

等离子体中高阶电离离子的空间分布

冯贤平 徐至展 江志明 张正泉
陈时胜 范品忠 田 莉 周智锦

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1987 年 4 月 30 日收到

本文利用高空间分辨的 X 射线针孔相机、晶体谱仪和光探针从三维空间上探测激光辐照平面靶产生的等离子体高、低阶电离离子的分布,发现高、低阶离子所占据的空间都具有近似的圆锥形状态,但它们重迭且方向相反.本文也得到了等离子体中离子密度在空间上的两种分布结构.

一、引 言

近几十年来的激光等离子体物理研究表明,激光等离子体无论对聚变还是对 X 射线激光器的研制都具有很重要的意义^[1].它已受到普遍的重视.然而激光等离子体又是一个极为复杂的体系,其内包含着各种快速多变的电子复合、电离、吸附等会决定等离子体的特性.此外等离子体本身的膨胀、辐射也都会严重地影响到等离子体的某些参数,如临界处密度变陡,不稳定性等.因此加强对等离子体机理研究和诊断显得极为重要.

早在 1972 年 Gribble 利用光探针方法已开始对等离子体的电子密度空间分布进行测量^[2]. Gabriel 利用 X 射线光谱测量了等离子体的电子温度和密度^[3]. Bhalla 测量了电离温度和丰度^[4]. Gitomer 对各种快离子热电子进行测量^[5].近几年来,利用条纹相机与多辐光探针^[6]或具有空间分辨的掠入射光栅或透射光栅连接^[7],在时间、空间分辨条件下,对等离子体各参数进行诊断,也得到了许多有意义的新结果.但目前对离子的分布还不是很清楚,故一般在实验数据处理中都假设了离子是作为均匀的背景分布^[8].而事实上,由于电子的快速飞散、膨胀,已不可能再使背景的离子保持均匀性状态¹⁾.为了能较为实际地反映等离子体的特性,本文利用 X 射线针孔相机、晶体谱仪和光探针从三维空间上对各种靶材的等离子体参数进行诊断.发现高、低阶电离离子所占据的空间都具有近似的圆锥形状态.另外我们也得到了等离子体中离子密度在空间上的两种分布结构.

二、实 验 条 件

实验是在本所六路大功率钨玻璃激光装置上进行的.为了提高靶面的辐照功率,我

1) 冯贤平,研究生论文,上海光学精密机械研究所,6(1986).

们使用该装置上的两束激光(每束能量为 8—10J, 脉宽为 200ps), 通过口径 $\phi 80\text{mm}$, 焦

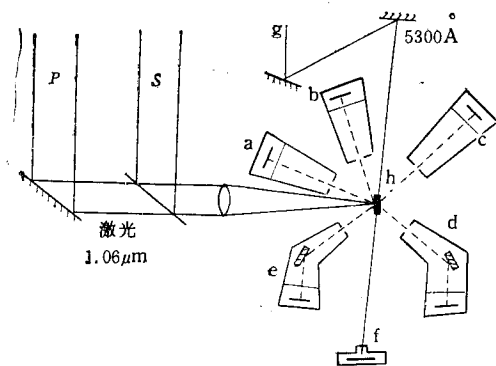


图 1

a, b, c 为针孔相机; d, e 为 X 射线晶体谱仪 (TIAP); f 为探针光相机; g 为探针光; h 为薄靶; P, S 为偏振状的激光

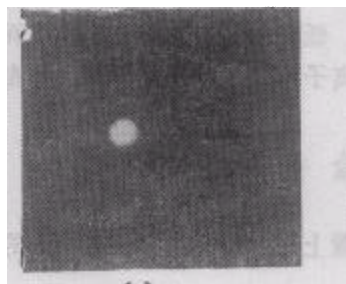
距 120mm 的非球面透镜, 同步、同轴向地聚焦在平面靶上。靶面功率密度约为 $5 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 。同步、同轴向光分别由条纹相机和高空间分辨的 X 射线针孔相机进行监视。

实验中为观察不同元素的激光等离子体特性, 我们选用高、中、低 Z 三种元素 (Au, Cu, Al) 平面靶, 激光打靶和拍摄都是在气压为 10^{-2}Torr 的真空室内进行的, 激光等离子体 X 射线 (LPX) 光谱用两台 TIAP 晶体谱仪拍摄, 等离子体 X 射线光斑用针孔相机拍摄, 底片采用事先标定过的上海感光胶片厂出品的医用 P-SF 型 X 射线软片。整个实验安排如图 1 所示。

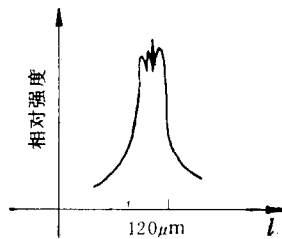
三、实验结果与分析

图 2 就是从相机 a 中拍摄到的激光等离子体 X 射线光斑 (LPXS)。从图 2 可看出, 光斑边界非常光滑。这表明: 等离子体膨胀主要是在一维的激光入射方向 (x 轴) 进行的。但光斑表面的 LPX 强度分布极不均匀 (见图 2(b) 黑度扫描曲线)。实际上从靶的侧面针孔相机 b 中所摄到的 LPXS 图 (图 3) 就可更加直观地看出为什么在 x 轴截面上光斑强度分布的不均匀性。另外, 从图 2 和图 3 比较, 还可看出, 等离子体距靶面越近时, 等离子体中高阶电离离子发射的 LPX 强度就越强, 发光范围也就越大, 由此可推测靶前高阶电离离子占据空间近似地显圆锥形状。

图 4(a) 是针孔 c 在靶后所得到的高阶电离离子发射的 LPXS。图 4(b) 是其相应的黑度扫描曲线。比较前后两侧的 LPXS, 不难发现: (1) 后侧 LPX 强度变弱; (2) 光斑变大; (3) 占据空间的均匀性程度变好。相应地从上述现象可推断出靶后侧的高阶电离离子占据空间比前侧大且显柱形状, 但密度降低许多。这从晶体谱仪 e, f 所得到的



(a)



(b)

图 2 从针孔相机 a 处摄到的铜 LPXS 图及其相应的黑度扫描曲线

LPX 光谱[图 5(a), (b)] 线的源加宽程度比较中也可很容易地得到证明. 图 6 是利用光探针(波长 $2\omega_0 = 5300 \text{ \AA}$) 得到的激光等离子体暗影象. 从图 6 可看出等离子体占据的空间形状, 前部线约 $250 \mu\text{m}$, 后侧约 $150 \mu\text{m}$. 整体近似显锥形状态, 前大后小. 而对于等离子体中高阶电离离子占据的空间, 线度一般不会超过 $120 \mu\text{m}$, 见图 2 至图 4, 且前小后大. 由此得到激光辐照平面铜靶产生的等离子体中, 高、低阶电离离子占据的空间都近似具有圆锥形状态但相互迭加且方向相反.

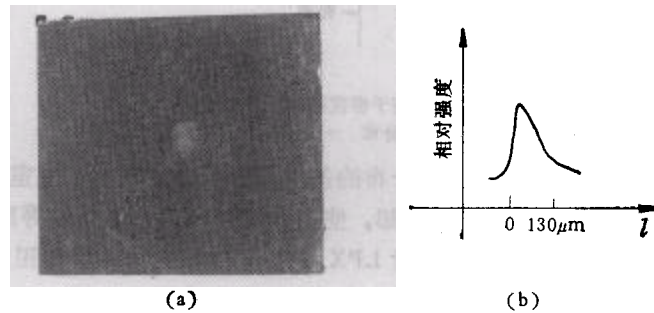


图 3 从针孔相机 *b* 处摄到的铜 LPXS 图及其相应的黑度扫描曲线

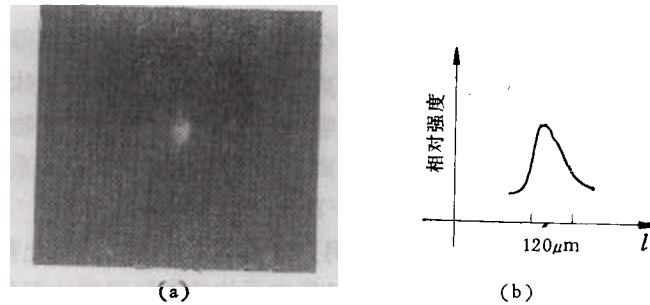


图 4 从针孔相机 *c* 处摄到的铜 LPXS 图及其相应的黑度扫描曲线

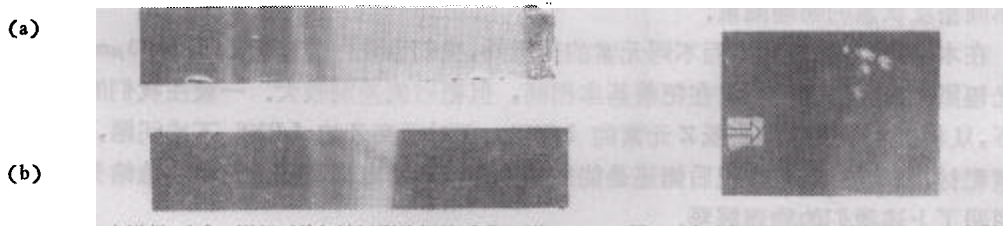


图 5 由谱仪 *c*(a), 谱仪 *d*(b) 拍摄到的铜的 LPX 谱

图 6 由光探针 *g* 拍摄到的等离子体暗影象 (箭头指激光入射方向) $\times 25$

四、讨 论

根据前述实验现象和分析结果知道, 等离子体空间范围一般为 $250 \mu\text{m}$ 左右, 而高阶电离离子范围一般在 $120 \mu\text{m}$ 左右, 考虑到在靶热蕊附近电子温度较高, 因此在这个区域离子主要都是处高阶电离状态, 由此可定性地得到高、低阶电离离子在空间上具有如图 7 的两种分布结构. (这里须指出的是高、低阶电离离子的分类是以离子是否发射 LPX

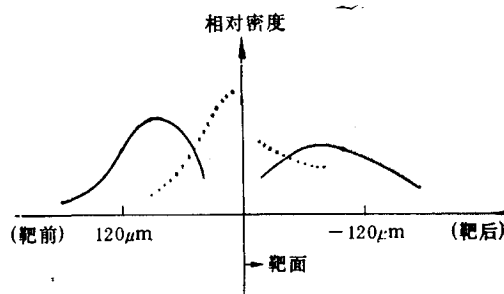


图 7 离子密度随空间分布
为高阶电离离子的分布 ——为低阶电离离子的分布

射线为基准。)引起图 7 的两种离子体分布的基本原因是激光辐照真空室内的平面靶后,一方面由于等离子体自由膨胀和辐射冷却,使膨胀到远离靶心区域的等离子体离子与电子复合成低阶电离离子状态,它们不发射 LPX。另一方面,由热传导作用,等离子体热能快速向薄靶(1—2 μm)内及后侧传递并加热后侧等离子体使其发射 LPX。由于热传导过程中的扩散等损耗,它已不可能再象前侧一样具有高密度的高阶电离离子状态。因此,它发射的 LPX 相对来说比较弱。

除上述铜靶外,我们对不同元素的金、铝靶也作了类似的诊断,从得到的实验结果来看,它们都具有相似分布结构。但高 Z 等离子体中的离子密度从总体上来看要高于低 Z 情况。这主要是因为高 Z 等离子体的能量吸收效率高。从等离子体物理研究知道:激光辐照平面靶主要是通过逆韧致辐射加热等离子体。从逆韧致辐射关系^[9]

$$\alpha_{\text{ff}} \sim N_e N_i z^2 T^{1/2} e^{-h\nu/kT}$$

可看出不同元素的吸收效率之比是 z_i^2/z_j^2 。另外从最基本的力学关系上我们也可知道,高 Z 离子的质量一般要比低 Z 的重许多,即高 Z 等离子体的膨胀速度比起低 Z 的要慢,由此可推断它在膨胀时能量损失较小,从而就产生了上述我们所观察到的高、低 Z 等离子体显示不同密度状态的物理图象。

在本实验中,除打同厚而不同元素的薄靶外,我们也进行了厚靶(10—100 μm)实验。激光辐照靶产生的离子分布在靶前基本相同,但靶后侧差别较大。一般在我们的实验条件下,从相机 c 中很难得到低 Z 元素的 LPXS。而对于高 Z 的 LPXS 不成问题,即高 Z 元素靶材,虽其较厚,但在靶后侧还是能较易地形成高阶电离离子。这个实验结果反过来又说明了上述我们的物理解释。

五、结 论

激光辐照平面靶时产生的高、低阶电离离子在占据空间上主要都显圆锥形状,但它们相互重叠且方向相反。在密度的空间分布上,靠近靶面区域有较高的高阶电离离子密度。而在距靶面 120—150 μm 区域低阶电离离子密度较高。另外,实验结果也表明。在相同的实验条件下,高 Z 等离子体中的离子密度无论是在靶前还是在靶后侧都要高于低 Z 等离子体情况。

参加本实验工作的还有林礼煌、张伟清、孙岗等、作者对六路激光实验室的同志在工作中的支持表示衷心的感谢。

- [1] R. Stepfen *et al.*, *Scientific American*, **255**(1986), 60.
- [2] R. F. Gribble *et al.*, *Phys. Fluid*, **14**(1972), 2042.
- [3] A. H. Gabriel *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **160**(1972), 99.
- [4] C. P. Bhalla *et al.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **170**(1975), 359.
- [5] S. J. Gitomer *et al.*, *Los Alamos. Nation Laboratory LA-UR-86-8*.
- [6] R. Sigel *et al.*, 814/spie Vol 1491 High Speed Photography (strasbourg 1984).
- [7] J. D. Doll *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55**(1985), 1.
- [8] 徐家鸾、金尚宪, 等离子体物理学, 原子能出版社 (1981), 15 页.
- [9] 贝克福等, 激光等离子体原理, 上海科学技术出版社, (1982), 374 页.

SPACE DISTRIBUTION OF HIGH IONIZING IONS IN PLASMA

FENG XIAN-PING XU ZHI-ZHAN JIANG ZHI-MING ZHANG ZHENG-QUAN

CHEN SHI-SHENG FAN PIN-ZHONG TIAN LI ZHOU ZI-JIN

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

ABSTRACT

Using X-ray crystal spectrograph, light probing and X-ray pin-hole camera, we have measured the distributions of high and low ionizing ions of plasma in the three-dimensional space. We have found the spaces in which the high and low ionizing ions occupied were of conical forms, but overlapped each other and the directions of the cones were opposite. In addition, we have also obtained two distributions of ion densities. ..