

线状聚焦激光与金属作用的离子速度分布

孙 岚 徐至展* 张燕珍

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

本文报道了利用法拉第筒飞行时间法进行的离子测量。通过比较高功率激光线状聚焦和点状聚焦在平面金属靶上产生的离子发射特性,总结出离子速度分布和激光辐照密度的定标规律,以及离子速度分布的空间各向异性。实验是在上海光机所钨玻璃激光装置上进行的,激光束的波长为 $1.06\ \mu\text{m}$, 脉宽为 300 ps, 辐照密度为 $10^{12}\sim 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。

关键词: 线状聚焦激光; 离子速度分布; 离子发射的各向异性。

一、引 言

近年来,由于以线状激光等离子体作为X射线激光增益介质的方案愈来愈引起重视,人们开始研究在线状聚焦情况下出现的各种现象^[1]。

激光辐照固体金属靶形成等离子体流的特征主要决定于激光能量的吸收机制。激光聚变的研究表明,被等离子体吸收的大部分激光能量转换的离子的动能^[2,3,4,10]。为了通过离子的测量获得一些定量的数据,人们利用各种离子分析与飞行时间法相结合进行测量^[5~9]。其中法拉第筒法,以其结构较为简单,被人们常用作激光等离子体离子发射特性的测量。通过对点状等离子体离子速度分布的一系列研究,讨论了离子温度、快电子温度和临界区域的电子密度^[11~14]。这些数据对激光等离子体相互作用的分析,或者激光能量吸收和运输的研究,提供了重要信息。本文在以前工作^[20]的基础上,对离子速度分布作一更为详尽的报道。

二、实验测量与分析

本文的实验是利用高功率激光实验室中六路激光装置中的一束激光完成的。激光波长: $1.06\ \mu\text{m}$, 激光脉宽: 300 ps, 激光辐照密度: $10^{12}\sim 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。打靶透镜系统是由一个柱面发散透镜和一个非球面会聚透镜组成的。不同曲率半径的发散透镜可以得到不同长度 L 的焦线。实验用靶是一层涂在玻璃基板上的金属膜,膜厚: $10^2\ \text{\AA}\sim 1\ \mu\text{m}$ 。

激光与金属靶相互作用后产生的飞散离子,由法拉第筒收集极收集,并通过示波器记录下来。在激光辐照密度较低条件下,离子电流信号只能是慢离子信号。研究表明^[15]: 高能离子峰是聚焦的激光与等离子体的非线性相互作用、等离子体的非热效应或者是电荷分离引起的。鉴于我们的辐射激光条件和法拉第筒本身的结构,从收集的离子电流信号还不能分辨出各种(阶)离子的时间特性,但我们试图通过离子电流主峰来分析离子发射特性。

收稿日期: 1988年7月2日; 收到修改稿日期: 1989年3月14日

* 中国高等科学技术中心凝聚态与辐射物理中心。

一般来说,对不同 Z 值的金属靶,由于激光辐照后的消融参量不同,飞散离子的特性也不同。图 1 是铝膜靶和金属靶在相似条件下取得的离子电流信号曲线。图中可见,铝靶离子主峰明显高于金靶离子主峰,而金靶离子信号的脉宽 (FWHM) 大于铝靶离子信号的脉宽。金靶离子电流信号由几个宽度不同的脉冲叠加而成,其中的三个脉冲峰值几乎相等。这一现象说明飞散的金靶离子中有不同速度的离子群,它们的强度基本相等。

图 2 是在激光能量相同的条件下,激光线状聚焦和点状聚焦在铝膜靶上所得到的离子电流信号。通过观察发现,无论是点状聚焦还是线状聚焦,当法拉第筒的接收角 $\theta = 45^\circ$ (即

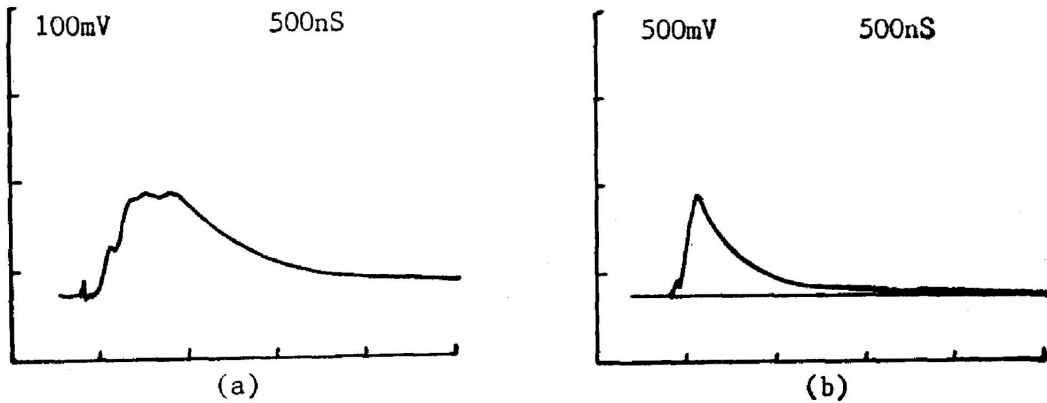


Fig. 1 Ion current versus time from target (a) gold, and (b) aluminum. $\theta = 22^\circ$, focused line $L = 2$ mm, laser energy $E = 6.0$ J, incident irradiance $I = 10^{13}$ W/cm 2 .

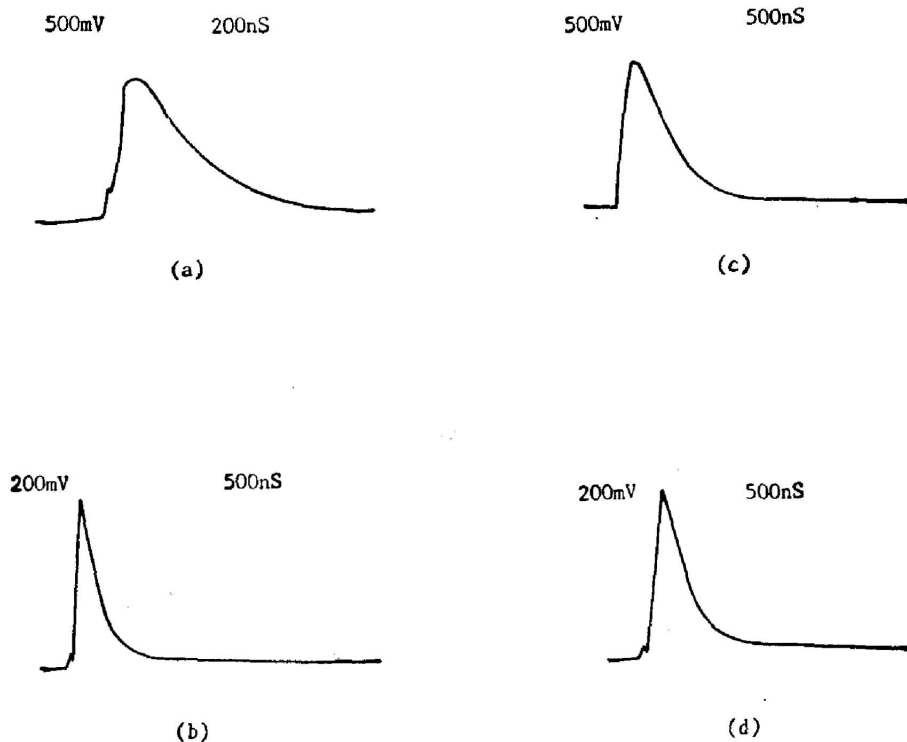


Fig. 2 Ion current from spot-focused on an aluminum foil, incident irradiance $I = 1.1 \times 10^{14}$ W/cm 2 . (a) $\theta = 45^\circ$. (b) $\theta = 22^\circ$. And ion current from line-focused on an aluminum foil, incident irradiance $I = 4.33 \cdot 10^{12}$ W/cm 2 , focused line $L = 2$ mm. (c) $\theta = 45^\circ$. (d) $\theta = 22^\circ$

在入射平面上法拉第筒的接收方向与激光轴之间的角度)时,获得的离子电流主峰明显高于 $\theta=22^\circ$ 时的离子电流主峰,比值大约为2。 $\theta=22^\circ$ 的离子信号脉宽偏窄,这一现象说明 $\theta=22^\circ$ 时铝靶被剥离的离子数略少。如若将线状离子电流信号的全宽(FWHM)与点状离子电流信号的全宽比较,发现前者略宽,激光线状聚焦铝靶得到的离子数较多。 $\theta=45^\circ$ 时,法拉第筒正好置于靶平面法线方向上。我们可同时得出这样的结论:离子发射呈现各向异性,在靶面法平面上的离子数较多,相应的主峰离子速度也最大。

下面我们就离子电流信号主峰所对应的飞行速度 v_p 作一定量分析。在激光等离子体相互作用中,辐照激光能量与激光聚焦焦斑面积都是影响 v_p 的因素。其中点聚焦的焦斑直径或线聚焦的焦斑长度是吸收传输部分功率的决定因素。Lewis等^[16]建立的在点状聚焦条件下适用的离子速度分布表达式如下:

$$v_p \approx 5 \times 10^7 (1/10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.2} (\phi/200 \mu\text{m})^{0.3}, \quad (1)$$

此式相应的实验条件为 $\lambda=1.05 \mu\text{m}$, FWHM=1.5 ns的激光点状聚焦在铝膜靶上,焦斑直径为 $50 \mu\text{m} \sim 150 \mu\text{m}$ 。由(3)式可知,对于一定的激光辐照小焦斑靶的功率密度,离子速度 v_p 随着点聚焦的光焦斑直径的增加而增加,而且对影响离子速度 v_p 来说焦斑直径比辐照量更为重要。

在我们的实验条件下,得到金靶和铝靶上离子速度分布的定标规律,如图3所示。

$$v_p = 1.8 \times 10^7 (1/10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.75}, \quad (2)$$

$$v_p = 5.0 \times 10^7 (1/10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.17}, \quad (3)$$

方程的形式与Lewis方程相似。如果我们将 $\phi=100 \mu\text{m}$ 代入(3)式,得到

$$v_p = 4.06 \times 10^7 (1/10^{13} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.2}. \quad (4)$$

我们所感兴趣的是线状等离子体的离子速度分布。如图4中曲线a和b所示^[20],金靶和铝靶的离子速度分别为:

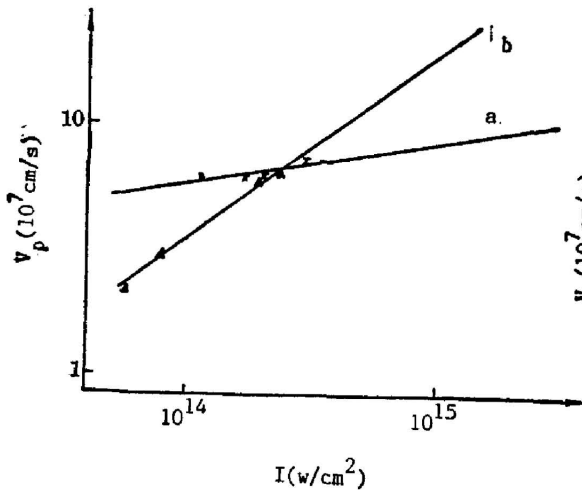


Fig. 3 The scaling law of the ion velocity with incident irradiance under spot-focused configuration $\theta=45^\circ$

- (a) aluminum foil,
(b) gold foil

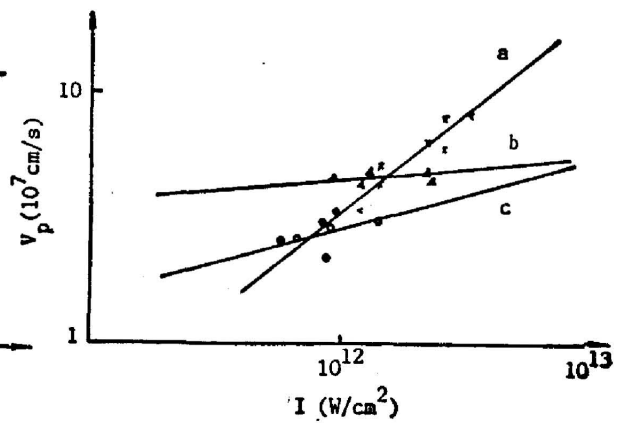


Fig. 4 The scaling law of the ion velocity with incident irradiance under line-focused configuration

- (a) $\theta=45^\circ$, aluminum foil with focused line $L=2 \text{ mm}$.
(b) $\theta=45^\circ$, gold foil with focused line $L=2 \text{ mm}$.
(c) $\theta=22^\circ$, aluminum foil with focused line $L=4 \text{ mm}$

$$v_p = 1.55 \times 10^7 (1/10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.285 \pm 0.001}, \quad (5)$$

$$v_p = 5.3 \times 10^6 (1/10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2})^{0.826 \pm 0.0075}, \quad (6)$$

很明显, 铝靶离子速度的功率指数大于金靶离子速度的功率指数, 换言之, 激光辐照密度越大, 铝离子速度上升越快。上述结论与点状聚焦的情况有所区别。金靶的点状离子速度功率指数大。

最后, 我们看一看离子速度分布在空间上的各向异性。正如我们在前面所交代的, 离子发射是在与激光轴成一定角度的方向内分布的。故在整个入射平面内, 离子发射呈各向异性。人们运用各种离子诊断工具, 如法拉第筒, Thomson 离子谱仪, 离子针孔成像等, 分析点状等离子体的离子发射特性, 均得出了离子发射各向异性的结论^[16~18]。我们在实验中归纳出如图 5 所示的点状聚焦和线状聚焦铝靶的离子空间速度分布^[20]。所以在激光线状聚焦时, 法拉第筒接收位置的选择, 对获得的离子速度分布具有很大的影响。

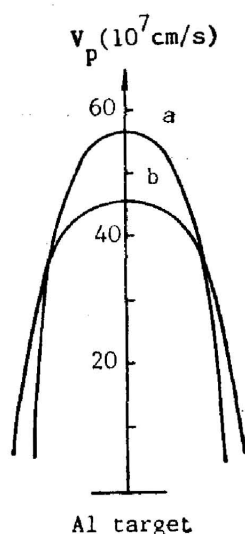


Fig. 5 Distribution of blowoff velocity measured with Faraday cup. The targets are aluminum foils
(a) line focused, $L=2\text{mm}$, (b) spot focused

作者感谢何兴法、赵志文、陆海鹤等同志以及“六路”工作人员的合作和支持。

参 考 文 献

- [1] M. D. J. Buegess, R. Dragila *et al.*; *Phys. Rev. (A)*, 1985, **32**, No. 5 (Nov), 2899~2908.
- [2] B. Luther-Davies, J. L. Hughes; *Opt. Comm.*, 1976, **18**, No. 3 (Aug), 351~354.
- [3] Jacques Martineau, Maximo Rabeau *et al.*; *Opt. Comm.*, 1976, **18**, No. 3 (Aug), 347~350.
- [4] B. Luther-Davies; *Opt. Comm.*, 1977, **23**, No. 1 (Oct), 98~104.
- [5] J. N. Olsen, G. W. Kuswa *et al.*; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, No. 5 (May), 2275~2283.
- [6] A. W. Ehler; *J. Appl. Phys.*, 1975, **46**, No. 6 (Jun), 2464~2467.
- [7] R. Decoste, B. H. Ripin; *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**, No. 2 (Jul), 68~70.
- [8] Tai Ho Tan, *et al.*; "Laser Interaction and Related Plasma Phenomena", 1976, **4A**, 677~687, edited by Helmut J. Schwarz and Heinrich Hora.
- [9] Jay S. Pearlman; *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **18**, No. 8 (Aug), 1064~1067.

- [10] X. Zhizhan, P. H. Y. Lee *et al.*; *Kexue Tongbao (Sci. Lett.)*, 1983, **23**, No. 4 (Apr), 564~568.
 [11] J. Grun, R. Stellingwerf *et al.*; *Phys. Fluids*, 1986, **29**, No. 10 (Oct), 3390~3393.
 [12] Hyung-Boo Kang, Tatsuhiko Yamanaka *et al.*; *Japan. J. Appl. Phys.*, 1972, **11**, 765~766.
 [13] T. H. Tan, G. H. Meccall *et al.*; *Phys Fluids*, 1984, **27**, No. 1 (Jan), 296~301.
 [14] L. M. Wickens, J. E. Allen *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1978, **41**, No. 4 (Jul), 243~246.
 [15] Wayne Ehler, William I. Linlor; *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**, No. 9 (Sep), 4229~4231.
 [16] S. J. Gitomer, R. D. Jones *et al.*; *LA-UR-86-8*.
 [17] M. H. Key, W. T. Toner *et al.*; *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 7 (Jul), 2011~2026.
 [18] B. H. Ripin, R. Decoste *et al.*; *Phys. Fluids*, 1980, **23**, No. 5 (May), 1012~1030.
 [19] J. Grun, S. P. Obenschain *et al.*; *Phys. Fluids*, 1983, **23**, No. 2, (Feb) 588~597.
 [20] 孙岚,徐至展等;《光学学报》,1988, **8**, No. 7 (Jul), 584~589.

Ion velocity distribution study of line-focused laser irradiation on foils

SUN LAN, XU ZHIZHAN*, ZHANG YIANZHEN

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

(Received 2 July 1988; revised 14 March 1989)

Abstract

We report the ion measurement of time-of-flight with Faraday cup and the ion energy with a simple analytic model involving an isothermal rarefaction. The targets were polished glass coated with 100Å to 1μm of Al and Au foils. Irradiance was varied in the range 10^{12} to 10^{14} W/cm² with constant laser power and variable focal size. Deductions include the scaling relationship of ion velocity at $\lambda=1.06\mu\text{m}$ with different focal size, and the anisotropic distributions have been clearly observed.

Key words: line-focused laser; distribution of ion velocity; anisotropy of ion emission.

* Center of Condensed Matter and Radiation, CCAST (World Laboratory) Beijing, China.