

不同角度激光打靶条件下等离子体 X 光辐射源的形状

冯贤平 徐至展 陈时胜 张正泉

(中国科学院上海光机所)

Shape of X-ray radiation source of laser-produced plasma dependent on the laser beam incident angle with targets

Feng Xiaping, Xu Zhizhan, Chen Shisheng, Zhang Zhengquan

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

提要: 通过分析激光在不同功率密度、不同入射角度打靶条件下的等离子体 X 射线辐射。本文给出了各种元素等离子体喷射图形以及辐射特点。利用激光与物质相互作用原理,对实验结果作了分析。

关键词: X 射线源形状

引言

X 光针孔相机和 X 射线晶体谱仪是诊断激光等离子体辐射特性的有效方法之一。利用上述探测仪,文献[1]已较详细地研究了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。以后又在各种偏振、各种角度下激光与物质相互作用研究特别是在激光等离子体 X 射线(LPX)辐射的方向性、激光与等离子体共振作用及 X 射线的转换效率研究中得到广泛的应用并已取得许多有意义的结果^[2,3]。本实验是在上述研究结果的基础上,进一步地探讨不同激光功率密度以及在不同角度入射情况下产生的等离子体喷射

形状以及各种元素 LPX 的辐射特性。由于着重研究的是激光在不同入射角下所产生的等离子体喷射结构及其辐射性质,因而结果在一定程度上也反映出激光与等离子体发生共振作用对等离子体喷射及辐射的影响。

实验中选取的元素主要是高、中、低三种原子序数的靶材,目的是为了比较等离子体喷射形状、辐射效率与原子序数之间的关系,实验结果显示出在相同激光功率密度条件下,低 Z 等离子体比高 Z 等离子体膨胀快但辐射强度弱。而在相同元素不同激光功率密度条件下,产生的等离子体空间分布形状极不相同。

收稿日期:1988年6月17日。

实验条件

实验是在上海光机所六路高功率钕玻璃激光装置上进行的。通过改变施加在激光器泵浦闪光灯上的电压大小,可使激光在不同功率范围(0 J/200 ps~10 J/200 ps)内输出,激光被 $f/D=2$ 的非球面透镜聚焦在靶面上,焦斑直径约 $100\ \mu\text{m}$ 。

实验中,真空靶室一般为 10^{-2} Torr,激光等离子体 X 射线辐射源的形状和光谱主要是采用一台 X 光针孔相机和一台 TIAP 晶体谱仪在靶(平面靶)侧面拍摄,目的是为了从二维空间研究高密度区等离子体的喷射特性,记录底片采用事先标定过的医用 5F 型 X 射线软片,整个实验安排如图 1 所示。

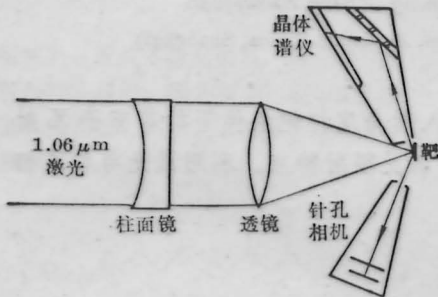


图 1 激光等离子体 X 射线辐射测量示意图

实验结果和分析

图 2、3 分别是在功率密度 $5 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 和 $2 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$, 且激光垂直入射靶条件下得到的激光等离子体 X 光(LPX)斑点图像。将图 2 与图 3 比较,可发现由于激光辐照功率密度的不同,图 2 中整个等离子体 X 光斑像类似于彗星像结构,但是在像侧面,边界明显,而在纵向,除靶内侧有一个明显的 LPX 强度变化外,在外侧 a 点附近 X 光强度也有一个明显的变化。该点对应于等离子体的临界密度点或位于其附近,理由是,首先由文献 [4] 的结果知道 LPX 主要是由临界面附近

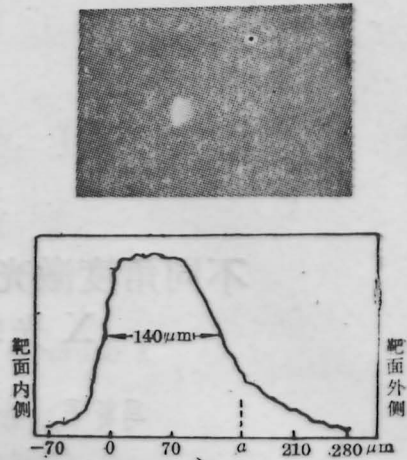


图 2 大功率激光辐照下的 X 光针孔像及其黑度扫描曲线

区域的等离子体发射的;其次,LPX 强度与粒子数密度成正比^[5]。而从文献 [6] 结果表明在临界域附近,等离子体密度是突变的,由此可以推断, a 点位于临界面附近。另外,从本实验结果中,我们还发现在上述实验条件下,等离子体的喷射方向基本上是逆向激光入射方向膨胀的,而在其侧面,等离子体的膨胀速度极小。

在图 3 中,除在靶面近区显示出等离子体的喷射结构外,整个图面并不象图 2 那样,而具有更大的 X 光辐射区域。这表明在较低激光功率密度条件下,等离子体喷射现象并不严重。另外,图 3 的 LPX 强度也比图 2 的弱。

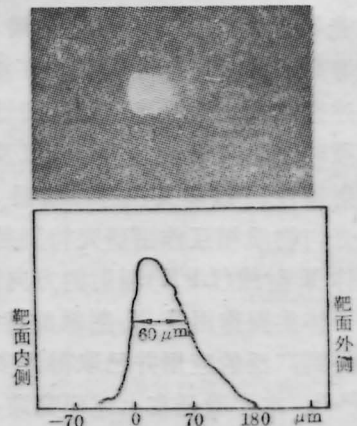


图 3 小功率激光辐照下的 X 光针孔像及其黑度扫描曲线

为了比较非垂直激光入射下的差别,进行了改变入射激光与靶面夹角的实验。图4(a)、(b)分别是激光(10J/200 ps, 5J/200 ps)在 37° 角入射下得到的LPX光斑像。由此图易看出,尽管这两个图像大小不同,但它们的结构非常相似,都呈现椭球形状,其强度变化在纵向上基本是线性地由强(靶附近)变弱(远离靶)。这个现象主要是由于等离子体在向外喷射过程中,粒子数密度下降引起LPX辐射强度下降的缘故,但是随着远离靶面的LPX发光区域并没有变大,这些特点与图2、3激光垂直入射时得到的LPX光斑像极不相同。

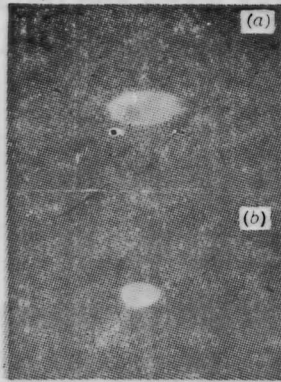


图 4

(a) 大功率激光以 37° 角辐照下的X光针孔像(A1靶);
(b) 小功率激光以 37° 角辐照下的X光针孔像(A1靶)

此外,由LPX诊断结果也发现当激光以一定角度辐照靶时,产生的等离子体主要沿着辐照激光在靶面的反射方向喷射,即体系满足动量守恒定律。

我们对高Z原子序数的平面靶也做了分析和测量,所得到的结果表明:(1)高Z等离子体的喷射现象要比低Z等离子体的小许多,其主要原因是高Z元素质量较大,故膨胀速度慢。此外还由于高电离的高Z离子处激发态的寿命短;(2)高Z等离子体的LPX辐射强度要比低Z等离子体的强。为了能比较直观地反映高、低Z两种元素等离子体性质差别,我们安排了线聚焦激光辐照双段靶的实验,结果示于图5(a)、(b),它表明低Z等

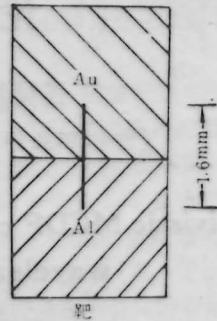
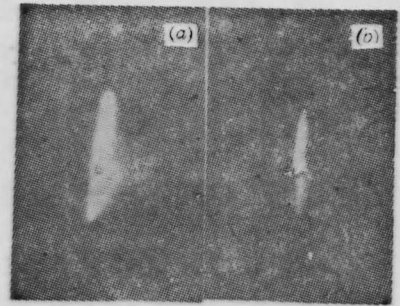


图 5

(a) 大功率激光光线聚辐照下的双段靶X光针孔像;
(b) 小功率激光光线聚辐照下的双段靶X光针孔像

离子体比高Z等离子体膨胀更快,须指出的是,图5(a)对应的LPX黑度扫描曲线并没有明显地显示出高、低Z LPX强度的差别,这主要是因为辐射激光功率密度太强,因而产生的LPX强度在底片上的响应曲线已处在饱和曲线区域,但适当降低激光功率密度,高、低Z的LPX强度差别就显得极为明显。图5(b)就是我们在功率6J/200 ps条件下得到的LPX光斑像。

对于高、低Z激光等离子体特性的差别,从理论上也是易理解的。由激光与等离子体相互作用关系知道^[5],在激光功率密度的一个很大范围内,等离子体电子温度 T_e 值基本保持为1keV左右,其原因是:第一,经典吸收系数与电子温度成反比,当等离子体电子温度超过1keV时,经典吸收不大。第二,等离子体电子温度 T_e 基本上与入射激光功率 P 的根号三次方成比例,也就是温度 T_e 是 P 变化不灵敏函数。而对于各种等离子体,由于它们的离子质量不同,它们的膨胀速度 v_0 与

(下转第361页)

所引起的,随着 θ 角的减少,这两个灯像向外移动,因此,这两个小高峰也向两边移动,使曲线趋向平滑。下表列出的是测得的半圆柱腔、无腔及多角腔光泵强度分布起伏,数据取的范围是23 mm, $\frac{\sigma x}{x}$ 是光泵分布起伏的均方根误差, $\frac{\Delta x_{\max}}{x}$ 、 $\frac{\Delta x_{\min}}{x}$ 是光泵分布中最大与最小起伏误差。

测量范围 23 mm	0°多角腔	无腔	半圆柱腔
$\frac{\sigma x}{x}$	±1.33%	±1.46%	±11.16%
$\frac{\Delta x_{\max}}{x}$	+2.58%	+2.40%	+15.60%
$\frac{\Delta x_{\min}}{x}$	-2.09%	-4.88%	-18.36%

从表中可看到当 $\theta=0^\circ$ 的多角聚光腔引起的起伏的均方根比无反射腔分布的还好,与半圆柱腔相比要相差一个量级。最后,定型的多角腔如图6所示。将它用于放大器,并测量了YAG晶体各处的光泵强度分布,其形状如图5 $\theta=0^\circ$ 的情形。

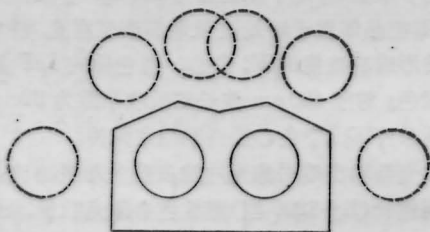


图4 多角腔形成的类似多灯照明

(上接第341页)

粒子声速接近。由此可得等离子体的膨胀速度与其自身质量关系是 $v_0 \sim 1/\sqrt{m_i}$,其中 m_i 是离子质量。这个结果说明:低Z等离子体的膨胀与高Z等离子体间的差别主要是由不同离子的质量所引起的。

本实验曾得到上海光机所六路实验组同志的大力帮助,在此表示感谢。

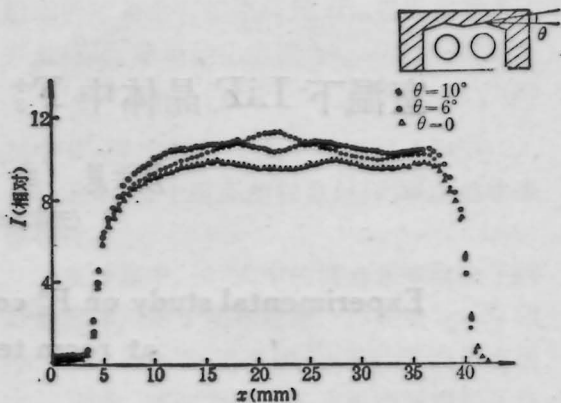


图5 不同 θ 角的多角腔光泵能量分布图

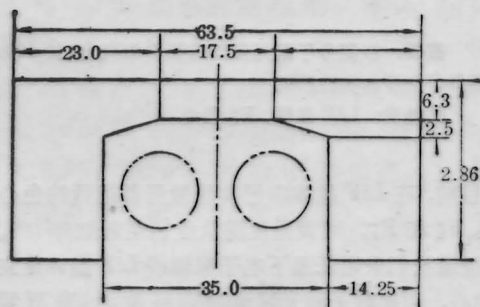


图6 $\theta=0^\circ$ 的多角聚光腔

参考文献

- 1 William B. Jones., *Laser Focus*, (9), 107 (1983)
- 2 Joseph A. Abate., *Spie* 293 Wavefront Distortions in Power, Optics (1981) 114
- 3 J. P. Chernach, W. B. Jones, 激光与红外, (11), 14 (1976)
- 4 M. R. Siegrist., *Appl. Opt.*, 5 (9), 2167(1976)

(收稿日期:1987年12月9日)

参考文献

- 1 张树干 *et al.*, 核聚变与等离子体物理, 1(3), 167 (1981)
- 2 周复正 *et al.*, 核聚变, 1(2), 121(1980)
- 3 成金透 *et al.*, 第三届全国惯约会议, 厦门, 1987
- 4 B. Meyer *et al.*, *Phys. Fluids*, 27 (1), 302 (1984)
- 5 贝克菲 *et al.*, 激光等离子体原理(上海科学技术出版社, 1981), 374
- 6 余玮 *et al.*, 中国科学, 4辑, (2), 154(1988)