

靶形与离子发射

张燕珍 徐至展* 孙岚

(中国科学院上海光机所, 201800)

摘要: 本文报道线状聚焦激光打靶, 激光等离子体发射的离子性质的实验结果。

关键词: 冷阱, 点聚焦, 线聚焦

Target forms and ion emission characteristics

Zhang Yanzheng, Xu Zhizhan, Sun Lan

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

Abstract: Some new interesting experimental results are reported about the characteristics of ion emission produced from targets with different sizes and forms by line-focused laser. Temporally resolved ion signals have been diagnosed by Faraday charge collector. It was found that the anisotropic angular distribution of ion emission under line-focused condition was weakened when laser irradiated the targets with cold pit.

Key words: cold pit, spot focusing, line focusing

实验在上海光机所六路激光装置上进行。激光波长 $1.06 \mu\text{m}$; 脉冲宽度 $\sim 250 \text{ps}$; 各路激光能量约 $5 \sim 10 \text{J}$ 。为了增大用于打靶的激光能量, 把装置上其中两路具有不同振动方向的激光(II、III路)经偏光镜叠加在一起(图1)。两激光脉冲的相对延时(Δt)可调, 实验中取 $\Delta t \sim 200 \text{ps}$ 。叠加后的激光通过一个平凹柱面透镜与一个非球面透镜系统沿 x 轴方向垂直作用于靶上。其聚焦线宽约 $200 \mu\text{m}$, 长度(L_f)可通过变换不同曲率的平凹柱面透镜而改变。用两个法拉第电荷收集器来观察激光等离子体发射的离子性质(图2)。其中 $FC1$ 置于入射平面上, 与激光焦线(y 轴)约成 39° 夹角, 距靶中心位置约 21cm 。 $FC2$ 放在入射平面的上方, 在 $x-z$ 轴构成的垂直平面上。接收方向与 x 轴夹角为 26° , 与靶中心相距为 10cm 。

实验中改变 L_f 并打多种不同尺寸、不同结构的靶, 如平面 Al 靶和 Si 靶, 靶宽 l 比 L_f 或长或短。图 3(a) 是在独特的衬架上均匀地涂上一层全膜作成的 Au 阱 Au 靶。图 3(b) 则是用两种材料做的 Mg 阱 Al 靶。

焦斑大小不变, 改变激光能量即改变参与加热的激光功率密度(P_i)将影响激光等离子体的离子发射谱^[1~5]。本文着重研究在 P_i 不变的情况下, 采用多种 $l < L_f$ 的靶以及在不改变打靶总能量的前提下变更 L_f 时激光等离子体的发射情况。

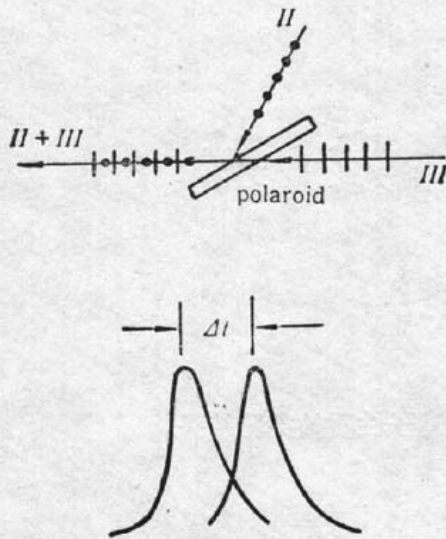


Fig. 1 Polarized light superposition and relative delay of two beams

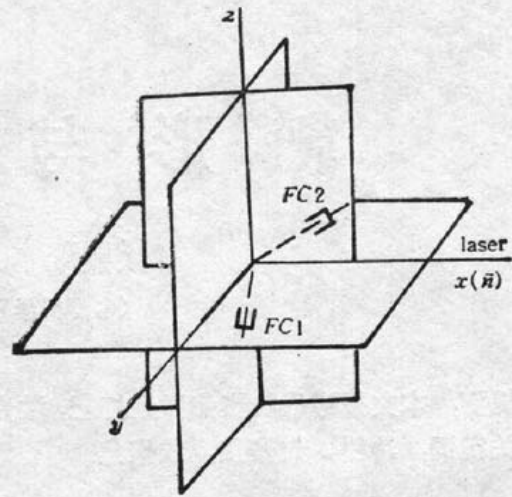


Fig. 2 Experiment arrangement

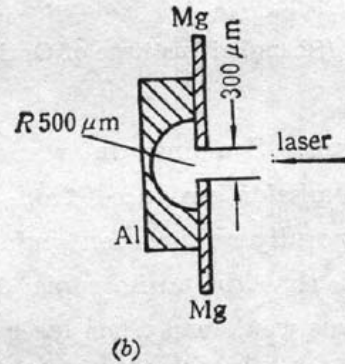
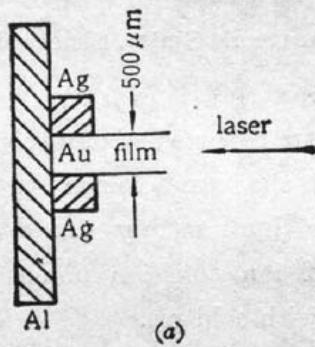


Fig. 3 Cold-pit target

(a) Au pit, Au target; (b) Mg pit, Al target

图 4 给出当 $L_f = 8\text{ mm}$ (相当于 $P_l \sim 2 \times 10^{12}\text{ W/cm}^2$)，打不同宽度 l 的靶时 $FC2$ 接收到的离子波形图。并给出图 4 所对应的离子最可几的漂移速度 (v_i) 和收集到的离子数 (n_i)。

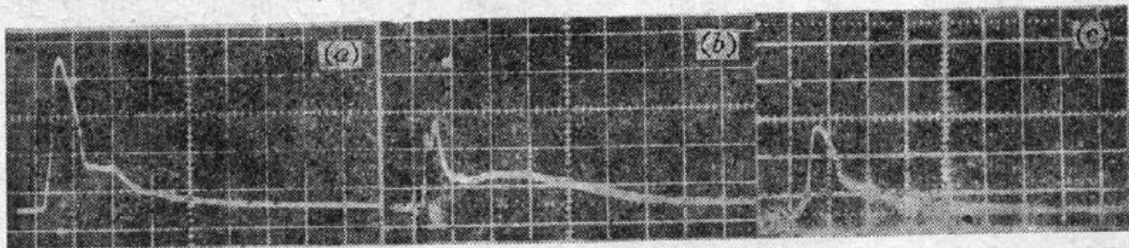


Fig. 4 Ion signals with different l

($FC2$, $L_f = 8\text{ mm}$, Al target, $y: 10 \times 200\text{ mV/div}$, $x: 500\text{ ns/div}$)
 (a) $l = 7.5\text{ mm}$, $v_i = 3.0 \times 10^7\text{ cm/s}$, $n_i = 1$ (arb. unit);
 (b) $l = 5\text{ mm}$, $v_i = 3.0 \times 10^7\text{ cm/s}$, $n_i = 0.88$;
 (c) $l = 2.5\text{ mm}$, $v_i = 3.0 \times 10^7\text{ cm/s}$, $n_i = 0.59$

从图 4 不难看出，在激光功率密度不变的前提下随着被激光加热的区域的减少，被剥离的粒子数也减少。但并不影响粒子的漂移动能。

图 5 给出激光能量不变的情况 ($E \approx 20\text{ J}$) 下改变激光焦线长度时 $FC2$ 接收到的离子波形图。并给出相应的离子漂移速度 v_i 和被剥离的粒子数 n_i 。从图 5 也可看出，焦线短即加热激光功率密度大。离子的最可几的漂移速度也大。但剥离的离子数却随烧蚀区的缩小而减少。这

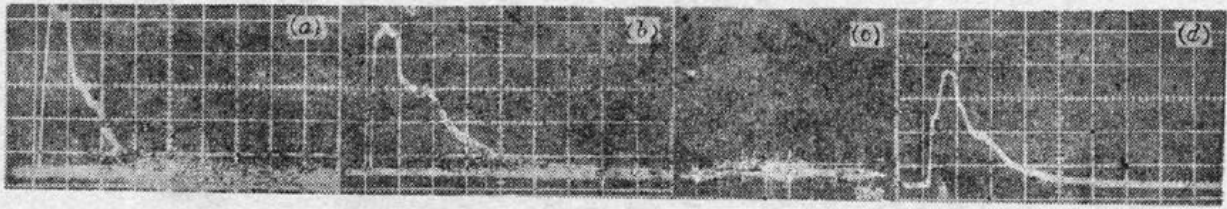


Fig. 5 Ion signals with different L_f

(FC2, Si target, $y: 10 \times 200 \text{ mV/div}$, $x: 500 \text{ ns/div}$)

(a) $L_f=5 \text{ mm}$, $v_i=4.2 \times 10^7 \text{ cm/s}$, $n_i=1$ (arb. unit);

(b) $L_f=20 \text{ mm}$, $v_i=3.0 \times 10^7 \text{ cm/s}$, $n_i=1.2$

是因为被剥离的粒子的多少取决于加热区的大小和激光能量的多少，而离子的漂移能量则主要决定于用来加热的激光的功率密度。

激光等离子体发射的离子并不是各向同性的。激光线状聚焦打靶时发射的离子的各向异性则更严重^[6]。图6中分别是FC1、FC2收集到的离子波形图，不难看出激光以线状形式聚焦打靶时，朝着由激光焦线与靶法线构成的平面(图2的 $x-y$ 平面)方向发射的离子(由FC1收集)远小于通过靶的法线而垂直于焦线的平面(图2的 $x-z$ 平面)方向发射的离子(由FC2收集)。也有例外的情况。例如当把激光焦线长度继续增大到 $L_f \sim 2 \text{ cm}$ ，或者把靶的外形稍微改变一下，做成冷阱的形状(见图3)，就可以在激光焦线与靶法线构成的平面上收集到较多的离子。

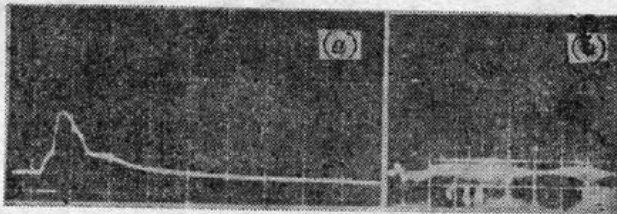


Fig. 6 Ion waveforms collected in different directions

(a) collection in $x-z$ plane;

(b) collection in $x-y$ plane

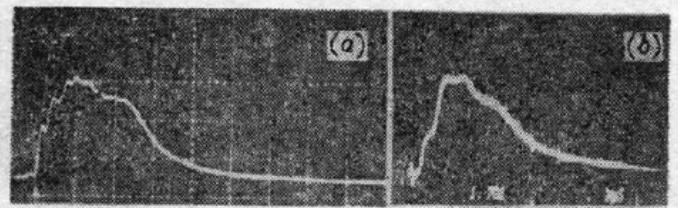


Fig. 7 Ion signals ($L_f=2 \text{ cm}$, Al target, (a) FC2, (b) FC1

当 $L_f=2 \text{ cm}$ 时(图7) $P_i \lesssim 1 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ ，在这样低的功率水平下，由激光等离子体所生的自发磁场的箍缩效应很小。等离子体的横向热传导造成的等离子体喷流，加上激光通过等离子体喷流时还会发生散射。这些可能的原因都会使FC1收集到更多的离子。这些离子大部分并非直接由激光激励而出射而是由于喷流而成，所以其能量是小的，漂移速度亦慢。

打冷阱靶时被加热的激光等离子体向外膨胀，电子或离子将与阱壁相碰而引起阱壁的次级发射。次级发射的离子包括那些被阱壁半弹性反射而按镜像反射的原激光等离子体的部分离子以及真正由原电子或离子与阱壁原子交换能量后蒸发出的阱壁原子所电离的次级离子。由于阱壁的粗糙不平，由于激光等离子体中电子的漂移速度比离子的高得多，它们的能量损失更快并且还在阱壁附近空间形成负电势，使电子向冷壁的运动受到静电的限制。但这静电场却又加速原离子向阱壁的运动以及二次离子飞出。因此，朝着FC1方向运动的慢离子便增多比较图8的(b)、(d)及图9的(d)、(b)很清楚了。

接收器FC2放置在离子发射较多的 $x-z$ 平面，与 x 轴成 $\sim 26^\circ$ 夹角。打Au阱Au靶

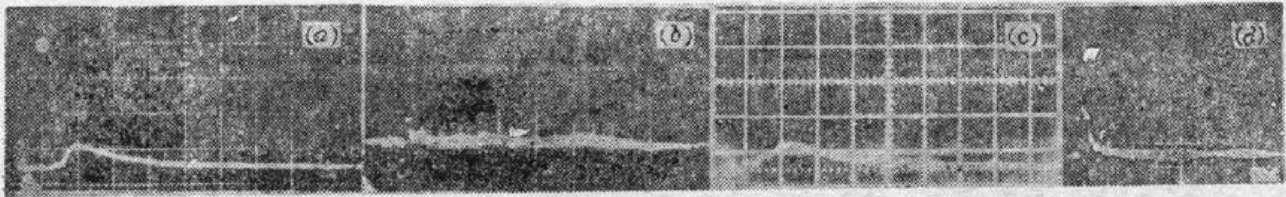


Fig. 8 Ion waveforms with or without cold pit for Au targets ($L_f=4\text{ nm}$)

(a) Without pit, FC2, $y:10\times500\text{ mV/div}$, $x:500\text{ ns/div}$; (b) Without pit, FC1, $y:200\text{ mV/div}$, $x:200\text{ ns/div}$; (c) Au pit, FC2, $y:10\times200\text{ mV/div}$, $x:500\text{ ns/div}$; (d) Au pit, FC1, $y:200\text{ mV/div}$, $x:500\text{ ns/div}$

时,接收到的离子波形(图 8(c))与平面 Au 靶时的相仿(图 8(a)),这是因为此时的冷阱在 $x-z$ 截面的张角 $\sim 53^\circ$,收集器落在其张角之内,所以从几何角度考虑:冷阱壁不会影响朝向接收器方向漂移的离子的运动,故其波形变化不大。当冷阱张角 $\sim 21^\circ$ (Al 靶 Mg 阱)时,FC2 接收到的离子波形明显地“窄”即粒子数减少很多(对比图 9 的(a),(c))。究其原因,主要是由于朝上飞行的离子受阱上壁所挡,不能直接到达 FC2 之故。但是经过上下阱壁的若干次半弹性反射仍可有数量相当多的离子沿着 FC2 的接收方向飞去。所以,此时由 FC2 接收的离子比平面靶发射的稍慢(然而,由于阱壁间距远比离子到达收集器的飞行距离短,在接收显示器上反映不出来。)且数量也适当地少。

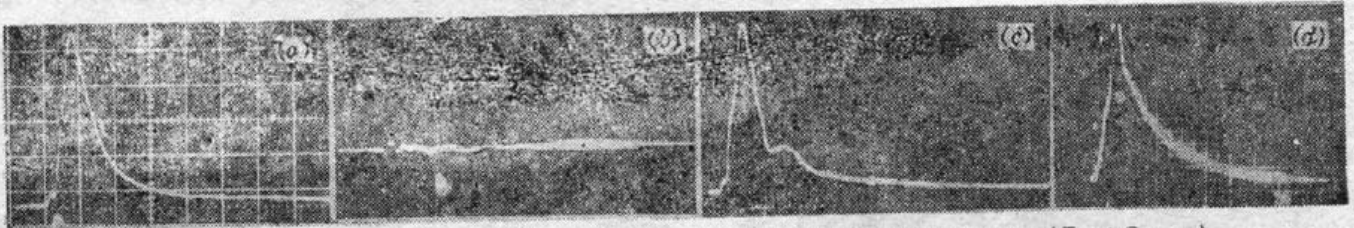


Fig. 9 Ion waveforms with or without cold pit for Al targets ($L_f=2\text{ mm}$)

(a) Without pit, FC2, $y:10\times200\text{ mV/div}$, $x:500\text{ ns/div}$;
 (b) Without pit, FC2, $y:500\text{ mV/div}$, $x:200\text{ ns/div}$;
 (c) Mg pit, FC2, $y:10\times200\text{ mV/div}$, $x:500\text{ ns/div}$;
 (d) Mg pit, FC1, $y:200\text{ mV/div}$, $x:2\mu\text{s/div}$

作者感谢王黎君及六路实验室全体工作人员在实验中给予的大力支持。

参 考 文 献

- 1 A. Caruso, R. Gratton, *Plasma Phys.*, **10**(9), 867(1968)
- 2 C. E. Max, C. F. Mokee, *Phys. Rev. Lett.*, **45**(1), 28(1980)
- 3 J. Grun *et al.*, *Phys. Fluids*, **26**(2), 588(1983)
- 4 徐至展 *et al.*, 科学通报, **27**(2), 274(1982)
- 5 林尊琪 *et al.*, 光学学报, **5**(1), 24(1985)
- 6 张燕珍 *et al.*, 中国激光, **16**(5), 315(1989)