

不同角度激光打靶下的光谱结构研究

陆培祥 冯贤平 徐至展 余 玮

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 通过分析不同角度激光打靶条件下等离子体的辐射特性, 发现在相同激光辐照功率密度下, 激光垂直辐照等离子体产生铝的 LPX 强度要比激光斜入射辐照时明显增强, 其中类氢离子跃迁线强度增长最为明显。实验结果还表明, 激光斜入射辐照时 LPX 源沿靶面法线方向的尺寸变大, 谱线变宽。

关键词: X射线光谱, 入射角

Investigation on spectral structures of plasmas produced by laser irradiation on planar target with different incidence angles

Lu Peixiang, Feng Xianping, Xu Zhizhan, Yu Wei

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

Abstract: By means of analysing emission characteristics of plasmas produced by laser irradiation on Al planar target with different incidence angles, we find that: with the same laser irradiance intensity, the intensity of LPX (laser produced X-ray), which is produced by laser irradiation on Al planar target normally, is much stronger than that produced by laser irradiation on Al planar target obliquely; and the increase of the intensities of the H-like transition lines are much more obvious. In addition, the experimental results also show that the size of LPX source along the normal of the target surface, which is produced by laser irradiation on Al planar target obliquely, is much larger, and the widths of the spectral lines wider.

Key words: X-ray spectrum, incidence angle

自从核聚变和X射线激光研究开展以来, 激光与等离子体相互作用的研究, 无论在理论上还是在实验上, 一直是相当活跃的课题之一。目前各大实验室对激光辐照球靶的内爆动力学行为以及等离子体的喷射特性^[1], 激光与等离子体共振作用及X射线转换效率等一系列激光与等离子体相互作用的物理问题已进行了广泛而深入的研究并已得到了许多有意义的结果^[2, 3]。本文在前人工作的基础上, 利用 TLAP 晶体谱仪和 X 光针孔相机, 进一步来探讨不同角度打靶条件下激光等离子体 X 射线的辐射特性, 旨在研究对不同角度激光打靶条件下, 激光与等离子体相互作用的能量耦合效率, 转换 X 射线的效率, LPX 光谱结构以及等离子体的喷射特性。

实验是在上海光机所六路钹玻璃高功率激光装置上^[4]进行的。利用其中一束波长为 $1.06\ \mu\text{m}$, 脉冲宽度为 $200\ \text{ps}$, 输出能量 $5\sim 10\ \text{J}$ 的激光, 通过 $f/D=2$ 的非球面透镜聚焦在平面铝靶上, 焦斑直径约 $100\ \mu\text{m}$ 。实验采用一台 TIAP 晶体谱仪和一台 X 光针孔相机在平面靶的侧面分别拍摄激光铝等离子体 X 射线光源的 LPX 光谱和光源像, 记录采用事先标定的医用 5 F 型 X 射线软片; 晶体谱仪和针孔相机暗盒前覆盖两层厚为 $50\ \text{nm}$ 的 Formvar 膜, 每层上均镀 $200\ \text{nm}$ 铝膜以防止可见光曝光。实验中通过改变靶面的方向来形成本实验所需的两种打靶角度 (0° 和 37°), 此外为了避免空气对 LPX 的吸收作用, 整个系统均处于 $10^{-2}\ \text{Torr}$ 的真空靶室中。

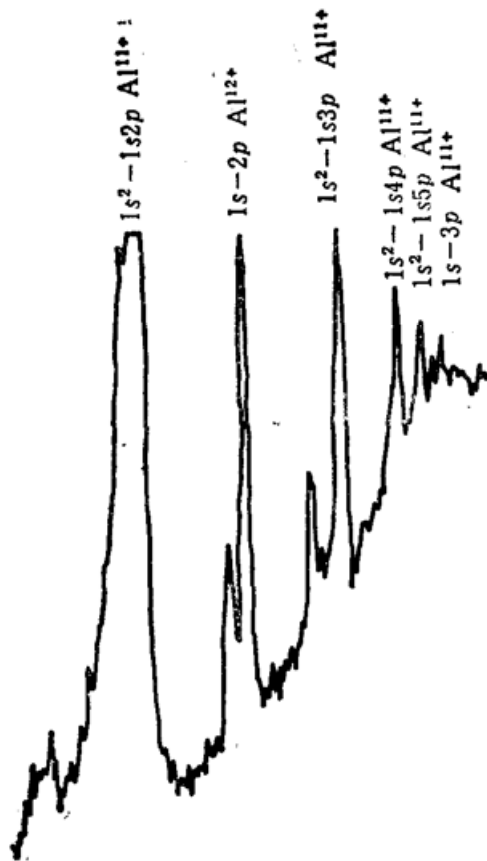


Fig. 1 Microdensitometer trace of LPX spectrum of Al plasma produced by laser irradiation on Al planar target with a 0° incidence angle

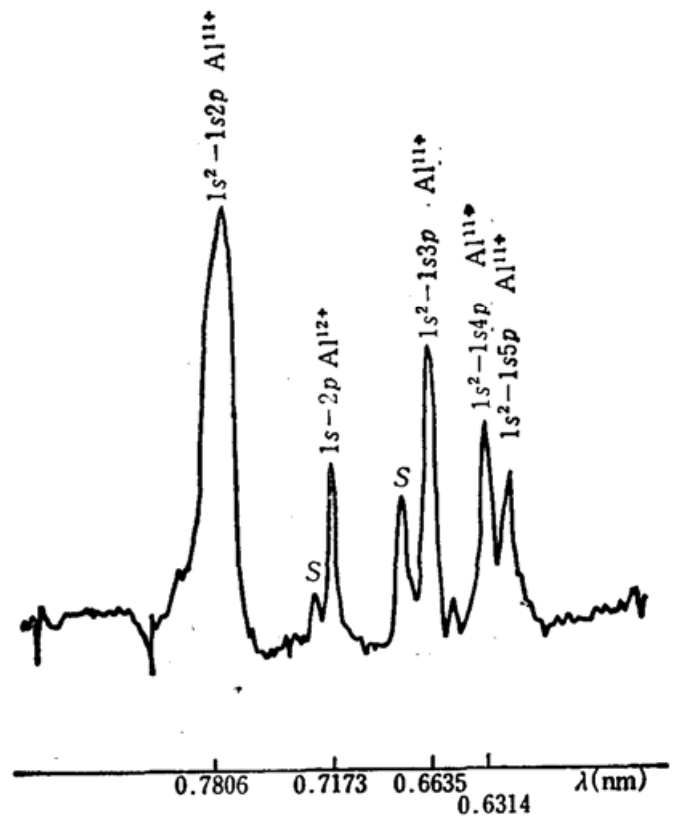


Fig. 2 Microdensitometer trace of LPX spectrum of Al plasma produced by laser irradiation on Al planar target with a 37° incidence angle

图 1, 2 分别是激光以 0° , 37° 角辐照平面靶产生铝 LPX 光谱所对应的黑度扫描曲线, 在这个谱图中, 我们已对各 LPX 线谱进行了辨认, 它们分别属于类氢、类氢离子发射的, 另外图中还存在着多条类氢、类氢离子的伴线谱。

比较图 1, 2 的光谱结构, 可以发现, 尽管辐照在靶面上的激光功率密度是相同的, 但它们各自的 LPX 发射强度差别极为明显, 对于类氢离子谱, 第一种实验条件下产生的 $1s-2p$ 线强度要比第二种实验条件下产生的 $1s-2p$ 线强 $3\sim 4$ 倍左右, 而对于 $1s-3p$ 谱线和处于更高量子数激发态向基态跃迁的线谱差别更大, 在图 2 光谱图中, 一点也看不出有处于 $n\geq 3$ 激发态向基态跃迁的线存在。对于类氢离子谱, 在图 1 上的每一条线谱都要比图 2 的谱

线强 1.5~3 倍, 同样, 在伴线谱中也存在类似的现象。此外在谱线强度比较分析中, 还可看出类氢离子的 LPX 谱线强度增长比类氦离子的更为明显。这个现象我们认为主要是由激光与等离子体相互作用的能量耦合效率不同影响 X 射线转换效率所致的, 激光垂直辐照等离子体时, 激光消融靶并加热等离子体, 同时由临界面反射回来的激光继续加热等离子体, 所以能量耦合效率和等离子体密度相对较大, 有利于转换 X 射线, 使 LPX 谱增强。而激光斜入射辐照靶时, 由于等离子体主要沿靶面法线方向喷射, 所以激光经等离子体折射后反射回来的激光直接射出, 对临界面外冕区等离子体没有进一步加热, 这样相应等离子体吸收的能量减少, 能量耦合效率明显减小。激光与等离子体在冕区的相互作用, 主要是逆韧致吸收, 在线性密度情况下, 逆韧致吸收系数 f 与激光入射角 θ 的关系式为^[5]

$$f = 1 - \exp\left[-\frac{32}{15}\left(\frac{\gamma_{\text{eff}}L}{O}\right)\cos^5\theta\right],$$

数值计算表明, 吸收系数 f 随 θ 增大而逐渐减小。大激光入射角 (37°) 的吸收系数要比激光垂直入射 (0°) 时要小, 由冕区等离子体温度和激光强度关系公式 $T_e \propto (f \cdot I)^{1/3}$ ^[6], 可得到激光以 37° 角斜入射时产生的等离子体温度要比激光垂直入射时要低, 这由图 1, 2 各自的 LPX 光谱的类氢离子共振线 $1s^2-1s3p$ 和伴线强度比^[7]也证实了这一现象。等离子体温度降低使得高阶离化的类氢、类氦离子的丰度明显下降, 同时由于能量耦合效率和等离子体密度降低, 使 LPX 转换效率降低, 相应等离子体 LPX 强度减弱, 尤其是类氢、类氦离子跃迁线的强度。由冕区的 Saha 分布^[8], 我们知道温度越高, 则类氢与类氦基态离子丰度比越大, 在激光垂直辐照靶时, 由于吸收系数大, 相应温度较高, 使得类氢与类氦离子丰度比相对激光斜入射辐照靶时有明显提高, 所以在激光垂直辐照靶时, 类氢 LPX 谱线强度增长比类氦的 LPX 增长更为明显。另外根据冕区的玻尔兹曼分布^[8], 温度越低, 高能态粒子数丰度越低, 在激光斜入射辐照时, 由于温度降低, 高能态粒子数降低, 所以在图 2 谱图中一点也看不到类氢离子 $n \geq 3$ 的激发态向基态跃迁的谱线。

另外分析图 2 的光谱结构, 我们还观察到激光斜入射辐照时的 LPX 谱线变宽, 我们认为这主要是由于源加宽造成晶体谱仪分辨率所致, 这从不同角度激光打靶产生等离子体 X 射线针孔像分析中很易说明这个问题。

图 3(a) 和 (b) 分别是激光以 0° 、 37° 角辐照平面铝靶产生铝 LPX 源的针孔像。比较图 3(a) 和 (b), 发现它们各自的 LPX 光斑像有明显的差别, 激光垂直辐照条件下, LPX 源呈彗星像结构, 等离子体向逆激光入射方向喷射; 而激光斜入射辐照条件下, 等离子体 LPX 源呈椭球形状且沿靶面法线方向的尺寸增大, 喷射方向偏向反射激光方向。我们认为激光斜入射辐照等离子体时, 激光经等离子体折射而反射出去, 这时有质动力使等离子体喷射方向趋向反射激光方向, 同时由于在逆等离子体喷射方向上没有有质动力作用, 使等离子体有利于沿靶面法线方向喷射; 而激光垂直辐照条件下, 由于同时存在逆向有质动力作用, 压迫等离子体, 使 LPX

光源沿靶面法线方向喷射相对激光斜入射辐照时要弱。此外由于靶面法线方向的等离子体 LPX 光源尺寸增大, 源加宽造成晶体谱仪分辨率降低, 使得激光斜入射辐照时的 LPX 光谱

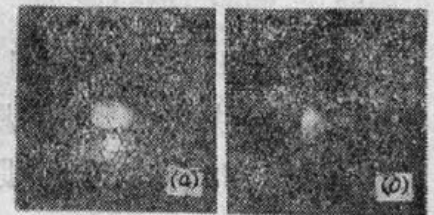


Fig.3 The images of Al LPX source obtained from X-ray pinhole camera

(a) laser irradiation on Al planar target with a 0° incidence angle;

(b) laser irradiation on Al planar target with a 37° incidence angle

线相对激光垂直辐照时变宽,使谱的分辨降低,如图 2 所示。

综上所述,不同角度激光打靶条件下,由于激光与等离子体相互作用的能量耦合效率不同,影响 LPX 转换效率,使得等离子体 LPX 发射光谱结构相差很大,另外不同的有质动力作用,使等离子体喷射特性和 LPX 光源的几何形状也有明显差异。

最后须指出,上述实验结果中,由于透镜调焦误差为 1%,能量测量误差 2% 及激光脉宽抖动等导致激光辐照在靶面的功率密度的误差约为 5% 左右。考虑晶体均匀性,暗盒窗口薄膜均匀性及底片显、定影中的误差,导致各底片 LPX 相对强度的实验误差为 10% 左右。另外还考虑实验中的数据处理及原底片标定的误差,本文所得的定量结果总误差在 30% 左右。

参 考 文 献

- 1 Zhi-zhan Xu *et al.*, *Phys. Rev. A*, **39**, 808(1989)
- 2 G. Kuhnle *et al.*, *Appl. Phys.*, **B47**, 361(1983)
- 3 J. A. Cobble *et al.*, *Phys. Rev. A*, **39**, 454(1989)
- 4 徐至展 *et al.*, 物理学报, **29**, 439(1980); *Chinese Phys.*, **1**, 548(1981)
- 5 J. W. Shearer, *Phys. Fluids*, **14**, 183(1971)
- 6 R. Balian, J. C. Adam, Session XXXIV, 1980-Interaction Laser-plasmas (Eds Les Houchs), North-Holland Publishing Company, 307(1982)
- 7 A. H. Gabriel, *M. H. B. A. S.*, **169**, 99(1972)
- 8 项志遵,俞昌旋,高温等离子体诊断,上海科学技术出版社,61(1982)

(上接第 204 页)

在 591.54 nm 激光共振激发的实验中,我们还观察到 U 原子 16900 cm^{-1} 能级在光抽运作用下,与某些下能级($16900\sim 4275\text{ cm}^{-1}$)间形成了粒子数反转,因而产生了放大的自发辐射(ASE)现象。由表 1 中可看出,791.88 nm 波长的 $\lambda^2 I/gf$ 值为 11400,远大于 763.17 nm 的 $\lambda^2 I/gf$ 值的 8220。而这二个跃迁的上能级均为 16900 cm^{-1} 。我们认为这一现象来源于前者的 ASE 作用。这一结果也表明,有可能用 HOD 灯对 U 原子的 ASE 现象进行进一步的深入研究。

利用 HOD 灯进行 U 原子敏化荧光光谱测量研究的实验装置简单。而 U 原子的能级密集,在激光共振激发时,易于观察到敏化荧光光谱。U 敏化荧光光谱中包含大量有用的信息,利用这一方法可以对 U 原子能级及其相互作用中的许多参数进行测量研究,因而具有很大的实用价值。

参 考 文 献

- 1 R. Hess, F. Burrell, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **21**(1), 23 (1979)
- 2 黄元网,光学学报, **4**(3), 223(1984)
- 3 黄元网,考尔贝,伯吉斯,光学学报, **4**(8), 680(1984)
- 4 殷立峰,胡企铨 *et al.*, 光学学报, **7**(2), 126(1987)
- 5 O. H. Corliss, *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, **80A**(1), 1(1976)