

用透射光栅光谱仪求解原子的 真实发射光谱

李跃林 王晓方 徐至展 陈时胜 钱爱娣

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文详细讨论了一种用针孔透射光栅 (PTG) 光谱仪求解原子真实光谱的方法, 并给出了在 6 路激光系统上得到的镁、铝和硅等离子体的真实软 X 射线光谱。

关键词: 软 X 射线光谱, 等离子体诊断, 原子光谱

Absolute evolution of real-atomic spectrum by a transmission grating

Li Yaolin, Wang Xiaofang, Xu Zhizhan, Chen Shisheng, Qian Aidi
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: A method of absolutely unfolding the atomic spectrum by a pinhole transmission grating spectrometer (PTG) is discussed in detail. Real SXR spectra of aluminum, magnesium, and silicon plasmas are presented of experiments performed on the Six-Beam Facility in SIOM.

Key words: SXR spectroscopy, plasma diagnostics, atomic spectroscopy

由于激光等离子体能高效率地将所吸收的入射激光能量转化为在软 X 射线 (SXR) 波段内的光谱辐射能量^[1], 因此了解原子在这一波段内的真实发射光谱对于研究等离子体的流体动力学过程和能量输运过程有重要的意义。国外不少作者都曾对此进行过专门研究^[2~5], 并发表了一些重要的物理结果^[3, 4]。

为了得到大光谱范围的软 X 射线光谱, 实验通常采用多通道光电二极管^[4, 6]或透射光栅^[2, 3, 5, 7]作为光谱分辨元件, 而从光谱分辨率上来看, 透射式光栅要优于多通道光电二极管。本文使用新建立的针孔透射式光栅光谱仪, 采用 Kodak 101-01 型软 X 光胶片记录, 对不同靶材在不同打靶条件下进行测量, 并求出了部分元素的真实发射光谱。

一、实验条件

实验是在上海光机所 6 路高功率激光装置^[8]上完成的。激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$; 实验中将 6 路中的二、三路并成一路, 经一 $f/2$ 非球面镜和两种不同的柱面镜, 在靶面形成分别为 $1.58 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m} \times 20 \text{ mm}$ 的焦线, 相应的激光强度分别为 10^{13} W/cm^2 和 10^{12} W/cm^2 。

cm²。对后一种焦线,为了满足底片上的曝光要求,进行了累积打靶。

透射光栅光谱仪^[9]是带有 $\phi 50 \mu\text{m}$ 和 $\phi 25 \mu\text{m}$ 针孔的无支撑透射光栅,光栅常数为 $1 \mu\text{m}$, 摄谱范围 $0.5 \sim 15 \text{nm}$ 。为了使光谱仪的光谱和空间分辨达到最佳,适应于不同的物理要求,谱仪的探测位置也做了不同的安排。典型条件下,谱仪的光谱和空间分辨分别为 0.2nm 和 $60 \mu\text{m}$ 。

记录除了采用 Kodak 101-01 胶片外,还采用了改进型的 5F 医用 X 光胶片。定量计算中,我们采用 Henke 等人对 Kodak 101-07 的标定结果对 Kodak 101-01 测量的数据进行了处理^[10]。

实验中所使用的靶主要是铝、镁和硅的厚板靶,还用了铝膜平面靶和一种由铝箔压制成的半圆柱壳的槽型靶。

二、实验结果及讨论

2.1. 由实验光谱求解真实光谱的数值方法

由于透射光栅(PTG)同时具有光谱和空间分辨能力,且胶片对不同波长射线的响应也不同,实测的光谱外形十分复杂。我们认为,除了胶片的响应外,在 PTG 的色散方向上是光谱色散与源的像的叠加。Kishimoto 等人^[2]认为源的空间信息已包含在光谱分辨 $\Delta\lambda$ 中,从而采用了以 $\Delta\lambda$ 为间隔逐点叠代的方法; Pakula^[3]

在研究金空腔靶辐射时,虽然考虑到了像的宽度,但又完全忽略了高级谱的影响。下面给出一种同时考虑了高级谱的影响和光源展宽的叠代方法。

设有波长为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 的 n 条光谱线,光源分布函数为 $f_1(x, y), f_2(x, y), \dots, f_n(x, y)$, 如图 1 所示,如针孔的成像扭曲足够小,则在像平面上一点 (x', y') 处,全部光谱叠加后的总强度应为

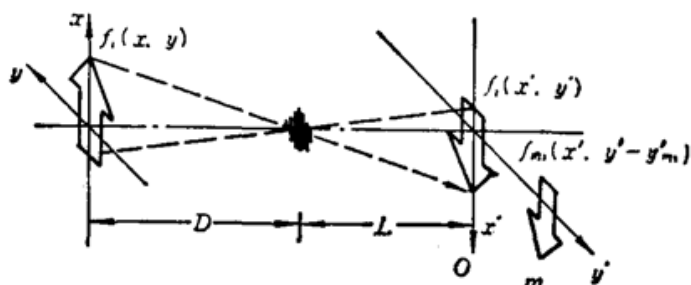


Fig. 1 An illustration of the diffraction and imagination of the pinhole transmission grating spectrometer. The original spatial profile $f_i(x, y)$ becomes $f_i(x', y' - y'_m)$, $x' = x L/D$, during the diffraction

$$I(x', y') = \sum_{m=1}^n \sum_{i=1}^n \eta_{im} I_i f_i\left(\frac{L}{D} x, y' - y'_m\right) \quad (1)$$

其中 D, L 都在图 1 中给出, $y'_m = \frac{mL}{d} \lambda_i$ 为第 i 条谱线的第 m 级色散;由于针孔同时具有成像的作用,故该谱线在这一位置上有与源分布相近的 $f_i(x', (y' - y'_m))$ 分布。 η_{im} 为光栅对第 i 条谱线的 m 级衍射效率, I_i 为谱线发射的峰值真实强度。以实测光谱的峰值强度 I_i 作为零级近似:

$$I_i^1 = \frac{1}{\eta_{i1}} \left[I_i - \sum_{m=1} \left(\sum_{i < l} \eta_{im} I_i^1 f_{mi}^l + \sum_{i > l} \eta_{im} I_i f_{mi}^l \right) \right]$$

这里忽略了由于像的互相叠加而造成的峰值漂移,并将 $i < l$ 的一级近似代入,以加速叠代的收敛。式中 $f_{mi}^l = (0, y'_i - y'_m)$ 。这样可以得到第一级光谱的第 j 级近似为

$$I_i^j = \frac{1}{\eta_{i1}} \left[I_j^{j-1} - \sum_{m=1} \left(\sum_{i < l} \eta_{im} I_i^j f_{m i}^l + \sum_{i > l} \eta_{im} I_i^{j-1} f_{m i}^l \right) \right] \quad (2)$$

若叠代收敛, 则

$$I_{ir} = \lim_{j \rightarrow \infty} I_i^j \quad (3)$$

2.2 胶片响应及光栅效率

为了解决由于像展宽而造成的不同波长的光谱线的叠加, 引入等效光强的概念。如胶片的乳剂特性为

$$D = G(I(\lambda)) \quad (4)$$

其中 D 为净黑度, I 为曝光流强。则对两个波长 λ_1, λ_2 的光强 I_1, I_2 , 如果产生的黑度相等, 即 $D_1 = D_2$, 可得

$$G(I_1, \lambda_1) = G(I_2, \lambda_2)$$

由此解得 I_1 与 I_2 之间的关系

$$I_1 = H(I_2, \lambda_1, \lambda_2) \quad (5)$$

这里我们就称波长为 λ_1 的 I_1 是波长为 λ_2 的 I_2 的等效光强。这样, 在(2)、(3)式的叠代中反复运用(5)式, 可以把不同波长的光统一到同一波长上。

光栅效率 η_m 采用 Shnopper 等人^[11]的理论公式, 有关常数取自文献[12]。

2.3. 光源空间分布的考虑

实际运算中, 这是最难于准确处理的问题。光源在胶片上的成像随着靶的几何结构和光栅的几何位置而变化, 而且在同一次打靶中, 不同波长的源的宽度也不一样。图 2 给出不同条件下的空间分辨的光谱和一维空间扫描迹。图 2(a)、(b)都是在 $1.58 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$ 辐照条件下, 光栅与激光束方向成 37° 角, 焦线和光栅条纹都在竖直方向上得到的光谱。(a)是平面铝箔靶, (b)则是带有半圆柱形槽。从图示中的空间扫描轨迹可以看出, (a)光谱中 K 带和 L 带的空间分布较为平缓, (b)中则由于槽的会聚作用在空间产生了一明显的峰。这两强光谱的共同特点是 L 带的空间分布明显大于 K 带。图 2(c)则是在 $20 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$ 辐照条件下的厚铝板的光谱。激光焦线和光栅条纹在水平方向, 离轴 53° 的光谱。这时可以清楚地看到等离子体柱在各光谱波长上的成像, 而空间扫描迹则给出了近于矩形的空间分布。(d)是在焦线轴上的镁板光谱, 焦线为 $1.52 \text{ mm} \times 100 \mu\text{m}$, 可以清楚地看到等离子体沿激光入射的反向的喷发, 而且在靶面附近, 由于临界面上等离子体密度的突变, 形成明显的高发射亮度层。这一层的厚度约为 $100 \mu\text{m}$ 。

可见要得出一般性的空间分布是很困难的。但由于我们选择的几何条件, 保证了色散方向光源线度维持不变, 而该方向源的分布基本上由激光强度的横向分布(一般为高斯形)决定; 尽管由于观察角度的不同, 会造成源分布复杂化, 这种影响与临界面上光谱的分布相比, 还是要小得多。因此, 在实际计算中, 我们取色散方向的源分布为高斯形, 其宽度由零级像宽决定, 且对各波长不变。

2.4. 光谱线选择

实验结果和理论计算都表明, 特征辐射在激光等离子体的 SXR 发射中占主要成份^[13, 14], 因此, 在计算中我们只考虑足够清晰的谱带结构。由于谱仪的低光谱分辨能力, 这样导致的误差是可以忽略的。

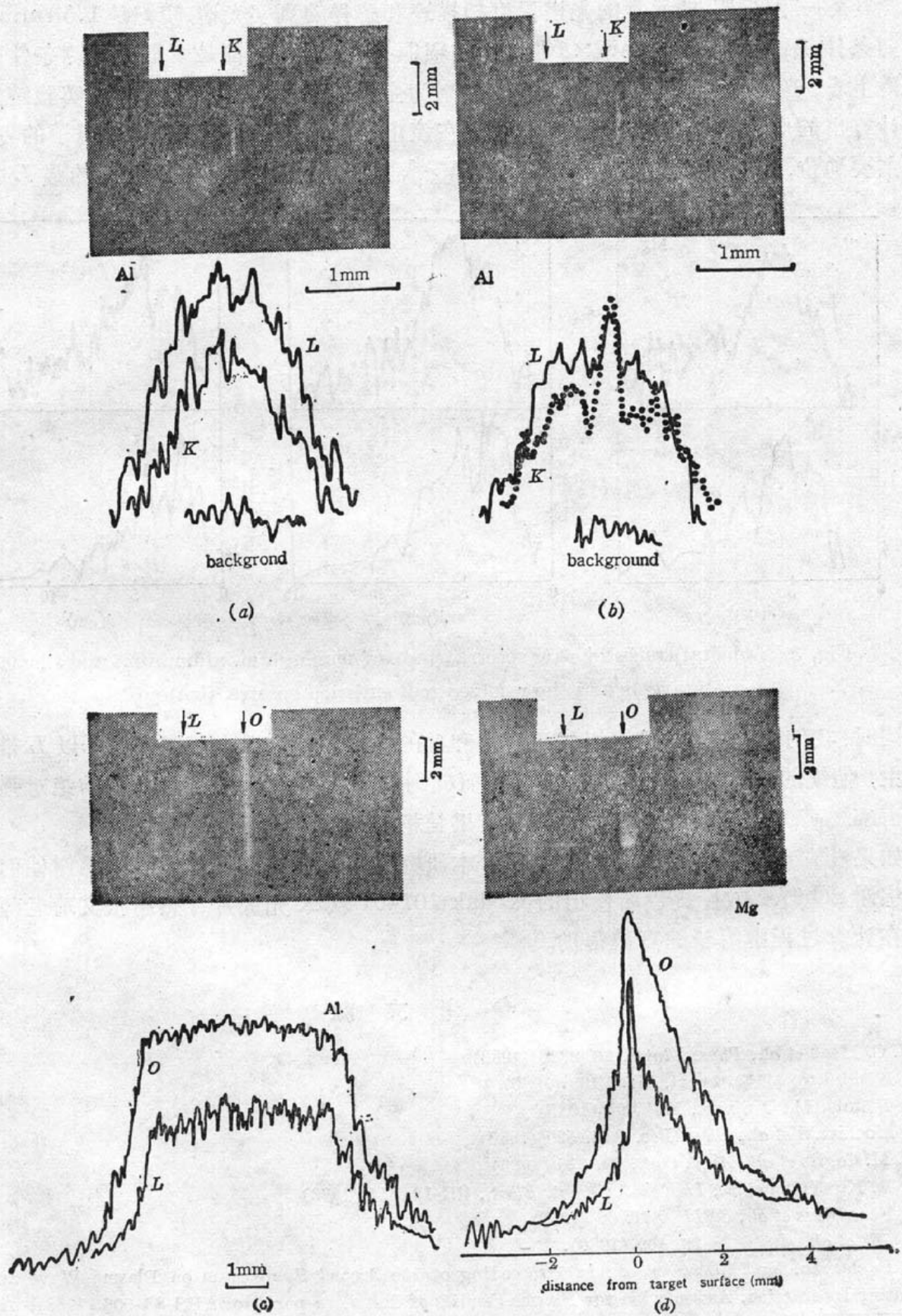


Fig. 2 Space-resolved spectra by TGS under different geometrical conditions and their spatial density traces. (a), (b) are aluminum planar and groove target, respectively. (d) is the on-axis spectrum of a slab magnesium target, and (c) the off-axis spectrum of an aluminum slab target

图3是一组镁、铝、硅元素的光谱黑度扫描迹和解得的真实光谱。镁靶是 $1.58\text{ mm} \times 100\ \mu\text{m}$ 的辐照条件,铝和硅则是 $20\text{ mm} \times 100\ \mu\text{m}$ 的辐照条件,三种靶都是厚板靶观测条件同图2(d)。从光谱上看,光谱呈带状分布,且L带的发射为主要成份。对于铝,我们对实验结果,用日冕平衡计算出的电子温度约为 $160\sim 180\text{ eV}$,在该电子温度范围内,铝的类锂离子的发射在光谱中占主要地位,光子能量范围为 $100\sim 400\text{ eV}^{[15]}$,从而形成图3(b)中所看到的强L带发射谱。

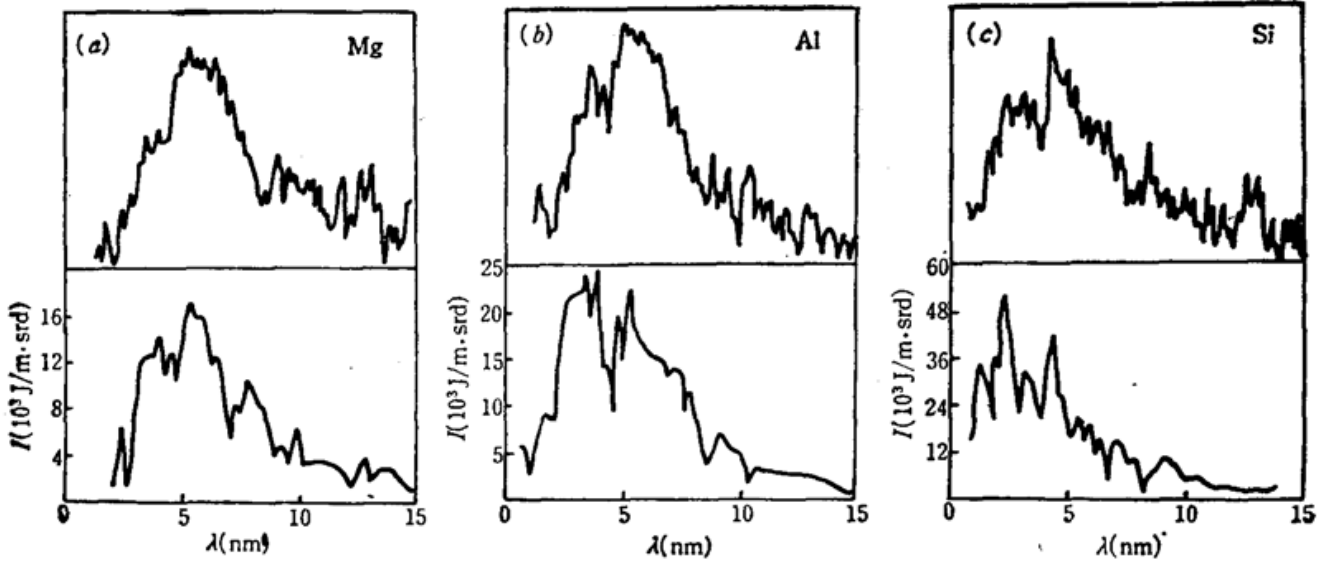


Fig. 3 Densitral traces of raw spectra (top) of magnesium, aluminum, and silicon slab targets and the resolved real emission spectra (bottom)

同时,我们还注意到,铝的相邻元素镁和硅的光谱虽然大致与铝差不多,以L带的特征发射为主,但镁的谱带中心向长波方向漂移而硅则向短波方向漂移。且硅谱的绝对强度比铝谱和镁谱都要高。这一结果与以前的研究结果是相吻合的^[2,4]。

如果没有6路工作人员的真诚合作,本研究是不可能的;在此,我们感谢他们的辛勤劳动。感谢 Schäfer 教授提供所使用的 Kodak 101-01 软 X 光底片。感谢张文琦老师和陈荣清博士在计算过程中给予的真诚帮助。

参 考 文 献

- 1 W. O. Mead *et al.*, *Phys. Fluids*, **26**, 2316 (1983)
- 2 T. Kishimoto, MPQ report, MPQ 108 (1985)
- 3 R. Pakula, MPQ report, MPQ 95 (1985)
- 4 T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev.*, **A33**, 525 (1986)
- 5 N. M. Ceglio *et al.*, *Appl. Opt.*, **22**, 318 (1983)
- 6 R. L. Kauffman *et al.*, *IEEE. J. Quant. Elect.*, **QE-19**, 616 (1983)
- 7 R. Fedosejevs *et al.*, *SPIE*, **831**, 66 (1987)
- 8 徐至展 *et al.*, *物理学报*, **29**, 439 (1980).
- 9 A. Pachtman, Xu Zhizhan *et al.*, in Proceeding of the Second Symposium on Plasma-Wave and Plasma-Matter Interaction, Association for Plasma Studies of China, re-port No. APS-88-006 (1988), paper D-1
- 10 B. L. Henke *et al.*, *J. Opt. Am.*, **B1**, 828 (1984)
- 11 H. Schnopper *et al.*, *Appl. Opt.*, **16**, 1088 (1977)
- 12 R. Tachyn and I. Lindau, *Low Energy X-Ray Diagnostics*, American Institute of Physics, New York (1981), p 323
- 13 J. Davis and K. G. Whitney, *J. Appl. Phys.*, **47**, 1426 (1976)
- 14 J. O. Gauthier, *SPIE*, **831**, 2 (1987)
- 15 D. Duston and J. Davis, *Phys. Rev.* **A23**, 2602 (1981)