

纳秒、飞秒激光脉冲下铝等离子体发射 光谱及其空间特性的比较

覃 岭 邓 健 钟方川 张正泉

(中国科学院上海光机所强光光学开放研究实验室 上海 201800)

提要 研究了 45 fs 和 6 ns 的强激光脉冲作用铝靶等离子体的发射光谱特性,发现在飞秒下 X 射线发射以 K 壳层为主,等离子体的温度(500 eV),电子密度($3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$)比纳秒情况(100 eV, $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$)下要高;铝等离子体的 X 射线发射长度短而且强区更靠近靶面。

关键词 飞秒激光, 等离子体诊断, 空间分辨测量

随着激光器件的发展,飞秒强激光的产生、超短强激光与物质的相互作用已成为当今研究的热点之一。强激光与物质(固体、分子、原子、团簇)作用过程中,等离子体的动力学特性,如温度、密度分布及其均匀性直接影响了 X 射线的发射特性、产生的 X 射线激光的增益高低及 X 射线的传输特性^[1,2],因而利用 X 射线谱来获取等离子体的温度、密度等重要参数,有助于我们对激光与物质相互作用机制和过程的认识和理解。国内 P. X. Lu, 王晓方等用条纹相机对纳秒光与各种固体靶进行了比较细致的研究^[3,4],但是在飞秒激光脉冲条件下,激光与物质的作用过程很快,超强激光能迅速地消融固体靶面,等离子体膨胀和扩散时间变得很小或可以忽略不计,等离子体的尺度在百分之一到十分之一激光波长的范围,从而激光能量可以直接沉积在固体表面上,产生大梯度的具有极高乃至近似固体密度的等离子体,其动力学过程及原子与离子的状态和时空特性与纳秒情况下完全不同。因此对飞秒激光下等离子体的特性,特别是时间与空间特性方面的研究具有重要的意义,飞秒与纳秒激光与物质作用的比较研究也有利于对其相互作用机理的理解。

本文报道了利用具有空间分辨能力的大面积透射光栅软 X 射线谱仪对铝等离子体在 0.5 ~ 11 nm 的发射光谱进行的研究,并用线强度比的方法对纳秒与飞秒激光打铝靶产生的等离子体的温度、密度特性进行了诊断,对其空间特性也做了简单的比较。

1 实验安排

图 1 给出了实验布局。所用的纳秒激光为 YAG 激光,其波长为 532 nm,单发能量为 180 mJ,脉宽为 6 ns;飞秒激光为钛宝石激光,中心波长为 785 nm,单发能量为 35 mJ,脉宽为 45 fs。两者的工作频率均为 10Hz,经过同一聚焦透镜和与铝靶作用,光强分别为 $3.8 \times 10^{11} \text{ W/}$

cm^3 , $8.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^3$ 。图中打靶透镜 5 装在步进电机上, 调靶时利用 He-Ne 激光模拟光路使纳秒、飞秒激光共轴, 并保证聚焦后落在靶面上。XUV 二极管用来监视 X 射线的发射。大面积透射光栅软 X 射线谱仪由轮胎镜、大面积透射光栅和 X 射线 CCD 照相机组成, 光栅刻线为 5000 条/mm, 光栅前面加 $0.25 \mu\text{m}$ 厚的铝膜挡可见光。实验过程中, 靶室的真空度优于 $1.3 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 。

2 实验结果

2.1 X 射线谱

图 2 给出了 X 射线 CCD 照相机接收到的谱图。图 3 (a), (b) 分别为纳秒与飞秒激光下铝等

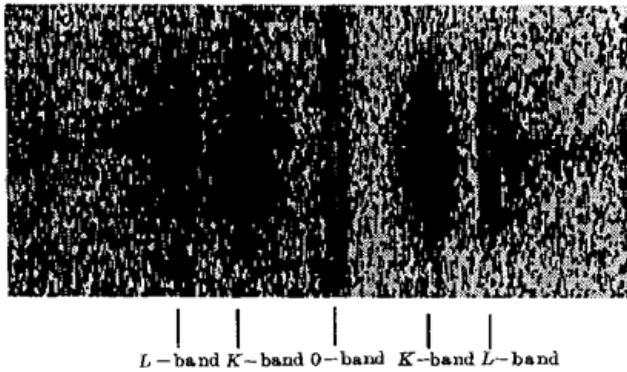


图 2 X 射线 CCD 面上的铝谱

Fig. 2 Spectrum taken by soft X-ray transmission grating spectrograph with soft-X-CCD camera

离子体 X 射线的时间积分谱, 积分时间为 5 s, 解谱时以文献[5, 6]为参考。在我们的实验条件下, 谱仪的光谱分辨率 $< 0.03 \text{ nm}$ (对 5 nm), 空间分辨率为 $20 \mu\text{m}$, 解谱时谱线的精确度小于 0.05 nm 。

从图 3 可见, 飞秒激光条件下, X 射线短波方向明显增强。这说明飞秒激光下, 等离子体的温度升高。从图 3 (a) 的 X 射线谱来看, 纳秒激光情况下铝等离子体的离子态以 Al^{10+} , Al^{9+} 为主, X 射线发射主要是 5 nm 左右的 L 带, 这与文献[4]中的结果是一致的。而从图 3 (b) 的 X 射线谱来看, 飞秒激光情况下铝等离子体的离子态以 Al^{12+} , Al^{11+} , Al^{10+} 为主, X 射线发射主要是 2.5 nm 左右的 K 带, 5 nm 左右的 L 带也有较强的分布。这是飞秒激光条件下高光强所致 ($8.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^3$)。图 3 (a) 中出现 Al^{8+} , Al^{7+} , Al^{6+} 离子以及图 3 (b) 中出现 Al^{9+} , Al^{8+} , Al^{7+} , Al^{6+} 离子是由于时间积分造成的, 这也说明铝离子是逐步电离的。对纳秒激光, 电离以碰撞电离为主; 飞秒激光情况下, 电离以光场电离为主, 但是, 在我们的实验条件下, 光场电离又不足以产生 Al^{12+} , Al^{11+} 这样高电离态, 说明飞秒激光与铝作用过程中, 也有碰撞电离的存在。

2.2 等离子体的温度与密度

在 XUV 诊断中, 用线强度比的方法可以比较精确地测量等离子体的温度和密度。其方法是选取两条位置比较靠近、强度比较强的谱线, 由一定的模型计算出两谱线强度比和等离子体温度与密度的依赖关系, 从而由实验的谱线强度反推出等离子体的温度与密度。对铝等离子体的 K, L 壳层发射, Duston 等用 CRE 模型作了深入的研究^[5, 6]。我们先用简化的二能级模型来获取纳秒激光下等离子体的平均电子温度^[7], 假设当电子碰撞到 5 nm 的能级几率最大时, 导致该能级的辐射最强, 有 $kT_e = x_{PQ}/2 = 113 \text{ eV}$ 。其中 x_{PQ} 为两能级的宽度。在这样的温度下, 可以参照 Duston 等的理论计算结果, 选用类 Li 铝 $2p(^2P) - 3s(^2S)$ 线与类 B 铝

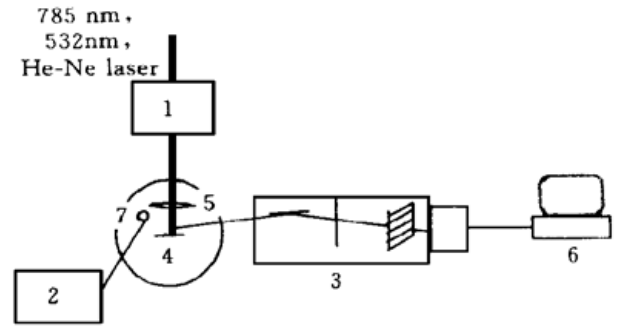


图 1 实验装置示意图

1: 远场监视系统; 2: 光谱仪; 3: 软 X 射线光栅谱仪; 4: Al 靶; 5: 聚焦透镜; 6: 计算机; 7: XUV 二极管
Fig. 1 Schematic of the experimental setup
1: far-field monitoring system; 2: oscilloscope; 3: soft-X-ray grating spectrograph; 4: Al target; 5: focusing lens; 6: computer; 7: XUV diode

$2s^2(1S)-2s3P(1P)$ 线的强度比来估计温度, 用 $Al^{III}2s^22p^3(4S)-2s^22p3s(4P)$ 线与 $Al^{III}2s^22p^3(2D)-2s^22p^2(1D)3s(2D)$ 线强度比来测量纳秒情况下的等离子体密度^[8]。对我们的实验数据, 两组线的比分别为 0.62, 0.66。与图 4 比较得到纳秒下等离子体的电子温度约为 100 eV, 电子密度为 $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ 。

在飞秒激光下, 铝等离子体的短波发射增强, 说明等离子体的温度很高, 以上的类 Li 铝的发射在这样的温度下发射很弱^[5], 因此选用有较高丰度的类 H 铝 $1s-2p$ 线与类 He 铝 $k^2-1s3p(1P)$ 线的强度比来估计铝等离子体的温度与密度^[6]。我们的实验数据为 1.75, 与图 5

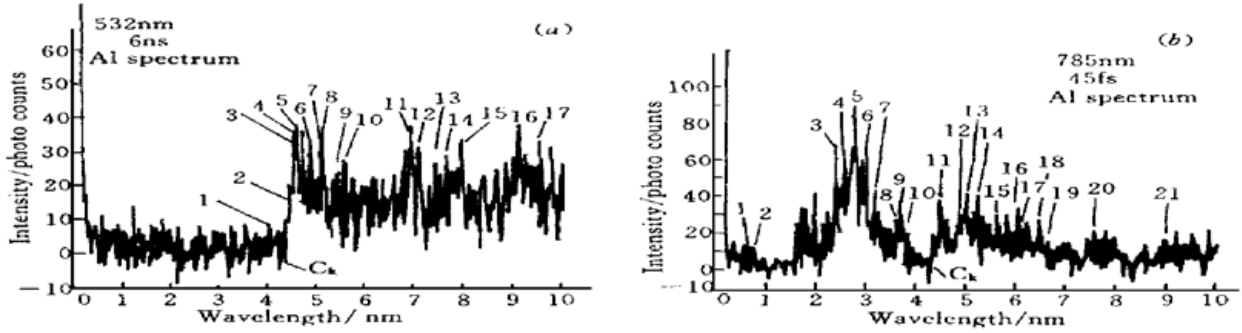


图 3 铝的 X 射线谱。(a) 532 nm 激光; (b) 785 nm 激光

Fig. 3 Spectrum of Al target irradiated

(a) 532 nm laser. 1: $Al^{10+}(1s^2 2p-1s^2 4d)$; 2: $Al^{9+}(2p^2-2p 4d)$; 3: $Al^{8+}(2s2p^2-2s2p 4p)$; 4: $Al^{8+}(2s2p^2-2s2p 5d)$; 5: $Al^{8+}(2s2p^2-2s2p 4d)$; 6: $Al^{10+}(1s^2 2s-1s^2 3p)$; 7: $Al^{9+}(2s2p-2s3p)$; 8: $Al^{9+}(2s^2-2s3p)$; 9: $Al^{10+}(2p-3s)$; 10: $Al^{9+}(2s2p-2s3d)$; 11: $Al^{8+}(2s2p^2-2s2p 3d)$; 12: $Al^{6+}(2s^2 2p^3-2s^2 2p^2 4s)$; 13: $Al^{7+}(2s2p^3-2s2p^2 3s)$; 14: $Al^{6+}(2s2p^4-2s2p^3 3d)$ or $Al^{6+}(2s^2 2p^3-2s^2 2p^2 3d)$; 15: $Al^{6+}(2s^2 2p^3-2s^2 2p^2 3d)$; 16: $Al^{6+}(2s^2 2p^3-2s^2 2p^2 3s)$; 17: $Al^{6+}(2s2p^4-2s2p^3 3s)$; (b) 785 nm laser. 1: $Al^{12+}(1s^2-1s3p)$; 2: $Al^{12+}(1s-2p)$; 3: $Al^{12+}(2p-7d, 2s-7p)$; 4: $Al^{12+}(2s-5p, 2p-5d)$; 5: $Al^{12+}(2s-4p, 2p-4d)$; 6: $Al^{10+}(1s^2 2s-1s^2 8p)$; 7: $Al^{10+}(1s^2 2s-1s^2 6p)$; 8: $Al^{10+}(1s^2 2p-1s^2 5d)$; 9: $Al^{10+}(1s^2 1s-1s^2 4p)$; 10: $Al^{10+}(1s^2 2p-1s^2 4d)$; 11: $Al^{9+}(2s2p-2s4d)$; 12: $Al^{10+}(1s^2 2s-1s^2 3p)$; 13: $Al^{9+}(2s^2-2s3p)$; 14: $Al^{10+}(1s^2 2p-1s^2 3d)$; 15: $Al^{9+}(2s2p-2s3d)$; 16: $Al^{9+}(2p^2-2p 3s)$; 17: $Al^{8+}(2s^2 2p-2s^2 3d)$; 18: $Al^{12+}(3s-6p, 3p-6d)$; 19: $Al^{8+}(2p^3-2p^2 3d)$; 20: $Al^{11+}(1s3d-1s6f)$; 21: $Al^{11+}(1s3d-1s5f)$

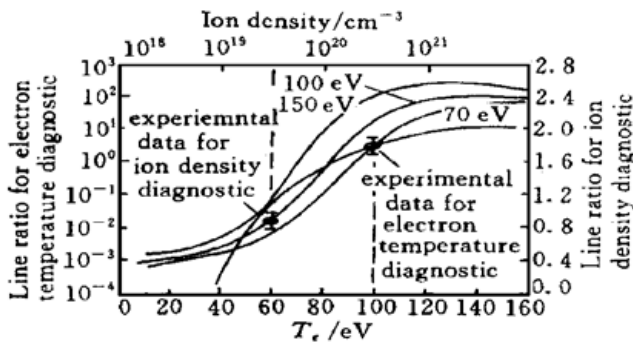


图 4 纳秒激光下用线强度比测量铝等离子体的参数

Fig. 4 Line ratio vs electron temperature and ion density with $Al^{III}2p(2P)-3s(2S)/Al^{III}2s^2(1S)-2s3P(1P)$, $Al^{III}2s^2 2p^3(4S)-2s^2 2p 3s(4P)/Al^{III}2s^2 2p^3(2D)-2s^2 2p^2(1D) 3s(2D)$, respectively
From ref. [6], Fig. 8, Fig. 12

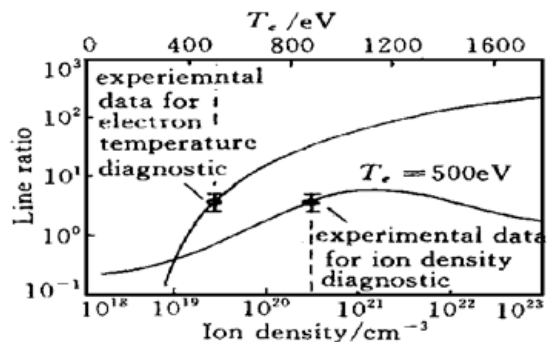


图 5 飞秒激光下用线强度比测量铝等离子体的参数

Fig. 5 Line ratio vs electron temperature and ion density with $Al^{III}(1s-2p)/Al^{III}1s-1s3p(1P)$.
From ref. [5], Fig. 8, Fig. 13

比较, 得到在光学薄近似下飞秒激光作用的等离子体电子温度为 500 eV, 电子密度为 $3 \times 10^{21} / \text{cm}^3$ 。在我们的系统中, 由于两线靠近轮胎镜的设计全反射角, 因此两条线损失较大, 但由于两线很靠近, 而测的是比值, 所以对测量结果是有效的。与纳秒结果比较, 发现飞秒下激光等离子体的温度、密度都比纳秒下的要高得多, 这也正是飞秒激光与固体靶相互作用的特点。

值得指出的是, 线强度比的方法虽然可以减少温度与密度绝对测量的困难, 但是仍然有一定的误差, 考虑到谱仪的谱分辨率、解谱以及 CRE 模型的理论误差, 在纳秒与飞秒下, 温度诊断误差分别约为 30~ 40 eV, 100 eV; 密度诊断的误差分别约为 100%, 120%。

对纳秒激光情况, 为了验证我们的线强度比方法的结果, 用类 Li 铝的 $5f-3d$ 跃迁谱线的 Stark 展宽来估算纳秒激光下铝等离子体的密度^[8,9], 在准静态近似下, 有 $\Delta\lambda = 0.04 \text{ nm}$, 对应的密度为 $1 \times 10^{20} / \text{cm}^3$ 。可见 Stark 展宽方法与线强度比方法得出的结论是一致的。

2.3 X 射线激光的空间特性

利用大面积透射光栅谱仪的一维空间分辨的特点, 可得到等离子体的空间分布情况, 光谱零级结果反映等离子体 X 射线发射是各个波长的总效应的空间分布; 一级结果反映单个波长发射的空间特性。图 6 (a) ~ (c) 分别给出了飞秒与纳秒下 Al X 射线谱的零级, K, L 带的空间分布比较图。

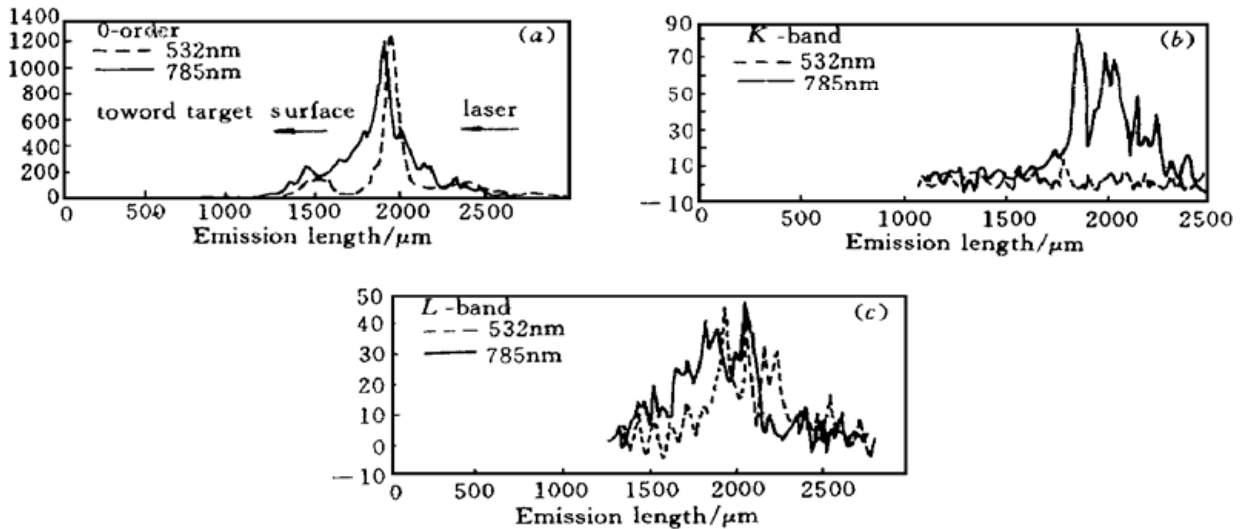


图 6 铝射线谱的空间分布比较图。(a) 零级; (b) K 带; (c) L 带

Fig. 6 The spatial distribution of Al X-ray spectrum of (a) 0-order; (b) K-band; (c) L-band

从图 6 (a) 可知, 飞秒激光下 Al 等离子体的 X 射线发射长度为 $1500 \mu\text{m}$ (图中 $1200 \sim 2700 \mu\text{m}$ 处), 纳秒下发射长度为 $2500 \mu\text{m}$, 因此飞秒下 Al 等离子体的喷射长度比纳秒下要短; 飞秒激光下 X 射线发射强区在 $1900 \mu\text{m}$ 处, 纳秒下强区在 $1975 \mu\text{m}$ 处, 两者相距 $75 \mu\text{m}$, 因此飞秒激光下 Al 等离子体的 X 射线的发射强区更靠近靶面。(b), (c) 中 X 射线的发射区域在飞秒下 K 带为 $750 \mu\text{m}$ 长, 纳秒下无 K 带发射, L 带都约为 $800 \mu\text{m}$, 这是由于飞秒激光光强很高, 使电子密度和温度很高, 导致 X 射线短波明显增强。

3 结 论

用大面积透射光栅谱仪观察了飞秒与纳秒激光作用下铝等离子体的发射谱, 对两种情况下等离子体的温度、密度用线强度比的方法进行了测量, 发现在飞秒下 X 射线发射以 K 壳层

为主, 等离子体的温度(500 eV), 电子密度($3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$) 比纳秒情况(100 eV, $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$) 下要高, 显示飞秒与纳秒下不同的作用机制; 对空间特性的分析, 发现飞秒激光等离子体的发射长度短, 而且更靠近靶面。由于谱仪分辨率的限制, 解谱时得到的谱线信息不完全而限制了对谱更多的重要信息的获取(例如高分辨率光谱和谱的时间特性)。因此需利用具有更高分辨率的谱仪, 如条纹像机对飞秒与纳秒激光下的等离子体的特性做更深入的研究。

致谢 感谢中国科学院上海光机所强光光学开放研究实验室的大力支持。

参 考 文 献

- 1 Yutaka Nagata, Katsumi Midorikawa, Shoich Kubodera *et al.*. Soft-X-ray amplification of the Lyman- α transition by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(23): 3774~ 3777
- 2 George Pretzler *et al.*. X-rays from optical-field ionized plasmas at low density. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10): 733~ 735
- 3 Pei-xiang Lu, Zheng-quan Zhang, Zhi-zhan Xu *et al.*. Spatial distributions of X-ray lasing spectral linewidth and electron density in a lithiumlike silicon plasma. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(14): 1649~ 1651
- 4 Xiaofang Wang *et al.*. Research of Plasmas induced by line-focusing-laser using pin-transmission-grating spectrograph. *Acta Phisica Sinica* (物理学报), 1990, **39**(5): 764 (in Chinese)
- 5 D. Duston *et al.*. Line emission from hot, dense aluminum plasmas. *Phys. Rev. A*, 1980, **21**(5): 1664~ 1676
- 6 D. Duston *et al.*. Soft-x-ray ultraviolet radiation from high-density aluminum plasmas. *Phys. Rev. A*, 1981, **23**(5): 2602~ 2621
- 7 Zhilin Xiang *et al.*. Diagnostic Technology of Hot Plasmas < 1 > . Shanghai: Shanghai Science and Technology Publication House, 1982. 60 (in Chinese)
- 8 A. Calisti *et al.*. Model for the line shapes of complex ions in hot and dense plasmas. *Phys. Rev. A*, 1990, **42**(9): 5433~ 5440
- 9 J. C. Motrno *et al.*. Stark-broadening measurements of $3d \rightarrow nf$ transitions in lithiumlike and heliumlike ions. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(1): 374~ 379

Comparison of Characteristics of X-Ray Emission And Its Spatial Distributions in an Alumium Plasma Using fs and ns Laser Pulses

Qin Ling Deng Jian Zhong Fangchuang Zhang Zhengquan
(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The characteristics of X-ray emission in aluminum plasmas using 45 fs and 6 ns pulsed lasers respectively are reported. It shows that under the fs laser, the X-ray emission is dominantly from the K shell, the aluminum plasma's temperature is 500 eV and the electron density is $3 \times 10^{21}/\text{cm}^3$, while under the ns laser, the L shell, 100eV and $2 \times 10^{20}/\text{cm}^3$ are obtained correspondingly. The spatial distributions are also compared simply.

Key words femtosecond pulsed laser, plasma diagnostics, measurement of spatial resolution