

# 针孔透射光栅用于等离子体辐射温度的测量

张正泉 侯先斌 王晓方

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

敬守勇

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

**提要** 给出一种利用针孔透射光栅谱仪(PTGS)求解原子真实发射光谱的实验安排和数据处理方法。并据此真实光谱求出激光等离子体辐射温度。

**关键词** 辐射温度, 傅里叶反卷积, 普朗克黑体辐射

## 1 引言

辐射温度是间接驱动 ICF 研究中非常重要的参量。美国 LLNL 实验室刚公布了他们利用多道谱仪和激波方法测得的柱型空膜靶的时间分辨的辐射温度数据<sup>[1]</sup>, 与德国量子光学所利用透射光栅谱仪测量数据规律<sup>[2]</sup>吻合。我们对于光谱的绝对测量尚有一定困难, 所以发展根据真实光谱轮廓求解等离子体辐射温度  $T_r$  的方法具有很大的必要性。

## 2 实验条件

实验是在“神光”装置上完成的, 透射光栅谱仪是带有  $\phi 25 \mu\text{m}$  针孔的无支撑透射光栅, 光栅常数为  $1 \mu\text{m}$ , 谱分辨率为  $0.06 \text{ nm}$ , 摄谱范围为  $0.1 \sim 15 \text{ nm}$ , 空间分辨率为  $4.4 \mu\text{m}$ 。UFSH-0 胶片和 5F 医用 X 光胶片同时用于记录和定量计算中, 我们采用西南核物理与化学所对原苏联生产的 UFSH-0 软 X 光胶片的标定数据进行细致数据处理, 实验所用靶为金靶。靶室真空度为  $(2 \sim 5) \times 10^{-3} \text{ Pa}$ , 激光波长为  $1.053 \mu\text{m}$ , 激光能量为  $500 \sim 700 \text{ J/beam}$ , 脉宽为  $600 \sim 900 \text{ ps}$ 。

## 3 实验结果及处理

### 3.1 光谱处理方法

图 1 为数据处理流程框图。我们采用分级处理方法, 由于光源空间成像展宽及光谱高级衍射造成不同波长的谱线叠加, 我们引入等效光强的概念<sup>[3]</sup>以解决黑度叠加问题。如胶片的乳胶特性为

$$D = H_1[I(\lambda)] = H_1(I, \lambda) \quad (1)$$

其中  $D$  为静黑度,  $I$  为曝光强度。则对  $\lambda_1, \lambda_2$  的光强  $I_1, I_2$ , 如果产生的黑度相等, 即  $D_1 = D_2$ , 得

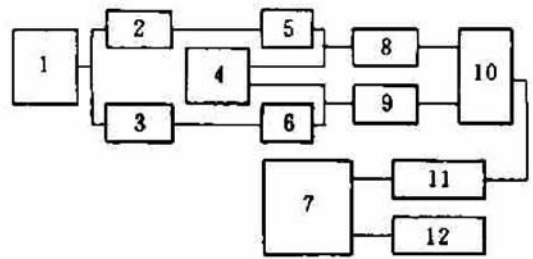
$$H_1(I_1, \lambda_1) = H_1(I_2, \lambda_2) \quad (2)$$

由此解得  $I_1$  与  $I_2$  的关系

$$I_1 = H(I_2, \lambda_1, \lambda_2) \tag{3}$$

Fig. 1 Flowchart of data processing

- 1, spectral data; 2, spectral scanning; 3, spatial scanning;
- 4, calibration data; 5, 6, diffuse density; 7, spatial distribution;
- 8, spectral distribution; 9, radiation temperature; 10, spectral unfold;
- 11, real spectrum distribution; 12, distribution of black-body radiation spectrum



我们就称波长  $\lambda_1$  的  $I_1$  是波长  $\lambda_2$  的  $I_2$  的等效光强。在此基础上,进行光源空间分布与衍射级次处理时,可以把不同波长的光能统一到同一波长上。

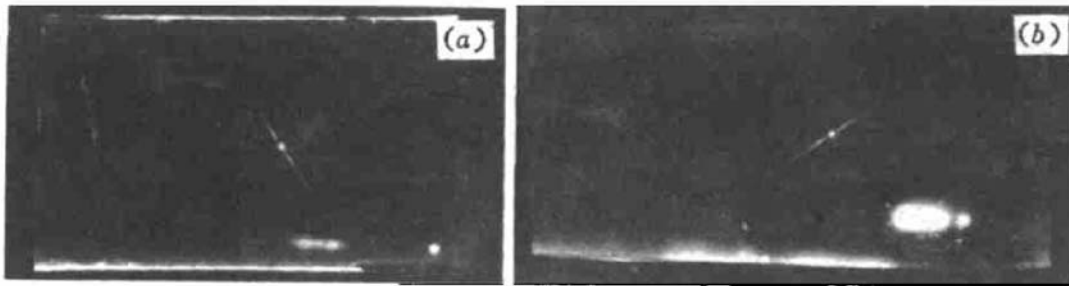


Fig. 2

(a) the record before the rotation of the grating; (b) the record after the rotation of the grating

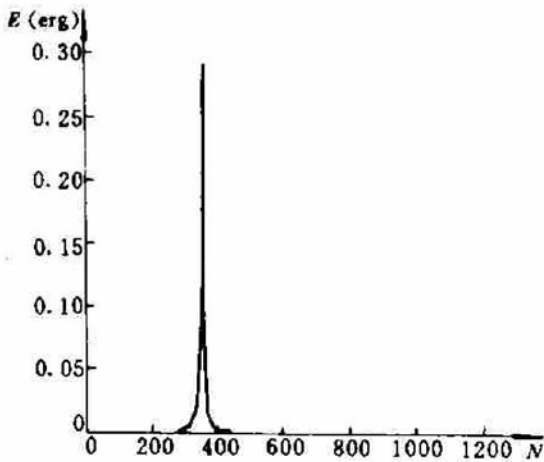


Fig. 3 The spatial distribution of the zero-order diffraction center

### 3.2 光源空间分布处理

我们实际接收到的光谱为不同波长的源在光谱衍射方向叠加的结果。所以在解谱之前首先要去除光源空间分布的影响,这要求已知不同波长处光源的空间分布函数。光源在底片上的成像同靶的几何结构及光栅位置、光阑设计均有关关系,并且不同波长的源成像情况也不一样,作为一种客观考虑,我们充分利用针孔的空间对称性,采用光栅旋转  $90^\circ$  角的方法来测量空间分布函数。这样,在同样的接收条件下两次得到的底片如图 2(a), (b)。很明显,图 2(b) 在 (X) 处的空间

方向分布即为图 2(a) 在 X 处沿光谱衍射方向的空间分布,如图 3 为我们所得 0 级衍射中心的空间分布曲线。

这样我们已知空间函数  $G(\Delta X)$ , 而

$$I(x) = \int I_{rs}(x - \Delta x)G(\Delta x)d\Delta x \tag{4}$$

$$I_{rs} = F^{-1}\{F[I(x)]/F[G(x)]\} \tag{5}$$

这样就利用 Fourier 反卷积技术求出了  $I_{rs}(x)$ 。式中  $I(x)$  为实测光谱。 $I_{rs}(x)$  为消除空间分布影响之后的光谱,如图 4 所示(图 4(a) 为消除空间影响之前的光谱图)。

### 3.3 叠级效应处理

由于高级衍射谱存在,我们所得光谱实际是各个衍射级次叠加的结果。由衍射级次叠加所造成的实测光谱  $I_{rs}$ , 为

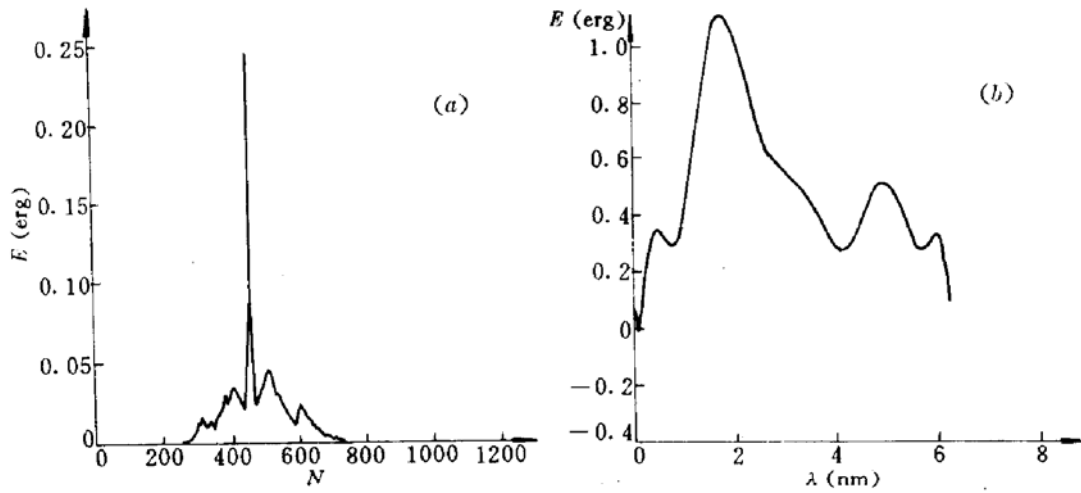


Fig. 4 (a) the distribution of relative intensity; (b) the spectrum after the elimination of the spatial effect

$$I_{Rz}(\lambda) = \sum_{m=1}^N \eta_m \left( \frac{\lambda}{m} \right) I_{Rl} \left( \frac{\lambda}{m} \right) \quad (6)$$

其中  $I_{Rl}$  为消除叠级效应之后的光谱,  $\eta_m(\lambda/m)$  为光栅在  $\lambda/m$  波长处的  $m$  级衍射效率, 则

$$I_{Rl}(\lambda) = \frac{1}{\eta_1(x)} \left[ I_{Rz}(\lambda) - \sum_{m=2}^N \eta_m I_{Rl} \left( \frac{\lambda}{m} \right) \right] \quad (7)$$

根据 M. Chaker 等人的处理方法<sup>[4]</sup>, 我们所取最小波长为  $\lambda_1$ , 并且  $I_{Rl}(\lambda_1) = I_{Rz}(\lambda_1)$ 。在此基础上叠代可解出整个波段的消除叠级效应之后的光谱, 如图 5 所示。

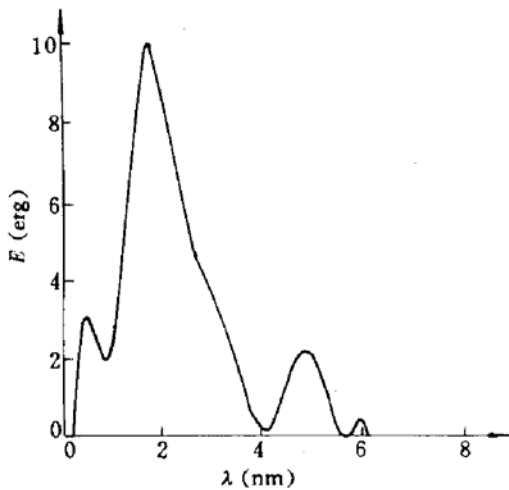


Fig. 5 The spectrum after the elimination of the superimposition effect

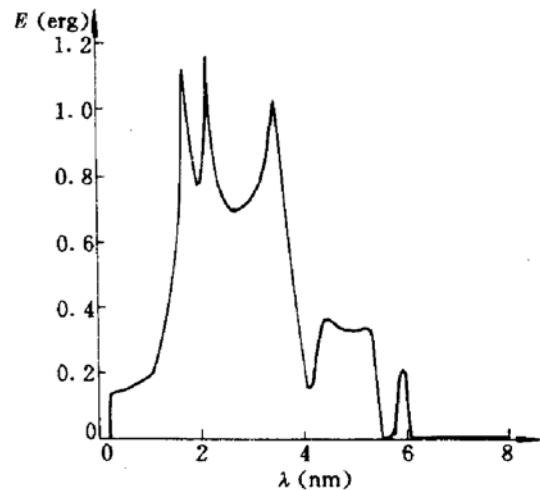


Fig. 6 The real spectrum

### 3.4 胶片响应及光栅效率

黑密度  $D$  对光强度  $I$  的数值拟合, 采用 B. L. Henkle 等人给出的半经验关系(对于单层型胶片)<sup>[5]</sup>进行,

$$D = D_{sat} [1 - \exp(-aI)] \quad (8)$$

其中  $D_{sat}$  是胶片的饱和黑密度,  $I$  是对于黑密度  $D$  的光子强度,  $a$  为与胶片特性(如感光材料种类及颗粒大小)及光子能量大小相关的参量。利用西南核物理与化学所对胶片标定的数据  $D_{sat}, a$ , 我们用插值法求出在某一波长处的黑密度  $D$  对应的光子强度  $I$ 。

光栅效率  $\eta_m$  采用 Shnopper 等人<sup>[6]</sup>的理论公式并根据王晓方的标定数据进行处理。图 6 是

我们所求的真实光谱。由于底片标定数据处理方法不一致造成光谱中间部分响应有失真而出现不应该出现的尖峰,因此我们采取了归一化形式。根据理论计算估计误差在 30% 以内。

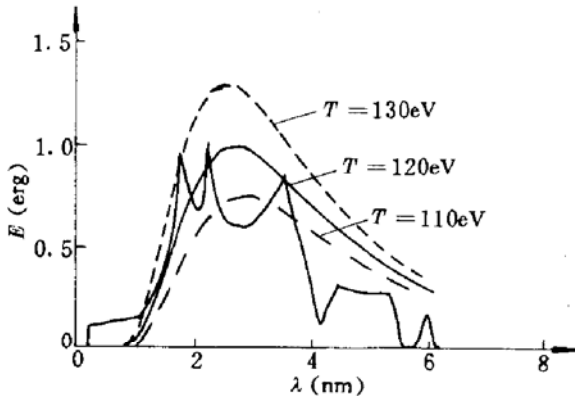


Fig. 7 The comparison with the Planck-Radiation model

### 3.5 辐射温度 $T_R$

在已知真实光谱轮廓的情况下,根据维恩位移定律可得出等离子体辐射温度

$$T_R = b/\lambda_{\max} \approx 121.75 \text{ eV} \quad (9)$$

其中  $b$  为维恩常数,  $\lambda_{\max}$  为能量最大处的波长。同时,我们以普朗克辐射模型比较如图 7 所示。可见,以我们的处理方式而言,辐射温度应在 110 ~ 130 eV 之间。

**致谢** 本文实验部分是同九院二所同志一起在“神光”装置上进行的,作者在此对靶室工作人员

表示真挚的感谢,同时感谢孙可照,易荣清等同志的指点帮助。

### 参 考 文 献

- 1 R. L. Kauffman, L. J. Suter, C. B. Darrow *et al.*. High temperatures in inertial confinement fusion radiation cavities heated with 0.35  $\mu\text{m}$  light. *Phys. Rev. Lett.*, 1994, **73**:2320~2323
- 2 R. Sigel, R. Pakula, S. Sakabe *et al.*. X-ray generation in a cavity heated by 1.3 or 0.44  $\mu\text{m}$  laser light. II. Comparison of the experimental results with theoretical predictions for X-ray confinement. *Phys. Rev.*, 1988, **A38**:5779~5785
- 3 李跃林, 王晓方, 徐至展 等. 用透射光栅光谱仪求解原子的真实发射光谱. *中国激光*, 1991, **18**:348
- 4 M. Chaker, V. Bateau, J. C. Kieffer *et al.*. Calibrated soft X-ray spectroscopy using transmission grating, pinhole and film. *Rev. Sci. Instrum.*, 1989, **60**(11):3386~3390
- 5 B. L. Henke, F. G. Fugiwara, M. A. Tester *et al.*. Low energy X-ray response of photographic films. *J. Opt. Soc. Am.*, 1984, **1**:818~827
- 6 H. Schnopper, L. P. Van Speybroeck, J. P. Delvaille *et al.*. Diffraction grating transmission efficiencies for XUV and soft X-rays. *Appl. Opt.*, 1977, **16**:1088~1091

## The Measurement of Radiation Temperature Using PTGS

Zhang Zhengquan Hou Xianbin Wang Xiaofang

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

Jing Shouyong

(Westsouth Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

**Abstract** The experimental arrangement and a data processing method used to find the real emission spectrum by means of PTGS are proposed. The plasma's radiation temperature is also given.

**Key words** radiation temperature, Fourier deconvolution, Plank's blackbody emission