

激光产生 MgIX 等离子体软 X 射线谱的识别

陆培祥 张正泉 范品忠 徐至展
(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 用掠入射光栅光谱仪拍摄了 4~12 nm 波段范围内镁的激光等离子体软 X 射线发射光谱。利用等电子数序列离子光谱的规律性, 对镁的类铍电离级离子跃迁的软 X 光谱线进行了识别。
关键词: 软 X 射线光谱, 激光等离子体, 掠入射光栅光谱仪

Recognition of MgIX spectra excited in a laser-produced plasma

Lu Peixiang, Zhang Zhengquan, Fan Pinzhong, Xu Zhishan
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: The emission spectrum of laser produced magnesium plasma has been recorded photographically in 4-12 nm spectral range by means of a grazing incidence grating spectrograph. Using isoelectronic regularities from known spectra of other neighbouring ions, the spectral lines of Be-like magnesium ions have been recognized and many new ones are obtained.

Key words: soft X-ray spectra, grazing incidence grating spectrograph

一、引 言

近年来,对 X 射线激光的探索,使软 X 射线波段光谱的研究日益受到人们的重视。特别是激光等离子体的光谱诊断研究,对于 X 射线激光器的研制、核聚变及天体物理等方面的工作都是极其重要的。

对低 Z 元素的 K 系列 X 射线发射光谱^[1]和中 Z 元素 L 系列 X 射线发射光谱^[2,3],我们已进行了一系列研究并得到了很好的结果。最近,由于利用复合泵浦机制进行 X 激光实验研究^[4]的需要,我们对低 Z 元素(Mg、Al和 Si)在软 X 光波段的发射光谱进行了研究。本文报道的是镁激光等离子体发射光谱的初步结果。用消像散掠入射光栅光谱仪在 4~12 nm 波段实验观测镁激光等离子体软 X 射线光谱,并对类铍镁离子的跃迁进行了识别,结果表明实验观测值与用莫塞莱定律所得的预期值以及 Söderquist^[5]、R. L. Kelly^[6]的数据基本相符。

二、实验装置和实验方法

本实验是在由一级调 Q 振荡器、一级前置放大器和四级放大器组成的常规千兆瓦高功率钕玻璃激光装置上进行的。激光系统输出能量约为 15 J, 脉宽为 7 ns。实验中激光束通过柱面透镜 ($R=400$ mm) 和非球面透镜 ($f=50$ mm) 后线聚焦在厚为 0.5 mm 的平面镁靶上。靶平面与激光束垂直正交, 焦线长 3 mm, 宽 300~400 μm , 焦线方向与光谱仪接近同轴。靶上平均功率密度约 10^{11} W/cm²。靶和激光聚焦系统及光谱仪均处于 10^{-4} Torr 的高真空中。

实验用掠入射光栅光谱仪拍摄了镁的激光等离子体软 X 射线谱。光谱仪的光栅槽数为 2400/mm, 闪耀角为 2° , 罗兰圆直径 $R=1$ m, 拍摄波长范围为 1~12 nm^[7]。记录谱线是用医用 5F 型 X 光胶片, 由于胶片灵敏度的限制, 采用累积能量打靶, 正常打靶 20 次才能得到一张合格的光谱照片, 实验中控制每次打靶能量偏离在 1.0 J 之内。谱线位置是用 MP-3 型显微光度计处理实验所得光谱照片而测出, 典型的镁等离子体软 X 射线发射谱的黑度扫描曲线如图 1 所示。

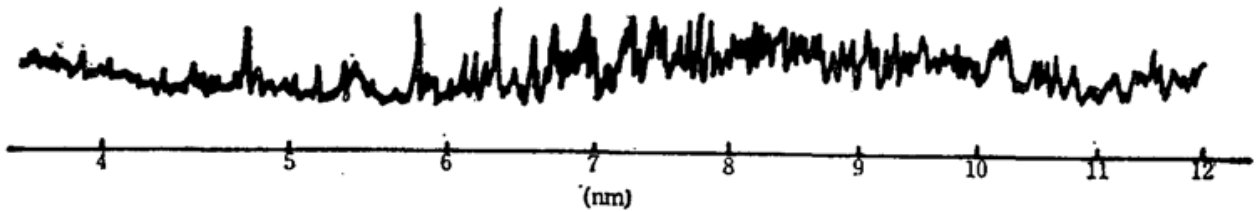


Fig. 1 Spectral densitometer trace of laser produced magnesium plasma

三、波长的确定和谱线识别的方法

图 1 中可以看到镁的激光等离子体软 X 射线发射光谱谱线非常丰富, 在所观测范围内有几百条谱线, 它们分别属于类锂、类铍、类硼、类碳、类氮和类氧离子的跃迁。

由光栅公式:

$$\sin \alpha - \sin \beta = \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

得到谱线波长与谱线位置的关系 (如图 2 所示):

$$\lambda = d \left\{ \sin \alpha - \sin \left[\sin^{-1} \left(\sin \alpha - \frac{\lambda_0}{d} \right) - \frac{x}{R} \right] \right\} \quad (2)$$

其中 α, β 分别为入射角和衍射角; λ, λ_0 为谱线和标准谱线的波长; x 为谱线与标准谱线在光谱照片上的距离; R 为罗兰圆直径。

由 (2) 式我们得到光谱仪的色散率为

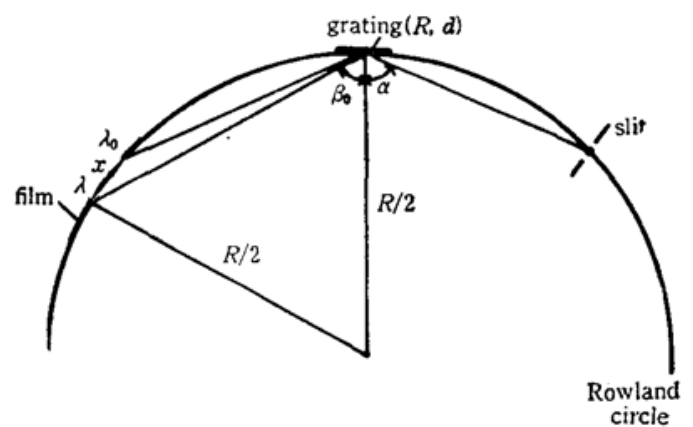


Fig. 2 Analytical relation between a spectral line and its wavelength for a grazing incidence grating spectrometer

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{d}{R} \cos \left[\sin^{-1} \left(\sin \alpha - \frac{\lambda_0}{d} \right) - \frac{x}{R} \right] \quad (3)$$

则有

$$\Delta\lambda \approx 7.3 \times 10^{-8} \cdot \Delta x \quad (4)$$

由图 1 得到记录软片上最窄的谱线宽度约为 $30 \mu\text{m}$, 利用 (4) 式估计确定的波长值的分辨率约 $2 \times 10^{-13} \text{nm}$ 。

由 (4) 式可以看出只要确定一标准谱线, 即可由谱线的相对位置得到所有谱线的波长值。但由于 α 很难准确测得 (α 的设计值约 88°), 故本文把 α 作为常数参量来处理。首先根据莫塞莱定律, 即在等电子数序列中, 原子序数不同的离子跃迁的能量差的平方根 $\sqrt{\Delta E}$ 与原子序数 Z 之间有非常好的线性关系的规律^[8], 从已有相邻元素的光谱数据进行内插和外推, 得到一系列波长预期值 (见表 1), 然后取 $\alpha = 88^\circ$, 把计算所得各预期谱线的相对位置与实验所得谱线位置比较, 由于实际 α 值接近 88° , 所以这与谱线实际相对位置差别非常小, 这样就可以把这些谱线识别出来。对照 Söderquist 和 R. L. Kelly 的数据, 选出其中一些较确定的强线, 拟合反推出 $\alpha = 87.9^\circ$, 然后以一较窄线作标准谱线 (本文为 6.1924nm), 利用式 (2) 计算确定谱线波长的观测值。

波长观测值的不确定性主要归因于测量谱线位置的误差 (由 (4) 式估计为 $\pm 3 \times 10^{-4} \text{nm}$) 及 α 带来的误差, 后者取决于预期值的精度, 但这已用解析法减小到最低程度。计算表明, 所有预期值具有足够的精度。

本文对类铍镁离子跃迁的软 X 谱线进行了识别, 表 1 列出了类铍镁离子跃迁的波长。为了比较波长测量的精度, 表 1 中除了本文的波长预期值和观测值外, 还列了 Söderquist 和 R. L. Kelly 的波长数据。表中的预期值是由 Hooray 等人^[9]、Söderquist^[10] 及 Tondello 等人^[11] 的数据沿等电子数序列内插或外推得到的。由表 1 可以发现, 我们实验所测波长值与预期值以及 Söderquist, R. L. Kelly 的数据基本一致, 偏差小于 $1 \times 10^{-3} \text{nm}$ 。

表 1. 类铍镁离子 (MgIX) 跃迁的波长表 (nm)

No.	Configuration	Term	$J-J$	λ_{obs}	λ_{pr}	λ_{ref}
1	$2s^2 \sim 2s6p$	$1S \sim 1P^0$	0~1	4.1801	4.1800	4.1803 [*]
2	$2s2p \sim 2s7d$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	4.3129	4.3115	4.3138 [*]
3	$2s2p \sim 2p5p$	$3P^0 \sim 3P$	2~2	4.3479	4.3475	4.3481 [*]
4	$2s^2 \sim 2s5p$	$1S \sim 1P^0$	0~1	4.3851	4.3857	4.3843 [*]
5	$2s2p \sim 2s6d$	$3P^0 \sim 3D$	1~2	4.4370	4.4362	4.4373 [*]
6	$2s2p \sim 2s6d$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	4.4415	4.4424	4.4420 [*]
7	$2s2p \sim 2s5d$	$3P^0 \sim 3D$	1~2	4.6651	4.6649	4.6657 [*]
8	$2s2p \sim 2s5d$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	4.6704	4.6705	4.6711 [*]
9	$2s2p \sim 2p4p$	$3P^0 \sim 3P$	2~2	4.7827	4.7834	4.7818
10	$2s2p \sim 2p4p$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	4.7952	4.7952	4.7947
11	$2p^2 \sim 2p5d$	$3P \sim 3P^0$	2~2 γ	4.8026	4.8033	
	$2p^2 \sim 2p(2P^0)5d$	$3P \sim 3D^0$	2~3	4.8026		4.8024 [*]
12	$2s^2 \sim 2s4p$	$1S \sim 1P^0$	0~1	4.8342	4.8337	4.8340
13	$2s2p \sim 2p4p$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	4.8799	4.8789	4.8794
14	$2s2p \sim 2s5d$	$1P^0 \sim 1D$	1~2	4.9592	4.9591	4.9586
15	$2s2p \sim 2p4p$	$1P^0 \sim 1D$	1~2	5.0781	5.0772	5.0777
16	$2s2p \sim 2s4d$	$3P^0 \sim 3D$	0~1	5.1553	5.1554	5.1560

(续表)

No.	Configuration	Term	$J-J$	λ_{obs}	λ_{pr}	λ_{ref}
17	$2s2p \sim 2s5d$	$3P^0 \sim 3D$	1~2	5.1596	5.1589	5.1591 [*]
	$2s2p \sim 2s4d$	$3P^0 \sim 3D$	1~1 _?			5.1591
18	$2s2p \sim 2s4d$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	5.1654	5.1655	5.1654
19	$2p^2 \sim 2p4d$	$3P \sim 3P^0$	1~2	5.3108	5.3100	5.3112
20	$2p^2 \sim 2p4d$	$3P \sim 3P^0$	2~2	5.3191	5.3190	5.3188
21	$2p^2 \sim 2p4d$	$3P \sim 3D^0$	2~3	5.3227	5.3228	5.3222
22	$2p^2 \sim 2p4d$	$1D \sim 1F^0$	2~3	5.4011	5.4020	5.4011
23	$2p^2 \sim 2p4d$	$1D \sim 1D^0$	2~2	5.4468	5.4462	5.4463
24	$2s2p \sim 2s4d$	$1P^0 \sim 1D$	1~2	5.5069	5.5067	5.5060
25	$2p^2 \sim 2p4d$	$1S \sim 1P^0$	0~1	5.6849	5.6836	5.6861
26	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3P$	1~2	6.1053	6.1050	6.1038
27	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3P$	1~1	6.1089	6.1085	6.1088
28	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3P$	2~2	6.1133	6.1128	6.1127
29	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3P$	2~1	6.1164	6.1168	6.1175
30	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3S$	0~1	6.1356	6.1354	6.1359
31	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3S$	1~1	6.1388	6.1395	6.1393
32	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3S$	2~1	6.1495	6.1492	6.1489
33	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	6.1924	6.1924	6.1924
34	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3D$	1~1	6.1968	6.1968	6.1964
35	$2s2p \sim 2p3p$	$3P^0 \sim 3D$	2~2	6.2029	6.2026	6.2020
36	$2s^2 \sim 2s3p$	$1S \sim 1P^0$	0~1	6.2742	6.2746	6.2751
37	$2s2p \sim 2p3p$	$1P^0 \sim 1D$	1~2	6.5617	6.5614	6.5609
38	$2s2p \sim 2p3d$	$3P^0 \sim 3D$	0~1	6.7096	6.7094	6.7090
39	$2s2p \sim 2s3d$	$3P^0 \sim 3D$	1~2	6.7131	6.7130	6.7135
40	$2s2p \sim 2s3d$	$3P^0 \sim 3D$	2~3	6.7238	6.7239	6.7239
41	$2s2p \sim 2p3p$	$1P^0 \sim 1P$	1~1	6.7721	6.7725	6.7731
42	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3P^0$	0~1	6.8949	6.8944	6.8949
43	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3P^0$	1~1	6.9006	6.9006	6.9009
44	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3P^0$	1~2	6.9065	6.9058	7.9058
45	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3P^0$	2~1	6.9114	6.9114	6.9116
46	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3P^0$	2~2	6.9165	6.9160	6.9161
47	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3D^0$	1~2	6.9402	6.9405	6.9413
48	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3D^0$	2~3	6.9464	6.9463	6.9467
49	$2p^2 \sim 2p3d$	$3P \sim 3D^0$	2~2	6.9508	6.9515	6.9513
50	$2p^2 \sim 2p3d$	$1D \sim 1P^0$	2~1	6.9611	6.9612	6.9615
51	$2p^2 \sim 2p3d$	$1D \sim 1F^0$	2~3	6.9939	6.9944	6.9950
52	$2s2p \sim 2s3s$	$3P^0 \sim 3S$	0~1	7.1835	7.1837	7.1841
53	$2s2p \sim 2s3s$	$3P^0 \sim 3S$	1~1	7.1903	7.1902	7.1901
54	$2s2p \sim 2s3s$	$3P^0 \sim 3S$	2~1	7.2029	7.2031	7.2027
55	$2p^2 \sim 2p3d$	$1D \sim 1D^0$	2~2	7.2228	7.2229	7.2226
56	$2s2p \sim 2s3d$	$1P^0 \sim 1D$	1~2	7.2315	7.2313	7.2313
57	$2p^2 \sim 2p3s$	$3P \sim 3P^0$	1~2	7.4280	7.4265	7.4274
58	$2p^2 \sim 2p3s$	$3P \sim 3P^0$	2~2	7.4368	7.4368	7.4366
59	$2p^2 \sim 2p3s$	$3P \sim 3P^0$	2~1	7.4411	7.4412	7.4411
60	$2p^2 \sim 2p3s$	$1D \sim 1P^0$	2~1	7.4731	7.4738	7.7738
61	$2s2p \sim 2s3s$	$1P^0 \sim 1S$	1~0	7.7745	7.7743	7.7737
62	$2p^2 \sim 2p3s$	$1S \sim 1P^0$	0~1	8.0433	8.0421	8.0428

注: λ_{obs} ——实验观测的波长值; λ_{pr} ——由文献[10]、[11]和[12]的数据沿等电子数序列内插或外推得到的波长预期值。 λ_{ref} ——参考波长值; 右上角标有“k”的波长值为 B. L. Kelly[6]的波长数据, 其它都是 Söderquist^[5]的波长数据。

(下转第 297 页)



Fig. 4 Two transverse patterns recorded at the laser frequency detunings

(a) $\delta = \omega_L - \omega_a = 1.9 \text{ GHz}$; (b) $\delta = \omega_L - \omega_a = 2.5 \text{ GHz}$.

Compared with fig. 1, because the pattern becomes clear and bright, the medial part of the pattern becomes bright points

影响空间的自位相调制不仅表现在光环数的很快减少,而且变得越来越明晰,随着频率远离共振方向调谐,环逐渐消失,最后形成自聚焦亮点,如图4所示。

在 Doppler 宽度之外,吸收很小,可以以两能级近似来描述空间相位调制,然而自聚焦效应的介入使理论描述偏离实验结果,由于稳态情况下必须考虑各种大小响应时间对自聚焦的影响以及饱和效应,原子中稳态自聚焦理论尚未建立,这给估计 $\Delta\psi$ 带来了困难。

综上所述,原子蒸气中连续激光的空间自相位调制具有和固体中完全不同的特性,多种过程的参与使理论描述十分困难,在衍射效应不强、自聚焦不显著、以及光学泵浦效应不明显的情况下,我们的描述是一种好的近似。考虑自聚焦效应的空间自位相调制理论,尚需作大量工作。

参 考 文 献

- 1 A. S. Zolot'ko *et al.*, *JEP T Lett.*, **32**, 158(1980)
- 2 S. D. Durbin *et al.*, *Opt. Lett.*, **6**, 411(1981)
- 3 R. Y. Shen, *Prog. Quant. Electr.*, **4**, 1(1975)
- 4 H. M. Gibbs *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **35**, 451(1979)
- 5 M. LeBerre, *Phys. Rev.*, **A 32**, 1604(1981)

(上接第 274 页)

参 考 文 献

- 1 卢仁详, 张正泉 *et al.*, 光学学报, **5**(4), 299(1985).
- 2 张正泉, 范品忠 *et al.*, 光学学报, **7**(4), 324(1987).
- 3 郑丹青, 张正泉 *et al.*, 光学学报, 待发表(1989).
- 4 徐至展, 张正泉 *et al.*, 中国激光, **16**(2), 128(1989).
- 5 Söderquist, *J. Ark. Mat. Astron. Fysik* **30A**(11), 1~20(1944).
- 6 R. L. Kelly, ORNL-59 22(1982)
- 7 张正泉, 范品忠等, 光学学报, **8**(5), 282(1988)
- 8 褚圣麟, 原子物理, (高等教育出版社, 1979).
- 9 Hoory, U. Feldman *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **60**, 1449(1970).
- 10 Söderquist, *J. Ark. Mat. Astron. Fysik*, **32A**, (19), 1~33(1946)
- 11 Tondello, G. and T. M. Paget, *J. Phys.*, **B3**, 1757~61(1976)