

# 平场光栅谱仪相对衍射效率测量

黄文忠, 尤永录, 成金秀, 谷渝秋, 淳于书泰, 蔡玉琴

(中物院核物理与化学研究所, 四川绵阳 919-216 信箱, 621900)

**摘要:** 以激光碳等离子体作为软 X 射线源, 同时用平场光栅谱仪、常栅距光栅谱仪测量了类氢和类氦离子谱线强度, 以一级谱线强度为标准, 给出了平场光栅谱仪高级次光谱的相对衍射效率。

**关键词:** 平场光栅谱仪; 光谱测量; 衍射效率

**中图分类号:** TL817

**文献标识码:** A

在软 X 射线和远紫外光谱测量中, 掠入射光栅谱仪是一种应用非常广泛的仪器。其中, 常栅距凹球面光栅谱仪由于其谱面是一直径为光栅曲率半径的圆柱面, 不能与条纹相机等平面光电器件连接, 从而在数据的实时处理和时间分辨或空间分辨光谱测量中受到很大限制。而平场光栅谱仪 (FFS) 由于采用变栅距光栅作为色散元件, 其象面近似为一与其色散方向垂直的平面, 避免了常栅距球面光栅谱仪的不足, 因而自八十年代中期问世以来, 应用越来越广泛。但平场光栅谱仪的高级次衍射效应相当严重, 其高级次衍射光谱的存在增加了谱线辨认的难度, 如果将高级次光谱认定为新的谱线, 则将严重影响物理结果的准确性。因此, 测量平场谱仪的衍射效率有着重要意义。Edelstein 等分别以空心阴极管和 Henke 管发射的极紫外谱线为光源, 测量了 FFS 的一级光谱衍射效率<sup>[1]</sup>。Schwanda 等研究了 FFS 在 1~10nm 波长范围的衍射特性<sup>[2]</sup>。Saemann 标定了采用 2400/mm 光栅的 FFS 在 1~7nm 波长范围的绝对灵敏度<sup>[3]</sup>。以激光碳等离子体为软 X 射线源用 FFS 和常栅距光栅谱仪测量和辨认了类氢、类氦离子谱线, 并以部分谱线的一级衍射强度为基准测量了平场光栅谱仪的高级次光谱相对衍射效率。

## 1 实验方法

实验在“星光-II”装置上进行。由于激光碳等离子体谱线数目相对较少, 且其类氢和类氦离子谱线强度较大, 容易辨认, 其强线波长集中在 3~4nm, 是显微生物成象感兴趣的波长区域, 选择其作为标准谱线。打靶激光波长 1.06 $\mu\text{m}$ 、能量 4~10J、脉宽 600ps, 点聚焦打靶, 靶面激光功率密度约 10<sup>14</sup>W/cm<sup>2</sup>。为了得到较强谱线, 采用 3 发打靶积累记录方式。由于此前已测量了常栅距光栅谱仪高级次衍射光谱的相对衍射效率<sup>[4]</sup>, 实验中采用平场谱仪和常栅距光栅谱仪进行同时测量, 便于数据比对。平场光栅谱仪采用的光栅是机械刻划的象差校正光栅, 由日本日立公司制造。光栅尺度 30mm $\times$ 50mm $\times$ 10mm, 标准线间距 1200 line/mm, 在 50mm 的刻线宽度内刻线间距从 1015 line/mm 变化到 1449 line/mm, 闪耀角 3.2°, 表面镀金, 光栅曲率半径 5649mm。谱仪入射角 87°、狭缝宽 30 $\mu\text{m}$ 、至光栅距离 237mm, 光栅至底片距离 235mm。谱仪测谱范围 2~40nm, 常用范围 5~30nm, 闪耀波长 10nm。由于激光碳等离子体 XUV 光谱发射强度呈余弦分布, 谱仪光轴与靶面法向成 30°, 常栅距光栅谱仪位于靶

• 中国工程物理研究院科学基金资助课题  
1999年6月2日收到原稿, 1999年10月14日收到修改稿。  
黄文忠, 男, 1951年3月出生, 副研究员

面法向另一侧的相同方位。平场谱仪由 Q 干板记录,常栅距光栅谱仪由 Kodak SWR 软 X 射线底片记录。

## 2 谱线测量和辨认

谱仪衍射光路见图 1。入射到光栅的谱线按照光栅色散方程衍射到底片不同位置。光栅色散方程

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (1)$$

式中,  $m$  为谱线衍射级次;  $\lambda$  为入射谱线波长;  $d$  为光栅常数;  $\alpha$  为入射角;  $\beta$  为衍射角。波长一定的谱线经光栅衍射后在感光底片的位置  $x_i$  由图 1 可得

$$x_i = L_0 \cot\beta_i \quad (2)$$

其中,  $x_i$  为底片所记录的第  $i$  条谱线至零级谱距离;  $L_0$  为零级谱至光栅顶点距离。

原则上只要测得谱线距离  $x_i$  就可以由(2)式求出其衍射角  $\beta_i$ , 再由(1)式确定其波长,

但由于光栅刻划、谱仪机械加工精度等原因,按照以上方法求出的谱线波长误差较大。为此,我们采用式(3)确定谱线波长。

$$\lambda_i = F(x_i) + \sum A_j \Phi_j(x_i) \quad (3)$$

式中,  $F(x_i)$  表示由式(1)和(2)确定的位置函数;  $\Phi_j(x_i)$  为切比雪夫正交多项式,  $A_j$  为其系数。在确定  $A_j$  时,我们选取 CVI 2p-1s( $L_\alpha$ ), CVI 3p-1s( $L_\beta$ )和 CV 2p1s-1s<sup>2</sup>(He<sub>α</sub>)等三条自发辐射跃迁线及过去实验获得的四条 Ge XX III 3p-3s 激光线( $L_1, L_2, L_3, L_4$ )作为标准谱线确定  $A_j$ 。  $L_\alpha, L_\beta, He_\alpha$  谱线一至八级衍射光谱波长见表 1, 其一级谱线波长取自文献[5]。  $L_1$  波长 19.6nm,  $L_2$  波长 23.2nm,  $L_3$  波长 23.6nm,  $L_4$  波长 28.6nm。谱线位置由黑密度计扫描底片得到后,再由式(3)确定出各谱线波长。

当激光打靶功率密度较高时,有 CVI 的巴耳末系谱线存在。在谱仪的光谱分辨范围内, CVI 的巴耳末  $\beta$  线( $B_\beta$ )波长 13.49nm, 在底片位置与  $L_\alpha$  线第四级衍射光谱重叠, CVI 的巴耳末  $\gamma$  线( $B_\gamma$ )波长 12.08nm, 在底片位置与 He<sub>α</sub> 线第三级衍射光谱重叠。

表 1 谱线衍射光谱波长(nm)

Table 1 Diffraction spectral wavelengths(nm)

Order	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$L_\alpha$	3.373	6.747	1.012	13.49	16.87	20.24	23.61	26.99
$L_\beta$	2.847	5.693	8.540	11.39	14.23	17.08	19.93	22.77
He <sub>α</sub>	4.027	8.054	12.08	16.11	20.13	24.16	28.19	32.21

某一谱线强度根据该谱线的底片感光黑度确定。Q 干板属于厚乳胶型感光材料,光学密度与强度关系为

$$D = \ln(1 + CI)D_s \quad (4)$$

式中,  $D$  为密度;  $C$  为常数;  $I$  为强度;  $D_s$  为饱和密度。Q 干板采用 D19 显影, F5 定影。显影时间 4min, 定影时间 10min, 然后水洗 30min, 显影温度 20℃。在确定谱线强度时, 首先用黑密度计

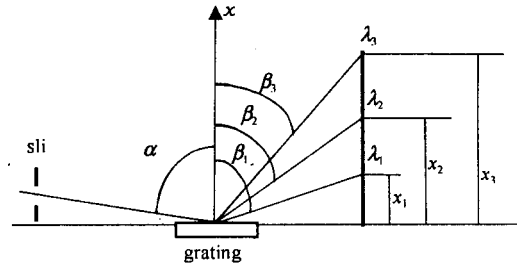


Fig. 1 Scheme of the flat-field spectrograph

图 1 谱仪衍射光路

分别测出某一谱线位置的总黑度  $D_0$  和该谱线位置的本底黑度  $D_b$ ，然后通过底片响应曲线转换为总强度  $I_0$  和本底强度  $I_b$ ，该谱线强度则为

$$I = I_0 - I_b \tag{5}$$

## 2 结果和讨论

图 2 是测得的谱线，图 3 是其微密度计扫描径迹。从图 2 可知， $L_\alpha$  跃迁线的第一至第八级光谱清晰可见，而  $L_\beta$  跃迁线和  $He_\alpha$  谱线由于强度关系，其高级衍射谱要弱一些，我们只能辨认出  $L_\beta$  线第一至第六级光谱和  $He_\alpha$  线的第一至第五级衍射光谱。在测得的谱图中还出现了波长 18.22nm 的谱线，它是  $B_\alpha$  线，属于 CVI 的  $2p-3s$  跃迁，因而同属于 CVI 巴尔末系的  $B_\beta$  和  $B_\gamma$  线也有可能存在。由于  $L_\alpha$  线第四级衍射光谱与  $B_\beta$  线重叠， $He_\alpha$  线第三级衍射光谱与  $B_\gamma$  线重叠，在根据该波长谱线强度确定相应光谱级次的衍射效率时要去除  $B_\beta$  线和  $B_\gamma$  线的强度。常栅距光栅谱仪的高级次光谱衍射效率较低， $L_\alpha$  线的第四级衍射光谱可以忽略，其它光谱级次的相对衍射效率已进行测量<sup>[4]</sup>。我们以常栅距光栅谱仪测量结果分别确定  $B_\alpha$  线和  $B_\gamma$ 、 $B_\beta$  线的强度比，然后在 FFS 测量结果中，根据 FFS 测得的  $B_\alpha$  线强度和由常栅距光栅谱仪测得的  $B_\alpha$  线和  $B_\gamma$ 、 $B_\beta$  线的强度比确定  $B_\gamma$  和  $B_\beta$  线强度，最后在测得的 12.08nm 谱线强度中减去  $B_\gamma$  线强度得到  $He_\alpha$  线的第三级衍射光谱强度，在 13.49nm 谱线强度中减去  $B_\beta$  线的强度即为  $L_\alpha$  线的第四级衍射光谱强度。

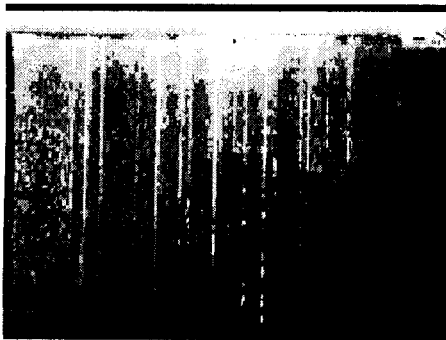


Fig. 2 Spectra of laser-produced C-plasma on a Q-plate

图 2 测量结果

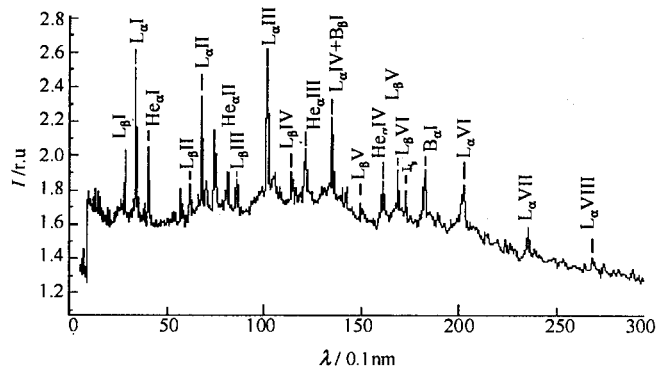


Fig. 3 Densitometer trace of carbon spectra

图 3 激光碳等离子体谱的微密度计扫描径迹

表 2 以上述三条跃迁线各自的一级谱线强度为基准，给出了平场光栅谱仪高级次光谱的相对衍射效率。从表 2 可知，平场光栅谱仪的高级次衍射光谱分布较宽， $L_\alpha$  线的第八级衍射光谱强度仍可达到第一级光谱强度的 10%，越接近闪耀波长，其相对衍射效率越高，但高级次光谱衍射效率均低于一级光谱效率。谱线波长不同，各光谱级次的衍射效率也不同。各高级次光谱中， $L_\alpha$  线的第 III 级光谱衍射效率相对最高，是一级光谱效率的 0.87； $L_\beta$  线的第 IV 级光谱衍射效率相对最高，为一级光谱效率的 0.86；而  $He_\alpha$  线的第 II 级光谱衍射效率相对最高，是一级光谱效率的 0.74。

目前我们只测量了以第一级光谱强度为标准的各级光谱的相对效率。在有条件时，尚需测量各级光谱的绝对效率和零级光谱强度。底片黑度和光学强度关系式(4)适用于线性区，当底片黑度太低时，其与强度关系式(4)有一定偏离。

表 2 平场谱仪相对衍射效率

Table 2 Relative diffraction efficiency of the flat-field spectrograph

Order	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$L_{\alpha}$	1	0.73	0.87	0.66	0.52	0.48	0.17	0.11
$L_{\beta}$	1	0.47	0.75	0.86	0.58	0.51		
$He_{\alpha}$	1	0.74	0.65	0.49	0.25			

致谢 张启仁副研究员处理了部分实验数据。

### 参考文献

- 1 Edelstein J, Hettrick M C, Mrowda S, et al. *Appl Opt*, 1984, 23:3267
- 2 Schwanda W, Eidmann K, and Richardson M C. *J X-ray Sci Technol*, 1993, 4:8
- 3 Saemann A and Eidmann K. *Rev Sci Inst*, 1998, 69(5):1949
- 4 黄文忠, 蔡玉琴, 谷渝秋, 何颖玲. 强激光与粒子束, 1997, 9(4):525
- 5 Kelly R L. Atomic and ionic spectrum lines below 2000 angströms, hydrogen through argon. ORNL-5922, 1982

## RELATIVE DIFFRACTION EFFICIENCY MEASUREMENT OF FLAT-FIELD SPECTROGRAPH

HUANG Wen-zhong, YOU Yong-lu, CHENG Jin-xiu, GU Yu-qiu, CUNYU Shu-tai, CAI Yu-qing  
Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 919-216 Mianyang, Sichuan 621900

**ABSTRACT:** The spectral intensities are measured using a flat-field grating spectrograph and a equally spaced grooves grating spectrograph with a laser-produced C-plasma as a soft X-ray source. The efficiencies on different diffraction orders are given relative to the first order.

**KEY WORDS:** flat-field grating spectrograph; spectra measurement; diffraction efficiency