

文章编号: 1001-4322(2010)11-2695-04

# 利用可见轫致辐射计算 EAST 有效电荷数\*

查文清, 吴振伟, 高伟, 张凌, 杨建华, 陈颖杰

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 利用弦积分的可见轫致辐射计算了先进实验超导托卡马克(EAST)的有效电荷数。对比分析 EAST 硼化前后的杂质含量, 硼化后有效电荷数减小约 40%, 碳杂质含量减小约 50%。统计分析了 2009 年 EAST 春季实验的有效放电, 显示有效电荷数与碳杂质线辐射量存在很强的线性关系, 得到的拟合系数是 3.4 ~ 5.8, 与等离子体电流和低杂波辅助加热功率都有明确的依赖关系。利用近紫外可见波段全谱对主要杂质的含量进行比较后显示, 碳是最主要的杂质, 大于其它轻杂质含量。同时, 还介绍了新建成的多道轫致辐射诊断系统。

**关键词:** 有效电荷数; 韧致辐射; 杂质; 光谱; 硼化

中图分类号: O532.2; O433.1 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20102211.2695

先进实验超导托卡马克(EAST)是我国自主研制的国际上首个全超导非圆截面托卡马克装置, 是一个开展高参数和稳态等离子体运行物理研究的重要实验平台。全超导、高参数和长脉冲运行条件下硼化和波加热等物理实验中的等离子体的杂质行为研究是 EAST 上主要的研究内容之一。有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  用以描述等离子体总体杂质水平, 影响等离子体的聚变功率、能量辐射损失和能量约束时间, 是托卡马克等离子体中的重要参数。 $Z_{\text{eff}}$  的计算有 3 种方法, 分别来自 3 种不同的诊断结果: 可见轫致辐射、软 X 射线轫致辐射和等离子体电阻率。其中, 通过可见轫致辐射诊断结果计算  $Z_{\text{eff}}$  的方法因相对准确的测量结果和良好的可操作性, 应用最为广泛。 $Z_{\text{eff}}$  常用于硼化<sup>[1]</sup>前后的对比, 分析硼化对杂质的抑制效果, 还可进一步研究分析等离子中主要杂质的线辐射与  $Z_{\text{eff}}$  的关系。本文基于 2009 年 EAST 春季实验, 主要进行这两方面的研究。

## 1 诊断系统

EAST 上, 可见轫致辐射诊断为计算  $Z_{\text{eff}}$  提供关键实验信号数据, 该诊断系统由单道和多道组成, 如图 1 所示。单道轫致辐射的观测弦位于极向水平近中心位置。多道轫致辐射观测 EAST 极向截面上半空间, 设计 8 道, 已经实现了 3 道, 并得到了有效信号, 观测弦距离极向截面中心点 A 的距离依次是 0, 164, 328 mm。轫致辐射系统的每一道由透镜光管、光纤、单色仪、光电倍增管和电导放大器组成。单色仪工作中心波长是 578.0 nm, 波长带宽是 1.0 nm, EAST 上这个波段的线辐射非常少, 可以得到非常纯净的轫致辐射; 光电倍增管为 R960, 额定放大倍数为  $1 \times 10^6$ ; 电导放大器属于低噪声精密放大, 灵敏度为  $2.5 \times 10^7$  V/A, 通频带为 0~50 kHz。计算  $Z_{\text{eff}}$  所需要的电子温度和电子密度分别来自软 X 射线能谱诊断和远红外激光干涉仪诊断。

近紫外可见光谱诊断观测极向近中心垂直弦, 由组合透镜光管、光纤和光谱仪构成。测量波段范围 200~700 nm, 在这个波段可以观测到工作气体和主要轻杂质特征线, 如  $D_{\alpha}$ ,  $D_{\beta}$ ,  $C\text{III}$ ,  $B\text{II}$  和  $O\text{V}$  等; 实际响应时间为 0.5 s, 典型的 EAST 放电时间为 5 s, 因此可得到 10 幅全谱。近紫外可见单色仪诊断(图 1 中 3 所示)对  $C\text{III}$  线

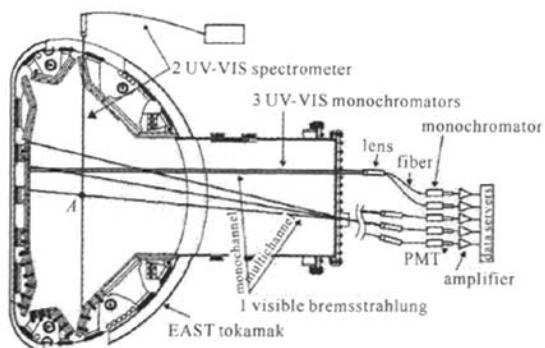


Fig. 1 Diagnostic system of EAST

图 1 EAST 诊断系统

\* 收稿日期: 2010-01-08; 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(10475078)

作者简介: 查文清(1985—), 男, 硕士研究生, 从事光学测量与信号放大器研究; wqzha@ipp.ac.cn。

的单独测量,系统结构与单道可见轫致辐射诊断系统一样,不同的是单色仪的中心波长是 C III 特征线 464.7 nm。

## 2 计算方法

有效电荷数  $Z_{\text{eff}}$  反映等离子体的杂质浓度,定义为<sup>[2]</sup>

$$Z_{\text{eff}} = \sum_i Z_i^2 N_i / \sum_i Z_i N_i, \quad (1)$$

式中:  $Z_i$  是质子数;  $N_i$  是离子数量。理论上,可以通过式(1)统计所有粒子对  $Z_{\text{eff}}$  的贡献,但实际上操作性不强。计算  $Z_{\text{eff}}$  最常用的方法是通过测量可见轫致辐射强度来求得,其原理是<sup>[3]</sup>

$$Z_{\text{eff}} = \frac{\lambda^2 (k T_e)^{1/2}}{1.9 \times 10^{-34} g n_e^2} \int P(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

式中:  $P(\lambda)$  是单位体积等离子体中所有电子在波长  $\lambda$  的单位波长间隔内发出的所有轫致辐射功率;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T_e$  为电子温度;  $n_e$  是电子密度;  $g$  是冈特因子,在 EAST 上经计算得到  $g=4.0$ 。如果等离子体中碳是最主要的杂质,并以 C III 线强度表示碳杂质含量,可以得到  $I_{\text{CIII}}$  与  $Z_{\text{eff}}$  的关系<sup>[4]</sup>

$$Z_{\text{eff}} = 1 + f [I_{\text{CIII}} / n_e^2] \quad (3)$$

式中:  $f$  是待定的系数,由线性回归分析的结果确定;  $I_{\text{CIII}}$  是 C III 线辐射强度;  $I_{\text{CIII}} / n_e^2$  表示  $I_{\text{CIII}}$  对电子密度的平方的归一化。

## 3 实验结果和分析

### 3.1 杂质的线辐射

杂质的线辐射不仅可以定性给出杂质的总体含量,还清晰显示出杂质的种类,如图 2 所示。图 2(a)是硼化前的一次放电的光谱图,由近紫外可见光谱仪测得,图中  $D_{\alpha}$  和  $D_{\beta}$  是等离子体主粒子 D 原子发出的线辐射, C II 线, C III 线, B II 线和 OV 线(该线很弱,图中没有标出)都是杂质粒子产生的线辐射。可以看出,在可见光谱段 C 的辐射最强,是主要杂质,其次是 B 杂质,O 杂质的含量非常小。图 2(b)与图 2(a)的对比得到,硼化后 C III 线和 C II 线相对强度都减小为原来的 1/4 左右,说明碳杂质含量大大减小,硼化后 B II 线增强,与预期的结果一致,因为硼化用的镀膜材料中含有 B 元素。对光谱全谱图的对比分析可以定性地判定出硼化对杂质的有效抑制作用。

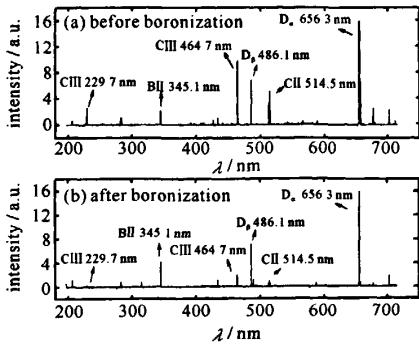


Fig. 2 UV-VIS spectrum before and after boronization

图 2 硼化前和硼化后近紫外可见光谱图

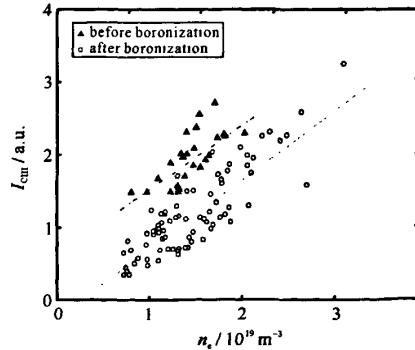


Fig. 3  $I_{\text{CIII}}$  as a function of  $n_e$  before and after boronization

图 3 硼化前后 C III 线辐射强度与中心道弦平均电子密度的关系

分析可知,碳是 EAST 等离子体中的最主要的杂质,是  $Z_{\text{eff}}$  增加的主要贡献者,所以对碳杂质单独监测。图 3 显示了硼化前后 EAST 等离子体中碳杂质含量和密度的关系。统计数据都来自等离子体电流  $I_p=240\sim 260$  kA,没有低杂波辅助加热和限制器下的有效放电炮。从图 3 中可以发现,碳杂质含量具有随着电子密度增加而增加的趋势,硼化前后都有这个特点,只是拟合直线的斜率略有不同,这是因为随着电子密度增加,等离子体与 EAST 第 1 壁作用加强而从第 1 壁上溅射出更多的碳杂质。硼化后碳杂质相对含量从平均 2 左右下降到 1 左右,减少约 50%,这是因为硼化给第 1 壁表面镀上了一层膜,减少了等离子体与内壁石墨材料的直接接触。

### 3.2 有效电荷数

图 4 统计了硼化前后  $Z_{\text{eff}}$  分别与中心道弦平均电子密度和低杂波功率( $P_{\text{low}}$ )的关系。图 4(a)统计的是  $I_{\text{p}} = 240 \sim 260 \text{ kA}$  和限制器下的欧姆放电, 可见硼化后  $Z_{\text{eff}}$  变小, 当  $n_{\text{e}} = (0.5 \sim 1.5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  时,  $Z_{\text{eff}}$  由 4~8 减小到 2.5~4.5, 平均减小约 40%; 当  $n_{\text{e}} = (1.5 \sim 2.5) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  时,  $Z_{\text{eff}}$  由 2~4 减小到 1.5~2.5, 平均减小约 25%。图 4(a)还表明, 硼化前后  $Z_{\text{eff}}$  都随着  $n_{\text{e}}$  增加而变小, 这是因为等离子体密度增加, 杂质被稀释了。其实等离子密度增加会增生杂质, 增生杂质和稀释杂质这两种效应相互竞争, 后者占主导作用。

图 4(b)反映硼化前后杂质含量与低杂波辅助加热功率的关系,  $Z_{\text{eff}} n_{\text{e}}$  表示杂质总含量, 相当于  $Z_{\text{eff}}$  对电子密度进行了归一化。图 4(b)显示了硼化后杂质含量降低, 从硼化前的 4~6 减小到硼化后的 2~4, 普遍下降了 2 左右, 证明硼化对 EAST 上杂质的抑制效果非常好。图 4(b)还反映了杂质总含量随着低杂波功率的增加而增加, 硼化前后都具有这个规律。

### 3.3 $Z_{\text{eff}}$ 与杂质线辐射的关系

EAST 上欧姆放电和低杂波辅助加热放电中, 都发现了  $Z_{\text{eff}}$  与杂质线辐射强度存在同增同减的关系<sup>[6]</sup>。因为碳是最主要的杂质, 464.7 nm 的 CIII 线是碳杂质在近紫外可见段辐射最强的一条线, 它与计算  $Z_{\text{eff}}$  所用的单道轫致辐射采用的是同一观测弦, 所以选取 464.7 nm 的 CIII 线作为分析对象, 具有较高的可信度。首先, 由式(3)得拟合系数  $f$ , 数据来自 EAST 2009 春季实验的数据库, 然后统计了约 3 000 次优质有效放电, 它们分布于  $(0.5 \sim 3.0) \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  的电子密度和 0~800 kW 的低杂波功率, 计算这些放电等离子电流的平台区中最佳时刻的  $Z_{\text{eff}}$  和  $I_{\text{CIII}}$ 。

图 5 显示了 2 个电流平台下对等离子体密度平方归一化后的 CIII 线辐射分别与同样归一化的轫致辐射的相关性和与  $Z_{\text{eff}}$  的相关性, 2 个图中都发现了非常好的相关性。图 5(a)还显示,  $I_{\text{p}} = 300 \text{ kA}$  与  $I_{\text{p}} = 250 \text{ kA}$  平台下的线性关系斜率是不同的, 说明拟合系数对等离子体电流  $I_{\text{p}}$  有依赖关系。在图 5(b)中更为明显, 显然是  $Z_{\text{eff}}$  中引入的电子温度的原因。线性回归分析的残差非常小, 定量证实了  $Z_{\text{eff}}$  和  $I_{\text{CIII}}$  存在很好的线性关系。

线性回归分析所得到的拟合系数  $f$  如图 6 所示。可以发现,  $f$  随着  $I_{\text{p}}$  的增加而减小, 随着  $P_{\text{low}}$  的增加而增大, 即  $I_{\text{p}}$  与  $P_{\text{low}}$  对极向截面电子温度剖面的改变是相反的<sup>[7]</sup>。纯欧姆驱动下等离子体电流  $I_{\text{p}}$  增加时, 由于趋肤效应, 等离子体电流离心扩散, 形成比较宽的电流剖面, 继而产生较宽的电子温度剖面, 等离子体边缘区温

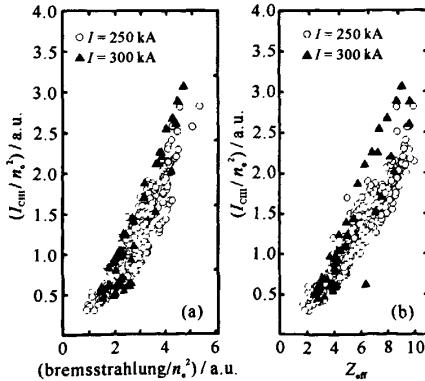


Fig. 5 关系线辐射与轫致辐射和  $Z_{\text{eff}}$  的关系

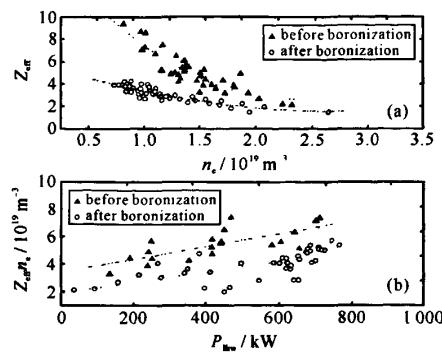


Fig. 4  $Z_{\text{eff}}$  与中心道弦平均密度和低杂波辅助加热功率的关系

图 4 硼化前后  $Z_{\text{eff}}$  与中心道弦平均密度

和低杂波辅助加热功率的关系

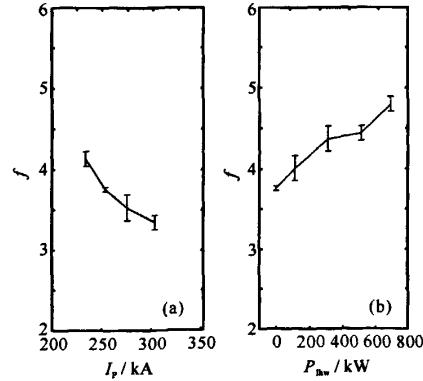


Fig. 6 拟合系数与等离子体电流和低杂波辅助加热功率的关系

度升高。这一区域正是 C<sub>III</sub> 线辐射区域, 所以 C<sub>III</sub> 离子增加较多, 而碳的高价态离子增加有限(碳的高价态离子需要较高的温度, 所以产生在等离子体近中心区), 所以 C<sub>III</sub> 离子占 C 离子的比重增加, 即 C<sub>III</sub> 对  $Z_{\text{eff}}$  的贡献增加, 所以系数  $f$  减小。低杂波辅助加热可以作用到等离子体芯部, 形成比较窄的电流剖面和电子温度剖面, 中心温度高产生较多的 C 高价态离子, 边缘温度低 C<sub>III</sub> 离子增加有限, 所以  $P_{\text{low}}$  增加时, C<sub>III</sub> 离子比重减小, 即对  $Z_{\text{eff}}$  贡献减小, 所以  $f$  增加。

### 3.4 多道轫致辐射

一个典型 EAST 的放电炮在 2~10 s 平台区, 低杂波功率  $P_{\text{low}}=750 \text{ kW}$ ,  $I_p=250 \text{ kA}$ ,  $n_e=1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 单道轫致辐射信号  $V_b=1.88 \text{ V}$ , 多道轫致辐射信号  $V_{b1}=0.26 \text{ V}$ ,  $V_{b2}=0.76 \text{ V}$ ,  $V_{b3}=0.33 \text{ V}$ , 如图 7 所示。轫致辐射是弦积分量, 同等条件下弦长越长信号越强, 相对标定后从  $V_{b1}$  到  $V_{b2}$  再到  $V_{b3}$  信号依次变弱与它们的光路弦长依次变小相吻合。 $V_{bN}$  ( $N=1, 2, 3$ ) 信号绝对标定后就可以计算得到每一道的  $Z_{\text{eff}}(t)$  值; 8 道可见轫致辐射全部建成后, 更可以得到随时  $Z_{\text{eff}}(r, t)$ ,  $r$  是极向截面上任意一点离中心的距离,  $t$  是时间。

## 4 结 论

EAST 上, 近紫外可见全谱显示了等离子体中各种杂质的含量, 比较实验数据, 显示碳的含量最大, 是 EAST 上的最主要的杂质。利用单道轫致辐射诊断结果, 计算出近中心区域的弦平均  $Z_{\text{eff}}$ , 对比硼化前后各种相同条件下  $Z_{\text{eff}}$  的大小, 清晰地显示了硼化后  $Z_{\text{eff}}$  平均减小 40%, 说明杂质得到有效抑制。对 2009 春季 EAST 实验所有放电进行统计分析, 显示  $Z_{\text{eff}}$  与碳杂质的线辐射大小之间存在很强的线性关系, 线性回归分析得到的拟合系数随等离子体电流增加而减小, 随低杂波辅助加热功率增加而增大。

## 参 考 文 献:

- [1] Wan Baonian, Zhao YanPin, Li Jiangang, et al. Enhanced plasma performance by ICRF boronization[J]. *Plasma Science and Technology*, 2002, 4(4):1375-1382.
- [2] John W. Tokamaks[M]. Oxford: Oxford University Press, 1996:229-231.
- [3] Wu Zhenwei, Li Jiangang, Wan Baonian, et al. Reduced effective ionic charge and enhanced plasma performance in the HT-7 tokamak[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 363-365:1380-1385.
- [4] Schunke B, DeMichelis C, Guirlet R, et al. Consistency check of  $Z_{\text{eff}}$  measurements in ergodic divertor plasmas on Tore Supra[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2001, 290-293:715-719.
- [5] Karlsson, Andreas. Introduction to linear regression analysis[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 2007, 170(3):856-857.
- [6] 徐伟, 万宝年. HT6-M 杂质通量与杂质循环[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(3):417-419. (Xu Wei, Wan Baonian. Impurity influx and recycling in HT6-M tokamak. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3):417-419)
- [7] Meister H, Giroud C, Zaniol B.  $Z_{\text{eff}}$  from spectroscopic bremsstrahlung measurements at ASDEX upgrade and JET[J]. *Rev Sci Instrum*, 2004, 75(10):4097-4100.

## Effective ionic charge from visible bremsstrahlung measurements on EAST

Zha Wenqing, Wu Zhenwei, Gao Wei, Zhang Ling, Yang Jianhua, Chen Yingjie  
(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1126, Hefei 230031, China)

**Abstract:** On EAST, effective ionic charge was routinely computed from line integrated measurements of visible bremsstrahlung. Comparison between the value of effective ionic charge before and after boronization shows that the amount of impurities decreases a lot after boronization. Analysis on a large database of EAST experimental campaign 2009 shows strong linear relationship between effective ionic charge and line radiation of carbon, and the fitting factor varies from 3.4 to 5.8, depending on both plasma current and auxiliary power. The amount of main impurities were compared with each other through UV-VIS spectrum, and the result shows that carbon contributes the most to effective ionic charge than any other light impurities.

**Key words:** effective ionic charge; bremsstrahlung; impurity; spectrum; boronization

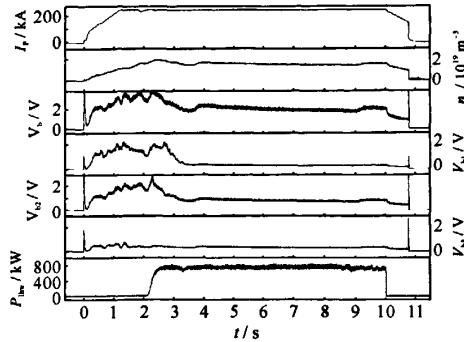


Fig. 7 Typical discharge waveform with auxiliary heating

图 7 EAST 上典型的带低杂波辅助加热的放电波形