

线状钛激光等离子体的光谱特性*

李儒新 范品忠 王晓方 陆培祥 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 通过研究线状钛激光等离子体的轴向光谱, 辨认和归类了一些高离化态钛离子的谱线, 并发现钛等离子体与表层氧化物等离子体的相互作用导致轴向发射光谱强度变化的现象。文中还提出利用中 Z 元素类锂离子 $3d - 2p$ 跃迁和低 Z 元素类氢离子 $3p - 1s$ 或 $4p - 1s$ 的匹配线对, 来实现共振光泵和复合泵浦双机制作用的高增益类氢离子激光的新方案。

关键词 等离子体光谱, 类锂离子, 类氢离子。

生物活细胞的全息成像是短波长实验室 X 射线激光研究的直接目的, 但近年来, 虽然以激光等离子体为增益介质的 X 射线激光的研究取得长足进展^[1], 真正实用、廉价的工作于水窗波段的饱和激光器仍未出现。在众多候选方案中, 中 Z 元素的类锂和类氢离子复合泵浦机制是最有希望的方案^[2]。而中 Z 元素的高离化态光谱的实验数据比较缺乏, 因此, 这方面的工作日益受到重视。另外, 为提高复合 X 射线激光的增益, 引入一些附加的泵浦机制提高粒子数反转度也是十分值得尝试的。结合作者进行的类锂钛离子复合 X 射线激光实验^[3], 研究了线状钛激光等离子体的轴向光谱, 辨认和归类了一些高离化态钛离子的谱线, 提出了实现共振光泵和复合泵浦双机制作用的高增益类氢离子激光的新方案。

1 实 验

实验在本所的高功率激光系统 LF12 装置上进行。脉宽约为 110 ps 的准高斯型激光脉冲通过线聚焦光学系统在靶面上形成宽为 120 μm 的均匀焦线, 实验中靶面功率密度约为 $4.3 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 。实验用靶是表面经过抛光的钛金属厚靶, 靶长为 10 mm。实验所用诊断仪器是消像散掠入射平场光栅光谱仪^[4], 谱仪的光轴与线状等离子体的轴线准直, 谱仪的狭缝与靶面法向(驱动激光入射方向)平行, 因此获得的是沿垂直靶面方向具有一维空间分辨的等离子体轴向光谱。在 10 nm 附近谱仪的光谱分辨率为 1000^[4], 在整个摄谱范围内谱仪的空间分辨率为 35 μm , 空间放大倍数为 2.1^[5]。在谱仪的焦面上用相对标定过的 SIOFM-5FW X 光底片^[6]记录时间积分光谱, 用 SXRSC- I 型软 X 射线条纹相机^[7]记录时间分辨光谱。

* 国家 863 高科技项目。

收稿日期: 1994 年 7 月 18 日

2 结果与分析

2.1 谱线辨认

实验光谱的辨认是采用已知的参考谱线来确定谱仪结构参数,再通过色散方程来确定未知谱线的波长。由于中 Z 元素激光等离子体的光谱结构比较复杂,各个电离级的离子的发射光谱同时并存,谱线重叠很严重,再加上平场谱仪的分辨率不高,谱线中心波长的确定和谱线归类比较困难,因此仅给出了参考谱线附近的谱线辨认结果。本文采用的参考谱线是在整个光谱中非常显著的杂质元素 O 的类氢 H_α 线和 H_β 线。图 1 给出了 7.4 nm 到 10.4 nm 波段范围内,线状 Ti 等离子体轴向光谱在距靶面约 300 μm 处沿光谱方向的黑密度扫描径迹。表 1 则给出了该光谱中一些较强线的波长和对应的可能的跃迁组态,谱线波长的不确定度为 ± 0.005 nm。为了比较,表中还给出了理论计算的光谱数据^[8]和前人的实验数据^[9,10],由表 1 可见,在实验误差范围内本实验值与理论值或前人实验结果符合得较好。谱线辨认结果表明,在该波长区域等离子体光谱中类氢 O,类氢 O,类锂 Ti,类钠 Ti 和类氖 Ti 离子的光谱占优势,特别是类氢 O 的 H_α 线和 H_β 线尤其显著,由此得到一些启发(将在第 2 部分讨论)。

Table 1. Wavelengths and corresponding transition terms of the intense lines in Fig. 1

Ion	Transition	J-J	λ (obs.)	λ (from Ref.)
			(nm)	(nm)
Ti ¹²⁺	$2s^2 2p^5 3p - 2s^2 2p^5 4d$	1-2	8.055	8.0494 ^[10]
Ti ¹¹⁺	$2p^6 3s - 2p^6 4p$	0.5-0.5	8.232	8.2344 ^[9]
	$2p^6 3d - 2p^6 5f$	1.5-2.5	8.232	8.2307 ^[9]
	$2p^6 3d - 2p^6 5f$	2.5-3.5	8.232	8.2368 ^[9]
Ti ¹¹⁺	$2p^6 3p - 2p^6 4d$	1.5-2.5	9.058	9.0512 ^[9]
	$2p^6 3p - 2p^6 4d$	1.5-1.5	9.058	9.0547 ^[9]
Ti ¹⁰⁺	$4p - 5d$	0.5-1.5	9.852	9.8632 ^[8]
Ti ¹⁰⁺	$4p - 5d$	1.5-2.5	9.922	9.9293 ^[8]
Ti ¹²⁺	$2s^2 2p^5 3d - 2s^2 2p^5 4f$	2-3	10.024	10.016 ^[10]
Ti ¹⁰⁺	$4f - 5g$	3.5-4.5	10.092	10.0942 ^[8]
Ti ¹⁰⁺	$4f - 5g$	3.5-3.5	10.092	10.0980 ^[8]
Ti ¹⁰⁺	$4f - 5g$	2.5-3.5	10.092	10.0856 ^[8]

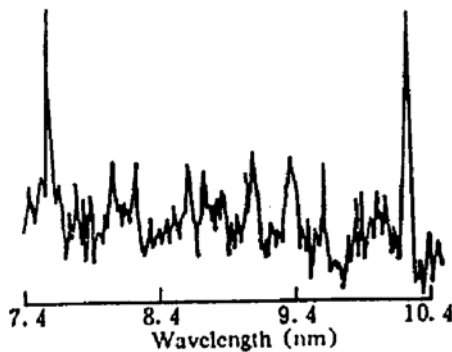


Fig. 1 Microdensitometer trace of the on-axis spectra of line-shaped Ti plasma in the wavelength range from 7.4 nm to 10.4 nm

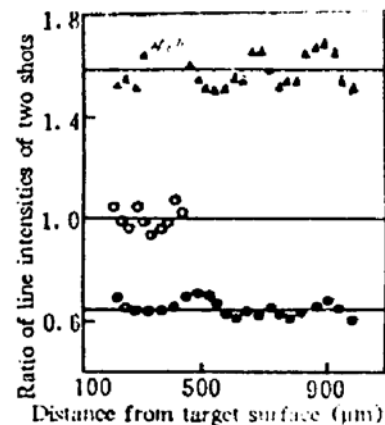


Fig. 2 The spatial distribution of line intensities ratios of two shots with the same laser conditions and the same plasma length. \blacktriangle : H-like $O^{7+} H_\alpha$, \circ : Li-like $Ti^{10+} 4f - 3d$, \bullet : Na-like Ti^{11+} at 8.232 nm

图 2 给出了两块同样长度的 Ti 靶在相同的激光辐照条件下产生的线状等离子体的轴向

光谱中类氢 O 离子 H_α 线强度比, 类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 跃迁谱线强度比和中心波长为 8.232 nm 的谱线(包括 Na-like Ti^{11+} 离子 $5f - 3d$ 和 $4p - 3s$ 跃迁, 见表 1)强度比随离开靶面的距离的分布情况。为了避开近靶面处等离子体的光厚和连续谱的影响, 本文着重考察在离开靶面 200 μm 以外的情况。另外, 因为类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 跃迁谱线强度随离开靶面距离增大急剧下降, 400 μm 以外谱线太弱也就未给出强度比, 而类氢 O 离子 H_α 线和类钠 Ti 离子 $5-3$ 和 $4-3$ 跃迁的空间范围较大, 实验给出了直到 1000 μm 的数据。图中的 3 条水平直线的纵坐标值代表各个强度比的所有数据点的平均值, 所有数据点偏离对应的平均值均不超过 10%, 小于用底片方法确定谱线强度的相对误差, 因此, 基本上可以忽略谱线强度比随离开靶面距离的变化。由图可知, 类氢 O 离子 H_α 线强度比, 类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 强度比和类钠 Ti 离子 8.232 nm 谱线强度比的平均值分别为 1.58, 1.01 和 0.65。由于产生两个等离子体的激光条件基本一致, 两套光谱中类氢 O 离子 H_α 线强度和类钠 Ti 离子谱线强度明显发生变化的主要原因在于靶条件的不同。Ti 等离子体中 O 离子杂质主要来源于金属 Ti 表面的氧化物或 Ti 金属的不纯(含氧化物), 两套光谱中类氢 O 离子 H_α 线强度不同表明两块靶的纯度或表面氧化程度不同。但两个光谱中类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 强度基本一致而类钠 Ti 离子谱线强度却相差很大, 显然值得探讨。激光加热过程中的电子温度可由下式估计^[11],

$$T_e = 0.6 [(1/f) \alpha I \lambda_L^2]^{3/8}$$

若 I 取 10^{14} W/cm^2 为单位, λ_L 取 μm 为单位, 则 T_e 以 keV 为单位。这里取 $f = 0.03$ ^[11], $\alpha = 34\%$ (100 ps , $\sim 4 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$)^[12], 激光波长为 1.053 μm 。实验中的靶面激光功率密度下, $T_e = 1847 \text{ eV}$ 。这种电子温度足以产生类 He 的 Ti 离子和 O 的裸离子, 但类 He 的 Ti 离子的光谱不在掠入射平场光栅光谱仪的摄谱波段内。在另一实验中采用类似的驱动条件观察到了类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 跃迁的自发辐射放大现象^[3], 可认为类 He 的 Ti 离子三体复合泵浦是其工作机制。在图 1 所示的光谱中, 发现了较强的类锂 Ti 离子 $5g - 4f$ 跃迁谱线, 理论计算表明这个跃迁具有很大的振子强度且下能级的自发辐射跃迁几率也很大, 是个可能的激光跃迁。类钠 Ti 离子的谱线则主要是在激光加热后, 等离子体通过膨胀冷却之后发射的, 虽然前面提到, 中 Z 元素的等离子体光谱比较复杂, 各个电离级的离子光谱同时存在, 等离子体辐射的早期也有类钠离子的发射, 但由于加热脉冲较短, 等离子体升温较快, 早期类钠离子的发射是很弱的, 这一点也可由时间分辨的测量的结果得到证实: 对距离靶面 170 μm 附近的测量表明类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射峰滞后于驱动激光脉冲峰值约为 170 ps, 而类钠 Ti 离子 $5-3$ 发射峰相对于类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射峰滞后 300~440 ps。

由上述分析可对图 2 中的现象作一定性解释。假如 O 的杂质主要来源于 Ti 靶的不纯(即混合靶), 那么如果 O 离子含量的不同(类氢 O 离子 H_α 线强度不同), 类锂 Ti 离子的含量必定不同, 那么类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 强度也就不同, 这与实验结果不符。因此, O 的杂质可能主要来源于 Ti 靶表面的氧化层, 由于 Ti 在常温下比较稳定, 氧化层一般是极薄的。可以设想激光脉冲的前沿首先将 Ti 靶表面的极薄的氧化层电离, 形成的低温的稀薄的等离子体层立即向外膨胀, 并开始发射类氢 O 离子的谱线, 氧化层氧化程度的不同使参与发射的 O 离子数不同也就导致类氢 O 离子的谱线强度的不同。激光脉冲主要部分基本不被吸收地穿过这层等离子体到达金属 Ti 表面, 形成高温的 Ti 等离子体, 将 Ti 剥离到类 He 电离级, 等离子体很快复合到类锂离子, 发射强的 $4f - 3d$ 谱线, 此时这层等离子体在空间上与外层的氧化物等离子体是分离的, 如果忽略 X 光相互作用, 类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射也就基本不受外层等离

子体的影响。Ti 等离子体的迅速膨胀冷却使等离子体继续复合, 导致类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射的空间宽度和时间宽度都较小, 距离靶面 $170 \mu\text{m}$ 附近类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射时间轮廓的半高宽度为 290 ps ^[3]。如果类锂 Ti 离子 $4f - 3d$ 发射基本结束时, 内层 Ti 等离子体与外层氧化物等离子体开始混合, 两层等离子体的相互作用就要影响这时占主导地位的一类钠 Ti 离子的发射, 靶初始表面的氧化程度的不同就可能使类钠 Ti 离子的发射强度发生变化。当然影响等离子体辐射的具体过程从已有的实验数据中无法得知, 其中的相互作用机制可能包括碰撞引起的能量转移和流体运动受阻导致 Ti 等离子体的冷却变慢, 使类钠离子丰度降低等。但实验结果发现了等离子体辐射确实受到影响, 具体作用过程有待于进一步研究。

2.2 共振光泵和复合泵浦双机制作用方案

图 1 光谱中类氢 O 的 H_α 线和 H_β 线特别强, 如前所述, 这些线是 Ti 的氧化物等离子体发射的。如同在氟化钙等离子体中, Ca 离子的强辐射致冷使等离子体以高于纯绝热膨胀冷却的速率迅速降温, 使采用块状靶的氟化钙等离子体中的类氢氟 $3-2$ 跃迁^[3]获得了与采用氟化锂细纤维靶方案^[13]类似的增益系数。也可利用氧化钛块状靶来实现类氢 O 的 H_α 线自发辐射放大。块状靶的优点是比细纤维靶有更高的同驱动激光耦合的效率。为进一步提高增益系数, 对特定的激光跃迁, 考虑引入一些附加的泵浦机制以提高粒子数反转度, 下面提出共振光泵和复合泵浦双机制作用的

类氢氧 H_α 激射的可能方案。相应的简化的能级图如图 3 所示。表 2 给出了有关跃迁的波长和振子强度, 其中类锂钛离子 $3d - 2p$ 跃迁的波长和跃迁几率是用多组态 HXR 方法的计算值^[8], 而类氢氧离子的数据则是普遍采用的结果。类锂钛离子 $3d - 2p(J = 5/2 - 3/2)$ 跃迁和类氢氧离子 $3p - 1s$ 跃迁匹配线对的波长相对差 $((\lambda_p - \lambda_c)/\lambda_p)$ 为 2.55×10^{-3} , 其中 λ_p 是泵浦线波长, λ_c 是吸收线波长。这种程度的失配可以通过多普勒频移和光厚加宽来补偿^[14]。表 2 还列出了类似的 Ca-N 共振系统以实现类氢氮的 H_β 线放大的有关数据, 类锂钙离子 $3d - 2p(J = 5/2 - 3/2)$ 跃迁^[15]和类氢氮离子 $4p - 1s$ 跃迁匹配线对的波长相对差为 1.82×10^{-3} 。由于高 Z 元素的组态相互作用较强, 理论计算有一定误差, 下一步将用高分辨的晶体谱仪来测量上述线对的实际匹配情况。另一方面, 上述共振光泵过程同样有助于减少对应的类锂离子 $4-3$ 跃迁下能级的光厚, 这对提高类锂离子 $4-3$ 跃迁激光增益也是有益的, 此外最近的理论研究^[16]表明激射体系中, 轻的杂质在减少复合再加热方面也更具优点。

Table 2. The related data for Ti-O and Ca-N photo-pumping systems

pumping line		collecting transition	λ_p (nm)	λ_c (nm)	λ_i (nm)	$(\lambda_p - \lambda_c)/\lambda_p$ ($\times 10^{-3}$)
transition	gf					
Ti ¹⁹⁺	2.44	O ⁷⁺	1.6047	1.6006	10.243	+2.55
$3d^2D_{3/2} - 2p^2P_{3/2}$		$3p^2P_{3/2} - 1s^2S_{1/2}$				
Ca ¹⁷⁺	2.43	N ⁶⁺	1.9790	1.9826	9.913	-1.82
$3d^2D_{3/2} - 2p^2P_{3/2}$		$4p^2P_{3/2} - 1s^2S_{1/2}$				

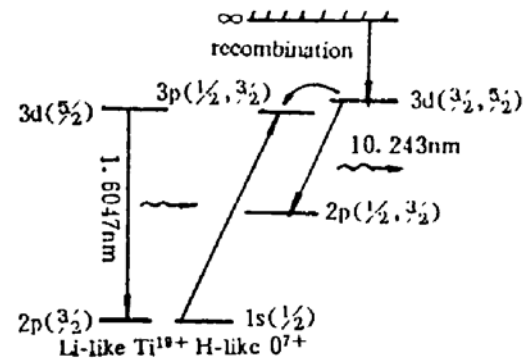


Fig. 3 The simple levels diagram representing the double mechanism pumping H-like O ion H_α lasing

结 论 本文通过研究线状钛激光等离子体的轴向光谱, 辨认和归类了 7.4 nm~10.4 nm 范围内的一些谱线, 它们分别属于类锂 Ti, 类钠 Ti 和类氦 Ti 离子的发射光谱。通过对不同发次等离子辐射光谱的比较, 发现在相同驱动条件下, 某些谱线的轴向强度发生变化, 这种现象可能源于钛等离子体与表层氧化物等离子体的相互作用。本文还提出了利用类锂离子 3d-2p 跃迁和类氢离子 3p-1s 或 4p-1s 跃迁的匹配线对, 来实现共振光泵和复合泵浦双机制作用的高增益的类氢离子 H_α 或 H_β 激励的新方案。

感谢 LF12 装置和靶场运行组的支持和帮助。张令清博士参加了部分实验, 冯贤平副研究员、韩中生研究员提出了有益的建议, 项惠珠, 高来兰为实验提供靶, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] S. Suchewer, C. H. Skinner, Soft X-ray lasers and their applications. *Science*, 1990, 247(12): 1553~1557
- [2] H. Dumont, J. L. Bourgade, J. Bruneau *et al.*, Three pumping schemes for soft X-ray lasers at $\lambda \approx 100$ Å. *Opt. Comm.*, 1993, 98(1, 2, 3): 87~93
- [3] Z. Z. Xu, Z. Q. Zhang, P. Z. Fan *et al.*, Recent progress on shorterwavelength recombination X-ray laser research at SIOFM. *4th Inter. Colloqui. on X-ray lasers*, Williamsburg, Virginia, U. S. A., May 16~20, 1994
- [4] P. Z. Fan, Z. Q. Zhang, J. Z. Zhou *et al.*, Stigmatic grazing-incidence flat-field gratingspectrograph. *Appl. Opt.*, 1992, 31(31): 6720~6723
- [5] Z. Z. Xu, Z. Q. Zhang, P. Z. Fan *et al.*, Investigation of Li-like Si ion recombination laser and plasma nonuniformity. *Appl. Phys. B*, 1993, 57(6): 319~323
- [6] P. X. Lu, P. Z. Fan, Z. Z. Xu *et al.*, A simple in-situ calibration technique for soft-X-ray film. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, 64(10): 2879~2882
- [7] X. Q. Zhang, M. X. Gong, Z. H. Chang *et al.*, Picosecond soft X-ray streak camera. *Proc. SPIE*, 1988, 1032: 602~607
- [8] 袁萍, 王永昌, 范品忠, Sc¹⁷⁺, Sc¹⁸⁺ 和 Ti¹⁸⁺, Ti¹⁹⁺ 光谱波长和辐射跃迁几率的多组态 HXR 计算. *原子与分子物理学报*, 1992, 9(1): 2174~2182
- [9] J. O. Ekberg, L. A. Svensson, Spectrum and term system of Ti XII. *Phys. Scripta.*, 1975, 12(3): 116~118
- [10] R. L. Kelly, Atomic and ionic spectrum lines below 2000 angstroms, Hydrogen through Krypton, Part I(H-Cr). *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, 16(Supplement 1): 532~543
- [11] C. E. Max, Heat transport in laser irradiated targets. LLNL Report, UCRL-53107, 1981, 186~189
- [12] C. E. Max, *Physics of Coronal Plasma*, North-Holland Publishing Ltd., 1982, 189
- [13] M. Grande, M. H. Key, G. Kiehn *et al.*, Measurement and detailed analysis of single pass gain at 81Å in a recombining laser produced fluorine plasma. *Opt. Comm.*, 1990, 74(5): 309~312
- [14] K. Gabel, Ch. Bergmann, E. Fill *et al.*, Verification of X-ray line coincidences by high-resolution spectroscopy. *Appl. Phys. B*, 1993, 58(1): 3~7
- [15] 滕华国, 徐至展, 沈百飞等, 类 Li 钙离子精细结构能级和软 X 射线光谱的理论计算. *光学学报*, 1993, 13(2): 134~138
- [16] S. B. Healy, G. J. Pert, Radiatively cooled recombination lasers. *Rutherford Appleton Laboratory Report*, RAL-94-042, 1994, 114~115

Spectral Characteristics of the Line-Shaped Ti Plasma

Li Ruxin Fan Pinzhong Wang Xiaofang

Lu Peixiang Zhang Zhengquan Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 18 July 1994)

Abstract The characteristics of the on-axis spectra of line-shaped Ti plasma was studied. Some spectral lines were classified and the variation of line intensities induced by interaction of Ti plasma and the Ti-oxide plasma was detected. A new proposal of lasing caused by both resonant photo-pumping and recombination pumping was given.

Key words plasma spectra, lithium-like ion, hydrogenic ion