

激光—等离子体相互作用过程中 离子发射的各向异性

孙 岚 徐至展* 张燕珍 陈时胜
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

用波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 、强度为 $10^{13}\sim 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 的激光辐照金属平面靶,在点状聚焦和线状聚焦方式下,离子发射速度及其动量呈现各向异性;通过分析低 Z 靶和高 Z 靶在不同能量的激光照射下的离子发射速度 V_p 和消融质量 M ,研究离子发射的定标规律。

关键词: 各向异性,线聚焦(点聚点),消融质量。

一、引 言

在高功率激光与物质相互作用中,离子测量是等离子体诊断的重要内容之一,它有助于我们对激光、电子束和等离子体相互作用的各种过程的理解。测量和分析高能离子的最简单的方法是利用法拉第筒(Faraday-cup)^[1,2]作为探头的实验方法。

本文通过旋转平面靶来改变法拉第筒与靶面法线的相互位置,用来接收不同方向发射的离子。文中具体描述靶和法拉第筒的放置,分析激光等离子体相互作用中离子发射的速度分布和总的消融质量,研究离子发射的定标规律。

在法拉第筒的离子测量中,国内外目前还尚未对离子发射的各向异性作任何细致的分析和阐述。本文旨在实验测量的基础上,对实验结果进行分析和处理,以期获得法拉第筒接收各向不均匀的离子发射的一般规律。

法拉第筒的输出电流波形可以通过同轴电缆直接传送至示波器进行显示。为避免二次电子发射所造成的测量误差,实验中采用深筒型法拉第筒^[3]。

二、实验装置概述

实验在云路高功率激光装置^[3]上进行。

(1) 激光束波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 激光脉宽 $300\ \text{ps}$, 激光能量为 $1\sim 10\ \text{J}$, 功率密度 $10^{13}\sim 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$;

(2) 激光聚焦方式有点状聚焦和线状聚焦。点状聚焦是由一个 $(f/D)=2$ 的非球面透镜完成, 焦距直径约 $\phi 100\ \mu\text{m}$; 线聚焦是由非球面透镜与曲率半径分别为 $R=1500\ \text{mm}$, $R=1000\ \text{mm}$, $R=800\ \text{mm}$ 的平凹柱面透镜组合完成, 实现长度相应为 $L=2\ \text{mm}$, $L=3\ \text{mm}$,

收稿日期: 1987年7月1日; 收到修改稿日期: 1987年9月2日

$L=4\text{ mm}$ 的焦线;

(3) 靶材为铝(^{27}Al)和金(^{197}Au)的平面靶均放置在真空靶室内。(真空度为 $5 \times 10^{-8} \sim 10^{-5} \text{ Torr}$)。靶与法拉第筒之间的距离为 $15\text{ cm} \sim 20\text{ cm}$ 。实验中靶的位置如图 1 所示。

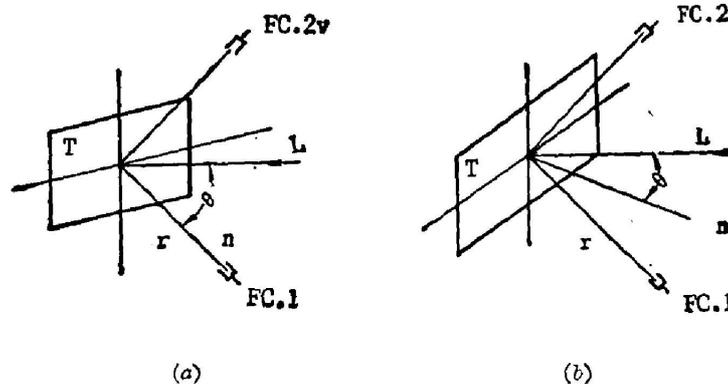


Fig. 1 Experimental arrangement. The target normal was rotated by an angle θ from the laser beam in the incident plane. T: target; L: laser beam; FC. 1 and FC. 2; Faraday-cups.

(a) $\theta=45^\circ$; (b) $\theta=22^\circ$

(4) 法拉第筒 FC. 1 和 FC. 2 的安置如图 1 所示。激光轴和靶法线构成水平入射面, 它们之间夹角为 θ ; 靶法线和 Z 轴构成垂直接收面。FC. 1 和 FC. 2 分别放置在这两个平面上;

(5) 法拉第筒电荷收集极输出的电流通过放置在屏蔽室内的千兆赫高速示波器记录波形。

三、实验结果及分析

高功率激光入射至金属平面靶, 它的能量被靶表面物质吸收, 其表面被烧蚀, 烧蚀的物质以很高的速度向外喷射, 形成类似于日冕的冕层等离子体。在冕层等离子体临界层附近, 激光能量进一步被共振吸收, 从而产生超热电子。这些超热电子一方面在冕区外部产生快离子, 带走可观的动能; 另一方面使烧蚀的表面不断产生向外喷射的烧蚀动量流, 其反冲力将产生强烈的激波。

法拉第筒 FC. 1 和 FC. 2 用来接收离子信号, 并由千兆赫高速示波器进行显示, 其典型示波图形如图 2 所示。图中首先出现一个预脉冲, 它是由等离子体产生的 X 光信号^[4], 以此作为激光打靶的基准时间; 接着出现的是快离子信号, 幅度很小, 脉宽较宽的是慢离子信号。离子中大量的是慢离子, 通常情况下其幅度远大于快离子信号。图 3 中 (a)、(b) 分别为 FC. 1 和 FC. 2 所接收到的离子信号, 图 3(b) 中的脉冲宽度明显比图 3(a) 中的脉冲宽度大。

在获得实验结果的基础上, 我们讨论法拉第筒 FC. 1 接收到的离子信号速度分布和消融质量, 并研究离子发射速度及其动量的各向异性。

1. 离子速度分布 (V_x 分布)

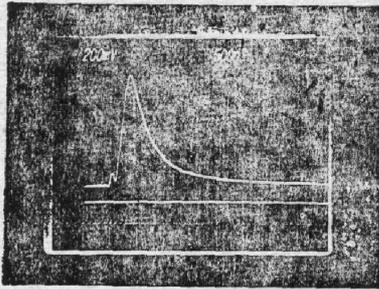
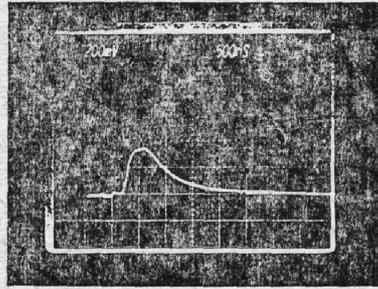
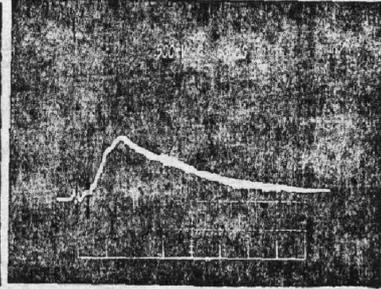


Fig. 2 Oscilloscope trace of a typical ion signal received by FC. 1



(a)



(b)

Fig. 3 Oscilloscope trace of ion signal received by (a) FC. 1 and (b) FC. 2

图 2 所示的示波图形可以转化成速度分布函数 $f(v)$, 如图 4 所示。由图 4 可得:

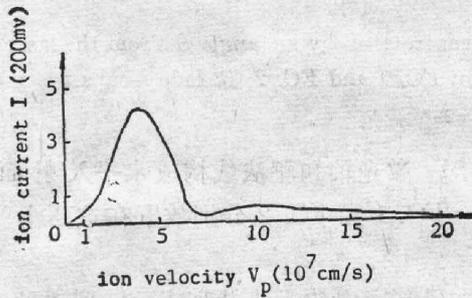


Fig. 4 The velocity distribution function $f(v)$

$$\bar{V} = \frac{\int f(v) \cdot V \cdot dV}{\int f(v) \cdot dV}, \quad (1)$$

$$V_p = r / \Delta t, \quad (2)$$

式中 $f(v)$ 为速度分布函数; \bar{V} 为离子平均速度, V_p 为离子电流峰值所对应的速度; r 为靶与法拉第筒 FC.1 的距离; Δt 为离子信号波峰延迟时间。

我们根据实验得到的照片和数据, 给出如图 5 所示的离子速度与激光能量的定标规律通过平凹柱面透镜的线状聚焦焦斑面积分别为 $0.3 \times 2 \text{ mm}^2$, $0.3 \times 3 \text{ mm}^2$ 和 $0.3 \times 4 \text{ mm}^2$ 。故

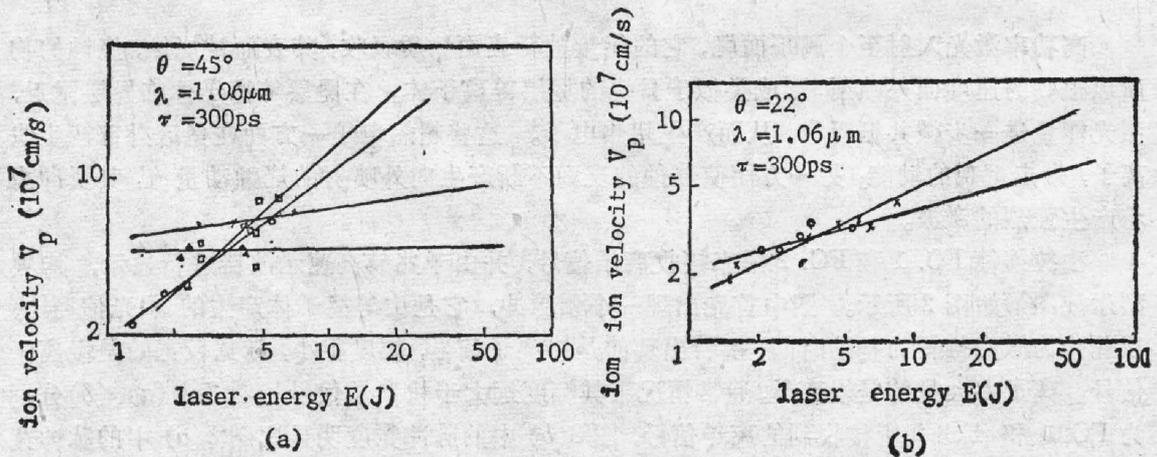


Fig. 5 The scaling law of ion velocity with laser energy

(a) $\theta=45^\circ$, \times spot focused on Al target, \square line focused on Al target, $L=2 \text{ mm}$, \circ spot focused on Au target, \triangle line focused on Au target, $L=2 \text{ mm}$; (b) $\theta=22^\circ$, \otimes spot focused on Al target, \bullet line focused on Al target, $L=4 \text{ mm}$

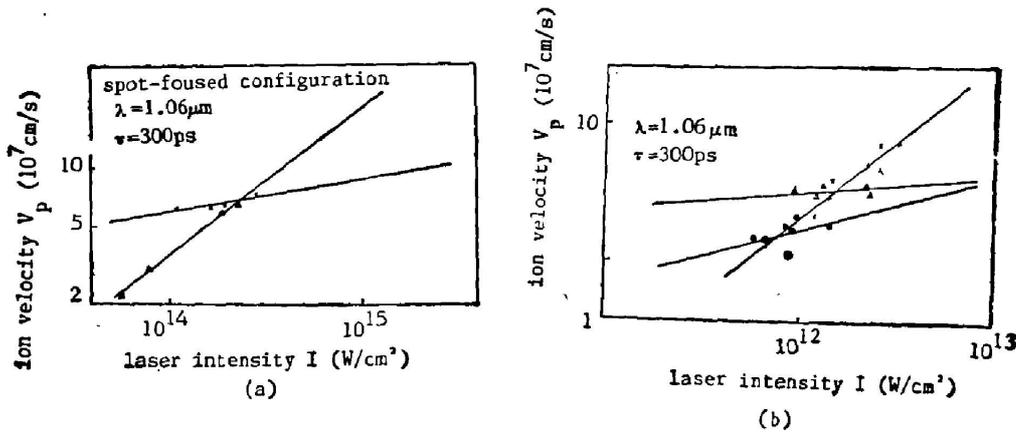


Fig. 6 The scaling law of the ion velocity with laser intensity

(a) spot-focused configuration, \times $\theta=45^\circ$, Al target, \blacktriangle $\theta=45^\circ$, Au target; (b) line-focused configuration, \times $\theta=45^\circ$, Al target, $L=2$ mm, \bullet $\theta=22^\circ$, Al target, $L=4$ mm, \triangle $\theta=45^\circ$, Au target, $L=2$ mm

由此获得离子速度与激光功率密度的定标关系,如图6所示。

由实验结果可知,采用低 Z 靶,可以得到较多的快离子信号;而采用高 Z 靶,得到的快离子较少,这可以由动能守恒定律 $mv^2 \propto E_L$ 进行解释。以往的实验和研究工作表明,离子速度分布与激光能量成线性关系;在靶平面法线方向发射的离子速度要比其他方向上的离子速度快,且这一方向上的离子数量也最多^[5~9]。这与我们的实验结果相符。我们还发现,对低 Z 靶(如 Al 靶),线聚焦情况下的离子速度 V_p 值较大;对高 Z 靶(如 Au 靶),点聚焦情况下的离子速度 V_p 值较大。

2. 消融质量

激光照射平面靶的消融质量可表示为:

$$M = \frac{2\pi}{\Delta\Omega} \cdot \frac{m_p}{e} \cdot \frac{\bar{A}}{\bar{Z}} \int i(t) dt = K \int i(t) \cdot dt, \quad (3)$$

式中 $\Delta\Omega$ 为法拉第筒电荷收集器所张立体角; m_p 为质子质量; \bar{Z} 、 \bar{A} 分别为平均电荷数和平均原子量; $i(t)$ 为接收到的离子流强度。我们对 M 作一近似积分计算:

$$M = K \cdot \frac{h}{6} \cdot \left[i(a) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} i(a_{k+\frac{1}{2}}) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} i(a_k) + i(b) \right] \quad \left(h = \frac{b-a}{n} \right), \quad (5)$$

K 值根据立体角 $\Delta\Omega$ 的不同列出表 1:

Table 1 The value K is resolved by the solid angle $\Delta\Omega$

r (cm)	20	17	15	12
$\Delta\Omega$ (Sr)	2.00×10^{-4}	2.97×10^{-4}	3.56×10^{-4}	5.56×10^{-4}
K (10^{-4})	6.50	4.75	3.70	2.35

消融质量与激光功率密度的定标关系如图7所示。由图可知,点聚焦的消融质量很小,相对来说,线聚焦的消融质量较大。尽管线聚焦时激光功率密度比点聚焦时小两个数量级,但上述结果与靶面焦斑面积密切相关。线聚焦焦斑面积大约是点聚焦焦斑面积的100倍,两者的消融质量相差10倍左右。

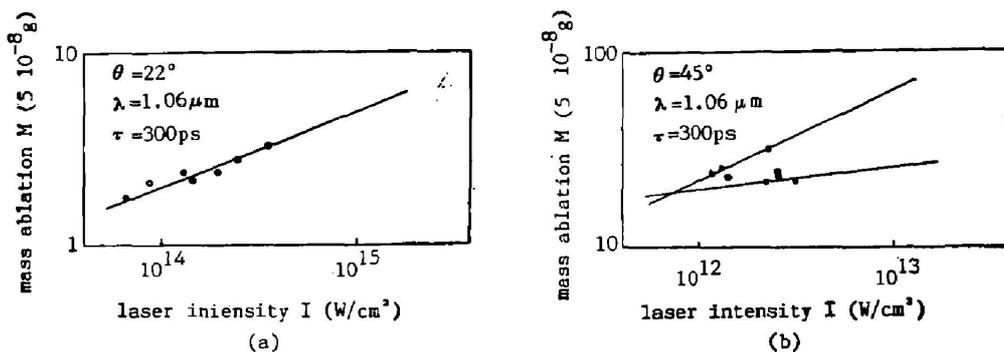


Fig. 7 The scaling law of mass ablation of plasma with laser intensity
 (a) \circ $\theta=22^\circ$, spot focused on Al target; (b) $\theta=45^\circ$, line-focused configuration,
 \bullet Al target, $L=2$ mm, \square Au target, $L=2$ mm

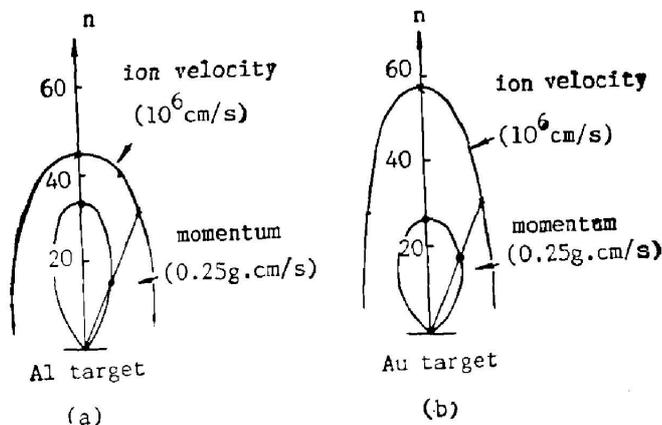


Fig. 8 The anisotropic angular distribution of ion velocity and momentum on Al target
 (a) spot-focused configuration; (b) line-focused configuration, $L=2$ mm

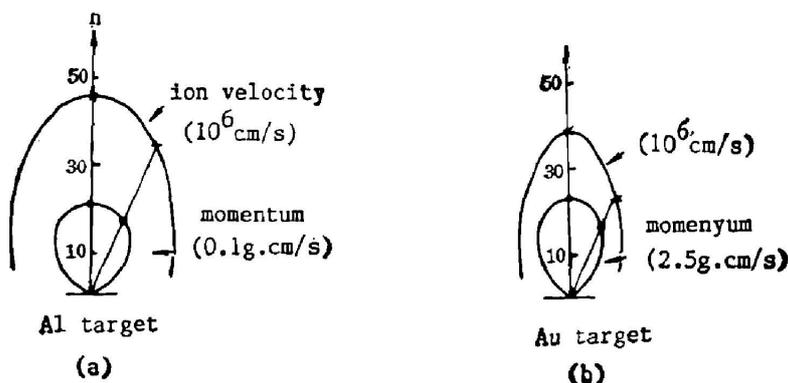


Fig. 9 The anisotropic angular distribution of ion velocity and momentum on Au target
 (a) spot-focused configuration; (b) line-focused configuration, $L=2$ mm

在实验的基础上,根据离子发射各向异性关于靶法线的对称性,参考国外同类实验的结果,我们得出在靶法线平面内各向异性角分布。图 8 和图 9 分别是 Al 靶和 Au 靶在点聚焦和线聚焦时离子速度及其动量的各向异性。我们可以得到如下结论:离子动量的各向异性比离子速度的各向异性明显得多;离子速度各向异性在线聚焦情况下比在点聚焦情况下较为明显。从上述的空间角分布,我们可以得到离子的平均速度,平均动量以及在靶临界面上的离子速度。

实验中得到张伟清,钱爱娣,陆海鹤等同志和六路实验室工作人员的帮助和合作,作者在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Jay. S. Pearlman; *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **48**, No. 8, 1064.
- [2] 张燕珍,徐惠华;《核聚变与等离子体物理》,1985, **5**, No. 3, 161.
- [3] 徐至展等;《物理学报》,1980, **29**, No. 4, 439.
- [4] Xu Zhizhan, P. H. Y. Lee, Zhang Yanzhen; *etc.*, *KEXUE TONGBAO*, 1983, **28**, No. 4(Apr), 564.
- [5] M. H. Key and W. T. Torner; *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 7 (Jul), 2011.
- [6] B. H. Ripin, R. Decoste; *etc.*, *Phys. Fluids*, 1980, **23**, No. 5 (May), 1012.
- [7] J. Grun, S. P. Obenschain, *etc.*, *Phys. Fluids*, 1983, **26**, No. 2(Feb), 588.
- [8] T. H. Tan, G. H. McCall, and A. H. Williams; *Phys. Fluids*, 1984, **27**, No. 1 (Jan), 296.
- [9] B. Meyer and G. Thiell; *Phys. Fluids*, 1984, **27** No. 1 (Jan)302.
- [10] J. Grun, R. Stellingwerf and B. H. Ripin; *Phys. Fluids* 1986, **29**, No. 10 (Oct), 3390.

Anisotropy of ion emission in the laser-plasma interaction

SUN LAN, XU ZHIZHAN*, ZHANG YIANZHEN AND CHEN SHISHENG
(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 1 July 1987; revised 2 September 1987)

Abstract

The anisotrop of ion emission was observed when laser irradiation of the aluminum or gold targets at $1.06\mu\text{m}$ wavelength with laser intensity of 10^{13} to 10^{14} W/cm² and configurations of spot-focused and line-focused. The scaling law of ion velocity and the mass ablation have been studied with the analysis of ion emission, the anisotropic angular distributions of ion velocity and momentum.

Key words: anisotropy; line-focused configuration (spot-focused configuration); mass ablation.

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