

EAST全超导托卡马克高分辨率EUV 光谱仪诊断系统

张 伟¹ 石跃江¹ 王秋平² 沈永才¹ 杜学维² 李颖颖¹
符 佳¹ 王福地¹ 吕 波¹ 徐经翠¹ 何晓业²

1 (中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

2 (中国科技大学国家同步辐射实验室 合肥 230029)

摘要 EAST全超导托卡马克装置上建立一套极紫外(EUV)光谱诊断系统,用于高温等离子体高电离态杂质线辐射研究。该系统利用1200 l/mm凹面变线距全息光栅作为分光元件,工作波段50–500 Å,波长分辨率 $\Delta\lambda\sim 0.16$ Å (186.6 Å),时间分辨为20 ms,空间观测范围为0–450 mm,基本覆盖EAST全超导托卡马克的主等离子体上半空间。在EAST放电期间,利用该系统获得高波长分辨率和时间响应的杂质谱图,通过对等离子体冲氦气,利用已知波长的Ar线,对谱仪进行了初步的原位标定。

关键词 托卡马克, 杂质, EUV 谱仪

中图分类号 O536, TL65

在磁约束聚变装置中的等离子体杂质不可避免,EAST托卡马克装置中常见的非金属杂质有C、O、Si,金属杂质有Fe、Cr、Ni。此外,硼化、锂化等真空壁处理会引入B、Li等低Z杂质,进行杂质输运和辐射偏滤器研究还会注入He、Ne、Ar等杂质。在未来,EAST第一壁部分材料将更换为W或Mo。杂质会引起大量的辐射损失,制约所能获得的等离子体的品质。杂质离子的存在还会稀释聚变等离子体燃料,削弱聚变功率密度。杂质聚芯将导致等离子体约束性能的退降、降低低杂波的驱动效率^[1]。

中大型磁约束聚变装置的主等离子体电子温度较高,杂质主要以高电离态存在,辐射主要集中在软X射线到真空紫外波段。因此,对很多磁约束装置,极紫外(EUV)光谱是重要诊断手段^[2–7,9]。在高温等离子体中,EUV波段光谱可用来分析等离子体与壁的相互作用,估计杂质辐射损失,研究杂质输运现象。但该波段谱线比较密集,要更有效地测量谱线,须使用高分辨率的极紫外谱仪系统。同时,磁约束聚变等离子体的空间分布在高度上并不均匀,须有较高空间分辨本领的谱仪才能得到杂质的空间分布,进行深入的杂质输运研究。

在各磁约束聚变装置上安装的EUV光谱仪,通常由入射狭缝、光栅、探测器组成。光栅多采用凹面变线距光栅,其兼有色散与聚焦作用。由于减少了用于成像的辅助透镜,增加光通量的同时减少了杂散光,分辨率得到提高。Fonck等^[7]研发了一套闪耀角真空紫外光谱仪,用于等离子体杂质诊断,其采用环面全息光栅作为分光元件,得到平场焦平面,消除了象散引起的几何光损失,从而提升了传输效率。Toshiaki Kita等^[8]采用机刻像散修正凹面光栅研发了闪耀角光谱仪,其散射光成像焦平面几乎与束线垂直。十几年前,LHD装置安装了一个平场EUV光谱仪,先后以刻线参数相同的机刻变线距光栅和全息光栅作为分光元件。两者的分辨率几乎没有差别(0.24–200 Å),但全息光栅在压缩高阶光方面性能更优越。全息光栅在全波段(50–500 Å)的灵敏度表现稳定,而机刻光栅在低于200 Å时灵敏度急剧下降^[9]。

本文介绍一套宽波段、高分辨率、具有空间分辨能力的EUV光谱仪,为EAST芯部主等离子体杂质行为研究和物理诊断,为EAST高参数稳态运行,提供设备支持。

国家自然科学基金项目(10975155)、中国科学院科研装备研制项目(EAST软X射线-极紫外高分辨率光谱诊断系统)资助

第一作者: 张伟,男,1983年出生,硕士研究生,核能科学与工程专业

通讯作者: 石跃江, E-mail: yjshi@ipp.ac.cn

收稿日期: 2011-01-24, 修回日期: 2011-04-25

1 平场焦平面光栅原理

入射和出射光束在法线两侧时,光栅方程可为:

$$\sin\alpha - \sin\beta = k\lambda / d \quad (1)$$

式中, α 为入射角; β 为衍射角; $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 为衍射级次; λ 为波长; d 为光栅刻线间距。等间距凹面光栅, d 为常数。对于确定的 k 和 λ , α 决定 β 。用此种类型光栅的光谱仪,如狭缝 S 和光栅 G 置于直径为光栅凹面曲率半径 R 的罗兰圆上,并使狭缝与光栅刻线平行,则入射光经光栅分光后,各衍射光束都能在子午方向汇聚在同一罗兰圆的不同弧线上(图 1a)。

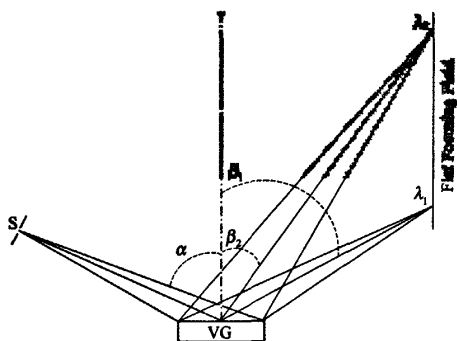


图 1 凹面等间距光栅(a)和凹面变线距光栅(b)
Fig.1 Concave grating with invariable line space (a) and variable line space (b).

采用凹面变线距光栅时(图 1b), d 为变量,对于指定的 k 和 λ , β 将由 α 和 d 决定。调整 d 值可使

某一波段范围的衍射光成像在几乎平直的平面内。

2 EUV光谱仪设计结构

图 2 为平场 EUV 光谱仪光路示意图。入射狭缝到光栅中心距离为 237 mm, 光栅中心到焦平面距离为 235 mm, 入射角为 87° , 成像宽度为 57.7 mm, 色散角度 69.82° – 83.04° 。光栅凹面曲率半径为 5 649 mm。

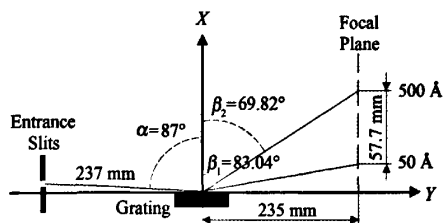


图 2 平场极紫外光谱仪光路示意图
Fig.2 Flat-field EUV grating spectrograph's principle.

该平场极紫外光谱仪(图 3)主要由可调入射狭缝、快门、光栅、探测器构成。其中狭缝、快门以及光栅置于真空腔室内; CCD 探测器通过一段波纹管连接真空腔室左端,并由下面的导轨带动,可在焦面进行扫描,记录不同波段的谱线。CCD 探测器为英国 Andor 公司 DO936N-BN 像元数 $2\,048 \times 2\,048$ pixel, 像元尺寸为 $13.5\,\mu\text{m} \times 13.5\,\mu\text{m}$ 。经过光栅分光后, 50–500 Å 谱线在焦平面上展开距离为 57.7 mm(图 2), CCD 感光面宽度为 27.6 mm, 扫描获得全波段谱线。

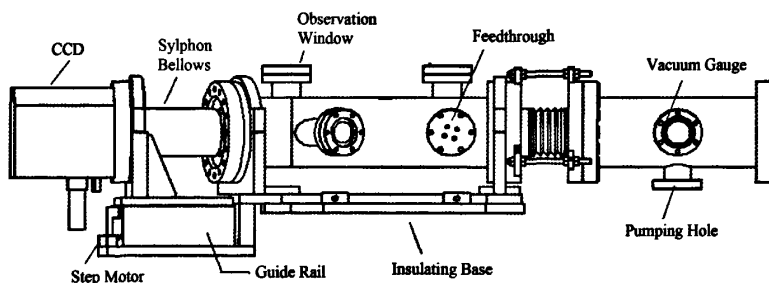


图 3 EUV 光谱仪结构示意图
Fig.3 Outside diagram of EUV spectrometer.

光谱仪腔体通过波纹管与四通管道相连,波纹管有利于与 EAST 装置对接和光谱仪方向调整,还能缓冲两侧应力。四通管道侧面两个 CF35 法兰,一个连接真空计,一个用于系统抽气。四通管道左侧法兰,采用聚四氟乙烯密封圈密封,紧固螺钉外面包有绝缘材料,光谱仪底板支撑隔有绝缘板,这些绝缘措施有利于探测信号的稳定。抽气系统采用

常规电源,而快门、CCD 则采用隔离电源。

杂质输运研究中常进行瞬态杂质注入实验,这要求 EUV 光谱仪探测器有很高的时间分辨能力。快门时间响应远高于 CCD 曝光、读数时间,使用快门后可改善谱仪的时间分辨。为使整个 CCD 晶面均匀曝光,曝光时间要数倍于快门打开时间。其时间分辨率约为 20 ms。

3 EUV光谱仪在EAST装置现场布局

EAST 是世界第一个全超导托卡马克, 基本参数为: 纵场 $B_T=3.5$ T, 大半径 $R_0=1.75$ m, 小半径 $a=0.4$ m, 拉长比 1.2–2, 可在限制器和偏滤器(上单零, 下单零, 双零位形)位形下放电运行^[10]。EUV 光谱仪安装于 EAST 装置水平 B 窗口, 抽气管道末端, 与现有的极向弯晶谱仪(XCS spectrometer)相邻(图 4a)。CF100 插板阀置于光谱仪和 EAST 装置之

间, 当光谱仪真空度达到要求后, 打开插板阀即可通光采集数据。该插板阀还在 EAST 装置进行器壁处理或 EUV 光维修时起两者隔离作用。

EUV 光谱仪与等离子体中心相距 9 000 mm, 入射光束与主抽气管道中心线的水平方向夹角为 2.17° (图 4a), 竖直方向夹角为 2.49° (图 4b)。光栅竖直放置, 光栅刻线与纸面垂直。观测范围自中平面向上 450 mm ($R=1.9$ m, 图 4b), 基本覆盖了主等离子体上半空间。

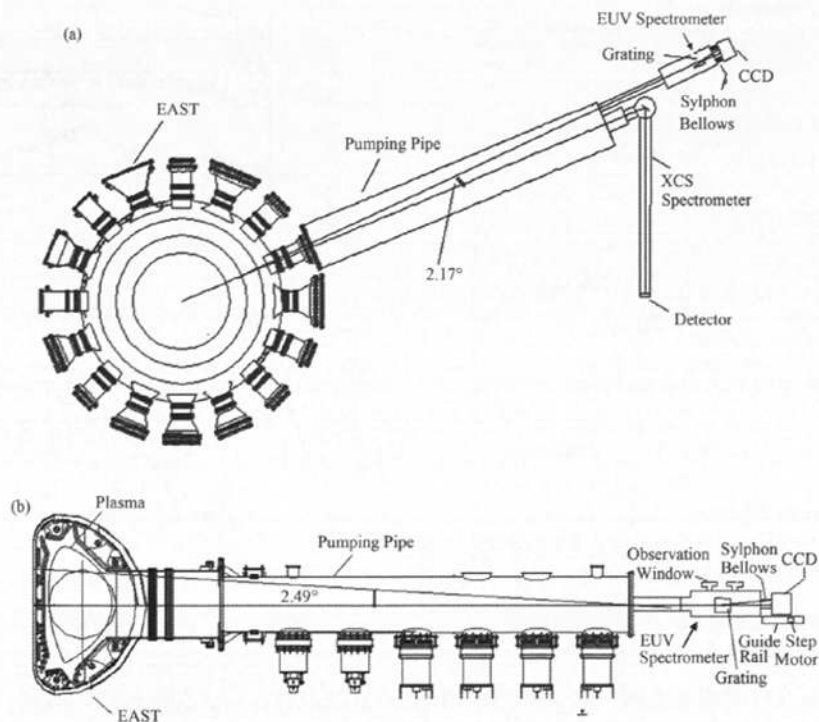


图 4 EUV 在 EAST 安装示意图(俯视图)(a)和(侧视图)(b)
Fig.4 EUV spectrometer on EAST (top view) (a) and (side view) (b).

4 初步实验结果

EUV 光谱仪在中国科学技术大学同步辐射实验室调试阶段, 利用潘宁放电光源的铝谱线, 完成了与 EAST 连接前的台面波长标定, 在谱仪狭缝和 CCD 位置调试到最优化的情况下, 在 $186.6 \text{ \AA}$ 处波长分辨率为 $0.16 \text{ \AA}$, 已接近设计值的 $0.15 \text{ \AA}$ 。但为了让谱仪赶上 EAST 的实验, 当时未继续优化参数。EAST 实验后, 经细致调节, EUV 谱仪分辨率已达 $0.15 \text{ \AA}$ 。该谱仪已在 2010 年冬季 EAST 放电期间投入试运行, 采集了大量的实验数据, 并且从 #35279–#35284 的重复欧姆放电中, 得到了 EAST 装置等离子体在 $50\text{--}500 \text{ \AA}$ 范围内的谱线(图 5)。在 $200 \text{ \AA}$, 谱线的展宽为 $0.3 \text{ \AA}$, 高于台面标定结果,

但此展宽包括谱仪仪器展宽和等离子体离子温度带来的多普勒展宽等。图 5 中, 等离子体所含杂质 C 的辐射强度很高, 这是由于 EAST 装置壁材料为石墨, 放电期间会引入 C 杂质, 在 $50\text{--}500 \text{ \AA}$, C 的类 Li 碳离子(C IV)线辐射丰富; O 元素是各种聚变装置的常见元素, 在该波段 O 的类 Be 离子(O V)线辐射也很密集。此外还观察到了 B IV 谱线, 推测 B 元素是由硼化引的。图 5 中 $250\text{--}400 \text{ \AA}$, 可看到谱线强度跃变, 这是典型的复合辐射谱形。

该 EUV 光谱仪在离线调试阶段已初步完成波长标定, 利用 EAST 放电期间采集的充 Ar 与未充 Ar 气的两炮放电谱形, 根据已知波长的 Ar 线, 进行了原位标定。图 6 给出了 #36226、#36229 两炮在相同时刻采到的谱线。其中 #36226 未充 Ar 气, 而

#36229 在放电前 800 ms 时充 Ar, 充气脉宽为 30 ms。两炮的放电参数基本相同: 等离子体电流 $I_p=500$ kA, 中心弦平均密度 $\bar{n}_e=2.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 纵场强度 $B_T=2.5$ T。图 6(b) 中明显出现较强的 ArXV 和 ArXVI 的谱线。

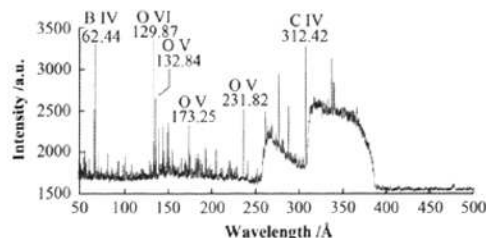


图 5 EAST 装置等离子体 50–500 Å 谱线
Fig.5 Spectral region of 50–500 Å in EAST tokamak plasma.

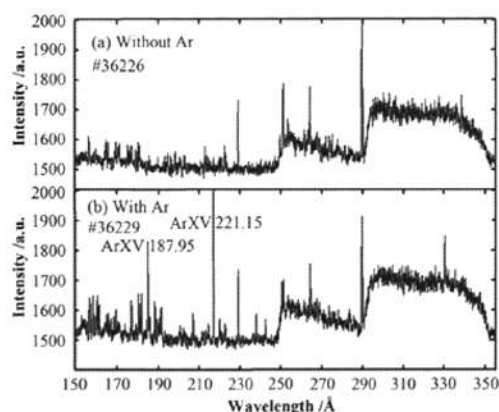


图 6 EAST 装置放电期间采到的原始谱线
Fig.6 EUV spectra from EAST discharges.

图 7 为 EAST 装置典型欧姆放电 #36409 炮放电波形。在等离子体建立初期, 等离子体温度较低, C 原子以较低的电离态存在, C III 的电离能(24.38 eV)低于 C IV 的电离能(47.89 eV), 同时 C III 的 4 647 Å 可见波段的线辐射对应峰值激发截面的电子温度远低于处于短波段的 C IV 的 312.42 Å 线, 这导致了 C III 的 4 647 Å 线在放电初期爆发, 而 C IV 的 312.42 Å 无相应的行为。杂质谱线的线辐射强度与密度及杂质离子本身的浓度成正比, 且在一定温度范围内与电子温度有较密切关系。由图 7, 除放电初期的爆发外, C III 的 4 647 Å 线演化趋势与密度一致, 因为放电平稳后, 温度较高, 谱线的激发截面已与温度关系不大。而放电平稳段的温度范围却是 C IV 的 312.42 Å 激发截面的敏感区域, 由于电子温度下降, 使谱线强度在 2.2–3.3 s 内减弱。图中 CXUV 信号是测量从真空紫外到软 X 射线波段的总辐射强度, 其与电子密度及温度的关系类似于 EUV 波段的 C IV 线, 演化趋势与 C IV 线一致。上

述信号的自洽关联都验证了 EUV 光谱仪测量的 C IV 线的时间演化行为确实有效, 该 EUV 能获得具有时间分辨率的谱。

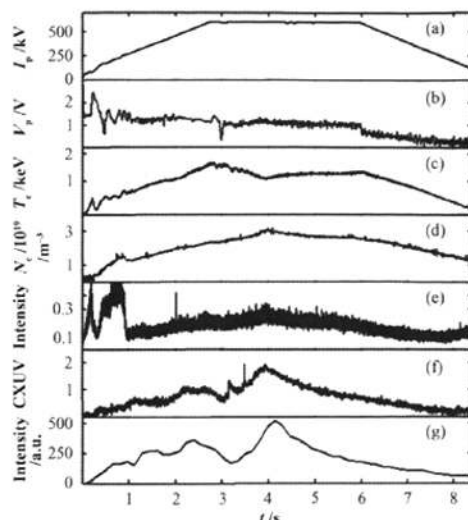


图 7 欧姆放电 #36409 炮放电波形
(a) 等离子体电流, (b) 环电压, (c) 电子温度, (d) 中心弦平均电子密度, (e) C III(4 647 Å) 线辐射强度, (f) XUV 辐射强度, (g) C IV(312.42 Å) 线强度随时间演化
Fig.7 Waveforms of shot 36409# discharge.
(a) Plasma current, (b) Cycle voltage, (c) Electron temperature, (d) Average density of electron along centre chord, (e) Time evolution of C III (4 647 Å), (f) Time evolution of XUV radiation intensity, (g) Time evolution of C IV (312.42 Å)

5 结语

在 EAST 全超导托卡马克装置上, 建立了一套 EUV 光谱仪来研究杂质辐射强度及杂质输运, 目前已经正常投入 EAST 物理实验中, 并获得了大量初步实验结果。结果表明, EUV 光谱仪具有很高的波长分辨能力和时间响应, 其将成为 EAST 装置极紫外波段诊断重要工具。

参考文献

- 1 石秉仁. 磁约束聚变原理与实践[M]. 北京: 原子能出版社, 1988
SHI Bingren. Magnetic confinement fusion principle and practice [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988
- 2 Cui Z Y, Sun P, Dong J F, et al. First measurement of VUV spectroscopy using 1-m normal incidence spectrometer on HL-2A [J]. Plasma Sci Technol, 2008, 10: 298–301
- 3 CUI Zhengying, Shigeru Morita, FU Bingzhong, et al. Space-resolved vacuum ultraviolet spectrometer system for edge impurity and temperature profile measurement in HL-2A [J]. Rev Sci Instrum, 2010, 81: 043503

- 4 Hodge W L, Stratton B C, Moos H W. Grazing incidence time-resolved spectrograph for magnetic fusion plasma diagnostics [J]. *Rev Sci Instrum*, 1984, **55**(1): 16–24
- 5 Lepson J K, Beiersdorfer P, Clementson J, *et al.* EUV spectroscopy on NSTX [J]. *J Phys*, 2010, **43**: 144018
- 6 Biel W, Bertschinger G, Burhenn R, *et al.* Design of a high-efficiency extreme ultraviolet overview spectrometer for plasma impurity studies on the stellarator experiment Wendelstein 7-X [J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, **75**(10): 3268–3275
- 7 Fonck R J, Ramsey A T, Yelle R V. Multichannel grazing-incidence spectrometer for plasma impurity diagnosis: SPRED [J]. *Appl Opt*, 1982, **21**: 2115–2123
- 8 Kita Tatsuo Harada T, Nakano N, Kuroda H. Mechanically ruled aberration-corrected concave gratings for a flat-field grazing-incidence spectrograph [J]. *Appl Opt*, 1983, **22**: 512–513
- 9 Malay Bikas Chowdhuri, Shigeru Morita, Motoshi Goto, *et al.* Spectroscopic comparison between 1200 grooves/mm ruled and holographic gratings of a flat-field spectrometer and its absolute sensitivity calibration using bremsstrahlung continuum [J]. *Rev Sci Instrum*, 2007, **78**: 23501
- 10 Wan Yuanxi, L i Jianggang, Weng Peide, *et al.* 2006 Overview progress and future plan of EAST Project Proc. 21st Int. Conf. on Fusion Energy 2006 (Chengdu, China, 2006) (Vienna: IAEA) CD-ROM file OV/1-1

High resolution EUV spectrometer diagnostic system on EAST

ZHANG Wei¹ SHI YueJiang¹ WANG Qiuping² SHEN Yongcai¹ DU Xuewei²
LI Yingying¹ FU Jia¹ WANG Fudi¹ LÜ Bo¹ XU Jingcui¹ HE Xiaoye²

¹ (Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

² (National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

Abstract A high resolution EUV spectrometer has been installed on EAST tokamak for plasma diagnostic. The system employs a concave varied line spacing groove holographic grating (1 200 grooves/mm at grating center) as dispersion elements, covering wavelength range of 50–500 Å, with resolution of about 0.16 Å at 186.6 Å, and monitoring up half of EAST plasma (0–450 mm). The time resolution is 20 ms and the spatial resolution achieves 50 mm. During the discharge with Ar injection, good spectra were obtained. Compared to the discharge without pumping Ar at all, the Ar spectrum was clearly observed. The time behavior of the C IV (312.42 Å) intensity was analyzed.

Key words Tokamak, Impurity, EUV spectrometer

CLC O536, TL65