

激光加热碳、金平面靶等离子体膨胀过程

唐永建 郑志坚 何海恩 淳于书泰

(中国工程物理研究院)

龚美霞 雷志远 刘进元

(中国科学院西安光学精密机械研究所)

1988年6月11日收到

利用软X射线条纹相机与针孔成像装置相结合,测得了碳、金平面靶靶面X射线时、空分辨图象,从而推算出靶面等离子体膨胀平均速度分别为(碳): $5.11 \times 10^7 \text{ cm/s}$, (金): $6.13 \times 10^7 \text{ cm/s}$. 实验用 $1.06 \mu\text{m}$ 的钕玻璃激光轰击靶面, X射线能谱范围为 $0.1-10 \text{ keV}$. 测量在激光功率密度 $\approx 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 的情况下进行.

一、引 言

从等离子体中辐射X射线,能量份额主要在 10 keV 以下,所以通过对X射线辐射现象的研究可以获得大量的等离子体信息. 在X激光的研究中,了解靶中激光烧蚀情况,以及等离子体的形成过程尤为重要,因为要使X激光实现,必须首先使激光介质达到一种均匀高电离的等离子体状态^[1]. 这样一种状态的研究,可以归结为加热等离子体膨胀过程(即等离子体形成的时空特性)的研究.

研究激光加热等离子体膨胀过程常用的实验方法是探针光或X射线背景光源加分幅照象^[2-4]. 这些方法的优点是能全面反映等离子体的空间特性. 这对于同一时刻所测区域内等离子体不对称分布的情况来说是最理想的研究手段. 但缺点是时间分辨太差,一般在时间尺度为亚微秒到皮秒量级情况下只能获取几幅图象^[5], 因此它不能反映等离子体的整个变化过程.

用具有高时间分辨的X射线条纹相机与能反应空间特性的成像元件相结合,弥补了上述方法的不足,可以连续反应对称分布等离子体的时间变化过程.

本文给出了在 LF-12[#] 强激光装置上用中国科学院西安光学精密机械研究所研制的亚千X射线条纹相机与针孔成像装置相连接,获取了碳、金平面靶的X射线发射时、空特性图象,经过对实验结果的处理,得到了具有时、空特征的等离子体密度分布曲线,以及等离子体沿靶面膨胀的平均速度和激光作用过后的靶面等离子体冷却速度等重要参数.

二、实验原理

实验用 $1.06 \mu\text{m}$ 的钕玻璃激光经过复眼透镜打在平面靶上产生高温等离子体,入射

激光靶面功率密度 $\approx 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。测量时,靶面法线与入射激光成一定角度向针孔及条纹相机狭缝一方倾斜。图 1 为实验装置安排图。

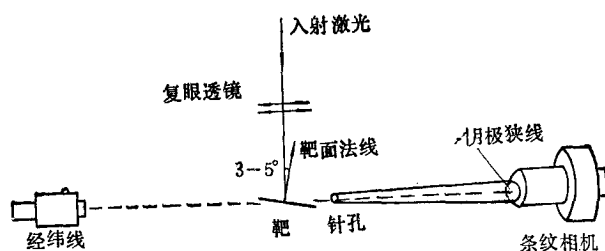


图 1

激光脉冲打在靶上,通过逆韧致吸收和反常吸收损失能量形成等离子体,每一时刻等离子体区域的边缘可近似看成是快离子膨胀所造成的。因此,其膨胀速度和密度分布满足平面靶几何条件下的一维电子温度的双流体物理模型方程^[6]:

$$\begin{aligned} \partial(\ln n)/\partial t + v\partial(\ln n)/\partial x + c_s\partial(v/c_s)/\partial x &= 0, \\ \partial(v/c_s)/\partial t + v\partial(v/c_s)/\partial x + c_s\partial(\ln n)/\partial x &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n 为离子密度; v 为离子流速度; c_s 为离子声速。设 T_e 为电子温度, Z, M 分别为离子电荷数和质量,则 $c_s = \left(\frac{Z}{M} T_e\right)^{\frac{1}{2}}$ 。

图 2 为靶中等离子体形成过程示意图。图中每一时刻的等离子体分快离子和慢离子两部分组成。考虑到快离子行走的路程较长,所以每一时刻由喷射和在靶面形成的等离子体边缘可以看成是快离子的贡献为主,而中间部分则是以慢离子的贡献为主。实验中利用针孔成象于亚千条纹相机的探测面上,然后经过相机狭缝截取一条狭缝象(即条纹相),实验结果由不同时刻的条纹相组成一幅连续变化的时、空分辨相。

研究等离子体的膨胀过程,在这里是通过测量等离子体 X 射线的辐射情况而定的。因此,探测器对 X 射线的响应函数则决定了测量结果的能量范围。图 3 为亚千 X 射线条纹相机光阴极背表面的量子产额随能量的变化关系。因此,可以认为条纹相机的能量响应范围为 0.1—10 keV。

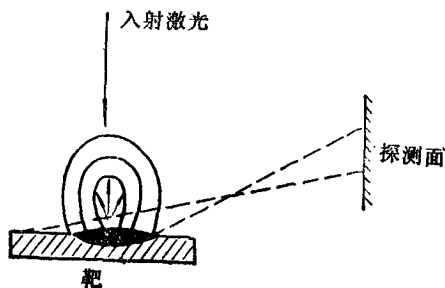


图 2

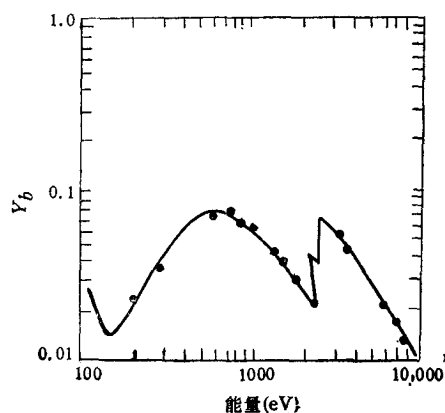
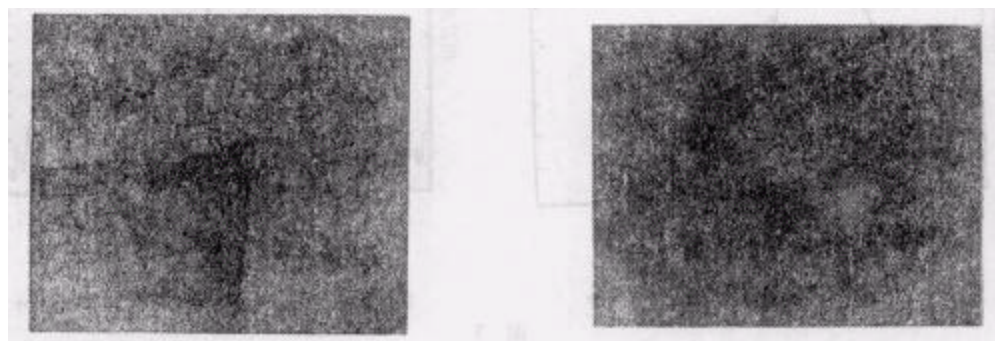


图 3

三、实验结果

实验对碳、金两种平面靶进行了研究,结果见图 4 (a),(b)。其中,碳靶有镁和二氧化硅做底衬,金靶为 $25\mu\text{m}$ 厚的纯金。实验是在真空度 $\approx 10^{-5}$ Torr 条件下进行的。



(a) 碳靶靶面等离子体 X 射线辐射时空特性

(b) 金靶靶面等离子体 X 射线辐射时空特性

(a),(b) 中的图象分别放大了 26.8, 57.0 倍, 每毫米扫描时间分别为 96.7, 45.4 ps

图 4

图 4 (a),(b) 中, 图象轮廓沿时间方向上升阶段(即 R 增加)为激光加热靶面形成等离子体的过程。在这一过程中因激光脉冲功率随时间不断增加, 使形成等离子体的区域也在不断扩大。这一期间激光在等离子体临界面以下通过逆韧致吸收和反常吸收, 把能量交给靶物质并使介质中的电子获得能量, 在空间电场的相互作用下电子又逐渐把能量传给离子, 于是等离子体在大于德拜长度的条件下发生双极向膨胀。图 4 中的 X 射线时空象如实地反映了这一过程。下降阶段(即 R 减小)为等离子体冷却过程, 在这个过程中等离子体区域随着入射激光脉冲功率密度的减少和消逝而失去外能, 此时等离子体的电子温度逐渐减少, 由激光加热形成的等离子体区域也因此由增大转而缩小。从方程 (1) 的解析解^[6]中也可以看出, 离子密度随时间和空间的指数变化过程, 即

$$\frac{n}{n_0} = e^{(-x/L + \frac{Z}{M} T_e t^2 / 2L^2)} \quad (2)$$

式中 n_0 为激光作用期间的初始密度; L 为等离子体的有效尺度, 它与德拜长度有关。

图 4 中有两个明显的 X 射线辐射区, 中间亮区表示 X 射线发射的强区, 它是入射激光在靶面形成的焦斑或者说致密等离子体区引起的; 外层暗区表示 X 射线发射的弱区, 它是喷射等离子体以及靶面稀薄等离子体区(冕区)引起的。

通过空间 (R) 方向、时间 (t) 方向的黑密度扫描(结果见图 5 和图 6), 分别计算了焦斑区和冕区的平均速度(见表 1)。表 1 中的 $\bar{v}_1, \bar{v}_2$ 分别为 R 上升阶段的焦斑区和冕区的快离子平均膨胀速度; $\bar{v}_3$ 为冷却速度(即 R 下降阶段)。实验的平均速度由下式求得:

$$\bar{v} = \frac{\overline{\Delta R}}{f\eta\eta'\Delta t} \quad (3)$$

式中 f 为针孔放大倍数; η 为相机系统放大倍数; η' 为黑密度计扫描放大倍数。 $\overline{\Delta R}, \Delta t$ 分别为测量的空间和时间, 它可以从时、空黑密度分布曲线中获得。

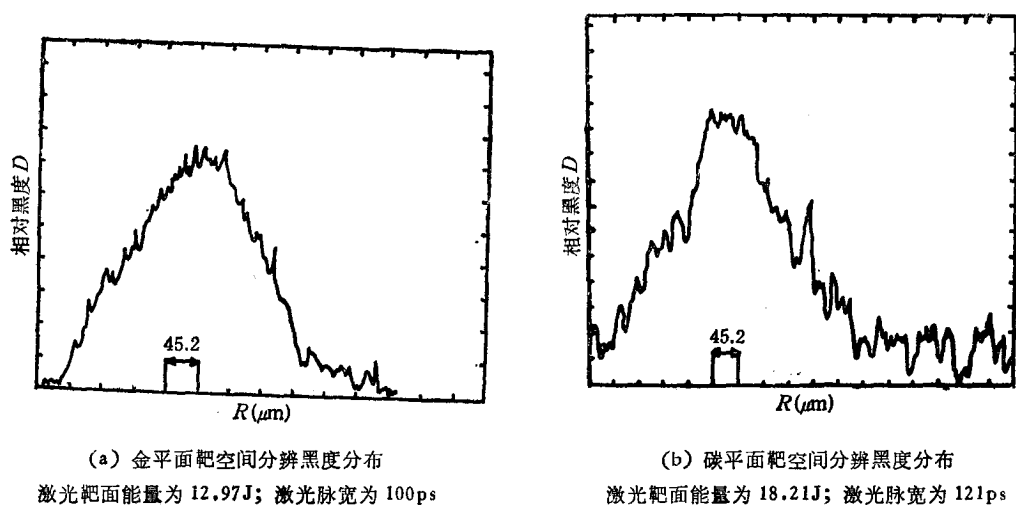


图 5

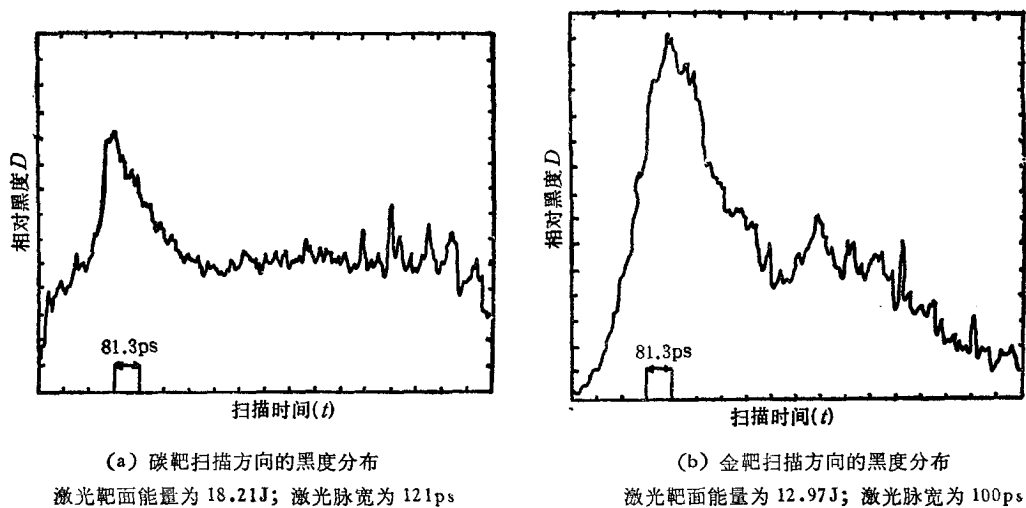


图 6

表 1 等离子体靶面膨胀、冷却平均速度

靶 (平面)	靶面能量 (J)	脉冲宽度 (ps)	功率密度 (W/cm ²)	$\bar{v}_1$ (10 ⁷ cm/s)	$\bar{v}_2$ (10 ⁷ cm/s)	$\bar{v}_3$ (10 ⁶ cm/s)
碳	18.21	121	1.03×10^{14}	5.11	5.03	3.59
金	12.97	100	0.43×10^{14}	6.13	4.99	5.48

图 7 和图 8 显示了 X 射线辐射能为 0.1—10 keV 的等离子体时空密度分布图象。我们发现金靶 X 射线辐射随时间呈不连续变化,前后出现了两个峰,两峰间距约 528 ps (见图 6 (b))。由于第二个峰是在激光脉冲作用过后,靶面等离子体处于冷却阶段时出现的,所以这种现象目前尚不能解释。

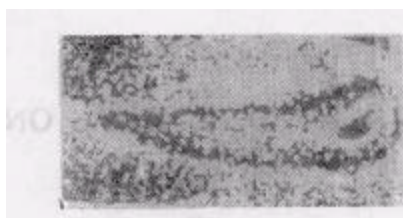


图7 碳靶X射线辐射等密度分布



图8 金靶X射线辐射等密度分布

四、讨 论

如果将图4(a), (b)中的图形用M75计算程序进行二值化勾边处理后可获得快离子膨胀的时、空关系,并可从中求出快离子速度随时间变化关系,即

$$R(t) = \sum_i^n c_i t^i, \quad (4)$$

$$v(t) = dR(t)/dt \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n),$$

式中 c_i 为拟合系数,可以从时空分辨图象边缘的离散数据点通过最小二乘法拟和求得; i 表示第 i 个象元。有关拟合系数的物理意义可以通过对照方程(1)的解析解来得到。

在方程(1)中速度随时间变化的解析解为

$$v(t) = c_i^1 t / L, \quad (5)$$

于是由(5)式可得理论上的快离子膨胀时、空关系为

$$R(t) = \int_0^t c_i^1 t / L dt = \frac{1}{2} c_i^1 t^2 / L. \quad (6)$$

把(6)式与(4)式相比较,可以方便地得到

$$c_i = \frac{1}{2} c_i^1 / L. \quad (7)$$

因此,拟合系数 c_i 是一个与电子温度、介质中离子的剥离程度有关的函数。这样我们就有可能从X射线辐射的时空特性中观察到有关等离子体中的电子温度的变化规律。

感谢彭翰生、张启仁、丁耀南、唐道源等的有益讨论;感谢 LF-12* 装置的全体运行值班人员,他们为这次实验打靶付出了辛勤劳动。

- [1] Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 24/25, (1987), p. 373.
- [2] W. Sibbett, *et al.*, "Ps Framing Imagetube" 15th Int. Congr. on HSP (1982).
- [3] Hugenschmidt, *et al.*, 15th Int. Congr. on HSP, San Diego SPIE, Vol. 348(1982), p. 59.
- [4] J. A. Stamper, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, 40(1978), 1177.
- [5] R. Benattar and C. Popovics, *J. Appl. Phys.*, 54(1983), 683.
- [6] F. S. Fellber *et al.*, *Phys. Fluids*, 22(1978), 520.

EXPANSION PROCESSES OF LASER-HEATED PLASMAS ON CARBON AND GOLD PLANAR TARGET

TANG YONG-JIAN ZHENG ZHI-JIAN HE HAI-EN CHUNYU SHU-TAI

(National Academy of Engineering Physics, Chengdu, China)

GONG MEI-XIA LEI ZHI-YUAN LIU JIN-YUAN

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

ABSTRACT

Space-time resolved X-ray photograms of carbon (4671Å thick with substrate) and gold (15 μm in thickness) planar targets were obtained using a pinhole coupled to a soft X-ray streak camera. The planar targets were irradiated with laser ($\lambda=1.06 \mu\text{m}$) pulses of about 100 ps duration from a LF-12 Nd: glass laser. The spectral response of the soft X-ray camera is defined to be 0.1—10 keV. Average plasma expansion velocities on the C and Au target surface measured at a laser power density of about 10^{14} w/cm^2 for were $5.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ and $6.1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ respectively.