. Temperature mapping of compressed fusion pellets obtained by monochromatic imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(1): 734—736.
- 14 Young B K, Osterheld A L, Price D F, *et al.*. High-resolution X-ray spectrometer based on spherically bent crystals for investigations of femtosecond laser plasmas[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, 59(12): 4049—4053.
- 15 Shlyaptseva A S, Fedin D A, Hamasha S M, *et al.*. X-ray spectroscopy and spectropolarimetry of high energy density plasma complemented by LLNL electron beam ion trap experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 1947—1950.
- 16 Shevelko A P, Kasyanov T A, Yakushev O F, *et al.*. Compact focusing von hamos spectrometer for quantitative X-ray spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2002, 73(10): 3458—3463.

栏目编辑: 吴秀娟