

EAST 等离子体 Mo V-Mo XVIII 极紫外光谱的识别*

张文敏¹⁾²⁾ 张凌^{2)†} 程云鑫²⁾³⁾ 王正涵^{1)‡} 胡爱兰²⁾
段艳敏²⁾ 周天富²⁾ 刘海庆²⁾

1) (大连理工大学物理学院, 大连 116024)

2) (中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

3) (中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 合肥 230026)

(2021 年 12 月 24 日收到; 2022 年 1 月 29 日收到修改稿)

磁约束聚变等离子体中高 Z 杂质的存在给等离子体的约束状态带来不同程度的影响. EAST 装置第一壁是钨瓦, 不可避免地, 等离子体与壁相互作用会使钨进入等离子体成为高 Z 杂质. 本文利用 EAST 托卡马克装置快速极紫外杂质谱仪系统实现了对 5—500 Å ($1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm}$) 波段范围内杂质线光谱进行同时监测. 结合 EAST 等离子体低、中 Z 杂质的特征谱线对波长进行原位标定, 基于 NIST 数据库和已有实验数据进行对比, 并利用归一化谱线强度随时间演化行为, 对较低电子温度 ($T_{e0} = 1.5 \text{ keV}$) 等离子体中 5—485 Å 波段范围内由瞬态钨杂质溅射产生的钨光谱进行了系统性识别. 在 15—30 Å 和 65—95 Å 波段范围观测到分别由电离态 Mo^{19+} - Mo^{24+} (Mo XX-Mo XXV), Mo^{16+} - Mo^{29+} (Mo XVII-Mo XXX) 组成的未分辨跃迁系. 而且在 EAST 上观测并识别出 27—60 Å 和 120—485 Å 波段范围内低价钨离子 (Mo^{4+} - Mo^{17+}) 的多条谱线 (Mo V-Mo XVIII). 这些谱线包含多条强度较强且独立的禁戒线和共振线, 例如 Mo XII (329.414 Å, 336.639 Å, 381.125 Å), Mo XIII (340.909 Å, 352.994 Å), Mo XIV (373.647 Å, 423.576 Å), Mo XV (50.448 Å, 57.927 Å, 58.832 Å); 还观测到 27—32 Å 波段范围内 6 条新的钨谱线, 即 $(27.21 \pm 0.01) \text{ Å}$, $(27.37 \pm 0.01) \text{ Å}$, $(28.99 \pm 0.01) \text{ Å}$, $(30.81 \pm 0.01) \text{ Å}$, $(31.54 \pm 0.01) \text{ Å}$, $(31.83 \pm 0.01) \text{ Å}$, 并推断这 6 条谱线可能是 Mo XV-Mo XVIII 谱线. 同时确定了 12 条用于杂质输运物理研究的谱线. 这些谱线的识别不仅丰富了钨原子数据库, 还为 EAST 托卡马克开展高 Z 杂质行为以及输运物理的研究提供了坚实基础.

关键词: EAST 托卡马克, 极紫外光谱, 钨杂质, 谱线识别

PACS: 52.55.Fa, 33.20.Lg, 61.72.sh, 95.30.Ky

DOI: 10.7498/aps.71.20212383

1 引言

磁约束等离子体中燃料粒子是氢和它的同位素. 杂质的存在会稀释燃料粒子, 对于高 Z 杂质, 还会由于高冷却率, 造成等离子体的辐射功率损

失, 影响等离子体的约束性能. EAST 全超导托卡马克装置在 2014 年和 2020 年分别将上、下石墨偏滤器升级成钨偏滤器. 自 2021 年, EAST 装置运行在全金属壁的环境: 上、下偏滤器为钨、第一壁为钨, 此外 EAST 装置低杂波加热天线和众多诊断屏蔽材料分别为铜和铁. 在长脉冲实验和混合运行

* 国家磁约束核聚变能发展研究专项 (批准号: 2022YFE03180400)、国家自然科学基金 (批准号: 11925501) 和国家重点研发计划 (批准号: 2018YFE0311100, 2019YFE030403) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangling@ipp.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zxwang@dlut.edu.cn

模式下, 中、高 Z 杂质聚芯会导致等离子体约束性能严重退化 (从高约束模转换为低约束模) 甚至直接导致放电终止 [1,2]. 因此, 在 EAST 装置上, 观测本征中、高 Z 杂质离子密度的时空演化, 开展杂质输运过程和机理的研究, 实现芯部杂质含量的有效控制 [3,4], 对聚变装置获得高约束稳态长脉冲运行具有重要意义 [5].

被动光谱诊断是聚变装置中常规的杂质诊断手段 [6]. 工作在极紫外 (extreme ultraviolet, EUV) 波段范围 (5—500 Å) 的杂质光谱仪 (掠入射光谱仪) 已广泛应用于聚变装置中, 成为杂质行为研究不可或缺的诊断系统之一 [7–12]. 快速 EUV 杂质光谱仪用于实时监测等离子体芯部到边界几乎所有杂质离子发射的特征谱线; 空间分辨 EUV 杂质光谱仪用于观测中、高 Z 杂质离子密度分布的时空演化. 2021 年之前, EAST 上发展了分别工作在短波段范围 (5—130 Å, 可同时观测 42—97 Å) 和长波段范围 (20—500 Å, 可同时观测 131—253 Å) 的 “EUV_Short” 和 “EUV_Long” 两套快速 EUV 光谱仪系统 [13,14], 受限于探测器 (charge-coupled device, CCD) 感光面的大小, 需要控制 CCD 在焦平面上 (波长色散方向) 扫描实现等离子体芯部到边界不同杂质离子的全谱监测. 2020 年和 2021 年, EAST 快速 EUV 谱仪系统进行了升级, 可以在一炮放电中同时监测 5—500 Å 波段范围内芯部到边界杂质离子的特征谱线, 以及其谱线强度随放电时间的演化, 尤其对于中、高 Z 杂质铁、铜、钼和钨等杂质可以同时观测低-高多个电离态离子, 更利于研究杂质的输运行为. 然而由于 EUV 波段存在大量的杂质谱线 [13–15], 特别是对于高 Z 杂质钼、钨, 相邻电离态的杂质离子相似的跃迁发出的谱线波长差别小 [16,17], 因此精确的谱线识别是一项基础且关键的工作.

很多聚变装置上利用等离子体中自发的钼杂质爆发事件或钼弹丸注入方式开展了钼谱线的识别工作. TFR 装置首次观测并识别 5—50 Å 波段范围的钼杂质离子谱线 [18], 70—110 Å 和 50—500 Å 波段的钼光谱由 JET [19] 和 LHD [16] 装置相继观测并识别. 然而到目前为止各装置没有系统地识别 5—500 Å 波段范围钼杂质离子谱线. 在 2020 年 EAST 实验中, 利用等离子体中自发的瞬态杂质溅射事件, 通过两套快速 EUV 杂质谱仪波段扫描, 观测较高温度 ($T_{e0} = 3.5$ keV) 下钼杂质离子在

8—400 Å 波段范围内发出的特征谱线, 识别了中、高阶电离态钼离子 Mo^{23+} – Mo^{31+} 发出的 Mo XXIV–Mo XXXII 谱线. 本文基于 2021 年 EAST 上升级后的 4 套快速 EUV 谱仪系统对较低电子温度 ($T_{e0} = 1.5$ keV) 等离子体低、中阶电离态钼离子 Mo^{4+} – Mo^{17+} 在 5—485 Å 波段范围内发出的 Mo V–Mo XVIII 特征谱线进行系统性的识别. 低、中阶电离态钼离子位于等离子体边界区域, 因此这些谱线的精确识别不仅丰富了磁约束聚变等离子体钼杂质光谱数据, 同时还提供了边界钼杂质源的观测, 为深入研究从边界到芯部的高 Z 杂质输运行为奠定了基础.

2 EAST 实验装置和 EUV 杂质光谱仪诊断系统

EAST 是具有先进偏滤器位形的全超导托卡马克装置, 根据放电需求可灵活控制极向场提供上单零 (upper single null, USN)、下单零 (lower single null, LSN) 和双零 (double null, DN) 等多种偏滤器位形的实验条件. 其中等离子体电流和纵场强度分别可达 1.0 MA 和 3.5 T. 配备多种辅助加热和电流驱动系统 [20,21], 包括中性束 (neutral beam injection, NBI)、低杂波 (low hybrid wave, LHW)、电子回旋共振加热 (electron-cyclotron resonance heating, ECRH) 和离子回旋加热 (ion-cyclotron range of frequency heating, ICRF), 大幅度提升 EAST 装置的性能, 灵活调控等离子体参数 [22].

为了开展从边界到芯部的杂质输运物理行为研究, 2021 年 EAST 装置提升了边界低阶电离态杂质离子观测能力, 共发展了 4 套快速 EUV 杂质光谱仪, 包括 EUV_Short、EUV_Long_a、EUV_Long_b 和 EUV_Long_c. EUV_Short 谱仪工作波段范围为 5—130 Å, 采用 88.6° 的入射角和中心刻线密度为 2400 grooves/mm 的层状变间距 (varied line spacing, VLS) 凹面全息光栅实现平场成像. 后 3 套谱仪工作波段范围为 20—500 Å, 采用入射角为 87.0° 和中心刻线密度为 1200 grooves/mm 的 VLS 的凹面光栅作为分光系统. 光栅衍射方程为

$$m\lambda = \delta_0 (\sin\alpha - \sin\beta), \quad (1)$$

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 1(a), (b) 为这两类谱仪的光栅参数和光路设计. 两类快速 EUV

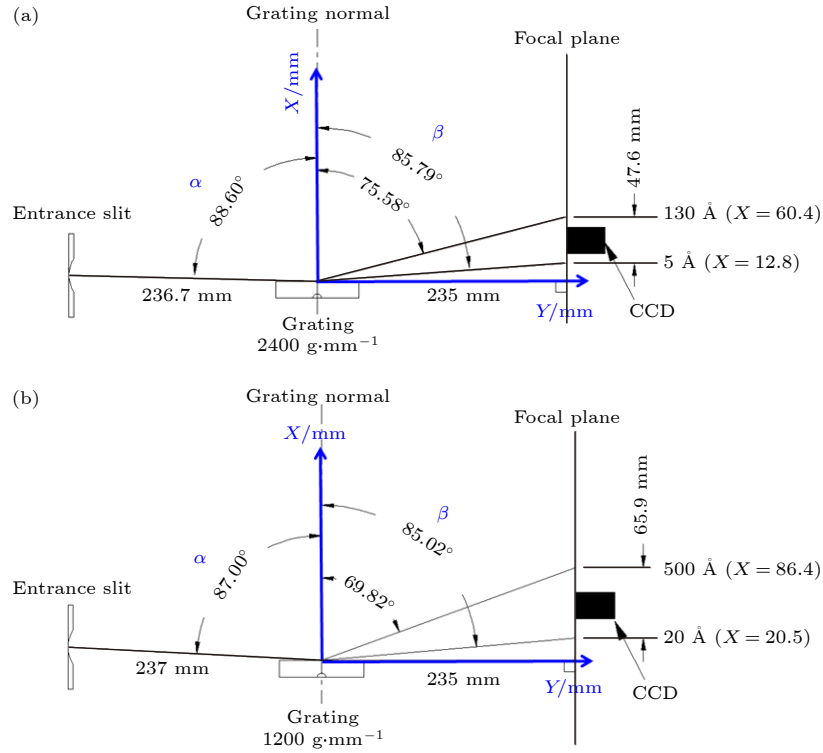


图 1 极紫外光谱仪的光路设计 (a) 短波段快速 EUV 谱仪; (b) 长波段快速 EUV 谱仪

Fig. 1. Optical layout of fast-time-response EUV spectrometer: (a) EUV_Short; (b) EUV_Long_a, EUV_Long_b, EUV_Long_c.

谱仪的入射狭缝都为 $30\ \mu\text{m}$, 均采用背射式高能段电荷耦合器件 (CCD, 1024×255 个像素点, 像素点大小 $26\ \mu\text{m} \times 26\ \mu\text{m}$, CCD 长边 1024 像素点用于波长分辨测量, 短边 255 像素点进行全部纵向合并) 采集光谱图像, 时间分辨可达 $5\ \text{ms}/\text{frame}$. 此外, 每套 EUV 谱仪系统上还安装有准直激光器用于空间标定. 文献 [13–15] 详细描述了 EUV 杂质光谱诊断系统的特征和性能. 升级后的 4 套系统分别固定观测 $5\text{--}50\ \text{\AA}$, $40\text{--}190\ \text{\AA}$, $245\text{--}500\ \text{\AA}$, $160\text{--}385\ \text{\AA}$ 波段范围. 4 套快速 EUV 谱仪的观测弦如图 2 所示, 其中 EUV_Long_b 和 EUV_Long_c 观测弦主要穿过等离子体边界区域.

本文利用该 4 套快速 EUV 光谱仪组成的快速杂质谱仪诊断系统对瞬态杂质溅射事件产生的钼杂质离子发出的 EUV 光谱进行观测. 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其二阶和三阶谱线对该 4 套快速 EUV 谱仪的波长进行精确原位标定 [23]. 第一种标定方法是利用全波段的多条线通过三次多项式拟合得到波长 (简记为 λ_{exp}), 第二种标定方法是利用单条线结合光栅色散方程计算出波长 (简记为 λ_{cal}). 波长的不确定度定义为 $\Delta\lambda_{\text{err}} = \lambda_{\text{exp}} - \lambda_{\text{cal}}$, 两类快速 EUV 谱

仪的 $\Delta\lambda_{\text{err}}$ 分别小于 $0.03\ \text{\AA}$ (EUV_Short) 和 $0.08\ \text{\AA}$ (EUV_Long_a, EUV_Long_b, EUV_Long_c) [15]. 利用可见和 EUV 连续韧致辐射比的方法进行原位绝对强度标定 [24]. 基于 NIST 数据库 [25] 和已有实

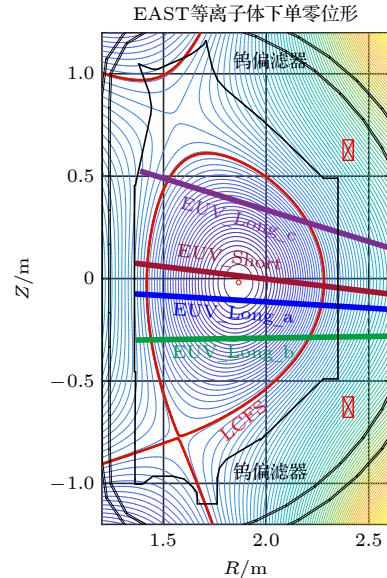


图 2 EAST 极向截面、最外磁面 (红色线) 以及 4 套快速极紫外光谱仪观测弦

Fig. 2. EAST poloidal cross section and the last closed magnetic surface (red line), and lines of sight of four fast-time-response EUV spectrometers on EAST.

验数据^[16,18,19], 并利用归一化谱线强度随时间演化行为对观测到的谱线进行识别. 此外, 本工作还利用快速辐射量热 (absolute extreme ultraviolet, AXUV) 诊断系统监测钼杂质爆发前后辐射的时空演化行为^[26].

3 钼杂质谱线识别

图3所示为EAST装置L模放电(#101700)伴随有钼杂质爆发的典型波形图. 该炮等离子体为LSN位形; 等离子体电流 $I_p = 0.4$ MA; 低杂波加热功率 $P_{LHW} = 1.2$ MW (4.6 GHz); 离子回旋加热功率 $P_{ICRF} = 0.3$ MW; NBI作为诊断束脉冲

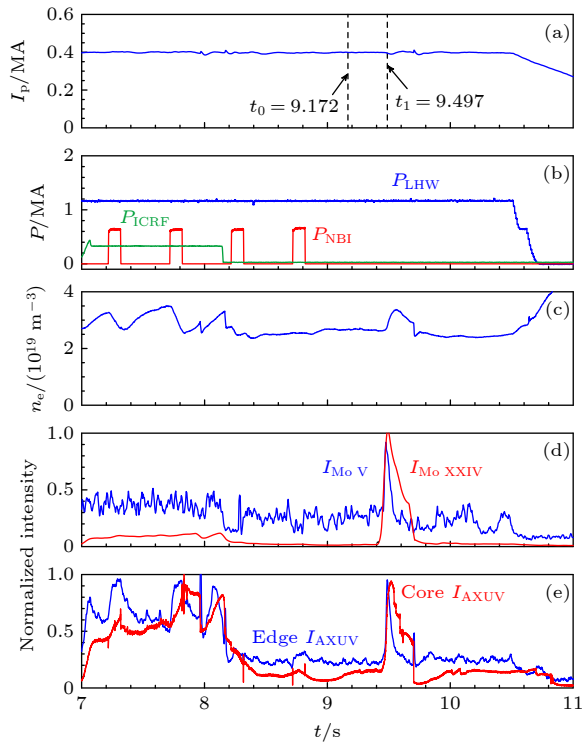


图3 发生钼杂质溅射的典型波形图 (a) 等离子体电流 I_p ; (b) 低杂波、离子回旋和中性束加热功率 (P_{LHW} , P_{ICRF} , P_{NBI}); (c) 芯部弦平均电子密度 n_e ; (d) 归一化的 Mo V 258.069 Å 和 Mo XXIV 70.726 Å 线辐射强度 ($I_{Mo V}$, $I_{Mo XXIV}$); (e) 归一化的边界辐射和芯部辐射强度 (Edge I_{AXUV} , Core I_{AXUV})

Fig. 3. Typical waveform of discharge with molybdenum impurity sputtering: (a) plasma current, I_p ; (b) heating power of low hybrid wave, P_{LHW} , ion cyclotron range of frequency heating, P_{ICRF} , and neutral beam injection, P_{NBI} ; (c) central line-averaged electron density, n_e ; (d) normalized intensities of Mo V at 258.069 Å, $I_{Mo V}$, and Mo XXIV at 70.726 Å, $I_{Mo XXIV}$; (e) normalized radiation intensities observed by fast AXUV system along an edge and central chord, Edge I_{AXUV} , and Core I_{AXUV} , respectively.

式注入, 功率 $P_{NBI} = 0.6$ MW; 弦平均电子密度 $n_e = 2.6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 从图3(c)—(e) 可以看出, 由于ICRF功率的注入, 等离子体密度、归一化的钼杂质强度以及辐射在 7.029—8.315 s 有明显的上升及波动; 而在 $t = 9.431$ s 时 Mo V 和 Mo XXIV 归一化谱线强度及辐射的突然上升表明此时发生了钼杂质突然溅射事件, 随着钼杂质离子向芯部输运, 杂质线辐射强度在 $t = 9.497$ s 达到峰值, 之后逐渐下降, 在 $t = 9.711$ s 后消失. 图3(e) 中的边界辐射 Edge I_{AXUV} 和芯部辐射 Core I_{AXUV} 强度与 $I_{Mo V}$ 和 $I_{Mo XXIV}$ 谱线强度具有相似的时间演化行为. 从图4(a), (b) 钼杂质爆发前后辐射剖面的时空演化分布也可以看出与图3(d) 一致的钼杂质爆发及输运现象. 为了更准确进行谱线的分析和识别, 选用在钼杂质爆发前 $t_0 = 9.172$ s 和爆发期间 $t_1 = 9.497$ s 两个时刻点 (如图3中两条点划线所示) 观测到的全谱进行对比. 图5所示为钼杂质爆发前和爆发期间 5—485 Å 波段范围 EUV 全谱以及谱线识别结果. 图5(a)—(d) 所示 EUV 全谱分别是利

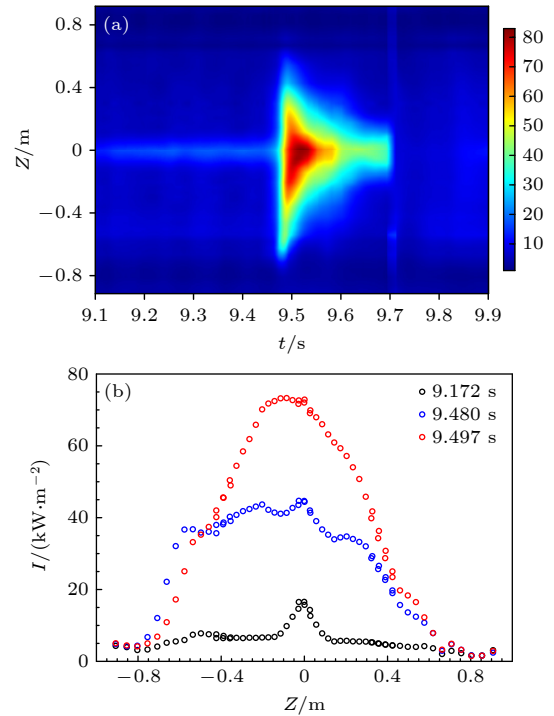


图4 EAST #101700 放电中钼杂质爆发前后辐射分布 (a) 9.1—9.9 s 的时间演化; (b) $t = 9.172$ s, 9.480 s, 9.497 s 3 个时刻

Fig. 4. Radiation profiles before and after the molybdenum impurity burst in EAST #101700 discharge: (a) Time evolutions during 9.1–9.9 s; (b) at three timings of $t = 9.172$ s, 9.480 s and 9.497 s.

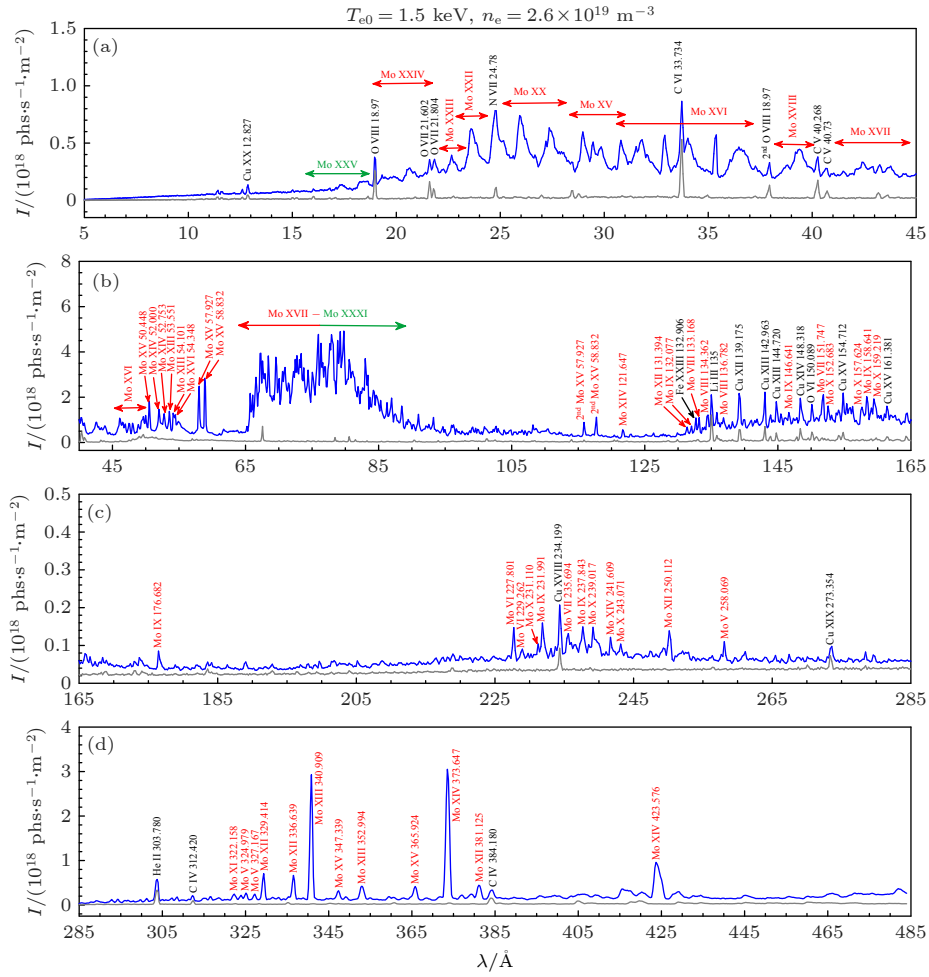


图5 EAST #101700 放电钼杂质爆发前 325 ms (灰色线, $t = 9.172$ s) 和爆发期间 (蓝色线, $t = 9.497$ s) 观测 5—485 Å 波段范围的 EUV 光谱 (a) 5—45 Å; (b) 45—165 Å; (c) 165—285 Å; (d) 285—485 Å

Fig. 5. EUV spectra observed 325 ms before (grey lines, $t = 9.172$ s) and during (blue lines, $t = 9.497$ s) the molybdenum burst at the wavelength ranges of 5–485 Å in EAST discharge #101700: (a) 5–45 Å; (b) 45–165 Å; (c) 165–285 Å; (d) 285–485 Å.

用 EUV_Short, EUV_Long_a, EUV_Long_c, EUV_Long_b 谱仪观测的结果. 谱线的识别是基于原子数据库 NIST^[25] 和已发表的实验数据^[16,18,19], 并结合归一化谱线强度随时间的演化行为进行验证. 图 5 所示为由不同颜色标注的所识别出的谱线, 其中绿色表示电离态离子 Mo^{24+} – Mo^{20+} 发出的 Mo XXV–Mo XXX 谱线, 红色表示电离态离子 Mo^{4+} – Mo^{23+} 发出的 Mo V–Mo XXIV 谱线, 黑色表示其他杂质离子谱线.

图 5(a) 所示为 5—45 Å 波段范围的钼光谱. 在 15—27 Å 波段范围, 出现了强度较弱的钼未分辨跃迁系 (Mo unresolved transition array, Mo-UTA), 经分析其主要由电离态 Mo^{10+} – Mo^{24+} (Mo XX–Mo XXV) 的 4d—3p, 4f—3d 跃迁的谱线组成^[18]. 本文在 EAST 上观测到 27—45 Å 波段范围的钼谱线. 通过与 TFR 装置结果对比^[18], 确定由

Mo^{14+} – Mo^{17+} (Mo XV–Mo XVIII) 的 5f—3d, 4f—3d, 4p—3d 跃迁的谱线组成, 其中 Mo^{14+} (Mo XV) 离子的共振线 $3d^9 5f \ ^1P^\circ_1 \rightarrow 3d^{10} \ ^1S_0$ (29.458 Å) 和 $3d^9 4f \ ^1P^\circ_1 \rightarrow 3d^{10} \ ^1S_0$ (35.368 Å), 以及 Mo^{15+} (Mo XVI) 离子的 32.916 Å 谱线强度较强且分立, 可用于钼杂质诊断和输运研究. 同时在该波段还发现了 6 条强度较强的新谱线: (27.21 ± 0.01) Å, (27.37 ± 0.01) Å, (28.99 ± 0.01) Å, (30.81 ± 0.01) Å, (31.54 ± 0.01) Å, (31.83 ± 0.01) Å. 根据该波段范围附近已知的其他钼谱线, 可以初步推断这 6 条谱线是 Mo XV–Mo XVIII 线.

图 5(b) 所示为 40—165 Å 波段范围的钼光谱. EAST 上首次观测到 45—60 Å 波段范围内的钼谱线. 波长在 45—50 Å 范围内的谱线主要由 Mo^{15+} (Mo XVI) 的 4p—3d 跃迁线组成, 然而由于谱线强度较弱, 目前很难进行精确识别. 50—60 Å 波段

内的谱线主要由 Mo^{12+} - Mo^{15+} (Mo XIII - Mo XVI) 的 $4p-3d$, $4s-3d$ 跃迁线组成, 其中包含一些强度较强且独立的禁戒跃迁线, 例如 $\text{Mo XV } 57.927 \text{ \AA}$ ($3d^9(^2D_{3/2})4s(3/2, 1/2)_2 \rightarrow 3d^{10}^1S_0$) 和 58.832 \AA ($3d^9(^2D_{5/2})4s(5/2, 1/2)_2 \rightarrow 3d^{10}^1S_0$) 的电四极子跃迁 (electric-quadrupole, E2)^[27], 另外通过图 6(b) 电离态归一化谱线强度随时间演化的方法, 在波长 $(115.865 \pm 0.01) \text{ \AA}$ 和 $(117.738 \pm 0.01) \text{ \AA}$ 处观测到这两条 E2 线的二阶谱 ($2^{\text{nd}}\text{Mo XV: } 2 \times 57.927 \text{ \AA}$, $2 \times 58.832 \text{ \AA}$). 在 $65-95 \text{ \AA}$ 波段范围内观测到的 Mo-UTA 是由 Mo^{16+} - Mo^{29+} (Mo XVII - Mo XXX) 的跃迁线组成^[16,19]. 在 $130-165 \text{ \AA}$ 波段范围内, 虽然存在一些较强的铜杂质谱线, 但对钼谱线的识别并无影响; 另外 $65-95 \text{ \AA}$ 波段的 Mo-UTA 在该波段范围的二阶谱强度非常弱. 经过仔细识别, 可以确定出该波段主要由 Mo^{7+} - Mo^{11+} (Mo VIII - Mo XII) 的 $5s-4p$, $4p-4p$ 跃迁线组成, 包括 $\text{Mo VIII } 133.168 \text{ \AA}$, 134.362 \AA , 136.782 \AA , $\text{Mo X } 152.683 \text{ \AA}$, 157.624 \AA , 159.219 \AA 和 $\text{Mo XII } 131.394 \text{ \AA}$.

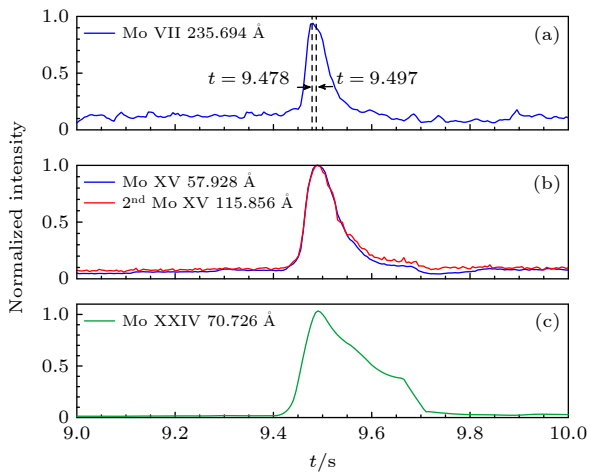


图 6 EAST #101700 放电中四条钼离子归一化谱线强度随时间的演化 (a) $\text{Mo VII } 235.694 \text{ \AA}$; (b) $\text{Mo XV } 57.928 \text{ \AA}$, $2^{\text{nd}} \text{Mo XV } 115.856 \text{ \AA}$; (c) $\text{Mo XXIV } 70.726 \text{ \AA}$

Fig. 6. Time evolutions of the four molybdenum ions normalized line emission intensities in EAST #101700 discharge: (a) Mo VII at 235.694 \AA ; (b) Mo XV at 57.928 \AA and $2^{\text{nd}} \text{Mo XV}$ at 115.856 \AA ; (c) Mo XXIV at 70.726 \AA .

图 5(c) 是由 EUV_Long_c 观测到的 $165-285 \text{ \AA}$ 波段范围内的钼光谱. 由于 EUV_Long_c 谱仪的观测弦靠近边界, 因此在该波段范围观测到较低电离态的 Mo 离子谱线, 例如 $\text{Mo VI}(227.801 \text{ \AA})$, $\text{Mo IX}(176.682 \text{ \AA}, 231.991 \text{ \AA}, 237.843 \text{ \AA})$, $\text{Mo XII}(250.112 \text{ \AA})$. 图 5(d) 是由 EUV_Long_b 观测到的 $285-485 \text{ \AA}$ 波段范围的钼光谱. 该波段存在一些强度很强的分立谱, 利用谱线强度随时间演化的特点可判断为低阶电离态钼离子谱线, 通过 NIST 数据库对比可以确定为 $\text{Mo XIII}(340.909 \text{ \AA}, 3d^{10}4s4p^1P^{\circ}_1 \rightarrow 3d^{10}4s^2^1S_0)$, $\text{Mo XIV}(373.647 \text{ \AA}, 3d^{10}4p^2P^{\circ}_{3/2} \rightarrow 3d^{10}4s^2^1S_0)$ 线以及 $4p-4s$ 跃迁的 $\text{Mo XV}(347.339 \text{ \AA}, 365.924 \text{ \AA})$, $\text{Mo XII}(329.414 \text{ \AA}, 336.639 \text{ \AA}, 391.125 \text{ \AA})$ 谱线. 该波段同时还观测到一些低 Z 杂质离子谱线, 例如 He II 和 C IV 等, 这些谱线用于波长的原位标定.

图 6 所示为 4 条典型的较低电离态到较高电离态归一化的钼谱线强度随放电时间的演化行为, 其中图 6(a) 是较低电离态 $\text{Mo VII } 235.694 \text{ \AA}$ 谱线; 图 6(b) 是中阶电离态 $\text{Mo XV } 57.928 \text{ \AA}$ 以及其二阶谱 $2^{\text{nd}}\text{Mo XV } 115.856 \text{ \AA}$ 谱线; 图 6(c) 是较高电离态 $\text{Mo XXIV } 70.726 \text{ \AA}$ 谱线. 当钼杂质溅射事件发生以后, 低阶电离态 $\text{Mo VII } 235.694 \text{ \AA}$ 谱线强度随时间快速上升并在 $t = 9.478 \text{ s}$ 达到峰值, 随后快速下降. 中阶电离态 $\text{Mo XV } 57.928 \text{ \AA}$ 和高阶电离态 $\text{Mo XXIV } 70.726 \text{ \AA}$ 谱线在 $t = 9.497 \text{ s}$ 才达到峰值, 随后缓慢的下降. 电离态谱线归一化的时间演化行为与电子温度分布以及等离子体粒子约束及输运特性相关. 本文利用杂质谱线归一化的时间演化行为对于所识别的谱线进行验证.

表 1 总结了 $5-485 \text{ \AA}$ 波段范围内识别的钼谱线, 包括钼线、电离态、电离能、波长与跃迁能级. 其中谱线波长实验值一栏由 $\lambda_{\text{exp}} \pm \Delta\lambda_{\text{err}}$ 的形式给出. 对于谱线波长的参考值落在误差棒之外的谱线均采用时间演化对比的方法进行检验, 可以确定是该条谱线. 粗体表示可用于杂质诊断和输运研究的 12 条谱线.

表 1 在 EUV 波段识别的钼谱线
Table 1. Identified molybdenum lines in EUV range.

谱线	离子	电离能/eV	波长/ \AA		跃迁能级
			实验值	参考值	
Mo V	Mo^{4+}	54.42	258.09 ± 0.03	258.069	$4p^5 4d^3 \rightarrow 4p^6 4d^2 \text{ } ^1D_2$
			324.98 ± 0.02	324.979	$4p^6 4d 5f \text{ } ^3H^{\circ}_4 \rightarrow 4p^6 4d^2 \text{ } ^3F_4$
			327.13 ± 0.01	327.167	$4p^5 4d^3 \rightarrow 4p^6 4d^2 \text{ } ^3P_2$

表 1 (续) 在 EUV 波段识别的钼谱线
Table 1 (continued). Identified molybdenum lines in EUV range.

谱线	离子	电离能/eV	波长/Å		跃迁能级
			实验值	参考值	
Mo VI	Mo ⁵⁺	68.83	227.75 ± 0.04	227.801	4p⁵(²P°)4d(³F)5s ²F°_{5/2}→4p⁶4d ²D_{5/2}
			229.20 ± 0.04	229.262	4p ⁶ 6f ² F° _{5/2} →4p ⁶ 4d ² D _{3/2}
Mo VII	Mo ⁶⁺	125.64	151.85 ± 0.04	151.747	4s ² 4p ⁵ (² P° _{3/2})5d ² [1/2] ₁ °→4s ² 4p ⁶ ¹ S ₀
			235.66 ± 0.05	235.694	4s ² 4p ⁵ (² P° _{3/2})5f ² [3/2] ₁ →4s ² 4p ⁵ (² P° _{1/2})4d ² [3/2] ₂ °
Mo VIII	Mo ⁷⁺	143.6	133.18 ± 0.03	133.168	4s ² 4p ⁴ (³ P)5d ² P _{3/2} →4s ² 4p ⁵ ² P° _{3/2}
			134.34 ± 0.03	134.362	4s ² 4p ⁴ (³ P)5d ⁴ F _{5/2} →4s ² 4p ⁵ ² P° _{3/2}
			136.83 ± 0.03	136.782	4s ² 4p ⁴ (³ P)5d ² D _{3/2} →4s ² 4p ⁵ ² P° _{3/2}
			132.03 ± 0.03	132.077	4s ² 4p ³ (² P°)5d ³ P° ₁ →4s ² 4p ⁴ ¹ S ₀
			158.53 ± 0.03	158.641	4s ² 4p ³ (² P° _{1/2})5s (1/2, 1/2) ₁ °→4s ² 4p ⁴ ³ P ₂
Mo IX	Mo ⁸⁺	164.12	176.67 ± 0.04	176.682	4s ² 4p ³ (² D° _{3/2})5s (3/2, 1/2) ₂ °→4s ² 4p ⁴ ¹ D ₂
			231.90 ± 0.05	231.991	4s²4p³(²D°)4d ¹F°₃→4s²4p⁴ ¹D₂
			237.76 ± 0.05	237.843	4s ² 4p ³ (² D°)4d ¹ D° ₂ →4s ² 4p ⁴ ¹ D ₂
			152.54 ± 0.04	152.683	4s ² 4p ² (³ P)5s ⁴ P _{3/2} →4s ² 4p ³ ⁴ S° _{3/2}
			157.65 ± 0.04	157.624	4s ² 4p ² (³ P)5s ² P _{3/2} →4s ² 4p ³ ² D° _{5/2}
Mo X	Mo ⁹⁺	186.3	159.07 ± 0.04	159.049	4s ² 4p ² (³ P)5s ⁴ P _{5/2} →4s ² 4p ³ ² D° _{5/2}
			159.42 ± 0.04	159.219	4s ² 4p ² (³ P)5s ⁴ P _{3/2} →4s ² 4p ³ ² D° _{3/2}
			231.07 ± 0.04	231.110	4s ² 4p ² (¹ D)4d ² F _{7/2} →4s ² 4p ³ ² D° _{5/2}
			239.03 ± 0.06	239.017	4s ² 4p ² (¹ S)4d ² D _{5/2} →4s ² 4p ³ ² P° _{3/2}
			243.05 ± 0.06	243.071	4s ² 4p ² (¹ D)4d ² D _{3/2} →4s ² 4p ³ ² D° _{5/2}
Mo XI	Mo ¹⁰⁺	209.3	146.65 ± 0.04	146.641	4s ² 4p (² P° _{1/2})5s (1/2, 1/2) ₁ °→4s ² 4p ² ³ P ₂
			322.12 ± 0.04	322.158	4s4p ³ ¹ P° ₁ →4s ² 4p ² ¹ D ₂
			131.37 ± 0.03	131.394	4s ² 5s ² S _{1/2} →4s ² 4p ² P° _{1/2}
			250.09 ± 0.06	250.112	4s²4d ²D_{5/2}→4s²4p ²P°_{3/2}
Mo XII	Mo ¹¹⁺	230.28	329.53 ± 0.01	329.414	4s4p ² ² P _{3/2} →4s ² 4p ² P° _{3/2}
			336.51 ± 0.01	336.639	4s4p ² ² P _{1/2} →4s ² 4p ² P° _{3/2}
			381.13 ± 0.06	381.125	4s4p ² ² D _{3/2} →4s ² 4p ² P° _{1/2}
			53.56 ± 0.02	53.551	3d ⁹ 4s ² 4p ³ D° ₁ →3d ¹⁰ 4s ² ¹ S ₀
Mo XIII	Mo ¹²⁺	279.1	54.12 ± 0.02	54.101	3d ⁹ 4s ² 4p ¹ P° ₁ →3d ¹⁰ 4s ² ¹ S ₀
			340.88 ± 0.01	340.909	3d¹⁰4s4p ¹P°₁→3d¹⁰4s² ¹S₀
			352.87 ± 0.03	352.994	3d ¹⁰ 4p ² ³ P ₁ →3d ¹⁰ 4s4p ³ P° ₀
			51.98 ± 0.02	52.000	3d ⁹ (² D)4p ² (³ P) ² P _{1/2} →3d ¹⁰ 4p ² P° _{3/2}
			52.77 ± 0.02	52.753	3d ⁹ (² D)4s4p (³ P°) ² P° _{3/2} →3d ¹⁰ 4s ² S _{1/2}
Mo XIV	Mo ¹³⁺	302.6	121.68 ± 0.02	121.647	3d ¹⁰ 5s ² S _{1/2} →3d ¹⁰ 4p ² P° _{3/2}
			241.78 ± 0.06	241.609	3d ¹⁰ 4d ² D _{3/2} →3d ¹⁰ 4p ² P° _{1/2}
			373.55 ± 0.05	373.647	3d¹⁰4p ²P°_{3/2}→3d¹⁰4s ²S_{1/2}
			423.57 ± 0.07	423.576	3d¹⁰4p ²P°_{1/2}→3d¹⁰4s ²S_{1/2}
			29.48 ± 0.01	29.458	3d⁹5f ¹P°₁→3d¹⁰ ¹S₀
Mo XV	Mo ¹⁴⁺	544	29.81 ± 0.01	29.774	3d ⁹ 5f ³ D° ₁ →3d ¹⁰ ¹ S ₀
			35.39 ± 0.01	35.368	3d⁹4f ¹P°₁→3d¹⁰ ¹S₀
			50.43 ± 0.02	50.448	3d ⁹ (² D _{5/2})4p (5/2, 3/2) ₁ °→3d ¹⁰ ¹ S ₀
			58.04 ± 0.04	57.927	3d⁹(²D_{3/2})4s (3/2, 1/2)₂→3d¹⁰ ¹S₀
			58.86 ± 0.04	58.832	3d⁹(²D_{5/2})4s (5/2, 1/2)₂→3d¹⁰ ¹S₀
Mo XVI	Mo ¹⁵⁺	591	347.47 ± 0.05	347.339	3d ⁹ (² D _{5/2})4p (5/2, 3/2) ₃ °→3d ⁹ (² D _{5/2})4s (5/2, 1/2) ₃
			365.77 ± 0.04	365.924	3d ⁹ (² D _{5/2})4p (5/2, 3/2) ₄ →3d ⁹ (² D _{5/2})4s (5/2, 1/2) ₃
			32.92 ± 0.05	32.916	3p⁶3d⁸(¹G₄)4f ²[1]_{3/2}°→3p⁶3d⁹ ²D_{5/2}
			34.03 ± 0.01	33.992	3p ⁶ 3d ⁸ (³ F ₂)4f ² [1] _{3/2} °→3p ⁶ 3d ⁹ ² D _{3/2}
			54.46 ± 0.03	54.348	3p ⁶ 3d ⁸ (³ F ₄)4s (4, 1/2) _{9/2} →3p ⁶ 3d ⁹ ² D _{5/2}
Mo XVIII	Mo ¹⁷⁺	702	38.81 ± 0.01	38.700 ^a	3d ⁶ 4p→3d ⁷

^a 数据来源于文献[18], 其他数据来源于NIST数据库[29], 粗体表示可用于杂质诊断的谱线.

4 总结与展望

本工作主要利用 2021 年 EAST 升级的四套快速 EUV 光谱仪对较低电子温度 ($T_{e0} = 1.5$ keV) 等离子体中 5—485 Å 波段范围内由瞬态钼杂质溅射产生的钼光谱进行了系统性的识别. 在 15—30 Å 和 65—95 Å 波段范围分别观测到由电离态 Mo^{19+} — Mo^{24+} (Mo XX — Mo XXV) 与 Mo^{16+} — Mo^{29+} (Mo XVII — Mo XXX) 组成的 Mo-UTA. 同时识别并分析了 27—60 Å 和 120—485 Å 波段范围内 Mo^{4+} — Mo^{17+} 离子发出的多条 Mo V—Mo XVIII 谱线, 包括 EAST 上首次观测到强度较强且分立的禁戒线及共振线 ($\text{Mo XV } 50.448 \text{ Å}$, 57.927 Å , 58.832 Å , $\text{Mo XIV } 373.647 \text{ Å}$, 423.576 Å , $\text{Mo XIII } 340.909 \text{ Å}$, 352.994 Å); 而且在 27—32 Å 波段范围发现强度较强的 6 条钼的新谱线, 根据附近已知的其他钼谱线初步推断是 Mo XV—Mo XVIII 线. 另外, 确定了 12 条用于物理研究强度较强的分立谱线. 本文为深入研究从边界到芯部的高 Z 杂质输运行为奠定了基础. 下一步计划利用这些已识别的用于杂质输运研究的谱线在 EAST 托卡马克装置运行期间实时监测等离子体中的杂质行为. 同时, 利用空间分辨的 EUV 谱仪^[28,29] 测量出对应电离态的杂质谱线的空间分布, 并通过相应的反演, 最后得出杂质浓度的时空分布; 结合模拟工具根据已获得的杂质浓度的时空演化分布可以计算出杂质粒子输运系数, 根据运输的特点从而寻找出控制芯部杂质聚芯、降低杂质含量的方法. 此外, 这些谱线的观测和识别还可以为天体物理和原子物理领域中元素的精确识别、高 Z 元素原子结构研究提供参考.

参考文献

- [1] Wan B N, Gong X Z, Liang Y, et al. 2022 *Nucl. Fusion* **62** 042010
- [2] Gao X, Zeng L, Wu M Q, Zhang T, Yang Y, Ming T F, Zhu X, Wang Y M, Liu H Q, Zang Q, Li G Q, Huang J, Gong X Z, Li Y Y, Li J G, Wan Y X 2020 *Nucl. Fusion* **60** 102001
- [3] Zhang L, Morita S, Xu Z, et al. 2017 *Nucl. Mater. Energy* **12** 774
- [4] Li J H, Hu J S, Wang X M, Yu Y W, Wu J H, Chen Y, Wang H Y 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 205203 (in Chinese) [李加宏, 胡建生, 王小明, 余耀伟, 吴金华, 陈跃, 王厚银 2012 物理学报 **61** 205203]
- [5] Gong X Z, Garofalo A M, Huang J, et al. 2019 *Nucl. Fusion* **59** 086030
- [6] Zhang L, Wu Z W, Gao W, Huang J, Chen Y J, Gao W, Hu L Q 2013 *J. At. Mol. Phys.* **30** 779 (in Chinese) [张凌, 吴振伟, 高伟, 黄娟, 陈颖杰, 高伟, 胡立群 2013 原子与分子物理学报 **30** 779]
- [7] Asmussen K, Fournier K B, Laming J M, Neu R, Seely J F, Dux R, Engelhardt W, Fuchs J C 1998 *Nucl. Fusion* **38** 967
- [8] Chowdhuri M B, Morita S, Goto M, Nishimura H, Nagai K, Fujioka S 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 023501
- [9] Huang X L, Morita S, Oishi T, Goto M, Dong C F 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 043511
- [10] Beiersdorfer P, Magee E W, Träbert E, Chen H, Lepson J K, Gu M F, Schmidt M 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3723
- [11] Lepson J K, Beiersdorfer P, Clementson J, Gu M F, Bitter M, Roquemore L, Kaita R, Cox P G, Safronova A S 2010 *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **43** 144018
- [12] Cui Z Y, Morita S, Zhou H Y, et al. 2013 *Nucl. Fusion* **53** 093001
- [13] Zhang L, Morita S, Xu Z, et al. 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 123509
- [14] Xu Z, Zhang L, Cheng Y X, et al. 2021 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **1010** 165545
- [15] Li L, Zhang L, Xu Z, et al. 2021 *Plasma Sci. Technol.* **23** 075102
- [16] Chowdhuri M B, Morita S, Goto M, Nishimura H, Nagai K, Fujioka S 2007 *Plasma Fusion Res.* **2** S1060
- [17] Liu Y, Morita S, Oishi T, Goto M, Huang X L 2018 *Plasma Fusion Res.* **13** 3402020
- [18] Schwob J L, Klapisch M, Schweitzer N, Finkenthal M, Breton C, Michelis C D, Mattioli M 1977 *Phys. Lett. A* **62** 85
- [19] Jupén C, Denne-Hinnov B, Martinson I, Curtis L J 2003 *Phys. Scr.* **68** 230
- [20] Yang Y L, Hu Y M, Xiang N 2017 *Acta Phys. Sin.* **24** 245202 (in Chinese) [杨友磊, 胡叶民, 项农 2017 物理学报 **24** 245202]
- [21] Hong B B, Chen S Y, Tang C J, Zhang X J, Hu Y J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 115207 (in Chinese) [洪斌斌, 陈少永, 唐昌建, 张新军, 胡有俊 2012 物理学报 **61** 115207]
- [22] Wan B N, Li J G, Guo H Y, Liang Y F, Xu G S, Wang L, Gong X Z 2015 *Nucl. Fusion* **55** 104015
- [23] Yao L M, Zhang L, Xu Z, Yang X D, Wu C R, Zhang R R, Yang F, Wu Z W, Yao J M, Gong X Z, Hu L Q 2019 *Spectrosc. Spect. Anal.* **39** 2645 (in Chinese) [姚黎明, 张凌, 许棕, 杨秀达, 吴承瑞, 张睿瑞, 杨飞, 吴振伟, 姚建铭, 龚先祖, 胡立群 2019 光谱学与光谱分析 **39** 2645]
- [24] Yang X D, Zhang L, Xu Z, Zhang P F, Chen Y J, Huang J, Wu Z W, Gong X Z, Hu L Q 2018 *Spectrosc. Spect. Anal.* **38** 1262 (in Chinese) [杨秀达, 张凌, 许棕, 张鹏飞, 陈颖杰, 黄娟, 吴振伟, 龚先祖, 胡立群 2018 光谱学与光谱分析 **38** 1262]
- [25] Kramida A, Ralchenko Y, Reader J 2021 NIST Atomic Spectra Database 78 <https://dx.doi.org/10.18434/T4W30F>
- [26] Duan Y M, Hu L Q, Mao S T, Xu P, Chen K Y, Lin S Y, Zhong G Q, Zhang J Z, Zhang L, Wang L 2011 *Plasma Sci. Technol.* **13** 546
- [27] Klapisch M, Schwob J L, Finkenthal M, Fraenkel B S, Egert S, Bar-Shalom A, Breton C, DeMichelis C, Mattioli M 1978 *Phys. Rev. Lett.* **41** 403
- [28] Zhang L, Morita S, Wu Z W, et al. 2019 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* **916** 169
- [29] Cheng Y X, Zhang L, Wu Z W, Xu Z, Yang X D, Li L 2020 *Nucl. Fusion Plasma Phys.* **40** 262 (in Chinese) [程云鑫, 张凌, 吴振伟, 许棕, 杨秀达, 黎縲 2020 核聚变与等离子体物理 **40** 262]

Line identification of extreme ultraviolet spectra of Mo V to Mo XVIII in EAST tokamak*

Zhang Wen-Min¹⁾²⁾ Zhang Ling^{2)†} Cheng Yun-Xin²⁾³⁾ Wang Zheng-Xiong^{1)‡}
Hu Ai-Lan²⁾ Duan Yan-Min²⁾ Zhou Tian-Fu²⁾ Liu Hai-Qing²⁾

¹⁾ (School of Physics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

²⁾ (Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

³⁾ (Science Island Branch of Graduate Suchool, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 24 December 2021; revised manuscript received 29 January 2022)

Abstract

The presence of high- Z impurities in magnetically confined fusion devices has different influences on the confinement property of the plasma due to the high cooling rate of high- Z impurities. The first wall of EAST is equipped with molybdenum tiles, molybdenum particles sputtered from inevitable plasma-wall interaction enter into the plasma and become high- Z impurity. In this paper, four fast-time-response extreme ultraviolet (EUV) spectrometers, a system which is upgraded in the EAST 2021 campaign, are used to monitor the line emission from impurity ions in the 5–500 Å wavelength range simultaneously. The in-situ wavelength calibration is carried out accurately using several well-known emission lines of low- and medium- Z impurity ions. The observed spectral lines are carefully identified based on the National Institute of Standards Technology (NIST) database, previously published experimental data and the time evolution of the normalized line intensity of emission lines from impurity ions. At the lower electron temperature ($T_{e0} = 1.5$ keV), the EUV spectra emitted from molybdenum ions in the range of 5–485 Å are systematically identified in EAST discharges accompanied with spontaneous sputtering events. As a result, two unresolved transition arrays of molybdenum spectra composed of Mo¹⁹⁺-Mo²⁴⁺ (Mo XX-Mo XXV) and Mo¹⁶⁺-Mo²⁰⁺ (Mo XVII-Mo XXX) are observed in the ranges of 15–30 Å and 65–95 Å. In addition, several spectral lines of lower molybdenum ions of Mo⁴⁺-Mo¹⁷⁺ (Mo V-Mo XVIII) in the ranges of 27–60 Å and 120–485 Å are observed and identified on EAST for the first time, including a few strong and isolated forbidden and resonant lines, e.g. Mo XII at 329.414 Å, 336.639 Å and 381.125 Å, Mo XIII at 340.909 Å and 352.994 Å, Mo XIV at 373.647 Å and 423.576 Å, Mo XV at 50.448 Å, 57.927 Å and 58.832 Å. Six spectral lines are newly observed in the range of 27–32 Å, i.e. (27.21 ± 0.01) Å, (27.37 ± 0.01) Å, (28.99 ± 0.01) Å, (30.81 ± 0.01) Å, (31.54 ± 0.01) Å and (31.83 ± 0.01) Å, which may be Mo XV-Mo XVIII spectral lines. As a result, twelve strong and isolated spectral lines are chosen in routine observation for impurity transport physical study. The identification of these spectral lines not only enriches the molybdenum atom database, but also provides a solid experimental data base for magnetically confined devices to study the behavior and transport in core and edge plasmas of high- Z impurity.

Keywords: EAST tokamak, extreme ultraviolet spectra, molybdenum impurity, line identification

PACS: 52.55.Fa, 33.20.Lg, 61.72.sh, 95.30.Ky

DOI: 10.7498/aps.71.20212383

* Project supported by the National MCF Energy R&D Program, China (Grant No. 2022YFE03180400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11925501), and the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2018YFE0311100, 2019YFE030403).

† Corresponding author. E-mail: zhangling@ipp.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zxwang@dlut.edu.cn