

## 钇-钼激光等离子体软 X 射线光谱

冯贤平 徐至展 余 玮

(中国科学院上海光机所 201800)

**提要:** 利用不同晶格常数的 X 光谱仪, 对钇-钼系列的等离子体 X 射线光谱进行了拍摄和分析, 发现线谱主要是由类氦离子发射, 并具有极相似的结构。此外, 本文对这些元素的类钠伴线结构也进行了分析和归类。

**关键词:** 钇-钼 LPX 光谱

### Soft X-ray spectrum of Y-Mo laser-produced plasma

*Feng Xianping, Xu Zhizhan, Yu Wei*

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

**Abstract:** Using TIAP and PET crystal spectrograph, we analysed the soft X-ray spectrum of Y-Mo laser-produced plasma, and found that the spectral lines are emitted by Y-Mo Ne-like ions with similar structure. In addition, we also analysed and classified the soft X-ray spectra of Na-like isoelectronic sequences of these elements.

**Key words:** X-ray spectrum of Y-Mo

### 引 言

高阶电离离子的 X 射线光谱特性分析在 X 射线激光研究及等离子体参数诊断中是极为重要的。早在 1978 年, 苏联的 Boiko 等人就已较为系统地对各元素的激光等离子体 X 射线光谱结构<sup>[1]</sup>和辐射特性<sup>[2]</sup>进行了研究。之后文献[3]利用谱仪也对原子序数  $Z=8\sim 14$  的各元素, 波长在  $0.4\sim 2.2\text{ nm}$  范围内类氢、类氦、类锂离子光谱及  $K_{\alpha}$  线进行测量和分析。近几年来, 随着更高功率激光器件的发展以及等离子体 X 光谱研究工作的不断深入, 人们对光谱的研究已逐渐转移到高、中  $Z$  等离子体中, 文献[4]分析了原子序数  $Z=27\sim 34$  的激光等离子体 X 射线(LPX)类氦、类氟离子光谱; 文献[5]对更高原子序数( $Z=36\sim 42$ )的 LPX 类氦、类钠离子光谱也进行了较为详细的辨认。

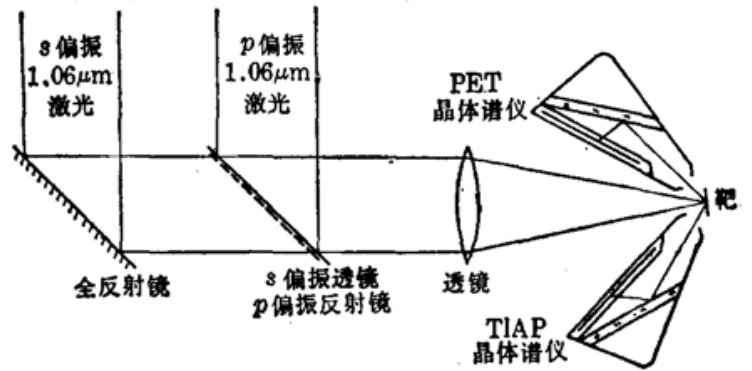
本文就是在上述研究的基础上, 利用各种晶格常数的 X 光谱仪对高  $Z$  元素系列的钇-钼等离子体所辐射的软 X 射线光谱进行较为细致的分析。由于采用的激光功率较强, 所用的体谱仪分辨率高, 因此, 本文所得的 LPX 谱的线谱拍摄范围、光谱分辨和测量精度都较好。

### 实 验 条 件

实验是在上海光机所 6 路高功率钎玻璃激光装置上进行的。为了提高靶面的激光功率辐

照, 将装置上的北路光与南路光合并, 组合光束的时间同步由条纹相机监视, 同步精度优于 20 ps, 组合光束的角向精度小于 0.1 mrad。组合后光束总输出为 10~20 J, 总脉宽为 200 ps, 激光束由一个  $f=120\text{ mm}$ 、 $f/D=2$  的非球面透镜聚焦, 焦斑直径约  $100\text{ }\mu\text{m}$ 。

实验中为观察不同元素的激光等离子体辐射特性, 选用钇-钼系列元素平面靶, 激光打靶和摄谱都是在气压为  $10^{-3}\text{ Torr}$  的真空室内进行的。激光等离子体 X 射线(LPX)光谱分别用晶格常数为  $2.578$



nm 的 TIAP 型和常数为  $0.8742\text{ nm}$  的 PET 平晶谱仪同时拍摄, 目的是为了得到更大范围的光谱。记录底片采用事先标定过的医用 P-5F 型 X 射线软片, 整个实验布局如图 1 所示。

图 1 各元素激光等离子体 X 射线光谱的拍摄示意图

### 实验结果和分析

图 2~5 分别是元素钇-钼激光等离子体 X 射线谱的黑度扫描曲线。从谱图中可看出, 各元素的 LPX 谱丰富, 辐射范围广。由晶体的 X 射线衍射方程及本谱仪的几何结构, 求出了各谱线对应的波长, 并找出了它们所属的光谱项和组态, 列于表 1。其中, 表及图 2~5 中所用的 A、B、H、...P 符号主要是以文献[5]为标准的。

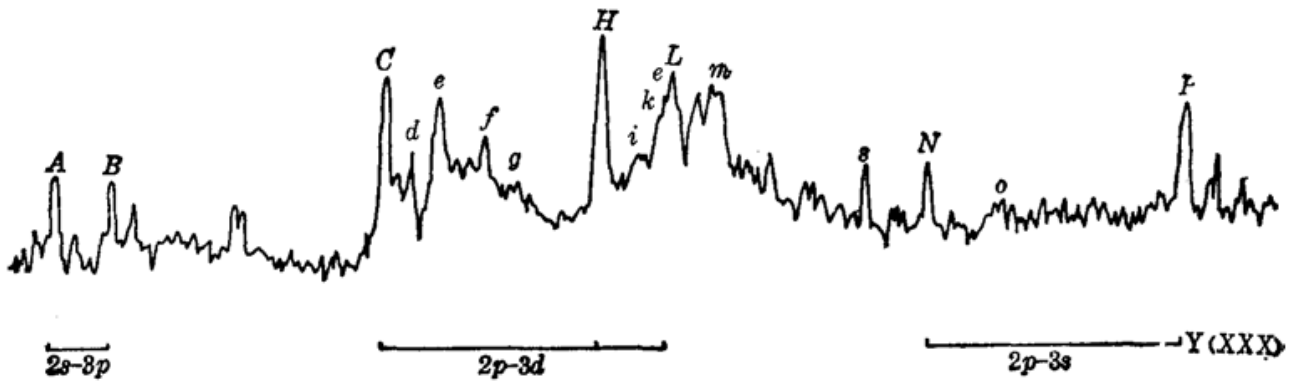


图 2 钇 LPX 射线谱黑度扫描曲线

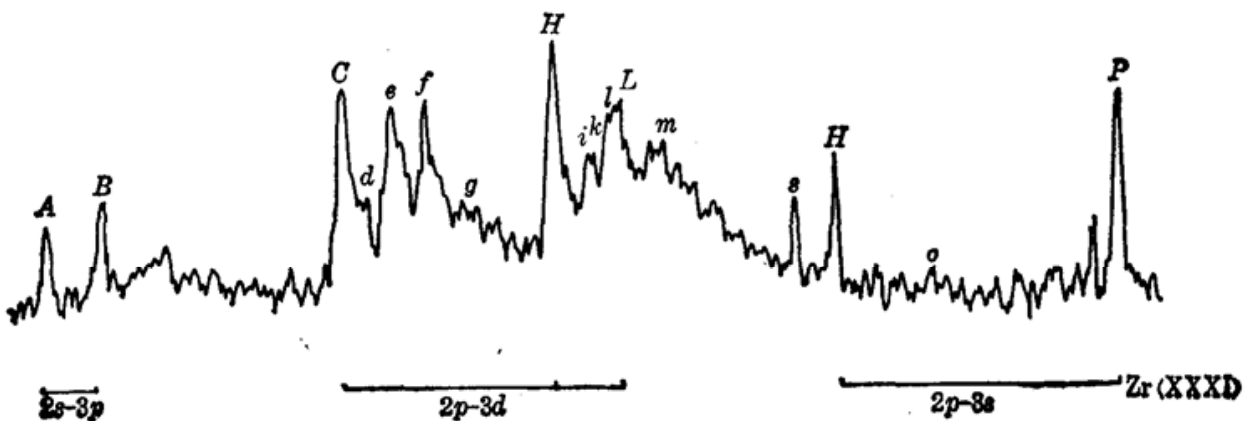


图 3 锆 LPX 射线谱黑度扫描曲线



图4 铌 LPX 射线谱黑度扫描曲线

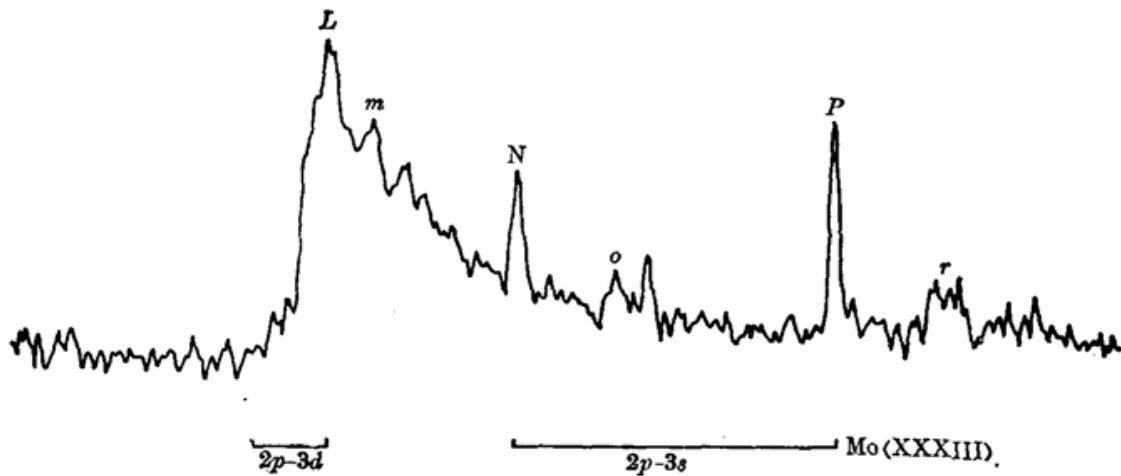


图5 钼 LPX 射线谱黑度扫描曲线

表1 钇-钼系列类氦离子发射线谱的理论和实验观察值

	Key	P	N	L	H	C	B	A
跃迁		$2p-3s$	$2p-3s$	$2p-3d$	$2p-3d$	$2p-3d$	$2s-3p$	$2s-3p$
	Term	$1s_0-(^2p_{3/2})^3p_1$	$-(^2p_{1/2})^1p_1$	$-(^2p_{3/2})^3p_1$	$-(^2p_{3/2})^3p_1$	$-(^2p_{1/2})^1p_1$	$-^3p_1$	$-^1p_1$
Y (Z=39) (nm)	$\lambda_{\text{calc}}^{[1]}$	0.6193	0.5965	0.5763	0.5708	0.5524	0.5299	0.5251
	$\lambda_{\text{Exp}}^{[5]}$	0.6196	0.5966	0.5759	0.5702	0.5525	0.5299	0.5251
	$\lambda_{\text{Exp}}$	0.6196	0.5966	0.5763	0.5706	0.5530	0.5304	0.5256
Zr (Z=40) (nm)	$\lambda_{\text{calc}}^{[1]}$	0.5831	0.5609	0.5431	0.5373	0.5198	0.4997	0.4950
	$\lambda_{\text{Exp}}^{[5]}$	0.5831	0.5602	0.5423	0.5370	0.5194	0.4989	0.4941
	$\lambda_{\text{Exp}}$	0.5833	0.5605	0.5426	0.5372	0.5194	0.4996	0.4946
Nb (Z=41) (nm)	$\lambda_{\text{calc}}^{[1]}$	0.5503	0.5280	0.5130	0.5078	0.4903	0.4720	0.4672
	$\lambda_{\text{Exp}}^{[5]}$	0.5506	0.5280	0.5128	0.5077	0.4901	0.4718	0.4669
	$\lambda_{\text{Exp}}$	0.5503	0.5281	0.5129	0.5079	0.4905		
Mo (Z=42) (nm)	$\lambda_{\text{calc}}^{[1]}$	0.5200	0.4980	0.4851	0.4805	0.4630	0.4465	0.4417
	$\lambda_{\text{Exp}}^{[5]}$	0.5204	0.4980	0.4852	0.4803	0.4629	0.4461	0.4415
	$\lambda_{\text{Exp}}$	0.5200	0.4985	0.4852				

为了与前人的研究结果作比较,我们在表 1 中同时也列出了 Boiko 的理论值<sup>[1]</sup>和 Gordon 的实验测量<sup>[5]</sup>,表 1 主要列出的是铋-铋的类氫离子所发射的 LPX 光谱线参数,如将本文实验结果与文献[1]的理论值比较,可发现它们之间最大的相对误差不超过 0.07%,这个辨认精度比起文献[5]的精度或实验结果要好许多。实际上,从直接的光谱图比较,就可很容易地看出,本文的各元素 LPX 光谱分辨要比文献[5]的好。

本文对各元素类钠伴线结构也进行了辨认和归类。由图 2~5 中的小写字母标出。它们的符号也是以文献[5]为标准的。从上图辨认结果可看出,类钠伴线谱的叠加要比类氫离子线谱严重得多。尽管如此,本文实验结果还是比文献[1]和[5]的光谱图分辨要好得多。

此外,由上述结果的分析及与文献[1]和[5]的比较,可发现图 2~5 的 LPX 谱图上线谱丰富。原因之一是本实验使用的激光辐照功率更高,从而产生更高阶电离离子和激发基态粒子到更高的激发态。这一点已在低功率激光打其它靶的实验中得到证明。图 6 是在靶面功率为  $4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  条件下拍得的 AsGa LPX 光谱图。从谱图分析可发现它只包含类氫离子在主量子数  $n=3 \sim 2$  能级间电子跃迁所发射的谱线<sup>[6]</sup>,整个谱图结构相当简单。但是,当靶面功率密度大到  $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  时,AsGa 的 LPX 光谱就变得极为丰富,光谱结构变得复杂,如图 7 所示。仔细分析图 7,发现在谱中除有类氫离子线谱外,还存在着大量的类氟、类氧的共振线和伴线。实际上,从上述光谱的分析和比较中还可发现各元素的离子发射光谱数目随着相对应的原子序数变大而逐渐减小、谱结构变简单等现象,这似乎与常规现象相矛盾。实质上,对等电子序数的电子束缚能,原子序数越高束缚能也就越大,电子就越不易被电离或激发到更高的激发态能级上去,相应的谱线发射强度变弱,所以就出现了上述这种物理现象。

应当指出,上述 LPX 线谱都是由 PET 型平晶谱仪拍摄的,而从 TLAP 型晶体谱仪中所拍摄到的光谱即含有线谱也包含大范围连续谱。其中线谱主要是各元素 LPX 线谱的二次衍

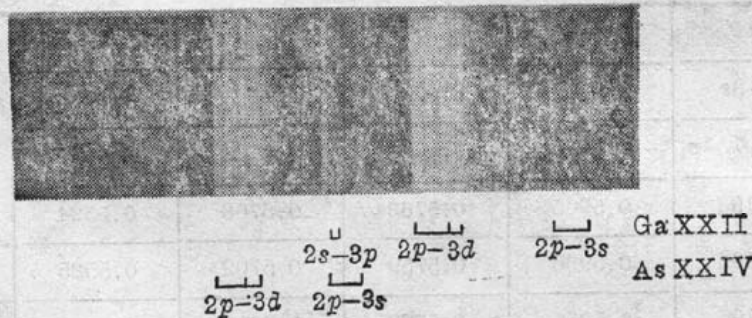


图 6 在  $4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$  激光辐照条件下所产生的 AsGa-LPX 光谱

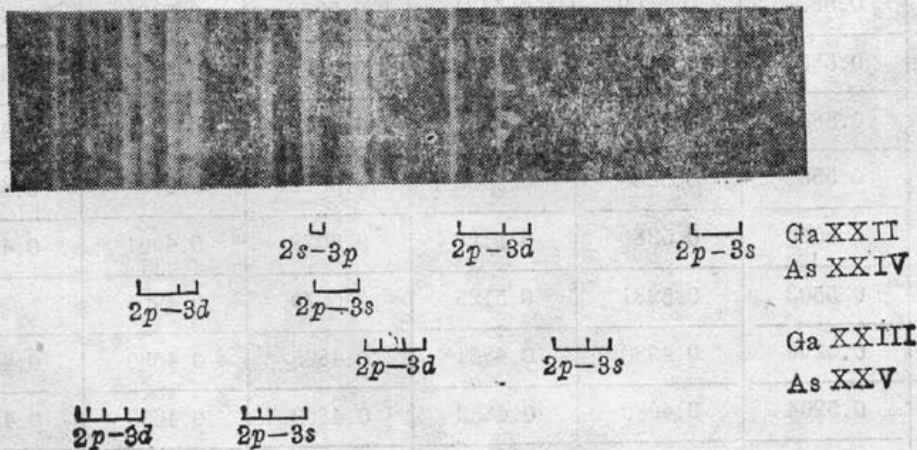


图 7 在  $5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  激光辐照条件下所产生的 AsGa-LPX 光谱

射谱, 而连续谱充满整个背景。这种现象与低  $Z$  元素的激光等离子体 X 光谱情况不同。对低  $Z$  元素, 其 PLX 连续谱一般集中在比最短线谱更短一侧的区域<sup>[8]</sup>。引起上述差别主要是由于它们之间的质量、离子结构不同, 从而导致它们之间的辐射机制不同。

本文曾得到 6 路实验组和“115”实验组同志的大力支持和帮助, 在此表示衷心的感谢。

### 参 考 文 献

- 1 V. A. Boiko *et al.*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, **19**, 11(1978)
- 2 V. A. Boiko *et al.*, *Sov. J. Quant. Electr.*, **8**, 226(1978)
- 3 卢仁祥, 张正泉 *et al.*, *光学学报*, **5**(4), 299(1985)
- 4 R. J. Hutcheon *et al.*, *Phys. Scripta.*, **21**, 89(1980)
- 5 H. Gordon *et al.*, *J. Phys. B.*, **12**, 881(1979)
- 6 冯贤平, 范品忠 *et al.*, *光学学报*, **7**(2), 172(1987)

(上接第 8 页)

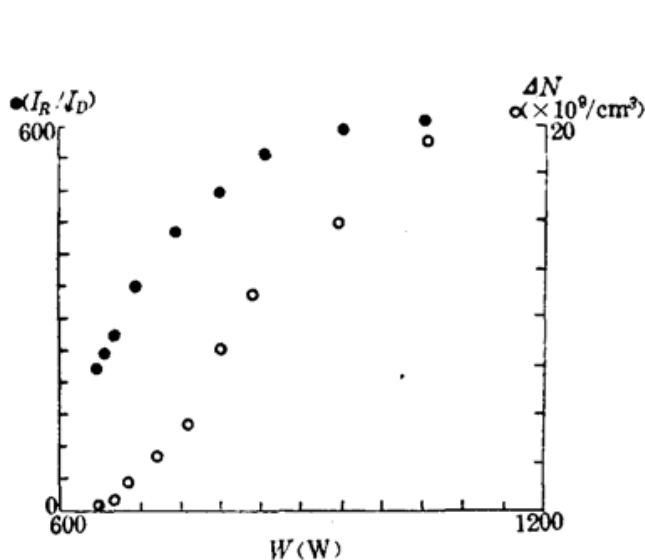


图 6  $I_R/I_D$  及  $\Delta N$  随功率的变化图

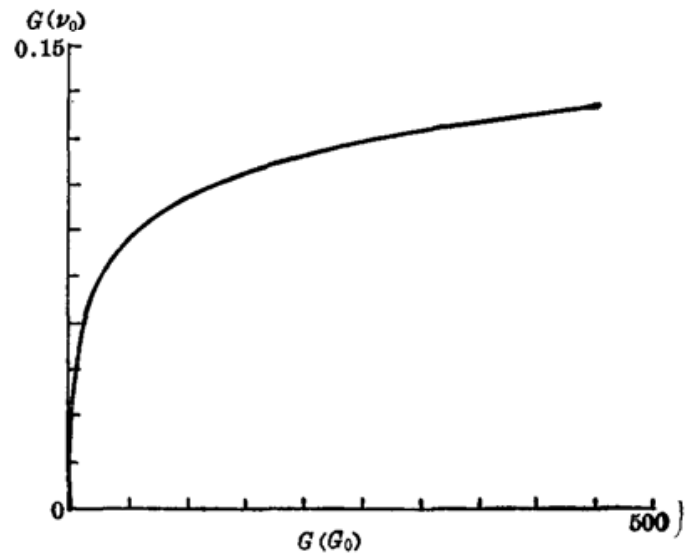


图 7 增益变化曲线

在此对张桂燕、宋秀冬两位同志提供的 CuBr 放电管及在实验过程中的大力帮助表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Y. Izawa *et al.*, *SPIE*, Vol. 1041, Metal Vapor Deep Blue and Ultraviolet Lasers, 1989, **19**
- 2 M. J. Kushner, B. E. Warner, *J. Appl. Phys.*, **54** (6), 2970 (1983)
- 3 A. A. Isaev *et al.*, *Sov. J. Quant. Electr.*, **16** (11), 1512 (1986)
- 4 C. S. Liu *et al.*, Copper Halide Laser Research, AD/AO, 1977, 42484
- 5 Wang Yongjiang *et al.*, *Appl. Phys. B*, **47**, 87 (1988)
- 6 John W. Moconkey, *Phys. Rev.*, **59**(10), 1262 (1969)
- 7 Takashi *et al.*, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, **34** (3), 217 (1985)