

文章编号: 0253-2239(2009)09-2594-07

激光诱导等离子体中 Al 原子发射光谱的时间、空间演化特性实验研究

从 然¹ 张保华^{1,2} 樊建梅¹ 郑贤锋¹ 刘文清² 郑荣儿³ 崔执凤¹

¹安徽师范大学原子与分子物理研究所, 安徽 芜湖 241000
²中科院安徽光学精密机械研究所大气光学中心, 安徽 合肥 2300
³中国海洋大学光学光电子实验室, 山东 青岛 266071

摘要 实验测定了激光诱导 Al 等离子体中 390.068, 394.4, 396.152, 466.3056 nm 等谱线的时间、空间分辨特性, 由发射光谱线的强度和 Stark 展宽计算了 Al 等离子体中的电子密度, 并由实验结果讨论了电子密度的时间空间演化特性。实验结果表明, 当延时在 100~1500 ns 变化时, 等离子体中的电子密度变化范围为 $0.02 \times 10^{17} \sim 1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 在沿激光束方向上, 当距离靶表面 0~1.8 mm 范围内变化时, 相应的电子密度范围为 $0.28 \times 10^{17} \sim 0.95 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 等离子体电子密度在沿激光束方向上具有很好的对称性。

关键词 光谱学; 激光诱导 Al 等离子体; 时间空间分辨发射光谱; 电子密度

中图分类号 O433.1; O562.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2594

Experimental Investigation on Time and Spatial Evolution of Emission Spectra of Al Atom in Laser-Induced Plasmas

Cong Ran¹ Zhang Baohua^{1,2} Fan Jianmei¹ Zheng Xianfeng¹
Liu Wenqing² Zheng Rong'er³ Cui Zhifeng¹

¹Institute of Atomic and Molecular Physics, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China

²Centre of Atmospheric Optics, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230026, China

³Optics and Optoelectronics Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract The time and spatial-resolved emission spectrum in laser-induced Al plasma was measured for the 390.068, 394.4, 396.152 and 466.3056 nm spectral lines. The electron density of the plasmas was calculated from the measured spectral line intensity and Stark broadening of emission spectral lines respectively. The time and spatial evolution property of the electron density was discussed according to the experimental results. It is shown that the plasma electron density varies from 0.02×10^{17} to $1.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ when the time delay is in the range from 100 to 1500 ns. It is also concluded that the plasma electron density varies from 0.28×10^{17} to $0.95 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ along the direction on the laser beam when the distance of the measured zone from the target surface is in the range from 0 to 1.8 mm. The distribution of the plasma electron density along the direction of the laser beam has well symmetry.

Key words spectroscopy; laser-induced Al plasma; time and spatial resolved emission spectra; electron density

收稿日期: 2008-07-18; **收到修改稿日期**: 2009-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(10674002)、国家 863 计划(2006AA09Z243)、安徽省教育厅自然科学研究重大项目(ZD2007001-1)和安徽师范大学创新团队建设基金资助课题。

作者简介: 从 然(1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事分子光谱和环境光学领域的理论和实验研究。

E-mail: cr122904@163.com

导师简介: 崔执凤(1963-), 男, 教授, 主要从事多原子分子、自由基、激光等离子体及其应用领域研究。

E-mail: zfcui@mail.ahnu.edu.cn (通信联系人)

1 引言

激光诱导击穿光谱学(Laser induced breakdown spectroscopy,简称 LIBS)是通过测定高功率密度脉冲激光诱导等离子体中原子或离子发射光谱线实现样品中微量元素定量分析的一门光谱技术,由于 LIBS 具有对样品的破坏性小、无须对待测样品进行复杂的预处理、能对样品中的多种微量元素同时进行检测等独特的优点,近几年来受到光谱化学工作者的广泛关注^[1~5],被认为是最有可能取代传统光谱分析方法成为可实现对微量元素进行快速、实时和在线定量检测的新技术^[6~8]。利用该技术对定量分析固相、液相和气相基质中的微量元素开展的理论和实验研究,是当今光谱分析化学中的研究热点^[9,10]。但是要使 LIBS 技术能真正应用到微量元素的快速、实时和在线定量分析,需要解决两个关键问题,即需要提高 LIBS 技术的检测限和检测结果的重复性^[11,12]。由于 LIBS 技术的基础是激光诱导等离子体,因此要从根本上解决这两个问题,必须从物理机理上揭示激光等离子体动力学,电子密度是描述等离子体特性的重要参数,而脉冲激光诱导的等离子体是与时间空间相关的非稳态等离子体,其电子密度随时间和空间变化,对激光等离子体电子密度的时间和空间演化特性进行深入的研究可为提高 LIBS 技术的检测限和重复性提高具有实验指导作用。

表面等离子体发光是光学和电子学在纳米尺度的连接桥梁,在基础物理研究领域和量子信息领域都具有重要意义,因此越来越引起人们的广泛关注,已成为近年来的研究热点。众多研究小组对此领域开展了有意义的研究工作。郭光灿小组研究结果表明,在表面等离子体辅助传送过程中,纠缠可以从光子转移到表面等离子体,也就是说这种大量 10^{10} 电子的集体振荡也具有量子特性^[13]。张杰小组研究了近相对论光强下,对 p 偏振超强激光脉冲与固体靶相互作用过程中产生的超热电子的角分布和能谱,结果表明导致超热电子沿着靶面发射的原因是它受到靶前的鞘层电场与表面磁场的共同作用;而沿着法线方向发射的超热电子的主要加速机制是共振吸收机制^[14]。吴乐南小组基于表面等离子体共振效应,主要研究了可以用于嗅觉、味觉的检测技术和高清晰、真彩色的显示技术^[15]。陈湛等研究了 Ag-ADP 界面产生的二次谐波的增强效应,并把它与 Ag-石英界面产生的 SH 信号进行了比较。在理论上给出了 SH 信号强度的计算公式^[16]。

研究等离子体中电子密度特性的实验方法有各

种微探针、质谱和发射光谱等方法,但是前两种方法都是有接触的测量方法,最后一种方法是真正的无接触测量,因而得到广泛应用。Margot 小组通过测定时间分辨和空间积分的发射光谱线的强度和 Stark 展宽,研究了激光波长、脉宽、能量密度对激光 Al 等离子体时间和空间特性的影响,结果表明当激光脉宽在 60 ns~80 fs、波长从紫外到红外范围内变化时对等离子体特性影响很小,在激光作用后 1 μ s 内等离子体电子密度的空间分布是均匀的,并从理论上对实验结果进行了合理解释,但没有得到激光等离子体发射光谱的空间分辨特性^[17]。Colón 和 Alonso-Medina 利用 1064 nm 激光测定了真空和 Ar 环境下激光诱导 Pb 等离子体中 PbII 一价离子 31 条谱线的 Stark 展宽,考察了谱线的自吸收效应,但未涉及电子温度和电子密度的空间演化特性^[18]。Bredice 小组利用 RC 电路实时检测了激光等离子体电子密度的时间演化特性,实验结果表明电子密度演化特性与发射光谱线展宽的时间演化特性有紧密的联系,但未对得到定量的分析结果^[19]。X. Z. Zhao 等人通过测量缓冲气体环境下 YAG 激光诱导等离子体中 Mg 原子和离子谱线的 Stark 展宽,计算得到了电子密度的空间分布^[20],其测量的空间分辨率不高,约为 1 mm。杨柏谦等测定了强激光等离子体中 Al 原子 K 壳层的发射光谱,利用 Al 的 Ly- α 谱线翼部的 Stark 展宽,得到了电子密度空间分布的轮廓^[21],由于采用摄谱的方法导致实验测定结果的精确度不高,但是对大气环境下激光等离子体中电子密度时间空间演化特性的报道不多。我们在实验上测定了激光烧蚀 Al 等离子体中 Al 原子时间和空间分辨的 390.068, 394.4, 396.152, 466.3056 nm 等发射光谱线,通过测定 Al 原子谱线的相对强度和 Stark 展宽,计算得到了电子密度,并由发射光谱线 Stark 展宽的时间空间演化特性,研究了电子密度的时间和空间演化特性。

2 实验装置

实验装置原理如图 1 所示,烧蚀激光光源为 YAG 激光(India II-20)的 532 nm 输出,重复频率为 20 Hz,脉宽为 7 ns,光束直径为 6 mm,单脉冲激光能量在 2~100 mJ 范围内可调。脉冲激光束经焦距为 100 mm 石英透镜聚焦垂直入射在 Al 靶表面上,焦点在样品内距离样品表面约 2 mm,这样可以得到最佳的等离子体发射光谱信号,为了保证每个激光脉冲入射到不同的靶点,用慢速旋转电机控制

样品做低速转动(1 r/min),样品处于大气环境中。在与激光束垂直且与样品表面平行的方向上,激光等离子体的发射光谱信号经焦距为 70 mm 的成像透镜两倍放大成像于单色仪(ACTON, SP-2750)的入射狭缝处,成像透镜置于可沿与激光束平行方向调节的一维精密调整架上,成像透镜的空间分辨率为 0.1 mm,在与烧蚀激光束平行方向上的位置调节精度可达 10 μ m,固定靶和单色仪入射狭缝的位置,调节成像透镜的位置,即可测定激光诱导等离子体沿径向(与激光束平行的方向)不同位置所发射的光谱信号。单色仪的分辨率为 0.023 nm,入射狭缝宽度为 80 μ m,经过单色仪后的光谱信号由光电倍增管(R376)、Boxcar 平均器和计算机完成探测、采集和处理。光电倍增管输出信号同时由数字存储示波器(TEK460A)监测。Boxcar 和示波器由 YAG 激光 Q 开关同步输出脉冲触发,通过调节 Boxcar 取样门相对于激光的延时,可以测定激光等离子体演化过程中不同时刻的发射光谱信号。实验中使用的样品为 Alfa Aesar 公司提供的标准铝样品,其中 Al 元素的含量为 99.950%。

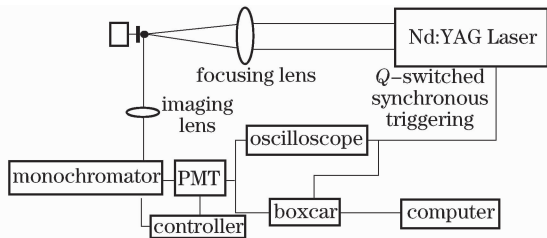


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

3 实验结果与讨论

3.1 发射光谱线 Stark 展宽的测定及其时间演化特性

在等离子体中,原子发射光谱线的线型与其所

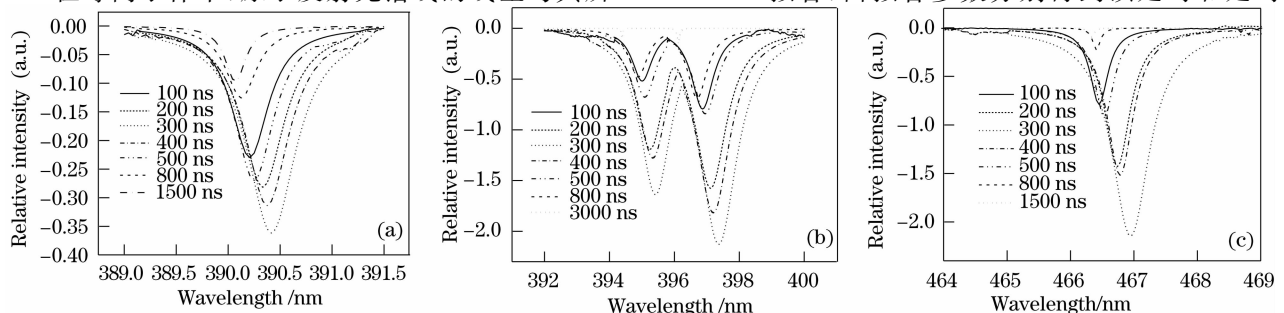


图 2 不同延时下 Al 原子发射光谱。(a) 390.068 nm; (b) 394.4 nm, 396.152 nm; (c) 466.3056 nm

Fig. 2 Emission spectra of Al atom at different time delays. (a) 390.068 nm; (b) 394.4 nm, 396.152 nm; (c) 466.3056 nm

处的环境有非常复杂的关系,与电子密度、温度也有关系。谱线的主要展宽机制有 Doppler 和 Stark 展宽,理论计算表明激光等离子体中原子谱线的 Doppler 展宽一般为 10^{-3} 纳米量级,而本实验测量谱线的半高宽度一般为 10^{-1} 纳米,因此可以忽略 Doppler 展宽。考虑到原子处于电子及离子的包围之中,因此电子、离子和激发态原子之间的长程库仑相互作用导致谱线的 Stark 展宽,其线型为 Lorentz 线型,属于平方 Stark 展宽,Stark 展宽包括相对于孤立原子发射谱线线宽的增大和波长的移动。电子与原子之间的相互作用是影响谱线 Stark 展宽的主要因素,离子仅影响谱线的两翼^[22,23]。

实验中 Boxcar 取样门宽为 60 ns,探测区域位于距样品表面 0.9 mm 处,激光功率密度为 2.4×10^9 Wcm⁻²,调节 Boxcar 取样门使得探测相对激光脉冲延时在 100~5000 ns 范围内,实验测定的不同延时下 Al 原子 390.068,394.4,396.152,466.3056 nm 等发射光谱线如图 2 所示,由图可见,随着延时的增加谱线宽度先增大后减小,谱线的峰值波长也是先增大后减小。

当延时大于 5000 ns 时,谱线的 Stark 展宽(谱线的半高全宽和线移)很小,可以认为此时不存在 Stark 展宽,仅包含光谱仪器展宽和谱线本底宽度,因此某延时下谱线的 Stark 增宽和线移的大小,可以由该延时下谱线的宽度和峰值波长分别扣除延时为 5000 ns 时的谱线宽度和峰值波长得到。由此得到的不同延时下 Al 原子 390.068,394.4,396.152,466.3056 nm 发射谱线的 Stark 增宽和线移,实验测定的这些光谱线的 Stark 增宽和线移如图 3 所示,实验中 Stark 增宽和线移测定绝对误差为 ± 0.03 nm。在测定谱线的 Stark 展宽时,先分别对测定的某延时和延时为 5000 ns 的谱线进行 Lorentz 拟合,由拟合参数分别得到该延时和延时

为 5000 ns 的谱线宽度和谱线峰值位置,将该延时下的谱线宽度和谱线峰值位置分别减去延时为 5000 ns 的谱线宽度和谱线峰值位置,分别得到该延时下的 Stark 增宽和线移。实验结果表明,在相同的环境和位置不变的条件下,随着相对激光脉冲延

时的增加,谱线的 Stark 展宽先增大然后持续减小,在 300 ns 以前 Stark 展宽快速增加,在 300 ns 以后则缓慢地减小。谱线的 Stark 线移随延时的变化与之相似,但变化速率要慢一些,但也在 300 ns 处达到最大。

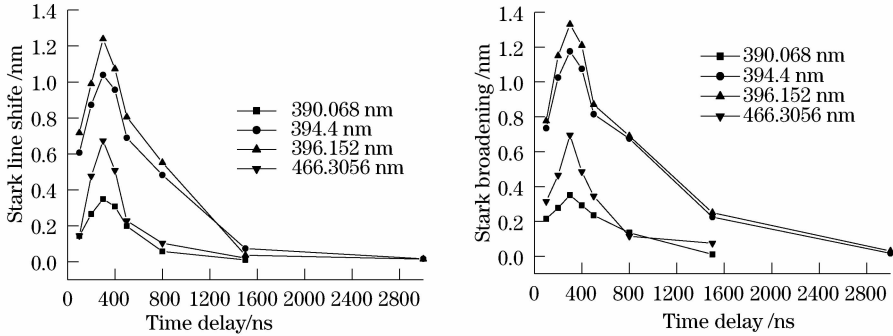


图 3 Al 原子各发射光谱线的 Stark 展宽的时间演化特性

Fig. 3 Time evolution of the Stark broadening of spectral lines for Al atom

3.2 电子密度的时间演化特性

谱线产生 Stark 展宽的大小与电子密度有关,对于平方 Stark 展宽,可以通过如下的经验公式^[24]计算得到电子密度

$$\Delta\lambda_{\text{width}} = [1 + 1.75 \cdot 10^{-4} n_e^{1/4} \cdot \alpha(1 - 0.068n_e^{1/6} T_e^{-1/2})] \cdot 10^{-16} \omega n_e, \quad (1)$$

$$\Delta\lambda_{\text{shift}} = [(d/\omega) + 2.0 \cdot 10^{-4} n_e^{1/4} \cdot \alpha(1 - 0.068n_e^{1/6} T_e^{-1/2})] \cdot 10^{-16} \omega n_e, \quad (2)$$

式中 T_e 为等离子体中的电子温度, ω 为电子碰撞半宽度(单位: 10^{-1} nm), d/ω 为相对电子碰撞线移, α 为离子展宽参数,各参数可在文献^[24]中查到。利用实验测定 Al 原子 390.068, 394.4, 396.152, 466.3056 nm 等发射谱线的 Stark 增宽和线移,由(1)式和(2)式计算出不同延时下的电子密度。由于(1)式和(2)式对电子温度变化不敏感,测定温度的误差不会给电子密度的计算结果带来很大影响^[24,25]。在测定等离子体中的电子温度时,由实验测定的原子光谱线强度和这些光谱线所对应激发态

的光谱数据,做出光谱线强度与激发态能量相对应的玻尔兹曼斜线,由该直线的斜率得到等离子体的电子温度,根据我们对电子温度测量的实验结果,电子温度 $T_e = (25000 \pm 50)$ K,取 $T_e = 25000$ K 计算得到不同延时下等离子体的电子密度值如图 4 所示,由实验测定的 Stark 线移和 Stark 增宽计算得到的电子密度绝对误差分别为 $\pm 2.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 和 $\pm 2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。

从图 4 可以看出,等离子体中的电子密度数量级为 10^{17} cm^{-3} ,当延时在 100~1500 ns 变化时,电子密度的变化范围为 $0.05 \times 10^{17} \sim 1.02 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,随延时的增加电子密度先增加后下降,在延时为 300 ns 附近达到最大,随后逐渐减小,但在 650 ns 时仍然具有较高的电子密度,一直到 650 ns 以后电子密度才减小到较低的水平。同时实验结果表明,由时间分辨光谱线 Stark 线移计算得到电子密度与由 Stark 增宽计算得到电子密度数值十分接近,但由 Stark 线移经验公式(2)计算得到的电

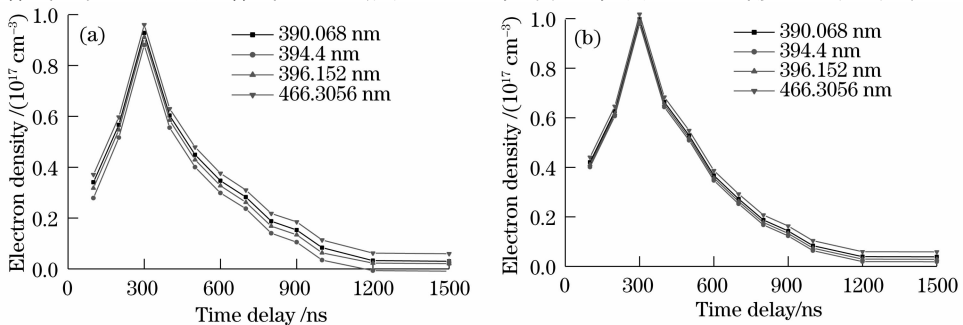


图 4 不同延时下的电子密度。(a)Stark 线移,(b) Stark 增宽

Fig. 4 Electron density at different time delays. (a) Stark line shift, (b) Stark broadening

子密度数值更加精确^[24,25],与实验测量误差无关。

3.3 发射光谱线 Stark 展宽的空间演化特性

实验测定了延时为 250 ns 时等离子体中不同径向位置 Al 原子的 390.068, 394.4, 396.152, 466.3056 nm 发射谱线线型,图 5 为不同径向位置 Al 原子 390.068 nm 发射谱线,计算得到此延时下 390.068, 394.4, 396.152, 466.3056 nm 谱线的 Stark 展宽与等离子体不同径向位置的关系如图 6 所示, Stark 增宽和线移实验测定绝对误差为

±0.03 nm。由图可见,在延时不变条件下,随着径向距离的增加,谱线的 Stark 增宽和线移都先增加,在 0.9 mm 处达到最大,随后径向距离的进一步增大将导致 Stark 增宽和线移开始减小。利用实验测定 Al 原子的 390.068,394.4,396.152,466.3056 nm 发射谱线的 Stark 增宽和线移,同时由图可见,谱线 Stark 展宽沿激光束方向的分布具有很好的对称性,对称中心位于距靶表面 0.9 mm 处。

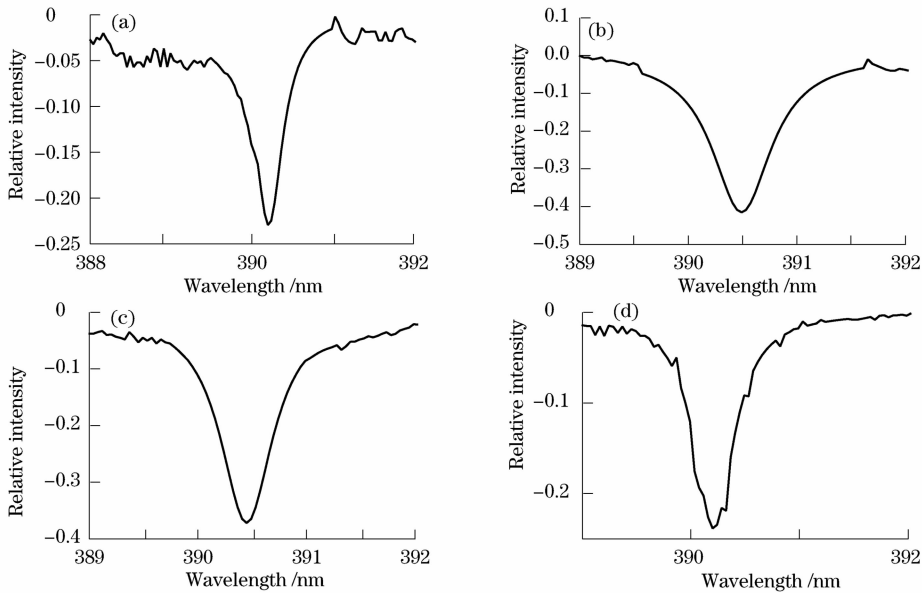


图 5 不同径向位置处 Al 390.068 nm 光谱线。(a)0 mm; (b) 0.9 mm; (c) 1.2 mm; (d) 1.8 mm

Fig. 5 Al 390.068 nm spectral line at different radial positions . (a) 0 mm; (b) 0.9 mm; (c) 1.2 mm; (d) 1.8 mm

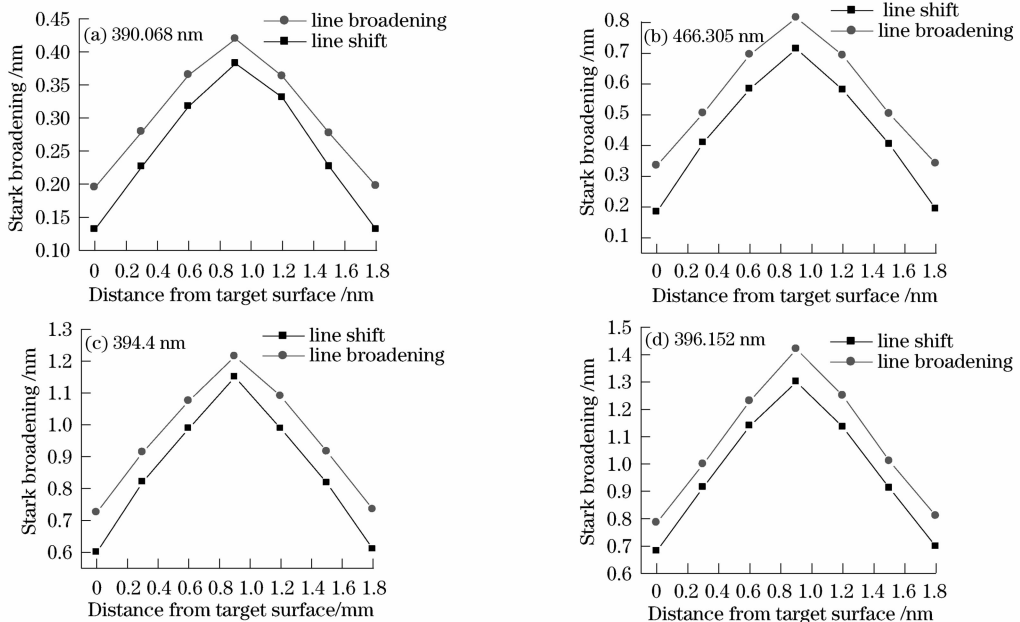


图 6 不同径向位置处 Al 原子发射光谱线的 Stark 展宽

Fig. 6 Stark broadening of emission spectral lines for Al atom at different radial position

3.4 激光诱导 Al 等离子体电子密度的空间演化特性

由(1)和(2)式计算出不同径向位置处的电子密度。由于(1)和(2)式对电子温度变化不敏感,测定温度的误差不会给电子密度的计算结果带来很大影响。根据我们对电子温度测量的实验结果,取 $T_e = 25000$ K, 计算得到激光等离子体中电子密度沿径向位置的分布如图 7 所示,由实验测定的 Stark 线移和 Stark 增宽计算得到的电子密度绝对误差分别为 $\pm 2.5 \times 10^{14}$ 和 $\pm 2.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。图 7 表明,随着径向距离的增大,电子密度先增大,大约在 0.9 mm 时达到最大,随后逐渐减小,当距离靶表面 0~1.8 mm 范围内变化时,相应的电子密度 n_e 范围为 $0.28 \times 10^{17} \sim$

$0.95 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,这说明本实验中激光诱导等离子体的线径在 1.8 mm 左右。同时实验结果也表明利用 Stark 线移计算得到电子密度与由 Stark 增宽计算得到电子密度数值十分接近,说明由时间和空间分辨发射光谱线 Stark 加宽和 Stark 线移能够得到精确的等离子体电子密度数值,一般来说由 Stark 线移计算得到的电子密度数值更精确,这也说明只有同时测定激光等离子体的时间和空间分辨发射光谱,才能精确描述激光等离子体动力学,同时克服了自吸收、等离子体时间和空间不均匀性等效应的影响。同时可以看出等离子体中电子密度在径向位置为 0.9 mm 的两侧具有很好的对称性,也即是说在等离子体的形成过程中其形状具有很好的径向对称性。

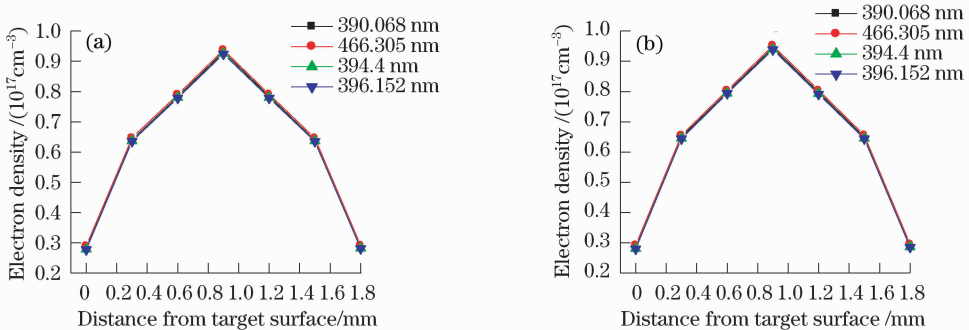


图 7 不同径向位置处的电子密度。(a) Stark 线移; (b) Stark 增宽

Fig. 7 Electron density at different radial positions. (a) Stark line shift; (b) Stark broadening

4 讨 论

由我们的实验测定结果可知,等离子体中原子光谱线的 Stark 展宽随延时的变化关系是先增加后减小,在激光作用后 300 ns 处达到最大,随后逐渐减小,这是由于 Stark 展宽的机理决定的,Stark 展宽是电子或离子与处在激发态的原子碰撞引起的展宽,并且主要是电子碰撞的结果。由经验公式(1)、(2)可知 Stark 展宽的大小是由等离子体中的电子密度决定的,因此谱线 Stark 展宽的时间和空间演化特性反映了电子密度的时间和空间演化特性,这也由本实验结果得到了证实。

由激光诱导等离子体的理论可知,如果不计及因扩散而引起的电子损失,在激光等离子体中,电子密度随时间的演化可由下述方程近似描述^[26]:

$$\frac{dn_e}{dt} = -\alpha_{CR} n_e^2 + S_{CR} n_e N, \quad (3)$$

其中 α_{CR} 和 S_{CR} 分别为辐射复合速率系数和电离速率系数, N 为中性原子密度。一般情形下, α_{CR} 和 S_{CR} 均与电子密度 n_e 和电子温度 T_e 有关,因而求解方程

(3)是特别困难的,下面依据该方程在一些特殊情况下解的特征,解释本实验中得到的电子密度随时间的演化特性。在激光作用下等离子体形成的初始阶段,这时高温等离子体把表面溅射进来的微粒进一步分解与电离,此时等离子体的电离速率系数远大于辐射复合速率系数,即有

$$S_{CR} n_e N \gg \alpha_{CR} n_e^2,$$

则方程(3)可写成

$$\frac{dn_e}{dt} = S_{CR} n_e N. \quad (4)$$

对于 S_{CR} 和 N 可近似看成是常量的情形,方程(4)的解为

$$n_e(t) = n_e(t_0) \exp[S_{CR} N(t - t_0)], \quad (5)$$

由该解可知在等离子体演化初期电子密度是随延时的增加而增加,从而导致原子发射光谱线的 Stark 展宽随延时的增加而增加,这与图 3、图 4 所示的结果定性一致。

随着激光等离子体的进一步演化,延时增加到一定程度时,会出现辐射复合速率系数远大于电离速率系数的情形,此时有

$$\alpha_{CR} n_e^2 \gg S_{CR} n_e N,$$

则方程(3)为

$$\frac{dn_e}{dt} = \alpha_{CR} n_e^2, \quad (6)$$

对于 α_{CR} 可看成是常量的情形, 方程(6)的解为

$$n_e(t) = \frac{1}{\alpha_{CR}(t-t_0) + n_e^{-1}(t_0)}, \quad (7)$$

由该解可知在等离子体演化后期电子密度是随延时的增加而减小, 从而导致原子发射光谱线的 Stark 展宽随延时的增加而减小, 这也与图 3、图 4 所示的结果定性一致。

激光诱导等离子体电子密度的空间演化特性的理论更加复杂, 本实验测定的发射光谱线 Stark 展宽和电子密度的空间演化特性有待于进一步从理论上研究。

参 考 文 献

- 1 V. Lazic, I. Rauschenbach S. Jovicic *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy of soils, rocks and ice at subzero temperatures in simulated martian conditions [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, **62**(12):1546~1556
- 2 Walid Tawfik, Y. Mohamed. Improved LIBS limit of detection of Be, Mg, Si, Mn, Fe and Cu in aluminum alloy samples using a portable Echelle spectrometer with ICCD camera [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, **40**(1):30~33
- 3 Sandra Koch, Walter Garen, Milos Muller *et al.*. Detection of chromium in liquids by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) [J]. *Appl. Phys. A*, 2004, **79**(4-6):1071~1073
- 4 Wang Chuanhui, Dai Lin, Zhang Xianyi *et al.*. Investigation on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy of $AlCl_3$ Water Solution [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9):1190~1194
王传辉, 戴琳, 张先懿等. $AlCl_3$ 水溶液的激光诱导击穿光谱研究 [J]. *中国激光*, 2006, **33**(9):1190~1194
- 5 Xu Hongguang, Guan Shicheng, Fu Yuanxia *et al.*. Laser Induced Breakdown Spectroscopy of the Trace Metal Element Pb in Soil [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(4):577~581
许洪光, 管士成, 傅院霞等. 土壤中微量重金属元素 Pb 的激光诱导击穿谱 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(4):577~581
- 6 M. Gaft, I. Sapir-Sofer, H. Modiano *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy for bulk minerals online analyses [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, **62**(12):1496~1503
- 7 Tae-Woo Lee, Nikhil Hegde. In-situ diagnostics of chemically reacting flows using laser-induced breakdown spectroscopy [C]. *SPIE*, 2005, **5710**:130~137
- 8 Cristian A. D' Angelo, Diego M. Diaz Pace, Graciela Bertuccelli *et al.*. Laser induced breakdown spectroscopy on metallic alloys; Solving inhomogeneous optically thick plasmas [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, **63**(3):367~374
- 9 Nilesh K. Rai, A. K. Rai. LIBS-An efficient approach for the determination of Cr in industrial wastewater [J]. *J. Hazardous Materials*, 2008, **150**(3):835~838
- 10 P. S. Dalyander, I. B. Gornushkin, D. W. Hahn. Numerical simulation of laser-induced breakdown spectroscopy: modeling of aerosol analysis with finite diffusion and vaporization effects [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, **63**(2):293~304
- 11 G. Cristoforti, S. Legnaioli, V. Palleschi *et al.*. Effect of target composition on the emission enhancement observed in double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, **63**(2):312~323
- 12 V. Burakov, N. Tarasenko, M. Nedelko *et al.*. Time-resolved spectroscopy and imaging diagnostics of single pulse and collinear double pulse laser induced plasma from a glass sample [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, **63**(1):19~26
- 13 Ren Xifeng, Guo Guoping, Huang Yunfeng *et al.*. Experimental Investigations on Plasmon Assisted Transmission [J]. *Science in China Series G*, 2007, **37**(6):706~715
任希锋, 郭国平, 黄运锋等. 表面等离子体辅助光传送的实验研究 [J]. *中国科学 G 辑*, 2007, **37**(6):706~715
- 14 Xu Miaohua, Li Yutong, Yuan Xiaohui *et al.*. Generation of surface electrons in femtosecond laser-solid interactions [J]. *Science in China Series G*, 2006, **36**(2):158~163
徐妙华, 李玉同, 远晓辉等. 飞秒激光与固体靶相互作用中产生表面电子的实验研究 [J]. *中国科学 G 辑*, 2006, **36**(2):158~163
- 15 Cao Zhenxin, Wu Lenan. Display technique based on surface plasmon resonant effect [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, **53**(8):857~864
曹振新, 吴乐南. 基于表面等离子体共振效应的显示技术 [J]. *科学通报*, 2008, **53**(8):857~864
- 16 Chen Zhan, Wang WenCheng, Wang Gongming *et al.*. Enhancement of the Second harmonic generation at the silver surfaces with surface plasmons [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1983, **28**(15):905~909
陈 湛, 王文澄, 王恭明等. 银膜表面等离子体激元的光学倍频增强效应 [J]. *科学通报*, 1983, **28**(15):905~909
- 17 O. Barthe'lemy, J. Margot, M. Chaker *et al.*. Influence of the laser parameters on the space and time characteristics of an aluminum laser-induced plasma [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, **60**(7-8):905~914
- 18 C. Colón, A. Alonso-Medina. Application of a laser produced plasma; Experimental Stark widths of single ionized lead lines [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, **61**(7):856~863
- 19 F. Bredice, H. Sobral, M. Villagran-Muniz *et al.*. Real time measurement of the electron density of a laser generated plasma using a RC circuit [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2007, **62**(8):836~840
- 20 X. Z. Zhao, L. J. Shen, T. X. Lu. Spatial distribution of electron density in microplasma produced by laser ablation of solids [J]. *Appl. Phys. B*, 1992, **55**(4):327~330
- 21 Yang Beiqian, Zhang Jiyan, Han Shensheng *et al.*. Space-resolved diagnosis for the electron density of laser-produced aluminum plasma [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**:703~706
杨柏谦, 张继彦, 韩申生等. Al 激光等离子体电子密度的空间分辨诊断 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(5):703~706
- 22 K. Dittrich, R. Wennrich. Laser Vaporization in Atomic Spectroscopy-Review [J]. *Prog. Analyt. Atom. Spectrosc.*, 1984, **7**(2):139~156
- 23 Z. Andreic. Dynamics of Aluminum plasma produced by a nitrogen laser [J]. *Physica Scripta*, 1993, **48**:331~339
- 24 H. R. Griem. *Plasma Spectroscopy* [M]. New York: McGraw-Hill, 1964. 139~140
- 25 W. Lochte-Holtgreven. *Evaluation of Plasma Parameter in Plasma Diagnostics* [M]. North Holland: Amsterdam, 1968. 156~157
- 26 Takashi Fujimoto. Kinetics of ionization-recombination of a plasma and population density of excited ions [J]. *J. Phys. Soc. Jap.*, 1979, **47**:265