

# CT-6B 托卡马克的红宝石激光 $90^\circ$ 汤姆逊散射系统的相对校正

胡淑琴 连钟祥  
(中国科学院物理研究所)

## 提 要

本文阐述了CT-6B托卡马克的红宝石激光  $90^\circ$  汤姆逊散射记录系统的光谱响应相对校正和带宽响应相对校正的方法和结果。

## 一、前 言

托卡马克等离子体的红宝石激光  $90^\circ$  汤姆逊散射信号一般为  $20\sim 30$  ns 的光脉冲,其功率谱为一高斯型曲线,并且为对称形状,故只需测其一半的轮廓就可知全谱的轮廓。用功率谱的半宽  $\Delta\lambda_{1/2} = 36\sqrt{T_e}$  可得等离子体的电子温度  $T_e$ ,用散射总功率(功率谱曲线下面所包含的面积)与瑞利散射总功率之比可确定等离子体电子密度  $n_e$  [1]。

实验中,我们测了功率谱轮廓,等离子体电子温度  $T_e$  和电子密度  $n_e$ ,所用的实验装置如图1所示。图中,1—红宝石激光器,它包括 KDP 电光晶体调 Q 的振荡级 1-1 和放大级

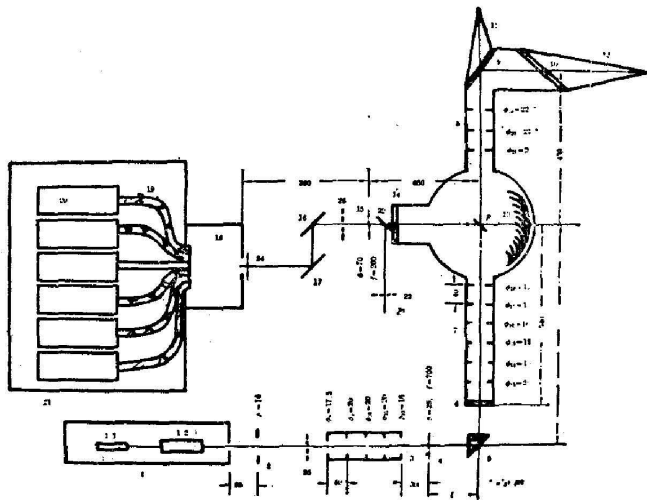


图1 CT-6B 托卡马克的红宝石激光  $90^\circ$  汤姆逊散射系统总体示意图

Fig. 1 The apparatus of  $90^\circ$  Thomson scattering experiment on CT-6B Tokamak

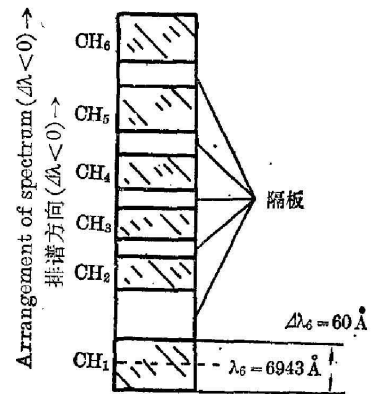


图2 在聚焦谱板平面上六根光导的排布图

Fig. 2 Arrangement of the six light guides on the focal output plane of spectrograph

1-2。2—激光限孔光阑。3—激光限孔光阑组。4—激光聚焦透镜。5—直角棱镜。6—激光入射窗口。7—激光入射光阑组。 $P$ —等离子体散射体积。8—激光出射光阑组。9、10—布儒斯特窗口——双布代窗。11、12—出射激光吸收角。13—视角光堆。14—散射光收集窗口。

等离子体散射光在光谱仪的谱板平面上形成的功率谱, 用一个六通的记录系统来测量, 此六道记录系统分别记为  $CH_1, CH_2, CH_3, CH_4, CH_5, CH_6$ , 其中每一道都由一根有机玻璃光导和一个加 100 ns 门的 RCA 7265 光电倍增管组成(图 1 中的标号 19 和 20)。六根有机玻璃光导的长  $l=400\sim 700$  不等, 横截面都为高  $h=12$ 、宽  $d=2$  或 3 的矩形, 它们的一端在光谱仪的聚焦谱板平面上, 沿着排谱的方向整齐地排列(如图 2 所示), 并将功率谱的一半分为六道。光谱仪的色散为  $20 \text{ \AA}/\text{mm}$ , 若定义  $CH_n$  道的光导宽的一半  $d/2$  所在处对应的波长  $\lambda_n$  为  $CH_n$  道的中心波长,  $CH_n$  道的光导宽  $d$  所覆盖的波长范围为  $CH_n$  道所包含的波长宽度  $\Delta\lambda_n$ , 则各道的中心波长  $\lambda_n$  及所包含的波长宽度  $\Delta\lambda_n$ , 如表 1 所示。六根光导的另一端分别与自己的光电倍增管的光阴极相接触。光电倍增管输出的光电信号用示波器来记录, 从示波器上读出六个散射信号  $T_{sn}$ , 它们每一个都对应于一个中心波长  $\lambda_n$ , 画出  $T_{sn}\sim\lambda_n$  曲线, 就可得功率谱轮廓。

表 1 各道记录系统的中心波长  $\lambda_n$  和所包含的波长宽度  $\Delta\lambda_n$

Table 1 Central wavelengths  $\lambda_n$  and cover range  $\Delta\lambda_n$  of six channels in  $\text{\AA}$

$CH_n$	$CH_1$	$CH_2$	$CH_3$	$CH_4$	$CH_5$	$CH_6$
$\lambda_n(\text{\AA})$	6943	6833	6783	6733	6673	6603
$\Delta\lambda_n(\text{\AA})$	60	40	40	40	60	60

但是, 光电倍增管有各自的光谱响应特性, 各道记录系统的电子学带宽响应也各不相同, 为了得到正确的功率谱轮廓, 必须先用相对校正系数对测出的散射信号  $T_{sn}$  进行修正以后才能用来画功率谱曲线, 为此必须对六道记录系统进行光谱响应相对校正和带宽响应相对校正, 以求得相对校正系数。

## 二、相对校正的原理

假如有一脉冲光源, 其脉宽为  $\delta$ , 辐射能  $E$  随波长的变化为  $E=E(\lambda, \delta)$ , 若用第一节中所述的设备来测其光谱轮廓, 而且  $CH_n$  道记录系统输出的光电信号为  $E'_n$ , 可令其满足关系

$$E_n(\lambda_n, \delta) = A_n(\lambda_n, \delta) E'_n, \quad (1)$$

其中  $A_n(\lambda_n, \delta)$  为我们所要求的  $CH_n$  道的相对校正系数, 而且

$$A_n(\lambda_n, \delta) = B_n(\lambda_n) C_n(\delta), \quad (2)$$

其中  $B_n(\lambda_n)$ ,  $C_n(\delta)$  分别为第  $CH_n$  道记录系统的光谱响应相对校正系数和带宽响应相对校正系数。

如果是直流光源(即  $\delta=\infty$ ), 辐射能  $E$  随波长  $\lambda$  的变化为  $E=E(\lambda, \infty)$ ,  $CH_n$  道记录系统输出的光电信号为  $E'_n$ , 同样可得关系式

$$E_n(\lambda_n, \infty) = A_n(\lambda_n, \infty) E'_n, \quad (3)$$

$$A_n(\lambda_n, \infty) = B'_n(\lambda_n) C_n(\infty), \quad (4)$$

其中的  $A_n(\lambda_n, \infty)$ ,  $B'_n(\lambda_n)$  和  $C_n(\infty)$  分别为在直流光源情况下,  $\text{CH}_n$  道的相对校正系数, 光谱响应相对校正系数和带宽响应相对校正系数。

对于一个确定的记录系统, 光谱响应相对校正系数只与波长  $\lambda$  有关, 与光源是不是脉冲光源无关。带宽响应相对校正系数只与光源的脉宽有关, 与波长无关。因此可得

$$B_n(\lambda_n) = B'_n(\lambda_n)。 \quad (5)$$

与上述多色脉冲光源的情况相似, 如果有一单色脉冲光源, 其波长为  $\lambda_0$ , 脉宽为  $\delta$ , 用平面反射镜代替谱仪的光栅和球面镜, 使它均匀照明六道记录系统, 每道记录系统所接收的辐射能都为  $E_n(\delta)$ ,  $\text{CH}_n$  道输出光电信号为  $V_n$ , 可得以下关系

$$\begin{aligned} E_n(\delta) &= A_n(\lambda_0, \delta) V_n, \\ A_n(\lambda_0, \delta) &= K_n(\lambda_0) C_n(\delta) = E_n(\delta) / V_n, \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $K_n(\lambda_0)$  是光谱响应相对校正系数。

与上述多色直流光源的情况类似, 如果有一单色直流光源, 其波长也为  $\lambda_0$ , 与单色脉冲光源波长一样, 也同样使它均匀照明六道记录系统, 每道记录系统所接收的辐射能为  $E_n(\infty)$ ,  $\text{CH}_n$  道输出光电信号为  $V'_n$ , 可得以下关系

$$\begin{aligned} E_n(\infty) &= A_n(\lambda_0, \infty) V'_n, \\ A_n(\lambda_0, \infty) &= K'_n(\lambda_0) C_n(\infty) = E_n(\infty) / V'_n, \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $K'_n(\lambda_0)$  也是光谱响应相对校正系数。由公式 (2)、(4) 和 (5) 可得

$$A_n(\lambda_n, \delta) = A_n(\lambda_n, \infty) C_n(\delta) / C_n(\infty), \quad (8)$$

由公式 (6) 和 (7) 可得

$$C_n(\delta) / C_n(\infty) = (V'_n / V_n) (E_n(\delta) / E_n(\infty)), \quad (9)$$

由公式 (8) 和 (9) 可得  $A_n(\lambda_n, \delta) = A_n(\lambda_n, \infty) (V'_n / V_n) (E_n(\delta) / E_n(\infty))$ , 式中因子  $E_n(\delta) / E_n(\infty)$  对各道都相等, 所以我们要求的相对校正系数  $A_n(\lambda_n, \delta)$  可写为

$$A_n(\lambda_n, \delta) = A(\lambda_n, \infty) (V'_n / V_n), \quad (10)$$

(10) 式右边三个量都可以用实验测得, 故  $A_n(\lambda_n, \delta)$  可以被完全确定。

如果对于测量脉宽为  $\delta$  的光脉冲来讲, 各道记录系统的带宽足够宽, 则各道的  $V'_n / V_n$  值相等, 所以相对校正系数可写为

$$A_n(\lambda_n, \delta) = A(\lambda_n, \infty), \quad (11)$$

此时, 不必用单色脉冲光源和单色直流光源来对记录系统进行相对校正, 只用一直流光源 (已知能量随波长变化) 来进行相对校正就可以了, 比如用标准钨带灯。

### 三、相对校正的实验和结果

**1. 测  $A_n(\lambda_n, \infty)$**  在测  $A_n(\lambda_n, \infty)$  的相对校正中, 用已知能量  $E$  和波长  $\lambda$  关系为  $E = E(\lambda, \infty)$  的标准钨带灯作光源。所用的实验装置参见图 1。为了使系数  $A_n(\lambda_n, \infty)$  包括从等离子体散射体积  $P$  到光电倍增管  $20$  的整个光路的光谱响应对信号的修正, 我们使用一块镀铝的全反射镜  $22$ , 并将光源置于与被测散射体积  $P$  的位置相当的地方  $P'$  上。发光钨带  $P'$  经过全反射镜  $22$ ,  $16$  和  $17$  被散射光收集透镜  $15$  成像在光谱仪  $18$  的入射狭缝上, 并在谱板平面上形成光谱, 六道散射记录系统在这种光谱的照射下输出六个光电信号  $E'_n$ , 将

$E'_n$  以及与其相应的标准钨带灯的能量  $E_n(\lambda_n, \infty)$  代入(3)式就可算出  $A_n(\lambda_n, \infty)$ 。

22 的反射率和用光学玻璃制成的散射光收集窗口 14 的透过率, 在我们工作的波长范围内(6943~6673 Å)变化不大, 因此可以忽略用 22 代替 14 所带来的误差。

2. 测  $V'_n$  在测  $A_n(\lambda_n, \infty)$  的实验装置中, 在标准钨带灯  $P'$  的前面加一块 6943 Å 的干涉滤光片 23, 就得到了一个波长  $\lambda=6943$  Å 的单色直流光源。用镀铝的全反射镜来代替光谱仪内的光栅和球面反射镜, 并仔细地调整光路, 使 6943 Å 单色直流光在谱板平面上均匀照明六根光导, 这六道记录系统的输出光电信号就是  $V'_n$ 。

3. 测  $V_n$  在测  $V_n$  的实验中, 用红宝石激光器作光源。作用的实验装置就是 OT-6B 托卡马克的红宝石激光 90° 汤姆逊散射系统(以下简称 OT-6B 系统, 如图 1 所示), 并作了如下的改动: (1) 在  $P$  点放上一块位置已预先调好的反射镜, 它使入射激光按图所示方向出射。(2) 为了防止强激光束破坏光学元件, 去掉 4 和 15, 并在光路中加上减光片 25 和 26。(3) 为了扩大激光束的光束直径, 在光谱仪的入射狭缝处装上一个短焦距的透镜 24, 并用镀铝的全反射镜来代替光谱仪中的光栅和球面反射镜。实验时, 用氦氛激光管来模拟红宝石激光进行光路调准, 仔细调整光路, 使氦氛激光均匀照明谱板平面上的六根光导截面。在实验时还必须十分小心地加减减光片, 以保证得到大小合适的信号, 并防止强激光损坏光学元件和光电倍增管。在上述装置中, 点燃红宝石激光器时所测得的六个光电信号就是所要测的  $V_n$ 。

用上述三种测量对 OT-6B 系统进行相对校正的结果如表 2 所示

表 2 所测得各道记录系统的  $A_n(\lambda_n, \infty)$ ,  $V'_n/V_n$  以及相对校正系数  $A_n(\lambda_n, \infty)$  的值

Table 2 Measured  $A_n(\lambda_n, \infty)$ ,  $V'_n/V_n$  and coefficient of relative calibration of the six channel recorded system

CH <sub>n</sub>	CH <sub>1</sub>	CH <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CH <sub>5</sub>
$A_n(\lambda_n, \infty)$	0.89	1.9	1	0.80	0.69
$V'_n/V_n$	1.24	1.3	1	0.97	0.70
$A_n(\lambda_n, \delta)$	1.1036	2.5	1	0.80	0.48

本文所介绍的 OT-6B 系统的相对校准方法, 在原则上也适用于其它测量快脉冲光源光谱轮廓的光电倍增管多道记录系统, 具有一定的普遍性。

### 参 考 文 献

- [1] D. E. Evans and J. Katzenstein; *Rep. Prog. Phys.*, 1969, **32**, 207.  
 [2] 胡淑琴; 《物理》, 1981, **10**, No. 2 (Feb), 113.

**Relative calibration of a six-channel recording system of  $90^\circ$   
Thomson scattering apparatus for CT-6B Tokamak**

HU SHUQIN AND LIAN ZHONGXIANG

*(Institute of Physics, Academia Sinica, Beijing)*

(Received 9 May 1984; revised 6 July 1984)

**Abstract**

In this paper the method and results are described by relative calibration of spectral response and of frequency response for the six-channel recording system measuring the signals of  $90^\circ$  Thomson scattering experiment on CT-6B Tokamak.