

等离子体会聚引起的 LPX 射线发射增强

冯贤平 徐至展 余玮 李跃林 陈时胜 江志明

(中国科学院上海光机所, 201800)

提要: 本文设计出一种新型的凹形靶, 使激光产生的等离子体具有自动会聚效应, 从而在实验上发现 LPX 发射极大增强现象。实验和理论光谱分析表明了 LPX 发射增强主要是由等离子体中电子与离子强相互碰撞引起。

关键词: 碰撞, LPX 发射增强

Enhancement of LPX radiation due to plasma convergence

Feng Xianping, Xu Zhishan, Yu Wei, Li Yaolin, Chen Shisheng, Jiang Zhiming

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

Abstract: According to principle of the angle of laser incidence relation to jet of laser-produced plasma, we designed a novel target which can make laser-produced plasma convergent. At the above condition, we found enhancement of LPX radiation. The experimental and the theoretical results show that enhancement phenomena are caused mainly by strong plasma convergence.

Key words: collision, enhancement of LPX radiation

我们曾在理论上较深入地研究了强激光辐照引起的等离子体密度变陡以及上下坪台结构^[1]。实验研究发现等离子体的喷射方向与入射激光在靶面反射的方向一致现象以及锥体膨胀结构^[2]。另外对等离子体 X 光辐射特性及光谱结构也进行了分析^[3], 基此, 本文研究激光等离子体之间的相互作用对 LPX 辐射的影响, 实验证明我们所预期的由于等离子体束定向碰撞会引起 LPX 强发射现象。

本文的基本思想是等离子体喷射方向与激光反射方向一致, 只要靶对入射激光有会聚效应, 激光在靶上产生的等离子体就会会合于空间某一点, 使电子与离子发生强相互作用, 引起 LPX 强发射。实验的基本手段是设计出一种新型结构靶, 它能使激光产生的等离子体具有自动会聚能力。

实验条件和布局

实验是在上海光机所六路钽玻璃激光等离子装置上进行的, 采用两路激光合并成一路, 单面辐照靶的方式, $1.06\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \text{ps}$ 的激光, 经非球面 ($f/20$) 和柱面的组合镜后, 在靶面形成

约 1.6 mm, 宽为 0.1 mm (半功率点) 的矩形焦区, 激光器的输出能量控制在 8~20 J 之间, 靶面功率密度在 $(2\sim5) \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 之间, 实验布局如图 1 所示。在厚为 100 μm 的铜(或铝)箔靶上压制一直径为 500 μm 的半圆弧, 在半圆弧柱侧面方向上安装带有 300 nm 左右的铝箔的针孔相机, 以摄取 1 keV 左右的 X 图像。在靶面侧向及与靶面法线 37° 角上分别放上带有空间分辨的晶体谱仪和透射光栅以获得 X 光波段的光谱结构。

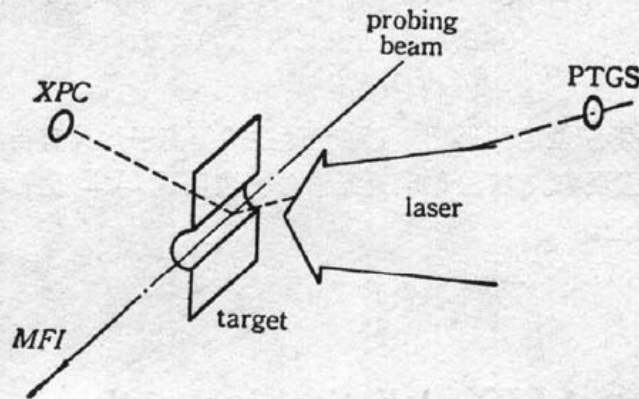
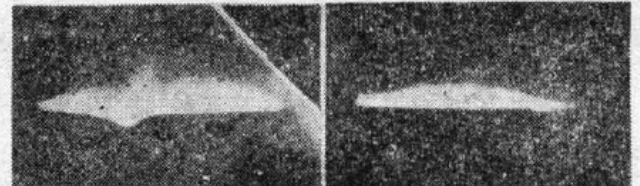


Fig. 1 Experimental arrangement. MFI: multi-frame interferometer; PTGS: pinhole transmission grating spectrometer; XPC: x-ray pinhole camera

实验结果和讨论

我们选择了线聚焦激光辐射半圆弧方式, 使部分激光辐照靶的平面部份, 可较明确地比较在圆弧处和平面处激光产生的等离子体不同特点, 图 2(a) 为在上述实验条件下得到的激光等离子体 X 光光场分布图。从中看出, 由于靶面存在凹槽, 它相应的 LPX 光场分布极为特别。图 2(b) 为激光辐照无槽平面靶而得到的 LPX 光场分布图。比较图 2(a) 和 (b), 当靶面无凹槽时, 由激光产生的等离子体 X 光场基本上是均匀分布的。从图 2(a) 可见, 在凹槽会聚处的 LPX 光强度比其它位置的 X 光发射强许多。



(a) (b)

Fig. 2 (a) LPX intensity distribution produced by laser irradiated concave target; (b) LPX intensity distribution produced by laser irradiated planar target

引起这个现象的原因主要是由于等离子体自动会聚后, 使等离子体中的电子与离子发生强相互作用, 由于这种作用都带有一定的方向性, 于是就出现了这种强 LPX 辐射结构。而对于图 2(b) 一般的平面靶, 它所对应的等离子体中电子与离子碰撞都是无规的或随机性的。因而它的 LPX 发射也就不可能出现局部增强现象。

从光谱测量和分析来看, 激光等离子体的自会聚产生的 X 射线成分中, X 射线连续谱和线谱发射强度都有增强现象。在铜激光等离子体中, X 线谱的增强线主要是由类氦离子 $2p^6-2p^53s$, $2p^6-2p^53d$ 和 $2s^22p^6-2s^12p^63p$ 几条线。其中 $2p^6-2p^53s$ 线增强明显, 约有 2 倍, 对于 LPX 线谱的增强, 直观上是比较易理解的。因为在等离子体会聚处, 电子与离子碰撞几率上升, 因而电子碰撞激发基态粒子到高激发态的几率也相应地增加。从简单的二能级方程很易得到这个结果。对于 LPX 连续谱增强, 主要是由韧致辐射引起。假设在实验中, X 射线增强主要是

连续谱,则激光产生的等离子体在激光压力的作用下,沿光在靶面反射方向向真空喷射,设其温度为 T_0 ,流动速度 μ_0 ,等离子体处于准中性状态,即有 $zn_i = n_e$, z 、 n_i 、 n_e 分别为离子电荷数、离子密度及电子密度。

考虑与靶面成 θ 角的两束等离子体相互碰撞(图3),等离子体的横向流动速度 u_y 在碰撞后变为0,相应的等离子体定向运动能转化为热能使等离子体温度由 T_0 上升到 T_1 ,由能量守恒定律可得

$$\frac{1}{2} n_i m_i u_y^2 = n_e K (T_1 - T_0) \quad (1)$$

m_i 为离子质量, K 为玻尔兹曼常数。设等离子体流动速度等于离子声速 $C_s = (zT_e/m_i)^{1/2}$,代入(1)式得到

$$T_1/T_0 = 1 + \sin^2 \theta / 2 \quad (2)$$

等离子体温度上升导致韧致辐射显著增强。以 $P_0(\lambda)$ 、 $P_1(\lambda)$ 表示碰撞前后单位体积等离子体发射波长为 λ 的电磁波的辐射功率,则

$$P_1(\lambda)/P_0(\lambda) = \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{1/2} \exp\left[\left(\frac{hc}{\lambda K T_0}\right)\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)\right] \quad (3)$$

其中 h 为普朗克常数, c 为真空中的光速。若 λ 以 \AA 为单位, $K T_0$ 以eV为单位,(3)式可改写成

$$P_1(\lambda)/P_0(\lambda) = \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^{1/2} \exp\left[\left(\frac{12395}{\lambda K T_0}\right)\left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right)\right] \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式后求出,等离子体碰撞前后波长为1nm的软X射线辐射功率之比 $\eta = P_1(1\text{nm})/P_0(1\text{nm})$ 。对于碰撞前等离子体温度 $K T_0$ 的依赖关系如图4所示。比较我们在实验中所得到的辐射功率与入射激光强度关系(见图5(a)),可看出它们的发展趋势基本是一致的,即随着激光功率的增强或等离子体原有的电子温度提高,由等离子体会聚引起的LPX发射增强率 η 逐渐变小。

在本实验中,除了上述铜等离子体实验外,我们对铝的凹形靶、平面靶也做了类似的分析工作,结果基本类似(见图5(b))。区别只在于铝的LPX发射总强度约要比铜的LPX强度弱5倍左右,但它的X光强度增强率 η 要比铜大。按我们的观点,这主要是由于铝的质量轻,粒子运动速度快,因此在会聚的等离子体中,电子与铝离子的作用要比铜的情况强。另一个区别是铝的线谱主要是由类氦离子发射的,LPX强度随着入射激光强度加强,它的强度上升较快,而铜的LPX强度随外界激光加强有点趋向饱和状态。

在实验中曾得到六路实验组同志的大力帮助,在此表示衷心的感谢。

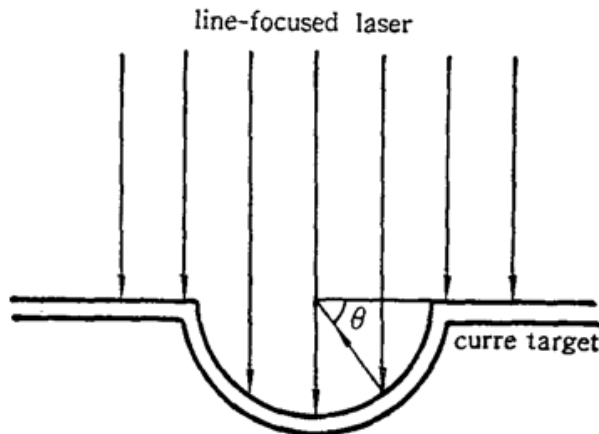


Fig. 3 Laser-produced plasma jets in concave area

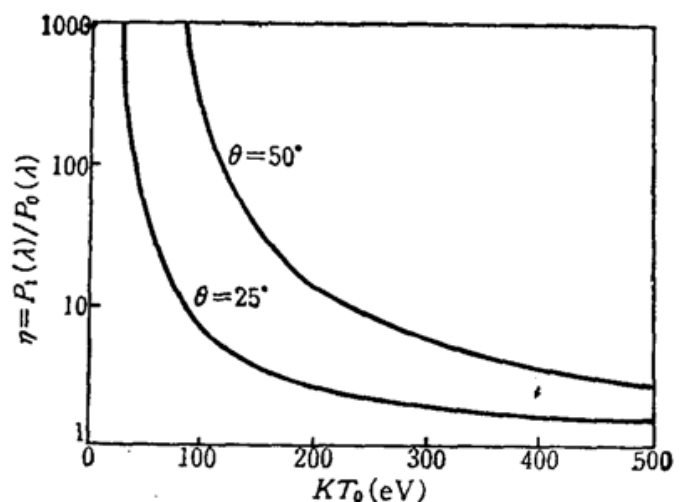


Fig. 4 Relationship between rate of LPX emission intensities with plasma temperature. here $\lambda = 1\text{nm}$

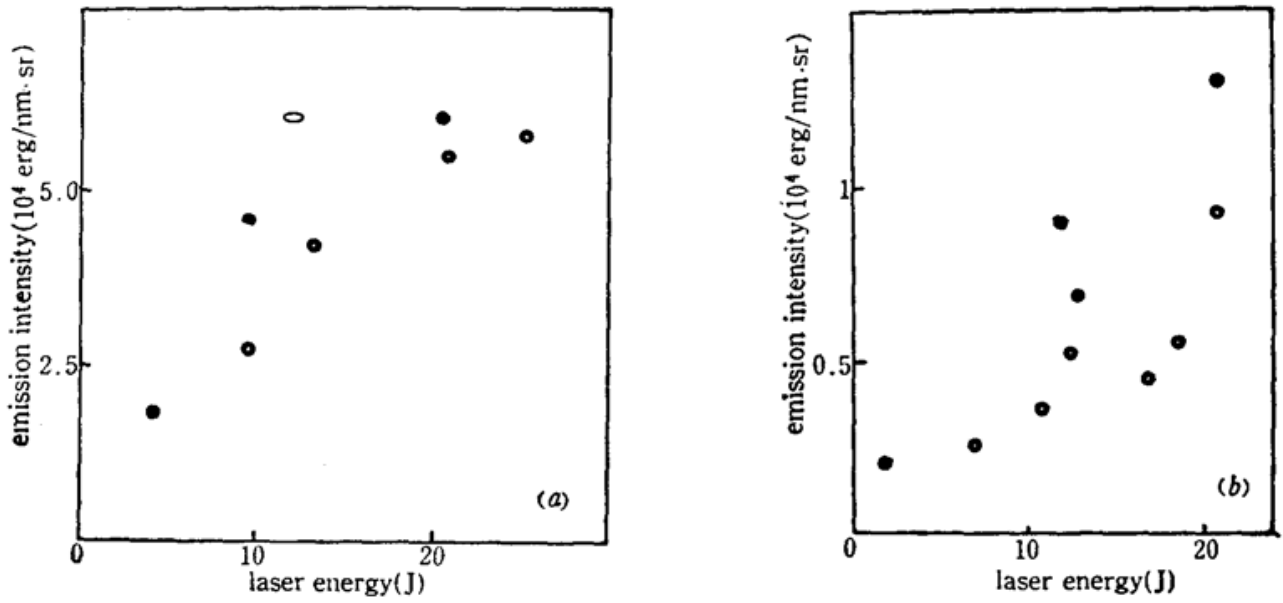


Fig. 5

- (a) Change of LPX emission intensity of Cu L-band with laser power, here ● shows results of laser irradiated concave targets and ○ shows results of laser irradiated planar targets
- (b) Change of LPX emission intensity of Al K-band with laser power here ● shows results of laser irradiated concave targets and ○ show laser irradiated planar target

参 考 文 献

- 1 冯贤平 *et al.*, 光谱与光谱分析, **8**(1), 45(1988)
- 2 冯贤平 *et al.*, 物理学进展, **8**(3), 311(1988)
- 3 冯贤平 *et al.*, 核聚变与等离子体物理, **8**(2), 114(1988)
- 4 冯贤平 *et al.*, 物理学报, **37**(7), 1183(1988)
- 5 冯贤平 *et al.*, 光学学报, **7**(2), 171(1987)