

文章编号: 1000-0364(2001)02-0159-04

激光诱导 Al 等离子体在背景气体中的流体现象^{*}张树东^{1,2}, 张为俊²

(1. 西北师范大学物理系激光实验室, 兰州 730070; 2. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 1 室, 合肥 230031)

摘要: 调 Q-YAG 脉冲激光(波长 1.06 μm , 脉宽 10 ns, 能量为 250 mJ/pulse)烧蚀 Al 靶, 用短焦距照相系统和光学多道分析仪(OMA)记录了等离子体在氩气背景气体及不同压强下所呈现的流体现象及其等离子体辐射的空间分辨光谱。实验发现, 当背景气压为 400 Pa 以下时, 在靶面上存在一个明亮的发光球体, 球体直径远大于激光烧蚀斑的大小, 此球体向四周辐射等离子体光谱, 只是在垂直靶面的方向辐射相对较强。在气压约为 400 Pa, 等离子体辐射才以较为明显的羽状体形态向前喷散, 且随气压增高, 喷散的立体角变小。随着背景气压的继续升高, 等离子体羽被压缩, 成为一个明亮的发光小羽状体, 当气压达 20~30 kPa, 发光羽状体开始出现分解的迹象, 在羽状体前端形成一个光球。气压继续升高, 等离子体羽完全变成一串发光球。离开靶面越远, 发光球的半径越大。用光学多道分析系统分析这些发光球的光谱特征, 发现在靶面附近主要是 Al 等离子体的谱线, 而较远的发光球, 其主要谱线则来自背景气体。在气压为 20 kPa 左右, 等离子体羽呈现烧蚀点为明亮的白色亮点, 而羽端为鲜艳绿色(氩的 514 nm)的彩色羽。

关键词: 激光诱导 Al 等离子体; 流体现象; 环境气体影响; 空分辨光谱

中图分类号: O432.1⁺2, O53 **文献标识码:** A

1 引言

激光烧蚀固体靶产生的等离子体与背景气体的相互作用对理解团簇形成的动力学过程有特别重要的作用, 因而受到人们的重视^[1-3]。在应用激光制备薄膜的过程中, 有时需要充以某种气体, 因而该种气体对激光诱导产生的等离子体(Laser-produced Plasmas, LPP)的空间分布的影响就需要加以诊断。等离子体与环境气体的相互作用的动力学过程与 LPP 在真空中的膨胀相比, 要复杂得多。它涉及等离子体的减速、衰减及能量交换、激波(shock waves)的形成等, 因而很难用某种模型来全面描述这一过程^[4]。在低气压下, 有人用 Monte Carlo 模拟等离子体的传播^[5]; 在中等和高气压下, 用爆破波模型(blast wave model)来描述等离子体在膨胀初期传播的距离^[6]。本文报道用光谱照相法, 获得在不同环境气压下 LPP 的流体图象和发射光谱在沿垂直靶面方向上的空间分布, 并将流体图象与超声速气流

产生的激波图象进行了类比。

2 实验

实验装置见 Fig. 1。由调 Q Nd:YAG 脉冲激光产生的激光(波长 1.06 μm , 脉冲宽度 10 ns, 能量 250 mJ/pulse), 经透镜聚焦垂直打在真空室中的 Al 靶上。为防止由于靶面烧蚀对谱信号的影响, 靶通过步进电机转动。谱信号强度变化表明, 转动时靶面的抖动可忽略。在靶面法线的垂直方向, 通过真空室的一个窗口, 用短焦距相机拍摄激光诱导产生的 Al 等离子体流动图象。同时, 通过与相机相对的另一窗口测量光谱。首先将发光点经透镜成像在直径为 3mm 的石英光纤头上, 光纤前加一宽度为 0.3 mm 的光阑, 光纤头和光阑同装在一个二维微调架上, 用于检测离靶面不同距离处的谱信号。谱信号经光纤传输, 再经透镜聚焦于光栅单色仪(2400/mm 的光栅)的入射狭缝, 缝宽 50 μm 。在光栅的出射口安装的是一台由 1024 个光电二极管阵列

* 收稿日期: 2000-12-06

基金项目: 此工作得到国家自然科学基金(No. 19874051)和本实验室专项经费的资助

作者简介: 张树东(1966-), 男, 甘肃白银市人, 西北师范大学物理系讲师, 硕士, 主要从事原子与分子物理实验教学与研究。

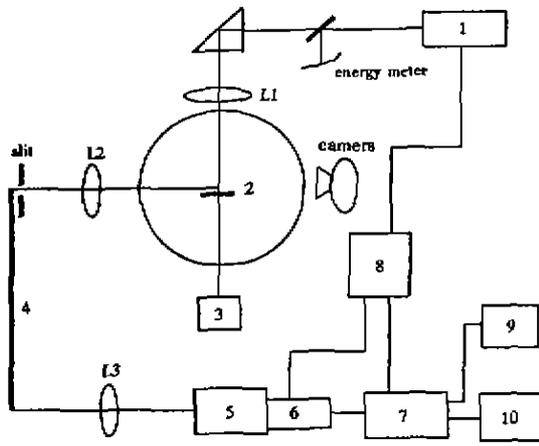


Fig. 1 Schematic diagram of experiment

1. laser; 2. target; 3. step motor; 4. optical fibre; 5. monochromometer
6. detector; 7. OMA analyzer; 8. pulse generator; 9. computer; 10. oscilloscope

组成的光学多道探头。谱信号经探头送到光学多道分析仪(OMA)。真空室所充气体的压强,在 400 Pa 以下,由复合真空计读出,高于 1 000 Pa 由一精密真空压力表读出。

3 结果与讨论

本实验在 Ar 背景气体下,1 Pa~0.1 MPa 的范围内观测了激光烧蚀固体 Al 靶产生的等离子体的流动现象。Fig. 2 是在单个激光脉冲下,相机快门处于手动 B 门,周围环境处于暗室条件下拍摄得到的等离子体流动图象。由于等离子体持续时间很短^[7],故无法采用普通的相机达到时间分辨的图象。如果采用门控二维 CCD 阵列摄像,便能记录单个脉冲作用下整个流动过程。从低真空(1 Pa)开始,通过一针阀向靶室充入气体,得到在不同背景气压下等离子体流动图象。Fig. 2 给出了部分具有代表性的不同气压下的图象。图象右上方的半明半暗的圆是靶室正对相机的另一窗口在等离子体光照下反射而形成的像。流动图象的尺寸是根据同时摄得的靶的尺寸大小来测算的,靶模型及相应尺寸如图 2 下方所示。实验发现,在 400 Pa 以下,靶面上都存在一个明亮的发光小球,如在 30 Pa 时,小球的直径为 3.0 mm,且小球清晰可见。随着气压的增大,发光小球被较强烈的发光辐射所笼罩,小球较为模糊。这一结果与以前的实验是一致的,即在 Ar 背景气体下产生的等离子体强度是同气压下其它背景气体下产生的等离子体强度的若干倍^[8]。当气压增大到 20 kPa~30 kPa,发光小球变为明亮发光的羽状体,且羽状体的立体角随气压的增大而减小。同时,在羽状体羽端有分离出发光球体的趋势。在气压为 50 kPa 左右,羽状体完全变为靶面上为半圆

或大半圆的发光球体,靶面前方为一个或若干个发光球,且垂直靶面排列。这些光球直径明显大于靶面上激光烧蚀斑的直径,且随着与靶面距离的增大,光球的直径也越大。如在气压为 70 kPa,光球的直径达 8.8 mm,气压越大,光球的数目也趋于越多。

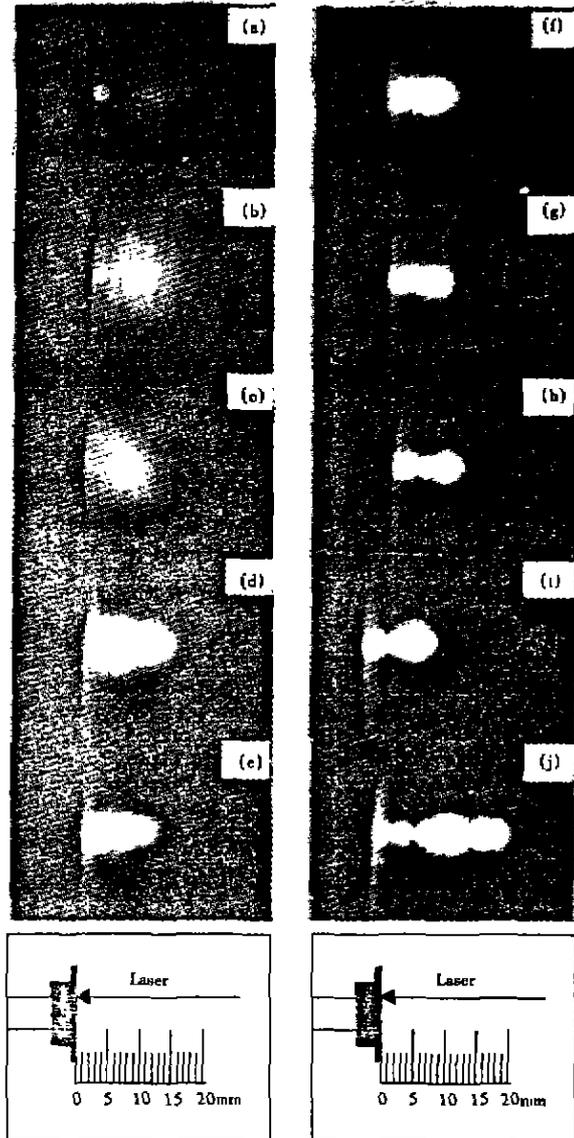


Fig. 2 Fluid photographs of laser-ablated Aluminum plane target in Ar back ground gas at different pressures
(a)30Pa; (b)100Pa; (c)200Pa; (d)20kPa; (e)30kPa;
(f)40kPa; (g)50kPa; (h)60kPa; (i)70kPa; (j)80kPa

在较高背景气压下产生的一系列发光球,十分类似于流体力学中用纹影法拍摄的在超声速喷管外超声速气流产生的激波图象。有关等离子体产生激波等流体动力学现象在实验和理论上都有描述^[9],但这些描述主要集中在激光与靶的相互作用研究上,而对冕区的等离子体在一定气压环境下的流动特征研究的相对较少。

以前的实验结果表明^[10],在高真空条件下(10^{-3} Pa)激光烧蚀平面靶,用读数显微镜测得烧蚀

斑的直径为 150 微米左右,在激光能量为单个脉冲几十 mJ 到几百 mJ 产生的等离子体密度在($10^{16} \sim 10^{18}/\text{cm}^2$)量级,温度 10 000 K~25 000 K,等离子体的速度高达 10^7 m/s ^[9]。若取 $T=20\ 000 \text{ K}$,在冕区,则在该温度下等离子体中的声速为 $3 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。显然,等离子体是以超声速流动的。将等离子体的流动与超声速气流的流动特征进行类比,超声速喷管外的流体,当环境气压大于喷口处的流体气压,就可产生激波,流体通过激波后,是通过一系列的膨胀波和等熵压缩波,流体密度、温度及压强等参数随着通过这些不同的波而变化。但等离子体流毕竟不同于超声速气体流,在本文的实验中,不论是在靶面,还是离开靶面的发光物质,均呈现出较为标准的球形,且这些球形体的直径远大于激光烧蚀斑的大小。

从等离子体的密度和背景气体的密度比较来看,在气压为 20 kPa~30 kPa,在等离子体的羽端均开始有光球分离的迹象,从理想气体的压强公式 $P = nkT$,可知此时背景气体的密度为 $10^{18}/\text{cm}^2$,这恰好与 Al 等离子体在真空条件下测得的密度相当。可见,等离子体由羽状体变为发光球体所对应的这一特定背景气压值是与等离子体的密度或压强密切相关的。

在用相机拍摄等离子体流动图象的同时,通过相机对面的另一窗口,用 OMA 测量空间分辨的光谱,见 Fig. 3。在靶面附近,主要是 Al 的谱线和较强的连续背景辐射。在离靶较远,连续背景辐射几乎完全消失,只剩下 Al 的谱线和背景气体的谱线,而且 Al 的谱线中,主要是 Al 原子的谱线,而离子谱线几乎完全消失,这不同于高真空下等离子体光谱的空间分布^[10]。显然,这是由背景气体的影响造成

的。在 Ar 背景下,观测到大量的 Ar 的谱线, Fig. 3 仅给出了在 430 nm 这一波段的结果,经标定,谱线的数值在表 1 给出。在这些光谱中,大部分为 Ar II 的谱线。用相机摄谱时,还观测到在气压为 20 kPa,等离子体羽呈烧蚀点为明亮的白色亮点,而羽端为鲜艳绿色(氩的 514 nm)的彩色羽。

Table 1 The species and wavelengths of spectra lines marked at Fig. 3

No.	species	wavelength(nm)
1	Al I	394.4
2	Al I	396.1
3	Ar II	401.4
4	Ar II	404.3
5	Ar II	407.2
6	Ar II	410.4
7	Ar I	416.4
8	Ar I	420.1
9		422.8*
10	Ar II	426.6
11	Ar I	433.3
12	Ar II	434.8
13	Ar II	437.1
14	Ar II	437.9
15		440.2*
16	Ar II	442.6
17	Ar II	448.1
18	Ar II	454.5
19	Ar I	459.6
20	Ar II	461.0
21	Ar II	466.4
22	Ar II	473.6
23	Ar I	474.1

4 结束语

环境气体及其压强对激光诱导等离子体的空间分布及其流动图象有着显著的影响,等离子体并不只是以羽状体喷射,而是表现出许多特有的流动特征,这些特征除了具有超声速流体所表现的激波现象外,还涉及等离子体与背景气体相互作用等复杂过程。

参考文献

- [1] Smalley R E. Self-Assembly of the fullerenes[J]. Acc. Chem. Res., 1990, 25(3):98-105.
- [2] Harilal S S, Issac R C. Optical emission studies of C₂ species in laser-produced plasma from carbon[J]. J. Phys. D, 1997, 30:1 703-1 709.
- [3] Harilal S S, Issac R C. Emission characteristics and

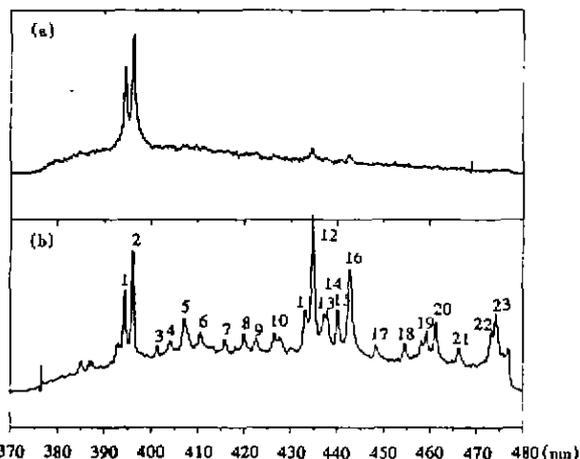


Fig. 3 Al plasma spectra in 430nm region, background gas is Ar at pressure of 43kPa, distance from target is (a) 0.5mm, (b) 6.5mm. the wavelength marked with numbers in (b) can be seen at Table 1

- dynamics of C_2 from laser produced graphite plasma[J]. *J. Appl. Phys.*, 1997,81(8):3 637~3 643.
- [4] Geohagan D B. Physics and diagnostics of laser ablation plume propagation for high-Tc superconductor thin growth [J]. *Thin solid Films*, 1992, 220:138~145.
- [5] Kools J C S. Monte Carlo simulations of the transport of laser-ablated atoms in a diluted gas[J]. *J Appl. Phys.*, 1993,74,6 401~6 406.
- [6] Geohagan D B. Fast intensified-CCD photography of YBCO laser ablation in vacuum and ambient oxygen[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1992,60:2 732~2 734.
- [7] 张树东,冯旺军等. 激光诱导 Al 等离子体时间分辨光谱[J]. *应用激光*,2000,20(4):155~162.
- [8] S. S. Harilal, C. V. Bindhu. Influence of ambient gas on the temperature and density of laser produced carbon plasma [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998,72(2):167~169.
- [9] M. N. Rosenbluth and R. Z. Sagdeev. *Handbook of plasma physics*, Vol. 3; *Physics of laser plasma* [M]. 1991, Elsevier Science Publishers V. V.
- [10] 张树东,陈冠英等. Al 激光诱导等离子体光谱观测 [J]. *原子与分子物理学报*,1999,16(4):457~461.

Fluid phenomena of laser-induced Al plasma in ambient gas*

ZHANG Shu-dong^{1,2}, ZHANG Wei-jun²

(1. Laser Laboratory, Department of Physics, Northwest Normal University, Lanzhou, 730070; 2. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academic Sinica, Hefei 230031)

Abstract: Q-switch Nd:YAG laser (wavelength 1.06 μm , pulse width 10 ns, energy 250 mJ/pulse) is used to ablate plane solid Al target in different ambient gas pressures. Using short focal length camera and optical-multichannel-analysis system(OMA), the fluid phenomena and spatial resolved emission spectra of laser-induced Al plasma have been recorded in Ar ambient gas. The experiment shows, when the background gas pressure is less than 400 Pa, a bright emission small sphere exists before the target surface, and the diameter of the sphere is much larger than the size of the laser-ablated point. The sphere irradiates to all direction, but there is a relative strong direction along the target surface vertical orientation. When the pressure is about 400 Pa, the plasma appears as a plume, and the solid degree of the plume becomes small. When the pressure increased. As the pressure increases to 20~30 kPa, a emission sphere is separated from the frontier of the plume. By the pressure increases continually, the plume becomes to a series of emission spheres completely. The distance from target longer, the diameter of the spheres larger. Analyzing the components of the spectra of the emission spheres, the Al spectra and continuum spectra are the major near the target surface, but at the far area, there are only Al I and ambient gases spectra. In particular, at 20 kPa pressure of Ar, the plasma plume became a color plume as the ablated point is shine and the plume frontier is green(514 nm Ar II)

Keywords: Laser-produced Al plasma spectra; Fluid phenomena; Effect of ambient gas; Spatial resolved spectra

* Project supported by the Natural Science Foundation of China (No. 9874051) and the special expenditure of the laboratory.