

225-228

第11卷 第2期
1999年4月强激光与粒子束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMSVol. 11, No. 2
Apr., 1999

文章编号: 1001-4322(1999)02-0225-04

HT-6M 托卡马克电荷交换复合辐射的测量

徐伟¹ 万宝年²

(1. 广州师范学院物理系, 广州 510400)

(2. 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 1126信箱, 230031)

TL631.24

摘要: 利用光学多道分析仪和单道近紫外系统分别测量了 HT-6M 托卡马克 C VI (207.1nm) 谱线线形分布和时间行为。通过对 C VI 谱线线形和时间行为的分析表明 C VI 谱线来源于电荷交换复合辐射。

关键词: 线形分布; 时间行为; 电荷交换复合

中图分类号: TL631.24

文献标识: A

托卡马克 辐射谱线

在托卡马克等离子体中,对杂质的研究一直是一个十分重要的课题。这一方面是因为杂质对等离子体的危害极大,另一方面通过对杂质辐射光谱进行分析又得出许多等离子体参数。对于完全剥离的杂质离子的测量,一般采用中性束注入,通过高电离态杂质离子与中性粒子电荷交换复合辐射,测量出离子密度^[1]、温度^[2]和旋转速度^[3]等等离子体重要参数,对这方面的研究近年来越来越为人们所重视。HT-6M 托卡马克由于装置参数决定,本身就存在很强的电荷交换复合辐射。

1 实验装置

本文用到的测量仪器有光学多道分析仪(OSMA),多道可见光谱探测系统,单道近紫外系统和多道 H_α 测量系统。光学多道分析仪配备三块光栅,实验中采用的是 3600g/mm 光栅,对应的探头谱分辨率为 0.0057nm/像素。光信号直接通过石英透镜耦合到 0.75m 单色仪的入射缝上。光学多道分析仪在本文中用来测量 C VI 谱线的线形分布,详细介绍可参考文献[4]。多道可见光谱探测系统分光元件为 1m 单色仪,光信号通过探头和光纤束耦合到单色仪的入射缝上,探测器为 RCA7265 型光电倍增管。单道近紫外系统分光元件是凹面光栅单色仪,探测波长范围是 200~800nm,光信号直接通过石英透镜耦合到入射缝上,探测器是小型的 EMI 光电倍增管。多道 H_α 测量系统分光元件是干涉滤光片,探测器是 GDB 型光电倍增管。这三套系统具有较好的时间响应,在本文中分别用来探测 C III, C VI 和 H_α 随时间的变化。

2 C VI 谱线线型分析结果

图(1)中左图是 C VI 双线(206.956nm 和 207.086nm)的强度随波长(像素)分布,它们的波长相差 0.134nm,与理论值 0.13nm 相符,而且谱线非常强,因此它们不是 O VI 双线(206.95nm 和 2070.29nm,波长相差 0.037nm),也不是较弱的 N II (207.109nm)。HT-6M 中心电子温度在 400~600eV 之间,金属谱线都非常弱,因此不是 Mn II (206.902nm)和 W II (207.121nm)。

• 联合国实验室资助课题
1998年10月12日收到原稿,1999年1月12日收到修改稿。
徐伟,1964年7月出生,博士,副教授

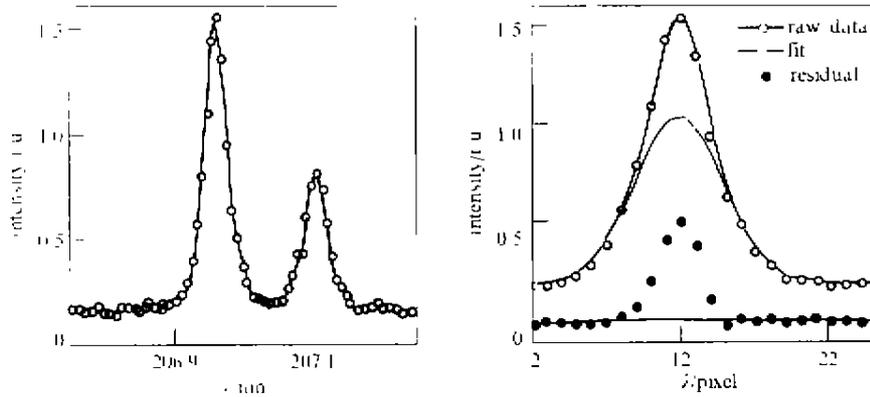


Fig. 1 The distribution of C VI (207.1 nm) line wavelength (left) and the result of chosen-point fitting (right)

图 1 C VI 207.1 nm 谱线的波长分布和选点拟合结果

这里采用选点拟合处理 C VI 谱线的线形分布,这种处理方法的基本思路是对于沿不同弦测量的线平均的谱线强度分布,通过自身环带的那部分弦在积分中具有较大的权重,将构成谱线分布的两翼,而外面的环带由于温度较低,对谱线分布的上贡献主要是峰部,因此我们可以通过选取一些点参与运算,舍弃一些点不参与运算,以提高弦积分自身环带部分的权重。处理上就是从谱线的峰部开始,有序地去点,每去掉一个点用高斯分布拟合一次,当弃到一定的点数,谱线的半高全宽、谱线的中心波长和强度基本不变,那么可以认为此时得出的离子温度就是该环带对应的等离子体离子温度。图(1)中右图是选点拟合结果。当去掉 6~7 个点时,高斯分布的三个参数就基本维持不变,这时中心弦对应的离子温度仅为 70eV 左右,表明辐射粒子靠近等离子体边界,这一结果与杂质运输给出的 C⁺⁵ 离子的径向分布不相符^[5],因此 C VI 辐射可能来源于完全电离得到的碳 C⁺⁵ 离子与氢原子 H⁰ 发生的电荷交换复合过程



从运输结果可知^[5],C⁺⁶ 离子是 HT-6M 托卡马克碳杂质的主要成份,它的径向分布类似于电子密度分布,总的粒子数占绝对优势。而中性氢原子的径向分布也并非象想象的那样局限于边界附近,特别是限制器前大约有 60% 的氢来源于反射粒子,其入射速度为 $3 \times 10^6 \text{ m/s}$ ^[4],因而自由程大于等离子体小半径,足够穿透到等离子体中心,为高电离态的杂质离子的电荷交换复合提供了可能。

C VI (207.1 nm) 是类氢 C⁺⁵ 离子中的一个电子由 $n=6$ 跃迁到 $n=5$ 时的辐射谱线,对于电子直接的碰撞激发系数很小,而 C⁺⁶ 离子与氢原子的电荷交换复合截面却较大。

当氢原子能量为 10eV 时,文献[6]给出(1)式电荷交换复合截面在 10^{-11} cm^2 ,电荷交换复合的速率 $\langle \sigma v \rangle$ 在 $10^{-11} \sim 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$ 之间,下面取 $\langle \sigma v \rangle = 0.5 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$,忽略 $\langle \sigma v \rangle$ 在等离子体中的变化,那么电荷交换复合后产生 C⁺⁵ 离子的径向分布为

$$n_{\text{C}^{+5}}(r) = n_{\text{C}^{+6}}(r)n_{\text{H}^0}(r)\langle \sigma v \rangle \quad (2)$$

式中: $n_{\text{C}^{+6}}(r)$, $n_{\text{H}^0}(r)$ 分别为 C⁺⁶ 离子和氢原子 H⁰ 密度。图(2)给出了计算出的由电荷交换复合产生的碳五价离子 $n_{\text{C}^{+5}}(r)$ 的径向分布。其中 C⁺⁵、C⁺⁶ 离子的径向分布取自杂质运输结果^[5]。中性氢原子的径向分布取自 H₀ 线型分析结果^[4]。从图中可以看出 C⁺⁵ 离子的径向分布的峰值

靠近等离子体边界,峰值在 10^{17} 量级,比由电子碰撞电离产生的 C^{+5} 径向分布的峰值高一个量级以上,因此在 HT-6M 托卡马克上 C VI (207.1nm) 主要来源于发生电荷交换复合后粒子的辐射,这就能很好地解释为什么由 C VI 谱线的半高全宽得出的离子温度仅有 70eV。

3 C VI 谱线的时间行为

为了证实上面的结论,在 HT-6M 托卡马克上利用单道近紫外系统测量了 C VI 谱线的时间行为,电子碰撞电离和碰撞激发产生的 C VI (207.1nm) 谱线与电荷交换复合产生的 C VI (207.1nm) 的行为应该不完全相同,因为后者依赖于中性氢的流量。

图(3)给出了等离子体环电流 I_p , 电子密度 n_e , H α 辐射信号, C II (464.7nm) 辐射信号, C VI (207.1nm) 辐射信号, C VI (207.1nm) 与 H α 辐射信号的比值 $I_{C VI}/I_{H\alpha}$ 随时间的变化。比较 C II 和 C VI 的辐射信号,可以看出,它们在电流平顶段变化趋势基本相同,这是补充充气实验,随电子密度增加,它们的辐射信号也逐渐增大,但在放电初期, C VI 的辐射信号十分反常,一般而言,电离态越高,放电初期的电离峰越不明显,而 C VI 207.1nm 谱线在放电初期的“电离峰”比 C II 强许多。在放电将结束时, C VI 的辐射信号增加的幅度明显大于 C II。从 H α 辐射信号可以看出,放电初期 H α 辐射信号存在很强的电离峰,放电结束前大幅度增加,电流平顶段则基本维持不变。因此放电初期 C VI 辐射信号上较强的“电离峰”实际上是由于中性氢的流量

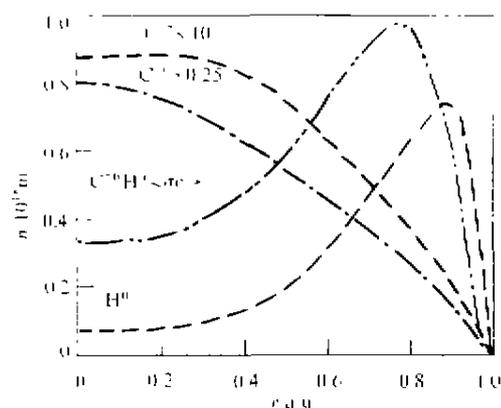


Fig. 2 Radial profile of C^{+5} ion calculated

图2 计算出的 C^{+5} 离子的径向分布

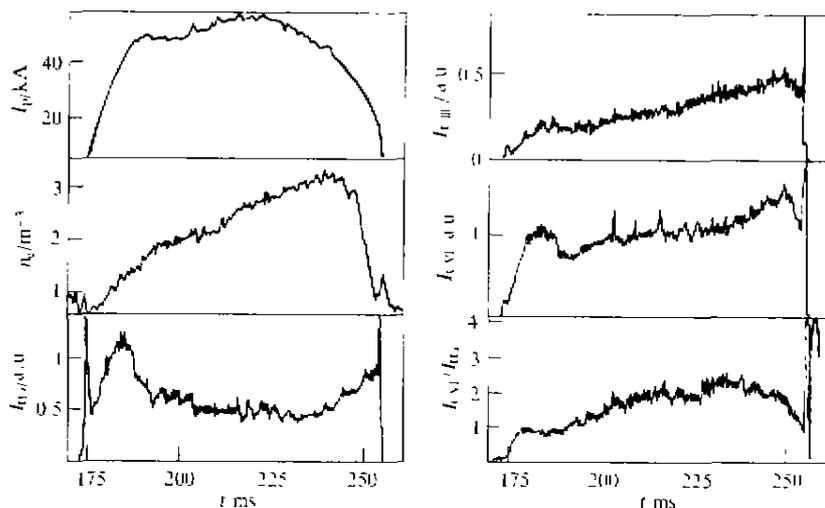


Fig. 3 The evolution of C VI (207.1nm) and related signal with the time

图3 C VI 207.1nm 和相关信号随时间的变化

增加(H α 辐射信号强度正比于氢原子的人射流量),电荷交换复合加剧造成的,并非真正的电离峰。放电后期 C VI 的增加也是如此。在放电处于电流平顶端,由于中性氢的流量基本保持不

变, CⅥ的行为取决于碳本身的人射通量,因而这时 CⅥ行为与 CⅡ类似。图中 CⅥ的辐射信号与 H α 辐射信号强度之比随时间变化就类似 CⅡ的变化趋势。因而更进一步证明了 CⅥ(207.1nm)谱线来源于电荷交换复合辐射。

4 总 结

通过上面的分析可知 HT-6M 托卡马克中 CⅥ(207.1nm)谱线主要是电荷交换复合辐射,这不仅为测量完全剥离的 C⁵⁺离子的径向分布提供了可能,同时也对杂质输运中测量谱线的选取有了新的要求。对于象 HT-6M 托卡马克这样中性氢在等离子体中有较大穿透深度的装置,不能选用类氢离子发射谱线进行输运分析,因为这类谱线电荷交换复合辐射占主导地位,因此不能用电子碰撞激发辐射进行模拟。

致谢 中国科学院等离子体物理研究所六室的方自深、毛剑珊和李建刚研究员在实验中给予了帮助。

参 考 文 献

- 1 Fonock R J, et al. *Phys Rev Lett*, 1982, **49**:737
- 2 Isler R C, Murray L E. *Appl Lett*, 1983, **42**:355
- 3 Fonock R J, et al. *Appl Phys Lett*, 1983, **42**:239
- 4 徐 伟, 万宝年等. H α 谱线线型分析. *物理学报*, 1997, **46**(7):1360
- 5 徐 伟. HT-6M 光谱分析[博士论文]. 中国科学院等离子体物理研究所, 1997
- 6 Belkic D, et al. *At Data Tables*, 1992, **51**:59

MEASUREMENT ON THE EMISSION OF CHARGE EXCHANGE RECOMBINATION IN HT-6M TOKAMAK

XU Wei¹, WAN Bao-nian²

¹ Department of Physics, Guang Zhou Normal University, P. O. Box 1126 Guangzhou 510400 China

² Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei 230031 China

ABSTRACT: The distribution of CⅥ line(at 207.1nm) and the time behavior has been measured with Optical Spectroscopy Multichannel Analyzer and single channel near ultra-violet system in HT-6M Tokamak. The result of the analysis of line shape and the time behavior show that CⅥ line(at 207.1nm) stemmed from the emission of charge exchange recombination processes.

KEY WORDS: the distribution of line shape; time behavior; charge exchange recombination