

快速真空紫外光谱诊断在 EAST 实验的初步应用

何 梁^{1,2}, 张洪明^{*2}, 曹锦佳¹, 沈永才³, 李颖颖², 符 佳²,
张 凌², 戴舒宇⁴, 王福地², 胡睿佶^{2,5}, 刘 兵⁶, 张晓龙⁷,
许 棕⁷, 宾 斌^{1,2}, 杨 进^{1,2}, 王勋禹^{1,2}, 吕 波², 龚学余¹

(1. 南华大学核科学与技术学院, 衡阳 421001; 2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;
3. 安庆师范大学物理与电气工程学院, 安庆 246133; 4. 大连理工大学三束材料改性教育部重点实验室, 大连 116024;
5. 中国科学技术大学工程与应用物理系合肥 230026; 6. 西南交通大学物理科学与技术学院聚变科学研究所, 成都 610031;
7. 深圳大学新能源研究中心, 深圳 518061)

摘要: 为了在 EAST 装置上开展高参数放电条件下边界杂质辐射的实验研究, 发展了真空紫外(VUV)光谱诊断系统。该系统采用了焦距为 200mm 的 Seya-Namioka 型 VUV 光谱仪, 并配备了 $600\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$ 凹面全息光栅, 所能观测的波长范围为 50~700nm, 覆盖真空紫外、近紫外和可见光波段。系统在垂直方向的观测范围为 $Z=-350\sim350\text{mm}$ 。利用该系统开展了 EAST 边界杂质谱线的实验研究。通过分析 CIV(154.8nm)杂质和 Fe II(235nm)的谱线强度的时间演化行为, 验证了该系统谱线强度测量的准确性与可靠性。通过分析 CI(365.2nm)杂质辐射强度在加热功率调制下的时间演化行为, 验证了该系统研究较短时间尺度的杂质辐射行为的可行性。

关键词: 等离子体诊断; 真空紫外光谱诊断系统; 杂质辐射

中图分类号: O536; TL65⁺¹

文献标志码: A

1 引言

开展杂质输运研究对于提高聚变等离子体约束性能有非常重要的意义。在托卡马克装置放电期间, 等离子体与装置第一壁、偏滤器等面向等离子体的壁材料发生相互作用, 会在壁表面溅射出各种粒子。在壁表面产生的各种粒子作为杂质进入等离子体后会稀释主离子浓度, 增加等离子体辐射损失, 引发不稳定性, 甚至导致破裂^[1]。国际热核聚变堆(ITER)选择了能够承受高热负荷和耐侵蚀(低杂质溅射率)的金属钨作为偏滤器靶板材料^[2]。然而, 由于新经典箍缩效应, 钨杂质极易在等离子体

芯部聚集(也称杂质聚芯), 引起芯部辐射急剧增加, 降低能量约束引发等离子体不稳定性甚至破裂^[3,4]。ITER 作为全超导托卡马克装置, 一个重要目标就是实现高性能稳态运行(高约束模式, 等离子体持续 3000s)。如何抑制钨杂质聚芯, 是 ITER 实现高性能稳态运行所面临的一个重大挑战^[5]。此外, EAST 装置拥有金属钼第一壁, 钨靶板上偏滤器和石墨靶板下偏滤器等面向等离子体的部件, 因此 EAST 等离子体中有较高含量的钼(Mo)、钨(W)、碳(C)等杂质^[6]。目前如何控制等离子体中的杂质含量和辐射损失已经成为实现更长脉冲放电所面临的重要议

收稿日期: 2019-06-07; 修订日期: 2020-06-14

基金项目: 国家磁约束核聚变能发展研究专项(2017YFE0301300, 2018YFE0301100); 聚变堆主机关键系统综合研究设施(2018-000052-73-01-001228); 国家自然科学基金(11805231); 安徽省自然科学基金(1808085QA14, 1908085J01); 中国科学院等离子体物理研究所科学基金(DSJJ-202002); 湖南省自然科学基金(2017JJ3268); 湖南省教育厅基金(17C1352); 湖南省核聚变国际科技创新合作基地(2018WK4009)

作者简介: 何梁(1994-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要从事等离子体物理研究。

***通讯作者:** 张洪明(1987-), 男, 山东聊城人, 博士, 助理研究员, 主要从事等离子体物理研究。

题。亟需开展多种实验条件下的杂质输运研究来探索 EAST 装置等离子体杂质控制方法。

真空紫外波段(VUV, 50~200nm)的光谱诊断系统是开展杂质输运研究的一种重要诊断。边界杂质在 VUV 波段有丰富的线辐射, 比如 C²⁺、C³⁺离子的共振线, C III(97.7nm) 和 C IV(154.8nm), 氚原子辐射的 Ly_a(121.57nm) 等谱线, 以及大量的杂质钨和钼的谱线^[8~15]。测量这些谱线可以为研究边界杂质输运行为提供重要信息。随着低杂波加热(LHW), 离子回旋波加热(ICRF), 中性束注入(NBI), 电子回旋波加热(ECRH)等多种辅助加热系统的成功运行, EAST 装置总加热功率显著提升^[7]。随着辅助加热功率的显著提升, 边界区域等离子体参数显著提升, 边界杂质辐射也向短波段移动, 主要辐射波段从可见光波段(350~700nm)移向近紫外波段(200~350nm)和真空紫外波段(VUV, 50~200nm)。因此在 EAST 装置上发展 VUV 波段的光谱诊断系统对于开展杂质属于研究, 发展杂质含量控制方法尤为重要。为了研究杂质控制方法, 探索杂质控制方案, 需要开展大量的芯部和边界杂质输运研究。

在国内外多个聚变实验装置上, 已经发展了多套 VUV 光谱诊断系统。1998 年, JET 装置应用 VUV 光谱诊断系统, 成功开展了 H、D、He 等离子实验条件下的杂质输运研究。在 2010 年, HL-2A 装置上建立了时空分辨的 1m 焦距的垂直入射 VUV 光谱诊断系统, 完成了绝对强度标定和测量实验。2014 年, LHD 装置上发展了 3m 焦距空间分辨 VUV 光谱系统, 并完成了边界低电离态钨杂质离子辐射的空间分布测量。2018 年, J-TEXT 装置上发展了高时空分辨的 1m 焦距的垂直入射 VUV 光谱诊断系统, 利用分支比方法完成了绝对强度标定, 并开展了多种放电条件下的杂质输运研究。目前 EAST 装置配备多套极紫外(EUV)波段和可见光波段的光谱诊断系统, 观测波段分别覆盖 1~50nm^[16,17] 和 350~800nm^[18]。但是目前 EAST 装置尚无观测真空紫外波段的光谱诊断系统, 为开展高加热功率条件下的边界杂质输运研究造成了很大困难。因此, 针对 EAST 装置边界杂质输运实验研究的需求, 发展

了 VUV 光谱诊断系统^[19], 本文主要介绍 VUV 光谱诊断系统在 EAST 装置上的初步实验数据分析。

2 VUV 光谱诊断系统

VUV 光谱诊断系统为满足 EAST 需求, 进行了如下设置。为了获得较好的垂直观测视野, 选取了合适光谱系统安装位置。为了降低 EAST 装置运行期间地面震动的干扰, VUV 光谱诊断系统放置在了光学减震平台上。为了实现 50~700nm 波长观测范围, 采取了 Seya-Namioka 光路设计。考虑到对 EAST 实验中较短时间尺度的杂质辐射行为的测量, 选择了超快采样率 CCD 探测器。以下是整个 VUV 光谱诊断系统的主要部分介绍。

2.1 总体布局

VUV 光谱诊断系统安装在 EAST 装置 C 窗口内真空抽气管道末端, 与弯晶谱仪共用同一通光管道。系统整体布局如图 1 所示, 等离子体中心(即磁轴位置)与 VUV 光谱诊断系统入射狭缝之间的距离约为 9m。VUV 光谱诊断系统主要由 VUV 光谱仪、CCD 探测器、光谱仪支撑系统和真空抽气系统组成。VUV 光谱诊断系统和 EAST 内真空室抽气管道末端之间装有超高真空气动插板阀(漏率 $\leq 10^{-10} \text{ Pa}\cdot\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), 用来控制 EAST 内真空室和 VUV 光谱诊断系统真空室之间的真空的隔离与联通。由于没有配置空间分辨狭缝, 目前系统尚无空间分辨能力, 仅可以提供芯部到边界弦积分的杂质辐射信息。

2.2 VUV 光谱仪

EAST 等离子体杂质辐射光线通过 VUV 光谱仪分光后形成光谱, 光谱投射到 CCD 探测器感光芯片表面, 由 CCD 探测器完成光谱信号采集。VUV 光谱诊断系统采用了 McPherson 公司生产的 Model 234/302 型(Seya-Namioka)VUV 光谱仪, 如图 2 所示, 其焦距约为 200mm, 进光口和出光口位置固定, 通过调整光栅角度来改变所观测的波长。所配备的光栅为 40mm×45mm 像差校正凹面全息光栅, 光栅安装在光栅转动平台上, 通过超高精度角度调节系统来调整光栅角度。光栅表面采用铝(Al)和氟化镁

(MgF₂)复合涂层来增强折射效率。根据不同的杂质谱线测量需求, VUV 光谱仪可以配备不同刻线密度的光栅, 以获得不同的波长观测范围、波长分辨率和色散率。在配备 $600\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$ 的光栅的情况下, 可可观测的波长范围为 50~700nm, 覆盖了真空紫外和可见光波长范围, 同时在 313.1nm 处可以实现波长分辨率为 0.2nm, 满足一般谱线识别的要求。VUV 光谱仪配备宽度可调的入射狭缝, 其宽度通过一个

外置的千分尺进行调整, 狹缝宽度变化范围为 $10\mu\text{m}$ ~ 3mm 。在本系统中为了提高波长分辨率, 将狹缝宽度设置为 $10\mu\text{m}$ 。由于在此波段 EAST 等离子体杂质辐射强度较高, 将狹缝宽度设置为 $10\mu\text{m}$ 仍然可以观测到较强的杂质辐射谱线。可以通过调节沿狹缝垂直方向放置的两块高度挡板的距离来调整入射狹缝高度, 在无空间分辨测量需求的情况下入射狹缝高度一般设置为 20mm。

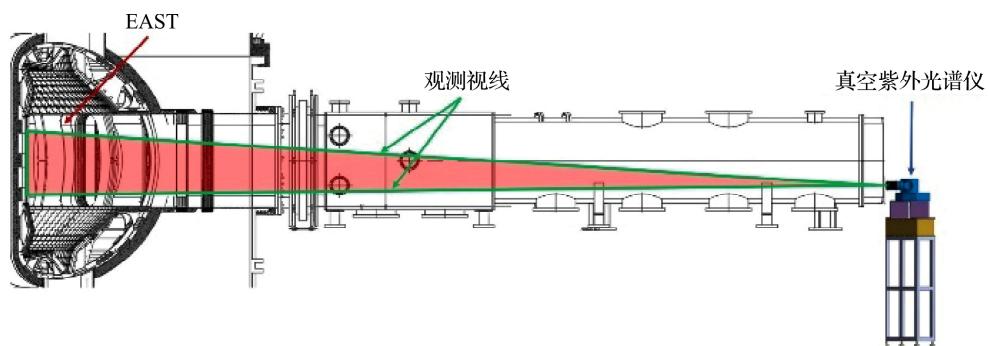


图 1 VUV 光谱诊断系统侧视图

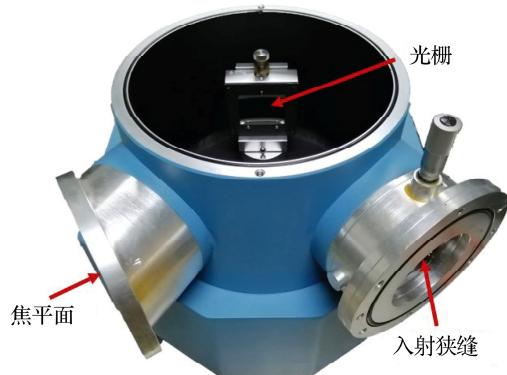


图 2 VUV 光谱仪

Model 234/302 型 VUV 光谱仪有两种工作模式: 一种为配备出射狭缝的单色仪模式, 一种为配备 CCD 探测器的谱线观测模式。如图 2 所示, 本光谱仪出光口可以安装出射狭缝来选择输出谱线波长, 实现单色仪的测量功能。也可以在出光口安装 CCD 探测器来测量光谱, 作为光谱仪使用。进光口和出光口光轴夹角为 64° , 入射焦距和出射焦距分别为 181.356mm 和 198.907mm。本系统采用的

CCD 探测器的感光面沿波长方向的长度为 6.7mm, VUV 光谱仪狹缝到等离子体中心的距离约为 9m, 而入射狹缝的宽度和高度分别为 $10\mu\text{m}$ 和 20mm。通过在 EAST 装置真空室内对 VUV 光谱诊断系统空间观测范围进行空间位置标定, 测量得到系统在磁轴的位置的垂直观测范围约为 $Z=-350\text{--}350\text{mm}$ 。EAST 装置水平窗口垂直尺寸为 $Z=-450\text{--}450\text{mm}$ 。因此 EAST 装置窗口不影响 VUV 光谱诊断系统的垂直空间观测范围。

通过在 Seya-Namioka 型单色仪出光口处安装 CCD 探测器来代替出射狭缝, 可以实现光谱测量的功能, 作为光谱仪使用^[23, 24]。由于单次测量波长范围有限, 可以通过改变光栅角度观测不同波长范围的光谱。由于光谱成像平面与出光口法兰有 25° 夹角, 因此在 CCD 探测器和出射口法兰之间需要安装角度适配器。本光谱诊断系统中采用的 CCD 探测器尺寸为 26.7mm(波长观测方向)×6.7mm(垂直方向), 探测器感光芯片长边水平放置, 以便获得较大的波长观测范围。在 EAST 装置放电期间, 通过已

知波长的谱线对系统进行了波长标定，并对光谱仪的波长准确性进行了评估和测试。系统通过精密转动平台带动光栅转动来改变系统观测波长范围。为了评估光栅转动带来的波长误差，在 EAST 装置实验中通过多次改变波长观测范围来测试了系统的波长重复准确性。以谱线强度较高的 C³⁺离子共振线 CIV(154.8 nm)为例，在多次改变光谱仪波长观测范围后，系统测量到的 CIV(154.8 nm)谱线的波长误差 $\leq \pm 0.1\text{nm}$ 。

2.3 CCD 探测器

VUV 光谱诊断系统配备了 1024×256 像素背照射 CCD 探测器(Andor Newton DO920P)，量子效率最高可达 95%。像素尺寸 $26\mu\text{m} \times 26\mu\text{m}$ ，感光芯片有效面积为 $26.7\text{mm} \times 6.7\text{mm}$ 。其中感光芯片长边沿水平方向(波长观测方向)放置，以获得更大的波长观测范围。数据采集过程中通常将 CCD 温度降至 -20°C 有效的降低暗电流噪声^[22, 23]。在无空间分辨测量模式下，通常采用全垂直 Binning (FVB) 模式来降低读出时间并提高采样频率。在 FVB 模式下，最高可以实现 200Hz 的采样率，且信噪比也会显著提升。为了评估 Model 234/302 型 VUV 光谱仪与 Andor Newton DO920P 型 CCD 探测器配合后的系

统探测效率，在 EAST 放电平台区对所测量常用谱线强度的计数率进行了测试。以谱线强度较高的 C³⁺离子共振线 CIV(154.8 nm)为例，在光谱仪入射狭缝宽度为 $10\mu\text{m}$ ，曝光时间 5ms 的条件下，CIV(154.8 nm)谱线的计数率为每道 35000 个(其中饱和计数率为每道 65536 个)。因此，此 VUV 光谱诊断系统的探测效率适用于测量 EAST 放电平台区的杂质辐射。在需要测量其他谱线强度较弱的杂质谱线时，可以适当增加狭缝宽度和曝光时间来增加谱线测量的计数率。

3 EAST 装置实验结果和数据验证

3.1 VUV 光谱诊断系统杂质谱线测量

EAST 装置采用金属钨和石墨作为上下偏滤器的靶板材料，因此在 EAST 装置放电时等离子体中会有较高含量的钨和碳杂质。为了改善壁条件，降低重杂质产生和气体再循环，在 EAST 实验期间会进行锂化壁处理，因此在放电过程中也会观测到较强的锂杂质辐射。此外，EAST 装置装置采用重金属钼作为真空室第一壁材料，在等离子体参数较高时也能观测到较强的金属钼杂质辐射。

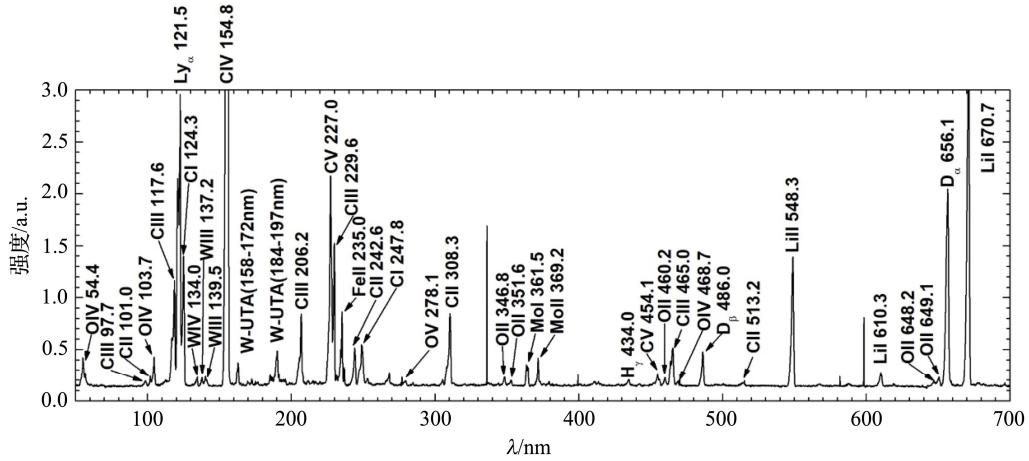


图 3 50~700nm 波段范围内的杂质辐射谱线

如图 3 所示，利用 VUV 光谱诊断系统测量了 EAST 装置放电过程中杂质在 50~700nm 波长范围内的杂质辐射谱线。受限于单次波长观测范围，无

法在同一次放电中完成全波段谱线测量，因此需要在多次参数相似的放电中通过扫描来测量不同波段的杂质谱线。图 3 是在 #83334、#83336、#83339、

#83341、#83344、#83346、#83348、#83350 共 8 次放电过程中测量到的杂质谱线。这 8 次放电等离子体参数相似：上单零放电，等离子体电流 $I_p=450\text{kA}$ ，等离子体弦平均电子密度约 $n_e=2.4\times10^{19}\text{m}^{-3}$ ，芯部等离子体电子温度约 $T_e\approx1\text{keV}$ 。在实验过程中，为了提高时间分辨率，VUV 光谱诊断系统采用 FVB 采集模式，采用周期设置为 5ms，以提高时间分辨率。如图 3 所示，可以观测到 C、O、Li、Fe、W、Mo 等杂质谱线。由于上述 8 次放电是在 EAST 装置内真空室锂化处理后不久进行的，因此壁处理对 W、Mo 等重杂质的产生抑制效果较好，等离子体中 W、Mo 杂质含量相对较低，但是锂杂质辐射谱线 Li II (548.3nm) 和 Li I (670.7nm) 则较强。CIV(154.8 nm) 为 C^{3+} 离子的共振线，因此谱线强度很强。在此波段，除了观测到 W III (137.2nm)，W III (139.5nm) 和 W IV (134.0nm) 等较为独立的钨杂质谱线之外，在 158~172nm 和 184~197nm 波长范围内也分别观测到了钨杂质的伪连续谱(W-UTA)。目前还无法完全对此波段内的钨光谱进行谱线识别，还需要结合更高分辨率的光谱仪和钨杂质谱线计算程序进行细致的研究。

3.2 VUV 波段杂质辐射强度时间演化

在完成 VUV 波段杂质谱线识别之后，利用 VUV 光谱诊断系统研究了 EAST 装置上不同杂质成分的时间演化行为。图 5 为 EAST 装置上射频波协同加热条件下放电(#83700)的波形图。此次放电脉冲为 $t_d=8.64\text{s}$ 。在放电初期，在欧姆线圈驱动下，等离子体电流逐渐爬升，并在 $t=2.25\text{s}$ 达到电流平台区，此后等离子体电流一直维持在 $I_p=450\text{kA}$ 。与此同时，低杂波加热投入运行，等离子体密度和储能进一步上升。此外，在 $t=1.7\text{s}$ ECRH 投入后，等离子体电子温度显著提升。在 LHW、ECRH、ICRF 协同加热下，放电平台区的弦平均电子密度和等离子体储能分别维持在 $n_e=3.3\times10^{19}\text{ m}^{-3}$ 和 $W_p=120\text{kJ}$ 左右。

图 4a 和 4b 分别是在#83700 $t=4\text{s}$ 时 VUV 光谱诊断系统 CCD 探测器测量到的光谱图像和相应的杂质谱线。此次放电中 CCD 探测器采用 FVB 模式，

垂直方向 256 个像元 Binning 为一个通道，因此尚且无法测量杂质辐射的空间分布信息。图 4a 为此光谱图像对应的谱线图，此次放电中 VUV 光谱仪中心波长设置为 $\lambda_0=200\text{nm}$ ，观测波长范围为 $\lambda=110\sim280\text{nm}$ 。为了提高波长分辨率，光谱仪狭缝宽度设置为 $10\mu\text{m}$ 。因此观测到的辐射谱线主要是 C、O、Fe、W 等杂质谱线强度较强的谱线。

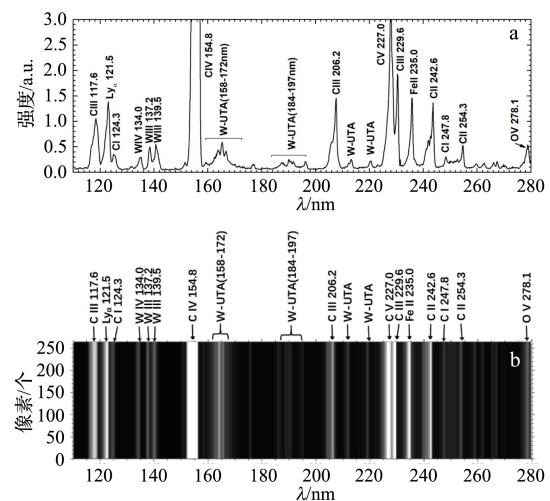


图 4 110~280nm 波段范围内的杂质辐射谱线(a)和#83700 次放电 VUV 光谱诊断系统 CCD 探测器谱线图像(b)

图 5g 和 5h 分别是#83700 放电中杂质碳和铁在 CIV(154.8nm) 和 Fe II(235nm) 波长位置的谱线强度时间演化曲线。在 $t=1.6\text{s}$ 和 $t=2.25\text{s}$ ECRH 和 LHW 分别投入之后电子温度显著提升，CIV(154.8nm) 强度显著增强，而 Fe II(235nm) 辐射强度变化较为平缓，反映出加热条件对 C 和 Fe 杂质辐射有不同的影响。在 $t=4\text{s}$ 时刻电子密度和等离子体储能趋于稳定，CIV(154.8nm) 和 Fe II(235nm) 辐射强度也趋于平稳。在 $t=8.1\text{s}$ 时 ECRH 停止注入，电子密度和等离子体储能随之下降，CIV(154.8nm) 和 Fe II(235nm) 的辐射强度也略有下降。但是随后由于等离子体约束变差，等离子体与壁相互作用增强，大量杂质被带入等离子体中，因此在 ECRH 停止注入之后，CIV(154.8nm) 和 Fe II(235nm) 急剧增加。由于等离子体辐射损失增强，也造成了等离子体储能的下降。通过对加射频波热功率与杂质的时

间演化的细致分析, 在采样时间设置为 5ms 的条件下, 碳杂质辐射随射频波加热功率的时间同步误差 $\leq 5\text{ms}$ 。此次放电中 C 和 Fe 辐射时间演化验证了 VUV 光谱诊断系统测量杂质辐射时间演化的可靠性。

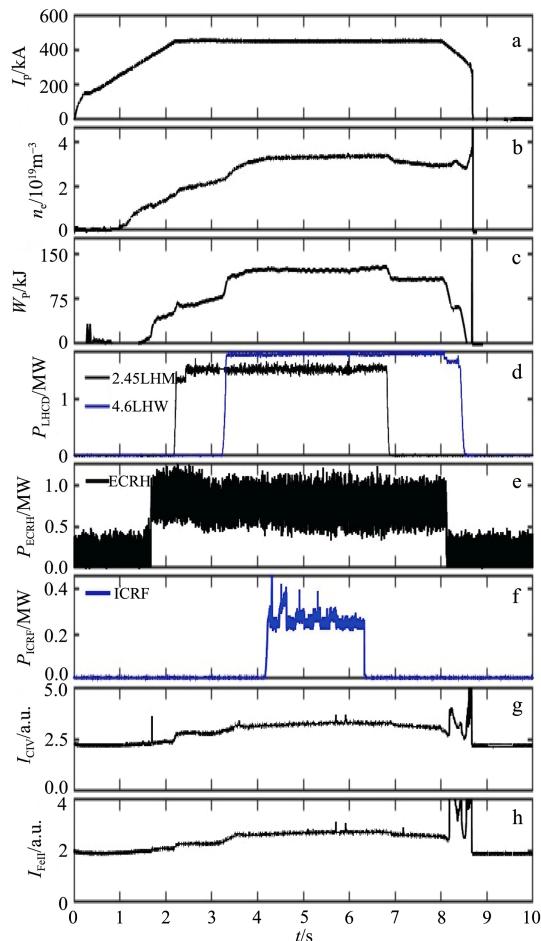


图 5 主要放电参数随时间演化图

a—等离子体电流; b—电子密度; c—等离子体储能; d—低杂波功率; e—电子回旋功率; f—离子回旋功率; g—CIV (154.8nm) 辐射强度; h—Fe II (235nm) 辐射强度。

此外, 基于对 VUV 光谱仪时间测量误差的评估, 分析了 C I 随 NBI 加热功率的变化。利用 VUV 光谱诊断系统测量了 NBI 调制加热模式下的杂质辐射行为。如图 6 所示, 在 EAST 装置#83779 次放电中, 在 $t=3, 4, 5, 6\text{s}$ 时刻分别注入功率为 $P_{\text{NBI}}=1.35\text{ MW}$ 的 NBI 加热脉冲, 脉冲持续宽度为 $t=100\text{ms}$ 。图 6 也给出了 VUV 光谱诊断系统测量到了碳杂质

在 C I (365.2nm) 位置的杂质辐射的时间演化行为, 此次放电过程中采样频率设置为 200Hz。可以看出虽然在 $t=2\sim 6\text{s}$ C I (365.2nm) 强度缓慢增强, 但是与 NBI 加热功率有很强相关性: NBI 注入时 C I (365.2nm) 辐射强度随之增加, 而 NBI 停止注入后 C I (365.2nm) 辐射强度迅速下降。在短脉冲 NBI 功率调制加热的条件下, VUV 光谱诊断系统的提供的杂质辐射时间演化, 可以准确反映杂质辐射强度随 NBI 加热功率的时间响应, 验证了 VUV 光谱诊断系统的高采样率测量可以为短时间尺度的杂质输运研究提供可靠的实验数据支持。

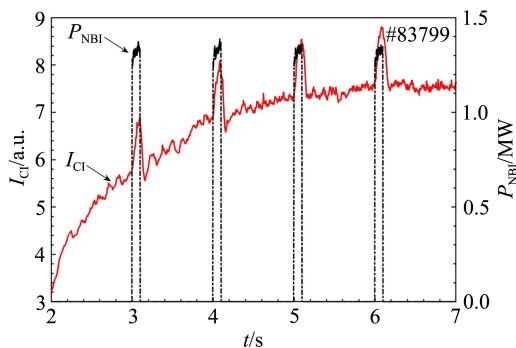


图 6 NBI 加热调制条件下 C I (365.2nm) 辐射强度时间演化

4 总结

为了开展边界杂质输运研究, 探索有效可行的杂质含量控制方法, 在 EAST 装置上发展了 VUV 光谱诊断系统来观测边界杂质辐射。在 2019 年 EAST 装置实验期间, VUV 光谱诊断系统投入运行, 并获取了大量的有价值的杂质辐射实验数据。在 EAST 装置上观测了 50~700nm 波长范围内的杂质辐射, 完成了杂质辐射谱线识别。此波段可以观测到大量的 Li、C、O、Fe 较轻杂质的辐射谱线, 以及 Mo 和 W 重杂质辐射谱线。在完成谱线识别之后, 分析并研究了杂质辐射强度随加热功率的变化关系, 相关结果验证了超快 VUV 光谱诊断系统的可靠性。VUV 光谱诊断系统为以后在 EAST 装置上开展边界杂质输运研究提供了重要的诊断支持。

感谢 EAST 装置团队所有工程技术人员的帮

助和支持;感谢中国科学院重大科技基础设施开放研究项目(EAST 全金属壁条件下长脉冲高参数运行的杂质控制研究)的支持。

参考文献:

- [1] Shi B R. Magnetic confinement fusion: principles and practice [J]. 中国核科技报告, 1998, (S5): 74–76.
- [2] ITER Physics Expert, et al. Chapter 4: power and particle control [J]. Nucl. Fusion, 1999, 39(12): 2391–2469.
- [3] Gervids V I, Krupin V A. Investigation of impurity diffusion in a tokamak by special methods [J]. Jett. Letters, 1973, 18(2): 60–62.
- [4] Isler R C, Kasai S, Murray L E, et al. Impurity sources and accumulation in ohmically heated ISX-B discharges [J]. Phys. Rev. Lett., 1981, 47(5): 333–337.
- [5] Dux R, Giroud C, Zastrow K-D. Impurity transport in internal transport barrier discharges on JET [J]. Nucl. fusion, 2004, 44(2): 260.
- [6] Vogel G, Zhang H M, Shen Y, et al. Extreme ultraviolet spectroscopy applied to study RMP effects on core impurity concentration in EAST [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(5): 1350–1355.
- [7] Wan B N, Recent experiments in the EAST and HT-7 superconducting tokamaks [J]. Nucl. Fusion, 2009, 49(10): 104011.
- [8] Dong C F, Morita S, Goto M, et al. Space-resolved extreme ultraviolet spectrometer for impurity emission profile measurement in large helical device [J]. Rev. Sci. Instrum., 2010, 81(3): 033107.
- [9] Katai R, Morita S, Goto M. High-resolution VUV spectra of carbon, neon and argon in a wavelength range of 250 to 2300 Å for plasma diagnostics observed with a 3 m normal incidence spectrometer in LHD [J]. Plasma and Fusion Research, 2007, 2: 014–014.
- [10] Kato T, Obara T, Goto M, et al. Spectra from impurities in the Large Helical Device [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2007, 72: 012017.
- [11] Machida M, Daltrini A M, Severo J H F, et al. VUV spectral line emission measurements in the TCABR tokamak [J]. Brazilian Journal of Physics, 2009, 39(2): 270–274.
- [12] Oishi T, Morita S, Dong C F, et al. Space-resolved 3 m normal incidence spectrometer for edge impurity diagnostics in the Large Helical Device [J]. Applied Optics, 2014, 53(29): 6900–6912.
- [13] Oishi T, Morita S, Huang X L, et al. Line spectrum of tungsten ions at low ionization stages in Large Helical Device in wavelength range of 300~2400 Å measured using 20 cm normal incidence VUV spectrometers [J]. Plasma and Fusion Research, 2015, 10: 3402031–340203.
- [14] Oishi T, Morita S, Huang X L, et al. Observation of W IV –W VII line emissions in wavelength range of 495–1475 Å in the Large Helical Device [J]. Physica Scripta, 2016, 91(2): 025602.
- [15] Prakash R, Jain J, Kumar V, et al. Calibration of a VUV spectrograph by collisional-radiative modelling of a discharge plasma [J]. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2010, 43: 144012.
- [16] Shen Y C, Du X W, Zhang W, et al. Space-resolved extreme ultraviolet spectrometer system for impurity behavior research on experimental advanced superconducting tokamak [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 700: 86–90.
- [17] Shen, Y C, Lu B, Du X W, et al. Spatially-resolved flat-field soft X-ray spectrometer on experimental advanced superconducting tokamak [J]. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 3072–3077.
- [18] 杨晓飞. EAST 托卡马克等离子体可见光诊断系统光学设计 [J]. 光电工程, 2015, (10): 31–36.
- [19] Zhang H M, Lyu B, He L, et al. Development of vacuum ultraviolet spectroscopy for measuring edge impurity emission in the EAST tokamak [J]. Plasma Sci. Techn., 2020, 22 (8): 084001.
- [20] Prokofev V K. Meridional focal curves of the Seya-Namioka mounting of a concave diffraction grating [J]. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 1976, 54: 265–271.
- [21] Namioka T. Construction of a grating spectrometer [J]. Sci. Light, 1954, 3: 15–24.
- [22] Namioka T. Theory of the concave grating III Seya-Namioka monochromator [J]. Journal of the Optical Society of America, 1959, 49(10): 951–959.
- [23] Dong C F, Morita S, Goto M, et al. Absolute intensity calibration of flat-field space-resolved extreme ultraviolet spectrometer using radial profiles of visible and extreme ultraviolet bremsstrahlung continuum emitted from high-density plasmas in Large Helical Device [J]. Rev. Sci. Instrum., 2011, 82(11): 113102.
- [24] Zhang H M, Morita S, Oishi T, et al. Performance improvement of two-dimensional EUV spectroscopy based on high-frame-rate CCD and signal normalization method in Large Helical Device [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2015, 54(8): 086101.

Preliminary experiment of fast vacuum ultraviolet spectroscopic diagnostic system on EAST

HE Liang^{1,2}, ZHANG Hong-ming², CAO Jin-jia¹, SHEN Yong-cai³, LI Ying-ying², FU Jia², ZHANG Ling², DAI Shu-yu⁴, WANG Fu-di², HU Rui-ji^{2,5}, LIU Bing⁶, ZHANG Xiao-long⁷, XU Zong⁷, BIN Bin^{1,2}, YANG Jin^{1,2}, WANG Xun-yu^{1,2}, LÜ Bo², GONG Xue-yu¹

- (1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001;
2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;
3. School of Physics and Electrical Engineering, Anqing Normal University, Anqing 246133;
4. Key Laboratory of Materials Modification by Laser; Ion and Electron (Ministry of Education), Dalian University of technology, Dalian 116024;
5. Department of Engineering and Applied Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;
6. School of Physical Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031;
7. Advanced Energy Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518061)

Abstract: A vacuum ultraviolet (VUV) spectroscopic diagnostic system has been developed on EAST to measure the edge impurity radiation in high-parameter discharges. One Seya-Namioka spectrometer with focus length of 200mm is used for the spectroscopy. The spectrometer is equipped with a holographic concave grating with groove density of $600\text{g}\cdot\text{mm}^{-1}$. The observed wave length range is from 50nm to 700nm, covering the VUV, near ultraviolet and visible ranges. The minimum sampling time can be set as 5ms. The observed vertical range is from $Z=-350\text{mm}$ to 350mm . The present spectroscopy has been used to measure the spectra from edge impurity of EAST plasma. Time evolution of CIV(154.8nm) and Fe II (235nm) have been analyzed to verify the system capability. The time evolution of C I (365.2nm) has also been studied for modulated NBI discharge to verify system ability to study impurity behaviors in relatively short time scale.

Key words: Plasma diagnostic; VUV spectroscopy; Impurity radiation