

长温度变化所致。

王占国、方兆强、高凤升、向贤碧、朱素珍、吴浪元等同志对本工作给与了不少帮助，在此向他们表示感谢。

参 考 文 献

- [1] E. W. Willams et al., *Semiconductors and Semimetals*, Vol. 8, Ed. by R. K. Willardson, New York, Academic Press, (1972), 321.
- [2] D. J. Ashen et al., *J. Phys. Chem. Solids*, **36-9** (1975), 1041.
- [3] E. H. Bogardus et al., *Phys. Rev.*, **176-3** (1968),

- 993.
- [4] M. D. Sturge, *Phys. Rev.*, **127-3** (1962), 768.
- [5] T. Kamiya et al., *J. Appl. Phys.*, **47-7** (1976), 3219.
- [6] H. Kressel et al., *J. Appl. Phys.*, **39-9** (1968), 4059.
- [7] H. J. Queisser et al., *J. Appl. Phys.*, **37-13** (1966), 4895.
- [8] R. Solomon, Proc. 2nd Inter. Symp. on GaAs, Ed. by C. I. Pedersen, Phys. Soc. Conf. Ser., No. 7, London, (1968), 11.
- [9] M. Otsubo et al., *Japan. J. Appl. Phys.*, **12-6** (1973), 797.
- [10] G. M. Blom, *J. Crys. Grow.*, **36-1** (1976), 125.

绝对强度和时空分辨光谱测量

黄 矛 李赞良 朱志英

(中国科学院物理研究所)

1980年3月28日收到

本文介绍一种能同时测量光谱线的绝对强度和空间、时间分辨¹⁾的实验方法。由于采用了空间多道测量，不受转镜法要求在空间扫描周期内光强保持相对不变的限制，故适于研究具有急剧变化的光脉冲的扩展光源的时间和空间行为。采用此法对托卡马克 CT-6 放电的等离子体光谱 H_{α} , H_{β} , OII4414.9 Å, CII4267.3 Å 和 CIII4647.4 Å 进行了测量，得到了它们的时间和空间行为以及绝对强度的实验结果。

一、引 言

对于像托卡马克等具有一定体积和随时间变化的光源来说，光谱测量往往希望得到具有时间和空间分辨的绝对强度，如对托卡马克中杂质和能量损失的研究^[1]。为此，要解决两个基本问题。首先是测量过程中光电倍增管不要因为光辐射过强而引起饱和^[2]。众所周知，在托卡马克典型放电中，初始辐射一般较强^[3]，有时足以使光电倍增管饱和^[4]，结果测量不准。为此，我们用光电控制机械快门来主动控制放电程序，让光谱仪狭缝在初始光辐射后才开启，以判断合适的光通量。其次，必须有绝对强度

的校准系统，我们是用标准温度灯和光学模拟系统。

空间分辨的光谱测量一般常用转镜法^[5]。但光源在空间扫描周期内有不可忽略的变化时，此法便失去一定的效能。CT-6 装置的等离子体放电恰好是这种情形，它的放电常常是不稳定的。所以，我们利用一台带有高达 10cm 的入射狭缝的单色仪 GDM-1000，六根光导、六个光电倍增管和两台双线四迹示波器组成多道光谱强度的时空分辨测量系统。显然，各道灵敏度必须进行校准。

我们对 CT-6 托卡马克等离子体的谱线 H_{α} , H_{β} , OII4414.9 Å, CII4267.3 Å 和 CIII4647.4 Å 进行了测量，得到了它们的绝对强度的空间行为随时间的变化。

二、实 验 装 置

整个实验装置示于图 1，光电控制的机械快门和钨带灯信号的调制都有马达带动的转盘。光导、光电倍增管和高压电源各有六个，图

1) 本文所述空间分辨、空间分布均指沿空间不同弦的积分强度。

中只画出两个，两台示波器只画出一台，整个装置可划为三个部分：

1. 光电控制的机械快门和同步触发电路

这部分由开有小孔的转盘、马达、电珠、光电二极管 2CU2D 以及与它相连的触发电路

(图 2) 组成。当电珠上的光通过转盘上的小孔照明光电二极管从而带动触发电路以起动托卡马克放电时，转盘边缘适当位置的扇形挡板恰好遮住单色仪入射狭缝，调整扇形挡板的宽度及其与转盘小孔的相对位置就可以准确控制遮

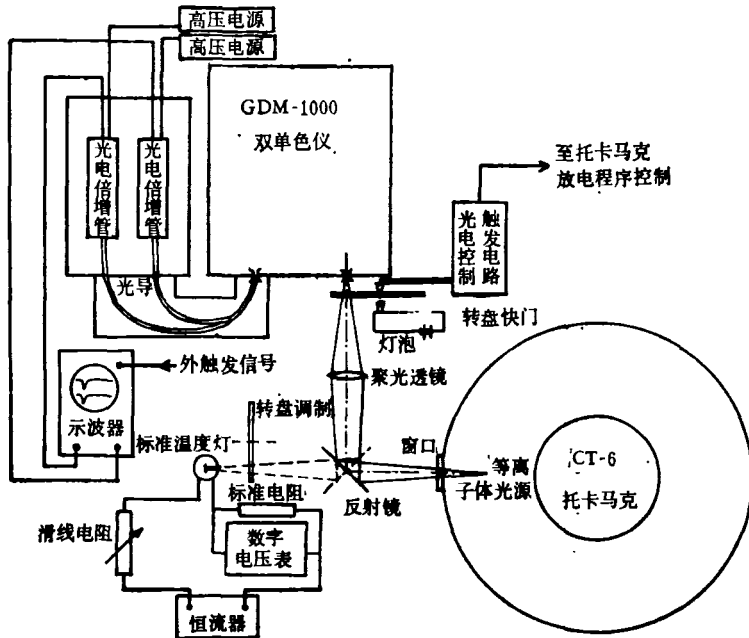


图 1 时空分辨绝对强度光谱测量装置顶视示意图

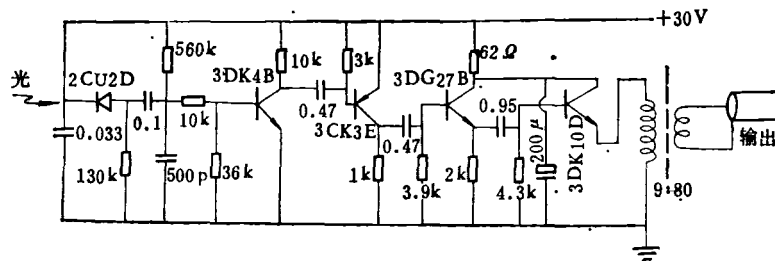


图 2 光电控制同步触发电路

挡时间。

2. 绝对强度校准系统

此系统用一只标准温度灯，以恒流器供电，滑线电阻保护恒流器，电流的准确值由数字电压表读出(乘标准电阻值)。标准温度灯在一定电流下所发光能随波长的分布是已知的^[6]。由于采用钨带完全模拟光源的光路结构，因而校准过程大大简化。

校准时，实际上是拿测得的光谱信号与钨带辐射的信号进行比较。设单色仪出射狭缝宽

度为 d ，线色散的倒数为 D ，测得光谱线的信号幅度为 V_2 ，钨带灯的信号幅度为 V_1 ，光谱线的发光强度为 I_λ ，光源窗口透过率为 τ' ，则

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{I_\lambda \cdot \tau'}{D \cdot d \cdot E_{\lambda T}}, \quad (1)$$

其中 $E_{\lambda T}$ 是钨带在温度 T 时，波长 λ 处的发射强度，可表示为

$$E_{\lambda T} = \frac{C_1}{\pi} \tau \epsilon_{\lambda T} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (2)$$

其中 C_1 ， C_2 均为确定的常数， λ 为波长， τ 为

钨带灯玻璃透过率, ϵ_{1T} 为钨带的发射率。

由(1)式得

$$I_s = D \cdot d \cdot E_{1T} \cdot \frac{1}{r'} \cdot \frac{V_s}{V_1}, \quad (3)$$

在可见区, 可认为 $r' \approx r$, 则由(2)和(3)得

$$I_s = \left(Dd \frac{C_1}{\pi} \epsilon_{1T} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \right) \frac{V_s}{V_1}, \quad (4)$$

此式是用功率表示的强度。要换成光子数, 只需除以 $h\nu = h \frac{c}{\lambda}$, h 为普朗克常数, c 为光速, 故

$$I_s = \left(Dd \frac{C_1}{\pi h c} \epsilon_{1T} \lambda^{-4} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \right) \frac{V_s}{V_1}, \quad (5)$$

式中括号内对于给定的实验均为已知, V_s/V_1 由实验测出, 故强度可以算出。

3. 多道时空分辨光电测量系统

光路的安排如图3所示, 聚光透镜的有效通光孔径为 $\phi 70$, 焦距约 200mm, 在这种情况下, 高约 19.5cm 的发光区在入射狭缝上所成的像约为 5.5cm 高。光源在出射狭缝的像由六根均匀分布的光导分别引入六个光电倍增管, 光电信号由六根同轴电缆送至示波器。



图3 聚光系统光路示意图

各道相对灵敏度的校准可分为两部分, 首先是用通过一定电流的标准温度灯模拟等离子体光源的相应部分的位置, 调节光电倍增管的电压, 使各道输出幅度相同; 其次是示波器各道灵敏度的相对校准, 这可利用同一校准信号来完成。

三、在托卡马克 CT-6 上的实验结果

在差不多同样的放电条件下, 即工作气体 H_2 充气压力约 2×10^{-4} 托, 纵场强度约 2.5kG 时, 对 H_{α} , H_{β} , $OH4414.9 \text{ \AA}$, $CH4267.3 \text{ \AA}$ 和 $CH44647.4 \text{ \AA}$ 进行了测量, 看到了 CT-6 放电中这

物理

些谱线的时间和空间行为及其绝对强度的变化趋势; 其次观测了气压和纵场大小的影响, 现将结果分述如下:

1. CT-6 放电的初始辐射是否会引光电倍增管饱和的判断实验

我们用光电控制机械快门主动触发 CT-6 的加热场放电, 观测到挡住初始辐射时的 H_{α} 线的时间扫描光谱如图4(a)所示; 另外在不加机械快门时所得的图4(b)显示了有初始辐射的情形, 可见在辐射信号不超过 20—25 V 时, 不会引起饱和, 因为以后的信号并不由于前面的光辐射而减小, 所以, 如果控制初始辐射的信号在此值以下, 可以不用光电控制的机械快门。

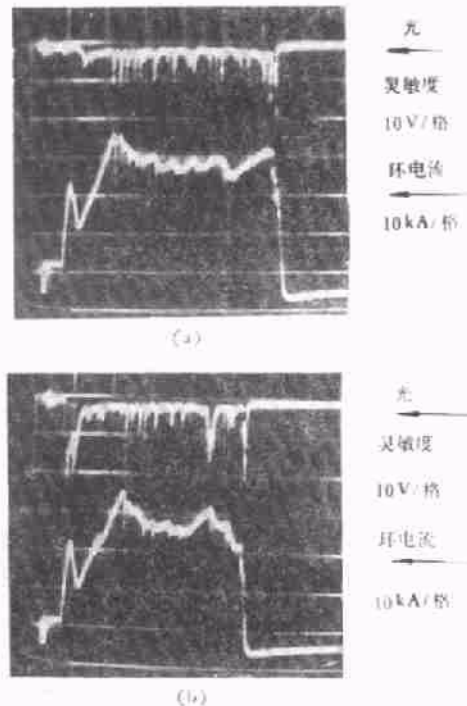


图4 挡住和未挡住初始辐射时的 H_{α} 信号

2. 谱线绝对强度的时空行为

将六根光导自上而下编号, 第二根对准等离子体中心, 即用五道测量等离子体截面一半的分布, 另一道作为参考。每幅绝对强度的时空分布曲线都是根据一次放电中六道示波图(如图5), 和绝对强度校准信号算出, 大量的示波图, 文中将不一一展示, 只标出分布曲线对

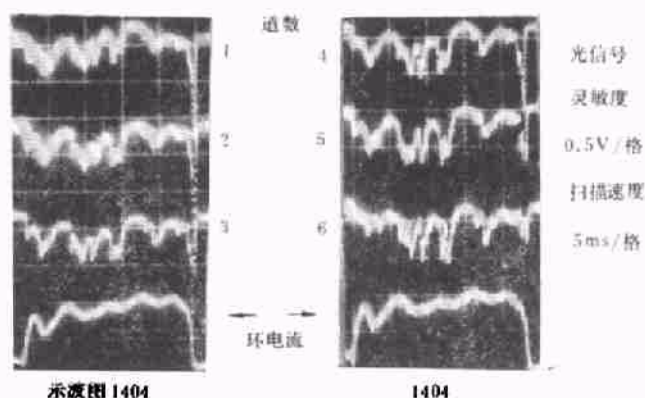


图5 CIII的时间空间分辨光谱示波图

应的时刻。

(1) H_{α} : 图6是一次放电中取三个不同时刻沿弦积分强度随空间的变化,当然可取更多的时刻。作曲线时进行了合理的光滑化;纵坐标所标强度值均系单位立体角的光强。这两点说明适用于以下各图。可见 H_{α} 线的辐射总的来说是相当强的。其时空特点是,起始时管壁附近有较弱的辐射,随着时间而下降。

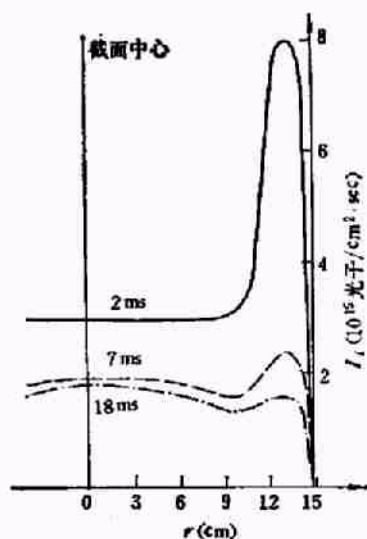


图6 H_{α} 积分光强时空分布 (I_p 持续 20ms)

(2) H_{β} : 由图7可以看到 H_{β} 线的绝对强度比 H_{α} 线的弱得多;其时空分布特点是,初始辐射也是边上强,接着边上减弱中间加强,到末期中间变得比边上强得多。

(3) $OII4414.9 \text{ \AA}$: 由图8可知,该线的绝对强度与 H_{β} 线相近。时空特点是,起初边上辐

射强,随着放电过程逐渐下降,末了中间辐射比边上强。变化趋势与 H_{β} 线有些相似。

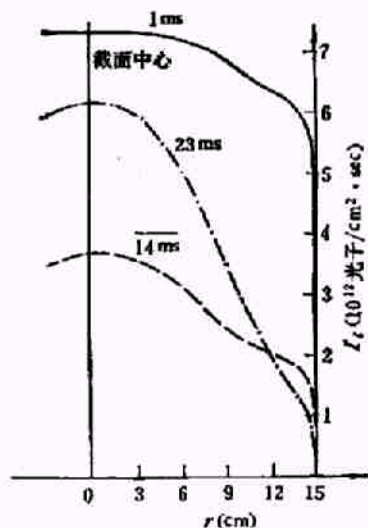


图7 H_{β} 积分光强时空分布 (I_p 持续 27ms)

(4) $CII4267.3 \text{ \AA}$: 由图9可知,该线在放电过程中始终边上比中间光强得多,且随着时间的推移,各处光强都一直发生递减。

(5) $CIII4647.4 \text{ \AA}$: 由图10可知,该线总的光强随着时间增长,开始边上增长较快,后来则中间增长较快。

3. 气压与纵场强度的影响

随着气压的增加, H_{α} 和 H_{β} 强度都增长很快。 H_{α} 初始辐射在边缘增强得较激烈, H_{β} 的增加和时空关系不大。氧和碳的三根线受气压影响很小。纵场大小的影响则相反, H_{α} 和 H_{β} 不大受影响, OII , CII 和 $CIII$ 则依次受影响越

来越大,都随纵场的加大而增强。

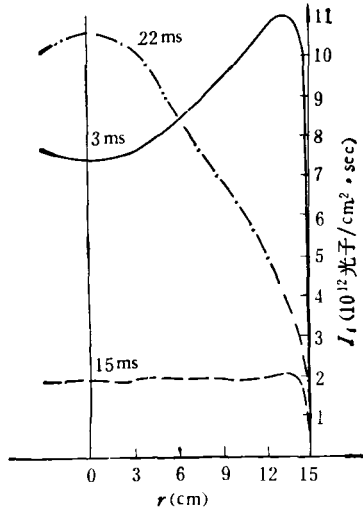


图8 OII4414.9 Å 积分光强时空分布 (I_P 持续 23ms)

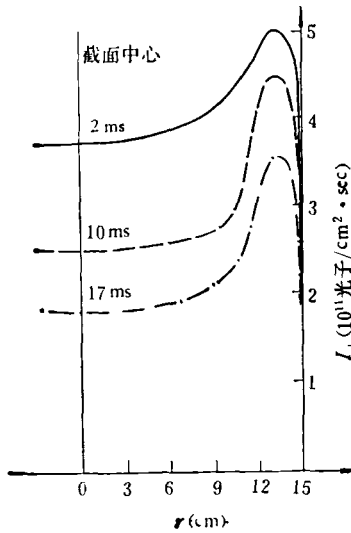


图9 CII4267.3 Å 积分光强时空分布 (I_P 持续 23ms)

四、结 语

当托卡马克放电出现较强的不稳定时,光

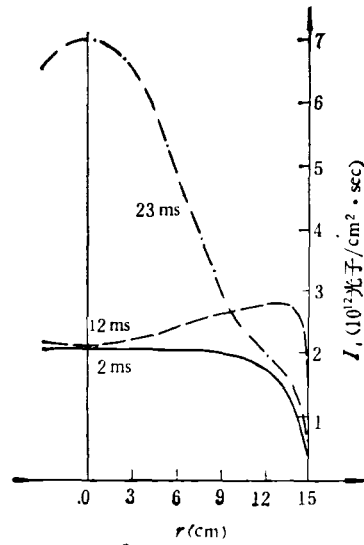


图10 CIII4647.4 Å 积分光强时空分布 (I_P 持续 23ms)

谱线的时间扫描信号将出现许多尖脉冲,这种尖脉冲有时非常密集,用转镜法难以完成空间分布的测量.我们用空间多道光电扫描的方法克服了这一困难,给出了一些光谱线的时间和空间行为以及它们的绝对强度的信息.

参 考 文 献

- [1] EQUIPE TFR, *Nuclear Fusion*, 15(1975), 1053.
- [2] J. B. 丹塞, 光电子器件, 云南光学仪器厂技术情报室译, 国防工业出版社, 1974.
- [3] L. A. Artsimovich, *Nuclear Fusion*, 12(1972), 215.
- [4] CLM-R, 107 (1970).
- [5] S. Suckewer, H. P. Eubank, R. J. Goldston, E. Hinnov and N. R. Sauthoff, *Phys. Rev. Lett.*, 43 (1979), 207
- [6] Robert D. Larrabee, *J. Opt. Soc. Am.*, 49 (1959), 619.