

文章编号: 1001-4322(2004)08-1017-04

振镜法测量等离子体离子温度*

徐 伟¹, 万宝年²

(1. 广州大学 物理系, 广东 广州 510405; 2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 离子温度是托卡马克等离子体一个重要参数, 介绍了一套振镜扫描装置, 该装置主要由 0.5m 单色仪和安装在出射狭缝前的振动的石英镜片组成, 时间分辨率小于 10ms, 系统测量误差小于 20eV。测量了 HT-6M 托卡马克 CV(227.1nm) 谱线的线形, 并由谱线的多普勒展宽得出欧姆加热和离子回旋共振加热(ICRH)下的离子温度, 结果表明 ICRH 期间离子温度由 200eV 升高到 300eV。这套装置广泛应用在中小型托卡马克上。

关键词: 振镜扫描; 离子温度; 离子回旋共振加热

中图分类号: O536; TL651 **文献标识码:** A

托卡马克等离子体中离子温度是表征等离子体特性的重要参数之一, 对于研究能量输运、能量平衡、杂质输运、加热机制以及从低约束模式到高约束(LH)转化都是必不可少的。利用杂质谱线的多普勒展宽测量等离子体离子温度是一种常规的诊断手段, 最常用的是具有高分辨率的多道光学分析仪(OSMA), 这样的系统空间和谱分辨率高, 但价格昂贵, 数据也应采取特殊的处理才能得出局部的信息^[1]。最大不足之处是时间分辨率低(时间分辨率大于 40ms), 因此对于放电时间较短的中小型托卡马克, 若要求时间分辨, OSMA 系统便失去意义。振镜快速扫描系统建立的目的, 就是弥补 OSMA 系统的不足, 主要测量离子温度随时间的变化。

1 实验仪器

系统的分光元件是 0.5m 的 Czerny-Turner 单色仪, 测量范围 200~500nm, 探测器为光电倍增管, 光电倍增管输出信号经放大后由计算机采集, 控制器触发信号由放电装置提供, 振动镜的位置输出信号也由计算机采集。整个系统和光路如图 1 所示。等离子体发出的光, 经过单色仪分光, 应是单色光, 在出射缝前, 通过振动的石英片扫描, 因此输出信号的光强变化轮廓就是谱线的线型。振镜扫描控制器控制石英玻璃片的振动, 振动频率在 150~330Hz 之间, 因此时间分辨率小于 10ms。振镜的初始位置和振动幅度, 由控制器的偏压决定, 是可调整的, 振镜的位置信号由位置传感器给出。

对于石英玻璃, 当光线通过时光线的波长变化为

$$= dk \sin \left(1 - \frac{\cos}{\sqrt{n^2 - \sin^2}} \right) \quad (1)$$

式中: d 为石英玻璃片的厚度; k 是单色仪的线色散; n 是玻璃的折射率; 是振镜偏置角; d, k 都是常量, 因此 仅是 的函数。

图 2 是由(1)式计算的 随 的变化关系, 从图 2(a)中可以看出, 在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 和 $65^\circ \sim 90^\circ$ 的范围内, 与 有很好的线性关系。实际上振镜偏置角 的变化范围不大于 10° , 从图 2(b)可以看出 与 几乎严格成正比, 又由于 与扫描电压成正比, 所以

正比于扫描电压 V_s , 只要用已知的低温光源谱线标定出比例系数, 就可以测量未知谱线的 。由半高全宽即可得出离子温度^[2]。

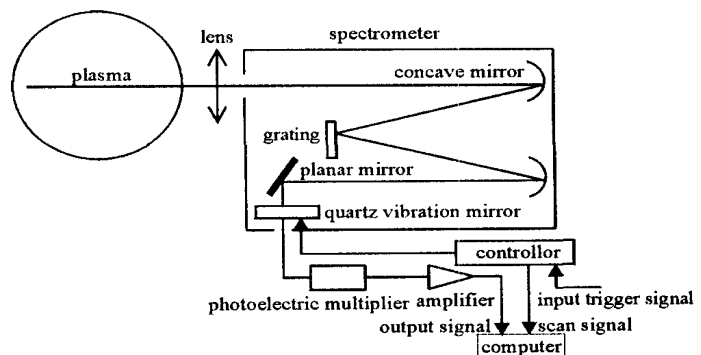


Fig. 1 Experimental equipment

图 1 实验装置

* 收稿日期: 2002-11-17; 修订日期: 2004-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助课题(19975013, 10275014)

作者简介: 徐 伟(1964-), 男, 博士, 副教授, 江西九江人; 研究方向为等离子体物理, 高温等离子体诊断和光谱分析; E-mail: Gnuxuwei@163.net.

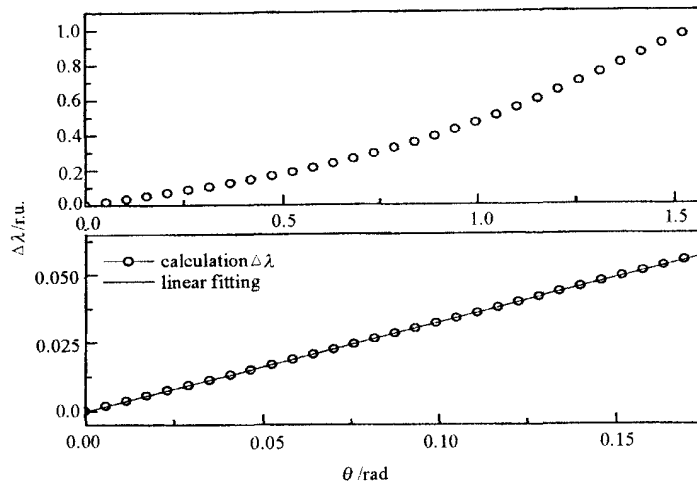


Fig. 2 Relation between $\Delta\lambda$ and θ
图 2 $\Delta\lambda$ 与 θ 的关系

从(1)式可以看出,石英玻璃片的厚度正比于 $\Delta\lambda$,因此适当增加石英玻璃片的厚度,可以提高谱分辨率,但太厚的石英玻璃片容易产生连续转动的现象。本仪器石英玻璃片厚度为 4mm,扫描范围 0.26 ~ 0.5nm。

常温下,汞灯 253.6nm 谱线展宽小于 0.01nm,可以忽略。因此改变单色仪的波长,扫描出的谱线的峰值对应不同的电压,从而得出 V_s 与 $\Delta\lambda$ 之间的比例系数。图 3 分别为扫描上升和下降段电压 V_s 和波长变化的关系,从图中可以看出 V_s 和 $\Delta\lambda$ 有良好的线性关系,拟合结果分别为

上升阶段
$$V_s/V = - 1.18 \Delta\lambda/\text{nm} + 6.30 \tag{2}$$

下降阶段
$$V_s/V = - 1.23 \Delta\lambda/\text{nm} + 6.55 \tag{3}$$

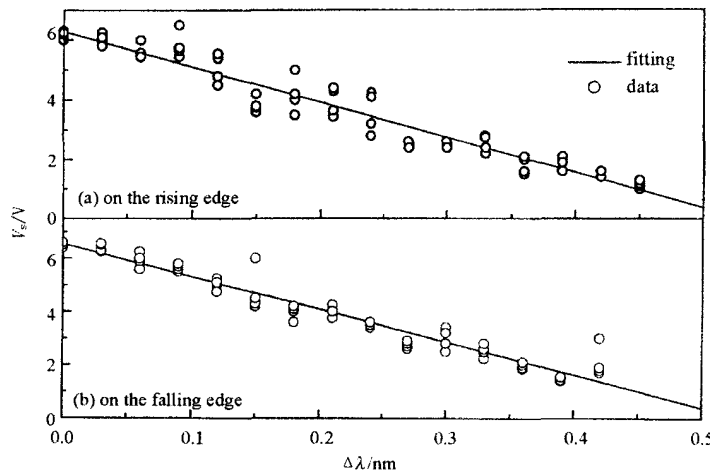


Fig. 3 Instrumental calibration
图 3 仪器的标定

2 探测谱线的选取

托卡马克等离子体杂质谱线各电离态呈壳层分布,低电离态的杂质离子分布较窄、峰值靠近边界,因此其辐射离子的温度仅反映边界的离子温度,利用杂质谱线的展宽测量离子温度一定要选取合适的谱线。图 4 是利用杂质输运程序计算出的碳、氧杂质各电离态的分布^[3]。纵坐标为杂质密度,横坐标为 r/a ,式中 a 为真空室小半径, r 为等离子体中心距离。

O^{+6} , O^{+7} 和 O^{+8} 的电离电位分别是 138, 739 和 871eV,氧很容易电离成 O^{+6} ,而进一步电离成 O^{+7} 和 O^{+8} 则只有依靠电子温度分布的高能部分。因此 O^{+6} 保留的浓度最大,但 OVII 在近紫外-可见区无辐射线。从 O^{+1} 到 O^{+5} 电离电位分别为 14, 35, 55, 77 和 113eV,电离电位都较低,电离的几率基本相同,浓度分配也基本相同,离子分布较窄、峰值太靠近边界,因此尽管 OV278.1nm 也是近紫外区强线,但分布靠近边界,难以从中

得出等离子体中心离子温度。

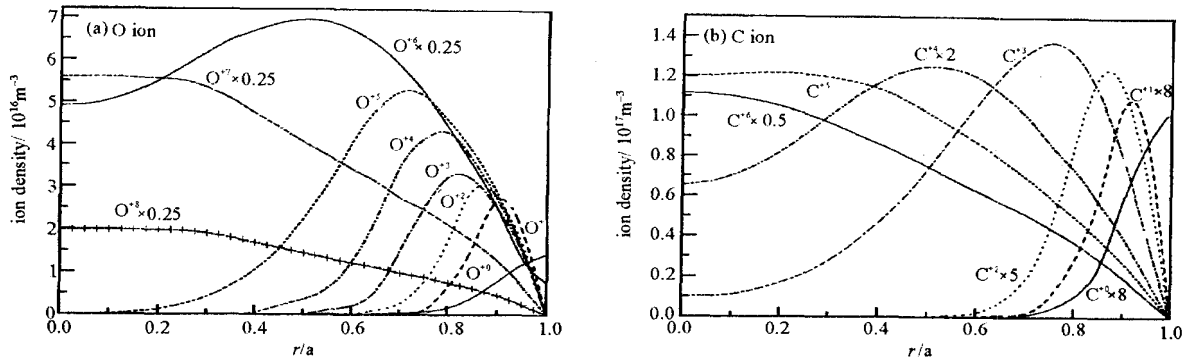


Fig. 4 Profile of carbon and oxygen ionization states
图 4 碳氧各电离态分布

对于碳杂质,峰值最大和分布最宽的是完全剥离 C^{+6} 离子,其峰值约是 C^{+5} 和 C^{+3} 峰值的 2 倍, C^{+4} 的 4 倍, C^{+2} 的 10 倍, C^{+1} 和 C^0 的 16 倍。可见 HT-6M 托卡马克中碳杂质的主要成份是完全剥离的 C^{+6} 离子,这主要是因为 C^{+6} 离子的电离电位是 489.98eV,小于 HT-6M 等离子体中心电子温度 (650eV 左右),因此较容易完全剥离,也正是由于 C^{+6} 离子丰度高,产生较强的电荷交换符合辐射^[4,5],因此强线 CVI207.1nm 谱线不能选。 C^{+4} 离子分布宽广,从边界覆盖到等离子体中心,峰值在 $r/a=0.45$ 处,但光强较弱。CV227.1nm 是一条非常强的线,周围也无其它强线,因此是首选谱线。

通过上面分析也能得出,碳氧完全剥离电离电位小于 900eV,当电子温度大于 900eV 时,近紫外可见谱线将主要分布于等离子体边界,通过谱线的多谱勒展宽很难得出等离子体中心离子温度。因此该仪器测量离子温度范围是在 20 ~ 350eV 之间(托卡马克等离子体中心电子温度比离子温度高 2 ~ 3 倍)。

3 ICRH 实验测量结果

自从 1974 年 ST 托卡马克上首次进行离子回旋共振加热 (ICRH) 实验以来,ICRH 已经成为最成功的等离子体辅助加热手段之一,并取得了令人满意的实验结果^[6]。HT-6M 托卡马克进行了纯氢等离子体的二次谐波实验,观察到明显的加热效果,等离子体离子和电子温度都明显升高^[7]。

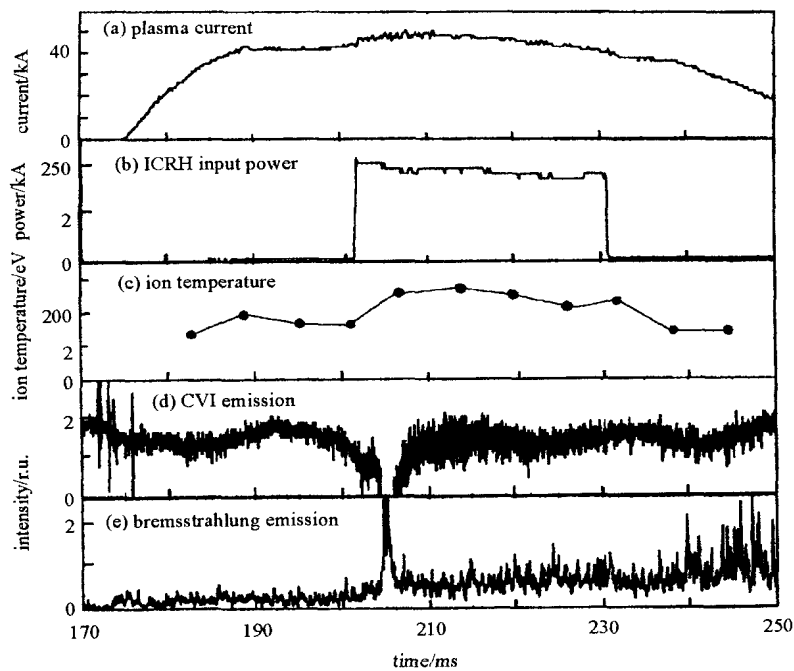


Fig. 5 Variation of correlative signal with discharge time
图 5 相关信号随放电时间的变化

图 5 是环电流 I_p 、ICRH 加热功率、振镜测出的离子温度、CVI 谱线和韧致辐射信号随放电时间的变化。其它放电参数:纵场为 1 T,中心道弦平均电子密度为 $1.0 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 。从图中可以看出当 250kW 的 ICRH 投入后,等离子体环电流(I_p)稍增大,韧致辐射信号(有效电荷数)基本保持不变,碳杂质辐射信号(CVI)基本维持不变,表明杂质得到了很好的控制^[7,8]。ICRH 加热明显,中心道离子温度(T_i)大约上升 100eV,这一结果与中性粒子能谱探测结果基本相同。当然当杂质控制不好时,随 ICRH 投入,杂质辐射增大,韧致辐射增加(有效电荷数增大),等离子体总辐射增加,则离子加热效果就不明显,这种情况比较常见。

4 结 论

快速振镜扫描法测量等离子体离子温度,时间分辨率好,因此适用于测量等离子体离子温度相对变化,尤其用于探测各类加热手段的效果。但对于绝对测量,一方面,实际测量的是弦平均的离子温度,得出的中心离子温度比实际温度偏低;另一方面,用汞灯标定时,忽略了谱线的展宽和仪器的带宽,也会给测量结果带来误差。HT-6M 典型参数下测量谱线的 $\Delta\lambda = 0.07 \text{nm}$,单色仪的分辨率为 0.02nm ,可扫描范围为 0.5nm ,测量系统误差小于 20eV 。总之,这套装置价格低廉,性能稳定,重复性好,是非常好的常规诊断装置。

参考文献:

- [1] 徐伟,万宝年. 等离子体离子温度和角向速度测量[J]. 强激光与粒子束,1999,11(1):93—96. (Xu W, Wan B N. Measurement of plasma ion temperature and rotation velocity. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999,11(1):93—96)
- [2] Hutchison I H. Principle of plasma diagnostics[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1987.216—218.
- [3] 徐伟,万宝年. HT-6M 托卡马克 C^{+6} 离子的径向分布[J]. 物理学报,1998,47(11):1804—1810. (Xu W, Wan B N. The radial profile of C^{+6} ion in HT-6M Tokamak. *Acta Physica Sinica*, 1998,47(11):1804—1810.)
- [4] 徐伟,万宝年,谢纪康. HT-6M 托卡马克装置杂质输运[J]. 物理学报,2003,52(8):1970—1978. (Xu W, Wan B N, Xie J K. The impurity transport in HT-6M Tokamak. *Acta Physica Sinica*,1998,52(8):1970—1978)
- [5] 徐伟,万宝年. HT-6M 托卡马克电荷符合交换辐射的测量[J]. 强激光与粒子束,1999,11(2):225—228. (Xu W, Wan B N. Measurement on the emission of charge exchange recombination in HT-6M. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999,11(2):225—228)
- [6] Wesson J. Tokamaks[M]. Oxford: Clarendon Press, 1997.100—200.
- [7] Xie J K, HT-7 team. overview on the progress Tokamak experimental research in China[J]. *Nuclear Fusion*, 2001,41(10):1495—1499.
- [8] Gong X Z, Li J G, Wan B N, et al. ICRF siliconization in HT-7 superconducting Tokamak[J]. *J Nuclear Mater*, 2001,290-293:1171—1173.
- [9] Guo Q G, Li J G, Zhai G T, et al. The primary results for the mixed carbon material used for high flux Tokamak operation in China[J]. *J Nuclear Mater*,2001,290-293:191—194.

Vibration mirror for measurement of plasma ion temperature

XU Wei¹, WAN Bao-nian²

(1. Department of Physics, Guangzhou University, Guangzhou 510400, China;

2. Institute of Plasma Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 1126, Hefei 230031, China)

Abstract: The ion temperature in Tokamak plasma is an important parameter. A vibration mirror instrument for measurement of plasma ion temperature was established, and this system consists of a 0.5m Czerny-Turner spectrometer and a vibration quartz mirror in front of the exit slit of the spectrometer. The CV (227.1nm) line shape was measured by vibrating the mirror, which was controlled by a scan controller, the time dispersion of the system is less than 10ms and the error is less than 20eV. The ion temperature in HT-6M Tokamak was derived from the Doppler broaden of CV line during OMH and ICRH. The result shows that the ion temperature rises from 200eV to 300eV during ICRH. The equipment can be widely applied to small and medium sized Tokamak.

Key words: Vibration mirror scan; Ion temperature; ICRH