

托卡马克弯晶谱仪双晶体结构应用的初步研究

陈俊^{1,2} 吕波² 王福地² 潘夏云^{1,2} 李颖颖² 符佳² 尹相辉^{1,2} 胡睿佳^{1,2}
冯双园^{1,2} 石跃江^{1,3} 余羿¹ 叶民友¹

1 (中国科学技术大学 核科学技术学院 合肥 230026)

2 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

3 (首尔大学 核工程系 韩国首尔 151-742)

摘要 X 射线弯晶谱仪作为托卡马克装置等离子体温度和旋转速度等参数诊断测量的重要手段之一,通常利用单晶体衍射分光来测量某种特定杂质的特征谱,这也限制了弯晶谱仪所能测量的等离子体温度范围。为解决更高温度等离子体测量问题,有效提高目前弯晶谱仪诊断系统温度测量范围,用双晶体代替原有单晶体,通过选择合适的晶体和 Bragg 衍射角组合,利用同一个探测器同时测量类氢和类氦的氦离子光谱,实现更高更宽温度范围测量。本文就东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)弯晶谱仪双晶体应用方面的设计和技术实现进行了阐述,并首次在 EAST 装置上成功实现了氦离子类氢和类氦谱线的测量,利用类氢线和类氦线拟合得到的氦离子温度非常接近,验证了双晶体结构的可行性。

关键词 等离子体诊断, 弯晶谱仪, 双晶体, 多普勒展宽

中图分类号 TL65.1

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2015.hjs.38.110403

X 射线弯晶谱仪主要利用等离子体中某种杂质离子的特征谱线的多普勒展宽和频移来实现等离子体温度和旋转速度的测量,最早在脉冲托卡马克(Pulsator Tokamak, PLT)上实现^[1]。早期的弯晶谱仪通常采用柱面弯曲晶体,只能单道测量,Bitter 等^[2]通过球面弯曲晶体的应用,成功实现了单晶体下的空间剖面测量,从而大大提升了弯晶谱仪的测量能力。弯晶谱仪作为一种被动测量方法,在现有托卡马克运行电子温度范围基础上,通常测量类氢氦离子伴线单谱进行等离子体参数测量,不依赖外部中性束注入等,特别适合射频波加热和长脉冲等离子体诊断测量,因此在东方超环(Experimental Advanced Superconducting Tokamak, EAST)、高场托卡马克(Alto Campo Toro C-mod, Alcator C-Mod)、韩国先进研究超导托卡马克(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research, KSTAR)、国家球环型实验托卡马克(National Spherical Torus Experiment, NSTX)等装置上得到了广泛使用,也是 ITER 装置诊断的重要组成部分^[3-7]。Alcator C-Mod 装置为了在更高温度下测量,发展了测量类氢和类氦氦谱独立谱仪,两套谱仪单独成像到探测器,能够独立测量等离子体温度^[6]。

EAST 装置 X 射线弯晶谱仪(X-ray Crystal Spectrometer, XCS)空间布局如图 1 所示,通过升级探测器技术,在类氢谱测量的时间分辨率上有了很大提高,最高可达 10 ms 左右^[8]。随着 EAST 装置的改造升级,中性束注入(Neutral Beam Injection, NBI)加热、低杂波电流驱动(Lower Hybrid Current Drive, LHCD)、离子回旋共振加热(Ion Cyclotron Resonance Frequency, ICRF)、电子回旋共振加热(Electron Cyclotron Resonance Heating, ECRH)等辅助加热功率的增加,等离子体温度将升高到几千电子伏,原有 EAST 弯晶谱仪原本以类氢离子谱线作为标识谱线,在电子温度高于 3 keV 时由于芯部类氢浓度可能中空分布,影响谱仪的可靠测量。为实现在更高温度条件下也能够测量等离子体温度,需要提高弯晶谱仪的温度测量上限,同时保证原有的测量能力。由从冠冕平衡计算可以看出的氦的各电离态相对浓度与电子温度关系可知,超过 3 keV 时,类氢 Ar 离子相对浓度将变得很少,而类氦 Ar 离子相对浓度则比较大^[9],因此如果能够扩充谱仪能力来实现两种谱的测量,则能有效扩充温度测量的区间。由于单独弯晶谱仪造价较高,如能利用原有探测器宽度实现两种谱的同时测量,就能大大提高弯

国家磁约束核聚变发展研究专项(No.2012GB101001、No.2013GB112004、No.2015GB101001)、国家自然科学基金(No.11175208、No.11275233、No.11405212)、中日韩 A3 前瞻计划项目(No.11261140328)、合肥物质科学技术中心方向项目培育基金(No.2014FXCX003)资助

第一作者: 陈俊, 男, 1991 年出生, 2014 年毕业于中国科学技术大学, 研究领域为等离子体物理

通讯作者: 王福地, E-mail: fdwang@ipp.ac.cn

收稿日期: 2015-08-28, 修回日期: 2015-09-29

晶谱仪的利用率。基于这些考虑, 我们通过探索同一谱仪上集成类氢和类氦两块晶体, 通过选择合适的晶体参数和衍射角度, 充分利用探测器的宽度, 实现双谱测量, 并在 EAST 上进行了初步的尝试^[8]。本文首先详述了双晶体结构的设计考虑和在 EAST 上的应用, 通过比较类氢和类氢谱得到的离子温度的一致性, 来验证双晶体的可行性。

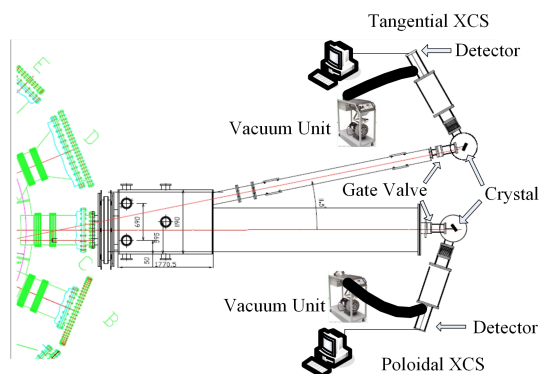


图1 EAST 弯晶谱仪诊断系统布局
Fig.1 Spatial distributions of XCS on EAST.

1 双晶体结构

在 EAST 典型放电温度下(1–2 keV), Ar 离子在等离子体芯部主要以类氢电离态形式存在。随着 EAST 装置辅助加热功率的大幅度提高, 等离子体温度也随之上升, 芯部的类氢氦离子会进一步电离至类氢态, 甚至造成中空类氢氦浓度分布, 造成测量温度比实际低。另一方面, 类氢氦离子在电子温度在 2–10 keV 都存在一定的份额, 因此如果能在原有谱仪增加对 Ar^{17+} 离子的测量能力, 则能实现在高功率辅助加热条件下等离子体参数的测量, 同时也能测量正常加热功率类氢 Ar 离子的伴线谱, 这就需要增加晶体用于类氢谱的分光。

考虑独立弯晶谱仪的建造成本, 如果能在原单晶体基础上增加新晶体, 又能利用原有的探测器来同时测量类氢和类氦谱, 就能大大提高谱仪的利用效率。在两种谱波长范围确定的前提下, 晶体的选择需要考虑两个因素: 两者的布拉格散射角相接近, 这样可以限制谱线在探测器上所占宽度, 以避免探测器因宽度不足而导致谱线丢失, 同时两条光谱在

探测器上面尽量不要重合。经过调研, 如果类氦晶体采用石英 110, 晶格间距 $2d=0.491\ 30\ \text{nm}$ 选择 W 和 Z 线作为参考波长, 波长分别是 $\lambda_1=0.394\ 94\ \text{nm}$ 和 $\lambda_2=0.399\ 44\ \text{nm}$, 计算得到两个衍射角度分别为 $\theta_1=53.501\ 0^\circ$ 和 $\theta_2=54.392\ 7^\circ$, 衍射角度之差 $\Delta\theta_1=0.891\ 7^\circ$; 而类氢晶体采用石英 102, 晶格间距 $2d=0.456\ 22\ \text{nm}$ 通过计算得到两个衍射角度分别为 $\theta_3=54.843\ 2^\circ$ 和 $\theta_4=54.958\ 9^\circ$, 衍射角度之差仅为 $\Delta\theta_2=0.115\ 7^\circ$, 在探测器平面上的谱范围差别也小, 可利用探测器宽度进行测量。双晶体组件如图 2 所示, 两种伴线谱计算结果如表 1 所示。几条参考波长衍射角平均值 $\theta_{\text{ave}}=54.43^\circ$, 考虑球面晶体中心到探测器表面的距离 $L=R\sin\theta_{\text{ave}}=3\ 050\ \text{mm}$, 类氦谱线在探测器表面所占宽度近似为 $\Delta L_1=L\Delta\theta_1=47.48\ \text{mm}$, 而类氢谱线在探测器表面所占宽度近似为 $\Delta L_2=L\Delta\theta_2=6.16\ \text{mm}$ 。利用两个完整谱线参考波长的平均衍射角度来确定谱线在探测器表面的相对位置, 类氦晶体的平均衍射角 $\theta_{\text{ave1}}=53.95^\circ$, 类氢晶体的平均衍射角 $\theta_{\text{ave2}}=54.90^\circ$, 因而谱线相对间距 $\Delta L=L\Delta\theta_{\text{ave}}=50.57\ \text{mm}$ 。由此可以粗略估计两个完整谱线在探测器表面所占宽度近似为 77.4 mm, 而探测器探测宽度为 83.8 mm, 表明探测器能够接收到完整谱线, 并且两个谱线在探测器上面的位置不会重叠。

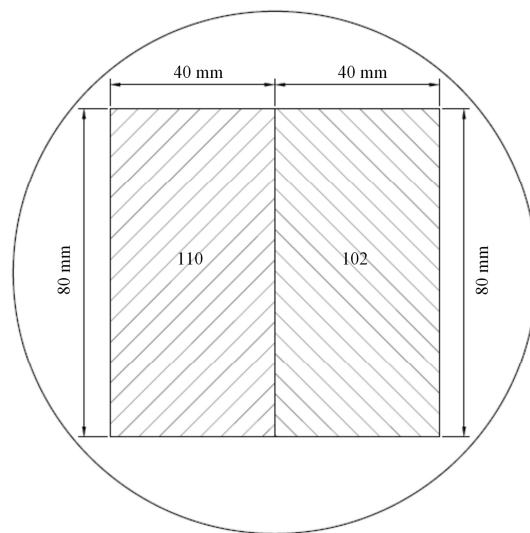


图2 双晶体的简化结构
Fig.2 Simplified structure of double-crystal.

表 1 双晶体组件参数
Table 1 Parameters of the double-crystal assembly.

杂质 Impurity	晶体 Crystal	两倍晶面间距 2d of crystal / nm	波长 Wavelength / nm	布拉格角 Bragg angle / (°)
氩 17 Ar XVII	石英 110 Quartz 110	0.491 304	$\lambda_1=0.394\ 94\ (W)$ $\lambda_2=0.399\ 44\ (Z)$	$\theta_1=53.501\ 0$ $\theta_2=54.392\ 7$
氩 18 Ar XVIII	石英 102 Quartz 102	0.456 225	$\lambda_3=0.373\ 00\ (Ly\alpha_1)$ $\lambda_4=0.373\ 53\ (Ly\alpha_2)$	$\theta_3=54.843\ 2$ $\theta_4=54.958\ 9$

2 实验结果以及分析

安装了双晶体的弯晶谱仪在 2014 年 EAST 实验中投入了使用，成功同时采集到 Ar 的类氢和类氢谱线，验证了双晶体概念的可行性。

图 3 显示了在 EAST 一次放电实验中测量得到的类氢和类氢氩谱。在图 3 中两套谱线成像在像素为 487(x)×1 891(y)探测器表面，其中色阶表示记录光子数的过少，黑线左边是石英 110 晶体采集得到的类氢谱线，黑线右边是石英 102 晶体采集得到的类氢谱线，两个谱线完整成像在探测器表面，并且两者之间有明显界线，验证了双晶体结构安排的可行性。由于球面弯晶谱仪聚焦是在一个球面上，聚焦的谱线投影到平面探测器表面就呈现出图 3 所示的弯曲形状谱线。图 4 是将图 3 纵轴从 1 120 到 1 180 进行并道得到的谱线，详细标注了各个峰值所对应的谱线，其中 W、X、Y 和 Z 是 4 条属于 Ar 的类氢谱线中的强线，而 Ly α 1 和 Ly α 2 属于其类氢谱线。从图 3 中可以看出，类氢谱线的强度相对类氢谱线较弱，这一点从图 4 具体数值也可以看出，类氢谱线的强度比类氢要高很多，约为类氢谱线强度的 10 倍。这是目前的等离子体温度还不够高导致的，当温度上升到 2–3 keV 时，类氢谱线强度将明显提高。

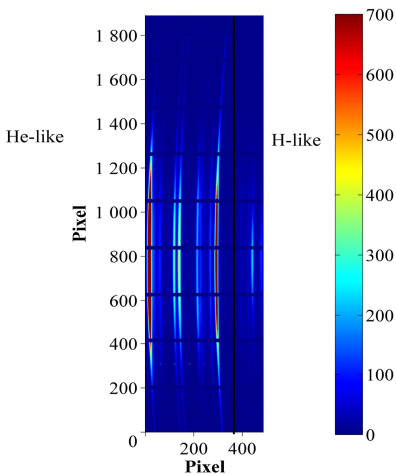


图 3 切向谱仪探测器测量光谱原始图
Fig.3 The original spectra of tangential XCS.

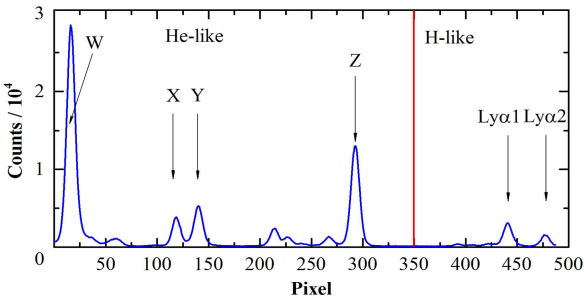


图 4 测量的 Ar 类氢谱线和类氢谱线
Fig.4 Measured spectra of He-like and H-like Ar.

图 4 所示双晶体系统测量的谱线是两个独立系统，在 340–380 像素之间不存在光谱，并且将谱线分成两部分，用来当作背景噪音。图 4 中每个像素对应的波长是通过 Bragg 衍射角来确定的，因为类氢晶体和类氢晶体的晶格间距不同，因此它们每个像素对应波长大小不同。所以对类氢谱线，需要对波长进行重新标定。在类氢谱线数据处理软件的基础上进行改进，标定之后，采用双高斯模型对谱线进行拟合。图 5 得到类氢谱线的 Ly α 1 和 Ly α 2 两条谱线，利用多普勒展宽，在 Ly α 1 的基础上对离子温度进行计算。由于目前等离子体温度相对较低，类氢谱线强度不够，特别是在放电的初始阶段。因此，从 3 s 左右开始对数据进行处理，并且在处理时对时间积分较大，得到的离子温度时间分辨率较差，这些都会随着等离子体温度升高逐渐得到改善。

为验证类氢谱线的正确性，将基于类氢和类氢谱线得到的离子温度进行比较。在 3.5 s 时，4.6 GHz 的低杂波开始注入，由于此频率的低杂波主要是加热电子，从图 6(f)可以看出，电子温度升高，达到 2 keV，由氩的各电离态相对浓度与电子温度关系可知，这时类氢离子所占份额会有所增加，因此类氢谱线强度会相应提高。如图 6(e)所示，利用类氢谱线和类氢谱线测量的离子温度均在 0.9 keV 左右，说明双晶体应用是可行的，并且整套双晶体弯晶谱仪诊断系统能够自洽地给出等离子体的离子温度。

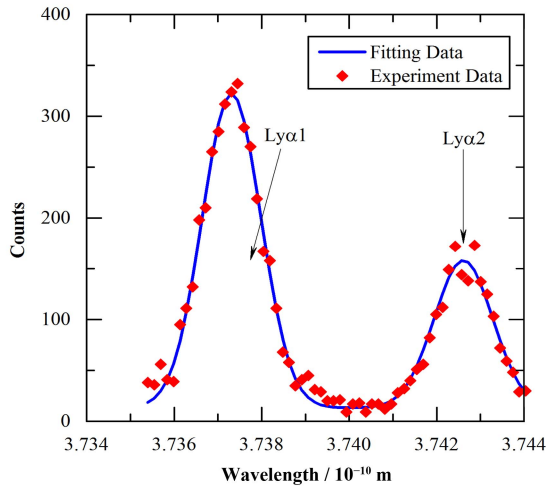


图5 类氢谱线拟合
Fig.5 Fitting of H-like spectra.

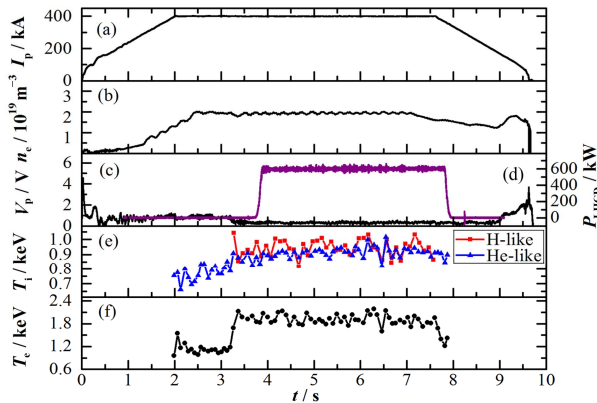


图6 类氢和类氦晶体测量的温度随时间变化
(a) 等离子体电流, (b) 电子密度, (c) 环电压, (d) 低杂波驱动, (e) 离子温度, (f) 电子温度

Fig.6 Temperature changing with time measured by H-like and He-like crystals.

(a) Plasma current, (b) Electron density, (c) Loop voltage, (d) LHCD power (purple), (e) Ion temperature, (f) Electron temperature

3 结语

在 EAST 全超导托卡马克装置上, 通过对弯晶谱仪诊断系统的升级改造和物理实验, 验证了双晶体应用于同一套谱仪的可行性。在实验中, 同一探测器上面测量得到氦离子的类氢和类氢谱线, 从两种谱线得到的离子温度较接近, 证明双晶体设计在托卡马克等离子体诊断是可行的。在 EAST 各种辅助加热系统的协同作用下, 等离子体温度将会超过之前单晶体弯晶谱仪类氦晶体测量的极限温度, 温度和旋转速度的准确测量将受到影响。随着类氢晶体的引入, 更高温度条件下弯晶谱仪的应用已经实现, 并且通过离子温度测量得到进一步验证, 表明未来对于更高温度下测量的能力。

参考文献

- 1 Bitter M, Von Goeler S, Horton R, *et al.* Doppler-broadening measurements of X-ray lines for determination of the ion temperature in tokamak plasmas[J]. *Physical Review Letters*, 1979, **42**(5): 304–307. DOI: 10.1103/PhysRevLett.42.304
- 2 Bitter M, Fraenkel B, Hill K W, *et al.* Numerical studies of the imaging properties of doubly focussing crystals and their application to ITER[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, **66**(1): 530–532. DOI: 10.1063/1.1146341
- 3 Shi Y J, Wang F D, Wan B N, *et al.* Imaging X-ray crystal spectrometer on EAST[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2010, **52**(8): 085001–085014. DOI: 10.1088/0741-3335/52/8/085014
- 4 Lee S G, Bak J G, Bitter M, *et al.* Imaging X-ray crystal spectrometers for KSTAR[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, **74**(3): 1997–2000. DOI: 10.1063/1.1535243
- 5 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 (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, **75**(10): 3660–3665. DOI: 10.1063/1.1791747
- 6 Hill K W, Bitter M L, Scott S D, *et al.* A spatially resolving X-ray crystal spectrometer for measurement of ion-temperature and rotation-velocity profiles on the Alcator C-Mod tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, **79**(10): 10E320. DOI: 10.1063/1.2969080
- 7 Hill K W, Bitter M, Delgado-Aparicio L, *et al.* Development of a spatially resolving X-ray crystal spectrometer for measurement of ion-temperature ($T(i)$) and rotation-velocity (v) profiles in ITER[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, **81**(10): 10E322. DOI: 10.1063/1.3492414
- 8 Lu B, Wang F, Shi Y, *et al.* Upgrades of the high resolution imaging X-ray crystal spectrometers on experimental advanced superconducting tokamak[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, **83**(10): 10E130. DOI: 10.1063/1.4738652
- 9 Marchuk O. Modeling of He-like spectra measured at the TMarchuk, modeling of He-like spectra measured at the tokamak TEXTOR and TORE SUPRAEXTOR and SUPRA[D]. Jülich: Ruhr-Universität Bochum, 2004

Preliminary study on double-crystal for X-ray curved-crystal spectrometer on EAST

CHEN Jun^{1,2} LYU Bo² WANG Fudi² PAN Xiayun^{1,2} LI Yingying² FU Jia² YIN Xianghui^{1,2}
HU Ruiji^{1,2} FENG Shuangyuan^{1,2} SHI Yuejiang^{1,3} YU Yi¹ YE Minyou¹

1(School of Nuclear Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

2(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

3(Department of Nuclear Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

Abstract Background: X-ray curved-crystal spectrometer, as one of important diagnostic tool for measuring the plasma temperature and rotation velocity of the tokamak, is usually based on the satellite spectra of some special kind of impurity by single-crystal diffraction, which limits the temperature range to be measured simultaneously. **Purpose:** This study aims to effectively broaden the temperature range of the spectrometers, an assembly of double-crystal was designed to replace the previous of single-crystal. **Methods:** The two crystals of the assembly having the similar Bragg angles were installed on the same pedestal, which could make the spectra recorded on the same detector. Consideration and technology route of the double-crystal were described and analyzed together with the experimental tests on the Experimental Advanced Superconducting Tokamak (EAST). **Results:** Experimental results on the double-crystal X-ray spectrometer showed that the He-like and H-like Ar spectra were obtained for the first time, and the ion Ar temperatures calculated by two kinds of spectra were in good consistence within a certain error range. **Conclusion:** The application of double-crystal for X-ray curved-crystal spectrometers on EAST proposed in this paper is applicable and feasible.

Key words Plasma diagnostic, Crystal spectrometers, Double crystal, Doppler broadening

CLC TL65.1