

# HT-6B 托卡马克的真空紫外光谱

魏乐汉 傅积闾 汪舒娅  
(中国科学院等离子体研究所)

## 提 要

本文报导了 HT-6B 托卡马克在 430~1300 Å 的发射谱。所用光谱仪如 247 型掠入射真空紫外摄谱仪。共辨认出谱线一百多条。除工作气体氢的谱线外,主要是氧、碳和氮的各价离子的谱线。此外还发现了硫的谱线,并对这一谱线的存在提出了解释。

等离子体中的杂质问题是当今受控聚变中的一个重要问题,而光谱方法是测量高温等离子体中杂质的有效手段。因为托卡马克的杂质辐射的强线主要在真空紫外波段,所以真空紫外光谱在杂质诊断中显得尤为重要。通过摄谱可以了解到等离子体在某一波段的辐射的全貌,同时它也是作进一步定量测量的基础。

## 一、实验装置概述

图1为摄谱仪和托卡马克的配置图,托卡马克的真空室及隔板均由不锈钢(1Cr18Ni9Ti)组成,隔板与光谱仪轴线成 120° 夹角。HT-6B 的主要参数为:大环的半径 45 cm,隔板半径 10 cm,  $B_T = 3000$  Gauss,  $I_p = 10$  kA,  $n_e \approx 1 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>, 等离子体维持时间约为 6 ms,工作气体为氢,气压  $1 \times 10^{-4}$  Torr,本底真空为  $2 \times 10^{-8}$  Torr。真空紫外摄谱仪和托卡马克作真空联接,摄谱仪的真空度约为  $5 \times 10^{-6}$  Torr。247 型光谱仪的主要指标为:工作波段 10~2500 Å,凹面光栅曲率半径  $R = 2217.6$  mm,光栅刻线 300 l/mm,分辨率优于 0.3 Å,镀铝,闪耀波长 2400 Å,油扩散泵加冷阱,实验中取入射角  $\alpha = 85^\circ$ ,入射狭缝到等离子体中心距离为 900 mm,狭缝宽度 40 μ,采用 Kodak 公司的 SWR 谱板。本摄谱是从 HT-6B 的第 25294~29924 次放电的发射谱,曝光 4630 次。

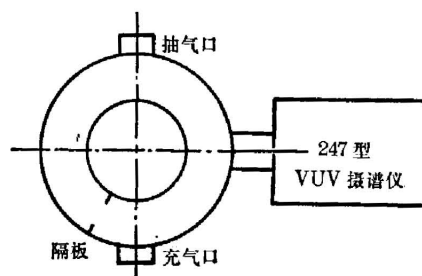


图1 实验装置示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the experimental arrangement

## 二、谱线的辨认

本次摄谱范围为 430~1300 Å,摄得谱线约 300 条,找到归属的 169 条。现将本实验所

用的波长测量方法简述如下。

从所周知,如图 2 所示的光栅的几何关系根据光栅方程有

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= d \sin \alpha - d \sin \beta_1, \\ \lambda_2 &= d \sin \alpha - d \sin \beta_2, \\ \lambda_x &= d \sin \alpha - d \sin \beta_x, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $d$  为光栅常数,  $m$  为光谱级数,  $\lambda$  为波长。解得

$$\left. \begin{aligned} \lambda_x &= \lambda_1 - 2d \sin \left( \frac{\Delta l'}{2R} \right) \cdot \cos \left( \beta_1 + \frac{\Delta l'}{2R} \right), \\ \beta_1 &= \cos^{-1} \left[ \Delta \lambda \left( 2d \sin \frac{\Delta l}{2R} \right)^{-1} \right] - \frac{\Delta l}{2R}, \\ \Delta l &= l_1 - l_2, \quad \Delta l' = l_1 - l_x, \quad \Delta \lambda = \lambda_1 - \lambda_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中  $\Delta l$  是  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  线间距, 也就是  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间在罗兰圆上的弧长,  $\Delta l'$  是  $\lambda_1$  和  $\lambda_x$  线间距。由此根据两已知波长的基准线间距时, 即可计算得到其它谱线波长, 这样就避免了零级谱位置测量的不精确性。我们是以工作气体氢的  $L_\alpha$ 、 $L_\beta$  线作为特征基准线的。

为了减少远离  $L_\alpha$  和  $L_\beta$  处的  $\lambda_x$  的测量误差, 在  $L_\alpha$ - $L_\beta$  区间之外确认某  $\lambda_x$  是某种离子的某条谱线以后, 再从表载<sup>[1]</sup> 波长  $\lambda'_x$  及  $L_\beta$  作为基准线对代入(2)式, 求该区域的  $\lambda_x$ 。以此逐级外推即可精确测出全谱板。利用这种方法测量精度可以优于  $0.1 \text{ \AA}$ 。本实验中的测量误差为  $\pm 0.2 \text{ \AA}$ , 其原因是谱线较宽, 这主要是由于入射狭缝较宽( $40 \mu$ )引起的。

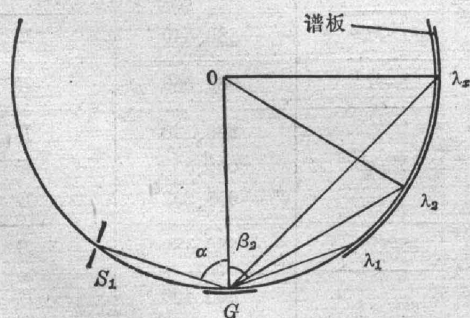


图 2 光栅光谱仪中的几何关系示意图  
Fig. 2 A schematic diagram of geometrical relation of the grating spectrograph

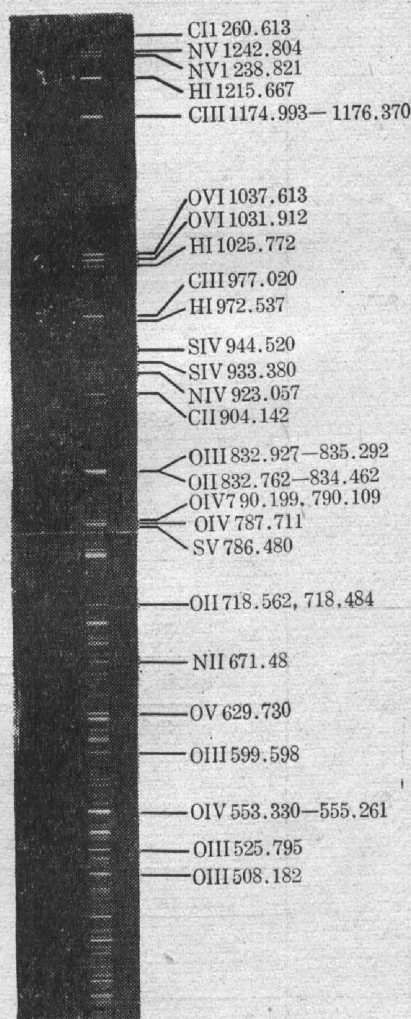


图 3 光谱图  
Fig. 3 Spectrograph

硫线是我们首次在托卡马克里发现的谱线, 因此对硫线作了仔细的辨认。首先, 所有硫谱线的波长都在所测波长精度范围内, 其次, 不同电离态的特征谱线都依次出现了, 而且相同电离态的谱线强度分布都符合多重线之间的强度比, 同时也排除了谱线级次重迭和其它

线的干扰,因此确认为硫谱线是毫无疑义的。所辨认出的硫谱线按离子分类见表1。图3是光谱图,并用测微光度计进行扫描(其扫描图由于篇幅,不予刊载)。所用参考数据为Kelly的真空紫外波长表<sup>[1]</sup>,Wiese的原子跃迁几率<sup>[2]</sup>及格罗川图。由于数据不够完善及托卡马克中谱线的展宽和位移,尚有一些线还未能找出其归属。

表1 按离子分类的硫谱线表(黑度由A~E递减)  
Table 1 The sulphur spectrum lines divided by ionic number  
(the density is decreased from A to E)

原子或离子	跃 迁 组 态	光 谱 项	波 长 (Å)	相对强度
SIII	$3p^2-3p3d$	$^3P-^3P^0$	700,220	D
SIV	$3s3p^2-3s^24s$	$^4P-^4P^0$	1108,480	D
			520,830	D
			519,200	D
	$3s^23p-3s^23d$	$P^0-^2D$	661,420	D
			660,940	D
			657,340	D
	$3s3p^2-3s3p3d$	$^4P-^4D^0$	653,980	E
	$3s^23p-3s3p^2$	$^2P^0-^2S$	815,970	E
			809,690	E
			$^2P^0-^2P$	753,760
750,230				D
748,400				D
744,920	D			
$^2P^0-^2D$	1072,990	E		
$3s3p^2-3p^3$	$^4P-^4S^0$	800,470	D	
SV	$3s3p-3s(2s)4s$	$^3P^0-^3S$	439,650	E
	$3s(2s)3d-3p(2p^0)3d$	$^3D-^3D^0$	883,540	E
	$3p^2-3p(2p^0)3d$	$^3P-^3D^0$	680,360	E
	$3s3p-3s(2s)3d$	$^3P^0-^3D$	663,160	D
			659,853	E
			658,262	E
	$3s^2-3s(2s)3p$	$^1S-^1P^0$	786,480	B
	$3s3p-3p^2$	$^3P^0-^3P$	860,460	E
854,800			E	
SVI	$3p-3d$	$^2P^0-^2D$	712,680	E
			706,480	E
	$3s-3p$	$^2S-^2P^0$	944,520	D
			933,380	C
	$3d-4f$	$^2D-^2F^0$	464,680	E

### 三、讨 论

(1) 统观全谱,除工作气体氢的赖曼(Laman)系之外,其余几乎全是氧,碳和氮这三种轻杂质的各价离子的谱线。按离子来分,从一价到五价的离子都有强线出现;按能级来分,各类离子以其共振线为最强,绝大部分谱线的跃迁上能级的量子数  $n$  不大于 5,这与托卡马克中主要是由基态碰撞激发有关<sup>[3]</sup>。从波长分布来看谱线主要密集在 430~630 Å 段。

(2) 从最高电离态的谱线估计<sup>[4]</sup>HT-6B的平均电子温度约为 20 eV,这与我们所做的可见及近紫外光谱工作的结果一致。但从斯必泽公式计算得到 40 eV。分析其原因可能有三:① HT-6B 中等离子体没有达到稳态日冕状态;② 电子温度的径向分布中心较尖;③ 可能有逃逸放电。

(3) 摄谱中最值得注意的是出现了硫的谱线(30条),主要是一些离子共振线,包括从 SIII~SVI。在辐射强度上虽比 O、C、N 低,但仍相当强,可见 HT-6B 托卡马克等离子体中硫有相当高的含量。近年来人们通过表面分析注意到硫在托卡马克真空室内壁上的富集过程,有人将这种富集归因于单极弧<sup>[5]</sup>,也有人认为这是在等离子体轰击下硫向晶格边缘扩散加强所致<sup>[6]</sup>。作者认为 HT-6B 等离子体中硫的来源主要是真空室在清洗过程中硫酸的残留所致。因而必须对真空室预处理的工艺提出更高要求。

(4) 作者对可能出现的金属线作了仔细的分析,除出现 CrV 的 469.0 Å 和 438.6 Å 两条弱线外无其它金属线,说明进入等离子体的金属离子很少。这和可见及近紫外所作的摄谱结果一致。由于没有发现 Fe、Ni、Ti 等不锈钢成份的谱线,因此倾向于认为 Cr 线的来源是酸洗时铬酸的残留物。

### 五、小 结

(1) 本文所提出的波长测量方法具有较高的精度,经使用证明结果较好。

(2) 在 HT-6B 的真空紫外光谱中主要是轻杂质的各价离子的共振线,几乎没有金属线,所以 HT-6B 中杂质的来源主要是真空室壁的解吸过程而不是等离子体轰击壁材料而使材料进入等离子体,同时也可以看到轻杂质的线辐射是 HT-6B 辐射损失的主要供献者。

(3) 酸洗的残留物是硫出现的原因。

### 参 考 文 献

- [1] L. Kelly; NRL. Report, 1973, 7599.
- [2] W. L. Wiese; NBS-4, 1966, Vol. I; NBS-22, 1969, Vol. II.
- [3] Indrek Martihson; Physics Script, 1981, 23, No. 2, 126.
- [4] W. Loebte-Holtgreven; Plasma Diagnostics, 1968, 188.
- [5] Clausing. R. E. J. Nucl. Mater., 1980, 93~94, Pt. A, 150.
- [6] H. F. Dylla; J. Nucl. Mater., 1976, 63, Dec., 487.

## VUV spectra of HT-6B Tokamak

WEI LEHAN FU JIKAI AND WANG SHUYA

*(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei)*

(Received 23 September 1982, revised 9 March 1983)

### Abstract

The VUV emission spectra of HT-6B tokamak from 430 Å to 1300 Å are photographed. The spectrograph used is model 247 grating incidence spectrograph. More than one hundred spectral lines have been identified. Besides Laman series of hydrogen which is the working gas, almost all lines are those of light impurities, i. e. oxygen, carbon and nitrogen. The spectral lines of sulfur are found firstly. The reason of exist of sulfur is explained.