

# 利用分支比法作真空紫外单色仪 灵敏度的绝对校准

魏乐汉\* 伍晓岚 傅积凯 汪舒娅  
(中国科学院等离子体物理研究所)

## 提 要

本实验利用托卡马克的高温等离子体作光源,采用分支比法对掠入射真空紫外单色仪在  $150\text{Å}\sim 1640\text{Å}$  波段的灵敏度作了绝对校准。文章对该方法的技术问题也作了讨论。  
关键词: 真空紫外单色仪。

## 一、引 言

光谱方法被广泛地用于高温等离子体诊断。但高温等离子体中的各种离子所辐射的强谱线大部分落在真空紫外(VUV)范围内,因此对 VUV 光谱仪及其探测系统灵敏度作绝对校准是光谱定量测量必不可少的。另外 VUV 的绝对校准在光度学中也是一个重要的课题。

本实验采用的是分支比法<sup>[1~3]</sup>。它和别的方法比较,所需的设备和所花的劳动量相对来说要少。另外,在一些实验中校准用的光源和被测光源是同一个(所谓现场校准),这时分支比法可省去发光面积和发射立体角的测量。

## 二、原 理

分支比法的实质是借助测定光源的可见或近紫外(UV)的光强来推算 VUV 光强。如果来自光源的同一上能级的两条谱线一条在 VUV 区域,一条在可见或 UV 区域,并且满足下列条件:(1)两条谱线的跃迁几率已知;(2)两条谱线从光源到探测器都是光薄的;(3)在不能分辨的上能级的亚能级之间的布居数正比于统计权重;(4)可见和 VUV 两单色仪都观察光源的同一区域,则可用分支比法。

如图 1 所示,如果某粒子的两条谱线有公共的上能级  $m$ ,而有不同的下能级  $l$  和  $k$ ,且一条谱线在可见或 UV 范围,另一条在 VUV 范围,则有

$$\frac{B_{\text{VUV}}}{B_{\text{VIS}}} = \frac{A_{\text{VUV}}\lambda_{\text{VIS}}}{A_{\text{VIS}}\lambda_{\text{VUV}}} \quad (1)$$

式中  $B$  为亮度,  $A$  为跃迁几率,  $\lambda$  为波长。如果知道了两谱线的跃迁几率,则可以从可见

收稿日期: 1988年1月30日

\* 现在上海师范大学实验中心工作。

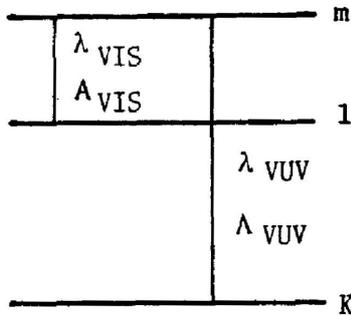


Fig. 1 Level and transition diagram of branch ratio

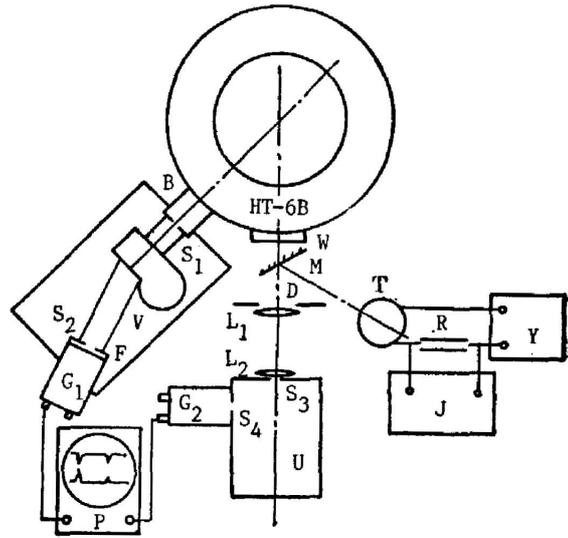


Fig. 2 Experimental setup

(或 UV)分支的亮度求出 VUV 分支的亮度。而可见分支可以通过黑体炉——亮度标准灯这一传统方法进行测量,且有较高的精度。

VUV 和可见光谱仪的灵敏度定义分别为:

$$S_{\text{VUV}}(\lambda) = \frac{V_{\text{VUV}}(\lambda)}{P_{\text{VUV}}(\lambda)} = \frac{V_{\text{VUV}}(\lambda)}{B_{\text{VUV}}(\lambda)\sigma_{\text{VUV}}\Omega_{\text{VUV}}}, \quad (2)$$

$$S_{\text{VIS}}(\lambda) = \frac{V_{\text{VIS}}(\lambda)}{P_{\text{VIS}}(\lambda)} = \frac{V_{\text{VIS}}(\lambda)}{B_{\text{VIS}}(\lambda)\sigma_{\text{VIS}}\Omega_{\text{VIS}}}. \quad (3)$$

式中  $V$  为光讯号电压,  $P$  为光功率,  $\sigma$  为发光面积,  $\Omega$  为接收立体角。将 (1) 和 (3) 式代入 (2) 式得

$$S_{\text{VUV}}(\lambda) = \frac{V_{\text{VUV}}A_{\text{VIS}}\lambda_{\text{VUV}}\sigma_{\text{VIS}}\Omega_{\text{VIS}}}{V_{\text{VIS}}A_{\text{VUV}}\lambda_{\text{VIS}}\sigma_{\text{VUV}}\Omega_{\text{VUV}}}. \quad (4)$$

所以求 VUV 分支的灵敏度归结为测可见分支的灵敏度。

### 三、实验安排、方法和结果

实验安排如图 2 所示。校准用的光源(同时也是待测光源)是 HT-6B 托卡马克的高温等离子体。 $V$  为 247 型掠入射 VUV 光谱仪,它是被校准的对象,其参数见文献[4]。 $F$  为内表面镀水杨酸钠的玻璃板,它将 VUV 光转换成可见光而被光电倍增管  $G_1$  接收,该分支的光讯号被送至记忆示波器的第一线。 $U$  为可见及 UV 单色仪,  $G_2$  为光电倍增管,这一分支的光讯号被送至记忆示波器的第二线。

实验的第一步是校准可见分支的灵敏度。放入反射镜  $M$ , 使该分支接收量度标准灯的光,设这时的讯号电压为  $V_s$ , 则该分支的灵敏度为

$$S_{\text{VIS}}(\lambda) = \frac{V_s}{B_s R \sigma_s \Omega_s D_s S_4}, \quad (5)$$

式中  $B_s$  为标准灯的亮度,  $\sigma_s$  为入射狭缝  $S_3$  的面积,  $\Omega_s$  为光阑  $D$  对  $S_3$  所张的立体角,  $D_s$

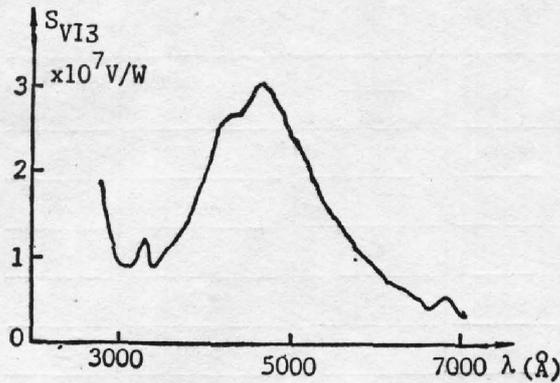


Fig. 3 The sensitivity of UV and visible spectrometer

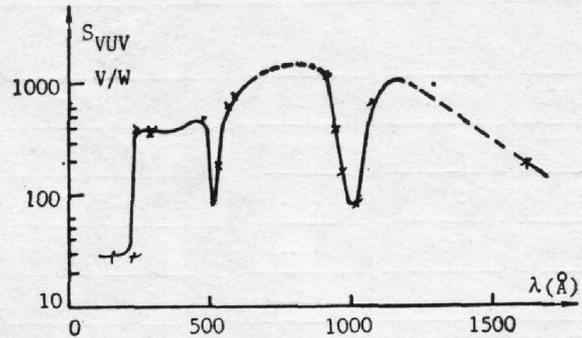


Fig. 4 The sensitivity of VUV spectrometer

为单色仪  $U$  的线色散倒数,  $S_4$  为出射狭缝宽度。可见分支的灵敏度曲线见图 3。

实验的第二步是校准 VUV 分支。移去  $M$ , 两光谱仪同时对同一上能级的两条谱线进行测量。设其波长分别为  $\lambda_{\text{VUV}}$  和  $\lambda_{\text{VIS}}$ ,  $G_1$  的输出讯号为  $V_{\text{VUV}}$ ,  $G_2$  的输出讯号为  $V_{\text{VIS}}$ , 则由 (4) 式可得 VUV 系统在波长  $\lambda_{\text{VUV}}$  处的灵敏度。

$$S_{\text{VUV}}(\lambda) = \frac{V_{\text{VUV}} \lambda_{\text{VUV}} \sigma_{\text{VIS}} \Omega_{\text{VIS}} \sum (2J+1) A_{\text{VIS}}}{V_{\text{VIS}} \lambda_{\text{VIS}} \sigma_{\text{VUV}} \Omega_{\text{VUV}} \sum (2J+1) A_{\text{VUV}}} \cdot \tau \cdot S_{\text{VIS}} \quad (6)$$

式中  $\tau$  为石英窗  $W$  的透过率,  $A$  为跃迁几率, 而  $\sum (2J+1) A$  则为所有被接收到的跃迁成份所对应的跃迁几率之和。本实验的跃迁几率数值取自文献 [5]。

本实验所选用的分支比线对及测量结果见表 1。VUV 光谱仪的灵敏度曲线见图 4。实验中并未确定所接收的发光面积和立体角的乘积  $\sigma_{\text{VUV}} \Omega_{\text{VUV}}$  这一几何因子, 这并不影响曲线的绝对校准的意义。因为在现场校准的情况下, 这个几何因子在测量时被消去了。

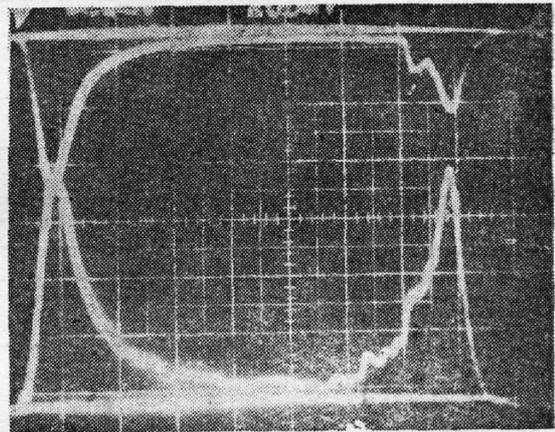


Fig. 5 Waveform of  $H_\alpha$  (upper) and  $L_\beta$  (lower), 2 ms/div

## 四、讨 论

1. 在图 4 的曲线上当  $\lambda < 240 \text{ \AA}$  时灵敏度明显下降, 这是水杨酸钠的荧光效率在此波长以短明显降低所致<sup>[3]</sup>。其次, 在  $\lambda \approx 1026 \text{ \AA}$  处灵敏度有一深谷, 这是光栅在该处反射率降低所引起的。

2. 托卡马克等离子体光源的谱线十分丰富, 加上有分支比的谱线都不是共振线, 以弱线居多, 因此排除背景和其他谱线的干扰检出所需的分支比谱线是本实验的关键。为此对光谱仪的分辨率, 孔径和色散都提出较高的要求。为了提高信噪比和判别有无其他谱线干

Table 1

ion	$\lambda_{\text{VUV}} \text{ \AA}$	$\lambda_{\text{VIS}} \text{ \AA}$	$\frac{[\sum(2J+1)A]_{\text{VIS}}}{[\sum(2J+1)A]_{\text{VUV}}}$	$\tau$	$\frac{V_{\text{VUV}}}{V_{\text{VIS}}}$	$S_{\text{VIS}}(\lambda) \times 10^3$ V/W	$S_{\text{VUV}}(\lambda)$ V/W
OVI	150.1	3811.4	0.00132	0.39	283	14.77	42
OVI	150.1	8834.2	0.000647	0.39	178	15.40	13
HeII	237.3	3203.1	0.534	0.39	54.2	9.45	89
OIV	238.5	3403.6	0.00109	0.38	219	8.78	28
OIV	238.5	3412.5	0.00217	0.38	62.9	8.80	16
HeII	243.0	4685.8	0.703	0.39	1.93	30.6	408
CIV	312.4	5801.5	0.00463	0.45	632	11.0	331
OII	485.3	4705.4	0.0318	0.40	23.9	30.6	455
OII	515.6	4942.4	0.0656	0.41	17.5	26.0	60
NII	533.7	4803.3	0.00405	0.40	72.5	28.8	180
CIII	574.3	5693.0	0.00794	0.45	304	12.2	612
NII	582.2	4447.0	0.100	0.39	10.8	26.9	696
HI	937.8	4101.7	0.592	0.41	1.79	23.5	1134
HI	947.7	4340.5	0.613	0.40	0.534	26.3	364
HI	972.5	4861.3	0.653	0.40	0.213	27.7	152
HI	1025.7	6562.8	0.794	0.48	0.571	5.86	74.7
HeII	1085.0	3203.1	0.870	0.39	1.81	9.45	609
HeII	1640.7	256.3	1.26		0.054		176

扰,在实验中选择谱线反射率达到极大的时刻进行测量。因为两分支来自同一上能级,因此达到发射率极大的时刻是相同的,而不同离子达到发射率极大的时刻是不同的。图5是 $H_{\alpha}$ 线和 $L_{\beta}$ 线对的示波图。

3. 要全面确定各测量点的误差是困难的。由于各测量点的跃迁几率精度不同,受其他谱线干扰的程度也不同,因此各测量点的不确定性不同。精度最差的是 $240 \text{ \AA}$ 以短的两个点。从表1中的两次 $150 \text{ \AA}$ 和两次 $238.5 \text{ \AA}$ 的测量可以估计其不确定性约100%。其原因是该处灵敏度低,信噪比差和受到的干扰较严重。相反,由于光强大和跃迁几率精度高,在 $1026 \text{ \AA}$ 和 $972.5 \text{ \AA}$ 两点有最高的精度。其不确定性约为10%。其余各点的不确定性在两者之间。这样的不确定性对于目前等离子体杂质密度的测量是可以接受的。

4. 利用分支比法所测得的灵敏度曲线上的测量点分布是不均匀的。这是该方法的缺点。为了增加被测点和扣除其它杂质谱线的干扰,在等离子体中曾充入其他气体He,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2$ 和Ar。实验中只有He取得好的结果。

5. 分支比法要求两光谱仪观察同一区域。由于托卡马克沿大环方向是等同的,所以本实验的安排等效于观察同一区域。在托卡马克中离子密度较低,满足光薄要求,氢原子是工

作气体,其密度较高,其光薄与否需要考虑,但根据文献[2],由于自吸收对  $L_s$  线的影响小于百分之几,所以也可认为光薄。对于被选的那些能级布居数正比于统计权重也是满足的。所以本实验是满足分支比测量条件的。

6. 因为没有合适的线对,  $582 \text{ \AA} \sim 938 \text{ \AA}$  之间和  $1026 \text{ \AA} \sim 1640 \text{ \AA}$  之间无测量点,因此该两段的中间部分有很大的不确定性。

## 五、结 论

用分支比法对 VUV 光谱仪作绝对强度校准是一个较好的方法。其优点是所需设备和工作量相对来说较少。在现场校准的情况下可免去发光面积和发射立体角的测量,更显得方便。缺点是校准点分布不均,目前校准精度还不够高。本实验中不确定性在  $10\% \sim 100\%$  之间。如果选用大孔径,高分辨率和大色散的光谱仪及有较高精度的跃迁几率,则校准精度可以大为提高。

本实验得到陈佳驭和谢纪康两位副研究员及 HT-6B 运行组的支持和帮助,在此一并致谢。

## 参 考 文 献

- [1] E. Hinnov, F. W. Hofmann; *J. O. S. A.*, 1963, **53**, No. 11 (Nov), 1259.
- [2] Satoski Kassi *et al.*; *Japanese J. Appl. Phys.*, 1978, **17**, No. 9 (Sep), 1625.
- [3] J. A. R. Samson; *«Techniques of Vacuum Ultraviolet Spectroscopy»*, (Wiley, New York, 1967), 214, 288.
- [4] 魏乐汉等; *«光学学报»*, 1984, **4**, No. 1 (Jan), 84.
- [5] W. L. Wiese, M. W. Smith *et al.*; *«Atomic Transition Probabilities»*, Vol. 1, NSRDS-NBS4, (U. S. GPO, Washington, D. C., 1966).

## Absolute calibration of VUV intensity using branch ratio

WEI LEHAN, WU XIAOLAN, FU JIKAI AND WANG SHUYA  
(*Institute of Plasma Physics, Academia Sinica*)

(Received 30 January 1988)

### Abstract

The absolute sensitivity of VUV grazing incidence VUV monochromator was calibrated on tokamak using branch ratio. The calibrated range is from  $15 \text{ \AA} \sim 1640 \text{ \AA}$ . The technical problems are discussed.

**Key words:** VUV monochromator.