

真空紫外光谱时空分辨测量

林晓东

(深圳大学应用物理系, 深圳 518060)

魏乐汉* 汪舒娅 谢纪康 杨传元

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要 利用光谱仪前置旋转多面镜技术, 在单次托卡马克脉冲放电过程中实现了真空紫外光谱的时空分辨测量, 避免了传统测量方法因连续重复放电带来的不准确性。

关键词 真空紫外光谱, 等离子体, 阿贝尔变换。

1 引 言

传统的光谱测量技术在真空紫外(VUV)波段遇到了许多困难^[1, 2], 首先是由于空气(特别是氧气)对光的连续吸收, 使得只有借助真空谱仪才能开展工作; 其次, 在这一波段尤其是极紫外(XUV)光谱区, 因为没有合适的透射材料, 而且各种材料的反射率也都很低, 因此通常采用凹面光栅作色散元件。凹面光栅光谱仪的优点是只有一个反射面, 从而最大限度地减少了反射损失, 但是由于像散, 基本上丧失了空间分辨能力。

近年来, 随着受控热核聚变和空间测量技术的发展, 人们对真空紫外光谱的研究变得越来越活跃, 例如在高温托卡马克等离子体中, 伴随着等离子体温度的升高, 各种杂质离子辐射的强辐射线大都落在真空紫外范围内, 为了研究等离子体杂质的输运规律, 关于真空紫外光谱的时空分辨测量便成为高温等离子体诊断中的一个重要课题。在目前的各类托卡马克装置上, 普遍的做法是^[3, 4]在真空紫外单色仪前安装一片反射镜, 每次托卡马克放电前调整反射镜倾角, 通过逐点扫描的方式获取等离子体不同空间的辐射信息。严格地说, 这种方法必须依赖于托卡马克的连续重复放电(shot-by-shot 放电)为基础, 但由于实际放电中等离子体的微观行为非常复杂, 连续的完全重复放电难以实现, 因此这就决定了上述方法存在较大的测量误差。

本实验首次利用快速旋转多面镜与真空紫外单色仪联接构成测量系统, 并在单次托卡马克放电中实现了对真空紫外光谱的时空分辨测量, 因此与传统方法相比, 测量效率与测量准确性都有了较大提高。

* 现工作地址上海师范大学实验中心。

收稿日期: 1995年7月21日; 收到修改稿日期: 1995年12月21日

2 实验装置

测量系统光路安排如图1所示。实验以合肥 HT-6M 托卡马克等离子体作待测光源(大环半径 $R = 65 \text{ cm}$, 等离子体柱半径 $r = 20 \text{ cm}$, 等离子体环电流 $I_p = 60 \sim 80 \text{ kA}$), 用美国 Mcpherson 公司生产的 MODEL 235型正入射真空紫外单色仪作色散元件。图中 W_1 、 W_2 、 W_3 和 W_4 为法兰盘, 其中 W_1 是托卡马克诊断窗, W_3 、 W_4 用玻璃密封, 为便于光路调节, W_2 与真空紫外单色仪之间用波纹管连接。 D_1 、 D_2 为光电倍增管, 其输出信号送入计算机实时采集。 R 为一块表面镀金的正十二面反射镜, 用单相电机驱动实现高速旋转, 正十二面镜及电机转子位于真空室内, 定子线圈位于真空室外。凹面光栅 G 表面镀银, 曲率半径为 500 mm , 刻线为 600 l/mm , 对应的单色仪线色散为 3.4 nm/mm 。测量光路由分子泵维持 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以上真空。单色仪出射狭缝处用一块玻璃平晶密封, 并在其内表面喷镀一层水杨酸钠晶体, 目的是将真空紫外光转换成可见光以便于光电倍增管接收。

由于整个测量光路位于真空系统中, 因此确定真空紫外信号与被测等离子体空间位置间的对应关系变得较为复杂, 实验中为此特别设计了一套辅助光路如图1中虚线部分所示: 由氩氟激光器发射的激光经反射镜 M_1 射入转镜 R 下表面(工作面), 随着 R 的转动, 首先由探测器 D_1 在 t_1 时刻接收到一个激光信号 L_1 (经 $M_1 \rightarrow R \rightarrow M_2 \rightarrow D_1$, 因快速掠过探测器而形成尖脉冲), 然后主光路在 t_2 时刻扫过等离子体中心(沿直径方向), t_3 时刻到达等离子体边缘(如图2所示)。这样真空紫外信号中不同时刻的值反应等离子体不同空间的辐射信息, 它们的时间对应关系由转镜转速以及各元件的相对位置确定。设置分束镜 BS 产生尖峰 L_2 (经 $M_1 \rightarrow R \rightarrow BS \rightarrow D_1$) 的目的是为了检验光路运行的可靠性。

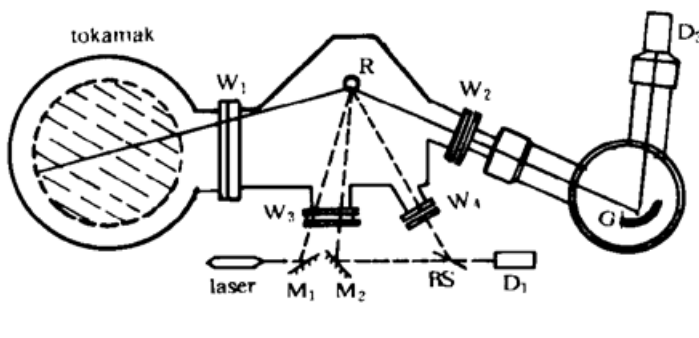


Fig. 1 The experiment arrangement. D_1 -photomultiplier, M_1 -mirror, W_1 -flange plate, R -rotating polygon mirror

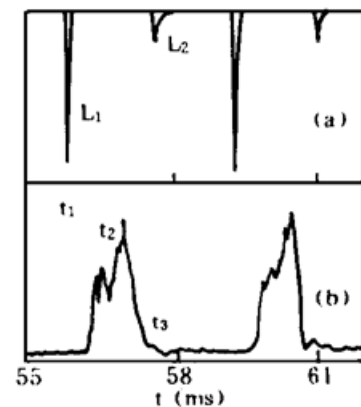


Fig. 2 The relationship between the signal of laser and VUV. (a) the laser signal from D_1 (b) the VUV signal from D_2

3 实验结果

利用图1所示的测量系统对合肥 HT-6M 托卡马克脉冲放电过程中杂质离子高离化态光谱辐射特征展开研究, 图3是 O VI(103.2 nm) 辐射的实时采集图, 其中上线 Laser 是激光参考信号, 中线 VUV 是单色仪接收到的 O VI(103.2 nm) 信息, 下线 I_p 为托卡马克等离子体环电流, 对图3 信号的局部展开如图2所示。

由于图1中真空紫外信号的获取实际上是沿观察方向等离子体辐射的线积分值, 由沿弦积分量求径向分布还需进行阿贝尔(Able)变换^[5], 图4是阿贝尔变换后 O VI(103.2 nm) 辐射

的时空分布结果。

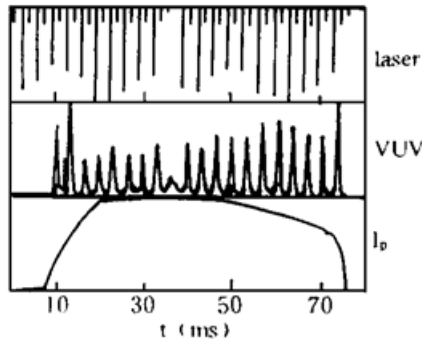


Fig. 3 The experimental results to measured O VI (103.2 nm) line

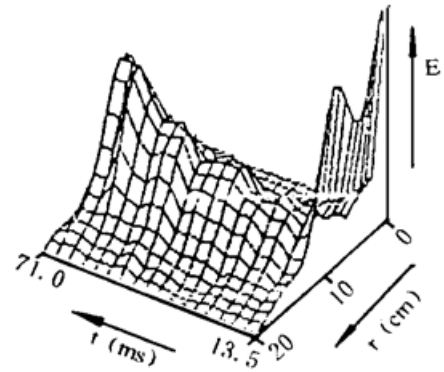


Fig. 4 The time-space distribution of O VI (103.2 nm) line after Abel inversion

在开展阿贝尔变换前, 本文已注意到下列事实并作了相应的技术处理:

1) 高温低密度托卡马克等离子体具有光学薄特征并满足柱对称性, 符合阿贝尔变换条件;

2) 正十二面转镜 R 各反射面的反射率略有不同, 并均随入射角的变化而改变, 测量系统安装前, 已利用真空紫外光谱灯对转镜各反射面的反射率及其随入射角的变化关系做了标定, 并在阿贝尔变换前利用标定曲线对实测结果进行了修正。考虑到标定结果与实际工作面的顺序对应关系, 实验中将正十二面镜的一个面覆盖 (由图3信号可以看出), 但为了保证时空分布图的连续性, 该反射面的信息重复其前一个反射面的结果;

3) 在转镜 R 的转动过程中, 单色仪接收立体角随反射面倾角而改变, 实际计算中反射面的有效利用面积取其在光路中的投影面积, 即乘以余弦因子, 这样测量系统的空间分辨率也作相应变化, 由于转镜每个面大小为 $15 \times 25 \text{ mm}^2$, 计算表明^[6], 在从等离子体中心到边缘的测量过程中, 空间分辨率在 $13.1 \text{ mm} \sim 18.4 \text{ mm}$ 之间变化。

4 总结与讨论

对于图4所示的结果, 讨论如下:

1) HT-6M 托卡马克 O VI杂质的分布具有明显的壳层特征, 峰值出现在 $r = 12.5 \text{ cm}$ 处。

2) 托卡马克放电初期, 在等离子体中心 ($r = 0$ 附近), 堆积有较大的 O VI辐射信号, 通过与图3的比较发现, 在该时间段, 等离子体环电流尚未进入平台区, 因此本文认为, 这可能是由于 O VI杂质的壳层分布未完全形成所致。

3) 在等离子体破裂前, O VI分布具有明显的趋中特征, 这可能是因为等离子体柱收缩引起的。

综上所述, 本文研制了一台主要用于托卡马克等离子体真空紫外光谱时空分辨测量的实验系统, 由于采用了快速旋转多面反射镜技术, 因此可以在单次脉冲放电中获取真空紫外谱线完整的时空分布变化图, 避免了传统实验方法依赖于托卡马克连续重复放电的现状, 从而大大提高了测量的准确性。通过对 HT-6M 托卡马克等离子体杂质高离化态光谱的测量表明, 该系统的运行是可靠的, 时间分辨率优于 4 ms , 空间分辨率优于 2 cm 。

本文的实验工作是在中国科学院等离子体物理研究所完成的,得到了 HT-6M 托卡马克装置运行组的大力协助,在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] J. A. R. Samson, *Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy*. New York, Wiley, 1967
- [2] 项志遴, 俞昌旋, 高温等离子体诊断技术. 上海科学技术出版社, 1982·176~ 179
- [3] Huang Rong *et al.*, The impurity transport in HT-6B tokamak. *Acta Physica Sinica* (overseas edition), 1992, **2**(1) ·22~ 28
- [4] S. Suckewer, A. Cavallo, S. Cohen *et al.*, Impurity ion transport studies on the PLT tokamak during neutral-beam injection. *Nuclear Fusion*, 1989, **24**(7) ·815~ 826
- [5] William L. Barr, Method for computing the radial distribution of emitters in a cylindrical source. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, **52**(8) ·885~ 888
- [6] 林晓东, HT-6M TOKAMAK 光谱诊断. 中国科学院等离子体物理研究所, 中国科学院博士学位论文, 1992·68~ 71

Measurement of Time-Space Resolved VUV Spectrum

Lin Xiaodong

(*Department of Applied Physics, Shenzhen University, Shenzhen 518060*)

Wei Lehan Wang Shuya Xie Jikang Yang Chuanyuan
(*Institute of Plasma Physics, The Chinese Academy Sciences, Hefei 230031*)

(Received 21 July 1995; revised 21 December 1995)

Abstract Using a VUV monochromator and a rotating polygon mirror, the time-space resolved VUV spectrum is obtained for the first time in the single pulse discharge of Tokamak. The measurement error from the conventional method of shot-by-shot discharge is avoided.

Key words VUV spectrum, plasma, Abel inversion.