

# 激光产生的铝、硅、氧、铜、硒 等离子体 X 光谱

冯贤平 徐至展\* 范品忠 陈时胜

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

关 铁 堂

(福州大学化学系)

## 提 要

利用长晶格的 OHM 晶体谱仪,从激光等离子体中获得丰富的铜、硒类氦、类氟、类钠离子的二、三、四级软 X 射线衍射光谱和铝、氧、硅的类氢、类氦、类锂离子一到四级谱,波长在  $14\sim 40\text{ \AA}$  之间,在此基础上,本文较为仔细地分析了各光谱结构。

关键词: 等离子体; X 射线光谱。

激光等离子体中高阶电离离子光谱一直是人们感兴趣的课题。这不仅因为它的光谱结构与等离子体物理特性有着密切的联系,从此可对各种等离子体进行诊断外<sup>[1]</sup>,还在于高阶离子是最有希望的 X 射线激光介质<sup>[2]</sup>。故进一步加强对这一领域的研究显得极为重要。

但是,迄今发表的激光产生等离子体发射及其诊断的 X 射线光谱大都集中在  $\leq 15\text{ \AA}$  区域,对于  $15\sim 60\text{ \AA}$  区域之间的软 X 射线谱,虽有透射式或掠入射式光栅光谱仪可以进行诊断,然而由于这两种光谱仪对上述区域的软 X 射线光谱分辨率较低且制作困难等原因,目前的光谱分析工作开展甚少,基于上述原因,我们采用福州大学提供的长晶格 OHM 晶体作为软 X 射线的分光元件,较为系统地诊断并分析了几种元素的激光等离子体辐射,得到了丰富的铜、硒、类氦、类氟离子光谱线和铝、氧、硅等离子体的类锂、类氦、类氢离子发射的 X 射线谱。

实验是在上海光机所“六路”大功率钽玻璃激光器上进行的,最大输出能量  $10\text{ J}$ ,脉宽为  $100\text{ ps}$  的钽玻璃激光经口径  $\phi 60\text{ mm}$ ,焦距  $90\text{ mm}$  的非球面透镜聚焦在各种平面靶上,靶面功率密度约为  $5\times 10^{14}\text{ W/cm}^2$ 。

实验时激光靶室气压为  $10^{-3}\text{ Torr}$ ,各元素的激光等离子体 X 射线光谱采用一台 TLAP 晶体谱仪(晶格常数  $2d=25.78\text{ \AA}$ )和一台 OHM 晶体谱仪(晶格常数  $2d=63.5\text{ \AA}$ )拍摄,目的是为了获得更广范围的激光等离子体 X 射线光谱,同时对二台谱仪的性能进行比较。实验安排如图 1 所示。

图 2 就是利用 TLAP 晶体谱仪拍摄到的铝激光等离子体 X 射线光谱,经过对图中的各条光谱进行辨认和分析,作者认为它们主要是由铝的类氢、类氦、类锂离子激发态上的电子向基态跃迁发射的辐射,其波长在  $4\sim 8\text{ \AA}$  之间。

收稿日期: 1988年1月30日; 收到修改稿日期: 1988年11月2日

\* 中国高等科学技术中心凝聚态与辐射物理分中心,北京。

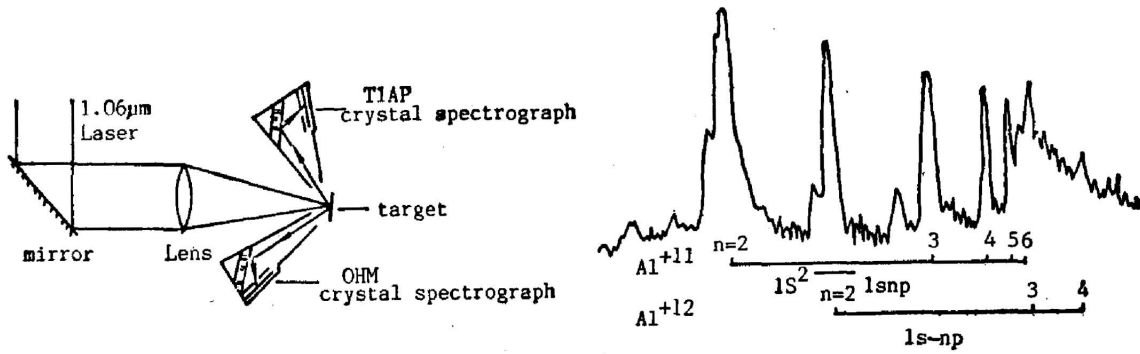


Fig. 1 Schematic of the experimental set up for taking the X-ray spectrum of laser plasma

Fig. 2 Microdensitometer tracing from Al PLX first order diffraction spectrum

图 3、图 4、图 5 和图 6 分别是利用 OHM 晶体谱仪所拍摄到的铝、玻璃、铜和硒元素的激光等离子体 X 射线光谱所对应的黑度扫描曲线, 其中  $K$  表示光谱衍射级。

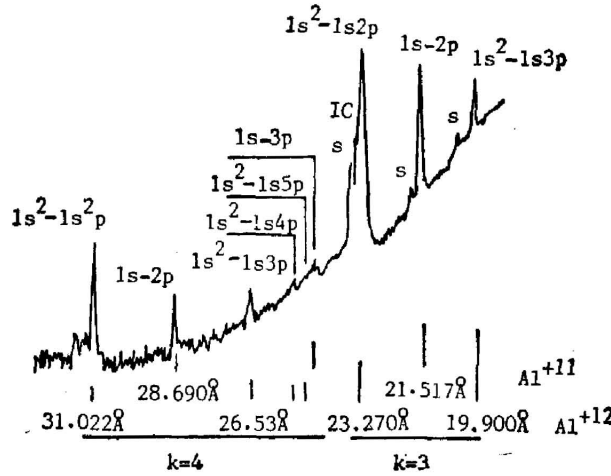


Fig. 3 Microdensitometer tracing from Al PLX multi-order diffraction spectrum

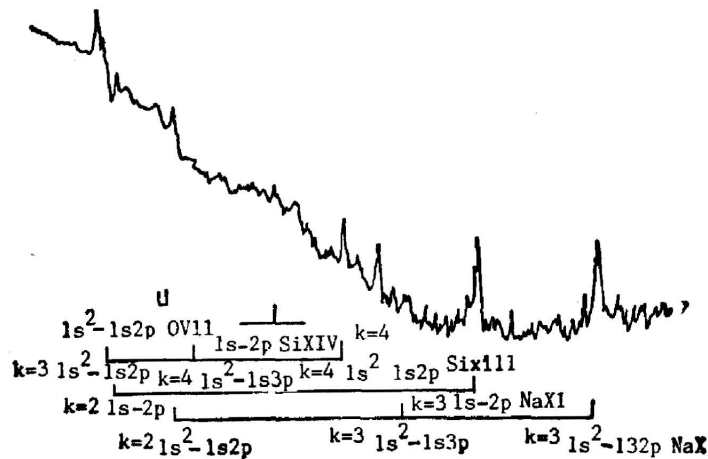


Fig. 4 Microdensitometer tracing from glass PLX multi-order diffraction spectrum

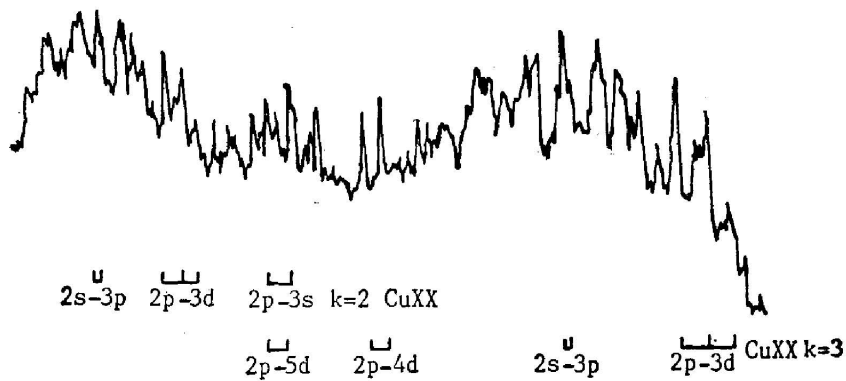


Fig. 5 Microdensitometer tracing from Cu PLX multi-order diffraction spectrum

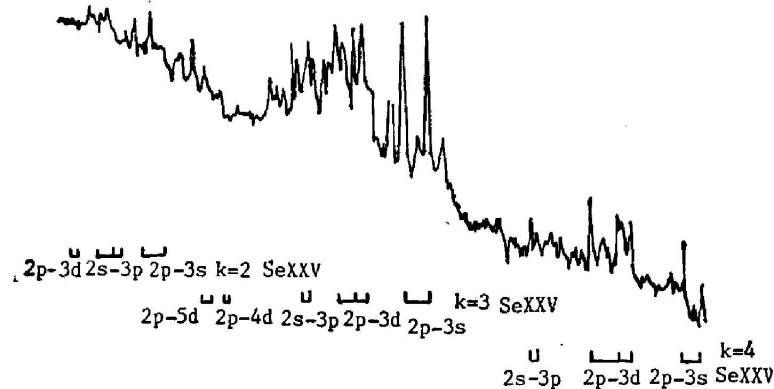


Fig. 6 Microdensitometer tracing from Se PLX multi-order diffraction spectrum

用类似于文献[4]的辨认方法对图3~图6光谱曲线进行辨认和测量,表1列出各图线谱所对应的离子、光谱项、衍射级和波长,与文献[5]的理论结果作比较,表中最大误差不超过0.3%。

对图3~图6黑度扫描曲线及表1的结果分析,发现在 $15\sim 40\text{ \AA}$ 区域存在着多级衍射,对铜、硒元素的激光等离子体X射线,主要有类氦、类氟、类氧离子的二到四级衍射谱,对于低Z系列的激光等离子体X射线谱,有钠离子的二级谱,氧离子的一级谱及铝、硅离子的三、四级衍射谱,它们主要由类氢离子的 $1s-2p$ ,类氦离子的 $1s^2-1s2p$ , $1s^2-1s3p$ , $1s^2-1s4p$ 及伴线和类锂离子的 $1s^22p-1s2p3p$ 能级间电子跃迁产生的,由于这些光谱的波长较短,对挡光铝膜透过率大,故在底片上反映出的信噪比很好。

各级衍射光谱的强度分布极为不同,由图3、图4表明三级谱比四级的强约3~2倍左右,而从图5、图6又可发现三级衍射谱强度比二级的约大1.4倍左右。对于背景连续谱,二阶衍射谱位置处的连续谱强度最强,其次是三级谱和四级谱。此外,分析整个光谱发现,衍射级数越高,光谱的分辨力也就越大。这点可从图3铝的类氦离子 $1s^2-1s2p$ 线三、四级衍射附近的光谱(伴线)比较或从图5类氦离子 $2p-2d$ 线二、三级衍射附近的光谱比较中看出。

在 $15\sim 40\text{ \AA}$ 波段的等离子体X射线中,图4氧的类氦离子 $1s^2-1s2p$ 能级的电子跃迁,发射的一级软X射线半宽度较大而强度较弱,这主要是由于窗口铝膜对波长较长的软X射线吸收效应所致。对图6长波区域的软X射线分析,可以推断它们也是由硒离子的一级谱形成的,分析中没有发现它们有 $(1/4)$ ,  $(1/3)$ 和 $(1/2)$ 倍波长对应的电子能级跃迁,但真正确定这些线还有待于进一步的实验分析。

Table 1 Parameters of elements LPX spectrum

ion	states	$K=1, \lambda(\text{Å})$	$K=2, \lambda(\text{Å})$	$K=3, \lambda(\text{Å})$	$K=4, \lambda(\text{Å})$
Al XIII	$1s-2p$	7.173		21.517	28.690
Al XII	$1s^2-1s2p$	7.757		23.270	31.022
Al XII	$1s^2-1s3p$	6.635		19.900	26.53
Al XI	$1s^22p-1s2p3p$	6.808		20.424	
Si XIII	$1s^2-1s2p$	6.65		19.951	26.597
Si XIII	$1s^2-1s3p$	5.68			22.360
Si XIV	$1s-2p$	6.182			24.301
Na X	$1s^2-1s2p$	11.000	22.060	32.985	
Na X	$1s^2-1s3p$	9.430		28.340	
Na XI	$1s-2p$	10.025	20.080	30.091	
O VII	$1s^2(1s)-1s2p(1p)$	21.60			
O VII	$1s^2(1s)-1s2p(3p)$	21.80			
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3s]_1$	12.830	25.641		
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 3s]_1$	12.572	25.120		
Cu XX	$2s^2Dp^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3d(2D_{3/2})]_1$	11.738	23.456	35.214	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3d(2D_{5/2})]_1$	11.594	23.211	34.767	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 3d(2D_{5/2})]_1$	11.382	22.764	34.141	
Cu XX	$2s^22p^6-[2s2p^63p(2p_{1/2})]_1$	10.647	21.290	31.942	
Cu XX	$2s^22p^6-[2s2p^63p(2p_{3/2})]_1$	10.592	21.193	31.800	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 4d(2D_{5/2})]_1$	9.230		27.611	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 4d(2D_{5/2})]_1$	9.103		27.240	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 5d(2D_{5/2})]_1$	8.437		25.105	
Cu XX	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 5d(2D_{5/2})]_1$	8.320		24.950	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3s]_1$	8.615	17.230	25.848	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 3s]_1$	8.374	16.763	25.129	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3d(2D_{3/2})]_1$	7.967	15.912	23.900	31.855
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 3d(2D_{5/2})]_1$	7.874	15.749	23.634	31.476
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 3d(2D_{5/2})]_1$	7.685	15.366	23.070	30.771
Se XXV	$2s^22p^6-[2s2p^63p(2p_{1/2})]_1$	7.294	14.590	21.890	29.181
Se XXV	$2s^22p^6-[2s2p^63p(2p_{3/2})]_1$	7.243	14.486	21.731	28.966
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 4s]_1$	6.368		19.120	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 4s]_1$	6.322		19.013	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{3/2}), 4d(2D_{5/2})]_1$	6.201		18.671	
Se XXV	$2s^22p^6-[2p^5(2p_{1/2}), 4d(2D_{5/2})]_1$	6.078		18.274	

除了上述 15~40 Å 光谱处,利用长晶格 OHM 晶体谱仪也可得到更短范围的一级衍射谱,但其衍射角较小,表现为底片上的谱线较为密集,一般用 TLAP 或 PET 晶体谱仪拍摄可克服这个问题。对于更长的 40~60 Å 光谱,本实验原则上是可行的。

挡光膜吸收的影响是本实验的主要问题,作者曾以理论估计,当挡光膜是由 1000 Å 厚的 Formuar 膜和 4000 Å 厚的铝膜组成时,30 Å 的软 X 射线光强度吸收是 8 Å 光的 20 倍左右,可见窗口膜对长波软 X 射线吸收的严重性,但如果改用掠入射光栅谱仪和透射式光栅谱仪拍摄 40~60 Å 的激光等离子体 X 射线谱,就可避免上述的窗口问题。

综合上述得到的结果,可归纳出无论是中  $Z$  的还是低  $Z$  的等离子体都会发射丰富的软 X 射线,其次,在采用 OHM 晶体谱仪拍摄时,尽管在光谱中存在着的多级衍射会增加光谱

的复杂性和辨认困难,但高级谱的高分辨率为更细致地深入研究等离子体光谱结构提供有利的途径。另外,利用长晶格晶体谱仪拍摄长波软 X 射线也是极为有利的,但窗口膜对长波软 X 射线的强吸收给光谱拍摄带来一定的困难。

作者感谢上海光学精密机械研究所六路实验组在本实验中所给予的帮助。

### 参 考 文 献

- [1] C. D. Michelis *et al.*; *Nuclear Fusion*, 1981, **21**, No. 6 (Jun), 677~754.
- [2] P. Jaegle *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (b)*, 1987, **4**, No. 4 (Apr), 563~574.
- [3] V. A. Boiko *et al.*; *J. Quant. Spectrosc. & Radiat. Transfer.*, 1987, **19**, No. 1 (Jan), 11~50.
- [4] 张正泉, 范品忠; 《原子与分子物理学报》, 1987, **4**, No. 1 (Jan), 377~382.
- [5] R. L. Kelly *et al.*; 《Atomic and Ionic Emission Lines Below 2000 Å》 NAVAL RESEARCH LABORATORY, WASHINGTON, D. C. 1973.

## X-ray spectrum of Al, Si, O, Cu, Se from laser plasma

FENG XIANPING, XU ZHIZHAN\*, CHEN SHISHENG AND FAN PINGZHONG  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 30 January 1988; revised 2 November 1988)

### Abstract

Using large lattice spacing OHM crystal instrument, we obtained abundant X-ray spectrum of the dispersion order  $m=1, 2, 3$  which belong to Ne-, F-, O-like ions of Cu, Se and the dispersion order  $m=1, 2, 3, 4$  of He-, Li-like ions which belong to O, Al, Si, in the range of 14~40 Å. Based on this result, we systematically analyse the various construction and physical character of above spectrum.

**Key words:** plasma; X-ray spectrum.

---

\* Center of Condense Matter and Radiation Physics, OCAST (World Lab.), Beijing.