

激光诱导铝合金等离子体的时间演化过程研究

郑培超 刘红弟 王金梅 于斌 杨蕊 张斌 王晓蒙

(重庆邮电大学光电工程学院, 重庆 400065)

摘要 为了深入研究激光诱导等离子体的物理特性,提高激光诱导击穿光谱(LIBS)技术的测量精度和可靠性,对激光诱导等离子体的时间演化过程进行了实验研究。采用 ICCD 相机对激光诱导铝合金等离子体进行快速成像,发现激光诱导铝合金等离子体的寿命大约为 30 μs ,等离子体呈现明显的分层结构,并且不同区域的面积和温度在等离子体的时间演化过程中呈现不同的特征。通过玻尔兹曼斜线法和 Stark 展宽法计算了铝合金等离子体电子温度和电子数密度的时间演化规律。实验结果表明,等离子体的电子激发温度在 6000 K~9000 K 之间,且前 3 μs 下降较快;等离子体电子数密度为 10^{17} cm^{-3} 量级,并随 ICCD 探测延迟时间缓慢降低。等离子体电子温度和电子数密度的时间演化规律与 ICCD 相机快速成像结果一致。

关键词 光谱学; 时间演化; 激光诱导击穿光谱; 快速成像; 电子温度; 电子数密度

中图分类号 O433.4; O562.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1015001

Study on Time Evolution Process of Laser-Induced Aluminum Alloy Plasma

Zheng Peichao Liu Hongdi Wang Jinmei Yu Bin Yang Rui
Zhang Bin Wang Xiaomeng

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications,
Chongqing 400065, China)

Abstract In order to further investigate the physical properties of the laser-induced plasma and improve the measurement precision and reliability of the laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) technology, the time evolution process of the laser-induced plasma is studied experimentally. Through fast imaging of the laser-induced aluminum alloy plasma using the ICCD camera, it is found that the lifetime of the laser-induced aluminum alloy plasma is about 30 μs , the plasma has an obvious hierarchical structure, and furthermore the areas and temperatures of different regions present different characteristics during the time evolution process. The time evolution process laws of the electron temperature and the electron number density are obtained using the Boltzmann plot method and Stark broadening of line, respectively. The results show that the electron excitation temperature of the plasma ranges from 6000 K to 9000 K, and it decreases rapidly in the first 3 μs . Besides the electron number density is in the order of 10^{17} cm^{-3} , it decreases slowly with ICCD detection delay time. The time evolution laws of electron temperature and the electron number density are in agreement with that of the fast imaging by the ICCD camera.

Key words spectroscopy; time evolution; laser-induced breakdown spectroscopy; fast imaging; electron temperature; electron number density

OCIS codes 300.2140; 300.6170; 300.6210; 300.6365; 350.5400

收稿日期: 2014-03-21; **收到修改稿日期**: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61205149)、重庆市科技人才培养计划(cstc2013kjrc-qnr40002)、重庆市自然科学基金(CSTC2012JJA50033)、南岸区科技攻关项目、重庆市教委科技项目(KJ120509)

作者简介: 郑培超(1980—),男,副教授,硕士生导师,主要从事等离子体光谱方面的研究。

E-mail: zhengpc@cqupt.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引言

激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术是一种多用途的原子发射光谱分析方法, 该技术在过去几十年里得到非常迅速的发展。自 1962 年 Brech 等^[1]首次报道该技术以来, LIBS 技术以其具有的快速实时、多元素同时检测、无需复杂预处理和可远程非接触检测等显著优点^[2], 被广泛运用于环境、文物、生物医疗和材料^[3-6]等领域。目前对于 LIBS 技术的研究主要聚焦在降低检出限, 提高精度和可靠性以及扩展应用领域方面, 并且已经取得了许多成果^[7-11]。另外, 由于等离子体的电子温度、电子数密度、等离子体体积膨胀等因素会显著影响谱线强度、背景辐射强度, 进而影响 LIBS 技术的测量精度和可靠性。因此, 一些研究人员对激光诱导等离子体的物理特性进行深入研究, 如 Tavassoli 等^[12]对激光诱导铝合金微等离子体时间和空间的演化进行了研究, 发现在激光脉冲期间, 等离子体发射强度逐渐增强, 激光脉冲结束以后, 等离子体发射强度开始下降。增加激光脉冲能量同时保持较短延迟时间会明显增强等离子体发射强度, 但是在较大延时条件下增大激光脉冲能量, 等离子体发射强度增强并不显著。Cristoforetti 等^[13]采用时间和空间分辨成像对共线双脉冲装置的 LIBS 信号进行了研究, 发现 LIBS 信号增强与环境气压有关, 双脉冲等离子体羽体体积和空间分布与单脉冲明显不同。Guo 等^[14]对激光诱导纯金属铬和高纯度硅等离子体进行快速成像, 研究了空间约束和磁场-空间双重约束下等离子体的空间分布演化过程, 发现在约束条件下等离子体得到明显压缩, 等离子体信号较强而且稳定, 持续时间长。

虽然目前对激光诱导等离子体物理特性的研究已取得一些成果, 但研究大多集中在等离子体的形成机理、等离子体的各种影响因素等方面, 鲜见对等离子体发射强度和温度的局部分布及其变化规律的研究。本文通过使用 ICCD 照相机对激光诱导铝合金等离子体进行快速成像, 对激光诱导等离子体的空间分布、温度分布、发射强度及其变化规律进行了研究, 并且计算了激光诱导铝合金等离子体电子温度和电子数密度, 对它们的时间演化规律进行了研究。

2 实验装置

图 1 为本实验的 LIBS 装置示意图。该装置主要由 Nd:YAG 脉冲激光器 (Quantel, Ultra 100),

光学系统, 三维载物台, 光谱仪 (英国 Andor, SR-750-A 型) 和 ICCD 探测器 (英国 Andor, iStar 型) 组成。其中脉冲激光器的工作波长为 1064 nm, 脉宽为 8 ns, 重复频率为 20 Hz, 输出的最大单脉冲能量为 100 mJ, 发散角小于 1 mrad。ICCD 探测器的像素为 2048 pixel \times 512 pixel, 响应波长范围为 200~900 nm。实验中, 激光束经焦距为 100 mm 的平凸石英透镜 (可以承受 100 mJ 的激光脉冲能量而不被损坏) 聚焦于固体样品表面激发产生高温等离子体。等离子体的发射光谱信号被焦距为 75 mm 平凸石英透镜和 30 mm 的双凸石英透镜组成的收集装置收集, 两透镜间距为 70 mm, 耦合装置将光谱信号耦合到光纤经光纤输送到光谱仪进行分光, 并由 ICCD 探测器接收和检测。最后由光谱软件对探测到的光谱数据进行处理。本实验对铝合金样品进行实验, 为了提高实验稳定性和重复性, 对铝合金样品进行了抛光处理, 并用超声波清洗机进行清洗处理。样品被固定在三维移动平台上, 并使其稳定平移以改变激光在样品表面上作用点, 保证样品测量的均匀性。等离子体图像由安装微距镜头 (Nikon AF 60 mm/2.8 D) 的 ICCD 相机拍摄。

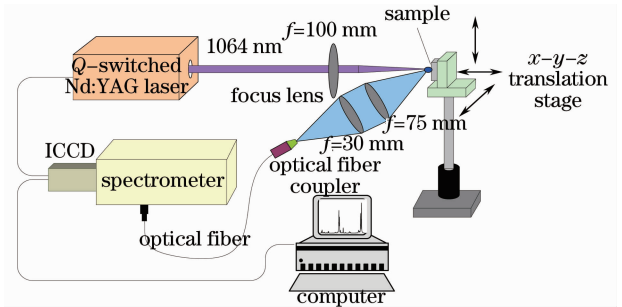


图 1 LIBS 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LIBS experimental setup

3 实验结果与分析

3.1 等离子体的时间演化图像

为了在一个快速的时间标度上研究铝合金等离子体的演化规律, 采用探测延迟和探测门宽可调的 ICCD 相机对激光诱导铝合金等离子体进行快速拍摄, 拍摄装置示意图如图 2 所示。在拍摄过程中保持 ICCD 相机与铝合金样品表面呈 45° 夹角, 并保持激光脉冲能量和 ICCD 门宽分别为 12 mJ 和 10 μ s。图 3 给出了探测延迟时间为 300 ns 时的激光诱导铝合金等离子体的图像。

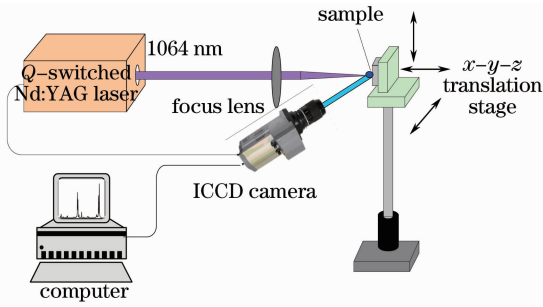


图 2 ICCD 相机照相装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ICCD camera photograph setup

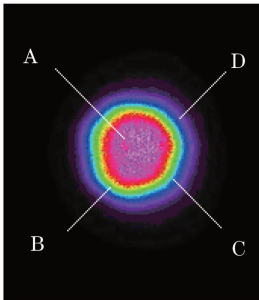


图 3 激光诱导铝合金等离子体图像

Fig. 3 Image of the laser-induced aluminum alloy plasma

图 3 中等离子体不同部位的颜色代表等离子体不同的发射强度,为了便于分析,将这些区域标记为 A, B, C, D 4 个区域。由图 3 可以看出,激光诱导铝合金等离子体的发射强度分布是不均匀的,其中等离子体中部深红色 A 区的发射强度最强,其次是紧靠中心的鲜绿色 B 区,然后是范围较窄的蓝色 C 区,最后是等离子体边缘较大的紫色 D 区。实际上,等离子体的发射强度的分布也可以反映等离子体的温度分布,其温度分布大致为从中心向外温度依次降低。等离子体的发射强度和温度分布说明了激光诱导等离子体具有分层结构,这与先前的研究结果^[15-16]是一致的。等离子体可分为密度较高的热等离子体区和密度低的冷等离子体区^[17],样品上激光脉冲作用点附近的区域为热等离子体区,此区域只有离子态物质存在,区域内的粒子具有很高的动能,彼此间的碰撞非常激烈,导致较强的韧致辐射。此区域之外的区域是低温等离子体区,该区域等离子体温度通常只有几千开尔文,此区域的物质以离子态、原子态和分子态形式存在。

利用 ICCD 相机采集了延迟时间在 50 ns ~ 32 μs 范围内的等离子体图像,最终得到 24 幅不同延迟时间的铝合金等离子体图像,结果如图 4 所示。

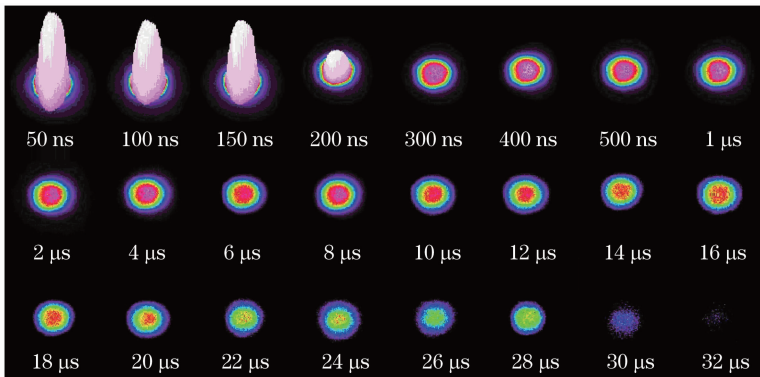


图 4 激光诱导铝合金等离子体的快速摄像图随 ICCD 延迟时间的变化

Fig. 4 Fast images of laser-induced aluminum alloy plasma with ICCD delay time

从等离子体的时间演化过程可以看出,等离子体形成过程发生在大约前 50 ns,在 50 ns ~ 32 μs 时间范围内,等离子体整体的发射强度逐渐下降,在前 12 μs 时间范围等离子体信号较强,之后随着时间的增加,等离子体信号逐渐减弱,尤其是 30 μs 以后基本上观察不到等离子体信号。这是因为当激光能量密度足够强时,激光脉冲前沿迅速对样品材料加热,使其熔化和气化并且分布在样品表面形成层状结构,一部分激光能量用于加热被气化的样品,另一部分激光能量被等离子体和其后面的样品吸收。由此

可见,等离子体的形成过程在激光脉冲结束后不久完成,而激光诱导等离子体的寿命是有限的,一般为 1 μs 至数百微秒,期间等离子体温度不断降低,最后离子重新聚合、凝结,等离子体消失在空气中。在前 300 ns 时间内,等离子体的温度快速下降,300 ns 之后,等离子体温度开始缓慢下降,在较长时间里温度变化范围很小。因为高温等离子体会向外急剧膨胀扩散,极短的时间内将在该等离子体周围形成高压区域,在高压驱动下,将伴随冲击波^[18]。在等离子体的时间演化过程中,起初 4 个区域的面积大小

关系为 $S_A > S_D > S_B > S_C$, 随着时间的推移, 中心 A 区面积逐渐减小, 向中心收缩, 而 C 区面积在较长时间范围内基本保持不变, 进而 B 区的面积逐渐扩大向中心延伸, D 区由于与周围大气环境接触, 温度降低速度较快, 因而面积逐渐减小, 在 $22 \mu\text{s}$ 以后, A 区基本消失, 此时 B 区面积最大, 其次是 D 区和 C 区。根据各个区域面积的变化情况不难发现, 在等离子体的时间演化过程中, A 区域温度下降速度最快, 其次是 D 区域边缘部分, 最后是 B 和 C 区域, 这可能是由于 A 区存在较强的韧致辐射、自吸收效应以及与 B 区的能量交换导致温度快速下降, 而 D 区域与周围大气环境接触, 不仅接触面积大而且两者温差大, 因而温度下降较快, 而 B 和 C 区域处于 A 和 D 区域之间, 韧致辐射不及 A 区域, 同时能量交换又不及 D 区域, 因而温度下降速度最慢, 最终的结果是等离子体各个部位温度趋于一致, 等离子体慢慢消失。在对物质元素进行定性和定量分析时, 必须同时考虑等离子体发射信号的强度和信号背景的干扰, 从等离子体时间演化过程可以看出, ICCD 延迟时间为 $2 \sim 8 \mu\text{s}$ 时比较合适。

3.2 等离子体电子温度的时间演化过程

实验中观察了激光诱导铝合金等离子体在 $200 \sim 700 \text{ nm}$ 波长范围内的光谱, 虽然出现了 Al 元素的许多特征谱线, 但是相对强度比较强的谱线较少, 并且一些特征谱线受到其他杂质元素谱线的干扰, 会严重影响分析结果。参考原子光谱标准与技术数据库 NIST^[19] 的谱线信息, 经过分析和选择, 最后选择 Al I 256.80 nm, Al I 257.51 nm, Al I 308.22 nm 和 Al I 309.27 nm 这 4 条谱线进行分析。此外, 从铝合金样品在 $250 \sim 320 \text{ nm}$ 波长范围的激光等离子体原子发射光谱中还可以观察到 Mg 和 Mn 元素的一些特征谱线, 如图 5 所示, 其中包括 Mg I 285.21 nm, Mn I 279.83 nm, Mn I 280.41 nm 和 Mn II 293.77 nm, Mn II 294.93 nm 和 Al I 305.71 nm, Al I 308.22 nm 和 Al I 309.27 nm。

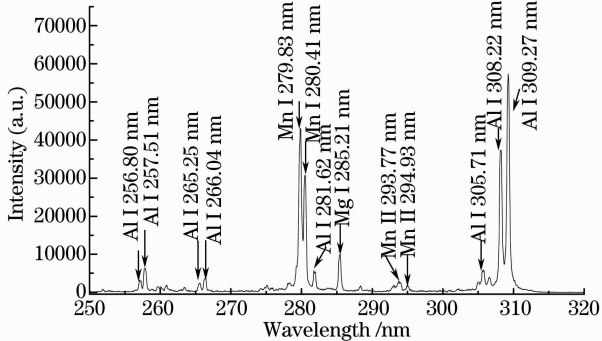


图 5 铝合金样品 LIBS 光谱

Fig. 5 LIBS spectra of aluminum alloy

293.77 nm, Mn II 294.93 nm 等杂质谱线。

对等离子体电子温度进行测算需要满足: 等离子体在一定时间和空间范围内处于局部热平衡 (LTE) 状态, 等离子体是光学薄的, 可以忽略自吸收效应, 而且不同能级的粒子数分布满足玻尔兹曼分布。此时, 激光诱导等离子体的两个能级 E_k 和 E_i 跃迁的谱线强度可表示为^[20]

$$I_{\lambda}^{ki} = N_s A_{ki} \frac{g_k \exp(-E_k/k_B T)}{U_s(T)}, \quad (1)$$

式中 A_{ki} 为两能级的跃迁几率, N_s 为发射粒子数密度 (单位: cm^{-3}), g_k 为统计权重, E_k 为受激能级的能量, T 为电子温度, $U_s(T)$ 为等离子体的配分函数, k_B 为玻尔兹曼常数。在实际的 LIBS 实验中, 由于光学系统的光学效率会对谱线强度产生影响。因此根据玻尔兹曼定律实验中测得的谱线强度可以表示为

$$I_{\lambda}^{ki} = FC_s A_{ki} \frac{g_k \exp(-E_k/k_B T)}{U_s(T)}, \quad (2)$$

式中 C_s 为样品中分析元素的含量, F 为实验参数。配分函数 $U_s(T)$ 可表示为

$$U_s(T) = \sum_k g_k \exp\left(-\frac{E_k}{k_B T}\right). \quad (3)$$

为了得到玻尔兹曼作图法的一般形式, 对 (2) 式两边取自然对数得到

$$\ln \frac{I_{\lambda}^{ki}}{g_k A_{ki}} = -\frac{E_k}{k_B T} + \ln \frac{FC_s}{U_s(T)}. \quad (4)$$

根据 (4) 式, 以 E_k 为横坐标, $\ln[I_{\lambda}^{ki}/(g_k A_{ki})]$ 为纵坐标, 利用实验测得的数据拟合曲线, 所得曲线斜率 $-1/(k_B T)$ 与等离子体电子温度有关。通过找到光谱中多种相同电离态的谱线, 利用原子谱线的相对强度作玻尔兹曼斜线来确定等离子体电子温度。利用选取的 4 条 Al 元素特征谱线确定等离子体电子温度的玻尔兹曼斜线如图 6 所示。

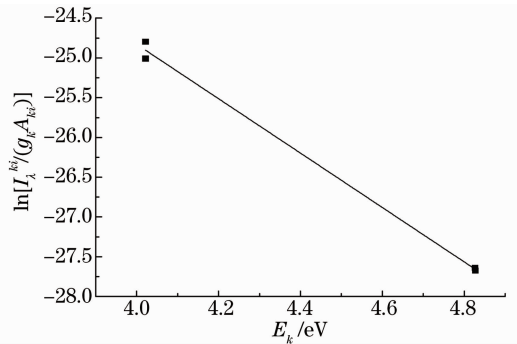


图 6 Al 原子谱线的玻尔兹曼斜线

Fig. 6 Boltzmann plot built with the emission line of Al I
为了研究激光诱导铝合金等离子体电子温度的时间演化规律, 实验中保持激光脉冲能量为 90 mJ。

实验中选择 ICCD 探测门宽值时,通常需要同时考虑光谱信号强度和信噪比。如果 ICCD 门宽值过小,采集到的光谱信号会比较弱,主要表现为原子谱线粗糙,不够平滑。在参照相关研究^[21-22]的基础上,同时根据本课题组先前研究^[23],最终将 ICCD 门宽值设置为 $10 \mu\text{s}$ 。改变 ICCD 探测延迟时间,通过玻尔兹曼斜线法计算出相应等离子体电子温度。为了减小实验误差,在每个参数条件下重复 20 次,对计算结果取平均值,等离子体电子温度随 ICCD 延迟时间的变化关系如图 7 所示。

从图 7 可以看出,ICCD 探测延迟时间在 $1 \sim 3 \mu\text{s}$ 时,Al 等离子体电子温度急剧下降,温度从 9165 K 下降到 6535 K ,之后随着 ICCD 探测延迟时间的继续增大,等离子体电子温度开始缓慢降低,表明在等离子体的整个生命周期里,等离子体的膨胀速度和温度变化速度并不相同,在等离子体膨胀的初期,其膨胀速度极快,温度急剧下降,之后膨胀速度减慢,温度也随之缓慢下降,并且整个过程伴随着与周围能量交换。该结果与前述 ICCD 相机对等离子体快速成像规律一致。

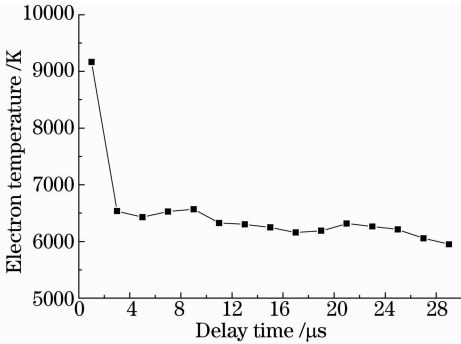


图 7 激光诱导铝合金等离子体电子温度随 ICCD 延迟时间的变化

Fig. 7 Electron temperature of laser-induced aluminum alloy plasma with ICCD delay time

3.3 等离子体电子数密度的时间演化过程

虽然激光诱导等离子体的发射谱线展宽是由多种展宽机制共同作用的结果。但是在高温,高密度的等离子体状态下共振吸收展宽,多普勒展宽,仪器展宽可以忽略,Stark 展宽成为主要展宽机制^[24]。由于电子和离子都会对 Stark 展宽做贡献,等离子体辐射光谱中由于 Stark 展宽导致的谱线宽度为^[25]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right) + 3.5A\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right)^{1/4} \times (1 - 0.75N_D^{-1/3})\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right), \quad (5)$$

式中等号右边第一项为电子碰撞作用导致的展宽,第二项为离子展宽修正值, A 为离子展宽参数, ω 为电子碰撞参数, N_D 为 Debye 球中的粒子数, N_e 为等离子体的电子数密度,其中离子对线宽的贡献非常小可以忽略。忽略次要展宽贡献后,(5)式可以简化为^[26]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right). \quad (6)$$

通过(6)式,只要知道谱线线宽,以及对应温度下的碰撞系数就可以求得电子数密度。利用洛伦兹函数对 Al I 308.22 nm 谱线进行拟合,拟合结果如图 8 所示。

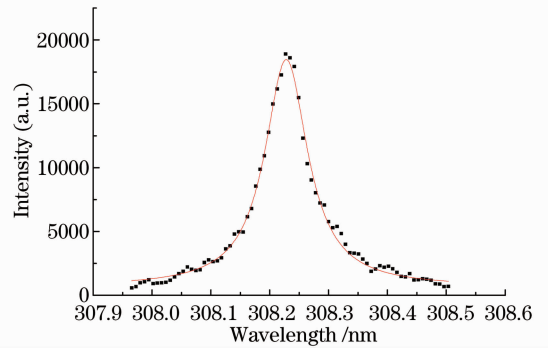


图 8 Al I 308.22 nm 谱线 Stark 展宽的洛伦兹函数拟合
Fig. 8 Lorentz function fitting of the Al I 308.22 nm line Stark broadening

为了探究铝合金等离子体电子数密度的时间演化特性,实验中保持激光脉冲能量和 ICCD 门宽分别为 90 mJ 和 $10 \mu\text{s}$ 不变,改变 ICCD 探测延迟时间,通过洛伦兹函数拟合法,计算出相应电子数密度,电子数密度随 ICCD 延时变化的关系如图 9 所示。由图 9 可知,随着 ICCD 探测延迟时间的增大,电子数密度逐渐减小。这可能是由于自由电子和离子的复合作用,导致电子数密度随着 ICCD 探测延迟时间逐渐降低。

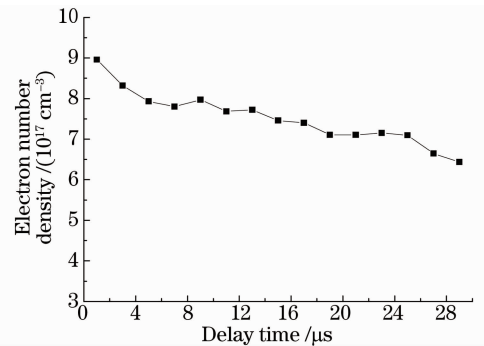


图 9 激光诱导铝合金等离子体电子数密度随 ICCD 延迟时间的变化

Fig. 9 Electron number density of the laser-induced aluminum alloy plasma with the ICCD delay time

3.4 局部热平衡验证

以上对等离子体温度和电子数密度的分析过程都是在 LTE 假设条件下进行的,因此有必要验证所得结果是否满足 LTE 状态,而 LTE 状态可以通过 WcWhirter 判据来判断^[27]

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} T_e^{1/2} \Delta E^3, \quad (7)$$

式中 T_e 是等离子体电子激发温度, ΔE 是谱线的最大能级差。本实验中温度的最大值为 9164.83 K, 上下能级差为 4.02 eV, 利用(7)式计算得到电子数密度的极限为 10^{16} cm^{-3} , 而实验中由于 Stark 展宽计算得到的电子数密度 N_e 远大于 10^{16} cm^{-3} , 可以看出在等离子体演化过程中使用局部热平衡假设是有效的。

4 结 论

采用 1064 nm 波长的调 Q 纳秒级 Nd:YAG 脉冲激光激发铝合金样品产生等离子体, 用 ICCD 照相机采集了不同延迟时间下的等离子体图像, 发现等离子体呈现明显的分层结构, 并且不同区域的面积和温度在不同的延迟时间下呈现出不同的特征。选择 Al I 256.80 nm, Al I 257.51 nm, Al I 308.22 nm 和 Al I 309.27 nm 4 条特征谱线对等离子体的电子温度和电子数密度进行计算和分析。通过玻尔兹曼斜线计算出等离子体的电子激发温度在 6000 K~9000 K 之间, 且前 3 μs 下降较快, 之后缓慢降低; 利用 Al I 308.22 nm 谱线 Stark 展宽计算出等离子体的电子数密度在 10^{17} cm^{-3} 量级, 并随 ICCD 探测延时缓慢降低。本实验结果对于提高 LIBS 技术测量精度和可靠性具有重要的理论价值。

参 考 文 献

- 1 F Brech, L Cross. Optical microemission stimulated by a ruby laser[J]. Appl Spectrosc, 1962, 16(2): 59-64.
- 2 A W Mizlerek, V Pallechi, I Schechter. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- 3 P K Srungaram, K K Ayyalasomayajula, F Yuyueh, *et al.*. Comparison of laser induced breakdown spectroscopy and spark induced breakdown spectroscopy for determination of mercury in soils[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2013, 87: 108-113.
- 4 S Duchêne, V Detalle, R Bruder, *et al.*. Chemometrics and laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) analyses for identification of wall paintings pigments[J]. Current Analytical Chemistry, 2010, 6(1): 60-65.
- 5 E M Emar, H Imam, M A Hassan, *et al.*. Biological application of laser induced breakdown spectroscopy technique for determination of trace elements in hair[J]. Talanta, 2013, 117: 176-183.
- 6 J D Pedarnig, P Kolmhofer, N Huber, *et al.*. Element analysis

- of complex materials by calibration-free laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Physics A, 2013, 112(1): 105-111.
- 7 Chen Jinzhong, Chen Zhenyu, Ma Ruiling, *et al.*. Effect of spatial confinement of carbon sheets on the soil plasma radiation characteristics[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0115002. 陈金忠, 陈振玉, 马瑞玲, 等. 碳片的空间约束对土壤等离子辐射特性的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0115002.
- 8 Yan Jing, Ding Lei, Ge Linlin, *et al.*. Research about analysis of heavy metals in liquid jet by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0215001. 闫 静, 丁 蕾, 葛琳琳, 等. 液体射流激光击穿光谱检测重金属研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0215001.
- 9 Du Chuang, Gao Xun, Shao Yan, *et al.*. Analyses of heavy metals by soil using dual-pulsed laser induced breakdown spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(4): 045202. 杜 闯, 高 勋, 邵 妍, 等. 土壤中重金属元素的双脉冲激光诱导击穿光谱研究[J]. 物理学报, 2013, 62(4): 045202.
- 10 Liu Lituo, Liu Jianguo, Zhao Nanjing, *et al.*. Application of correlative analysis with an alterable and scannable window in spectral automatic recognition laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1030002. 刘立拓, 刘建国, 赵南京, 等. 窗口可变滑动相关分析方法在激光诱导击穿光谱谱线自动识别中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1030002.
- 11 Wang Chunlong, Liu Jianguo, Zhao Nanjing, *et al.*. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy of heavy metals in water based on support-vector-machine regression [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(3): 0330002. 王春龙, 刘建国, 赵南京, 等. 基于支持向量机回归的水体重金属激光诱导击穿光谱定量分析研究[J]. 光学学报, 2013, 33(3): 0330002.
- 12 S H Tavassoli, Cravetchi I V, Fedosejevs R. Spatial and temporal evolution of laser-generated microplasmas [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2006, 34(6): 2594-2599.
- 13 G Cristoforetti, S V Legnaioli, V Pallechi, *et al.*. Characterization of a collinear double pulse laser-induced plasma at several ambient gas pressures by spectrally-and time-resolved imaging[J]. Applied Physics B, 2005, 80(4-5): 559-568.
- 14 L B Guo, W Hu, B Y Zhang, *et al.*. Enhancement of optical emission from laser-induced plasmas by combined spatial and magnetic confinement [J]. Optics Express, 2011, 19(15): 14067-14075.
- 15 M Corsi, G Cristoforetti, M Giuffrida, *et al.*. Three-dimensional analysis of laser induced plasmas in single and double pulse configuration [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(5): 723-735.
- 16 X Zeng, X L Mao, R Greif, *et al.*. Experimental investigation of ablation efficiency and plasma expansion during femtosecond and nanosecond laser ablation of silicon[J]. Applied Physics A, 2005, 80(2): 237-241.
- 17 R J Goldston, P H Rutherford. Introduction to Plasma Physics [M]. Boca Raton: CRC Press, 2010.
- 18 X Chen, B M Bian, Z H Shen, *et al.*. Equations of laser-induced plasma shock wave motion in air [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 38(1): 75-79.
- 19 NIST. NIST Atomic Spectra Database Lines Form [OB/OL]. 2014-08-26. http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html.
- 20 A Elhassan, A Giakoumaki, D Anglos, *et al.*. Nanosecond and femtosecond laser induced breakdown spectroscopic analysis of bronze alloys [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2008, 63(4): 504-511.
- 21 M S Cheri, S H Tavassoli. Quantitative analysis of toxic metals lead and cadmium in water jet by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Applied Optics, 2011, 50(9): 1227-1233.

- 22 A De Giacomo, M Dell'Aglio, R Gaudiuso, *et al.*. Effects of the background environment on formation, evolution and emission spectra of laser-induced plasmas[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2012, 78: 1–19.
- 23 P Zheng, H Liu, J Wang, *et al.*. Optimization of experimental condition by orthogonal test design in a laser-induced breakdown experiment to analyze aluminum alloys[J]. *Analytical Methods*, 2014, 6(7): 2163–2169.
- 24 A A I Khalil. A comparative spectroscopic study of single and dual pulse laser produced UV tin plasmas[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 45: 443–452.
- 25 J P Singh, S N Thakur. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* [M]. Oxford: Elsevier, 2007.
- 26 C Colon, G Hatem, E Verdugo, *et al.*. Measurement of the Stark broadening and shift parameters for several ultraviolet lines of singly ionized aluminum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 73(10): 4752–4758.
- 27 R W P McWhirter. *Plasma Diagnostic Techniques* [M]. New York: Academic Press, 1965.

栏目编辑:史敏