

用于激光等离子体实验的 X 光晶体谱仪

卢仁祥 毛楚生 殷光裕 申怀椿
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

在激光等离子体实验中,用晶体谱仪可获得高温等离子体所发射的 X 光谱。本文介绍我们设计和使用的 X 光晶体谱仪的原理、结构及晶体衍射参数,谱仪的线色散率,谱线加宽和谱仪窗口等有关参数,并给出了摄谱的典型结果。

一、原理和结构

高功率激光聚焦打靶可以获得线度在 100 微米左右的高温高密度等离子体,产生功率极大的脉冲 X 射线。这种 X 射线的谱分布携带着有关激光等离子体电子温度、电子密度、离化丰度比及离化温度等大量信息^[1~3]。X 光晶体谱仪就是研究这种谱分布(主要是线辐射和复合辐射)的重要实验仪器。

这种晶体谱仪是根据布拉格衍射原理: $2d \sin \theta = n\lambda$, 设计的,式中 d 为晶面间距, θ 为衍射角, λ 为衍射波长, n 为衍射级数。 n 一般取为 1, 当 $n=2$ 时, 衍射强度下降差不多一个数量级^[4]。

在靶球和谱仪晶体之间放置一个与波长色散方向平行的狭缝, 可获一维空间分辨的时间积分谱。图 1 是空间分辨谱仪衍射摄谱示意图。所设计的 X 光晶体谱仪, 均可更换衍射晶体而获得不同的谱段复盖。表 1 为 X 光晶体谱仪的一般参考。TIAP 晶体衍射效率较高, 但晶体加宽也严重。为扩展摄谱波段, 可使用曲率半径为 75 mm 的凸晶。

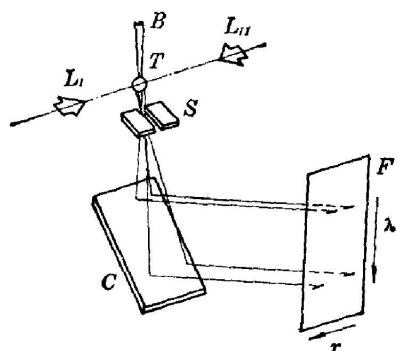


图 1 空间分辨谱仪示意图

L_I, L_{II} —激光束 I, II; B—支承杆;
T—靶; S—狭缝; C—晶体; F—底片

Fig. 1 Schematic of the
space-resolved spectrograph

L_I, L_{II} —Laser beam I, II; B—support;
T—target; S—slit; C—crystal; F—film

表 1 X 光晶体谱仪的一般参数

Table 1. General parameters of X-ray crystal spectroscopy

晶 体	晶面指数	$2d(\text{\AA})$	晶体大小	摄谱范围 (\AA)	谱仪色散率 ($\text{mm}/\text{\AA}$)	谱仪分辨率 $\left(\frac{\lambda}{\Delta\lambda}\right)$	备 注
TIAP	[100]	25.78	48×10.5×1.5	4.5~15	3.01	1.67×10^3	点源到底片距离约为 70~75 mm
PET	[002]	8.76	38×10.5×1.5	4~7.5	12.3	1.27×10^3	
KAP 凸晶	[100]	26.60	42×10.5×0.1	4.5~25	2.91	2.22×10^3	

收稿日期: 1981年7月21日, 收到修改稿日期: 1982年2月3日

二、晶体参数和谱仪色散

分光晶体是 X 光晶体谱仪的关键部件, 影响衍射的晶体主要参数是 W 、 P 、 R (W 是曲线的半高宽, P 是峰值衍射系数, R 是积分反射系数)。表 2 列出了几种晶体摆动曲线的实测结果。实验是在双晶衍射仪上进行的。测试用的 X 射线是 Cu 的 K_{α} 线 ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$)。表中最后一栏 $\Delta\%$ 表示晶体不同部位相对衍射强度的变化, 反映了衍射的均匀性。晶体的衍射特性还随测试所用的波长而有所变化。为了适应 X 光摄谱的需要, 应仔细挑选衍射强度高, 半宽度窄、衍射均匀性好的晶体。

表 2 仪器所用晶体的参数

Table 2 Parameters of crystal for apparatus

晶 体	$P(\%)$	$R(\text{rad.})$	$W(\text{sec})$	$\Delta(\%)$
PET	55	6.8×10^{-5}	19	9
KAP	31	4.6×10^{-5}	24	11
TIAP	64	12×10^{-5}	33	9

由晶体部分决定的谱仪分辨率 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$, 与晶体的质量有关, 从衍射基本公式出发, 有:
 $\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\text{tg } \theta}{\Delta\theta}$, 式右方的 $\Delta\theta$ 即为前述的半宽度 W 。

从晶体谱仪的线色散率及分辨率的表达式可知, 当 θ 增大时, 这两者均增大, 因而选用晶体的 $2d$ 尽可能接近于所摄波长是有好处的。但也须注意, 当 θ 增大, 特别当 $\theta > 60^\circ$ 时, 衍射强度将逐渐减弱^[4]。

三、仪器加宽

仪器加宽包括晶体加宽和源加宽两种, 表 3 列出了 KAP 和 TIAP 平晶谱仪的加宽特性。表中第一栏引用 X-3F 谱仪鉴定报告中的数据, 由于使用凹晶而产生应力, 从而增大了谱线的加宽, 即晶体加宽, 表中第二栏是实测的, 从理论上讲, 如果不计偏振, 对同一块晶体, $\lambda/\Delta\lambda$ 的数值与 λ 无关, 允许将某一波长的测量值 $\lambda/\Delta\lambda$ 外推到另一波段。由于等离子体有限的空间线度也会造成谱线加宽, 即源加宽, 它由平行于色散方向的源的大小所决定, 即由底片对源的张角所决定。例如, 对靶点 $\phi 70 \mu\text{m}$ 的光源, 源到底片的间距为 70 mm, 张角为 0.001 (rad), 这样, 源加宽: $\Delta\lambda/\lambda = \Delta E/E = \Delta\theta/\text{tg } \theta = 2.38 \times 10^{-3}$ (当 $\lambda = 10.03 \text{ \AA}$ 时), 相应地 $\Delta E = 2.95 \text{ eV}$ 。

当谱线的物理加宽(斯塔克加宽, 多普勒加宽, 失透加宽和自然加宽等)很小时, 就可以用它来代表仪器的加宽。例如, 我们以大功率激光轰击薄壁玻壳微球靶时, 往往可以把 Na 的 $1s-2p$ 类氢共振线作为仪器加宽来加以考察, 因为 Na_2O 在玻璃中只有 4% 的重量百分比, $1s-2p$ 的斯塔克加宽又小, 因而 Na 的 $1s-2p$ 谱线是光学薄的, 大体上代表了仪器的加宽。

表 3 平晶谱仪加宽及等离子体实验数据

Table 3 Broadening from the spectrograph and measured data from plasma experiment

		晶 体 加 宽					
		Mg K_{α} ($\lambda=9.98 \text{ \AA}$)	Cu K_{α} ($\lambda=1.54 \text{ \AA}$)	$\lambda=10.03 \text{ \AA}$ Na ($1s-2p$)		$\lambda=6.65 \text{ \AA}$ Si ($1s^2-1s2p$)	
KAP	$\Delta\lambda/\lambda$	1.86×10^{-3}	1.94×10^{-3}	$\phi 70 \mu\text{m}$ 源加宽	实测半高宽	$\phi 35 \mu\text{m}$ 源加宽	实测半高宽
	$\Delta E(\text{eV})$	2.3	15.6	—	—	—	—
TlAP	$\Delta\lambda/\lambda$	2.9×10^{-3}	2.6×10^{-3}	2.38×10^{-3}	2.6×10^{-3}	1.8×10^{-3}	2.38×10^{-3}
	$\Delta E(\text{eV})$	3.6	21	2.95	3.2	3.36	4.43

四、谱仪窗口和 X 光底片

在摄谱时为了滤去可见光, 必须在 X 光底片暗匣前挡上窗口薄膜。由于感兴趣的波段在软 X 光区, 一般可以采用三种窗口薄膜:

(1) **Mylar 膜** ($\text{C}_{10}\text{H}_8\text{O}_4$) 也叫涤纶薄膜, 厚 $4 \mu\text{m}$, 蒸镀 4000 \AA 铝膜, 适于波长 $< 7.5 \text{ \AA}$ 的 X 光。

(2) **Formvar 膜** ($\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2$) 厚约 500 \AA , 蒸镀 4000 \AA 铝膜, 适用于波长 $> 7.5 \text{ \AA}$ 的 X 光。Formvar 膜的制造及脱膜工艺是很精细的, 可参考文献[6]。

(3) **铝箔** 现有厚度为 $25 \mu\text{m}$ 及 $50 \mu\text{m}$ 两种。

镀铝有机薄膜不可避免地都有很小的漏光砂眼, 用两层膜迭在一起使用, 大体可以消除漏光。

图 2 是这几种薄膜对 $1 \sim 18 \text{ \AA}$ 的 X 射线透过率曲线, 图中在 7.95 \AA 处曲线跳跃是铝的 K 吸收边引起的, 曲线“FA”和“MA”分别是镀 2000 \AA 铝的 Formvar 膜 (500 \AA) 和镀 4000 \AA 铝的 Mylar 膜 ($4 \mu\text{m}$) 的透过率, 其余二条曲线厚度是为 $25 \mu\text{m}$ 和 $50 \mu\text{m}$ 的铝箔的透过率曲线。

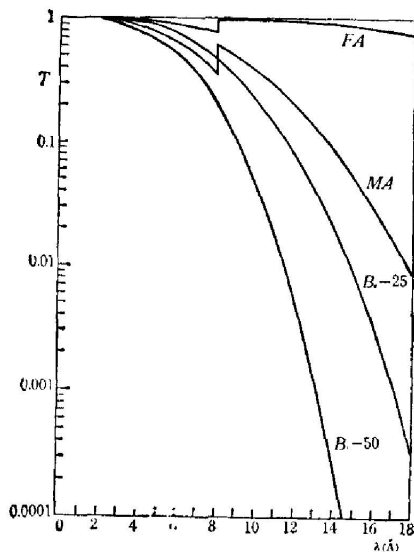


图 2 三种薄膜在软 X 射线区域的透过率

Fig. 2 Transmissions of three foils in soft X-ray region

我们在实验中先后用过上海、天津、汕头感光胶片厂生产的各种感光底片, 也用过进口的 Agfa Gevaert X 光底片, 结果表明 Agfa 底片灵敏度最高。为了从底片的黑度求出 X 光的强度, 开展了 X 光底片的标定工作, 先后曾用放射性源, 低压大电流 X 光机以及在激光等离子体摄谱时于暗匣前加阶梯衰减薄膜的方法获得了一些底片的特性曲线。为了减少 X 光光度测量中的误差, 应保持严格一致的显影条件。

五、摄谱典型结果

用 4.5~15 Å 范围内的 KAP 或 TLAP 平晶谱仪已拍摄到硅、氧、钠、铜等高价离子的 X 光线谱。图 3 就是用 TLAP 晶体谱仪所摄玻璃微球靶的积分 X 射线谱及一段连续谱, 从中可清晰地看到 Na, Si 的类氢、类氦高价 X 光线谱及它们的一维空间分布。图 4 是对应于图 3 中积分线谱的黑度扫描曲线。图 5 是 PET 晶体谱仪所摄硅的类氦线组的照片及黑度计扫描曲线, 可见 TLAP 晶体谱仪不易分辨出硅的类氦谱线及互组合线, 在这里已清晰地分开来了。此外, 还出现了一些新的伴线组。

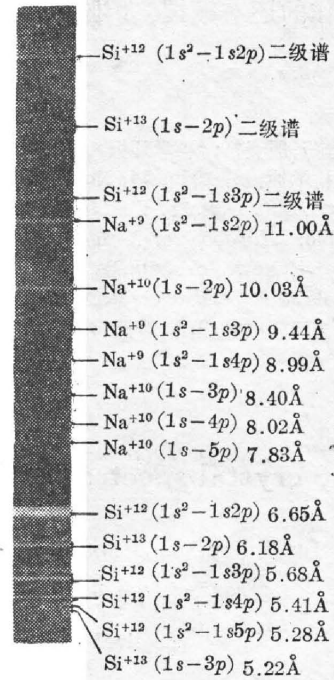


图 3 硅和钠 X 光高价离子积分线谱

Fig. 3 X-ray spectra of multiply-charged of Si and Na

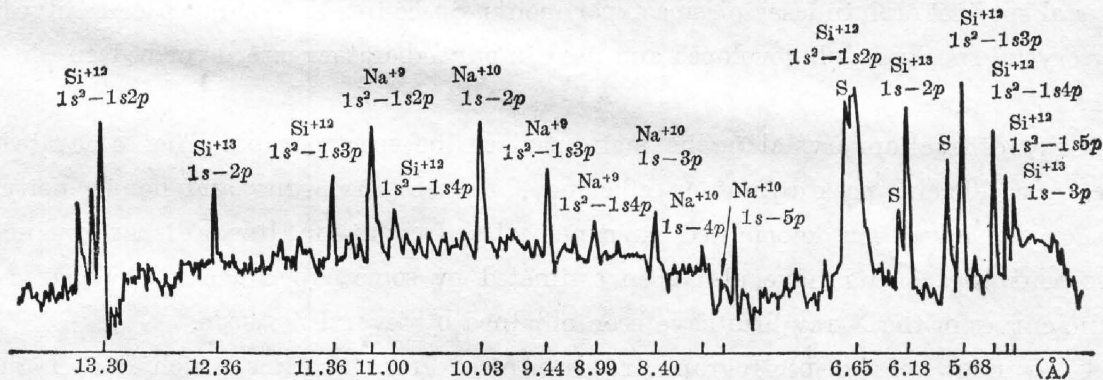


图 4 对应于图 3 中积分谱线的黑度扫描曲线

Fig. 4 Space-integrated spectra of He-like and H-like ions of sodium and silicon

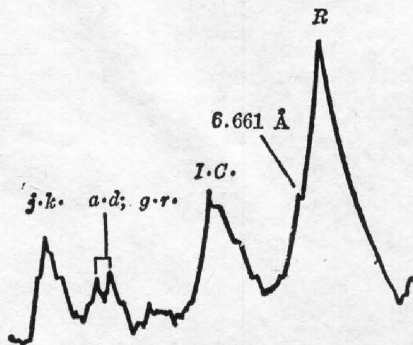


图 5 用 PET 晶体谱仪所摄的硅的类氦线组
 R—6.647 Å; I, C—6.688 Å; j—6.744 Å; k—6.741 Å;
 q—6.718 Å; r—6.720 Å; a, d—6.726 Å

Fig. 5 X-ray group of He-like of Si-ion with PTE flat crystal spectrograph

参加本工作的还有顾援、龚维燕、范品忠和徐钦敏等同志。

参 考 文 献

- [1] 卢仁祥、龚维燕、殷光裕;《科学通报》, 1979, **24**, No. 22 (Nov), 1013.
- [2] 曹谓楼等;《科学通报》, 1979, **24**, No. 17 (Sep), 782.
- [3] 卢仁祥等, 《ICL'80 Digest of Technical Papers》, (May, 1980), 21.
- [4] E. F. Kaelble; 《Handbook of X-rays for Diffraction, Emission, Absorption and Microscopy》, (McGraw-Hill Book Company, New York, 1967).
- [5] M. C. Wittels *et al.*; 《Advances in X-ray Analysis》, (Plenum Press, New York, 1964), **7**, 256.
- [6] 林天辉等;《物理学报》, 1978, **27**, No. 3(May), 276.

X-ray crystal spectrograph for the laser-plasma experiments

LU RENXIANG MAO CHUSHENG YIN GUANGYU AND SHEN HUAICHUN

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

(Received 21 July 1981, revised 3 February 1982)

Abstract

X-ray spectral lines emitted by high temperature plasma can be taken by means of crystal spectrograph in laser-plasma experiments. Space-integrated and space-resolved x-ray crystal spectrograph developed and used in our laboratory are described in this paper.

X-ray diffraction crystal is the main part of the spectrograph. The integrated reflection coefficient, peak diffraction efficiency, crystal broadening and homogeneity of the crystal have been determined experimentally. In addition, linear dispersion and instrument broadening have also been estimated by some experiments. The characteristic curves of the X-ray film have been obtained by several methods.

The windows of the spectrograph are aluminized Formvar films which have high transmission in soft X-ray region. This is one of the distinguishing features of our spectrograph. Some typical space-integrated and space-resolved spectra of He-like and H-like ions of sodium and silicon in $5\sim 13\text{ \AA}$ obtained in our experiments are presented in the end of this paper.