

半圆柱壳槽靶的激光等离子体软 X 射线光谱发射特点的研究

李跃林 徐至展 陈时胜 王晓方 江志明 冯贤平
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

通常对一种半圆柱壳槽靶与平面靶激光等离子体软 X 射线光谱空间分布特点和流体动力学行为的比较,证实这种槽形靶可以有效地提高槽区内等离子体温度,从而增强该区域内的软 X 射线光谱发射。

关键词: 软 X 射线光谱, 激光等离子体, 等离子体诊断。

一、引 言

在影响激光等离子体的动力学行为的诸多因素中,靶的几何结构是一个很重要的方面;而等离子体的动力学行为又直接影响其光谱发射特点。因此,靶型设计已经成为惯性约束核聚变和短波长激光研究的一个重要方面^[1,2]。

本文报道了对一种具有半圆柱壳形的凹槽靶进行的光谱发射及动力学特性的初步研究结果,证实了这种靶形结构对等离子体的会聚作用,讨论了其可能的应用。

二、实验布局

实验是在中国科学院上海光学精密机械研究所六路激光装置^[3]上进行的。激光波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 实验中将其两路合并,在靶面聚焦成 $2\text{mm} \times 100 \mu\text{m}$ 的线状,相应的功率密度为 $10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$ 。实验布局如图 1 所示。凹槽靶用厚度为 $100 \mu\text{m}$ 的铝膜或铜膜压制而成,其半圆柱壳直径在 $200 \sim 400 \mu\text{m}$ 之间,激光焦线与槽轴垂直,辐照在槽的内壁上。同时还用相同材料的平面靶进行实验以作比较。

光谱测量采用了具有空间分辨能力的针孔透射光栅光谱仪 (PTGS)^[4,5],其针孔直径为 $50 \mu\text{m}$,光栅常数为 $1 \mu\text{m}$ 。在实验的通常条件下,其摄谱范围为 $5 \sim 200 \text{\AA}$,光谱及空间分辨率分别为 2.5\AA 和 $65 \mu\text{m}$,为了保证其分辨率,光栅纹与激光焦线取平行位置。光谱记录采用改进医用 5F 胶片。该胶片与 Kodak SB-392 胶片有相近的结

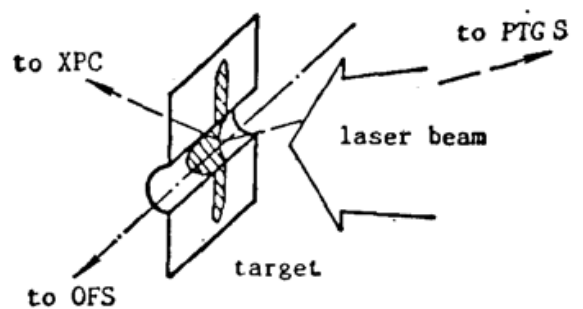


Fig. 1 The schematic setup of the experiment PTGS; the pinhole transmission grating spectrometer; OGS: the optical framing system positioned on the groove axis and XPC: the X-ray pinhole camera. The PTGS is 37° off the normal of the target plane, with its grating bars parallel to the focusing line.

Table 1 Comparison of film Kodak SB-392 with film 5F

film type	emulsion (μm)	coating (μm)	grain size (μm)	AgBr vol. frac.
5F ^[5]	8	1	1	0.2
Kodak SB-392 ^[6]	10	1	1	0.2

构参数(见表 1), 因此实验采用了 Henke 等人对 Kodak SB-392 胶片的定标结果进行数据处理^[6]。

此外, 在实验中还使用了 X 光针孔相机^[7]和安排在靶槽轴上的五分幅光探针系统^[8]。

三、实验结果及讨论

图 2(a) 是一张典型的用铝槽靶在针孔透射光栅光谱仪中摄取的光谱的二维黑度扫描图, 其零级无色散, 相当于靶源的针孔像; 可以看到在凹槽区域有大尺度的纵向喷流, 且在喷射方向与 $\text{Al}^{11+}K(1s^2-1s2p, 8\text{ \AA})$ 线的一级谱相重叠, 其尺度在 $600\text{ }\mu\text{m}$ 左右。同时, 这一部分的黑度分布相对平缓。而槽外区域的喷流尺度要小得多, 且黑度分布很陡。从一级谱来看, 上述 K 线只在槽内有明显的发射, 而 $\text{Al}^{10+}L(2p-3d, 52\text{ \AA})$ 线的空间范围则遍及全部聚焦区域。在图 2(b) 给出的这两条谱线的一维空间黑高扫描中, 这一现象更为清楚: K 线和 L 线在槽的边缘都有一个跃变, 而 K 线的跃变比 L 线明显得多, 并在槽中心形成一个尖峰。

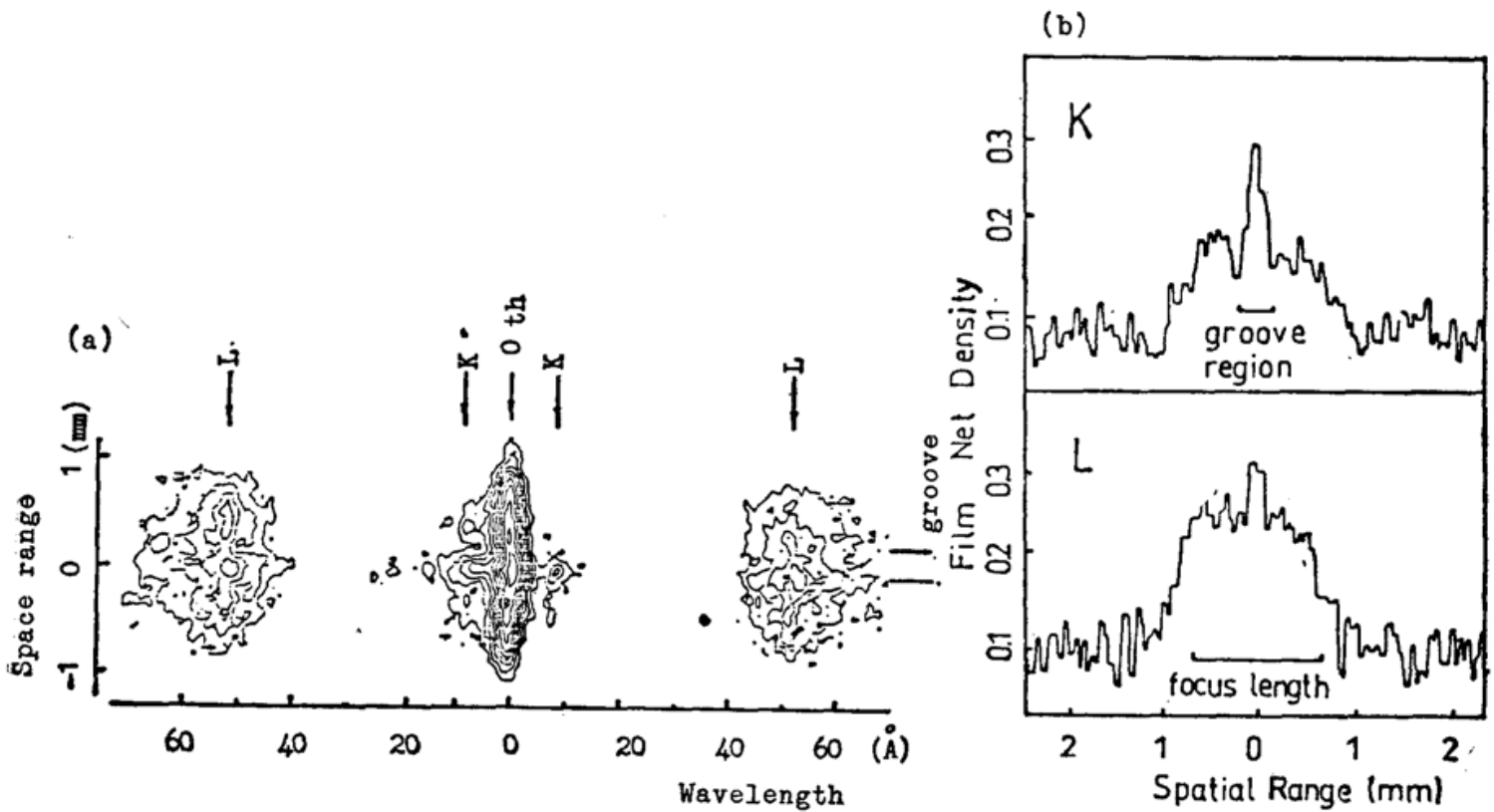


Fig. 2

(a) A2-D desital tracing of a typical space-resolved PTGS spectrum from a grooved aluminum target. Arrows indicate the tracing locations of the spatial densital traces of a $\text{AlXII } K-(1s^2-1s2p, 8\text{ \AA})$ and an $\text{AlXI } L-(2p-3d, 52\text{ \AA})$ line in (b). Traces in (b) show large gradients at edges of the groove, and the gradients of the K -line is much greater than that of the L -line. ($E_L=21.8\text{ J}$)

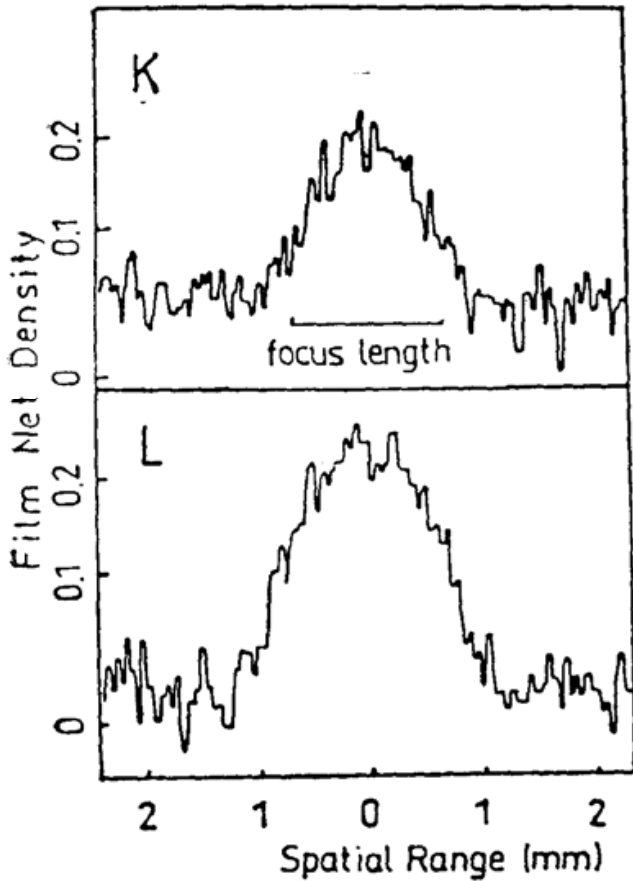


Fig. 3 The spatial traces of the same AlXII K and AlXI L line mentioned in Fig. 2 of a PTGS spectrum for a aluminum planar target. There are no intensity gradients in the focusing region. ($E_L=20.7J$)

图 3 给出了一张典型的用铝平面靶摄取的光谱的上述 K、L 谱线的一维空间扫描曲线。图中两条谱线在线聚焦区域内都有平缓的分布，不存在图 2(b) 中那样的陡峰。由于获得图 3 与图 2 结果的两次打靶具有相同的辐照条件，那末，其谱图区别的原因只能是两种靶的不同几何形状。

图 4 给出了铝的上述 K、L 线在两种靶型下发射强度随入射光能量的变化。来自于槽靶的凹区的 K 线强度要比平面靶强得多，而在两种靶形下，L 线的强度几乎不能区别。这说明，在相同的辐照条件下，凹槽可以使来自较高电离态 (Al^{11+}) 的谱线发射增强，而对低电离

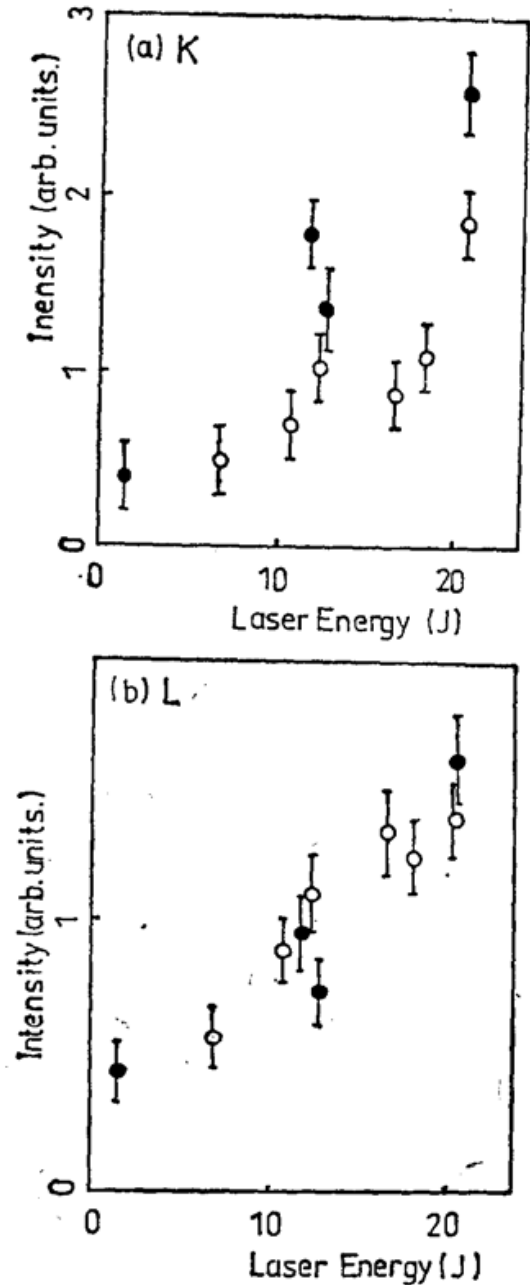


Fig. 4

(a) The AlXII K and (b) the AlXI L line peak intensities versus laser energies. Circles: plane targets, and dots: grooved targets. It is evident that the K-line emission from grooved targets increases faster with laser energy than from planar ones, while the L-line emission remains the same in the both

态(Al^{10+})发射的谱线则影响不大。这就暗示凹槽会聚的效果可能是提高了槽内电子温度。

图 5 是光探针对一次铝槽靶的记录。在图 5(a)中,会聚状等离子体首先出现在槽内等离子体沿激光反向以二倍于槽外等离子体的速度膨胀,电子密度也很快超过了槽外的平面区域,但没有明显的横向扩散如图 5(b)所示。在激光脉冲峰值 420 ps 后,纵向膨胀达到距靶面 $500 \mu m$ 处,而横向尺度只有 $200 \mu m$ 左右如图 5(c)所示。可见,槽内等离子体基本上没有横向的定向运动能,这一现象与 Berger 等人^[9]的观点是一致的。他们在研究薄膜双靶中等离子的对撞现象时,认为离子的定向运动能量在对撞中被耗散为无规热运动能。

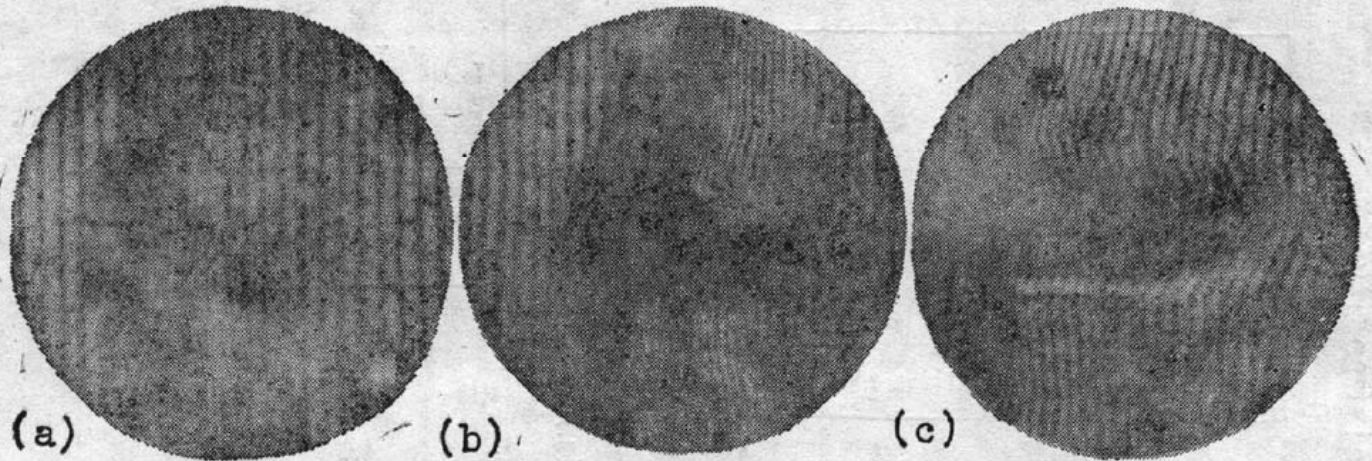


Fig.5 A typical data of optical framing system of one shot upon an aluminum groove target. (a) 60ps before the peak of the laser pulse; (b) 130ps after the peak; (c) 420ps after peak. ($E_L=12.9J$)

众所周知,由激光辐照产生的等离子体是沿靶表面法向膨胀的,因此,在凹槽中也存在着等离子体的对撞;对撞使得横向的定向能被耗散为热能,而纵向膨胀则不受该机制的抑制,从而形成图 5(c)中的密度分布。在这一图象下,可以猜测来自高电离态的谱线(如 $AlXIIK$)在时序上应存在双峰现象。第一个峰来自激光产生的初级离子;第二个则来自上述热化过程中所产生的次级离子。本文所观测到的光谱增强,也主要与这一个峰有关。如果这就是真实过程,这种半封闭几何形状的靶可以产生一空间尺度相对较大的均匀等离子体,并使之在较高温度上保持较长的时间,因而对于 X 射线激光所要求的泵浦条件,可能是有利的。

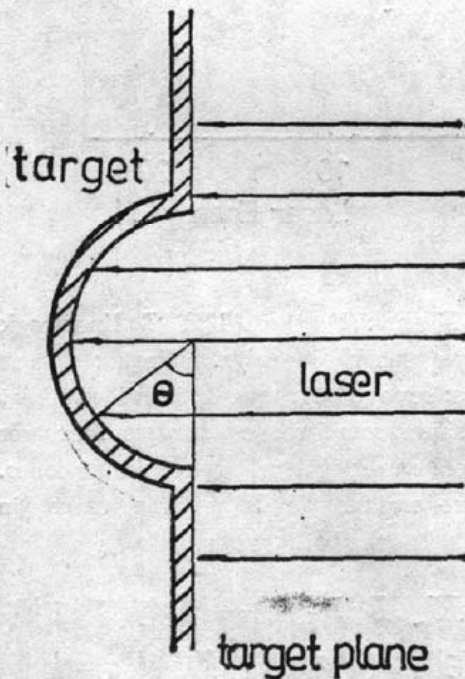


Fig.6 The irradiation of a line-focused laser beam across the inner surface of an ideal half-cylindrical-shell target

对铜靶比较了 $CuXX L$ 线 (11 \AA) 和 $CuXIX M$ 线,基本上重复了铝靶的结果,但 $Cu L$ 线的增强没有 $Al K$ 线这样明显,很可能是由于铜离子实具有较大的质量,影响了热化效率。

假定逆韧致吸收为主要的激光吸收机制,就可以估计出该热化所导致的温度增量。这时吸收能 $I_{ab} \propto I_L$, I_L 为入射激光能量;因而局域电子温度 $T \propto I_L^{2/3}$ ^[10],在

图 6 所示槽内角度为 θ 处温度为 $T_\theta = T_0(\sin \theta)^{2/3}$, T_0 为 $\theta = 90^\circ$ 时的电子温度,而等离子

体以离子声速 c_s 沿表面法向膨胀, 可以求出单位体积内离子在横向的定向运动能为

$$E = \frac{n_i}{(\pi/2)} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{2} M_i (c_s \cos \theta)^2 d\theta = 0.25 n_e T_0$$

如果这些能量完全热化为电子热运动能, 可使电子温度上升 $(E/n_e) = 0.25 T_0$, 这是理想情况下的结果, 实际由于靶的变形及热化效率的原因, 这一增长可能要小得多, 在进一步的实验研究中, 希望可以采用一些有较高光谱分辨率的谱仪, 来确定会聚的增温效应及其机制。

结论: 对半圆柱壳槽靶的激光等离子体的软 X 射线光谱及动力学特性的研究表明, 这种半封闭几何靶对等离子体有较强的会聚作用, 这种会聚提高了槽区内等离子体温度, 并使其软 X 射线谱发射增强。这一研究也是对实现 X 射线激光的实验条件的探索。

作者对六路激光装置的工作人员的精诚合作表示谢意; 感谢 A. Pachtman 博士的热忱帮助和钱爱娣同志的技术协助。

参 考 文 献

- [1] D. L. Matthews; *Proc. SPIE*, 1986, **688**, 67.
- [2] J. D. Lindl *et al.*; LLNL Report, 1986, *UCRL 50021-86*, 2-1.
- [3] 徐至展等, 《物理学报》, 1980, **29**, No. 3 (Mar), 439.
- [4] 李跃林等, 《光学学报》, 1989, **9**, No. 6 (Jun), 550.
- [5] A. Pachtman, Xu Zhizhan *et al.*; in the *Proceeding of the Second Symposium on Plasma-Wave and Plasma-Matter Interaction*, Association for Plasma Studies of China, 1988, report No. APS-88-006, paper D-1.
- [6] B. L. Henke, F. G. Fujiwara *et al.*; *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1984, **1**, No. 8 (Aug), 828.
- [7] 冯贤平等, 《量子电子学》1988, **5**, No. 4 (Apr), 332.
- [8] Zhi-zhan Xu *et al.*; *Opt. Comm.*, 1988, **69**, No. 1 (Dec), 49.
- [9] R. Berger, J. R. Albritton *et al.*; LLNL report, 1986, *UNCL 50021-86*, 2~41.
- [10] C. E. Max; LLNL report, 1981, *UCRL-53107*.

Investigation of soft X-ray emission characteristics of laser plasma in a half-cylindrical shell target

LI YAOLIN, XU ZHIZHAN, CHEN SHISHENG, WANG XIAOFANG,
JIANG ZHIMING AND FENG XIANPING

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

(Received 20 November 1989; revised 6 February 1990)

Abstract

Through the comparison of the soft X-ray emissive and hydrodynamic characters of a half-cylindrical-shell-target and a planar target, we proved that this kind of grooved target can effectively increase the plasma temperature in the groovy region, hence increase the soft X-ray emission in this region.

Key words: soft X-ray spectroscopy; laser plasma; plasma diagnostics.