

激光产生的 CuXXII 离子 X 光谱线辨认

郑丹青 张正泉 范品忠 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

用 TLAP 晶体谱仪拍摄了 8~14Å 波长范围内铜的激光等离子体 X 光谱,以铜的类氧离子为例,采用由能级值反推跃迁波长的方法,同时结合等电子序列的莫塞莱定律,归类了 $2p^3s^2s-2s^22p^4$ 和 $2p^33d-2s^22p^4$ 之间一百多条新的谱线,与实验结果相比较,大部分波长误差在 $\pm 5\text{m}\text{\AA}$ 以内。

关键词: 激光等离子体; 晶体谱仪。

一、引 言

对激光等离子体软 X 光谱的拍摄,可通过各种类型的晶体谱仪,掠入射光栅谱仪等来实现。就铜原子的激光等离子体谱而言,已有很多人做过拍摄和归类的工作,如在 X 波段, V. A. Biuk 等给出了铜的类铍、类氩^[1]和类氟^[2]光谱, H. Gordon 等除了给出铜的类氩、类氟光谱以外,还给出了铜的类氧光谱^[3]; 在 xuv 波段, J. O. Ekbery 等给出了铜的类氧到类硼离子的光谱^[4], 而 J. Sugar 等给出了铜的类氩到类氧离子光谱^[5], 另外, Kelly 等已给出了不完整的铜的各阶离子发射谱^[6]。

对新谱线的识别与归类,通常可采用将实验值与理论计算值进行比较来得出,如利用精度较高的 G. E. Bromage 程序包^[7]和 I. P. Grant 的程序包^[8], 另外,根据莫塞莱定律对等电子序列进行外推和内插^[9]也不失为一个良好的方法。目前已发表了文献上所采用的方法均属上述两种。本文由能级能量值反推跃迁波长也得出了—些新的谱线,并且只要能级值的可靠性足够高,则所得出的波长精度与参考波长具有同一量级。下面就以由 TLAP 晶体谱仪拍摄的铜的类氧离子谱来说明这一点。

二、实验装置及数据处理

1. 实验装置

我们的实验在中国科学院上海光机所六路钕玻璃激光装置上进行,波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 输出能量为 10J 左右,脉宽 200~400 ps, 激光束经一个 $F/2$ ($f=120\ \text{mm}$) 非球面透镜聚焦后, 焦点直径约为 $50\ \mu\text{m}$ 。对 X 射线发射谱的观测采用 $5\times 1\ \text{cm}$ TLAP 晶体谱仪, 然后利用日本理学电机株式会社的 MP-3 型显微光度计处理实验光谱照片。有关波长确定的详细描述可见文献^[9]。我们已获得大量新的铜的类钠至类铍离子的 X 光谱, 并且查出了现有文献中的一些错误, 有关这些将另文发表。

收稿日期: 1988年9月3日; 收到修改稿日期: 1989年1月27日

2. 数据处理

对于中 Z 元素的高电离态, 虽然原子的耦合表象已非某种纯耦合表象, 组态间存在严重的相互作用及混合, 但为了与以前的文献数据进行比较, 在这里, 能级仍采用 LS 符号来描述。

表 1 给出了类氧离子的激发态 $2p^33s$ 、 $2p^33d$ 向基组态 $2p^4$ 的大部分跃迁, 其中 λ^G 和 λ^K 分别为 H. Gordon^[3] 和 Kelly^[6] 等人的结果, λ^F 为根据 B. O. Fawcett 所给出的从镁原子到

Table 1 Wavelengths in Å, for transitions of $2s^22p^4--2p^33s$ and $2s^22p^4--2p^33d$ in O-like Cu XXII ions

Key	Transition	$J-J'$	λ^G	λ^K	λ^F	λ^E	λ_{obs}
	$2s^22p^4--2p^33s$						
1	$^3P-(^4S)^3S$	0-1	11.573	11.576	11.573	11.573	11.573
2		1-1	11.621	11.518	11.619	11.621	11.623
3		2-1	11.416	11.429	11.434	11.431	11.429
4	$^3P-(^4S)^1S$	1-2					
5		2-2					
6	$^3P-(^2P)^1P$	0-1				11.067	11.064
7		1-1				11.111	11.111
8		2-1				10.938	10.943
9	$^3P-(^2P)^3P$	0-1			11.201	11.200	11.200
10		1-0	11.266		11.257	11.258	11.259
11		1-1				11.245	11.239
12		1-2	11.097		11.121	11.123	11.121
13		2-1				11.081	11.084
14		2-2			10.956	10.949	10.956
15	$^3P-(^2D)^1D$	1-2			11.355	11.355	11.349
16		2-2			11.180	11.174	11.172
17	$^3P-(^2D)^3D$	0-1			11.407	11.405	11.407
18		1-1	11.440		11.449	11.452	11.440
19		1-2	11.466		11.456	11.458	11.462
20		2-1				11.267	11.271
21		2-2	11.266		11.275	11.273	11.271
22		2-3	11.198		11.202	11.200	11.200
23	$^1D-(^4S)^3S$	2-1				11.739	11.736
24	$^1D-(^2P)^1P$	2-1	11.185		11.211	11.219	11.218
25	$^1D-(^2P)^3P$	2-1	11.349		11.356	11.355	11.349
26		2-2	11.198		11.227	11.231	11.228
27	$^1D-(^2D)^1D$	2-2	11.468		11.487	11.468	11.462
28	$^1D-(^2D)^3D$	2-1				11.567	11.573
29		2-2	11.573		11.572	11.572	11.573
30		2-3			11.493	11.495	11.496
31	$^1S-(^4S)^3S$	0-1				12.020	12.021
32	$^1S-(^2P)^1P$	0-1	11.468		11.472	11.476	11.478
33	$^1S-(^2P)^3P$	0-1				11.619	11.623
34	$^1S-(^3D)^3D$	0-1				11.839	11.830
	$2s^22p^4--2p^33d$						
35	$^3P-(^4S)^3D$	0-1			10.727	10.724	10.722

(continued)

Key	Transition	$J-J'$	λ^G	λ^K	λ^F	λ^H	λ_{abc}
36		1-1			10.768	10.765	10.765
37		1-2			10.817	10.817	10.813
38		2-1			10.609	10.602	10.604
39		2-2			10.657	10.653	10.654
40		2-3	10.611	10.546	10.607	10.605	10.604
41	$^3P-(^4S)^5D$	0-1					
42		1-0					
43		1-1					
44		1-2				10.887	10.884
45		2-1					
46		2-2			10.718	10.720	10.722
47		2-3					
48	$^3P-(^2D)^1S$	1-0					
49	$^3P-(^2D)^3S$	0-1			10.488	10.488	10.486
50		1-1			10.525	10.528	10.540
51		2-1			10.374	10.371	10.365
52	$^3P-(^2D)^1P$	0-1			10.551	10.555	10.556
53		1-1				10.595	10.587
54		2-1			10.438	10.437	10.430
55	$^3P-(^2D)^3P$	0-1			10.518	10.517	10.507
56		1-0			10.564	10.565	10.570
57		1-1			10.556	10.558	10.556
58		1-2	10.611		10.601	10.604	10.604
59		2-1			10.406	10.408	10.410
60		2-2	10.392		10.448	10.445	10.445
61	$^3P-(^2D)^1D$	1-2			10.532	10.535	10.540
62		2-2			10.381	10.378	10.376
63	$^3P-(^2D)^3D$	0-1			10.626	10.628	10.630
64		1-1				10.669	10.654
65		1-2			10.555	10.557	10.556
66		2-1			10.509	10.509	10.509
67		2-2			10.402	10.399	10.398
68		2-3	10.406	10.506	10.412	10.410	10.410
69	$^3P-(^2D)^1F$	2-3	10.342		10.345	10.339	10.338
70	$^3P-(^2D)^3F$	1-2			10.678	10.683	10.683
71		2-2			10.523	10.522	10.509
72		2-3			10.505	10.504	10.504
73	$^3P-(^2D)^3G$	2-3			10.508	10.509	10.509
74	$^3P-(^2P)^1P$	0-1				10.204	10.204
75		1-1			10.244	10.241	10.239
76		2-1				10.694	10.692
77	$^3P-(^2P)^3P$	0-1				10.373	10.365
78		1-0			10.378	10.378	10.365
79		1-1	10.374			10.411	10.411
80		1-2					
81		2-1				10.259	10.256

(continued)

Key	Transition	$J-J'$	λ^G	λ^K	λ^P	λ^F	λ_{obs}
82		2-2					
83	$^3P-(^2P)^1D$	1-2				10.314	10.307
84		2-2				10.164	10.163
85	$^3P-(^3P)D$	0-1				10.330	10.329
86		1-1				10.368	10.365
87		1-2	10.316			10.318	10.321
88		2-1				10.217	10.204
89		2-2				10.168	10.162
90		2-3		10.450	10.189	10.187	10.185
91	$^3P-(^2P)^1F$	2-3			10.176	10.171	10.174
92	$^3P-(^2P)^3F$	1-2			10.472	10.472	10.486
93		2-2				10.317	10.321
94		2-3			10.307	10.307	10.307
95	$^1D-(^4s)^3D$	2-1				10.866	10.864
96		2-2		10.717		10.919	10.925
97		2-3				10.869	10.864
98	$^1D-(^2D)^3S$	2-1			10.622	10.624	10.630
99	$^1D-(^2D)^1P$	2-1			10.686	10.693	10.683
100	$^1D-(^2D)^3P$	2-1			10.654	10.655	10.654
101		2-2			10.670	10.701	10.703
102	$^1D-(D^2)^1G$	2-2			10.628	10.631	10.630
103	$^1D-(^2D)^3D$	2-1			10.762	10.768	10.765
104		2-3				10.653	10.654
105		2-3			10.660	10.664	10.654
106	$^1D-(^2D)^1F$	2-3	10.597		10.591	10.590	10.587
107	$^1D-(^2D)^3F$	2-2				10.782	10.786
108		2-3				10.763	10.765
109	$^1D-(^2D)^3G$	2-3			10.762	10.768	10.765
110	$^1D-(^2P)^1P$	2-1			10.333	10.333	10.329
111	$^1D-(^2P)^3P$	2-1	10.560			10.506	10.509
112		2-2					
113	$^1D-(^3p)^1D$	2-2	10.406			10.406	10.410
114	$^1D-(^3P)^3D$	2-1				10.461	10.451
115		2-2				10.410	10.410
116		2-3				10.431	10.430
117	$^1D-(^3P)^1F$	2-3	10.406		10.411	10.414	10.410
118	$^1D-(^3P)^3F$	2-2			10.567	10.567	10.570
119		2-3	10.611		10.551	10.556	10.556
120	$^1S-(^4s)^3D$	0-1				11.107	11.110
121	$^1S-(^2D)^3s$	0-1				10.854	10.855
122	$^1S-(^2D)^1F$	0-1				10.926	10.925
123	$^1S-(^2D)^3p$	0-1			10.888	10.886	10.884
124	$^1S-(^2D)^3D$	0-1		10.799	11.004	11.005	11.003
125	$^1S-(^3P)^1P$	0-1	10.611		10.554	10.550	10.556
126	$^1S-(^3P)^3P$	0-1				10.731	10.722
127	$^1S-(^3P)^3D$	0-1			10.687	10.685	10.683

镍原子的类氧离子 X 射线发射谱理论计算值^[10], 由莫塞莱定律所外推出的铜的类氧离子谱。比较可知, Kelly 的许多结果是不准确的。此外, 在跃迁编号 12、24、26、60、119、125 处, λ^G 和 λ^F 差别较大, 为对 Gordon 的结果进行验证, 对文献[3]中的数据应用莫塞莱定律进行计算, 发现它们也是彼此相容的, 这样得之, 上述 λ^G 和 λ^F 的差异一定来自对跃迁的误认。

我们由 $E_2 - E_1 = hc/\lambda$, 根据 λ^F 计算了组态 $2s^2 2p^4$ 、 $2s^2 2p^3 3s$ 和 $2s^2 2p^3 3d$ 各能级的能量值, 在计算中选取基态的 3p_2 项作为能量另点。然后根据这些能量值, 再反过来推导相应组态间的跃迁波长, 表 1 中的 λ^B 即为所得出的新结果。应该指出, 当同一能级的能量可由几个跃迁得出时, 我们选用其误差范围内的平均值, 这样, λ^B 和 λ^F 之间会略有差别。由此得出了大量新的跃迁波长, 与实验结果 λ_{obs} 比较可见, 大部分波长的精度在 $\pm 5 \text{ m}\text{\AA}$ 以内, 并且还发现, 跃迁 27 中的 λ^F 值是不准确的。

三、结 束 语

虽然由能级值反推跃迁波长能得出许多新的谱线, 但却往往得不到所有能级的能量值, 所以更完备的工作必须借助理论计算来完成。

衷心感谢中国科学院上海光机所六路激光装置运行组在实验中所提供的帮助; 衷心感谢田莉、周锦智、金仁山等同志所做的大量实验工作, 以及许多有益的讨论。

参 考 文 献

- [1] V. A. Boiko *et al.*; *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.*, 1978, **19**, No. 1 (Jan), 11~50.
- [2] V. A. Boiko *et al.*; *Physica Scripta*, 1979, **20**, No. 2 (Aug), 138~140.
- [3] H. Gordon; *J. Phys. B: Atom. Molec. Phys.*, 1980, **13**, No. 10 (May), 1985~1999.
- [4] J. O. Ekbery *et al.*; *J. O. S. A. B.*, 1987, **4**, No. 3 (Mar) 420~423.
- [5] J. Sugar *et al.*; *J. O. S. A. B.*, 1986, **3**, No. 5 (May), 704~710.
- [6] R. L. Kelly, L. J. Palumbo; *NEL Report* 7599, 1973.
- [7] G. E. Bromage; Rutherford Appleton Laboratory, Report AL-RS, 1978.
- [8] I. P. Grant *et al.*; *Comput. Phys. Commun.*, 1980, **21**, 207~246.
- [9] 张正泉, 范品忠等; 《光学学报》, 1987, **7**, No.4 (Apr), 324~334.
- [10] B. C. Fawcett *et al.*; *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1986, **34**, No. 2 (Mar), 215~260.

Classification of CuXXII X-ray spectra in laser-produced plasma

ZHEN DANQING, ZHANG CHENGCHUAN, FAN PINGZHONG AND XI ZHIZHAN
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 3 September 1988; revised 27 January 1989)

Abstract

Using a flat TLAP crystal spectrograph, we have recorded photographically the X-ray spectrum of laser-produced copper plasma in the range of $8\sim 14\text{\AA}$. According to Moseley rule combined with the method of rederiving wavelength from some known transitions, we have classified about one hundred new spectra of CuXXII, which belong to the transitions $2P^33S \rightarrow 2S^22P^4$ and $2P^33D \rightarrow 2S^22P^4$. The uncertainty of the calculated result is less than 5 m\AA . Compared with the experimental one.

Key words: laser-produced plasma; crystal spectrograph.