

EAST 快速极紫外光谱仪波长的原位标定及其应用

姚黎明^{1,2}, 张凌^{3*}, 许棕^{4,5}, 杨秀达⁶, 吴承瑞⁶, 张睿瑞³,
杨飞³, 吴振伟³, 姚建铭³, 龚先祖³, 胡立群³

1. 中国科学院技术生物与农业工程研究所, 安徽 合肥 230026
2. 中国科学院大学合肥物质科学研究院, 安徽 合肥 230026
3. 中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230026
4. 深圳大学光电工程学院, 广东 深圳 518060
5. 光电子器件系统(教育部/广东省)重点实验室, 广东 深圳 518060
6. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

摘要 介绍了东方超环(experimental advanced supereconducting tokamak, EAST)托卡马克上的两套快速极紫外(EUV)光谱仪系统波长的原位标定方法、结果及其应用。这两套谱仪均为掠入射平场谱仪, 时间分辨均为 $5\text{ ms} \cdot \text{frame}^{-1}$ 。两套谱仪分别工作在 $20\sim 500$ 和 $10\sim 130\text{ \AA}$ 的波段范围, 由步进电机控制探测器在焦平面上移动实现整个观测波段上的波长扫描。利用这两套谱仪系统观测极紫外波段光谱, 计算 EAST 中低-高 Z 杂质离子特征线辐射强度随时间的演化, 监测和研究等离子体中杂质的行为。高 Z 杂质尤其是钨、钼等金属元素, 发出的 EUV 波段光谱的构成非常复杂, 准确识谱对谱仪精确的波长测量能力以及谱分辨能力要求很高, 因此精确的波长标定是识别钨、钼等高 Z 杂质谱线以及研究它们行为的最关键的技术之一。利用 EAST 等离子体中类氢到类铍的低、中 Z 杂质的特征谱线以及它们的二阶甚至三阶谱线, 结合谱仪系统的色散能力, 对这两套快速极紫外光谱仪的波长进行了精确的原位标定。用于波长标定的杂质谱线有 $\text{O VIII } 18.97\text{ \AA}$, $\text{O VII } 21.60\text{ \AA}$, $\text{C VI } 33.73\text{ \AA}$, $\text{Li III } 113.9\text{ \AA}$, $\text{Li III } 135.0\text{ \AA}$, $\text{Li II } 199.28\text{ \AA}$, $\text{Ar X V } 221.15\text{ \AA}$, $\text{He II } 256.317\text{ \AA}$, $\text{He II } 303.78\text{ \AA}$, $\text{Ar X VI } 353.853\text{ \AA}$ 及 $\text{C IV } 384.174\text{ \AA}$ 等。利用波长标定的结果对观测到的 EUV 光谱进行谱线识别, 两套谱仪观测到的绝大多数谱线波长与美国技术标准局(National Institute of Standards and Technology, NIST)数据库的标准波长相差分别小于 0.08 和 0.03 \AA 。开发了谱仪波长原位标定程序模块, 将这个模块内嵌到谱仪数据实时上传的交互式软件中, 实现了全谱数据以及特征谱线强度随时间演化数据的实时处理和上传。同时利用开发的全谱分析交互式软件以及 EAST 上的数据查看软件, 最终实现了快速 EUV 谱仪自采数据的准实时分析、读取和查看。

关键词 EAST 托卡马克; 极紫外波段(EUV)光谱仪; 波长标定; 钨光谱

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)08-2645-06

引言

磁约束装置中杂质的存在会稀释燃料粒子的密度, 尤其对于高 Z 杂质钨($Z=74$), 由于其高冷却率, 它的存在会造成等离子体大幅功率损失, 影响等离子体的约束状态。因此磁约束装置中杂质行为的观测和研究对于稳态等离子体运行有很重要的意义。被动光谱诊断是最常规的用于研究杂质行

为的工具^[1], 而由于磁约束装置参数条件下几乎所有杂质在极紫外(extreme ultraviolet, EUV)波段均有较强的特征线辐射, 于是快速极紫外波段光谱仪^[2-4]以及空间分辨极紫外光谱仪^[5-9]很广泛地应用于磁约束聚变装置上。

为观测 EAST 等离子体中的低-高 Z 杂质, 2014 年和 2016 年 EAST 上先后建成了两套具有较高时间分辨的极紫外波段光谱仪, 分别工作在长波段 $20\sim 500\text{ \AA}$ ^[10]以及短波段 $10\sim 130\text{ \AA}$ 的波长范围, 以下简称为“EUV_Long”和“EUV_

收稿日期: 2018-07-05, **修订日期:** 2018-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(11575244, 11775269)和国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(2014GB124006)资助

作者简介: 姚黎明, 1976 年生, 中国科学院技术生物与农业工程研究所博士研究生 e-mail: lmy@ipp.ac.cn

* 通讯联系人 e-mail: zhangling@ipp.ac.cn

Short”谱仪。利用这两套谱仪系统观测极紫外光谱，计算杂质离子特征线辐射强度随时间的演化，从而监测和研究等离子体中高 Z 杂质的行为。对于高 Z 的钨元素来说，EUV 光谱仪的同一观测路径会同时存在若干不同电离态及其激发态，而具有相似电子壳层结构的相邻电离态离子会发出波长接近的谱线，于是钨光谱常出现未分解跃迁系 (tungsten unresolved transition array, W-UTA)，其谱线构成非常复杂^[11]，准确识谱要求谱仪系统有精确的波长测量能力以及较高的谱分辨率。例如图 1(a)给出了 EUV_Long 测得的钨和钼杂质同时存在时复杂 EUV 光谱的原始数据，在 EUV 光谱仪波长标定前，波长方向用像素点表示。精确的原位波长标定对于钨、钼等金属谱线的识别以及金属杂质离子在等离子体中的行为研究非常关键。本工作利用 EAST 等离子体中杂质特征谱线结合谱仪系统的色散能力对两套快速极紫外谱仪的全波段进行了精确的原位波长标定。

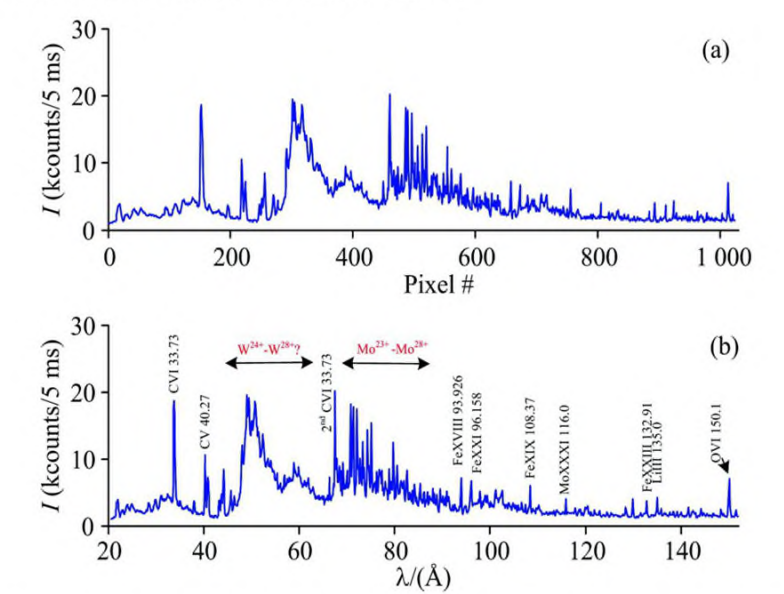


图 1 (a)钨、钼同时出现的全谱原始数据，(b)对应于(a)图波长标定后的全谱以及谱线识别

Fig. 1 (a) Raw data of EUV spectrum with strong W-UTA and Mo lines, (b) wavelength distribution and line identification in the EUV spectrum in (a)

1 快速 EUV 谱仪系统

长波段及短波段两套谱仪均为掠入射平场谱仪，核心部件为狭缝、光栅以及探测器。两套谱仪分别工作在 20~500 Å(简称 EUV_Long)和 10~130 Å(简称 EUV_Short)波段范围。两台谱仪入射狭缝宽度均为 100 μm，均采用层状变间距凹面全息光栅实现平场成像，光栅的衍射方程为 $m\lambda = \delta_0 (\sin\alpha - \sin\beta)$ ，其中 m ， λ ， δ_0 ， α 和 β 分别为衍射阶数、波长、光栅中心刻槽间距、入射角和衍射角。图 2(a)和(b)所示为这两套谱仪的光栅参数和光路设计。谱仪配备高能段背感光电荷耦合探测器(charge coupled detector, CCD)作为探测器，CCD 的像素点个数为 1 024×255，像素点大小为 26 μm，CCD 长边 1024 像素点用于波长分辨测量，短边 255 像素进行全部纵向合并(full vertical binning, FVB)，时间分辨可高达 5 ms·帧⁻¹。如文献[12]中所述，在这种设置下想要获得高谱分辨的光谱对 CCD 安装精度有很大的要求。除此之外，

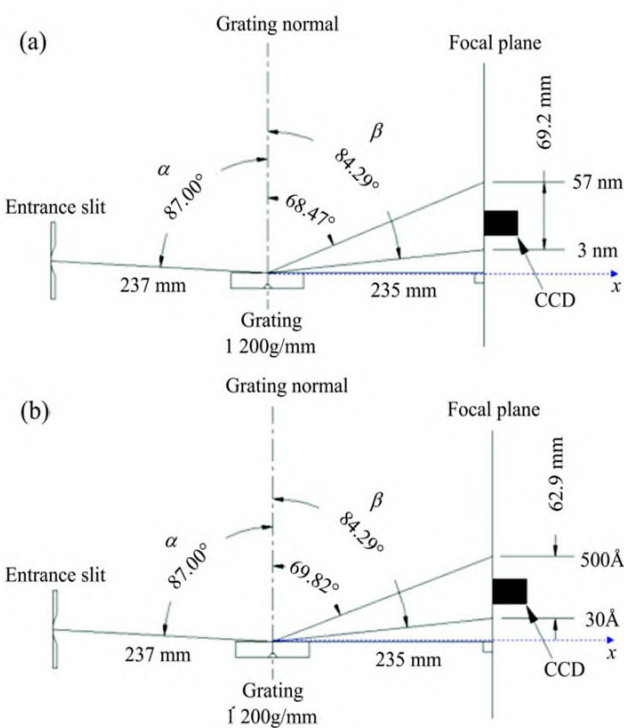


图 2 光路设计

(a): 长波段快速 EUV 谱仪; (b): 短波段快速 EUV 谱仪

Fig. 2 Optical layout of fast-response EUV spectrometer

(a): EUV_Long; (b): EUV_Short

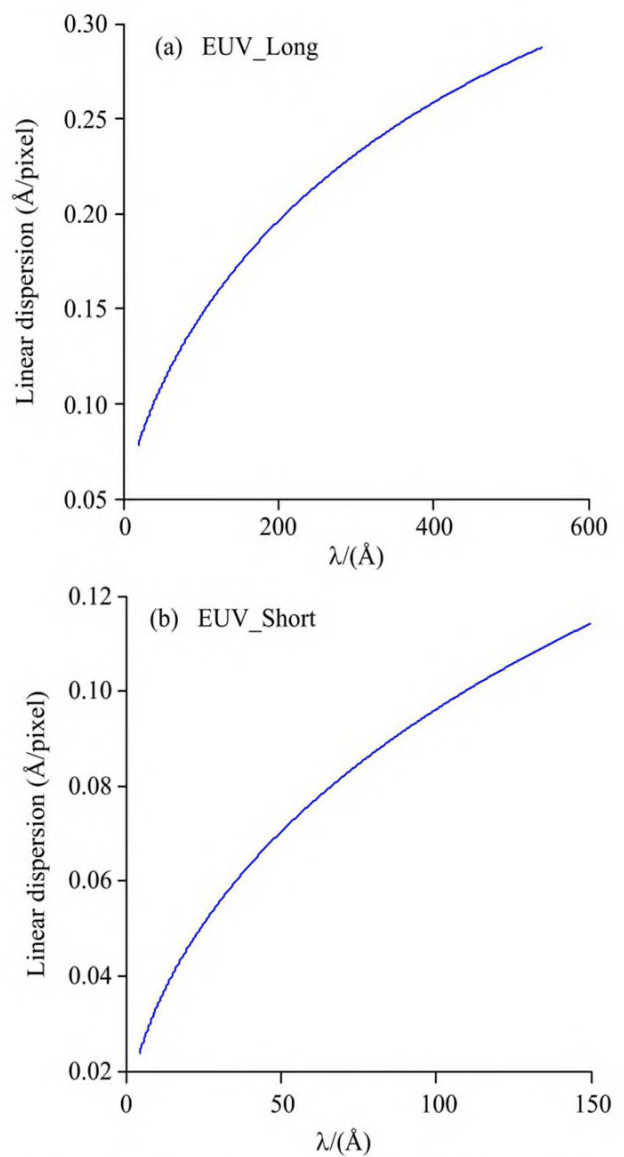


图 3 谱仪系统的线色散能力随波长的变化

(a): 长波段快速 EUV 谱仪; (b): 短波段快速 EUV 谱仪

Fig. 3 Capability of linear dispersion of (a) EUV_Long (b) EUV_Short as function of wavelength

EUV 谱仪系统上安装有准直激光器用于空间标定, 安装有步进电机用来控制 CCD 在焦平面上移动实现观测波段上的波长扫描。每套谱仪配备了一套分子泵机组, 将谱仪系统的真空度维持在 10^{-5} Pa。

2 EUV 谱仪的波长标定

根据谱仪光路设计和光栅、CCD 的参数, 焦平面上离水平 x 轴距离为 $Y(\text{mm})$ 的位置处一阶谱线波长为 $\lambda=\delta_0\{\sin\alpha-\sin[\arctan(Y/235)]\}$, 则对应 CCD 每个像素点上的波长间隔为 $d\lambda/d\text{pixel}=d\lambda/dY\times0.026$, 即谱仪系统的线色散能力。我们分别得到两套谱仪系统每个像素点上的波长间隔随波长的变化, 如图 3(a)和(b)所示。

EUV 谱仪开始工作前, 利用步进电机控制程序将 CCD 的位置设置好。图 4 所示为 CCD 位置标尺的照片, 图中短波段谱仪 CCD 位置设置在 23 mm 处。如果需要改变 CCD 位置测量不同波段范围, 则在两炮放电的间隙移动 CCD。当 CCD

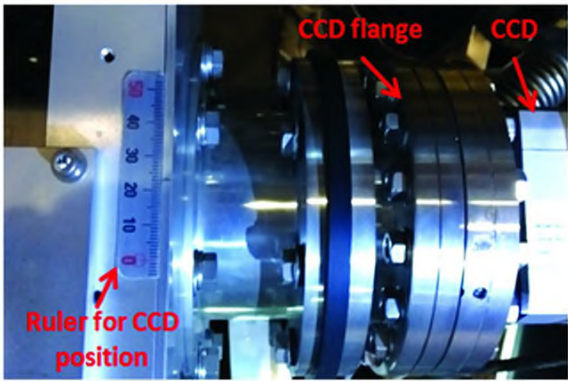


图 4 CCD 位置标识
Fig. 4 Ruler for CCD position

记录了全谱后, 识别出最强的特征谱线并记录其峰值所在像素点的位置, 结合图 3 中的每个像素点上的波长间隔随波长的变化关系, 计算出 1 024 个像素点上的波长值, 并保存成定标文件, 在后面的光谱分析中调用该文件进行谱线识别。图 1 (a)就是 EUV_Long 在 CCD 位置为 8 mm 时测到的全谱原始数据, 图 1(b)显示了波长标定后的全谱以及谱线识别的结果。

表 1 EAST 中常见的特征线谱(来自 NIST 标准数据库)
Table 1 Emission lines usually appear in EAST plasma

#	Emission line	$\lambda/\text{\AA}$	Transition	#	Emission line	$\lambda/\text{\AA}$	Transition
1	O VIII	18.97	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$	15	Li III	135.0	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$
2	O VII	21.60	$1s^2S_0-1s2p^1P_1$	16	O VI	150.1	$2s^2S_{1/2}-3p^2P_{3/2,1/2}$
3	O VI	21.80	$1s^2S_0-1s2p^3P_{2,1}$	17	Cu XXVII	153.513	$2s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$
4	C VI	33.73	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$	18	Ti XX	169.58	$2s^2S_0-2s2p^1P_1$
5	2 nd O VIII	37.94	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$	19	O VI	173.079	$2p^2P_{3/2}-3d^2D_{5/2}$
6	C V	40.27	$1s^21S_0-1s2p^1P_1$	20	Mo XXXII	176.648	$3s^2S_{1/2}-3p^2P_{1/2}$
7	2 nd C VI	67.46	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$	21	Li II	199.28	$1s^2S_0-1s2p^1P_1$
8	2 nd C V	80.54	$1s^2S_0-1s2p^1P_1$	22	Ar XV	221.15	$2s^2S_0-2s2p^1P_1$
9	3 rd C VI	101.19	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$	23	He II	256.317	$1s^2S_{1/2}-3p^2P_{3/2,1/2}$
10	Cu XXVI	111.186	$2s^2S_0-2s2p^1P_1$	24	2 nd Li III	270.0	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$
11	Li III	113.9	$1s^2S_{1/2}-3p^2P_{3/2,1/2}$	25	He II	303.78	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$
12	Mo XXXI	116.0	$3s^2S_0-3s3p^1P_1$	26	Ar XVI	353.853	$2s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2}$
13	Mo XXXIII	127.868	$3s^2S_{1/2}-3p^2P_{3/2}$	27	C IV	384.174	$2p^2P_{3/2}-3d^2D_{5/2}$
14	Fe XXIII	132.91	$2s^2S_0-2s2p^1P_1$	28	3 rd Li III	405.0	$1s^2S_{1/2}-2p^2P_{3/2,1/2}$

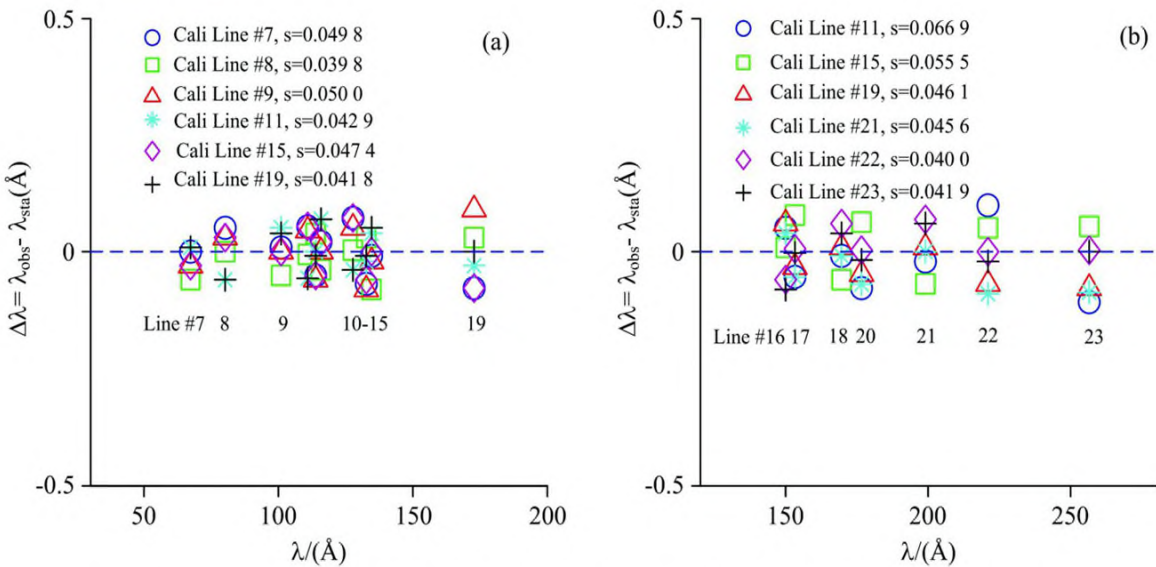


图 5 EUV_Long 标定后谱线测量波长与标准波长的差值以及标准偏差
Fig. 5 Differences between standard wavelength and observed value and their standard deviation for the emission lines measured by EUV_Long

表 1 列出了 EAST 等离子体中常见的特征谱线, 谱线波长以及跃迁能级等数据来自于 NIST 标准数据库, 其中一些较强的谱线被用作波长标定。图 5 和图 6 分别显示了两套系统同一条谱线在采用不同特征谱线标定后测量波长 λ_{obs} 与标准波长 λ_{sta} 的差值 $\Delta\lambda$, 以及标准偏差 $s = [\sum(\Delta\lambda)^2/N]^{1/2}$ 。从图 5 可以看出, 对于 EUV_Long 谱仪, 波长标定后谱线波长的测量值与 NIST 标准数据库给出的波长差值 $\Delta\lambda$ 很小 ($\Delta\lambda \leq 0.08 \text{ \AA}$)。从图 6 可以看出, 由于 EUV_Short 谱仪线色散率、谱分辨率更高, 波长标定更准确, $\Delta\lambda \leq 0.03 \text{ \AA}$ 。但是随着波长的增加, 波长差值均有增大的趋势, 分析认为是受谱仪系统线色散能力的影响。

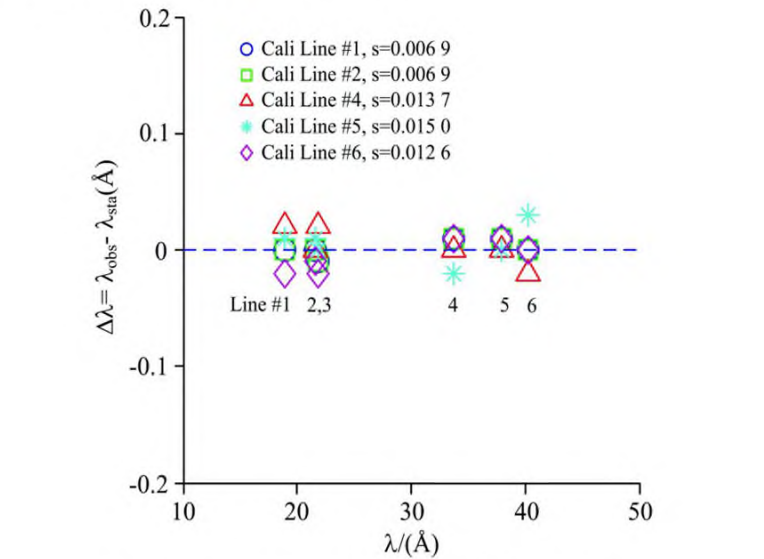


图 6 EUV_Short 标定后谱线测量波长与标准波长的差值以及标准偏差

Fig. 6 Differences between standard wavelength and observed value and their standard deviation for the emission lines measured by EUV_Short

2 原位波长标定的软件开发和应用

实验前, 将 CCD 移动到预设位置, 在 CCD 控制软件中预设好采集模式、曝光时间、数据读取速率等参数, CCD 每帧的周期时间 (t_c) 为曝光时间 (t_e) 与数据读取时间 (t_r) 之和 ($t_c = t_r + t_e$)。CCD 运行在 FVB 模式, 每帧周期时间 t_c 为 5 ms。当本地电脑监听到 EAST 总控发来的下一炮炮号 (Shot-Num) 以及预设放电长度 (t_{dur}) 信息后, CCD 软件将自动计算采集帧数 $N_{\text{fram}} = t_{\text{dur}}/t_c + N_0$, N_0 为多采集的帧数。一炮放电所有帧数采集完成后数据将自动保存成以炮号命名的 `sif` 格式文件 (ShotNum. `sif`)。CCD 的触发信号还被引出由 EAST 数据采集系统同步 (与等离子体放电) 采集。

从以上快速极紫外谱仪系统的工作流程可以看出, 除了 CCD 触发信号, 极紫外谱仪系统的数据属于本地电脑的自采集模式。但是 EAST 放电中杂质行为的准实时信息对等离子体约束性能的准实时评价以及功率平衡的准实时分析尤为重要, 因此针对这两套快速极紫外谱仪系统基于 MATLAB 环境分别开发了准实时数据自动上传 (至 EAST 数据服务器) 软件以及全谱分析软件。图 7 和图 8 所示为这两个软件的交互式界面 (以 EUV_Long 为例)。

在谱仪数据自动上传软件中填入 CCD 位置以及用以标定的谱线所在的位置, 当软件监测到有炮号文件 Shot-Num. `sif` 文件出现后, 检查本地是否存有相应的波长定标文件, 如果没有则计算一个新的波长定标文件。从 Shot-Num. `sif` 文件读出全谱数据, 将全谱数据、波长定标数据以及与放电时间同步的谱仪采集时序写成 MDSplus (model drive system plus) 格式^[13]的数据 Spec (二维, $N_{\text{fram}} \times 1024$)、WavL (一维, 1×1024) 以及 Time (一维, $1 \times N_{\text{fram}}$) 上传至 EAST 数据服务器。同时分别从 EUV_Long 和 EUV_Short 的谱测量中计算一些特征线辐射强度随时间的演化, 写成 MDSplus 格式的一维数据 ($1 \times N_{\text{fram}}$), 时间轴为 Time, 上传至 EAST 数据服务器。

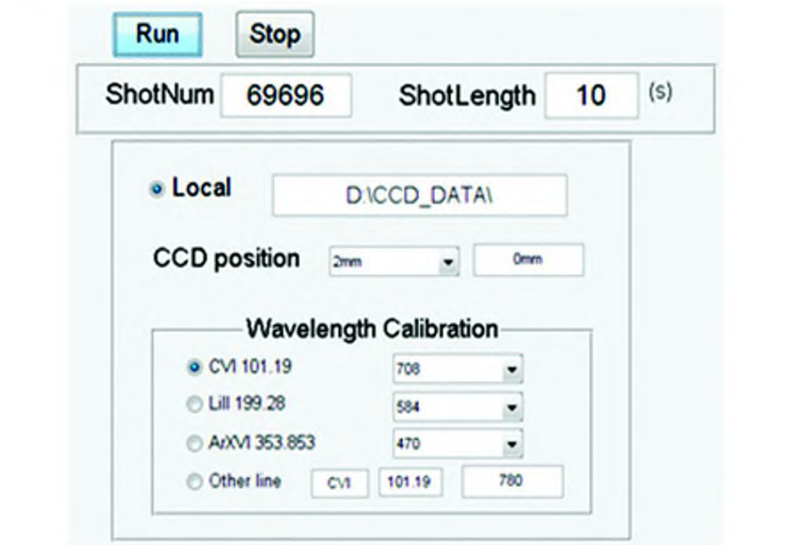


图 7 谱仪数据实时上传软件界面 (EUV_Long)

Fig. 7 Interface of the software for EUV_Long data real-time upload

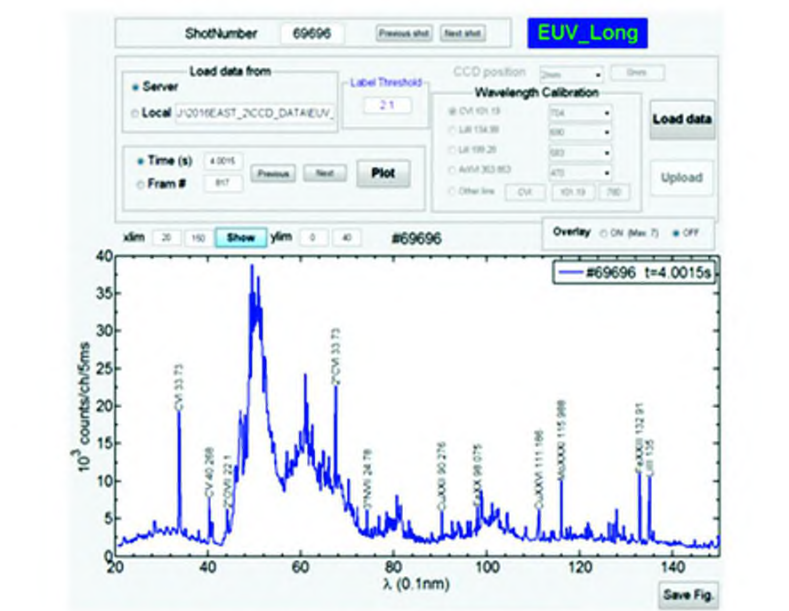


图 8 光谱分析软件界面 (EUV_Long)

Fig. 8 Interface of the software for EUV_Long spectrum analysis

自开发的全谱分析软件主要用于查看和分析 EUV 全谱, 可以从数据服务器或者本地读取谱仪数据, 如果选择数据服务器则自动读入 Spec, WavL 和 Time, 如果选择本地文件夹, 则读取 `sif` 格式文件, 需要填入波长标定信息。画出某个时刻的全谱, 可以叠加比较不同时刻或不同炮号的放电中

测得的全谱，调用已经识别出的谱线数据库，自动标识全谱中出现的达到阈值强度的线光谱。该全谱分析软件至于 EAST 数据服务器供实验人员使用，同时 EAST 实验人员还可以利用 EAST 主要的数据查看工具 WebScope^[14]、ReviewPlus 读取已经上传的谱线强度数据，查看杂质特征谱线强度随时间的演化，对比杂质行为与其他参数演化的相关性。

3 结 论

利用 EAST 等离子体中的类氢、类氦、类锂和类铍的低、中 Z 杂质谱线结合谱仪系统的线色散能力对两套极紫外光谱仪进行了精确的原位波长标定。同时开发了谱仪波长原

位标定程序模块，内嵌至 EUV 谱仪数据自动实时上传的交互式软件中；开发了全谱分析的交互式软件，结合 EAST 上主要的实时数据查看工具，最终实现了 EAST 实验过程中快速 EUV 谱仪自采数据的准实时读取和查看。这一工作提高了 EUV 谱仪数据读取的便捷性，基本满足了 EAST 实验中准实时杂质行为分析的要求。但是在进行深入数据分析时，为保证数据使用的严谨，仍要检查谱仪采集的原始数据，保证用于分析的特征谱线没有与其他谱线重叠。同时在精确波长测量的基础上，钨、钼谱线识别和分析仍具有难点，因为标准数据库还不够完备，并且它们的谱线构成会随等离子体温度的变化发生较大改变，仍需要结合有空间分辨能力的 EUV 谱仪的测量结果来进行准确的光谱分析。

References

[1] ZHANG Ling, WU Zhen-wei, GAO Wei, et al (张 凌, 吴振伟, 高 伟, 等). Journal of Atomic and Molecular Physics(原子与分子物理学报), 2013, 5(30): 779.

[2] Chowdhuri M B, Morita S, Goto M, et al. Review of Scientific Instruments, 2007, 78(2): 023501.

[3] Chowdhuri M B, Morita S, Goto M. Applied Optics, 2008, 47(2): 135.

[4] Lepson J K, Beiersdorfer P, Clementson J, et al. Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, 2010, 43(14): 144018.

[5] Dong C, Morita S, Goto M, et al. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(3): 033107.

[6] Cui Z, Zhou H, Morita S, et al. Plasma Science and Technology, 2013, 15(2): 110.

[7] Shen Y, Du X, Zhang W, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2013, 700(2): 86.

[8] Shen Y, Lu B, Du X, et al. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 3072.

[9] Huang X, Morita S, Oishi T, et al. Review of Scientific Instruments, 2014, 85(4): 043511.

[10] Zhang L, Morita S, Xu Z, et al. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(12): 123509.

[11] Morita S, Dong C, Goto M, et al. AIP Conference Proceeding, 2013, 1545: 143.

[12] YANG Xiu-da, ZHANG Ling, XU Zong, et al(杨秀达, 张 凌, 许 棕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(4): 1262.

[13] HUANG Wen-jun, WANG Hua-zhong, YANG Fei, et al(黄文君, 王华忠, 杨 飞, 等). Measurement and Control Technology(测控技术), 2014, 33(2): 16.

[14] Yang F, Dang N, Xiao B, et al. Plasma Science and Technology, 2010, 12(2): 141.

In-Situ Wavelength Calibration of Fast-Response Extreme Ultraviolet Spectrometers on Experimental Advanced Superconducting Tokamak and Its Application

YAO Li-ming^{1, 2}, ZHANG Ling^{3*}, XU Zong^{4, 5}, YANG Xiu-da⁶, WU Cheng-rui⁶, ZHANG Rui-rui³, YANG Fei³, WU Zhen-wei³, YAO Jian-ming³, GONG Xian-zu³, HU Li-qun³

1. Institute of Technical Biology and Agriculture Engineering, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China
2. Hefei Institutes of Physical Science, University of Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China
3. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026, China
4. Advanced Energy Research Center, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
5. Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China
6. Science Island Branch of Graduate School, Graduate School of University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

Abstract In this work, the in-situ wavelength calibration method for the newly installed fast-time-response Extreme Ultraviolet (EUV) Spectrometers on EAST is introduced and the result and its application are described. Both of the spectrometers are grazing incidence flat-field spectrometers with temporal resolution of $5 \text{ ms} \cdot \text{frame}^{-1}$. The two spectrometer works at $20 \sim 500$ and $10 \sim 130 \text{ \AA}$ respectively, and wavelength scanning is done by moving the detector along the focal plane. The impurity behavior is monitored for EAST operation with observed EUV spectrum and the calculated time evolution of impurity line intensity. High spectral resolution and capability of accurate wavelength measurement is required for line identification of EUV spectra from high-Z impurities especially tungsten, due to the complexity of the spectrum composition. Exact wavelength calibration is therefore one of the key techniques for the tungsten spectroscopy diagnosis and tungsten behavior study. Emission lines from hydrogen-, helium-, lithium- and beryllium-like low- and medium-Z impurities, e. g. , O VIII 18.97 \AA , O VII 21.60 \AA , C VI 33.73 \AA , C VI 40.27 \AA , Li III 113.9 \AA , Li III 135.0 \AA , Li II 199.28 \AA , Ar X V 221.15 \AA , He II 256.317 \AA , He II 303.78 \AA , Ar X VI 353.853 \AA , C IV 384.174 \AA , and their 2nd even 3rd order emission lines are used to perform the in-situ wavelength calibration for the two EUV spectrometers in the whole wavelength range. Line identification is then carried out with the result of wavelength calibration. It is found that for most of the emission lines the difference between observed wavelength and their standard value is very small, e. g. , $\leq 0.08 \text{ \AA}$ and $\leq 0.03 \text{ \AA}$ for the spectrometer working at $20 \sim 500$ and $10 \sim 130 \text{ \AA}$, respectively. A module for the in-situ wavelength calibration is developed and is inserted into the interactive software developed for real-time data upload, which realizes a real-time upload of the calibrated EUV spectra and calculated time-evolution of line intensity to the EAST data server. Meanwhile, the interactive software for spectrum analysis and visualization is also developed, combining with the use of the routine EAST data visualization tools, the quasi real-time analysis, reading and visualization of EUV spectrometer data are realized during the EAST operation.

Keywords EAST; Extreme Ultraviolet (EUV) spectrometer; Wavelength calibration; Tungsten spectra

(Received Jul. 5, 2018; accepted Oct. 28, 2018)

* Corresponding author