

# 高度电离的锆激光等离子体 X 射线谱的辨认

马国彬 韩国强 王 欣 顾 援 王世绩

(中国工程物理研究院 上海激光实验室)

仇 阳 辉

(应用物理与计算数学研究所, 北京)

## 提 要

本文结合理论计算得到的锆类钠、类氦、类氟、类氧离子的振子强度, 对平面晶体谱仪拍摄的锆激光等离子体 X 射线谱, 波长在  $6\sim 10\text{ \AA}$  范围内的 40 多条谱线进行了分类辨认。

关键词: 激光等离子体 X 射线谱, 振子强度。

## 一、引 言

依据等离子体发射的 X 射线谱的强度比推断其电子温度、电子密度、离子丰度等参数是等离子体状态诊断较为可行的方案之一, 因此研究等离子体的 X 射线谱对激光聚变、X 射线激光的发展具有重要意义。近年来, 随着实验室多电荷离子源技术的发展, 特别是高功率激光器的出现, 为实验室研究等离子体(尤其是中、高子元素)的 X 射线谱提供了有利条件。因而从六十年代以来, 曾有不少学者发表了在实验室研究高度电离的等离子体的 X 射线谱的成果<sup>[1, 2]</sup>。本文用高功率激光辐照锆靶, 产生高度电离的锆等离子体, 用平面晶体(KAP, TlAP)谱仪对其波长在  $6\sim 10\text{ \AA}$  范围内的谱线进行了分类、辨认

## 二、实 验

实验在中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理实验室的六路激光装置上完成。实验时用六路装置的第二路作打靶激光, 其波长  $\lambda=1.06\text{ }\mu\text{m}$ , 点聚焦的焦斑直径  $\phi_0=60\text{ }\mu\text{m}$ , 靶离焦距离  $d=+200\text{ }\mu\text{m}$  时, 实际照射在靶面的焦斑直径  $\phi=160\text{ }\mu\text{m}$ 。条纹相机测得的激光脉冲半宽度  $\tau=250\text{ ps}$ 。当激光能量  $E$  为  $1\sim 6\text{ J}$  时, 靶面的功率密度  $P$  为  $0.7\sim 4.2\times 10^{13}\text{ W/cm}^2$ (光路及靶场能量损耗已考虑在内)。

实验所用的探测仪器分布如图 1 所示。图中 1 为平面锆靶, 2 为装于靶面水平切向的平面(TlAP)晶体谱仪, 3 为与靶面法线方向成  $45^\circ$  角、且在靶斜下方的平面(KAP)晶体谱仪,

收稿日期: 1989年12月15日; 收到修改稿日期: 1990年2月27日

\* 现在地址: 中国科学院上海光学精密机械研究所。

4 为打靶激光, 5 为与靶面法线方向成  $45^\circ$  角、且在靶斜上方的 X 光针孔相机。平面晶体谱仪记录靶面等离子体的 X 射线发射情况, 而针孔相机记录靶面等离子体的膨胀情况, 两者拍摄谱段均在  $5\sim 12 \text{ \AA}$  之间, 全用“海鸥”医用 X 光底片。根据情况不同, 用 D-76 显影液显影  $9\sim 15$  分钟\*。

实验所用的靶除平面抛光的锆块外, 还有平面铝箔靶, 后者主要用来对谱仪进行波长定标。

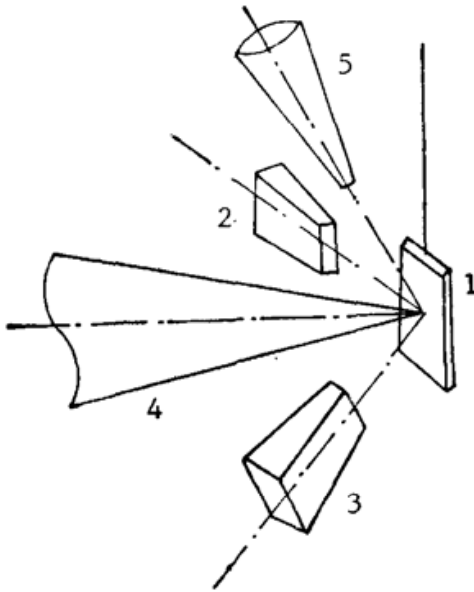


Fig. 1 Schematic of experimental arrangement

1. target 2, 3. flat crystal spectrographs  
4. laser beam 5. pinhole camera

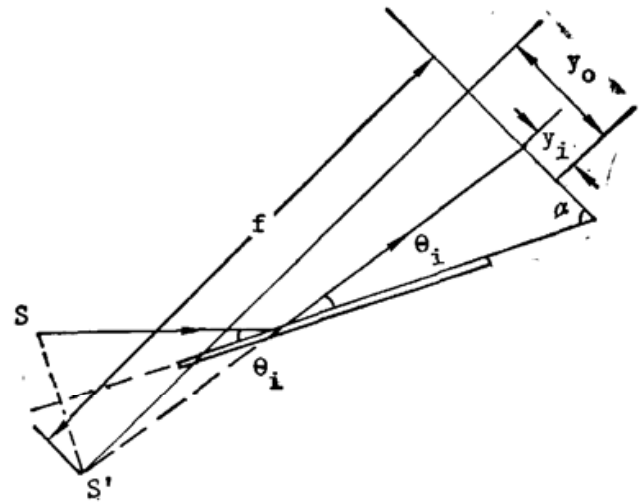


Fig. 2 Schematic of flat crystal spectrograph

### 三、谱线波长的确定

平面晶体谱仪的光路原理示于图 2。根据几何关系, 并考虑了 X 光在晶体上的一级衍射的布喇格公式  $\lambda_i = 2d \sin \theta_i$ , 得任一谱线的波长  $\lambda_i$  与其在底片上的位置  $y_i$  有如下关系<sup>[3]</sup>:

$$y_i = y_0 - f \cdot \text{ctg} \left( \alpha + \sin^{-1} \frac{\lambda_i}{2d} \right), \quad (1)$$

式中  $d$  为晶体的衍射晶面间距 (实验用的 TlAP 晶体  $2d = 25.78 \text{ \AA}$ , KAP 晶体  $2d = 26.63 \text{ \AA}$ ),  $\alpha$  为谱仪的底片与衍射晶面之间的夹角 (实验用的  $\alpha = 67.27^\circ$ ),  $f$  为光源像点  $S$  到底片的距离,  $y_0$  为光源像点  $S'$  到底片的垂线的垂足的坐标 (坐标原点  $O$  是任意选定的)。这些量中,  $\alpha$ 、 $d$  是仅与谱仪结构及晶体性质有关的参数, 可视为已知常数,  $y_0$ 、 $f$  为与底片相对于光源的位置有关的参数, 需要实验确定。

实际上, 谱仪和源的几何位置很难精确测定, 所以必须采用多条已知波长的谱线作为参考线来确定未知谱线的波长。在本文的实验中, 采用对底片遮半, 两次曝光的方法将锆和铝的谱线拍摄在同一张底片上。用铝的类氢、类氦线的位置  $y_i$  及其已知波长  $\lambda_i$  对 (1) 式进行最小二乘法拟合, 确定谱仪的色散参数  $y_0$  及  $f$ , 之后由同一底片上锆线的位置  $y_i'$  确定其波长  $\lambda_i'$

\* 显影温度控制在  $16\sim 20^\circ\text{C}$  之间。

$$|\lambda_i = 2d \sin \left[ \operatorname{ctg}^{-1} \left( \frac{y_0 - y'_i}{f} \right) - \alpha \right] \quad (2)$$

这样确定的波长误差较大,这是由于其一是两次打靶的条件不可能完全一样,其二是要使锗线位置坐标的原点(在底片的微黑度扫描图上确定)和铝线位置坐标的原点完全重合比较困难。两者造成的  $y_0$ 、 $f$  的误差对锗线波长的精确测定都影响较大。在此,本文作者参考国外所发表的锗线理论波长<sup>[4]</sup>及根据实验数据计算的锗线波长,取与用上述方法确定的波长最为相近的、且对应自发跃迁几率较大的一些理论值作为已知波长  $\lambda_i$ ,即选一些锗强线作参考谱线,重新用最小二乘法拟合(1)式,确定  $y_0$ 、 $f$ ,之后,再确定其它锗线的波长。这样,根据误差理论可计算出,用上述方法确定谱线波长时的标准偏差  $< 3 \text{ m}\text{\AA}$ 。考虑到晶体分辨率的限制,本文给出的波长实验值的误差  $< 10 \text{ m}\text{\AA}$ 。

#### 四、实验结果

图 3 是用 KAP 晶体拍摄到的锗激光等离子体的 X 射线谱的微黑度扫描图。对应的靶面功率密度为  $3.27 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。此时锗可被剥掉 12 个电子,即电离到类氦的状态。表 1 是对锗激光等离子体 X 射线谱的辨认结果。表中带 \* 号的谱线是第二次拟合(1)式时所选用的参考谱线,拟合得到的线性回归系数为  $R = 0.9999968$ 。

对高度电离的激光等离子体,它的激光等离子体 X 射线包括了多种不同电离阶离子的 X 射线谱,所以对其分类、辨认是一项很复杂且难度较大的工作。作者把实验得到的谱线波长与理论计算的结果比较,发现在实验误差范围内,一条实验谱线可能与多种理论值对应。为使谱线辨认结果的不确定最小,作者计算了锗的类钠、类氦、类氟、类氧离子波长在  $6 \sim 10 \text{ \AA}$  范围内的所有跃迁的振子强度<sup>[5]</sup>,根据自发跃迁几率的大小,把谱线对应的可能性较小的跃迁

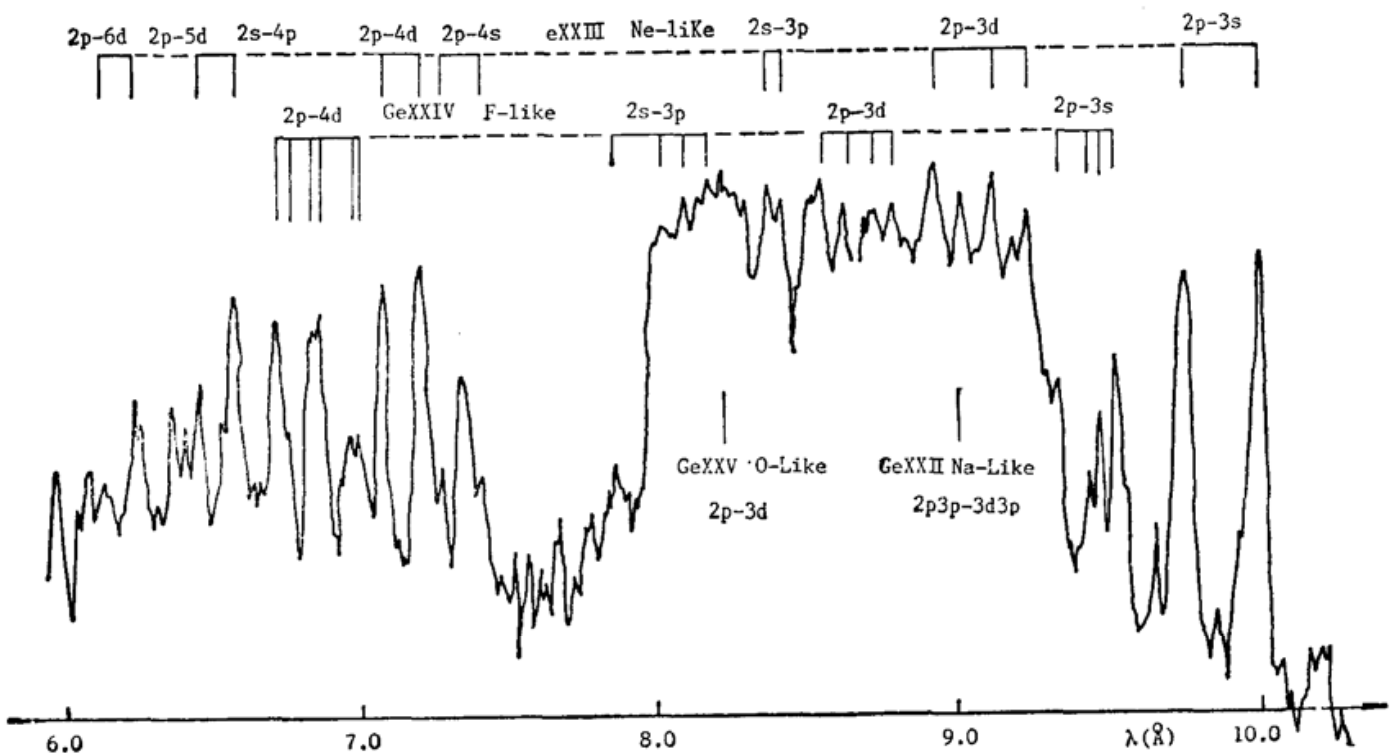


Fig. 3 Microdensitometer traces of the X spectra of Ge plasma

Table 1 Identification of X-ray spectral lines of laser-produced Ge plasma

No	wavelength (Å)			gf	ions	transition configuration
	exp.	th. [5]	th. [4]			
1	5.975					
2	6.085					
3	6.154	6.172	6.172	0.0677	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 6d(^2D_{5/2})]_1$
4	6.256	6.272	6.272	0.1227	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 6d(^2D_{5/2})]_1$
5	6.360					
6	6.403					
7	6.456	6.462	6.462	0.1269	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 5d(^2D_{5/2})]_1$
8	*6.577	6.574	6.575	0.2376	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2s2p^6 4p(^2P_{3/2})]_1$
9	*6.719	6.727	6.727	0.2901	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2P \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
10	6.758	6.767	6.768	0.3031	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2F \quad 3/2 \rightarrow 5/2$
11	6.841	6.839	6.838	0.4247	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2D \quad 1/2 \rightarrow 3/2$
		6.834	6.838	0.2968	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2P \quad 1/2 \rightarrow 1/2$
12	6.870	6.868	6.871	0.5638	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2D \quad 3/2 \rightarrow 5/2$
		6.871	6.871	0.3476	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2D \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
13	6.902	6.886	6.886	0.2010	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2P \quad 1/2 \rightarrow 3/2$
		6.883	6.886	0.1126	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4s \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2D \quad 3/2 \rightarrow 5/2$
14	0.996	7.009	7.010	0.0268	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 4s \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2D \quad 3/2 \rightarrow 5/2$
15	*7.081	7.078	7.078	0.3597	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 4d(^2D_{5/2})]_1$
16	*7.208	7.203	7.205	0.4539	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 4d(^2D_{5/2})]_1$
17	7.276	7.269	7.268	0.0217	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 4s]_1$
18	7.348					
19	7.409	7.410	7.410	0.0238	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 4s]_1$
20	7.657					
21	7.781					
22	7.860	7.845	7.859	0.0897	GeXXIV	$2s^2 2p^5 \rightarrow 2s2p^5 3p \quad 2P \rightarrow ({}^1P)^2D \quad 3/2 \rightarrow 5/2$
23	8.031	8.017	8.027	0.1519	GeXXIV	$2s^2 2p^5 \rightarrow 2s2p^5 3p \quad 2P \rightarrow ({}^1P)^2D \quad 1/2 \rightarrow 1/2$
24	8.111	8.114	8.110	0.2513	GeXXIV	$2s^2 2p^5 \rightarrow 2s2p^5 3p \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2P \quad 3/2 \rightarrow 1/2$
25	8.183	8.181	8.182	0.1656	GeXXIV	$2s^2 2p^5 \rightarrow 2s2p^5 3p \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2S \quad 1/2 \rightarrow 1/2$
26	8.238	8.257	8.233	0.5666	GeXXV	$2p^4 \rightarrow 2p^3 3d \quad 3P \rightarrow ({}^2D)^3P \quad 2 \rightarrow 2$
27	8.373	8.352	8.356	0.3303	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2s2p^6 3p(^2P_{3/2})]_1$
28	8.425	8.403	8.410	0.0694	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2s2p^6 3p(^2P_{1/2})]_1$
29	8.572	8.559	8.567	2.0080	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3d \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2P \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
30	8.655	8.665	8.653	0.0610	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^4D \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
31	8.738	8.758	8.754	0.3719	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3d \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2P \quad 1/2 \rightarrow 3/2$
32	8.802	8.792	8.788	0.7425	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3d \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^4P \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
33	8.933	8.913	8.913	2.1453	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 3d(^2D_{5/2})]_1$
34	9.024	9.033	9.032	1.2260	GeXXII	$2p^6 3p \rightarrow 2p^5 3p 3d \quad 1S \rightarrow 2P \quad 1/2 \rightarrow 3/2$
35	9.123	9.111	9.112	1.2362	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{5/2})]_1$
36	9.232	9.220	9.216	0.0089	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 3d(^2D_{3/2})]_1$
37	9.344	9.340	9.340	0.0786	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3s \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^4 \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
38	9.444	9.434	9.439	0.0497	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3s \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^4P \quad 3/2 \rightarrow 1/2$
39	9.484	9.482	9.481	0.1795	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3s \quad 2P \rightarrow ({}^1D)^2D \quad 1/2 \rightarrow 3/2$
40	9.531	9.532	9.531	0.2659	GeXXIV	$2p^5 \rightarrow 2p^4 3s \quad 2P \rightarrow ({}^3P)^2P \quad 3/2 \rightarrow 3/2$
41	9.668					
42	*9.760	9.762	9.758	0.0952	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{1/2}), 3s]_1$
43	*10.007	10.011	10.009	0.1313	GeXXIII	$2s^2 2p^6 \rightarrow [2p^5(^2P_{3/2}), 3s]_1$

排除。即使如此,仍有不少谱线是多种跃迁的迭加。

从表 1 可以看出,除极个别的几条谱线,绝对多数谱线的实验值与理论值符合得很好。有几条谱线,没有相近的理论值,但在其附近没有其它跃迁,所以尽管波长差别较大,仍可基本断定它对应表中所列跃迁。而另外一些谱线,没有对应的理论值。波长 $\sim 6 \text{ \AA}$ 的谱线,猜想可能是锗类氦离子  $n > 6$  或锗类氟离子  $n > 5$  的激发态向基态跃迁的结果,这可在下一步的计算中得到证实。而波长在  $7.5 \text{ \AA}$  左右的几条谱线,则有待进一步研究。

感谢中国工程物理研究院上海激光实验室其他同志对本实验的支持与协助,感谢中国科学院上海光学精密机械研究所六路实验室有关同志维持器件运行,保证实验的顺利完成。

### 参 考 文 献

- [1] V. A. Boiko *et al.*; *J. Phys. (B): Atom. Molec. Phys.*, 1979, **12**, No. 12 (Jun), 1927~1932.
- [2] P. K. Carrol *et al.*; *J., Phys. (B): Atom. Molec. Phys.*, 1986, **19**, No. 19 (Oct), L651~L656.
- [3] Zhang Zhengquan *et al.*; *Private communication.*
- [4] H. Gorden *et al.*; *J. Phys. (B): Atom. Molec. Phys.*, 1980, **13**, No. 10 (May), 1985~1999.
- [5] R. D. Cowan *et al.*; *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, **58**, No. 6 (Jun), 808~818 and No. 7 (Jul), 924~933.

## Identification of X-ray spectral lines in high-charged laser-produced Ge plasma

MA GUOBIN

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

HAN GUOQIANG, WANG XIN, GU YUAN AND WANG SHIJI

(Shanghai Laser Laboratory, China Academy of Engineering Physics)

QIU YANGHUI

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics Beijing)

(Received 15 December 1989; revised 27 February 1990)

### Abstract

With the calculated oscillator strengths of  $\text{Na}^-$ ,  $\text{Ne}^-$ ,  $\text{F}^-$  and  $\text{O}^-$  like Ge ions, over forty lines ( $\lambda = 6 \sim 10 \text{ \AA}$ ) of laser-produced Ge plasma taken by a plate crystal spectrograph have been identified.

**Key words:** X-ray spectral lines of laser plasma; oscillator strenth.