

激光等离子体中“牛角尖”状喷流结构*

徐至展¹⁾ 江志明 陈时胜 林礼煌 张伟清

钱爱娣 张正泉 范品忠

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

1988年4月6日收到

用激光探针分幅成像诊断技术,发现并研究了出现在线状聚焦激光产生的等离子体冕区的大尺度“牛角尖”状的喷流结构。这种类型的等离子体喷流总是出现在热等离子体与冷的固体靶物质的交界处,或者出现在不同原子序数的两种等离子体的交界处。

一、引 言

利用线状聚焦的高功率激光所产生并加热的线状等离子体作为增益介质,是当今实现X射线激光的主要方法之一^[1-3]。在这种方法中,要求作为增益介质的线状等离子体是十分均匀的,以便能获得最佳的X激光输出。然而,有许多过程,如加热激光束自身的自聚焦成丝,等离子体喷流结构的产生等等,都会严重破坏激光产生等离子体的均匀状态。在通常的点状聚焦激光辐照固体靶的条件下,人们曾采用激光探针诊断技术,研究了等离子体喷流结构的产生和发展过程^[4-6]。研究指出,在加热激光脉冲终止辐照靶后,冕区等离子体会分裂成许多横向尺寸较小的(5—15 μm)丝状喷流。当然,在线状聚焦激光产生的等离子体中,同样也有可能产生类似的喷流结构^[7-9]。在文献[7,8]中,我们曾报道了线聚焦激光自身在等离子体中因自聚焦效应而分裂成丝的现象,也观察到了在激光产生等离子体的冕区中,存在着许多丝状等离子体喷流结构的现象,这些喷流一般具有小的横向尺寸。本文将报道在线聚焦激光打靶实验中,观察到的另一种类型的喷流结构。用多分幅光学探针成像诊断技术,我们观察到了横向尺度更大的形似“牛角尖”状的等离子体喷流结构。研究表明,这类新发现的喷流总是存在于热等离子体与冷的固体靶物质的交界处,或存在于两种具有不同原子序数的等离子体之间的交界处。这种大尺度的喷流,与以往发现的小尺度喷流一样,同样会对以线聚焦激光产生的等离子体作为增益介质的X激光,或者激光核聚变带来十分不利的影响。

二、实验布局

实验是在本所六路钨玻璃激光等离子体装置上进行的^[10]。实验的光路安排如图1所

* 国家自然科学基金资助的课题。

1) 中国高等科学技术中心(世界实验室)凝聚态与辐射物理分中心。

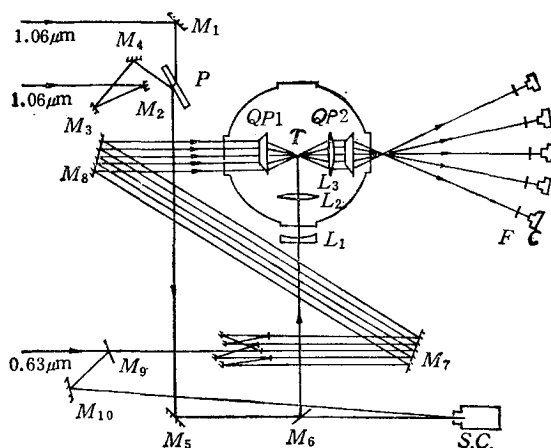


图1 实验光路布局

C 为照相机； F 为干涉滤光片； L_1 为柱面镜； L_2, L_3 为非球面镜； M_1-M_{10} 为专用反射镜； M 为五路分束延迟器； P 为检偏镜； QP_1, QP_2 为五棱镜； $S.C.$ 为条纹相机； T 为靶

示。六路激光中，二路偏振方向互相垂直的激光，由 M_1-M_4, P 合并成一路。激光能量在 $1-20\text{J}$ 之间，脉宽约为 250ps (FWHM)。该激光由一个柱面透镜 L_1 和非球面镜 L_2 组合系统垂直聚焦到平面靶上，在靶面形成宽约 0.1mm ，长约 1.6 到 4.0mm 可调的线状焦区，相应的靶面功率密度在 10^{12} 到 10^{14}W/cm^2 之间。六路激光中的另外一路则通过一块 KDP 晶体倍频和二甲亚砜液体的受激后向喇曼散射，成为波长为 $0.63\mu\text{m}$ ，脉宽约为 50ps 的与打靶激光精确同步的探针光^[11]。实验中，用一个可见光条纹相机同时测量打靶激光和探针光的脉冲波形和它们之间的延迟时间。打靶激光的预脉冲程度在探测精度之下。实验中，安排了五时间分幅的光探针成像诊断系统(由图1中的 $C, F, L_3, M, M_7, M_8, QP$ 组成)，用于研究出现在密度范围为 10^{18} 到 10^{20}cm^{-3} 内的等离子体冕区中的不均匀性结构及其时间演变过程。探针光经五路分束延迟器 M 后，被分成五束时间上互相延迟的探针光，各探针光束的探测方向与打靶激光束近似垂直，但对应于每一幅图象的探测方向间有一个很小的夹角。用上述系统能够在每一次打靶中，获得五幅相对于打靶激光有不同延迟时间的等离子体阴影图或干涉图。实验中，采用了平面薄箔靶和由不同原子序数的物质(如金和铝)组成的双段结构的平面靶。

三、结果与讨论

在线状聚焦激光辐照金属平面靶的实验中，沿着激光焦线方向观察到了横向尺寸较大的喷流结构。图2(见图版I)是在功率密度为 $1.4 \times 10^{13}\text{W/cm}^2$ 的激光辐照平面铝箔靶(厚为 0.1mm)时，用阴影-干涉诊断系统同时得到的阴影图(a)和干涉图(b)，探针光方向平行于打靶激光焦线。当延迟时间 $\Delta t = 2.8\text{ns}$ (指探针光脉冲与打靶激光脉冲峰值之间的延迟)，从图2中可以看到，在热等离子体与冷的靶物质交界处对称分布着形状类似于“牛角尖”的较大横向尺度的等离子体喷流结构。其横向尺寸约为 $30-50\mu\text{m}$ ，显然远大于以前观察到的小尺度喷流结构^[8]。喷流的尖顶指向冷的靶物质一边，并与靶面成

60°–65° 的夹角, 这个角度一般不随靶的原子序数和激光功率密度大小而变化。在激光功率密度小于 $5.0 \times 10^{12} \text{W/cm}^2$ 时, 则观察不到类似的喷流结构。干涉测量(见图 2(b)) 结果则表明喷流内部的电子密度比周围密度要大。并且, 喷流的膨胀速度也比整体等离子体的膨胀速度大得多, 平均为 $1.0 \times 10^7 \text{cm/s}$ 。对于中 Z (如铜) 靶, “牛角尖”状喷流结构发展得更迅速。

我们采用了一种特殊的激光辐照靶的方式来进一步肯定“牛角尖”状的喷流结构仅出现在热等离子体与冷靶物质的交界处。正如图 3(a) (见图版 I) 所示, 线聚焦激光辐照在 $100 \mu\text{m}$ 厚的铜平面薄箔靶上, 并使得激光焦线的大部份落在靶上, 另一部份则落在真空中。图 3(b) 和 (c) (见图版 I) 给出了在这种特殊的辐照条件下“牛角尖”状喷流的出现和发展过程。当 $\Delta t = 2.2 \text{ns}$ 时, 热等离子体与冷的靶物质交界处出现了等离子体喷流, 但此时横向尺寸还较小。当 $\Delta t = 4.6 \text{ns}$ 时, 喷流明显地得到了发展, 宽度增至约 $120 \mu\text{m}$ 。在此期间, 喷流的平均膨胀速度达 $1.0 \times 10^7 \text{cm/s}$, 而本底等离子体的速度却为 $3.5 \times 10^6 \text{cm/s}$ 左右。很清楚, 在整个观察期间, “牛角尖”状的喷流并没有出现在等离子体与真空的交界处。

大尺度的“牛角尖”状的等离子体喷流不仅发生在冷的靶物质与热等离子体的交界处, 而且也易发生在原子序数 Z 不同的两种等离子体的交界处。我们采用了由两种不同原子序数的物质所构成的双段靶进行了研究。图 4 (见图版 II) 是功率密度为 $1.0 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 的线聚焦激光辐照金-铝双段靶 (其结构见图 4(a)) 的阴影图。打靶激光束的聚焦线垂直于两种靶材的交界线, 并且它的上半部辐照在铝上, 下半部分辐照在金上, 而探针光则沿着平行于交界线的方向探测。从图 4(b) 中可以看到, 在两种等离子体的交界处明显地出现了“牛角尖”状的等离子体喷流, 喷流的尖角指向铝等离子体部份。进一步的研究表明, 这两种靶材之间即使有 $150 \mu\text{m}$ 左右的空隙, 喷流仍然会在两种等离子体的交界处出现。如图 5(a) (见图版 II) 所示, 我们采用了有空隙的金铝双段靶 (镀在玻璃基板上, 厚分别为 $0.33 \mu\text{m}$ 和 $0.23 \mu\text{m}$, 当中有 $150 \mu\text{m}$ 的空隙)。当 $\Delta t = 1.7 \text{ns}$ 时得到的阴影图 (图 5(b)) (见图版 II) 表明, “牛角尖”状喷流出现在两种不同原子序数的等离子体相接处, 平均膨胀速度达 $1.3 \times 10^7 \text{cm/s}$ 。与图 4 相同, 喷流的尖角也指向铝等离子体部份。此外, 我们还能在铝等离子体部份看到横向尺度较小 (约为 $5-10 \mu\text{m}$) 的喷流结构, 喷流的方向垂直于靶表面, 但在金等离子体, 这种结构则并不很明显。在双段靶实验中, 我们曾在平行于焦线方向在靶上施加了幅值约 5000Gs 的直流磁场, 研究直流磁场对喷流结构产生的影响。但没有观察到磁场的明显作用, 可能是磁场幅值太小的原因。

很显然, 大尺度“牛角尖”状喷流结构会严重破坏等离子体的均匀性。由于“牛角尖”状喷流一般出现在打靶激光脉冲终止以后, 并会随时间而继续增长; 同时, 喷流也往往出现在远离打靶激光的聚焦区域 (如图 2 和图 3), 因此, 入射打靶激光的自身可能存在的非均匀性不象是产生这类喷流的直接原因, 而等离子体中的一些不稳定性则很可能是这类喷流的产生原因。在热等离子体与冷的固体靶物质的交界处, 或在两种具有不同原子序数的等离子体交界处, 存在着很大的温度和密度梯度, 导致等离子体中出现大的热流。这样, 由于热流的出现, 激发起等离子体的热电和热磁不稳定性^[12], 加剧了密度的扰动和扰动范围, 并会伴随出现幅值为兆高斯量级的小空间尺度的直流磁场^[9], 该磁场会导致高温

电子或离子改变方向而撞向靶面,最终形成大尺度的等离子体喷流结构。

等离子体冕区出现的大尺度喷流结构,与小尺度喷流结构一样,同样会严重影响利用激光等离子体作为增益介质的X射线激光器的最佳工作状态,因为它将导致软X射线在传播中受到较大的折射,最终影响软X射线沿着线状等离子体的线增益和形成激光束的质量。另外,在激光核聚变研究中,通常采用多层球靶。在层与层之间可能出现的不均匀喷流显然会破坏靶的均匀压缩。此外,喷流也会出现在靶的支撑架附近,从而也会对靶的压缩产生不利的影响。虽然,实验中没有观察到直流磁场对等离子体喷流的形成与发展所造成的影响,但是,当外加直流磁场足够大时,研究磁场能否抑制喷流的产生与发展是很有意义的。显然,在以后的利用线聚焦激光产生等离子体作为增益介质的X射线激光器的实验研究中,需要选择合适的靶结构、尺度和激光的辐照方法,以最大限度地抑制等离子体喷流结构的出现,以获得最佳的X射线激光输出所必需的极为均匀的等离子体增益介质。

感谢毕无忌、施阿英帮助完成了光探针的等光程测量工作。感谢六路运行组给予本实验的支持与帮助。

- [1] D. L. Matthews *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 110.
- [2] M. D. Rosen *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **54**(1985), 106.
- [3] D. L. Matthews *et al.*, *J. Opt. Soc. Am.*, **B4**(1987), 575.
- [4] G. Thiell and B. Meyer, *Laser and Partical Beams*, Part 1, (1985), p. 51.
- [5] O. Willi *et al.*, *IEEE. J. Quant. Electronics*, **QE-17**(1981), 1909.
- [6] J. A. Stamper *et al.*, *NRL Memorandum Report* 4530, (1981).
- [7] Zhi-zhan Xu *et al.*, *Optics Comm.*, **61**(1987), 199.
- [8] 徐至展等, *中国科学A辑*, (11)(1987), 1169.
- [9] M. D. J. Burgess *et al.*, *Phys. Rev.*, **A32**(1986), 3580.
- [10] Zhi-zhan Xu *et al.*, *Chinese Phys.*, **1**(1981), 548.
- [11] 江志明等, *核聚变与等离子体物理*, **7**(1987), 127.
- [12] H. G. Hains, *Phys. Rev. Lett.*, **28**(1981), 917.

“HORN TIP” JET STRUCTURES IN LASER- PRODUCED PLASMAS

XU ZHI-ZHAN JIANG ZHI-MING CHEN SHI-SHENG LIN LI-HUANG ZHANG WEI-QING

QIAN AI-DI ZHANG ZHENG-QUAN FAN PIN-ZHONG

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

ABSTRACT

By using multi-frame optical probing photography, we have discovered and investigated the large-scale “Horn Tip” plasma jet structures in the coronal region of line-focused laser-produced plasmas. These plasma jets always appear at the boundary between the hot plasma and the cold target material, or between two plasmas with different Z-numbers.