

# 脉冲激光轰击固体表面产生的等离子体的实验研究

焦树良 陈殊殊 范永昌 李再光

(华中理工大学激光技术国家实验室, 430074)

**提要:** 本文对 Nd:YAG 脉冲激光在大气中轰击块状 YBaCuO 超导材料产生的等离子体进行了研究。首先,用光纤采集等离子体的辐射,由一台 OSA 接收并识别。然后利用光纤及单色仪跟踪发光粒子,得到了粒子的发光强度随垂直靶面距离的变化。测得了各种发光粒子在不同位置处的发光强度-飞行时间波形,并对实验结果进行了分析。

**关键词:** 激光诱导的等离子体, 超导体

## Experimental study of the plasma ejected by pulsed laser of solid surface

Jiao Suliang, Chen Shushu, Fan Yongchang, Li Zai Guang

(National Lab. of Laser Tech., Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

**Abstract:** Here, we studied the plasma ejected by pulsed laser ablation of YBaCuO superconductor pellet. Optical fibre is used to sample the plasma spectra, which are detected and recognized with an OSA system. Then, we use optical fibre and a monochromator to trace the recognized particles. The time-of-flight spectra at various distance from the target surface was measured and the variation of spectrum intensity versus the distance obtained. Analyses of the results are presented.

**Key words:** laser-induced plasma, superconductor

### 一、引言

近年来利用激光溅射法制备高温超导薄膜已成为一个越来越受人们重视的研究领域。对高  $T_c$  超导薄膜的研究又激起了人们对激光轰击固体表面产生等离子体的过程和机理研究的兴趣<sup>[1~3]</sup>。Osamu Eryu<sup>[4]</sup> 和 Hiroshi Fukumura<sup>[5]</sup> 等人对激光作用下等离子体的形成过程进行了细致的研究,发现激光轰击固体表面产生等离子体的过程不能用简单的光热效应来解释。他们的实验结果表明等离子体的产生是被溅射出的物质与激光相互作用的结果,并不是由激光的溅射过程形成的。

在前一阶段的实验中我们首先采用了光纤作为采集等离子体辐射及测量粒子速度的装

置。最近我们对实验装置进行了改进,并对 Nd:YAG 脉冲激光轰击块状 YBaCuO 超导材料产生的等离子体进行了研究。首先用一台 OSA 接收由光纤传过来的光谱并识别出各种粒子,然后利用光纤通过单色仪对各种发光粒子进行跟踪,从而测得了粒子的发光强度随距离靶面距离的变化。在距靶面不同距离处测得了发光强度-飞行时间波形,得到了发光粒子在距靶面一定距离内的垂直靶面方向的平均速度。为了研究气压对激光溅射过程及粒子飞行速度的影响,本实验是在大气中进行的。

## 二、实验装置

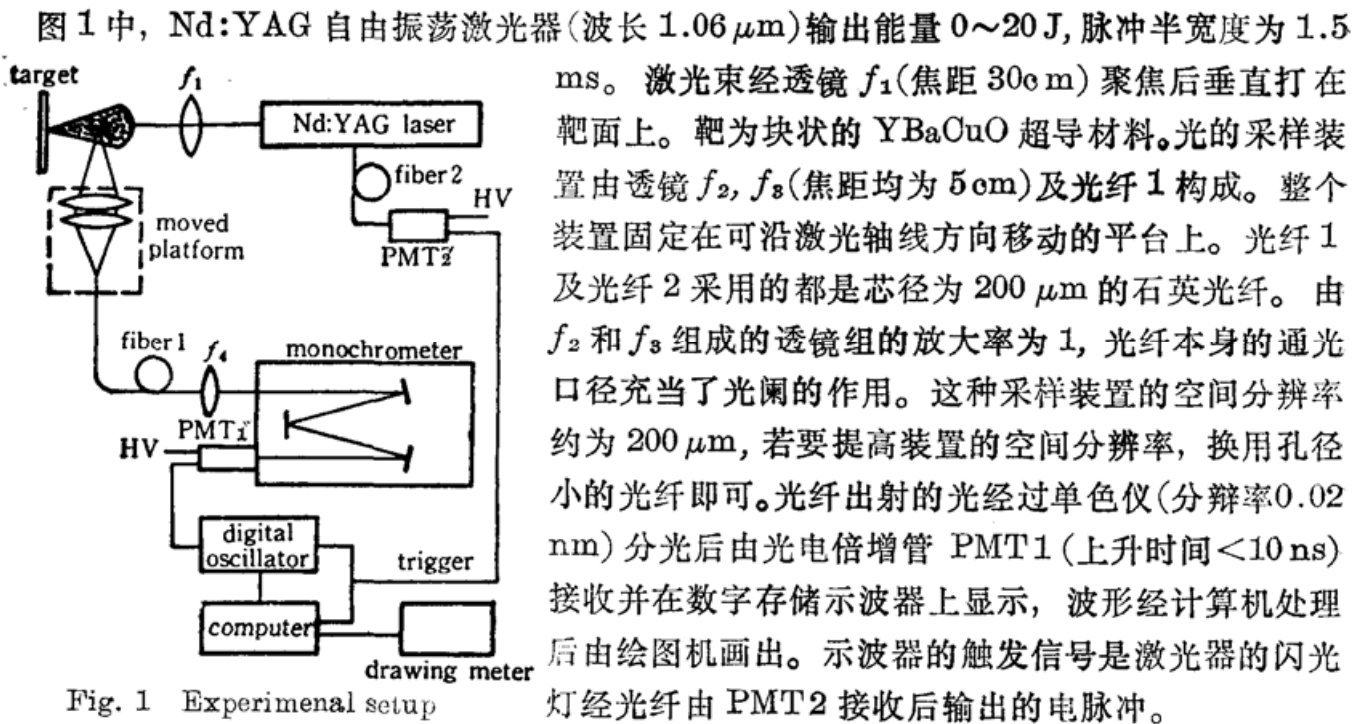


Fig. 1 Experimental setup

图 1 中, Nd:YAG 自由振荡激光器(波长  $1.06 \mu\text{m}$ )输出能量  $0 \sim 20 \text{ J}$ , 脉冲半宽度为  $1.5 \text{ ms}$ 。激光束经透镜  $f_1$ (焦距  $30 \text{ cm}$ ) 聚焦后垂直打在靶面上。靶为块状的 YBaCuO 超导材料。光的采样装置由透镜  $f_2, f_3$ (焦距均为  $5 \text{ cm}$ ) 及光纤 1 构成。整个装置固定在可沿激光轴线方向移动的平台。光纤 1 及光纤 2 采用的都是芯径为  $200 \mu\text{m}$  的石英光纤。由  $f_2$  和  $f_3$  组成的透镜组的放大率为 1, 光纤本身的通光口径充当了光阑的作用。这种采样装置的空间分辨率约为  $200 \mu\text{m}$ , 若要提高装置的空间分辨率, 换用孔径小的光纤即可。光纤出射的光经过单色仪(分辨率  $0.02 \text{ nm}$ ) 分光后由光电倍增管 PMT1 (上升时间  $< 10 \text{ ns}$ ) 接收并在数字存储示波器上显示, 波形经计算机处理后由绘图机画出。示波器的触发信号是激光器的闪光灯经光纤由 PMT2 接收后输出的电脉冲。

实验中激光束经  $f_1$  聚焦后作用在靶上的能量密度为  $79.6 \text{ J/cm}^2$ 。激光器采用单触发, 且每个脉冲后都调整光在靶上的作用点, 使得每一光脉冲与靶的作用条件尽量相同。计算机最后输出的波形为 10 次脉冲的平均。

## 三、实验结果及分析

我们首先用 OSA WP-4 接收 YBaCuO 等离子体光谱, 探头为 500 通道的硅靶, 系统的光谱分辨率在最佳状态下为  $0.2 \text{ nm}$ 。用 Ne 灯作标准光源对所获得的谱线进行波长定标。可识别出的谱线包括 YI, YII, BaI 及 BaII 的线状谱, 还观察到一条 OI 的谱线 ( $615.99 \text{ nm}$ ), 如表 1 所示(谱线的识别借助于 [1] 和 [6], 波长的误差主要来源于使用的探头的线性度不是很好)。在观察的波长范围内 ( $540 \sim 736 \text{ nm}$ ) 没有观察到 CuI 及 CuII 的谱线。所有谱线都叠加在很强的连续谱的背景上。连续谱是由电子的自由-自由的跃迁及自由-束缚态的跃迁产生的。氧化物分子的带状谱对背景也有部分贡献。由此证明等离子体内的电子密度是相当高的, 即等离子体的离化程度很高。我们接收到的谱线中绝大多数为原子的谱线, 离子的谱线很少, 且相对于原子谱而言, 离子的谱线比较弱。

将光的采样装置沿激光的轴向移动,得到了如图 2 所示的在各点处的发光粒子的发光强度-飞行时间的波形。图 2 表明,粒子的光谱强度随距靶面的距离变化而变化,强度最大的位置并不是在靶的表面,而是在约距靶面 10mm 处。这一实验结果与 Osamu Eryu<sup>[4]</sup> 等人的实验结果相吻合。[4] 中用的是 KrF 准分子激光,用条纹相机接收的结果显示当激光的能量密度大到  $3.6 \text{ J/cm}^2$  以上时,辐射最强的位置离开了靶面并在时间上有很大的延时。我们认为接收到的光谱在某一波长处的强度值是两部分之和,即原子或离子的谱线及连续谱在该波长处的强度两者之和。在某时刻光谱强度达最大值,说明此时:(1) 电子密度达最大值;(2) 激发态原子或离子的密度达最大值。

Table 1

|       |           |        |        |        |
|-------|-----------|--------|--------|--------|
| BaI:  | 542.32 nm | 552.35 | 577.79 | 580.46 |
|       | 582.43    | 597.44 | 601.83 | 633.98 |
|       | 644.91    | 648.44 | 649.77 | 652.56 |
|       | 659.80    | 667.30 | 686.84 | 705.90 |
|       | 711.46    | 723.09 | 727.94 |        |
| BaII: | 585.66    | 614.00 |        |        |
| YI:   | 564.59    | 567.54 | 570.05 | 573.15 |
|       | 574.84    | 577.42 | 594.63 | 600.37 |
|       | 619.62    | 621.98 | 666.07 | 669.16 |
|       | 679.20    |        |        |        |
| YII:  | 695.10    |        |        |        |
| OI:   | 615.99    |        |        |        |

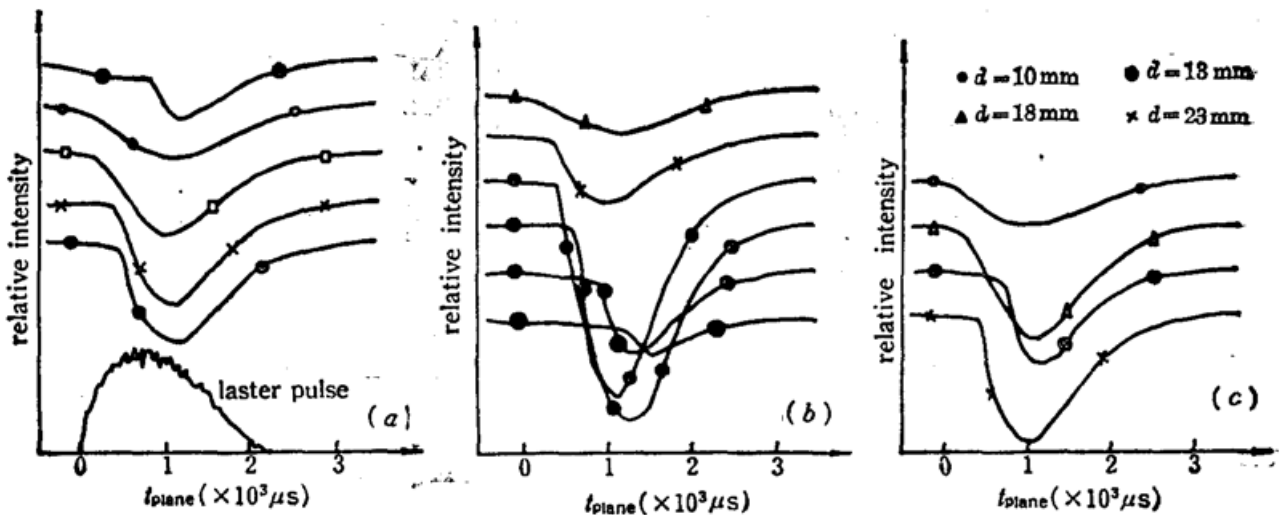


Fig. 2 Spectrum intensity versus the time of flight

(a) BaI(705.9 nm); (b) YI(600.37 nm).  $d$ —distance from the target.  
 ○— $d=0$ ; △— $d=2$  mm; □— $d=5$  mm; ×— $d=8$  mm. All are negative signals. (c) BaII(614.0 nm)

光谱强度最大值不在靶面的位置说明光的辐射是由等离子体与激光的作用产生的,等离子体在离开靶面方向运动的过程中与激光相作用,即等离子体吸收激光的能量使粒子的动能增加,从而使得粒子间的碰撞加剧。碰撞的结果是一方面使等离子体的离化程度提高;另一方面是造成原子或离子激发。同时,电子密度的增加也使激发的几率增大。另外,电子密度与电子能量的增加提高了连续谱的强度,使得原子或离子吸收连续谱的光子而激发的几率增大。这

一系列的过程都使得接收到的谱线强度增强。由于等离子体是在离开靶面方向的运动过程中与激光相作用的,因此使得谱线强度的最大值不在靶面位置。

在图 2 中测量激光脉冲的波形时示波器的触发形式与图 1 中所示的完全相同。可以看到靶面处有光出现的时刻与激光脉冲的起始时刻基本相同。取靶面处有光出现的时刻作为时间零点。在图 2 中 13 mm 前各位置处光谱强度的极大值出现的时刻几乎相同,且几乎在同一时刻衰减为零。这说明等离子体的长度约为 23 mm,如图 2 所示。由于激光脉宽比较宽,且激光的前部分产生的等离子体密度没有大到将后部分脉冲全吸收的程度,使得后部分激光可继续从靶上溅射出物质来。很明显,各处发光最强时的光强是由不同的粒子贡献的,即峰值间隔不代表粒子的实际运行时间。

图 2 中,为便于比较将各位置处的波形放在同一张图上。各波形的强度零点位置就是其各自的水平扫描线。激光脉冲的波形的强度在这里与各波形的强度值并无比例关系,仅在时间上作为参考。

由于激光的脉宽比较宽,即激光对靶的作用时间较长,因此各粒子离开靶面的时间就不能完全确定,这样各位置处的波形不能代表粒子的速度分布。但是对各位置处的波形的起始点的光强作贡献的发光粒子离开靶面的时间是可以确定的,即是在时间为零的时刻离开靶面的。这样各位置处的波形的起始点与时间零点之间的时间间隔就代表这些粒子由靶面运动到该位置所花的时间,这样就可以算出这些粒子在从靶面到该位置的距离内的垂直靶面方向的平均速度。以 BaI 为例,可得到在  $d=0$  到  $d=5$  mm 间粒子的垂直靶面方向的平均速度为  $2.5 \times 10^3$  cm/s,  $d=5$  mm 到  $d=8$  mm 间为  $2.0 \times 10^3$  cm/s,  $d=8$  mm 到  $d=10$  mm 间为  $2.0 \times 10^3$  cm/s,  $d=10$  mm 到  $d=13$  mm 间为  $0.86 \times 10^3$  cm/s。这比[4]中在真空中的实验结果低 3 个数量级。

因激光脉宽比较宽,上面得到的粒子在垂直靶面方向的一段距离内的平均速度还不能认为是粒子的最可几速度。这在短激光脉冲的实验中是可以克服的。测量装置本身的误差相对于由于激光脉宽而引起的误差要小得多。本实验装置的测量精度与[7]中的测量精度相当。

### 参 考 文 献

- 1 Q. Y. Ying, D. T. Shan *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **53**, (18), 1762~1764(1988)
- 2 K. M. Yoo, R. R. Alfano *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**(13), 1278~1279(1989)
- 3 T. Venkatesan, X. D. Wu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **53**(15), 1431~1433(1988)
- 4 O. Eryu, K. Murakami *et al.*, *Appl. Phys., Lett.*, **54**(26), 2716~2718(1989)
- 5 H. Fukumura, H. Nakaminami *et al.*, *Jap. J. Appl. Phys.*, **28**(3), 412(1989)
- 6 光谱线波长表,中国工业出版社,1971
- 7 J. P. Zheng, Z. Q. Huang *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **54**(3), 280~282(1989)