

极紫外波段 Ar 光谱分析在 EAST 偏滤器杂质屏蔽效应研究中的应用

张鹏飞^{1,2}, 张凌^{1*}, 许棕^{1,2}, 段艳敏¹, 吴承瑞^{1,2}, 黄娟¹, 吴振伟¹, 郭后扬^{1,3}, 胡立群¹

1. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230031
3. General Atomics, P. O. Box 85608, San Diego, California 92186, USA

摘要 在托卡马克偏滤器区域充入杂质气体是检验偏滤器杂质屏蔽效应的重要手段。利用快速极紫外 EUV 光谱仪对 EAST 托卡马克装置上开展的偏滤器 Ar 杂质注入实验进行观测。结合 NIST 原子光谱数据库对 2~50 nm 范围内不同电离态 Ar 的线光谱进行了谱线识别, 识别出 Ar IV, Ar IX-XI, Ar X IV-X VI 等若干个电离态的谱线。为了同时观测等离子体不同区域的 Ar 杂质行为, 在杂质注入实验时重点监测 Ar X VI 35.39 nm (Ar X VI 电离能 918.4 eV, 主要分布在等离子体芯部) 和 Ar IV 44.22 nm (Ar IV 电离能 9.6 eV, 主要分布在等离子体边界) 这两条谱线。利用该两条谱线强度随时间演化的结果初步分析了偏滤器杂质屏蔽效应。在同一充气口不同等离子体位形下的实验结果表明偏滤器对于从偏滤器区域注入 Ar 杂质的屏蔽效果优于从主等离子体区域注入, 并且下偏滤器及内冷泵的综合粒子排除能力优于上偏滤器。

关键词 Ar 极紫外光谱; EAST 托卡马克; 偏滤器; 杂质屏蔽

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2134-05

引言

在现代磁约束核聚变托卡马克装置中, 偏滤器是隔绝等离子体与壁相互作用的重要结构。其最初目的和首要任务是把等离子体与杂质强烈作用的区域移到远离主等离子体的区域, 阻止杂质进入主等离子体区, 从而产生偏滤器杂质屏蔽、滞留的效果; 同时也具有功率分散, 和排除氦灰的重要作用^[1]。

在偏滤器区域进行气态杂质注入实验, 可以灵活控制充气速率、脉宽和充气位置以研究影响偏滤器杂质屏蔽的这些重要因素。注入的杂质可以分为再循环杂质和非再循环杂质。AlcatorC-MOD 托卡马克上的实验与模拟结果表明在高参数情况下非再循环杂质的偏滤器屏蔽效果依赖于充气位置, 而再循环杂质的屏蔽效果与充气位置无关^[2-3]。氩气 (Ar) 是再循环杂质, 化学性质不活泼。在偏滤器区域的充气口注入后, 以中性粒子的压强梯度力作用下扩散, 随后电离为 Ar 离子, 大部分滞留在偏滤器区域, 少部分沿着刮削层进入主等离子体区域。其不同电离态在等离子体中的分布由 Ar 电离平衡过程所决定, 而后者则是由等离子体的温度、密度分布以及 Ar 在等离子体中的输运特性所决定。分布于偏

滤器区域的 Ar 原子、主等离子体边界和中心的低阶到高阶电离态 Ar 离子会发射出从可见波段到软 X 射线波段范围的线辐射。利用 EAST (experimental advanced superconducting tokamak, EAST) 上新安装的快速极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 波段光谱仪观测 2~50 nm 波段范围内的谱线。结合 NIST (national institute of standards and technology, NIST) 原子光谱数据库对该波段范围内不同电离态的 Ar 线光谱进行了谱线识别, 并通过比较 Ar X VI 35.39 nm, Ar IV 44.22 nm 这两条谱线强度随时间的演化初步分析了 EAST 偏滤器对 Ar 杂质的屏蔽效应。

本文第一部分将简要介绍 EAST 托卡马克装置及快速 EUV 谱仪系统; 第二部分对 Ar 线光谱进行谱线识别, 并在此基础上分析偏滤器杂质屏蔽效应; 第三部分为总结。

1 实验装置

1.1 EAST 托卡马克装置

EAST 托卡马克装置^[4]是全超导托卡马克装置。大半径 1.85 m, 小半径 0.45 m, 纵场 3.5 T, 可灵活控制极向场进行限制器位形和上单零、下单零、双零偏滤器位形实验, 是验证 ITER 高功率长脉冲稳态运行的重要实验平台之一。

收稿日期: 2015-05-16, 修订日期: 2015-10-05

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(2014GB124006)和国家自然科学基金项目(11305214, 11105181, 11275231)资助

作者简介: 张鹏飞, 1991 年生, 中国科学院等离子体物理研究所, 中国科学技术大学博士研究生 e-mail: pfzhang@ipp.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: zhangling@ipp.ac.cn

2014年度EAST将石墨上偏滤器升级为钨铜块结构,第一壁和下偏滤器分别保持为钼和石墨^[5]。以锂化为主要的壁处理手段,上下偏滤器还分别安装有内置式低温泵(简称内冷泵),增强抽气能力。EAST还发展了多个辅助加热系统,包括2.45和4.6GHz低杂波电流驱动与加热系统、离子回旋加热系统和中性束注入系统。EAST上下偏滤器内外靶板和DOME各有充气口,充气阀门开闭由压电阀控制^[6-7],位置如图1所示。

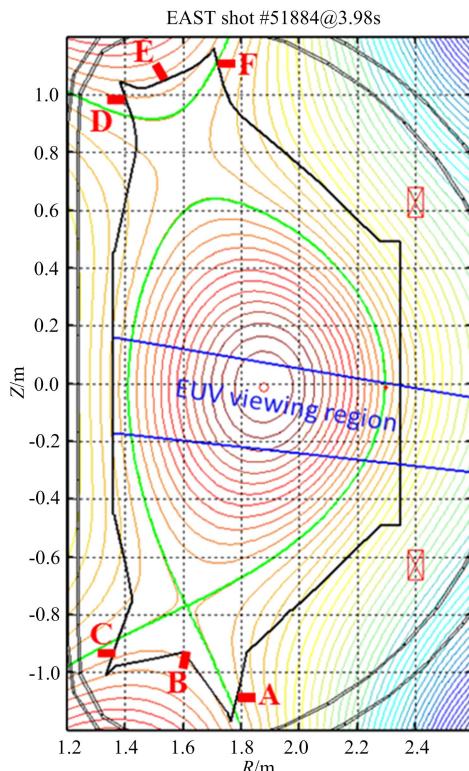


图1 EAST真空室、充气口位置、下单零位形
和快速EUV光谱仪的观测范围

A—F依次为下偏滤器外靶板、DOOM、内靶板和上偏滤器内靶板、DOME、外靶板充气口位置;蓝线内为EUV观测区域;绿线为分界线

Fig. 1 Vacuum vessel , Divertor puffing location , Lower single-null configuration of EAST and viewing region of fast-response EUV spectrometer on EAST

The divertor gas puffing locations at (A) lower outer target, (B) lower DOME, (C) lower inner target, (D) upper inner target, (E) upper DOME, (F) upper outer target. EUV viewing region is inside the two blue line. The last closed magnetic surface is shown in green line

1.2 快速EUV光谱仪系统

实验中利用2014年新搭建的时间分辨为5ms的快速EUV光谱仪系统对Ar谱线进行观测。该谱仪系统安装在EAST水平D窗口,结构如图2所示,主要包括:法兰延伸管和支持、CF63超真空插板阀、EUV谱仪、谱仪可调节支架和分子泵机组等。实验观测区域如图1所示。该快速EUV谱仪与EAST已有的两套有空间分辨的EUV光谱仪^[8]结构类似,均为掠入射平场成像光谱仪。入射狭缝宽度为30μm,

入射角为87°,采用中心线密度为1200·mm⁻¹的变栅距层状刻蚀凹面全息光栅。探测器为高能段背照式CCD,像素点为1024×256,感光面大小为26.6 mm×6.6 mm。谱仪安装有一个激光器用作光路准直。分子泵机组将谱仪系统的真空度维持在10⁻⁵Pa量级。CCD被一个步进电机控制可以沿着谱仪的聚焦面移动而改变观测的波段范围。实验中CCD位置改变三次(观测范围分别为2~14, 10~28和26~50nm)可得到2~50nm范围的全谱。利用CCD的FVB(Full Vertical Binning)采集模式和高读出率,采集和保存一幅谱仅需5ms。步进电机控制软件和CCD采集软件均被安装在谱仪旁的工控机中。在实验过程中,通过远程控制EAST大厅中的这台工控机来控制CCD的移动和数据的采集和存储。利用EAST等离子体本征轻杂质Li, C, N, O等线光谱对快速EUV谱仪的波长进行标定。

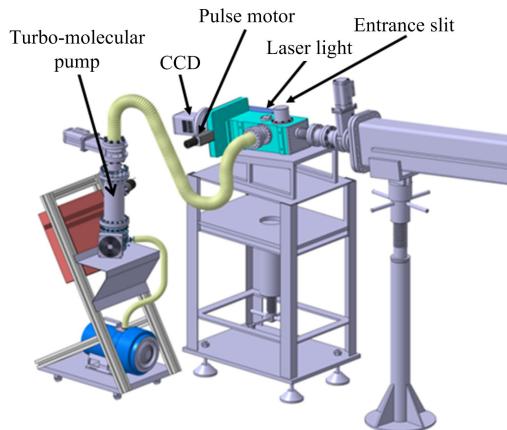


图2 快速EUV光谱诊断系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of fast-response EUV spectrometer system

2 结果与讨论

选择EAST实验期间有Ar充气且观测范围不同的三炮:#51870(观测范围为2~14nm),#51052(观测范围为10~28nm)和#52353(观测范围为26~50nm)来进行谱线识别。EUV谱仪测量结果如图3所示。表1比较了快速EUV谱仪Ar谱线的波长测量结果和其他装置及NIST原子光谱数据库中实验测量结果^[9-10],并列出了各条谱线基态和激发态等数据。从表1可以看出,对于绝大多数Ar谱线,快速EUV谱仪波长测量结果与数据库吻合的很好,相差小于0.008nm,仅Ar IV 44.22 nm这条谱线与数据库相差0.02nm。这是因为在较长波长范围,谱仪线色散较大。如表1所示,在Ar充气条件下,EUV谱仪可以观测到Ar IV, Ar IX-XI, Ar X IV-X VI等若干个电离态的谱线。但是3~5nm波段范围内的Ar IX-X谱线容易与钨在该波段的准连续谱重叠,不利于杂质充气实验分析。Ar IV电离能59.6 eV,主要分布在等离子体边界;Ar X VI电离能918.4 eV,主要分布在等离子体芯部。为了同时观测等离子体不同区域的Ar杂质行为,我们在杂质注入实验时将EUV的观测范围设置为

表 1 识别出的 Ar 谱线列表 (* 引用自文献[10])

Table 1 List of identified Ar emission lines (* from ref. [10])

Ion	Ionization energy /eV *	Lower level *	Upper level *	Observed in this work /nm	NIST observed wavelength /nm *
Ar X	479.7	$2s^2 2p^5 \ ^2P_1/2$	$2s^2 2p^4 (3P) 4d \ ^4F_{3/2}$	3.163 7	3.1 641
Ar IX	422.6	$2s^2 2p^6 \ ^1S_0$	$2s^2 2p^5 \ ^3D \ ^1P_1$	4.148 6	4.1 485
Ar IX	422.6	$2s^2 2p^6 \ ^1S_0$	$2s^2 2p^5 \ ^3S \ ^1P_1$	4.877 8	4.873 7
Ar IX	422.6	$2s^2 2p^6 \ ^1S_0$	$2s^2 2p^5 \ ^3S \ ^3P_1$	4.921 5	4.918 5
2 * Ar IX	422.6	$2s^2 2p^6 \ ^1S_0$	$2s^2 2p^5 \ ^3S \ ^1P_1$	4.8778	4.873 7
2 * Ar IX	422.6	$2s^2 2p^6 \ ^1S_0$	$2s^2 2p^5 \ ^3S \ ^3P_1$	4.921 5	4.918 5
Ar XI	540.4	$2s^2 2p^4 \ ^1D_2$	$2s^2 p^5 \ ^1P_1$	15.188 4	15.186
Ar X	479.7	$2s^2 2p^5 \ ^2P_3/2$	$2s^2 p^6 \ ^2S_{1/2}$	16.556 9	16.553 9
Ar X IV	755.1	$2s^2 2p^2 \ ^2P_3/2$	$2s^2 p^2 \ ^2P_{3/2}$	18.788 0	18.796 2
Ar X V	855.4	$1s^2 2s^2 \ ^1S_0$	$1s^2 2s^2 p \ ^1P_1$	22.106 4	22.115
Ar X VI	918.3	$1s^2 2s^2 S_{1/2}$	$1s^2 2p^2 \ ^2P_{3/2}$	35.385 3	35.385 3
Ar X VI	918.3	$1s^2 2s^2 S_{1/2}$	$1s^2 2p^2 P_{1/2}$	38.901 3	38.906 6
Ar IV	59.5	$3s^2 3p^3 \ ^4S_{3/2}$	$3s^2 3p^2 (^3P) 3d \ ^2D_{5/2}$	44.244 4	44.22

26~50 nm, 重点监测 Ar X VI 35.39 和 Ar IV 44.22 nm 这两条谱线的强度随时间的变化。

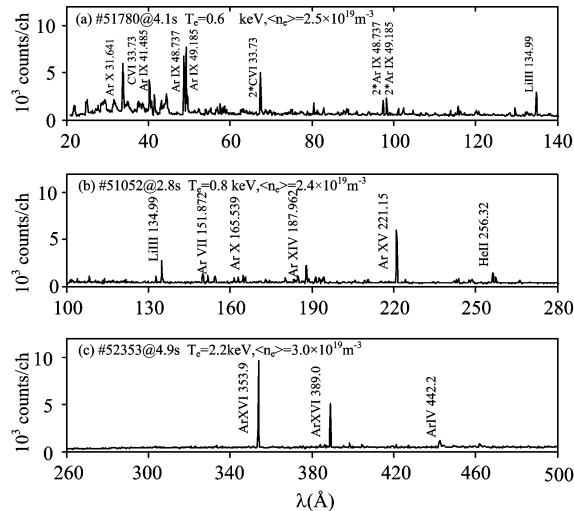


图 3 快速 EUV 谱仪测量结果

(a): 2~14 nm 范围, #51780 炮, $t=4.1\text{ s}$, $T_e(0)=0.6\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 2.5 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$; (b): 10~28 nm 范围, #51052 炮, $t=2.8\text{ s}$, $T_e(0)=0.8\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 2.4 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$; (c): 26~50 nm 范围, #52353 炮, $t=4.9\text{ s}$, $T_e(0)=2.2\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 3.0 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$

Fig. 3 Ar spectra measurement in three wavelength ranges

(a): 2~14 nm, #51780, $t=4.1\text{ s}$, $T_e(0)=0.6\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 2.5 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$; (b): 10~28 nm, #51052, $t=2.8\text{ s}$, $T_e(0)=0.8\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 2.4 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$; (c): 26~50 nm, #52353, $t=4.9\text{ s}$, $T_e(0)=2.2\text{ keV}$, $\langle n_e \rangle = 3.0 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$

比较下偏滤器外靶板充气口(即图 1 中的 A 位置)不同偏滤器位形下的 Ar 充气实验。#51884 炮为下偏滤器(lower single-null, LSN)位形, #51885 为上偏滤器(upper single-null, 为 USN)位形, 其他实验参数和等离子体参数均相同: 纵场 $B_t=2.3\text{ T}$, 电流 $I_p=400\text{ kA}$, 弦平均电子密度 $\langle n_e \rangle = 2.2 \times 10^{19}\text{ m}^{-3}$ 。氩气在 4 s 注入, 脉宽为 70 ms, 充入 Ar 总粒子数约为 1.58×10^{19} 个。等离子体参数和充气后谱线强度

随时间演化如图 4 所示。

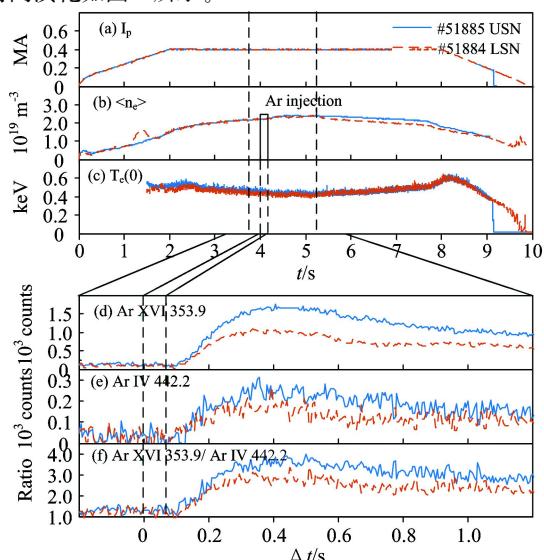


图 4 #51885 炮 (USN) 和 #51884 炮 (LSN) 等离子体参数和充气后谱线强度随时间演化, 4 s 充气, 充气脉宽 70 ms

(a): 等离子体电流 I_p ; (b): 电子弦平均密度 $\langle n_e \rangle$; (c): 芯部电子温度 $T_e(0)$; (d): Ar X VI 353.9 nm; (e): Ar IV 442.2 nm; (f): Ar X VI 353.9 nm 和 Ar IV 442.2 nm 强度比

Fig. 4 Time history of plasma parameters of #51885 (USN) and #51884 (LSN) and time evolution of line intensity and ratio after Ar injected from lower outer target at 4 s for 70 ms; The duration of Ar injection is shown in dashed lines (70 ms)

(a): Plasma current I_p ; (b): The line-averaged electron density $\langle n_e \rangle$; (c): Core electron temperature $T_e(0)$; (d): Ar X VI 353.9 nm; (e): Ar IV 442.2 nm; (f): Ratio of Ar X VI 353.9 nm to Ar IV 442.2 nm

杂质的线辐射强度与杂质离子本身的浓度成正比, 并与谱线的光子发射系数相关。光子发射系数是由等离子体温度和密度决定的。在背景等离子体温度和密度不变的情况下,

可以认为谱线的线辐射强度变化反映了杂质离子浓度的变化。如图4所示,两种位形下,Ar IV线强度从充气开始后约90 ms开始上升,在360 ms左右达到最大值,之后开始缓慢下降,衰减时间约1 200 ms。而Ar X VI线强度从充气开始后约100 ms开始上升,约400 ms达到最大值并开始缓慢下降,衰减时间约1 100 ms。说明Ar在充气管道里的扩散及输运至等离子体边界的时间和为90 ms,Ar从等离子体边界输运至中心的时间约为10 ms,边界的Ar相比中心等离子体的Ar更难被排除。从图4中可以看出,上单零位形(#51885 炮)充气后相同时刻Ar IV和Ar X VI线强度以及Ar X VI/Ar IV线强度比均高于下单零位形(#51884 炮)。说明下偏滤器外靶板充气口注入Ar时,上单零位形下更多的Ar粒子进入等离子体边界和芯部。图5所示为64道辐射量热阵列测量到的Ar注入前后辐射功率时空演化图^[11]。可以看出,充气后上单零位形下主等离子体的辐射功率明显高于下单零位形下主等离子体区的辐射功率,说明下偏滤器外靶板充气口注入Ar时,下单零位形的屏蔽效应优于上单零位形。而两种位形下Ar注入后上半等离子体的总辐射均明显高于下半等离子体,且Ar注入前下单零位形辐射量热测量区域的下偏滤器本底辐射明显低于上单零位形辐射量热测量区域的上偏滤器本底辐射,说明EAST下偏滤器结构本身的粒子屏蔽效应及内冷泵的粒子排除的综合能力优于上偏滤器。

当等离子体为下偏滤器位形时,在下偏滤器注入杂质相当于从偏滤器区域注入杂质;而当等离子体为上单零位形时,在下偏滤器注入杂质相当于从主等离子体区域注入杂质。不同位形下,在下偏滤器内靶板、DOME和上偏滤器外靶板充气口(上偏滤器内靶板、DOME充气口2014年暂不可用)注入Ar均得到相同的结论,即偏滤器对于从偏滤器区域注入Ar杂质的屏蔽效果优于从主等离子体注入。偏滤器区域背景等离子体参数比较高,Ar气从偏滤器注入后大部分粒子迅速被电离成低阶电离态Ar离子,受到摩擦力和离子温度梯度力,合力指向偏滤器方向被屏蔽在偏滤器区域,少量离子跨越磁力线进入主等离子体。而在主等离子体杂质注入区域,背景等离子体参数较低,Ar气从注入后以中性粒子的压强扩散为主,大部分粒子直接进入主等离子体被电离,继而被约束在主等离子体中,较难被排除。

当等离子体为下偏滤器位形时,在下偏滤器注入杂质相当于从偏滤器区域注入杂质;而当等离子体为上单零位形时,在下偏滤器注入杂质相当于从主等离子体区域注入杂质。不同位形下,在下偏滤器内靶板、DOME和上偏滤器外靶板充气口(上偏滤器内靶板、DOME充气口2014年暂不可用)注入Ar均得到相同的结论,即偏滤器对于从偏滤器区域注入Ar杂质的屏蔽效果优于从主等离子体注入。偏滤器区域背景等离子体参数比较高,Ar气从偏滤器注入后大部分粒子迅速被电离成低阶电离态Ar离子,受到摩擦力和离子温度梯度力,合力指向偏滤器方向被屏蔽在偏滤器区域,少量离子跨越磁力线进入主等离子体。而在主等离子体杂质注入区域,背景等离子体参数较低,Ar气从注入后以中性粒子的压强扩散为主,大部分粒子直接进入主等离子体被电离,继而被约束在主等离子体中,较难被排除。

3 结 论

利用快速极紫外(EUV)光谱仪对EAST托克马克装置上开展的偏滤器Ar杂质注入实验进行观测。结合NIST原子光谱数据库对2~50 nm范围内不同电离态的Ar线光谱进行了谱线识别,识别出Ar IV, Ar IX-XI, Ar X IV-X VI等若干个电离态的谱线。利用Ar光谱强度随时间演化的观测结果初步分析了偏滤器杂质屏蔽效应。在同一充气口不同等离子体位形下的实验结果表明EAST偏滤器对于从偏滤器区域注入的Ar杂质的屏蔽效果优于从主等离子区域注入。且EAST下偏滤器结构本身的粒子屏蔽效应及内冷泵的粒子排除的综合能力优于上偏滤器。下一步工作计划是结合实验和模拟对偏滤器的杂质屏蔽效应进行定量研究,并且进一步研究EAST不同实验条件下上下偏滤器对碳、钨等主要本征杂质的屏蔽效应。

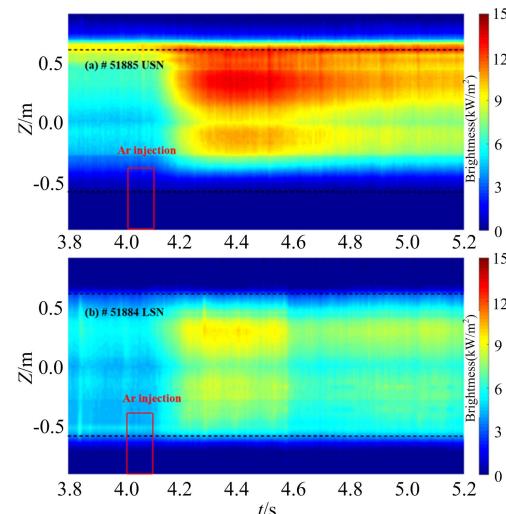


图5 偏滤器下偏滤器外靶板充气口(即图1中的A位置)充Ar气后辐射功率演化,4 s充气,充气脉宽70 ms

(a): #51885 上单零位形; (b): #51884 下单零位形; Y轴为快速辐射量热阵列各道观察弦在 $R=1.85$ m时的Z值,黑色虚线划分主等离子体区域和上下偏滤器区域

Fig. 5 The contour map of radiative brightness after Ar injection from lower outer target (location A in Fig. 1) at 4 s for 70 ms

(a): #51885USN ; (b): #51884LSN (Y axis in this figure show the Z value at $R=1.85$ m for each viewing chord of fast bolometer). Black dotted lines are dividing line between lower divertor or upper divertor and main plasma

References

- [1] Pitcher C S, Stangeby P C . Plasma Physics and Controlled Fusion , 1997, 39(6): 779 .
- [2] McCracken G M , Granetz R S , Lipschultz B , et al . Journal of Nuclear Materials , 1997, 241 : 777 .
- [3] McCracken G M , Lipschultz B , LaBombard B , et al . Physics of Plasmas , 1997, 4(5): 1681 .
- [4] Li J , Guo H Y , Wan B N , et al . Nature Physics , 2013, 9(12): 817 .
- [5] Zhou Z , Yao D , Cao L . Journal of Fusion Energy , 2015, 34(1): 93 .
- [6] HUANG Jian-feng , WU Zhen-wei , WANG Ling , et al(黄剑锋, 吴振伟, 王 玲, 等). Vacuum(真空), 2014, 3 : 001 .
- [7] WANG Wen-zhang , LUO Guang-nan , YANG Zhong-shi , et al(王文章, 罗广南, 杨钟时, 等). Nuclear Fusion and Plasma Physics (核聚

变与等离子体物理), 2016, 36(1): 42.

- [8] ZHANG Wei, SHI Yue-jiang, WANG Qiu-ping, et al(张伟, 石跃江, 王秋平, 等). Nuclear Science and Techniques(核技术), 2011 (08): 613.
- [9] Kramida A, Ralchenko Yu, Reader J, et al. NIST Atomic Spectra Database (version 5.2), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2014.
- [10] Katai R, Morita S, Goto M. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2007, 107(1): 120.
- [11] Duan Y M, Hu L Q, Chen K Y, et al. Journal of Nuclear Materials, 2013, 438: S338.

Application of Extreme-Ultraviolet Ar Spectra Analysis in the Study of Divertor Impurity Screening in EAST Tokamak

ZHANG Peng-fei^{1,2}, ZHANG Ling^{1*}, XU Zong^{1,2}, DUAN Yan-min¹, WU Cheng-rui^{1,2}, HUANG Juan¹, WU Zhen-wei¹, GUO Hou-yang^{1,3}, HU Li-qun¹

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

2. Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China

3. General Atomics, P.O. Box 85608, San Diego, California 92186, USA

Abstract Divertor impurity injection on Tokamak is the most important means to achieve divertor impurity screening efficiency. In this paper, a fast-response extreme-ultraviolet (EUV) spectrometer is used to monitor the Ar emission lines during the EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) divertor Ar injection experiment. Based on the NIST (National Institute of Standards and Technology) atomic spectrum database, the emission lines from different ionized Ar ions in 2~50 nm wavelength range, e.g. Ar IV, Ar IV-XI and Ar X IV-X VI, are being identified. Ar X VI 35.39 nm and Ar IV 44.22 nm with the ionization energy of 918.4 and 59.6 eV respectively are being monitored during the experiment with Ar puffing to observe the behavior of Ar impurities in different regions in plasmasimultaneously. The preliminary analysis on divertor impurity screening efficiency is carried outwith the time evolution of intensities of two Ar emission lines. The results of experiment puffing from the same gas puffing inlet (e.g. from lower outer target inlet) and withdifferent plasma configurations (e.g. lower single null, upper single null) show that the screening effect on the impurity injected from the divertor region is better thanfrom the main plasma region; the screening effect of lower divertor and particle pumping by internal cryopump installed in lower divertor is stronger than upper divertor.

Keywords Ar extreme ultraviolet spectra; EAST Tokamak; Divertor; Impurity screening

(Received May 16, 2015; accepted Oct. 5, 2015)

* Corresponding author