

气压对激光烧蚀 Al 等离子体中粒子速度的影响*

张树东^{1,2}, 陈冠英¹, 刘亚楠¹, 董晨钟¹

(1 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要: 在背景气压为 $8 \times 10^{-3} - 100$ Pa 范围内, 通过测量脉冲激光烧蚀平面 Al 靶产生的等离子体辐射谱的时间分辨特征, 比较空间不同点辐射的飞行时间轮廓的相对延迟, 从而得到辐射粒子速度及其空间分布. 利用绝热膨胀的理论和激波模型分别对背景气压小于 0.6 Pa 的结果和 5 Pa 时的结果作了分析, 并得出激波的波面基本上为柱对称.

关键词: 激光等离子体; 平面铝靶; 粒子速度分布; 激波模型; 背景气压

中图分类号: O562.3 **文献标识码:** A

1 引言

脉冲激光沉积(PLD)在制备各种薄膜材料方面被证明是十分有效的, 因为制备条件可方便地通过改变激光参数和环境条件而实现^[1]. 然而, 在激光烧蚀材料中产生等离子体, 存在激光与等离子体相互作用、团簇的形成和解离、气相的化学反应、激波的形成及其他波动等复杂现象. 因而, 尽管有大量的理论和实验研究, 但激光与材料的相互作用、等离子体的演化过程、气相动力学以及将材料沉积于衬底的最佳条件尚未完全清楚^[2-4]. 等离子体辐射的测量是对等离子体诊断的重要方法之一. 因为这种测量不会影响到等离子体的原始状态. 除了传统的测量谱线的 Stark 加宽和位移确定等离子体密度和比较同一电离级的多条谱线的相对强度测定电子温度外, 通过测量辐射的时间分辨和空间分辨特征, 可为等离子体参数的测定提供大量有用的信息. 本文利用激光烧蚀 Al 靶产生的等离子体中 Al II 的共振辐射跃迁(波长 396.1 nm), 在不同背景气压下, 测量在靶前方不同点处该辐射的时间轮廓, 比较不同辐射点时间轮廓的相对延迟, 从而测定等离子体中 Al 原子速度的空间分布, 比较背景气压对速度及其速度分布的影响.

2 实验

实验装置和文献[5]介绍的相同. Q 开关 YAG

激光器的基频输出(波长 1.06 μm , 脉冲的半高全宽 10 ns)经过焦距为 50 cm 的透镜聚焦后辐照在 Al 靶上. 靶及靶前方不同点处的等离子体辐射通过石英透镜成像于光纤头上, 光纤前加有狭缝宽度为 0.2 mm 的光阑, 光纤头和光阑安装在一个可横向移动的支架上, 以便检测不同点的辐射. 在双光栅单色仪的两个出口处分别装有光学多道分析仪和光电倍增管. 光电倍增管信号的飞行时间轮廓由一高速存储示波器(PM3266, Phillips, 最高记录速度 1 000 DIV/ μs)记录. 通过比较靶前方不同点的辐射信号的起始时间, 可获得它们之间的相对延迟, 从而测定空间不同点处的速度. 实验中选了 5 个不同的气压条件, 即 0.008, 0.08, 0.6, 5 和 100 Pa, 进行测量.

3 实验结果与讨论

在 350—650 nm 范围内, 用光学多道分析仪(OMA)仅观测到 Al I, Al II 和 Al III 的发射谱线, 其中 Al I 的共振谱线 394.4 nm 和 396.1 nm ($3p^2 P - 4s^2 S$) 很强. 调节单色仪的扫描结构, 使 396.1 nm 谱线恰好处在光电倍增管所在的出口狭缝. 改变光纤头支架位置, 可得到空间不同点处辐射的时间轮廓, 比较这些轮廓线的起始位置, 即得到时间

收稿日期: 2002-03-20; 修改日期: 2002-05-10

* 基金项目: 教育部优秀资教师资助计划项目; 教育部高等学校骨干教师资助计划(GG-140107361002); 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心基金

作者简介: 张树东, (1966-), 男(汉族), 甘肃白银人, 讲师, 在读博士生, 从事激光光谱学研究.

的相对延迟. 除距靶很近的位置外, 径向距离与延迟时间的关系可很好地用直线来拟合, 对应的速度分别为 1.399×10^6 , 1.208×10^6 和 1.069×10^6 cm/s, 但在气压为 5 Pa 时, 仅在距靶较远处才近似可用线性拟合, 得出速度为 0.286×10^6 cm/s. 在气压为 100 Pa 时, 辐射飞行时间轮廓的前沿弥散, 无法较为准确地测量时间的相对延迟.

对于气压为 5 Pa 时的结果可较好地用激波模型解释. 激光烧蚀产生的等离子体在背景气压较高时, 等离子体在膨胀中受到不断增加的背景气体的阻力, 膨胀的等离子体就像活塞一样推动其前面的气体, 使气体加速到超声速, 从而在等离子体边界处形成激波 (shockwave). 按照激波模型, 该激波距离靶面的径向距离 R 随时间 t 的关系可描述为^[6]

$$R \approx \xi \left[\frac{Et^2}{\rho(\infty)} \right]^n, \quad (1)$$

其中 ξ 是比例常数, 对于空气 $\xi=1$, $\rho(\infty)$ 是不受扰动时背景气体的密度, E 是激波的动能和等离子体的热能之和, n 是与激波波面的对称性有关的量, 如果波面具有柱对称性, 则 $n=1/4$. 用(1)式来拟合实验结果, 选用简化拟合公式 $R=at^{2n}$, 假定激波面具有柱对称性, 即 $n=1/4$, 拟合的结果虽不能与实验完全符合, 但还是基本一致的, 即波面近似柱对称. 与实验值拟合最好的是选用 Dhyperbl 拟合, 其拟合函数为

$$R = \frac{P_1 t}{P_2 + t} + \frac{P_3 t}{P_4 + t} + P_5 t, \quad (2)$$

其中 P_1-P_5 为拟合参数. 利用(2)式对实验数据拟合, 得到距靶面不同距离 R 处粒子的速度, 如图 1 所示.

随着背景气压的降低, 等离子体的膨胀可用绝热膨胀理论解释. 按照绝热膨胀的理论^[7], 绝热膨胀引起温度的降低, 它们的关系服从绝热方程

$$\frac{T}{T_0} = \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(\gamma-1)/\gamma}, \quad (3)$$

其中 T_0 和 P_0 为膨胀前等离子体内部的温度和压强, γ 为比热比. 按照绝热流动中能量守恒, 膨胀中温度的下降, 即内能的减小, 意味着运动动能的增加, 即速度的增加. 由实验结果看, 除靶很近的地方外, 速度的空间分布近似为常数, 即速度很快

达到一个稳定值, 这说明温度衰减的梯度很大. 由(3)式可看出, 背景气压越低, 等离子体绝热膨胀中所降到的温度越低, 则最终达到的速度就越大, 这与实验结果一致. 比较背景气压与速度的关系, 如图 2, 发现在 0.6—0.008 Pa, v 与 $\log P$ 呈直线, 但在 5 Pa 时, 粒子的最终速度已下降得很低了.

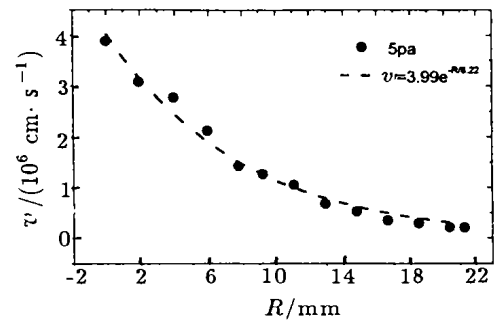


图 1 在背景气压为 5 Pa 时粒子速度的空间分布曲线为拟合的结果.

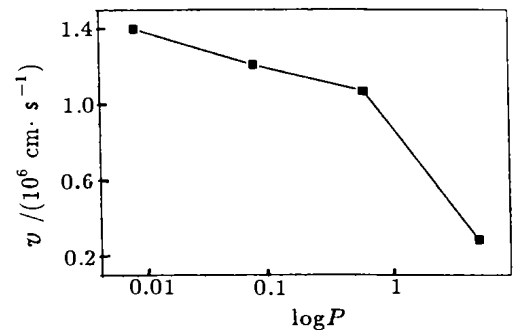


图 2 粒子最终速度与背景气压的关系

4 结论

本文研究了在不同背景气压条件下脉冲激光 (能量为 160 mJ/pulse, 对应的激光能量密度大约为 10^9-10^{10} W/cm²) 以垂直方向烧蚀平面 Al 靶产生的等离子体中 Al I 共振谱线的时间分辨特征. 通过测定等离子体在膨胀过程中其边界处辐射的相对延迟, 从而得到辐射粒子速度的空间分布. 在背景气压为 0.008—5 Pa, 测得的速度在 10^6 cm/s 量级. 利用激波模型较好地解释了低气压 (5 Pa) 的实验结果, 并得出激波的波面相对于靶面的法向近似为柱对称, 速度的空间分布随距靶距离的增大而近似呈指数减小. 在较高真空度下 (0.008—0.6 Pa), 速度的空间分布基本为一常数, 并用绝热膨胀理论作了解释.

参 考 文 献:

- [1] Chrisey D B, Hubler G K. Pulsed Laser Deposition of Thin Films[M]. New York: Wiley, 1994.
- [2] Issac Riju C, Pillai K Vasudevan, Harilal S S, *et al.* Dynamics of Laser Produced Silver Plasma Under Film Deposition Conditions Studied Using Optical Emission Spectroscopy [J]. Appl Surf Sci, 1998, **125**: 227.
- [3] Harilal S S, Issac Riju C, Bindhu C V, *et al.* Optical Emission Studies of C₂ Species in Laser-produced Plasma from Carbon [J]. J Phys: Appl Phys, 1997, **D30**: 1 703.
- [4] Krasa J, Laska L, Rohlena K, *et al.* The Effect of Laser-induced Plasma Expansion on the Ion Population [J]. Appl Phys Lett, 1999, **75**: 2 539.
- [5] 张树东, 张为俊. 激光烧蚀 Al 靶产生的等离子体中辐射粒子的速度及激波[J]. 物理学报, 2001, **50**(8): 1 512.
- [6] Baurle D. Laser Processing and Chemistry [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996, 533.
- [7] Singh R K, Narayan J. Pulse-laser Evaporation Technique for Deposition of Thin Films: Physical and theoretical model [J]. Phys Rev, 1990, **B41**: 8 843.

Influence of Ambient Pressure on Velocity of Emission Particle of Laser-ablated Al Target *

ZHANG Shu-dong^{1, 2}, CHEN Guan-ying¹, LIU Ya-nan¹, DONG Chen-zhong¹

(1 College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2 Laboratory of Environmental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: With the ambient gas pressure in the range from 8×10^{-3} to 10^2 Pa, Q-switched YAG laser ablates plane aluminum target and plasma are produced. Optical emission spectroscopy is used to carry out time-resolved analysis of atomic particles. Using the resonance transition of Al I 396.1 nm ($3p^2P - 4s^2S$), the spatiol velocity distribution of Al I has been obtained under the laser energies of 160 mJ/pulse when the ablating size is about 200 μm . The velocity is at the order of 10^6 cm/s. The distribution of velocity in spatial is approximately constant when the ambient pressure is in the range of $8 \times 10^{-3} - 6 \times 10^{-1}$ Pa and is decreasing nearly in exponential law when the ambient pressure is 5 Pa. When the pressure increase to 100 Pa, the rising front of the time profile becomes too blurred to measure the delay time exactly. The results are explained by using adiabatic expansion theory for pressure less than 0.6 Pa and shockwave model for 5 Pa respectively.

Key words: laser-produced plasma; plane Al target; velocity distribution of particle; shockwave model; ambient gas pressure

* **Foundation item:** Foundation for Excellence Young Teacher by the Ministry of Education; Foundation for University Key Teacher by the Ministry of Education (GG-140107361002); Foundation of Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator Lanzhou