

## EAST 快速极紫外光谱仪绝对强度的原位标定

杨秀达, 张凌\*, 许棕, 张鹏飞, 陈颖杰, 黄娟, 吴振伟, 龚先祖, 胡立群

中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230026

**摘要** 磁约束等离子体中杂质(特别是高 $Z$ 杂质)的存在将大大增强等离子体辐射功率损失, 破坏等离子体的约束性能。杂质行为的定量研究首先要求对杂质测量的光谱诊断系统进行绝对强度标定, 获得灵敏度响应曲线。介绍了 EAST 托卡马克上的快速极紫外光谱仪系统绝对强度的原位标定方法。在波长范围 20~150 Å 内, 通过对比极紫外(EUV)波段连续韧致辐射强度的计算值和测量值得到光谱仪的绝对强度标定。在此过程中, 首先由(523±1) nm 范围内可见连续韧致辐射强度的绝对测量值计算出有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$ , 进而结合电子温度和密度分布计算 EUV 波段连续韧致辐射强度; EUV 波段连续韧致辐射强度的测量值即为不同波长处探测器的连续本底计数扣除背景噪声计数值。对于较长波段范围 130~280 Å, 通过对比等离子体中类锂杂质离子( $\text{Fe}^{23+}$ ,  $\text{Cr}^{21+}$ ,  $\text{Ar}^{15+}$ )和类钠杂质离子( $\text{Mo}^{31+}$ ,  $\text{Fe}^{15+}$ )发出的共振谱线对(跃迁分别为  $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2, 3/2}$  及  $2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{1/2, 3/2}$ )强度比的理论和实验值进行相对强度标定。其中共振谱线对强度比的理论值由辐射碰撞模型计算得到, 模型中处在各个能级的离子数主要由电子碰撞激发, 去激发以及辐射衰变三个过程决定。两种方法相结合, 实现了光谱仪 20~280 Å 范围的绝对强度标定。考虑韧致辐射、电子温度及电子密度的测量误差, 绝对标定误差约为 30%。在绝对标定的基础上, 我们对杂质特征谱线强度进行绝对测量, 并将测量结果与杂质输运程序结合 ADAS (Atomic Data and Analysis Structure) 原子数据库计算得到的模拟值进行比较, 进而估算等离子体中的杂质浓度。

**关键词** EAST 托卡马克; 极紫外波段(EUV)光谱仪; 绝对标定; 韧致辐射; 共振谱线对

**中图分类号**: TH744.1 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)04-1262-06

## 引言

自 2014 年实验, EAST 托卡马克 (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 运行在钨铜上偏滤器、石墨下偏滤器和钨第一壁条件<sup>[1]</sup>。同时 EAST 上常规锂化壁处理以及不可避免的等离子体与壁、天线材料的相互作用, 使得等离子体中的本征杂质覆盖了从低 $Z$ 到高 $Z$ 的范围, 包括: 锂、碳、氮、氧、铁、铜、钨和钨等。等离子体中杂质的存在会稀释燃料粒子的密度, 对于高 $Z$ 杂质钨, 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。在 EAST 实验中, 杂质的爆发和高 $Z$ 金属杂质的聚芯常阻碍稳态高约束等离子体的获得。因此杂质行为的定量研究非常紧迫。对杂质行为进行定量研究, 首先需要杂质特征线辐射和韧致辐射进行绝对强度测量。到目前为止, 被动光谱诊断是诊断杂质行为的最常规的诊断手段。极

紫外(extreme ultraviolet, EUV)波段(1.5~1 050 Å)的光谱仪可以测量几 keV 温度范围内位于等离子体边界到芯部的几乎所有杂质离子若干电离态的特征线, 可广泛应用于磁约束聚变装置上<sup>[2-4]</sup>。对杂质线辐射强度进行绝对测量首先就要对光谱仪系统进行绝对强度标定, 得到系统的灵敏度响应曲线。

对于极紫外和真空紫外(vacuum ultraviolet, VUV)波段的光谱仪, 有几种绝对强度标定方法<sup>[5]</sup>。一是利用有绝对亮度测量的同步辐射光源; 二是利用等离子体自身发射的连续韧致辐射; 三是利用分支比的方法(同一激发态跃迁至不同基态的谱线对强度比, 通常一条谱线在可见波段而另一条谱线在 VUV 或者 EUV 波段)。后两种方法是原位标定方法。对于第一种方法, 由于标定过程的复杂性不适用于托卡马克装置上的光谱诊断。近年来 LHD (Large Helical Device) 装置上 Morita 等和 HL\_2A 装置上崔正英等利用等离子体自身可见波段韧致辐射计算 VUV 或者 EUV 波段的韧致辐射强

收稿日期: 2016-12-12, 修订日期: 2017-04-19

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(11575244, 11275231)资助

作者简介: 杨秀达, 1990 年生, 中国科学院等离子体物理研究所硕士研究生 e-mail: xdyang@ipp.ac.cn

通信联系人 e-mail: zhangling@ipp.ac.cn

度,进而标定该波段的谱仪<sup>[6-7]</sup>。这种方法能获得连续的以波长为函数的绝对标定系数,非常适用于聚变装置上的 EUV 光谱的绝对标定。但是 EUV 波段的谱仪响应率随波长下降很快,在长波段利用这种方法标定,想要获得好的信噪比,需要高密度等离子体放电条件,而托卡马克等离子体存在密度极限,所以这种标定方法应用到长波段比较受限。在 EAST 高功率加热条件下等离子体中常能观测到多种中高 Z 杂质,而且能观测到长波段的数个类锂和类钠共振谱线对,于是我们利用类似于分支比的共振谱线对强度比的方法对长波段进行相对强度标定。

## 1 硬件系统

EAST 是全超导中型托卡马克装置,可灵活控制等离子体限制器、单零和双零位型,其小半径是 0.45 m,大半径为 1.85 m,拉长比为 1.2~2,纵场最高可达 3.5 T。目前电流驱动和辅助加热方式主要有 2.45 和 4.6 GHz 低杂波 (low hybrid wave, LHW)、中性束加热 (neutral beam injection, NBI)、离子回旋 (ion cyclotron resonance heating, ICRH) 和 140 GHz 的电子回旋加热 (electron cyclotron resonance heating, ECRH)。

快速 EUV 光谱仪通过一个真空延长管安装在 EAST 水平 D 窗口,光学设计、机械设计和观测范围可参考<sup>[8]</sup>,这是一台掠入射平场谱仪,入射角为 87°。狭缝宽度为 30 μm,采用变间距凹面全息光栅,中心刻蚀密度为 1 200 mm<sup>-1</sup>。探测器采用高能段背感光电荷耦合探测器 (charge coupled detector, CCD),像素点大小为 26 μm,像素点个数为 1 024 × 256。光谱仪观测波长范围为 20~500 Å,谱分辨为 0.22 Å@200 Å。CCD 长边 1 024 像素点的一侧用于波长分辨测量,短边 256 像素点一侧进行全部纵向合并 (full vertical binning, FVB),时间分辨可高达每帧 5 ms<sup>[8-9]</sup>。在这样的运行模式下,高谱分辨率的获得对 CCD 的安装精度要求很高,我们在初次安装后首先要测量一幅全分辨谱 (full image, FI),通过观测谱线在 256 像素方向的偏移来确定 CCD 的偏角进而对偏角进行精细校正。利用 Li 和 C 等低 Z 杂质的特征谱线结合光栅的线色散关系对谱仪进行精确的波长标定。快速 EUV 谱仪一次能测得的光谱范围为 130~220 Å。

## 2 利用连续轫致辐射进行绝对标定

利用等离子体自身连续轫致辐射对 EUV 谱仪进行绝对标定时,首先我们利用可见波段轫致辐射 (visible bremsstrahlung, VB) 测量系统测量并通过阿贝尔反演推导出该波段的轫致辐射的发射率 ( $\mathfrak{s}_{\text{rem\_vis}}$ , 单位为 photons · s<sup>-1</sup> · m<sup>-3</sup> · Å<sup>-1</sup> · sr<sup>-1</sup>)。VB 测量系统已经利用标准积分球光源进行绝对标定。理论上 EUV 波段的轫致辐射的发射率 ( $\mathfrak{s}_{\text{rem\_EUV}}$ ) 可以通过 (1) 式计算得到

$$\mathfrak{s}_{\text{rem\_EUV}} = \mathfrak{s}_{\text{rem\_vis}} \left( \frac{\lambda_{\text{is}}}{\lambda_{\text{EUV}}} \right)^2 \frac{g_{\text{ff\_EUV}}}{g_{\text{ff\_vis}}} \exp \left[ -\frac{12\,400}{T_e} \left( \frac{1}{\lambda_{\text{EUV}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{is}}} \right) \right] \quad (1)$$

其中  $g_{\text{ff}}$  是岗特因子,  $T_e$  (eV) 是电子温度,  $\lambda$  (Å) 是波长。通过对上面得到的  $\mathfrak{s}_{\text{rem\_EUV}}$  进行弦积分,得到 EUV 波段的轫致辐射的计算值  $I_{\text{brem\_EUV}}$ ,并且通过与 EUV 谱仪测得的强度进行比较,进而得到绝对标定系数。

实验中, EUV 谱仪系统探测器 1024 像素点一侧测量到的全谱排除所有带一定展宽的线光谱再扣除探测器背景热噪声即是等离子体在该波长的连续辐射,在低 Z 杂质占主导的情况下该连续辐射由轫致辐射贡献 (复合辐射比轫致辐射低两个量级以上)。EAST 上 VB 测量系统采用滤光片结合光电倍增的多道阵列结构,经过积分球标准光源绝对标定后<sup>[10]</sup>,测得 (523 ± 1) nm 范围内连续轫致辐射强度。由于可见测量阵列观测弦通道数的限制以及与 EUV 光谱仪系统观测弦位置的差异不容易得到准确的空间反演结果,所以我们利用由可见轫致辐射测量计算的有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  来传递。结合电子温度  $T_e$ 、电子密度  $n_e$  以及  $Z_{\text{eff}}$  的剖面分布,按式 (2) 可计算出沿 EUV 光谱仪观测弦的弦积分 EUV 波段的轫致辐射强度。实验中  $T_e$  的分布是由迈克尔逊干涉仪<sup>[11]</sup>测得,  $n_e$  的分布由微波反射仪<sup>[12]</sup>以及偏振干涉仪<sup>[13]</sup>测得。

$$I_{\text{brem}} = \frac{9.5 \times 10^{-20} \Delta \lambda}{4\pi \lambda} \int \frac{g_{\text{ff}} n_e^2 Z_{\text{eff}}}{T_e^{1/2} \exp(12\,400/T_e \lambda)} dl \quad (\text{photons} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}) \quad (2)$$

我们利用 NBI 加热下的一炮等离子体 (炮号 #51015) 进行绝对标定。图 1 所示为 #51015 炮 NBI 加热功率、芯部电子温度和弦平均密度、 $D_a$ 、芯部辐射量热、CV I (33.73 Å), Li III (135.0 Å), Fe XXIII (132.91 Å), Cu XXVI (111.186 Å)、45~70 Å 范围的钨未分解跃迁系 (tungsten unresolved transition array, W-UTA, 在此温度范围内由 W<sup>27+</sup> — W<sup>43+</sup>

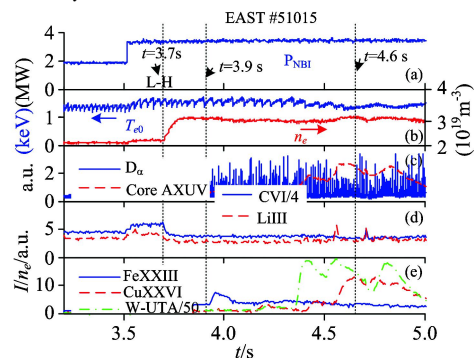


图 1 #51015 炮参数和辐射信号随时间的演化 (a): NBI 加热功率; (b): 等离子体芯部电子温度和弦平均电子密度; (c):  $D_a$  和芯部等离子体辐射; (d): 密度归一化 CV I (33.73 Å), Li III (135.0 Å) 的线辐射强度; (e): 密度归一化 Fe XXIII (132.91 Å), Cu XXVI (111.186 Å), W-UTA (45~70 Å) 的线辐射强度

Fig. 1 Time evolutions of (a): NBI power; (b): Central electron temperature and line-averaged electron density; (c):  $D_a$  at lower divertor and the radiation power at plasma centre; (d):  $n_e$  normalized line intensity of CV I (33.73 Å) and Li III (135.0 Å); (e):  $n_e$  normalized line intensity of Fe XXIII (132.91 Å), Cu XXVI (111.186 Å), W-UTA (45~70 Å)

线辐射组成)线辐射强度随时间的演化。其中后五个信号是由 EUV 光谱仪系统测得的,如图 1(d—e)所示。在 3.7 s 等离子体发生了从低约束态到高约束态的转换(L-H),之后密度迅速上升。密度归一化的 CV I 和 LiIII 线辐射强度没有明显变化,Fe XXIII 线辐射在 L-H 后有略微上升,钨杂质以及铜杂质辐射分别在 4.35 和 4.4 s 突然增强。图 2 对比了 3.7, 3.9 以及 4.6 s 三个时刻 20~150 Å 范围内的 EUV 全谱。可以看到 4.6 s 时由于钨、铜等金属杂质的出现导致连续辐射本底有明显的抬升,这主要是由增强的钨和铜离子的复合辐射贡献,标定过程要避免选择这种条件。我们选取中高 Z 杂质突然增强之前的五个时刻点( $t_1 - t_5 = 3.4, 3.7, 3.73, 3.75, 3.77$  s)来进行绝对标定。绝对标定结果如图 3 所示。由图 3 可以看出从 20 Å 到 150 Å,系统的响应率下降了三倍左右,这主要是由光栅的特性决定的。为了定量研究高 Z 杂质复合辐射对标定结果的影响,我们另外选取了三个时刻点( $t_6 - t_8 = 4.35, 4.43, 4.6$  s)与  $t_5$  时刻对比,如图 4 所示,可以看出 4.35 s 复合辐射已经影响到了标定结果,到了 4.6 s 计算得到的系统响应率相对于准确结果增加了 3~4 倍,这是因为复合辐射在可见波段的贡献较 EUV 波段小,而且由于谱线增多和 W-UTA 的出现,使得可以选作标定的波长数目大大降低。

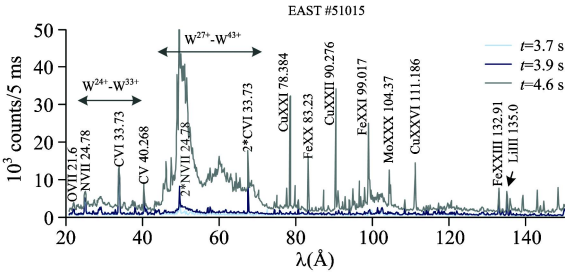


图 2 #51015 炮 3.7、3.9 和 4.6 s 时刻 EUV 谱仪测量到的 20~150 Å 范围的全谱  
Fig. 2 EUV spectra in wavelength range of 20~150 Å at 3.7, 3.9 and 4.6 s in shot #51015

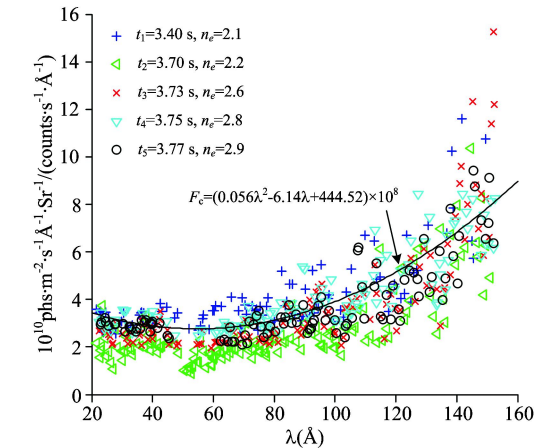


图 3 EUV 谱仪 20~150 Å 范围的绝对标定结果  
Fig. 3 The absolute calibration factor,  $F_e$ , as a function of wavelength in the range of 20~150 Å

此种标定方法的误差主要来自两个方面,一是光谱仪对连续光谱的测量误差,二是用等离子体参数分布计算韧致辐射。我们通过选择较高等离子体电子密度(如图 3 所示)同时避免金属杂质的复合辐射对韧致辐射波段的影响来减小测量误差。在理论计算韧致辐射过程中,我们通过选择相似等离子体放电中的剖面分布作平均来减少测量误差。在标定过程中,后一误差对该标定结果的影响较大,考虑到等离子体参数的测量误差  $n_e$  (10%),  $T_e$  (15%) 及  $Z_{eff}$  (20%),该方法的标定误差约为 30%。

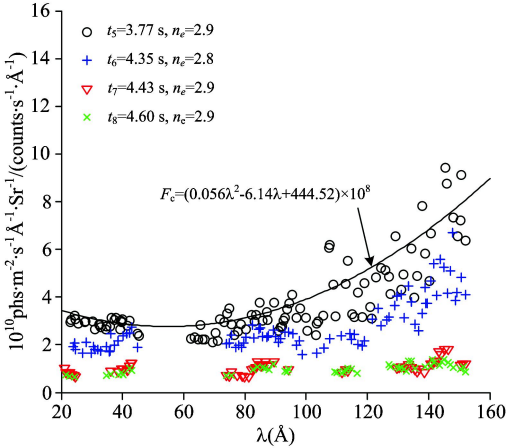


图 4 中高 Z 杂质复合辐射对绝对标定的影响( $t_5$  时刻没有复合辐射,  $t_6 - t_8$  时刻有复合辐射)  
Fig. 4 The influence of the recombination from medium and high Z impurities on the calibration factor (without free-bond recombination at  $t_5$ , with free-bond recombination at  $t_6 - t_8$ )

### 3 利用共振谱线对进行相对标定

对于能级跃迁分别为  $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2, 3/2}$  和  $2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{1/2, 3/2}$  的类锂和类钠离子谱线对其强度比的理论计算值准确率很高,不同模型的计算结果仅相差百分之几,且对温度的依赖性弱<sup>[14]</sup>。当等离子体电子温度达到电离能附近时,谱线对的线强度也较强,利于实验测量和进行相对标定。

在 EAST 高功率加热条件下,快速 EUV 谱仪观测到类锂杂质离子( $Fe^{23+}$ ,  $Cr^{21+}$ ,  $Ar^{15+}$ )和类钠杂质离子( $Mo^{31+}$ ,  $Fe^{15+}$ )的共振谱线对,如图 5 所示。表 1 列出了它们的波长、电离能、谱线强度比(对  $2^2 S_{1/2} - 2^2 P_{1/2}$  跃迁的谱线进行归一)的理论模拟值和实验统计值以及得到的谱仪系统的相对灵敏度。图 6 是利用谱线对强度比得到的系统在长波段的相对响应率。图 7 是结合了韧致辐射和谱线对两种原位标定方法给出的快速 EUV 谱仪的响应率曲线,其中绝对标定部分只显示了  $t_5$  时刻的数据以及拟合曲线,由于  $Cr^{21+}$  和  $Ar^{15+}$  谱线对波长没有重合部分,所以没有包括长波段的  $Ar^{15+}$  和  $Fe^{15+}$  谱线对相对标定结果。

对于此种标定方法其误差主要来自于谱线对强度的测量。在计算谱线强度时,我们对该条谱线所占的像素点的计

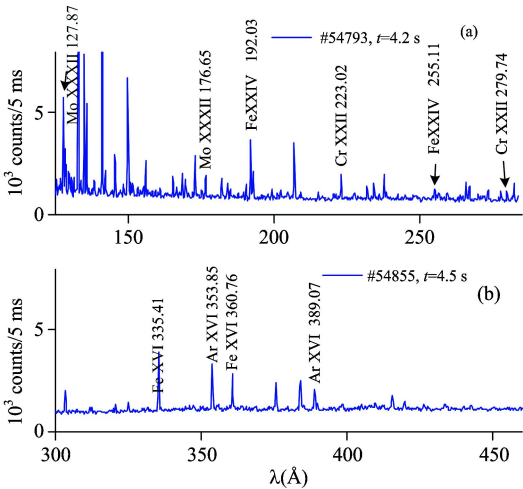


图 5 快速 EUV 谱仪测量到的共振谱线对 (a) 类钠(Mo XXII)和类锂(Fe XXIV, Cr XXII), (b) 类钠(Fe XXIV)和类锂(Ar XVI)

Fig. 5 The Li/Na-like doublets measured by EUV spectrometer (a) the Na-like doublets (Mo XXXII) and Li-like doublets (Fe XXIV, Cr XXII) and (b) the Na-like doublets (Fe XXIV) and Li-like doublets (Ar XVI)

数值扣除背景计数值后求和。我们统计了若干炮中同一条谱线 2~3 种线型下的强度,在统计强度比时选择温度较高两条谱线强度都比较强的时刻以降低统计误差。谱线测量的误差值参考表 1。由于此种标定方法是对利用等离子体自身连续韧致辐射得到的绝对标定结果进一步拓展,考虑到前者的绝对标定误差(30%)以及谱线对测量值的误差(2.6%),快速 EUV 系统的绝对标定误差约为 30%。

4 估算杂质浓度

利用得到的绝对标定系数,我们得到各种杂质特征线辐

表 1 本征类锂和类钠金属杂质离子电离能、共振谱线对波长以及跃迁,强度比的理论和测量值以及 EUV 谱仪的相对响应率

Table 1 Ionization energy, wavelength and transition of Na/Li-like doublets, modeled and measured line intensity ratios and sensitivity ratios for EUV spectrometer

Ion	$E_i/\text{eV}$	$\lambda/\text{\AA}$	Transition	Intensity ratio		Sensitivity ratio
				Modeled <sup>[14]</sup>	Measured	
Fe XXIV	2 046	192.03	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{3/2}$	1.91	$4.38 \pm 0.11$	0.436
		255.11	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2}$			
Mo XXXII	1 776	127.87	$2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{3/2}$	1.82	$5.02 \pm 0.13$	0.363
		176.65	$2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{1/2}$			
Cr XXII	1 722	223.02	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{3/2}$	1.93	$3.39 \pm 0.11$	0.569
		279.74	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2}$			
Ar XVI	918	353.85	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{3/2}$	1.97	$2.21 \pm 0.07$	0.891
		389.07	$1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2}$			
Fe XVI	489	335.41	$2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{3/2}$	1.95	$1.66 \pm 0.10$	1.175
		360.76	$2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{1/2}$			

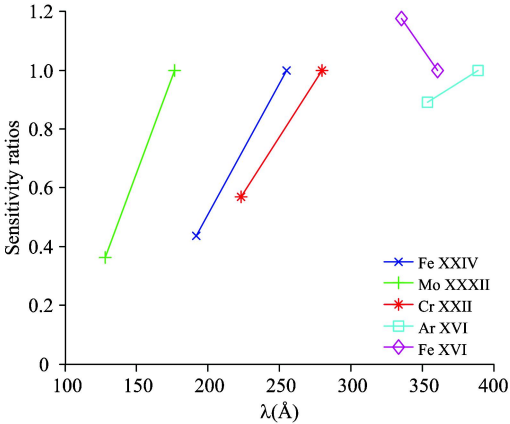


图 6 利用共振谱线对的相对标定结果  
Fig. 6 The Na- and Li-like doublets inverse sensitivity ratios against wavelength

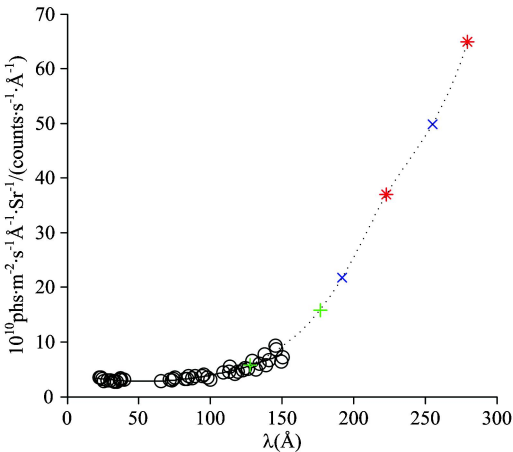


图 7 结合绝对标定和相对标定得到的系统响应率曲线  
Fig. 7 The experimentally obtained absolute sensitivity curve for EUV spectrometer

射的绝对强度，在此基础上我们定量计算杂质浓度。对于锂、碳等低 Z 杂质我们选择类氢离子特征线，对于铁、铜等中 Z 金属杂质我们选择类锂和类铍离子特征线，对于钼我们选择类钠离子特征线，对于钨我们选择类铜离子特征线，结合杂质输运程序与 ADAS (atomic data and analysis structure) 原子数据库模拟出的特征辐射线强度与测量到的绝对强度进行比较，得到各种杂质在等离子体中的浓度 (对电子密度归一化的杂质密度)<sup>[15]</sup>。在上钨偏滤器位形条件下以 RF 加热为主的稳态 H 模等离子体中，锂、碳、铁、铜、钼和钨等杂质的浓度分别在 2%~10%，1%~5%， $10^{-5} \sim 10^{-4}$ ， $3 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$ ， $2 \times 10^{-7} \sim 3 \times 10^{-6}$  和  $6 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-4}$  范围。

5 结 论

本文介绍了 EAST 上工作在 20~500 Å 范围的快速

EUV 光谱仪的原位绝对标定方法和结果。在波长范围为 20~150 Å，我们通过对比等离子体自身发射的可见和 EUV 波段的连续韧致辐射对其做绝对标定。同时利用能级跃迁分别为  $1s^2 2s^2 S_{1/2} - 1s^2 2p^2 P_{1/2, 3/2}$  和  $2p^6 3s^2 S_{1/2} - 2p^6 3p^2 P_{1/2, 3/2}$  的类锂 ( $Fe^{23+}$ ,  $Cr^{21+}$ ,  $Ar^{15+}$ ) 和类钠 ( $Mo^{31+}$ ,  $Fe^{15+}$ ) 共振谱线对进行相对标定，将绝对标定的结果拓展到 280 Å 的范围。绝对标定的误差约为 30%。利用绝对标定后的 EUV 谱线强度，我们对杂质浓度进行定量计算。在今后的实验中我们会继续尝试例如氖弹丸注入等更有效的实验方法 (提高等离子体密度，同时避免中高 Z 杂质产生)，来拓展绝对标定的波长范围。

References

[1] Wan B, Li J, Guo H, et al. Nuclear Fusion, 2015, 55 (10): 104015.

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

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

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

[5] 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.

[6] Dong C, Morita S, Goto M, et al. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(11): 113102.

[7] CUI Zheng-ying, GAO Ya-dong, FU Bing-zhong, et al (崔正英, 高亚东, 傅炳忠, 等). Nuclear Fusion and Plasma Physics (核聚变与等离子体物理), 2011, 1(31): 1.

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

[9] ZHANG Peng-fei, ZHANG Ling, XU Zong, et al (张鹏飞, 张 凌, 许 棕, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2016, 36(7): 2134.

[10] Chen Y, Wu Z, Gao W, et al. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 2825.

[11] Liu Y, Schmuck S, Zhao H, et al. Plasma Science and Technology, 2016, 18(12): 1148.

[12] Wang Y, Gao X, Ling B, et al. Fusion Engineering and Design, 2013, 88(11): 2950.

[13] Liu H, Jie Y, Ding W, et al. Journal of Instrumentation, 2013, 8(11): C11002.

[14] Lawson K D, Coffey I H, Zacks J et al. Journal of Instrumentation, 2009, 4(4): P04013.

[15] Yang X, Zhang L, Xu Z, et al. Impurity Density Evaluation on EAST, A3 Foresight Program Workshop, Yinchuan, China, 17-20 May 2016.

In-situ Absolute Intensity Calibration of Fast-Response Extreme Ultraviolet Spectrometer on Experimental Advanced Superconducting Tokamak

YANG Xiu-da, ZHANG Ling\*, XU Zong, ZHANG Peng-fei, CHEN Ying-jie, HUANG Juan, WU Zhen-wei, GONG Xian-zu, HU Li-qun  
Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP), Hefei 230026, China

**Abstract** In the magnetic confinement device, the existence of impurity, especially the high-Z impurity, will cause the large enhancement of the radiation power loss and serious degradation of plasma performance. Quantitative study of impurity behavior



requires the absolute intensity calibration of spectroscopy diagnostic system for impurity firstly . In this work , a precise in-situ absolute intensity calibration of a fast-response flat-field extreme ultraviolet ( EUV ) spectrometer is carried out by using different methods in different wavelength range . In the range of  $20\sim150\text{ \AA}$  , the sensitivity curve is obtained by comparing EUV bremsstrahlung between the measurement and calculation , in which the latter one is calculated by combining the profile of electron density , temperature and the effective charge  $Z_{\text{eff}}$  deduced from the absolutely measured visible bremsstrahlung intensity in the range of  $(523\pm1)\text{ nm}$  . The measured EUV bremsstrahlung intensity is the continuous counts subtracting the background noise at different wavelengths from the detector . In the longer wavelength range , i . e .  $130\sim280\text{ \AA}$  , the relative intensity calibration is addressed by comparing the measured and simulated line intensity ratio of resonance transition doubles from Li-like ions , e . g .  $\text{Fe}^{23+}$  ,  $\text{Cr}^{21+}$  ,  $\text{Ar}^{15+}$  , and Na-like ions , e . g .  $\text{Mo}^{31+}$  ,  $\text{Fe}^{15+}$  , with the transition of  $1s^2 2s^2 S_{1/2}—1s^2 2p^2 P_{1/2, 3/2}$  and  $2p^6 3s^2 S_{1/2}—2p^6 3p^2 P_{1/2, 3/2}$  , respectively . For the simulated line intensity ratio , it is modeled using the collisional-radiative model , in which the energy level populations are determined by electron collisional excitation , de-excitation and radiative decay . By combining those two methods , the absolute calibration of EUV spectrometer is achieved in the wavelength range of  $20\sim280\text{ \AA}$  . In addition , the uncertainty of the calibration is estimated to be about 30% , considering the measurement uncertainties of electron temperature , electron density and bremsstrahlung . Based on the obtained absolute sensitivity curve , the quantitative study of impurity concentration is being carried out by comparing the absolute measurement of emission line intensity with that simulated by combining the one-dimensional impurity transport simulation and ADAS ( Atomic Data and Analysis Structure ) database .

**Keywords** EAST ; Extreme Ultraviolet ( EUV ) spectrometer ; Bremsstrahlung ; The absolute calibration ; The relative calibration ; The branching ratio

(Received Dec . 12 , 2016 ; accepted Apr . 19 , 2017)

\* Corresponding author

## 敬告读者——《光谱学与光谱分析》已全文上网

从 2008 年第 7 期开始在《光谱学与光谱分析》网站(www.gpxygpx.com)“在线期刊”栏内发布《光谱学与光谱分析》期刊全文,读者可方便地免费下载摘要和 PDF 全文,欢迎浏览、检索本刊当期的全部内容;并陆续刊出自 2004 年以后出版的各期摘要和 PDF 全文内容。2009 年起《光谱学与光谱分析》每期出版日期改为每月 1 日。

《光谱学与光谱分析》期刊社