

X 射线连续谱法诊断铝丝阵 Z 箍缩等离子体温度*

蒙世坚[†] 李正宏 秦义 叶繁 徐荣昆

(核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2010 年 4 月 19 日收到; 2010 年 6 月 7 日收到修改稿)

用球面石英弯晶衍射、CCD 记录测量铝丝阵 Z 箍缩中的时间积分 X 射线连续能谱, 并由连续谱斜率拟合出电子温度. 该法获得的拟合数据点多, 能有效剔除含线辐射的数据, 减弱线辐射的影响, 求得更可靠的等离子体核心高温区的温度. 以发次 09076 为例, 核心温度约为 250 eV, 在 95% 的置信度范围里, 其变化范围约 241—258 eV.

关键词: 球面弯晶, 连续谱, 电子温度, Z 箍缩

PACS: 52. 70. La, 32. 30. Rj

1. 引言

将 X 射线辐射谱作为有力的诊断手段已经被广泛应用于激光聚变^[1,2]、Z 箍缩^[3,4]等惯性约束聚变(ICF)研究中. 通过等离子体自身辐射出的 X 射线的连续谱求电子温度不依赖于电子密度, 且适用于高密度等离子体诊断. 测量 X 射线连续谱的方法主要有吸收法^[5]和衍射法. 吸收法时间分辨率高, 但能量分辨率低, 数据点少, 2006 年国内采用罗斯滤片法测得 0. 28—1. 56 keV 范围内的 5 个连续能量段^[6]. 美国圣地亚国家实验室曾用金刚石光电探测器(diamond photoconducting detectors, PCD)测量铝丝阵 Z 箍缩高能连续辐射并拟合电子温度^[7], 主要看重 PCD 能量响应平坦、响应稳定、不易老化^[8], 但只得到 5 个能量段的强度, 即只有 5 个数据用于拟合电子温度^[7], 如果某个能段落在线辐射上, 引起的误差很大. 衍射法主要通过色散元件使不同能段 X 射线分布到空间不同位置, 实现能谱测量. 常用的色散元件包括光栅^[9]、晶体^[10]和多层反射膜. 诊断铝等离子体温度的 X 射线连续谱的波长一般小于 1 nm. 美国研制的 Chandra X 射线望远镜中的高能透射光栅刻线密度达 5000 l/mm, 周期为 200 nm^[11]. 2008 年国内中科院微电子所研制的透射光栅周期为 300 nm^[11]. 而晶体或反射镜由于面间距为纳米级^[12], 故比光栅更适合测量高能

辐射谱.

本文采用球面石英弯晶测得铝丝阵 Z 箍缩等离子体 X 射线辐射谱, 获得大量数据点, 有效剔除了含强线辐射的数据, 求得更为可靠的电子温度.

2. 测量原理及装置

当电子速度是麦克斯韦分布时, 等离子体产生的连续辐射在单位频率间隔内的辐射产额 $dE/d(h\nu) \propto \exp(-h\nu/kT_e)$ ^[13], $h\nu$ 为光子能量, 测出连续谱可推算出电子温度 T_e . 分析表明^[14,15], 连续谱低能部分的形状与 T_e 关系不大, 且与大量线辐射相叠加, 只有高能部分的谱形状才与 T_e 高度相关. 能谱的指数关系没有考虑量子力学修正, 也没有考虑非类氢离子的情况. 量子力学修正对低能辐射变得非常重要^[13], 故应选高能段估算温度. 考虑量子修正、非类氢情况、所有主量子数求和的影响后, 常数部分引入冈特因子(Gaunt factors) g , 是 $h\nu$ 的函数. 当 X 射线能量较大时, 在一定误差范围内可认为 g 是个固定值, 故可用斜率法测温度, 详见文献[16].

球面弯晶的衍射如图 1 所示. 晶面间距为 d , 曲率半径为 R , 曲率中心为 O 点. r 为源的尺寸, X 射线波长为 λ , 源与晶体距离为 p , O 点与聚焦点距离为 f , O 点与源距离为 s , 掠射角为 θ , 反射角为 $\varphi = \pi/2 - \theta$.

衍射满足布拉格(Bragg)方程 $n\lambda = 2d\sin\theta$, n 是衍射阶次. f 与 λ 满足^[17,18]

* 国家自然科学基金(批准号:10635050)资助的课题.

[†] E-mail: mengsj04@163.com

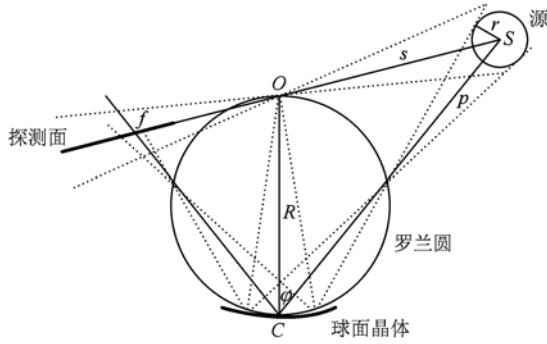


图1 球面弯晶衍射示意图^[17]

$$f(\lambda) = \frac{R \sin \varphi}{\sin(\arcsin(R \sin \varphi / s) + 2 \arccos \varphi)}, \quad (1)$$

其中 $s = \sqrt{p^2 + R^2 - 2pR \cos \varphi}$.

实验装置如图 2, 等离子辐射出 X 射线, 经过 Be 膜(用于遮挡可见光)和狭缝后入射到球面弯晶上, 色散到薄膜闪烁体上转换为可见光, 经一维阵列传像束进入像增强器, CCD 拍摄后传入计算机。

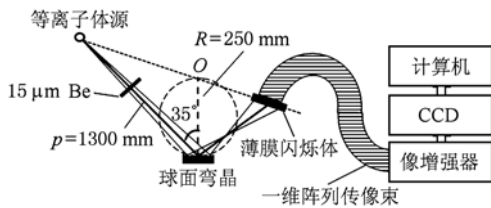


图2 实验装置示意图

3. 实验结果

发次 09276 的负载为 32 根直径 20 mm, 长 20 mm 的铝丝阵, 单根丝直径为 8 mm, 负载电流为 1.3 MA. 拍摄图像见图 3(a), 中间白色条状区即为光纤

阵列端面, 尺寸为 30 mm × 2 mm, 从左到右, X 射线能量逐渐增高. 结合(1)式和实验条件求得相对能谱如图 3(b).

实验用的 Be 膜滤片厚度为 15 μm, 其对能谱的影响见图 4(a). 实线为消除 Be 影响前的能谱, 虚线为消除后的. 薄膜闪烁体的能量响应、球面弯晶的积分衍射效率尚未标定, 可假设在关注能段内与射线波长无关. 能量段 2174—2365 eV 的线性较好, 扣除线辐射附近的数据点后进行拟合, 如图 4(b). 拟合得电子温度为 $T_e = 249.2$ eV. 在 95% 的置信度范围里, 电子温度的变化范围为 241.2—257.8 eV, 拟合数据的线性相关系数为 -0.945. 北京应用物理与计算数学研究所用磁流体力学模型(MHD)模拟计算得发次 09276 在内层 5, 20, 50 网格中的平均电子温度分别为 260, 201, 189 eV. 可见实验温度与内层 5 网格的平均温度符合得较好.

解谱时没考虑晶体高阶衍射影响. 对能量为 $h\nu$ 附近的能谱, 二阶衍射来自于 $2h\nu$, 在关注的能段内, $2h\nu$ 的能段里只有连续辐射, 故二阶与一阶强度比约为 $\exp(-h\nu/kT_e)$, 由于 $kT_e < 300$ eV, $h\nu > 2100$ eV, 故二阶的影响小于 0.09%, 可忽略不计. 高于二阶的衍射影响更小, 故解谱时不需要考虑高阶衍射.

连续辐射主要来自箍缩等离子体中心的高温区, 且被周围环绕的低温区等离子体吸收的程度小, 故连续辐射的温度反映中心高温区的温度^[19]. 实验温度与理论模拟不同区域温度的比较也说明了这点. 而高温区产生线辐射在低温区被强烈吸收并再辐射, 故线辐射比的温度反映中心高温区与周围低温区的平均温度. 本文的测量方法补充了线辐射比法的不足, 为认识铝丝阵 Z 箍缩中核心区的等离子体状态提供了电子温度参量.

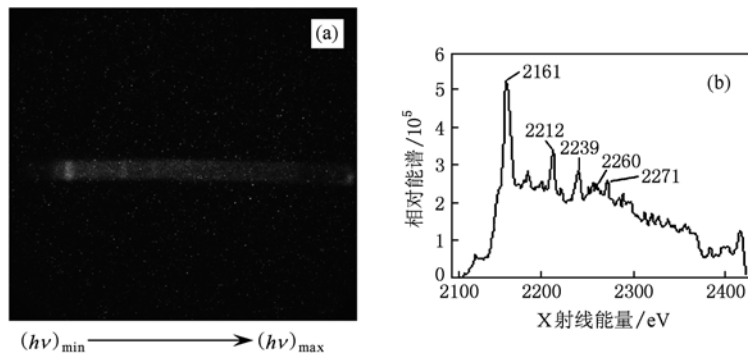


图3 发次 09276 实验结果 (a) CCD 拍摄到的 X 射线色散图; (b) X 射线相对能谱图

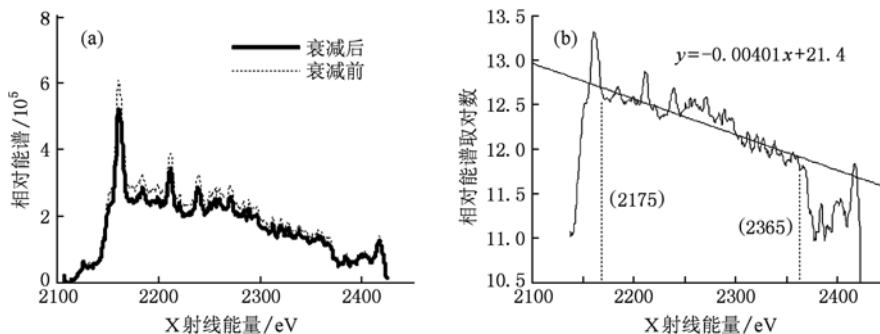


图4 (a)经15 μm厚的Be膜衰减前后的X射线相对能谱;(b)取对数后的相对能谱,并利用2175—2365 eV能段的数据拟合直线,扣除了含主要线辐射的数据点

4. 结 论

在强光一号装置上,利用球面石英弯晶测量了能谱范围在2.17—2.4 keV的时间积分辐射谱.根

据连续谱估算得等离子体核心温度约为250 eV,在95%的置信度范围里,其变化范围约241—258 eV,而MHD模拟得内层温度约260 eV.与PCD测温法比较,该法用于拟合温度的数据点多,且能有效减弱弱线辐射引起的误差.

- [1] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y K, Liu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Pei W B, He X T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3325 (in Chinese) [李三伟、易荣清、蒋小华、何小安、崔延莉、刘永刚、丁永坤、刘慎业、蓝可、李永升、吴畅书、古培俊、裴文兵、贺贤士 2009 物理学报 **55** 3325]
- [2] Dewald E L, Landen O L, Suter L J, Holder J, Campbell K, Glenzer S H, McDonald J W, Niemann C, Mackinnon A J, Schneider M S, Haynam C, Hinkel D, Hammel B A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056315
- [3] Deeney C, Apruzese J P, Coverdale C A, Whitney K G, Thornhill J W, Davis J 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 155001
- [4] Jones B, Deeney C, Mckenney J L, Ampleford D J, Coverdale C A, Lepell P D, Shelton K P, Safronova A S, Kantsyrev V L, Osborne G, Sotnikov V I, Ivanov V V, Fedin D, Nalajala V, Yilmaz F, Shrestha I 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 105003
- [5] Wang D 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 443 (in Chinese) [王栋 2010 物理学报 **59** 443]
- [6] Zou X B, Wang X X, Zhang G X, Han M, Luo C M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1289 (in Chinese) [邹晓兵、王新新、张贵新、韩旻、罗承沐 2006 物理学报 **55** 1289]
- [7] Sanford T W L, Nash T J, Mock R C, Spielman R B, Seamen J F, McGurn J S, Whitney K G, Thornhill J W, Pulsifer P E, Apruzese J P 1997 *Rev. Sci. Instrum.* **68** 852
- [8] Spielman R B 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 867
- [9] Liu Y Q, Zhang J, Chen Z L, Peng X Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1433 (in Chinese) [刘运全、张杰、陈正林、彭晓昱 2004 物理学报 **53** 1433]
- [10] Lazarchuk V P, Muntyan A N, Murugov V M, Petrov S I, Senik A V, Taran S S 2008 *Instrum. Exp. Tech.* **51** 226
- [11] Zhu X L, Ma J, Xie C Q, Ye T C, Liu M, Cao L F, Yang J M, Zhang W H 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1026 (in Chinese) [朱效立、马杰、谢常青、叶甜春、刘明、曹磊峰、杨家敏、张文海 2008 光学学报 **28** 1026]
- [12] Sun J W 2003 *High Temperature Plasma X-ray Spectroscopy* (Beijing: National Defense Industry Press) p157 (in Chinese) [孙景文 2003 高温等离子体X射线谱学(北京:国防工业出版社)第157页]
- [13] Huddleston R H, Leonard S L 1965 *Plasma Diagnostic Techniques* (New York: Academic Press) p362
- [14] Fujimoto T 2004 *Plasma Spectroscopy* (Oxford: Clarendon Press) p205
- [15] Gross B, Grycz B, Miklóssy K (translated by Guo Z Y, Fu W B) 1980 *Plasma Technology* (Beijing: Science Press) pp136—145 (in Chinese) [格罗斯B、格力滋B、米格罗希K 1980 等离子体技术(北京:科学出版社)第136页]
- [16] Griem H R 1964 *Plasma Spectroscopy* (New York: McGraw-Hill Book Company) pp114
- [17] Ye F, Li Z H, Xue F B, Qin Y, Xu R K, Jin Y J 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 307 (in Chinese) [叶凡、李正宏、薛飞彪、秦义、徐荣昆、金永杰 2009 强激光与粒子束 **21** 307]
- [18] Sinars D B, Chandler G A, Bailey J E, Mancini R C, Rochau G A, Wenger D F, Adams R G, Adams M L, Scott H A, Faenov A Y, Pikuz T A, Pikuz S A 2006 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **99** 595
- [19] Whitney K G, Thornhill J W, Pulsifer P E, Apruzese J P,

X-ray continuum spectra for diagnosing plasma temperature in aluminum wire array Z-pinches^{*}

Meng Shi-Jian[†] Li Zheng-Hong Qin Yi Ye Fan Xu Rong-Kun

(*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Mianyang 621900, China*)

(Received 19 April 2010; revised manuscript received 7 June 2010)

Abstract

Time-integrated X-ray continuum spectra measured with spherical bent quartz crystal and CCD in aluminum wire array Z-pinches, provide electron temperature by fitting the continuum slope. More data obtained for fitting and markedly reduced influence of line radiation by removing the data superimposed with line spectra, make the temperature in hot core region of plasma more reliable. In experiment of shot No. 09076, the core temperature is around 250 eV, ranging from 241 eV to 258 eV at a 95% confidence level.

Keywords: spherical bent crystal, continuum, electron temperature, Z-pinch

PACS: 52.70.La, 32.30.Rj

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10635050).

[†] E-mail: mengsj04@163.com