

# 从氧到硅高阶电离离子 K 系 X 射线光谱的辨认

卢仁祥 张正泉 殷光裕 范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

徐 建 明

(中国科学技术大学近代物理系)

## 提 要

用 X 射线晶体谱仪拍摄激光等离子体的 X 射线发射光谱, 获得了原子序数从 8~14 各元素波长在 4~22 Å 范围内丰富的类氢、类氦、类锂离子光谱及  $K_{\alpha}$  线; 在实验室内拍摄到了理论上曾预言过的位于类氦强共振线最红侧的  $o$ 、 $p$  伴线。

## 一、引 言

零级光谱学, 即波长光谱学<sup>[1]</sup>, 它的主要内容是谱线的辨认、波长的测定、相应电子跃迁能级的电子组态的确定。它是一级(强度)光谱学、二级(线形)光谱学的基础。虽然用加速器的输出产生的束箔光谱已对大量元素类氢、类氦、类锂离子的 X 光谱作了许多研究, 但用大功率激光产生的等离子体的 X 射线光谱(LPX)具有新的特点。激光等离子体 X 射线光谱的研究更加丰富了高阶电离离子能谱学方面的知识<sup>[2]</sup>。鉴于 X 射线激光器发展的需要<sup>[3,4]</sup>, 积累丰富的 LPX 线谱方面的知识也是十分必要的。

另一方面, 目前在天体上尚有大量的未辨认的高阶电离离子 X 射线谱<sup>[5]</sup>。因而, 谱线的正确识别对天体物理也有意义; 众所周知, 双电子复合伴线就是首先在天文研究中发现的。从核聚变研究的需要来说, 无论是惯性约束等离子体的 X 射线诊断, 还是磁约束等离子体中杂质元素的辨认, 都需要高阶电离离子 X 射线光谱方面的知识。

本文系统地报告我们获得的  $Z=8\sim 14$  元素高阶电离离子 K 系 X 射线光谱, 以及用作激光等离子体参量诊断的有关结果。还将报告实验观测到了理论上曾预言处于类氦共振线最红侧的  $o$ 、 $p$  伴线。

## 二、实 验 条 件

利用上海光学精密机械研究所六路大功率钕玻璃激光实验装置<sup>[6]</sup>的一束输出光束, 其功率约为  $10^{11}$  W (能量 5~8 J, 脉宽 100 ps), 通过口径  $\phi 60$  mm 焦距 120 mm 的非球面透镜直接聚焦在靶上, 靶面功率密度约为  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>。由于在这样高的激光功率密度下, 靶

收稿日期: 1984年6月19日; 收到修改稿日期: 1984年11月23日

面上的辐射场强已可以与元素原子内壳层的电场强度相比拟，激光迅速将靶材元素剥去大部分电子而变为高温的等离子体，并产生丰富的 LPX 辐射。

实验中除氦以外都采用平面靶。氧元素用 SiO<sub>2</sub> 靶，氟元素用 LiF 靶，氖气事先注入直径  $\phi 100 \mu\text{m}$ 、壁厚  $1 \mu\text{m}$  左右的空心玻璃球壳靶中，钠元素用 NaCl 靶，镁、铅元素用单质金属靶，硅用玻璃球壳靶。靶材放入真空度为  $10^{-2}$  Torr 的靶室中。

X 射线光谱用自行设计的 TLAP X 射线晶体谱仪拍摄<sup>[7]</sup>，波长覆盖范围  $4 \sim 22 \text{ \AA}$ 。摄谱采用事先标定过的上海感光胶片厂出品的医用 5F 型 X 射线软片。

### 三、摄谱结果和分析

图 1~图 7 分别示出氧、氟、氖、钠、镁、铝、硅诸元素的 LPX 光谱黑度扫描曲线，一般来说均可见完整的类氢、类氦、类锂离子光谱。由于摄谱波长范围限制，在图 1 中氧的 LPX 谱缺少  $1s^2-1s2p$  线 ( $\lambda=21.6 \text{ \AA}$ )。图 3 中，氖的 LPX 谱图短波长部分由于暗盒局部漏光使扫描基线逐渐有所抬高。表 1 中列出了图 1~图 7 中出现的上述元素的类氢、类氦、类锂离子 X 射线谱线相应的波长、电子组态。实验测定的波长与理论波长差一般情况下小于  $\pm 0.05 \text{ \AA}$ ，最大相对误差  $\Delta\lambda/\lambda \sim 0.5\%$ ，理论值基本上以文献 [8] 为据。

1. 氟的类氦离子跃迁序列  $1s^2-1snp$ ， $n$  高达 6，并可见一段类氦离子复合成类锂离子的复合谱。但随着原子序数的增加，这段复合谱越来越短，并很快与  $L_{\beta}$  线衔接上，在图 7 硅的 LPX 谱中类氦离子复合谱已不明显。在一般摄谱正常的情况下(如钠、镁、铝、硅谱)类氢离子的复合谱都是清晰可见的。由于复合辐射强度可解析表示为

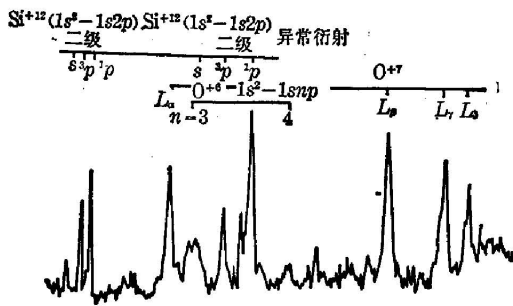


图 1

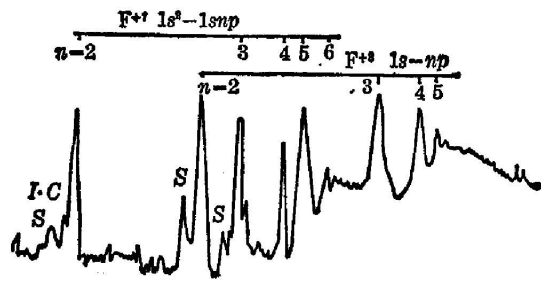


图 2

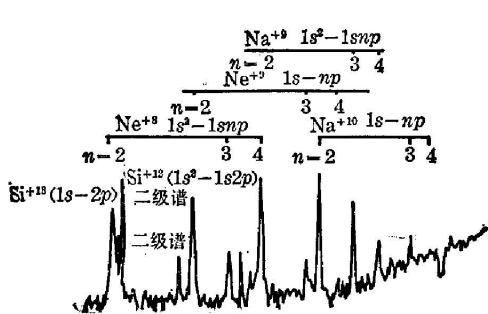


图 3

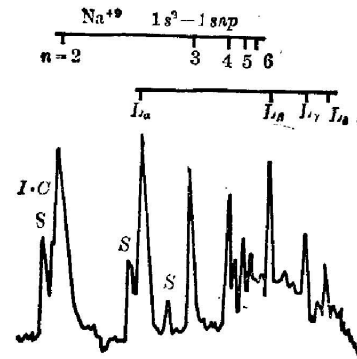


图 4

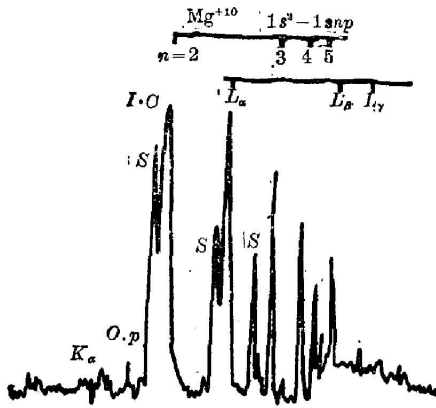


图 5

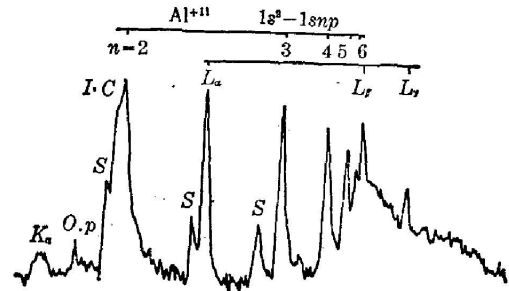


图 6

$$I_{\nu} \propto g_{\nu} \exp(-h\nu/kT_e),$$

因而可以方便地利用这一复合辐射坡的斜率求出等离子体的电子温度  $T_e$ 。由于复合辐射是光学薄的, 自吸收小, 故这一方法值得推荐使用。以图 7 为例, 求出硅等离子体电子温度为 430 eV。

2. 在 LPX 光谱图及表 1 中列出了大部分元素最重要的三条伴线  $1s2p-2p^2$ ,  $1s^22p-1s2p^2$  及  $1s^22p-1s2p3p$ 。实际上, 在上述电子组态的跃迁中还包括不同的光谱项, 即它们还有丰富的组结构。这些伴线与其紫侧主线  $1s-2p$ ,  $1s^2-1s2p$ ,  $1s^2-1s3p$  的强度比可以用来确定电子温度  $T_e$ 。以硅为例, 申怀椿、顾援等

用前两组谱线强度比在日冕模型下, 求得等离子体电子温度  $T_e$  分别为 370 eV 和 345 eV<sup>[9]</sup>, 用光学薄的类氢、类氦伴线比求出  $T_e=485$  eV<sup>[10]</sup>, 这一数值与用连续谱求出的  $T_e$  相近。

3. 在光谱图中, 除氧和氮的 LPX 线谱以外, 其它元素的 LPX 谱均可见互组合线  $1s^2^1S_0-1s2p^3P$ , 图中以  $I$ 、 $O$  带箭头标记。这一跃迁在  $LS$  耦合下本来是禁戒的 ( $\Delta s=1$ ), 但随着原子序数的增加, 相对论效应起作用, 互组合线相对于共振线  $1s^2^1S_0-1s2p^1P$  的强度逐渐增强, 这在光谱图中也得到了反映。另外, 这两根谱线的强度比是电子密度  $n_e$  的灵敏函数, 因此可用它来计算等离子体的电子密度。仍以硅为例(图 7), 算出  $n_e=10^{21}/\text{cm}^3$ <sup>[10]</sup>。

4. 在镁、铝、硅的光谱图中, 出现了  $K_\alpha$  谱线, 它是由等离子体中的快电子激发引起的, 从它的强度可以估计快电子预热靶的情况<sup>[11]</sup>。此外, 在镁、铝、硅的 LPX 光谱中还出现了波长为 9.57 Å、8.06 Å、6.915 Å 的谱线。对硅的 6.915 Å 谱线, 以前未能辨认出来, 留下了疑问<sup>[12]</sup>。现在我们确认其为类氦离子  $1s^2-1s2p$  强共振线红侧波长最长的伴线  $o$ 、 $p$ , 它的电子组态及光谱项如表 2 所示。这个类锂离子跃迁有它特殊的地方, 它牵涉到两个电子的组态同时改变, 是双电子激发态, 它处于类锂离子自离化能级之上。根据 Gabriel 的理论估计<sup>[13]</sup>, 形成该伴线的辐射几率较强, 约有形成表 1 中  $j$ 、 $k$  伴线几率的一半以上。这一伴线尽管在理论上早有预言, 但到目前为止我们还未见到另有实验观察报道。

5. 在图 1 中可见氧的  $L_\beta$  线强度强于  $L_\alpha$ , 尽管这是在时间、空间积分的条件下获得的, 但由于氧离子  $1s-2p$  线振子强度大于  $1s-3p$  线, 这表明在氧的类氢离子  $n=3$ 、 $2$  能级对之

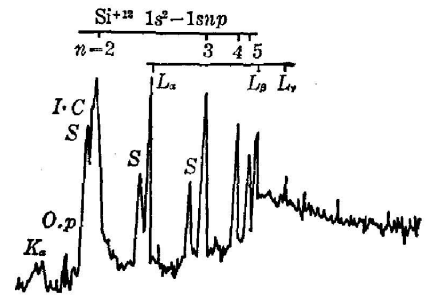


图 7

表 1

元 素		电 子 组 态		类					氢	
				1s-np						
				2	3	4	5	6		
O	波 长 Å		18.969	16.006	15.176	14.821				
F		14.984	12.644	11.988	11.707					
Ne		12.134	10.239	9.708						
Na		10.025	8.459	8.021	7.833					
Mg		8.421	7.106	6.738						
Al		7.173	6.053	5.739						
Si		6.182	5.217	4.947						

元 素		电 子 组 态		类						氦		锂	
				1s <sup>2</sup> -1snp						1s <sup>2</sup> 2p-1s2p <sup>2</sup>		1s <sup>2</sup> 2p-1s2p <sup>3</sup> p	
				1s2p-2p <sup>2</sup>		2		3	4	5	6	(j, k)	
		1S-1P	1S-3P										
O	波 长 Å		21.60	20.80	18.627	17.768							
F		16.807	16.951	14.458	13.78	13.49	13.34	17.17					
Ne		12.353	13.447	13.549	11.544	11.001			13.71				
Na		10.79	11.00	11.08	9.43	8.99	8.79	8.69	11.20				
Mg		8.458	9.168	9.23	7.85	7.473	7.31			9.32	8.071		
Al		7.253	7.757	7.806	6.635	6.814	6.18			7.87	6.805		
Si		6.26	6.65	6.69	5.68	5.41	5.283			6.74	5.816		

表 2 o、p 伴线波长及光谱项

Table 2 Wavelengths and terms for the o, p satellites

元 素		光 谱 项		1s <sup>2</sup> 2p <sup>2</sup> P <sup>0</sup> -1s2s <sup>2</sup> 2S	
				理 论	实 验
Mg	波 长 Å			9.566	9.59
Al				8.06	8.06
Si				6.90	6.915

间可能存在着粒子数反转。在图 3 中钠的一条类氦强共振线  $1s^2-1s2p$ , 其波长恰与氦的  $1s^2-1s4p$  线完全重合 ( $\lambda=11 \text{ \AA}$ ), 亦即钠离子的光共振激发有可能造成氦的类氦离子的  $n=4-3$ 、 $4-2$  能级对之间粒子数分布反转。美国罗仑斯·利弗莫尔国家实验室化了许多力量来验证用这种光共振激发泵浦方式来获得软 X 射线波段激光放大的可能性<sup>[14]</sup>。

参加本文实验工作的还有毛楚生、顾援、潘成明、朱大庆等同志。作者对中国科学院上海光学精密机械研究所六路钽玻璃大功率激光实验装置实验室的同志们在工作中的支持,表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- [1] D. D. Burgess; *Space Science Reviews*, 1972, **13**, 493.
- [2] W. L. Pickles, *et al.*; ed., *Advances in X-Ray Analysis*, Vol. 18, (Plenum Press, New York, 1975).
- [3] R. W. Waynant, *et al.*; *Proc. IEEE*, 1976, **64**, No. 7, 1059.
- [4] R. C. Elton; *Optical Engineering*, 1982, **21**, No. 2, 307.
- [5] W. M. Neupert; *Solar Physics*, 1971, **18**, 474.
- [6] 邓锡铭等;《光学学报》,1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [7] 卢仁祥等;《光学学报》,1982, **2**, No. 6 (Nov), 568.
- [8] R. L. Kelly, *et al.*; *Atomic and Ionic Emission Lines Below 2000 Å* (Hydrogen through Krypton), NRL Report 7599, 1973.
- [9] 卢仁祥等;《科学通报》1979, **24**, No. 22 (Nov), 1018.
- [10] 卢仁祥;《核聚变与等离子体物理》, 1983, **3**, No. 3, 188.
- [11] 卢仁祥等;《光学学报》,1983, **3**, No. 5 (Aug), 400.
- [12] 卢仁祥等;《科学通报》, 1979, **24**, No. 23 (Dec), 1071.
- [13] A. H. Gabriel; *Mon. Not. Roy. Astr. Soc.*, 1972, **160**, No. 1, 99.
- [14] D. L. Mathews, *et al.*; *CLEO'83, Conference on Laser and Electro-Optics Technical Digest*, May 17~20, 1983. THE3.

## Identification of the K-series of laser-produced X-ray spectra from oxygen to silicon

LU RENXIANG CHANG CHENGCHUAN YIN GUANGYU AND FAN PINZHONG  
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

XU JIAUMING

(Chinese University of Science and Technology)

(Received 19 June 1984; revised 23 November 1984)

### Abstract

Laser-produced X-ray spectra of H-like, He-like and Li-like ions as well as K lines have been taken and identified with an X-ray crystal spectragraph in the range of  $4\sim 22\text{ \AA}$  for  $Z=8\sim 14$  elements. The  $o$ ,  $p$  satellites which were theoretically predicted have been found experimentally at the redside of intensive resonant lines of He-like ions for the first time.