

文章编号 :1001-5078(2004)03-0194-03

Ar 辅助 Al 等离子体辐射谱分析

宋一中^{1,2}, 贺安之¹

(1. 南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094; 2. 德州学院物理系, 山东 德州 253000)

摘要: NdYAG 脉冲激光聚焦到 Al 靶表面, 烧蚀 Al 靶, 产生 Al 等离子体。用 Ar 气作保护气时, 将诱发 Ar 气电离, 产生丰富的 Ar⁺ 离子辐射。文中根据 Ar⁺ 离子辐射信息, 分析了 Ar 385.06nm, Ar 386.85nm, Ar 404.29nm 等三条谱线的时间分辨行为, 计算了 Al 等离子体离子辐射时期的电子温度; 估算了特征辐射时期的电子密度。结果发现: 在 Al 等离子体离子辐射时期, 电子温度约 1.2 ~ 1.9eV, 随延迟时间增加, 单调递减; 在特征辐射时期, 电子密度大约是 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

关键词: 离子辐射; 特征辐射; 电子温度; 电子密度; 谱线半高全宽

中图分类号: O593 **文献标识码:** A

Study on Al Plasma Radiating Spectra Assisted with Ar⁺ Characteristic Lines

SONG Yi-zhong^{1,2}, HE An-zhi¹

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Physics, Dezhou college, Shandong 253000, China)

Abstract: Focusing an NdYAG pulsed laser beam onto surface of an aluminum(Al) target, ablating it, Al plasma would be induced upon the surface. Protected with Ar in the process, it would induce atom Ar breakdown, and farther more, a lot of Ar⁺ ionic characteristic radiations appeared accompanying the Al plasma's emitting. Based on the Ar⁺ ionic characteristic radiations, we studied time-resolved behavior of three Ar⁺ ionic characteristic lines, Ar 385.06nm, Ar 386.85nm and Ar 404.29nm, respectively. Electron temperature of the plasma in the stage of ionic emission was approximately calculated. Electron number density of the plasma in the stage of Al characteristic radiation was estimated. The results show that, in the stage of ionic emission, the electron temperature of the plasma ranged from 1.2 to 1.9eV, and decreased successively with delayed time increasing. In the stage of Al characteristic radiation, electron number density of the plasma was about $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

Key words: ionic radiation; characteristic radiation; electron temperature; electron number density; the full half high width of characteristic line

1 引言

电子温度是等离子体十分重要的参数之一, 与等离子体的 Doppler 效应、Stark 效应等谱线展宽机制密切相关^[1,2], 与等离子体的演化行为、电子数密度等状态参量紧密相联^[3,4], 所以是等离子体诊断的前提。因此, 电子温度的估算, 对等离子体的研究是十分重要的。一般等离子体电子温度的确定, 是根

据等离子体的特征辐射信息, 在局域热平衡假设条件下, 利用玻尔兹曼分布率计算的^[5,6]。这种方法要求同时采集到多条同种原子或离子同电离度的孤立谱线, 这对一般元素来说是比较困难的。本文

作者简介: 宋一中(1971 -), 男, 南京理工大学理学院在读博士后, 主要从事激光诱导等离子体的特征与机理研究。

收稿日期: 2003-10-13

研究发现,使用 Ar 作保护气,借助 Ar⁺ 的丰富孤立谱线,可近似估算 Al 等离子体的电子温度,从而较圆满解决 Al 等离子体电子温度的确定问题。

2 实验

本实验用 Ar 气作保护气,纯 Al (99.99%) 作样品,用 NdYAG 脉冲激光烧蚀 Al 靶获得 Al 等离子体,实验装置及数据采集过程在相关工作^[7]中已给出详尽描述,在此不再赘述。

3 结果和讨论

3.1 实验结果

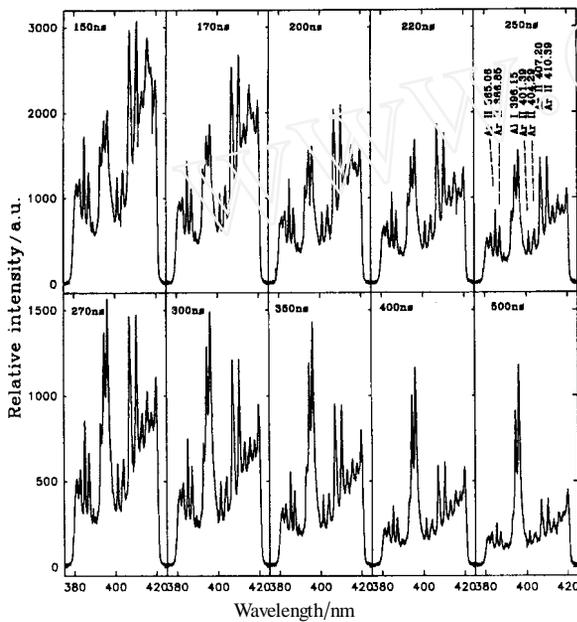


图 1 Al 等离子体在离子辐射时期的时间分辨辐射谱

10kPa 气压、145mJ/脉冲条件下,在靶前 0.1mm 处采集 Al 等离子体时间分辨辐射信息,采集结果已经在我们以前的相关工作中做了详细描述^[8]。用于

本文计算的几条光谱集中在图 1 给出。

3.2 电子温度

3.2.1 理论分析

等离子体达到热平衡或局域热平衡时,同种原子或离子辐射的两条谱线,辐射强度比可用下式表示^[9]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{f_{m1n1} g_{n1}}{f_{m2n2} g_{n2}} \cdot \left[\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right]^3 \exp \left[- \frac{E_{m1} - E_{m2}}{kT_e} \right] \quad (1)$$

其中, I_1, I_2 分别是谱线 1 和谱线 2 的辐射强度、阵子强度、下能级统计权重、中心波长、上能级激发能; k 是玻尔兹曼常数, T_e 是电子温度。 $f_{m1, m2, n1, n2}, g_{n1, n2}, \lambda_1, \lambda_2, E_{m1, m2}$ 参数通过计算或查参考书获得,根据实验结果,通过积分特征谱线下的面积计算谱线强度比,可进一步计算 T_e 。

3.2.2 谱线选择

利用 (1) 式计算电子温度,所选特征谱线必须满足: 同种原子或离子同电离度特征谱线; 这些谱线还必须是彼此孤立的; 上能级激发能、上或下能级统计权重、辐射跃迁几率或阵子强度等参数是已知的。

在本实验采集的频段范围内,采集到多条 Ar⁺ 谱线,如: Ar 385.06nm, Ar 386.85nm, Ar 401.39nm, Ar 404.29nm, Ar 407.20nm, Ar 410.39nm 等。其中 Ar 407.20nm 受 Ar 407.24nm, Ar 407.66nm, Ar 404.70nm 谱线的影响,不是严格孤立的; Ar 410.39nm 是两元跃迁产生的^[3]; Ar 401.39nm 缺少相关参数。所以只能选取其余 3 条谱线计算电子温度,其相关参数在表 1 给出。

表 1 选择用来计算电子温度的 3 条 Ar⁺ 离子谱线及其相关参数^[3,10]

| (nm) | E_m (cm ⁻¹) | (eV) | g_n | g_m | A (10 ⁸ s ⁻¹) | f_{mn} |
|-----------|------------------------------|-------|-------|-------|---|----------|
| Ar 385.06 | 161049 | 19.88 | 4 | 4 | 0.47 | 0.130 |
| Ar 386.85 | 186891 | 23.07 | 4 | 6 | 1.90 | 0.476 |
| Ar 404.29 | 173348 | 21.40 | 4 | 4 | 1.40 | 0.337 |

3.2.3 T_e 计算

对 (1) 式取对数并整理得:

$$\ln \frac{I_1}{I_2} + \ln \frac{f_{m2n2} g_{n2}}{f_{m1n1} g_{n1}} = - \frac{1}{kT_e} E_{m1} + \frac{1}{kT_e} E_{m2} \quad (2)$$

取一条参考线,并令其强度为 I_2 ,其它线都与其相比,则对于同一时间分辨谱, I_2 等是恒量,则有:

$$\ln \frac{I_1}{I_2} = - \frac{1}{kT_e} E_{m1} + \left(- \ln \frac{f_{m2n2} g_{n2}}{f_{m1n1} g_{n1}} + \frac{1}{kT_e} E_{m2} \right) \quad (3)$$

可见, $\ln \frac{I_1}{I_2} + \ln \frac{f_{m2n2} g_{n2}}{f_{m1n1} g_{n1}}$ 和 E_{m1} 成线性关系,可简单表示成:

$$\ln \frac{I_1}{I_2} + \ln \frac{f_{m2n2} g_{n2}}{f_{m1n1} g_{n1}} = - \frac{1}{kT_e} E_{m1} + b \quad (4)$$

将选择谱线的值代入 (4) 式,以 $\ln \frac{I_1}{I_2} + \ln \frac{f_{m2n2} g_{n2}}{f_{m1n1} g_{n1}}$ 为因变量, E_{m1} 为自变量描点,然后,按 $y = kx + b$ 线性拟合,结果在图 2 给出。

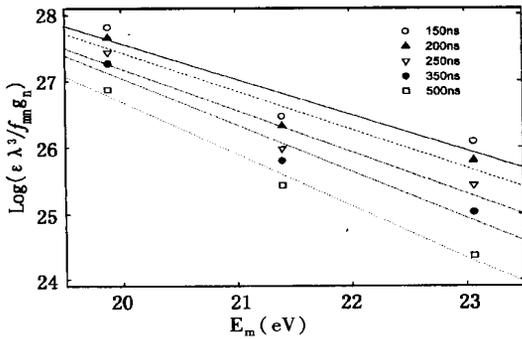


图 2 $\ln(\epsilon \lambda^3 / f_m g_n)$ 关于 E_m 的实验数据和拟合曲线

表 2 在 150ns ~ 500ns 延迟时的电子温度

| Time delayed (ns) | 150 | 200 | 220 | 250 | 270 | 300 | 350 | 400 | 500 |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| kT_e (eV) | 1.86 | 1.73 | 1.65 | 1.60 | 1.55 | 1.54 | 1.43 | 1.32 | 1.29 |
| $T_e (\times 10^4 \text{ K})$ | 2.16 | 2.00 | 1.91 | 1.85 | 1.80 | 1.79 | 1.66 | 1.53 | 1.49 |

$$\text{原子 } \Gamma_{1/2} = 2w \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) + 3.5a \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right)^{1/4} \left(1 - \frac{3}{4} N_D^{-1/3} \right) w \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) \quad (5)$$

$$\text{一次电离离子 } \Gamma_{1/2} = 2w \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) + 3.5a \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right)^{1/4} \left(1 - \frac{6}{5} N_D^{-1/3} \right) w \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) \quad (6)$$

式中 $\Gamma_{1/2}$ 表示谱线的半高全宽, 等号右边计算结果的单位是 Å , 第一项对应电子的碰撞作用, 第二项加入了准静态的离子电场作用, w, a 分别为电子和离子场的展宽系数, N_e 是以 cm^{-3} 为单位的电子数密度, N_D 是 Debye 球内的粒子数, 其值由下式近似估算:

$$N_D = \frac{1.72 \times 10^9 T(\text{eV})^{3/2}}{N_e (\text{cm}^{-3})^{1/2}} \quad (7)$$

式中 T 是以 eV 为单位的等离子体温度, 将(7)式代入(6)得:

$$\Gamma_{1/2} = 2w \left(\frac{N_e}{10^{16}} \right) + 3.5aw \left(\frac{N_e^{5/4}}{10^{20}} \right) - 3.506 \times 10^{-23} aw \left(\frac{N_e^{17/12}}{T^{1/2}} \right) \quad (8)$$

Al 396.15nm 的相关参数在表 3 给出。

表 3 Al 396.15nm 的相关参数

| | w | a | T | $\Gamma_{1/2}$ |
|-------------|-----------------------|-------|-----------------|----------------|
| Al 396.15nm | 1.52×10^{-2} | 0.039 | 10,000K(0.86eV) | 0.68nm |

将表 3 中的数据代入(8)式得:

$$6.8 \times 10^{26} = 3.04 \times 10^8 N_e + 2.07 \times 10^3 N_e^{5/4} - 2.24 N_e^{17/12} \quad (9)$$

式中等号右边第一项是电子碰撞作用, 第二、三项是离子静电作用。显然, 第一项比第二、三项高 5 个数量级, 说明电子的碰撞作用比离子的静电作用强 5 个数量级。忽略后两项, 仍可得到精确到

根据图 2 拟合直线的斜率, 可以直接计算

$$- \frac{1}{kT_e}, \text{ 结果在表 2 给出。}$$

由表 2 可见, 在 Al 等离子体离子辐射时期, 电子温度约 1.2 ~ 1.9eV, 随延迟时间增加, 单调递减。

3.3 电子数密度

对于中性原子和一次电离的离子的孤立谱线, 谱线加宽主要是由电子碰撞引起的, 离子准静态库仑场引起的加宽只是作为一种修正。在良好的近似下, 谱线的半高全宽可用下式计算^[11]:

1/10,000 的方程近似解:

$$N_e = 2.2368 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

4 结论

脉冲激光烧蚀 Al 靶时, 采用 Ar 作保护气, 采集到丰富的 Ar^+ 辐射谱线。在本实验采集的频段范围内, 采集到 Ar 385.06nm、Ar 386.85nm、Ar 404.29nm 等孤立谱线。通过分析这三条孤立谱线, 计算得 Al 等离子体离子辐射时期的电子温度约 1.2 ~ 1.9eV; 特征辐射时期的电子数密度约是 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

参考文献:

- [1] H R Griem. Spectral Line Broadening by Plasma [M]. New York: Academic Press, 1974.
- [2] 王青圃, 张行愚, 赵圣之. 激光物理学 [M]. 济南: 山东大学出版社, 1993.
- [3] H R Griem. Plasma Spectroscopy [M]. New York: Academic Press, 1964.
- [4] 朱沛臣, 万春华, 熊诗杰, 等. 热等离子体中 Stark 谱线增宽和移动的理论及实验现状 [J]. 物理学进展, 2001, 21(1): 88 - 130.
- [5] Paul J Wolf. The plasma properties of laser-ablated SiO_2 [J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(4): 1280 - 1289.
- [6] Kenneth J Grant, George L Paul. Electron Temperature and Density Profiles of Excimer Laser-induced Plasmas [J]. Applied Spectroscopy, 1990, 44(8): 1349 - 1354.
- [7] 宋一中, 李亮. 激光诱导 Al 等离子体连续辐射的时间分布 [J]. 光学学报, 2001, 21(4): 404 - 409.
- [8] 宋一中, 李尊营, 朱瑞富, 等. Al 原子共振双线跃迁几率实验研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2002, 22(4): 545 - 547.
- [9] X T Wang, B Y Man, G T Wang, et al. Optical spectroscopy of plasma produced by laser ablation of Ti alloy in air [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 80(3): 1783 - 1786.
- [10] W L Wiese, G A Martin. Wavelengths and Transition Probabilities for Atoms and Atomic Ions [M]. Washington: National Standards Reference Data Series, 1980.
- [11] G Bekefi. In Principles of laser plasmas [M]. New York: Wiley Interscience Publication, 1976.