

CT-6 B 托卡马克等离子体的真空紫外光谱

王文书 李赞良 黄 矛

(中国科学院物理研究所) (北京大学分校物理系)

1986年7月16日收到

提 要

用一米掠入射真空紫外光谱仪拍摄了 CT-6 B 托卡马克等离子体的杂质光谱, 波长区为 1580—550 Å 和 460—43 Å. 观察到限制器材料钼的谱线 Mo VIII 234.314 Å, 235.510 Å 和 237.215 Å, 以及低 Z 杂质 C, N, O 的谱线. 它们的最高电离阶分别为 Mo VIII, OVII, CIV 和 NV. 在这些杂质光谱中, OV 和 OVI 谱线出现得多而且强, 说明氧是 CT-6 B 等离子体的主要杂质, 它的线辐射在 CT-6 B 辐射损失中占主要部分. 观察到的最短波长为 OVII 21.6020 Å 和 21.804 Å 的二级谱. 由 Mo VIII 和 OVII 谱线的出现可以估计出 CT-6 B 等离子体平均电子温度约为 140 eV. 在所观察波长区内, 未发现真空室壁材料 Fe, Ni, Cr, Ti 等杂质的谱线.

一、引 言

高温等离子体和受控聚变研究中杂质是重要课题之一. 高温等离子体中杂质的辐射主要出现在真空紫外光谱区. 研究杂质的真空紫外光谱可以提供有关等离子体大量有用的信息. 近年来, 一些作者报道了在各自托卡马克上测得的真空紫外光谱^[1-3]. 然而, 这些装置的电子温度 T_e 均在 keV 量级. 对于 T_e 在百电子伏量级的装置, 光谱数据报道得很少. 现有文献表明, 不同的托卡马克装置, 由于 N_e , T_e 等参数, 限制器和真空室壁的材料, 以及真空室状态等的差别, 它们的真空紫外光谱有不同的特征. 本文报道了在 CT-6 B 托卡马克上测得真空紫外光谱的结果. 它反映了 CT-6 B 上等离子体的光谱特征, 为等离子体诊断, 杂质辐射损失, 杂质输运过程等研究提供了基础.

二、实验条件

CT-6 B 是圆截面小型托卡马克装置, 其主要参数为

$R = 0.45 \text{ m}$; $a = 0.10 \text{ m}$; $T_e \approx 200 \text{ eV}$ (Thomson 散射测量值);

$n_e \approx 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (4 mm 微波干涉测量值); $I_p \approx 24 \text{ kA}$; $B_T \approx 10 \text{ kG}$.

等离子体电流维持时间 14—20 ms. 真空室材料为不锈钢, 限制器材料为钼. 工作气体为氢, 气压为 $5 \times 10^{-3} \text{ Torr}$.

拍摄光谱使用 McPherson 248 型一米掠入射真空紫外摄谱仪/单色仪. 摄谱仪置于托卡马克赤道平面, 沿水平弦并垂直于纵场方向观察等离子体. 入射狭缝与等离子体中

表 1 1580—550 Å 波长区部分谱线的波长值及其能级组合

离子	波长值(Å)	目视黑度	能级组合	光谱项
CIV	1550.774	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{1/2}^0$
CIV	1548.185	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{3/2}^0$
OV	1371.292	A	2s2p—2p ²	$^1P_1^0-^1D_2$
CH	1334—1335 线组	C	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^2D$
NV	1242.804	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{1/2}^0$
NV	1238.821	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{3/2}^0$
L _α	1215.668	A	1s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{3/2}^0$
CIII	1174—1176 线组	A	2s2p—2p ²	$^3P^0-^3P$
NII	1083—1085 线组	D	2s ² 2p ² —2s2p ³	$g^2P-^3D^0$
OVI	1037.613	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{1/2}^0$
OVI	1031.912	A	2s—2p	$g^2S_{1/2}-^2P_{3/2}^0$
L _β	1025.722	B	1s—3p	$g^2S_{1/2}-^2P_{1/2}^0$
NIII	991 二条	A	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^2D$
NIII	989.790	B	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P_{1/2}^0-^2D_{3/2}$
CIII	977.020	A	2s ² —2s2p	$g^1S_0-^1P_1^0$
NIV	921—924 线组	A	2s2p—2p ²	$^3P^0-^3P$
NII	915—916 线组	D	2s ² 2p ² —2s2p ³	$g^3P-^3P^0$
OII, OIII	832—835 线组	A	2s ² 2p ³ —2s2p ⁴ 2s ² 2p ² —2s2p ³	$g^4S^0-^4P$ $g^3P-^3D^0$
OIV	790 二条	A	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^2D$
OIV	787.711	A	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P_{1/2}^0-^2D_{3/2}$
OIV	779 线组	D	2s2p ² —2p ³	$^2D-^2D^0$
NIV	765.148	A	2s ² —2s2p	$g^1S_0-^1P_1^0$
OV	758—762 线组	A	2s2p—2p ²	$^3P^0-^3P$
OIII	702—703 线组	A	2s ² 2p ² —2s2p ³	$g^3P-^3P^0$
NIII	684—686 线组	B	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^1P$
OV	629.730	A	2s ² —2s2p	$g^1S_0-^1P_1^0$
OIV	624—625 线组	A	2s2p ² —2p ³	$^4P-^4S^0$
OIV	608—609 线组	A	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^2S$
OIV	553—555 线组	A	2s ² 2p—2s2p ²	$g^2P^0-^2P$

注: g 表示基态光谱项;谱线的目视黑度由 A—F 递减。

心相距 1.25 m。窗口与限制器的夹角约 45°。

用 300 条/mm 和 1200 条/mm 光栅分别拍摄 1580—550 Å 和 460—43 Å 光谱。缝宽分别为 40 μm 和 30 μm,入射角分别为 87°和 88.5°,曝光分别为 1300 次放电和 2500 次放电。使用 Kodak SWR 胶片。

三、实验结果

在拍摄到的 1580—550 Å 和 460—43 Å 的两张光谱图中,测量并辨认了约 180 条谱线,其中包括大部分强线和少数重要的弱线。图 1 和图 2(见图版 I)为部分波段的光谱图。表 1 和表 2 分别给出这两个波段中主要谱线的波长值和相应的能级跃迁。

在确定位于 43 Å 附近的两条未知强线的波长值及其归属时遇到了困难。因为在摄

表 2 460—43 Å 波长区部分谱线的波长值及其能级组合

离子	波长值(Å)	目视黑度	能级组合	光谱项
NIII	374.441	D	2p—3d	$g^2P_{3/2}^0 - ^2D_{3/2}$
NIII	374.204	D	2p—3d	$g^2P_{1/2}^0 - ^2D_{3/2}$
NIV	335.052	E	2s2p—2s3d	$^1P^0 - ^1D_2$
NIV	283 线组	A	2s2p—2s3d	$^3P^0 - ^3D$
OIV	279.933	B	2p—3s	$g^2P_{3/2}^0 - ^2S_{1/2}$
OIV	279.631	C	2p—3s	$g^2P_{1/2}^0 - ^2S_{1/2}$
NV	266 二条	B	2p—3s	$^1P^0 - ^2S$
OV	248.459	A	2s2p—2s3s	$^1P^0 - ^1S_0$
NV	247.561, 247.706	A	2p—3d	$^1P^0 - ^2D$
NIV	247.205	C	2s ² —2s3p	$g^1S_0 - ^1P^0$
OIV	238 二条	A	2p—3d	$g^2P^0 - ^2D$
MoVIII	237.215	F	4p ³ —4p ⁴ (³ p)4d	$g^2P_{3/2}^0 - ^2P_{3/2}$
MoVIII	235.510	F	4p ³ —4p ⁴ (³ P)4d	$g^2P_{1/2}^0 - ^2D_{3/2}$
MoVIII	234.314	E	4p ³ —4p ⁴ (³ P)4d	$g^2P_{3/2}^0 - ^2D_{3/2}$
OV	231.823	C	2p ² —2p(³ P ⁰)3d	$^1S_0 - ^1P^0$
OV	220.352	A	2s2p—2s3d	$^1P^0 - ^1D_2$
OV	215 线组	A	2s2p—2s3s	$^3P^0 - ^3S$
NV	209 二条	A	2s—3p	$g^2S - ^2P^0$
OV	207.794	D	2p ² —2p(³ P ⁰)3d	$^1D_2 - ^1F_3$
OIV	195.863, 196.009	A	2p—4d	$g^2P^0 - ^2D$
UV	192 线组	A	2s2p—2s3d	$^3P^0 - ^3D$
NV	190 线组	B	2p—4s	$^1P^0 - ^2S$
NV	186 线组	C	2p—4d	$^2P^0 - ^2D$
OVI	183—184 线组	A	2p—3s	$^2P^0 - ^2S$
OVI	172—173 线组	A	2p—3d	$^2P^0 - ^2D$
OV	172.169	A	2s ² —2s3p	$g^1S_0 - ^1P^0$
OV	167—168 线组	A	2s2p—2p(³ P ⁰)3p	$^3P^0 - ^3D$
OV	164 线组	A	2s2p—2p(³ P ⁰)3p	$^3P^0 - ^3P$
NV	162.556	A	2s—4p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OV	156 线组	A	2s2p—2s4s	$^3P^0 - ^3S$
OV	151 线组	A	2s2p—2s4d	$^3P^0 - ^3D$
OVI	150 线组	A	2s—3p	$g^2S - ^2P^0$
OV	138 线组	A	2s2p—2s5d	$^3P^0 - ^3D$
OV	135.5232	B	2s ² —2s4p	$g^1S_0 - ^1P^0$
OVI	132 线组	A	2p—4s	$^2P^0 - ^2S$
OVI	129 线组	A	2p—4d	$^2P^0 - ^2D$
OV	124.6159	B	2s ² —2s5p	$g^1S_0 - ^1P^0$
OVI	117.40	B	2p—5s	$^2P_{3/2}^0 - ^2S_{1/2}$
OVI	116 线组	B	2p—5d	$^2P^0 - ^2D$
OVI	115.824	A	2s—4p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OVI	110.69	D	2p—6s	$^2P_{3/2}^0 - ^2S_{1/2}$
OVI	110.148, 110.220	B	2p—6d	$^2P^0 - ^2D$
OVI	106.79	D	2p—7d	$^2P_{3/2}^0 - ^2D_{3/2}$
OVI	104.811	B	2s—5p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OVI	99.68	C	2s—6p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OVI	96.78	C	2s—7p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OVI	95.02	D	2s—8p	$g^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}^0$
OVII	21.804 二级	B	1s ² —1s2p	$g^1S_0 - ^3P^0$
OVII	21.6020 二级	B	1s ² —1s2p	$g^1S_0 - ^1P^0$

注同表 1.

得的光谱中,短于 94 \AA 的波段缺乏可供内插法或外推法利用的已知谱线。为此,利用了光栅公式

$$m\lambda = d \sin \alpha - d \sqrt{1 - \left(\frac{x}{39.323}\right)^2},$$

式中 λ 为波长值, m 为光谱级次, d 为光栅常数, α 为入射角, x 为光谱仪用作单色仪时,与波长 λ 对应的鼓轮读数值,它表示该波长的谱线在谱片上的位置。事先从实验上求得了已知谱线波长值与相应的鼓轮读数之间的关系曲线。在大于 94 \AA 的波段中选取一条或几条谱线,将其 λ 值和相应的 x 值代入上式,确定 α 为 88.5° 。然后,测量两条未知强线在谱片上与已知谱线的距离,于是,可求得相应的鼓轮读数值,将它代入上式,即可求得它们的波长值。由此确定它们是 $\text{OVII } 21.6020 \text{ \AA}$ 和 21.804 \AA 的二级谱。它们的一级谱落在谱片之外,未能观察到。

据文献可知,在 $\text{Mo VIII } 234.314 \text{ \AA}$ 和 237.215 \AA 处分别有 $\text{NIV } 234.124\text{--}234.249 \text{ \AA}$ 和 $237.873\text{--}237.991 \text{ \AA}$ 多重线组干扰。为确定谱片上出现的这两条谱线是 Mo VIII 线还是 NIV 线,用阿贝比长仪精确测量了这两条谱线,其波长值为 234.36 \AA 和 237.29 \AA ,确定它们为 Mo VIII 线,而不是 NIV 线。此外,还测得另一条 Mo VIII 线的波长值为 235.58 \AA 。这三条 Mo VIII 线都很弱,但它们之间的目视相对黑度与文献[4]给出的相符。 Mo VII 的电离电势为 126 eV ,因此,CT-6B 的电子温度值能激发这三条 Mo VIII 线。

四、讨 论

1. 观察到高 Z 杂质 Mo 和低 Z 杂质 C , N , O 的谱线,它们的最高电离阶分别为 Mo VIII , OVII , CIV 和 NV 。

2. 由表 1 和表 2 可知, OV 和 OVI 谱线出现得多而且强,表明在各种离化杂质离子中,氧的丰度最高,它们的线辐射在 CT-6B 等离子体辐射损失中占主要部分。

3. 观察到最短的真空紫外波长为 $\text{OVII } 21.6020 \text{ \AA}$ 和 21.804 \AA 的二级谱。 Mo VII 的电离电势为 126 eV , OVI 的电离电势为 138 eV ,由 Mo VIII 和 OVII 谱线的出现,可以估计出 CT-6B 等离子体的平均电子温度约为 140 eV 。这个数值与用 Thomson 散射^[5]和软 X 射线吸收比较法^[6]测得的结果基本一致。

4. Mo VIII 最灵敏的三条谱线 234.314 \AA , 235.510 \AA 和 237.215 \AA 的出现,表明 CT-6B 等离子体中出现了 Mo 杂质,这是等离子体与钼限制器相互作用的结果。从限制器溅射产生的 Mo 原子进入等离子体后,在向等离子体高温中心区输运的途中,受电子碰撞而被逐阶电离。这三条谱线都很弱,说明进入等离子体中心的 Mo 的量甚少。

5. 在所观察的波长区内,没有发现真空室壁材料 Fe , Cr , Ni 和 Ti 的谱线。

本实验得到王龙同志的热情支持和帮助,并为我们调试得到较好的等离子体状态;CT-6B 托卡马克运行组韩共和,耿秀敏和范世浩等同志为本实验提供了较好的放电条件,在此谨致谢忱。

参 考 文 献

- [1] E. Hinnov, *Phys. Rev.*, **14**(1976), 1533.
- [2] C. Breton *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer.*, **69**(1979), 1652.
- [3] M. F. Stamp *et al.*, LRP 220/83.
- [4] J. O. Ekberg *et al.*, *J. Opt. Soc. Amer.*, **62**(1972), 1143.
- [5] 胡淑琴、连钟祥, *物理学报*, **34**(1985), 594.
- [6] 万柏坤、戚震枝、郑少白, *物理*, **11**(1982), 682.

VACUUM ULTRAVIOLET SPECTRA OF CT-6B TOKAMAK PLASMA

WANG WEN-SHU LI ZAN-LIANG

(*Institute of Physics, Academia Sinica*)

HUANG MAO

(*Department of Physics, The Branch School of Peking University*)

ABSTRACT

A spectrographic survey of the impurity lines was made on the CT-6B Tokamak with 1 metre grazing incidence spectrograph. The observed wavelength ranges were from 1580 to 550 Å and from 460 to 43 Å, using 300 lines/mm and 1200 lines/mm gratings respectively. The survey revealed that the main impurities in CT-6B Tokamak plasma are Mo for high Z impurities and C, N, O for low Z impurities. There are a large number of OV and OVI lines with intense emission. We also observed MoVIII resonance lines 234.314 Å, 235.510 Å and 237.215 Å. The shortest observed wavelengths are the second order of OVII lines 21.6020 Å and 21804 Å. The first order of these two lines situate beyond the film and can not be recorded. According to the features of the spectra and the ionization potentials of OV, OVI as well as MoVII, the average electron temperature for CT-6B Tokamak is estimated to be about 140 eV. Oxygen is the main impurity in CT-6B Tokamak, and its lines emission is the main portion of energy loss in CT-6B Tokamak. Lines of the main components of the vacuum-vessel material such as Fe, Cr, Ni and Ti have not been found.