

飞秒和纳秒激光脉冲作用下等离子体 X 射线辐射特性

钟方川 邓 健 覃 岭 张正泉 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所强光光学开放研究实验室, 上海 201800)

摘 要 对飞秒和纳秒激光作用下的 Al 和 Cu 等离子体的 X 射线辐射进行了测量、分析和比较. 实验结果表明在飞秒激光脉冲下等离子体 X 射线峰值向短波方向移动. 同时 Al 等离子体的电离阶数和温度在飞秒下比纳秒高.

关键词 超短超强激光, 等离子体, X 射线谱.

1 引 言

由于啁啾脉冲技术的应用, 近年来超短强激光得到了迅速的发展, 使超短强激光与物质相互作用成为引人入胜的前沿领域, 受到广泛的重视和研究. 已有许多有关超短强激光与物质相互作用^[1-5]及其在超短 X 射线脉冲^[6-8]、X 射线激光^[9-11]、高次谐波^[12-13]等方面的应用的研究得到了开展.

利用纳秒级激光获得等离子体 X 射线辐射已得到广泛的研究. 在纳秒激光作用条件下由于等离子体的膨胀和扩散, 等离子体的尺度在几十到几百个激光波长的范围. 激光能量主要在对激光波长的临界面 [$n_{ec}(\text{cm}^{-3}) = 1 \times 10^{21}/\lambda(\mu\text{m})$] 处被吸收^[14]. 与纳秒或皮秒激光打靶不同, 在飞秒强激光作用时等离子体膨胀和扩散变得非常小或可忽略, 等离子体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, 产生大梯度的具有极高乃至近似固体密度的等离子体.

本文将对纳秒和飞秒激光作用下 Al 和 Cu 等离子体的 X 射线辐射进行分析, 并比较长脉冲和超短脉冲下波长在 0~ 10 nm 内的等离子体 X 射线辐射. 实验时飞秒和纳秒激光脉冲聚焦后的光强分别为 $8.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 、 $3.8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$.

2 实验安排

实验是在上海光机所强光光学实验室进行的. 利用纳秒、飞秒激光与平面 Al 靶或 Cu 靶作用产生等离子体. 等离子体的 X 射线辐射由轮胎镜加大面积透射光栅组成的掠入射透射光栅谱仪在与激光束成 90° 方向进行测量. 谱由 X 射线 CCD 记录. 实验装置如图 1 所示. 所用

的飞秒激光器为脉宽为 45 fs, 最高能量为 120 mJ, 重复频率为 10 Hz, 中心波长为 785 nm 的钛宝石激光器^[15]. 纳秒激光器为一台小型的重复频率为 10 Hz 的 YAG 激光器, 用其倍频的 532 nm 脉冲, 最大能量为 200 mJ, 脉宽为 6 ns. 飞秒和纳秒激光脉冲经 $F/1$ 的非球面镜聚焦到置于真空靶室内的平面靶上. 真空靶室内的真空度在 1.33×10^{-3} Pa 以上. 聚焦的好坏由图 1 的靶点远场监测系统监测, 精度可达 $2 \mu\text{m}$. 透射光栅谱仪所用的光栅条数为 5000 l/mm, 谱分辨率为 0.04 nm. 在光栅前加了 $0.25 \mu\text{m}$ 的 Al 膜, 以滤去可见光本底. 测量时调节谱仪使自靶面到垂直靶面 2 mm 以内的等离子体 X 射线辐射能被收集和测量.

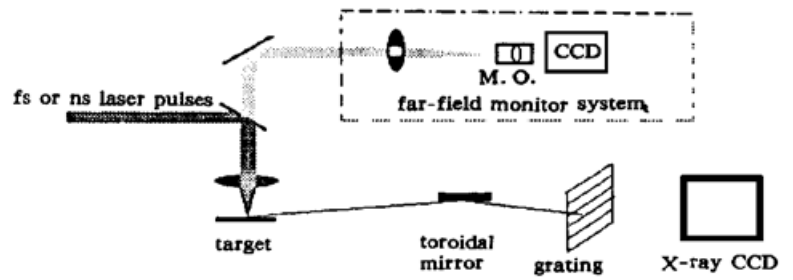


Fig. 1 The schematic diagram of experimental setup

3 实验结果

图 2、图 3 分别给出纳秒和飞秒下时间积分的波长在 0~ 10 nm 的 Al 和 Cu 等离子体的 X 射线谱. 飞秒和纳秒激光脉冲的能量分别为 35 mJ 和 180 mJ, 对应的聚焦后的光强为 $8.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 、 $3.8 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$. 由图 2、图 3 可以发现相对纳秒激光, 在飞秒激光打靶时波长在 4 nm 以下的辐射得到增强, 辐射峰值向短波方向移动. 这是由于在飞秒激光的强光场作用下等离子体具有更高温度和电离态所致. 落在“水窗”内的~ 2.0 nm 的大幅度辐射, 对 X 射线源的应用是非常有利的. 所有谱中在 4.4 nm 附近的跳跃是 Al 膜中 C(碳)的吸收边造成的. 由于 Cu 等离子体的强线主要为 Cu^{18+} 的辐射, 而比之高的 Cu^{19+} 、 Cu^{20+} 等的辐射线的

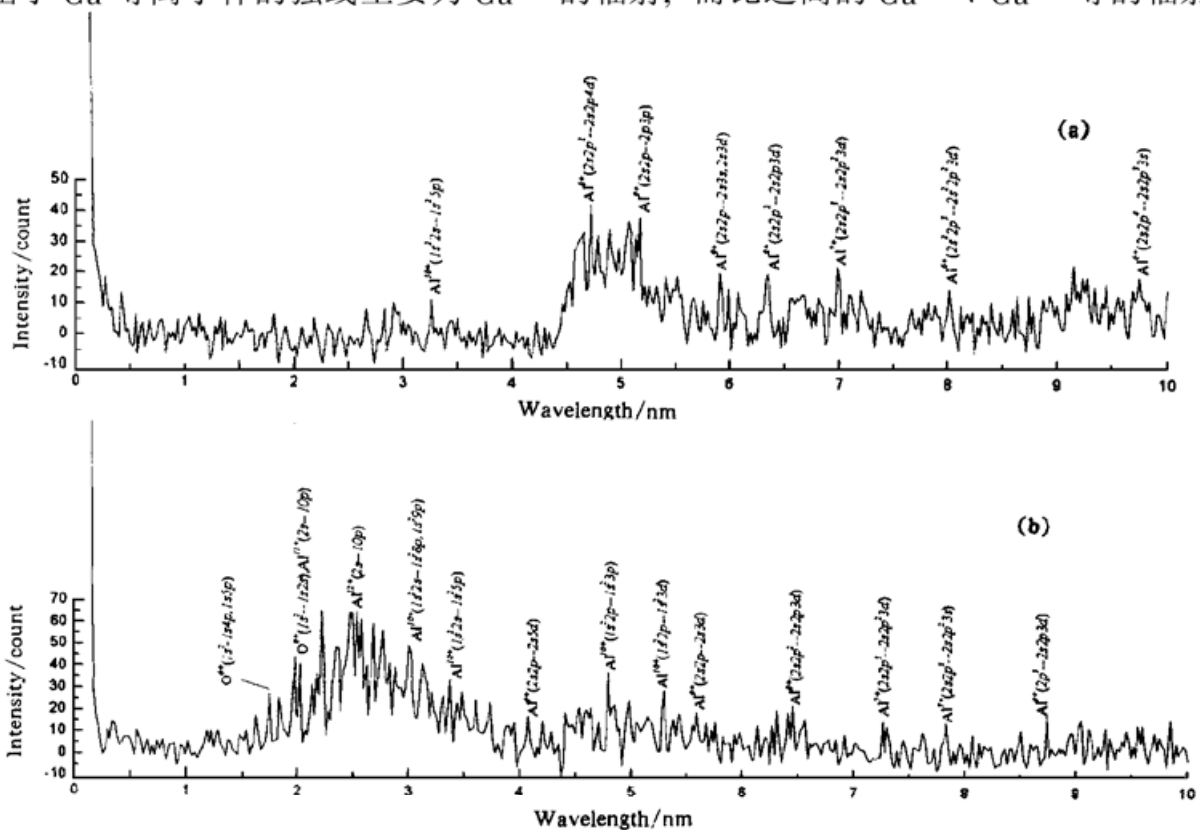


Fig. 2 The X-ray spectrum of Al laser-produced plasma. (a) Generated by ns laser, (b) Generated by fs laser

波长靠得太近, 需要分辨率更高的谱仪. 因此下面只对 Al 等离子体作进一步的分析.

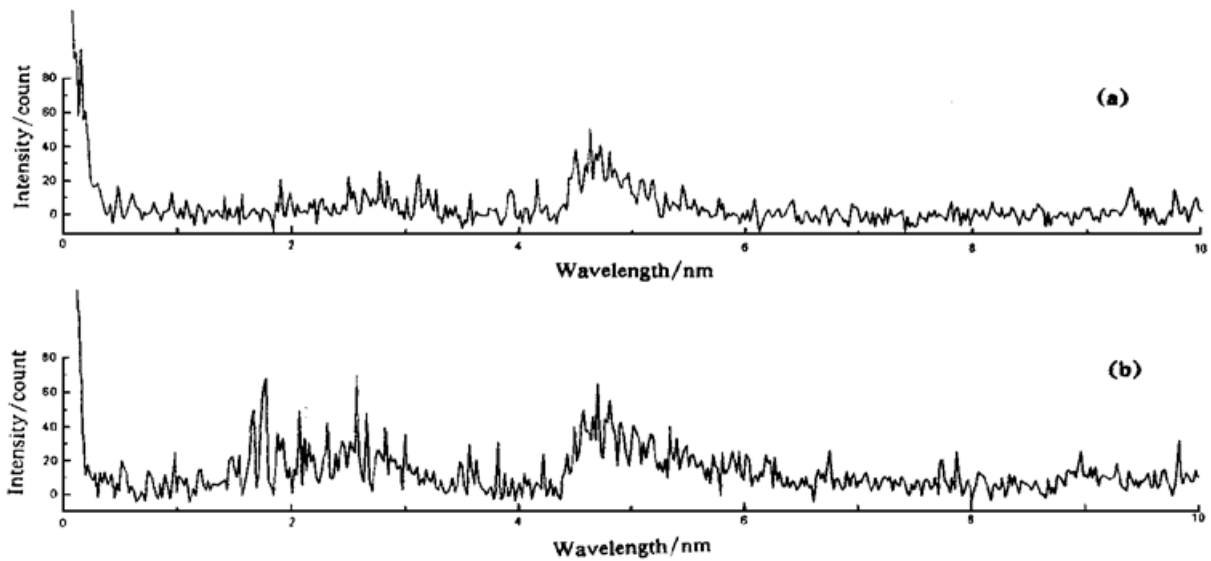


Fig. 3 The X-ray spectrum of Cu laser-produced plasma. (a) Generated by ns laser, (b) Generated by fs laser

为了得到 Al 等离子体的特性, 对两种激光脉冲的 X 射线辐射进行解谱, 得到了主要线谱所对应的离子状态, 并标在图 2 的各线谱的上方. 解谱时波长的定标以文献[16]作为参考.

由图 2(a) 可见在纳秒激光作用下, X 射线辐射主要来自波长在 40~ 6.0 nm 的类 Li、类 Be、类 B 的 Al 离子的辐射. 根据纳秒激光下冕区的等离子体温度(单位 keV)定标公式^[17]:

$$T_e \approx 0.6 \left[\frac{1}{0.03} \frac{I_{\text{abs}} \lambda_L^2}{10^{14}} \right]^{2/3}$$

式中 I_{abs} 为被吸收的激光光强(单位为 W/cm^2), λ_L 为激光波长(单位为 μm). 可得对应实验条件时等离子体平均电子温度为 60 eV. 而由文献[18]也可知在 L 带辐射(原子或离子从主量子数 $n > 2$ 的能态或连续态跃迁到 $n = 2$ 的能态所产生的辐射)占主导时 Al 等离子体的电子温度在 50~ 200 eV 的范围. 因此纳秒激光产生的 Al 等离子体温度为 100 eV 左右. 由于等离子体的喷射, 等离子体密度的上限为对应激光波长的临界密度.

由图 2(b) 显示在飞秒激光打靶时, 2 nm 左右的短波方向的辐射增强. 这 2 nm 左右谱线主要来自类 H Al 的辐射. 由于谱仪使用时轮胎镜的掠入射角约为 87° , 对应截止波长为 1 nm. 因此类 H、类 He 的两条强线(波长分别为 0.715 nm、0.765 nm), 得不到全反射而使测量的强度大大衰减. 类 H、类 He 辐射的出现, 表明飞秒激光脉冲下 Al 的电离阶数比纳秒下高了两阶. 但图 2(b) 上表明飞秒下等离子体也拥有五个电离态, 辐射主要来自类 Li、类 H 和类 Be 离子. 由于飞秒脉冲与等离子体作用的时间很短, 低阶的 Al^{8+} 、 Al^{7+} 离子可能来自于脉冲结束后高阶离子的复合或下面将要指出的激光的放大的自发辐射(ASE)本底. 同时由于靶加工完后在大气中搁了一段时间, 表面被氧化, 故在谱中出现 O^{6+} 、 O^{7+} 的几条强线.

类 H、类 He Al 离子的出现, 说明飞秒激光作用下的等离子体电子温度比纳秒时高得多. 飞秒打靶时等离子体电子温度(单位为 eV)根据定标公式进行估算^[17]:

$$T_e = 710 \left(\frac{\tau}{100} \right)^{2/3} \left(\frac{I}{10^{16}} \right)^{2/3},$$

式中 τ 为激光脉宽(单位为 fs), I 为激光光强, 单位为 W/cm^2 , 得到温度为 570 eV. 文献[5]通过对类 H、类 He Al 离子的共振线和伴线的测量和模拟, 得到在短脉冲打靶时类 H、类 He

Al 离子出现时的平均电子温度分别为 550 eV、350 eV。因此在飞秒时等离子体平均电子温度为 500 eV 左右。

对比图 2(a) 和图 2(b), 发现在飞秒条件下谱线宽度未有明显的加宽, 说明没有明显的密度展宽效应。这是由于激光的放大的自发辐射本底为飞秒主脉冲产生了予等离子体。由三阶自相关仪测得的激光器信噪比为 10^{-5} , 45 fs 的主脉冲叠加在宽度为 200 ps 的放大的自发辐射本底脉冲中间^[19]。实验时飞秒脉冲的光强约为 10^{16} W/cm², 相应的本底放大的自发辐射光强可达 10^{11} W/cm²。因此在飞秒主脉冲与 Al 靶平面作用之前, 放大的自发辐射本底与 Al 靶作用产生予等离子体, 结果使飞秒脉冲不能完全辐照到靶面。然而由于飞秒激光脉冲对予等离子体的进一步电离, 同时由于飞秒激光产生的巨大有质动力, 使飞秒脉冲作用后等离子体密度要高于纳秒激光等离子体密度。

4 结果与讨论

对飞秒和纳秒激光作用下的 Al 和 Cu 等离子体的 X 射线辐射进行了测量和分析、比较。实验结果表明在飞秒激光脉冲下等离子体 X 射线峰值向短波方向移动。对 Al 等离子体的进一步分析表明飞秒等离子体的电离度比纳秒高, 对应的等离子体温度从纳秒时的 100 eV 左右上升到飞秒时的 500 eV 以上。

类 H、类 He 离子的共振线及其伴线、混合线是等离子体特性参数的有效诊断。利用共振线及其伴线的谱线宽度, 共振线与共振线、共振线与伴线、混合线之间的强度比及伴线之间的强度比可得等离子体温度、密度及离子相对丰度等重要信息^[20]。如前面所述, 由于截止波长的存在及分辨率的限制, 使飞秒激光下 Al 等离子体的类 H、类 He 的共振线与其伴线等得不到精确的测量和分辨。因此有必要使用分辨率更高的晶体谱仪对此进行测量和分析。另外实验中得到的时间积分谱线是激光脉冲与等离子体相互作用整个过程的平均效果。而飞秒激光等离子体是高瞬态的。为了对等离子体动态特性进行观测测量, 需要有高时间分辨的谱仪, 如条纹相机等。因此对飞秒激光等离子体的研究需要具有高光谱分辨、高时间分辨、高空间分辨的多种诊断, 对瞬态的短尺度等离子体的特性及其动力学过程进行测量, 理解超短强激光与物质相互作用的现象与机理。

感谢上海光机所强光光学开放实验室激光运行组的大力支持和协作。

参 考 文 献

- [1] Kyrala G A, Fulton R D, Wahlin E X *et al.*. X-ray generation by high irradiance subpicosecond lasers. *Appl. Phys. Lett.*, 1992, **60**(18): 2195~ 2197
- [2] Nakano H, Nishikawa T, Ahn H *et al.*. Effects of an ultrashort prepulse on soft X-ray generation from an aluminium plasma produced by femtosecond Ti:Sapphire laser pulses. *Appl. Phys. (B)*, 1996, **63**(1): 107~ 111
- [3] Teubner U, Bergmann J, van Wonterghem B *et al.*. Angle-dependent X-ray emission and resonance absorption in a laser-produced plasma generated by a intensity ultrashort pulse. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(6): 794~ 797
- [4] Teubner U, Wulker C, Theobald W *et al.*. X-ray spectra from high-intensity subpicosecond laser produced plasma. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(3): 972~ 981

- [5] Teubner U, Missalla T, Uschmann I *et al.*. X-ray spectra from highly ionized dense plasma produced by ultrashort laser pulses. *Appl. Phys. (B)*, 1996, **62**(2) : 213~ 220
- [6] Murnane M N, Kapteyn H C, Falcone R W. High-density plasmas produced by ultrafast laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1989, **62**(2) : 155~ 158
- [7] Murnane M N, Kapteyn H C, Rosen M D *et al.*. Ultrafast X-ray pulses from laser-produced plasma. *Science*, 1991, **251**(2) : 531~ 536
- [8] Cobble J A, Kyrala G A, Hauer A A *et al.*. Kilovolt X-ray spectroscopy of a subpicosecond-laser-excited source. *Phys. Rev. (A)*, 1989, **39**(1) : 454~ 457
- [9] Nagata Y, Midorikawa K, Kubodera S *et al.*. Soft X-ray amplification of the Lyman- α transition by optical-field-induced ionization. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **71**(23) : 3774~ 3777
- [10] Lemoff B E, Yin G Y, Gordon III C L *et al.*. Demonstration of a 10-Hz femto-pulse-driven XUV laser at 41.8 nm in Xe IX. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(9) : 1574~ 1577
- [11] Korobkin D V, Nam C H, Suckewer S. Demonstration of soft X-ray lasing to ground state in LiIII. *Phys. Rev. Lett.*, 1996, **77**(26) : 5206~ 5209
- [12] Macklin J J, Kinetec J D, Gordon C C. High-order harmonic generation using intense femtosecond pulse. *Phys. Rev. Lett.*, 1993, **70**(6) : 766~ 769
- [13] Zhou J, Peatross J, Murnane M M *et al.*. Enhanced high harmonic generation using 25 fs laser pulses. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **76**(5) : 752~ 755
- [14] Kruer W L. *The Physics of Laser Plasma Interaction*. U.S.A, Addison-Wesley Publishing Company Inc., 1988. 27~ 35
- [15] 徐至展, Vigroux L, Frederic 等. 输出 2 TW/45 fs 的掺钛宝石超短脉冲强激光系统. 中国科学, 1997, **A27**(7) : 640~ 645
- [16] Kelly R. Atomic and ionic line of hydrogen through krypton. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 1987, **16** (Supl. 1)
- [17] 李儒新. 短波长 X 射线激光及相关的光学与光谱技术研究: [博士论文]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 1996
- [18] Duston D, Davis J. Soft X-ray and X-ray ultraviolet radiation from high density aluminum plasma. *Phys. Rev. (A)*, 1981, **23**(5) : 2602~ 2621
- [19] 王益民, 韩申生, 张正泉等. 利用相关技术测量激光脉冲的对比度. 光学学报, 1997, **17**(4) : 493~ 496
- [20] Michelis C D, Mattioli M. Soft X-ray spectroscopic diagnostic of laboratory plasma. *Nuclear Fusion*, 1981, **21**(6) : 677~ 754

Characteristic of Plasma X-Ray Emissions Generated by Femtosecond and Nanosecond Laser Pulses

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

(Received 11 February 1998; revised 23 March 1998)

Abstract The X-ray emission from Al and Cu plasma generated by femtosecond and nanosecond laser pulses have been measured and compared. The irradiation intensities of fs and ns laser pulses are 8.9×10^{15} and 3.8×10^{11} W/cm² respectively. The experimental results show that under fs laser irradiation the emission peak is shifted to shorter wavelength. The ionization stage and temperature of fs Al Plasma is higher than that produced by ns laser.

Key words ultrashort intense laser, plasmas, X-ray spectrum.