

液体射流双脉冲激光诱导击穿 Ca 等离子体温度和电子数密度研究

胡振华 张巧 丁蕾 王颖萍 郑海洋 方黎

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学研究室, 安徽 合肥 230031)

摘要 等离子体温度和电子数密度是激光诱导击穿光谱(LIBS)测量中的重要因素。采用两台 532 nm Nd:YAG 脉冲激光器作为光源击穿 CaCl₂ 样品溶液液体射流形成等离子体,得到了 300~450 nm 波段的发射光谱图,定性分析了 Ca II 离子发射谱线。实验中假设等离子体处于局部热平衡状态,根据 LIBS 公式,利用 Ca 的 6 条一价离子谱线的相对强度,通过 Boltzmann 斜线法得到了液体双脉冲 LIBS 等离子体温度约 10⁴ K,其等离子体电子温度和单脉冲 LIBS 相比要高,但和固体双脉冲 LIBS 相比略低。通过拟合 Ca II 393.366 nm 离子线得到等离子体电子数密度约为 10¹⁷ cm⁻³,并由实验结果讨论了等离子体温度和电子数密度随延时时间、脉冲间隔的变化规律,也证明了双脉冲 LIBS 较单脉冲 LIBS 更有优势。最后基于实验计算结果证明本实验的 Ca 等离子体满足局部热力学平衡。

关键词 激光技术;双脉冲;激光诱导击穿光谱;等离子体温度;电子数密度

中图分类号 O433 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0430004

Temperature and Electron Number Density of Liquid Jet Double-Pulse Laser Induced Breakdown Ca Plasma

Hu Zhenhua Zhang Qiao Ding Lei Wang Yingping Zheng Haiyang Fang Li

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

Abstract Plasma temperature and electron number density are important factors of the laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) measurements. The plasmas are generated using two 532 nm Nd:YAG pulsed lasers to ablate the plasma breakdown liquid jet of CaCl₂ solution. We get the spectrum of 300~450 nm band and analyze the Ca II emission lines. It is assumed that the plasmas produced in the experiment are in local thermodynamic equilibrium (LTE), according to LIBS formula the Ca plasma temperature of 10⁴ K is determined by using the Boltzmann plot method with 6 Ca II lines while the electron density of 10¹⁷ cm⁻³ is obtained from the Stark broadening of Ca II 393.366 nm line. The variations of plasma temperature and electron density with delay time and the time between two pulses are discussed based on experimental results. The advantage of double-pulse LIBS over single-pulse LIBS is proved. Experimental results show that the laser induced Ca plasma is in local thermodynamic equilibrium.

Key words laser technique; double-pulse; laser induced breakdown spectroscopy; plasma temperature; electron number density

OCIS codes 140.3440; 140.3540; 300.6365; 350.5400

1 引言

激光诱导击穿光谱(LIBS)是一种新型的物质元素分析技术,具有高灵敏度和多元素同时、快速测量等优点^[1,2]。虽然利用 LIBS 技术探测等离子体

较为简单,但是激光和物质相互作用产生等离子体是一个非常复杂的非线性过程。在利用 LIBS 技术进行测量时,等离子体电子温度和电子数密度是描述等离子体特性的两个重要参数^[3],与等离子体辐

收稿日期:2012-10-31;收到修改稿日期:2012-12-27

基金项目:中国科学院合肥物质科学研究院院长基金(Y03HG21136)资助课题。

作者简介:胡振华(1983—),男,博士后,主要从事激光光谱方面的研究。E-mail: ssshzh@mail.ustc.edu.cn

导师简介:方黎(1964—),男,研究员,主要从事激光光谱方面的研究。E-mail: fangli@aiofm.ac.cn

射光谱密切相关。

对激光诱导等离子体的性质及形成机理的研究在目前尚处于定性理解阶段,还需要大量的实验与理论研究。国内外很多学者对此已经进行了深入的研究。Singh 等^[4]对在大气环境下的硅样品进行了研究,并计算出了等离子体温度随时间的变化规律。Stavropoulos 等^[5]分别用纳秒和皮秒量级的 Nd:YAG 激光对金属样品中的 Al, Mg, Fe 与 Si 等元素进行了研究,得出了等离子体温度与激光能量、延迟时间的关系并进行了比较。Pérez-Tijerina 等^[6]研究了激光诱导等离子体中电子密度和温度随空间变化的关系。Zhao 等^[7]通过测量 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。Man^[8]对 Ti 原子进行研究,分析了等离子体温度随时间的变化关系。唐晓闫等^[9]对激光诱导 Al 等离子体的温度的演化特性进行了研究,并分析了不同背景气体的影响。杨柏谦等^[10]测定了 Al 原子激光等离子体中 K 壳层的发射光谱,并利用谱线翼部的 Stark 展宽测量电子密度空间分布的轮廓。张树东等^[11]对激光诱导 Al 等离子体温度随激光能量的变化特性进行了研究。

在实际应用中,LIBS 检测技术较低的灵敏度制约了该技术更深入的发展和更广泛的应用,特别是

对液体方面的研究甚少,而使用双脉冲 LIBS 来研究能较大地提高 LIBS 检测技术的灵敏度、光谱信号强度和稳定性,在喷射液体表面点击穿,可以避免波动等因素的影响^[12,13]。为此本课题组使用了双脉冲 LIBS 方法,对液体射流的等离子体光谱进行了实验研究。实验所采用的双脉冲激光法是由两台激光器产生的两束激光,一束用于产生等离子体为电离激光束,另一束则用于对已产生的等离子体施加影响^[14],研究作用激光束对产生等离子体时间演化过程的影响。初步研究结果表明,该方法能很好地增强传统的 LIBS 技术中光谱信号强度和稳定性,同时也具有更低的元素含量检出限。

本文采用激光发射光谱法,研究了液体射流 Ca 双脉冲激光诱导等离子体光谱技术增强辐射光谱强度的机理,并讨论了双脉冲激光等离子体的温度和电子数密度随时间及脉冲间隔的变化规律。

2 实验装置

双脉冲 LIBS 实验装置工作原理如图 1 所示,主要由光源、进样系统、光信号接收系统组成,采用了两台 2 倍频 532 nm Nd:YAG 调 Q 激光器,激光器 I 脉宽 8 ns,激光能量约 25 mJ,激光器 II 脉宽 10 ns,激光能量 115 mJ。

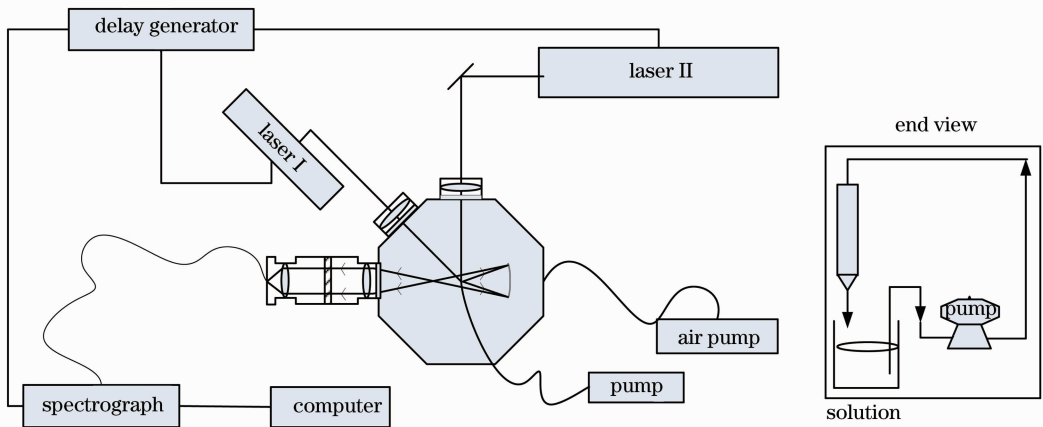


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment setup

样品采用射流进样技术,将待测样品液体通过加工过的玻璃管与蠕动泵相连,在竖直方向产生射流,通过调节蠕动泵转速控制射流的喷射速度,喷射液流的速度与移液管的直径密切相关,移液管的喷口呈圆形,通过成像法测量得到液流直径约为 0.3 mm。

激光器 I 出射的激光通过一块 45°全反射镜片与光谱仪接收方向成 45°,再通过一块 90 mm 的平

凸透镜,聚焦在腔内垂直流下的液流上,激光器 II 出射的激光经过一块全反射镜片与光谱仪接收方向成 90°,同样通过一块 90 mm 的平凸透镜,并击中垂直流下的液流。实验中两激光聚焦点在液流上同一位置,距离移液管下喷口 2~3 mm。

聚焦的激光将样品液流瞬间击穿产生等离子体,处于激发态的金属原子或离子会发射出较强并

且有特征波长的谱线,与激光器 II 入射光束垂直的方向上,有一球面反射镜收集等离子体的发射光谱信号,球面镜收集立体角约为 2.0 sr,收集到的等离子体光经过两个透镜传输并会聚,通过光纤耦合进入双通道光纤光谱仪,和一般的 LIBS 装置相比具有较高的光信号接收效率。

光谱仪与计算机相连接,光谱仪是荷兰 Avantes 公司生产的双通道光纤光谱仪,通过自行开发的计算机软件进行数据采集和存储。光谱仪包括光纤接头、准直镜、聚焦镜和衍射光栅,带有 2048 pixel CCD 探测器阵列,通过 USB 接口连接到计算机上。光谱仪在波长范围 194~465 nm 分辨率 0.13 nm,光栅 1200 line/mm;在波长范围 438~966 nm 分辨率 0.26 nm,光栅 600 line/mm^[15]。

3 分析与讨论

3.1 谱线标识

实验中激光频率为 1 Hz,激光器 I 能量约 25 mJ,激光器 II 能量约 115 mJ,光谱仪积分延时 0.2 μs,积分时间 1.1 ms,光谱仪的积分起始时间与激光器 II 出光时间一致,两激光器出光之间间隔 2.8 μs,得到双脉冲激光条件下 5 g/L 的 CaCl₂ 在波长范围 300~450 nm 的光谱如图 2 所示,根据美国国家标准与技术研究院 (NIST) 的原子光谱标准与技术数据库和观测到的等离子体光谱图可知,产生的光谱线大多在紫光和紫外区,在这个波段范围内可以观察到 Ca II 的 6 条离子谱线分别是 315.887、317.933、370.603、373.731、393.366 和 396.847 nm 离子谱线。

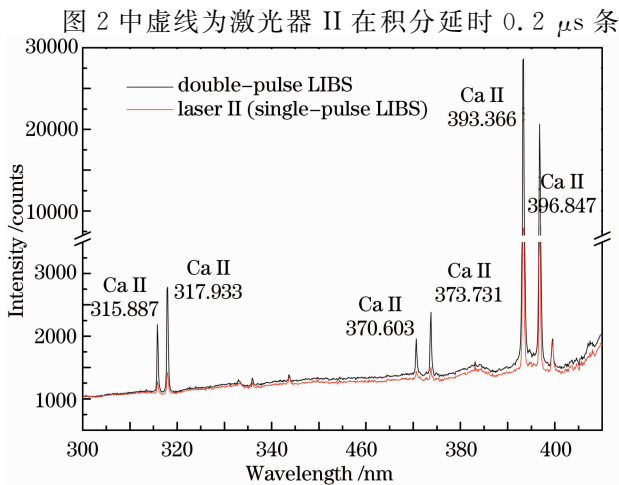


图 2 300~450 nm Ca 元素激光诱导击穿光谱
Fig. 2 300~450 nm laser-induced breakdown spectroscopy of Ca

件下获得的单脉冲 LIBS 光谱图,将图中单脉冲和双脉冲 LIBS 对比,显然利用双脉冲 LIBS 技术采集的光谱和传统单脉冲 LIBS 技术采集的光谱相比在信号强度上有很程度的增强^[16],目前已经有较多文献证明双脉冲 LIBS 比单脉冲 LIBS 信号上有增强并解释了可能的原因^[3,4,17]。

3.2 等离子体电子温度计算

激光诱导击穿等离子体是一个瞬态过程,在激光激发后一小段时间以后,等离子体进入局部热平衡状态(LTE)。在局部热平衡条件下,等离子体中的各种温度(电子温度、离子温度和激发温度)均近似相等^[18],因此可以利用等离子体发射光谱测量电子温度的一般方法,也就是通过测量谱线相对强度,做 Boltzmann 斜线来求出等离子体电子温度。等离子体电子温度测量的各种光谱方法都是基于等离子体在每一个小体积元中满足局部热力学平衡,原子或离子束缚态布居满足 Boltzmann 分布,因此等离子体温度可以根据

$$\ln \frac{I_{ki} \lambda_{ki}}{g_k A_{ki}} = -\frac{E_k}{k_B T_e} + \ln \frac{N(T)}{U(T)} \quad (1)$$

计算,其中 k 和 i 分别为谱线跃迁的上下能级, λ 为跃迁波长, A_{ki} 为自发跃迁几率, I_{ki} 为所测谱线的相对强度, E_k 和 g_k 分别是上能级的激发能量和统计权重, k_B 是 Boltzmann 常数(8.617×10^{-5} eV/K)。在求解等离子体温度时,右边 E_k 的数值为横坐标,左边的数值为纵坐标,然后选取同一元素同一电离态的不同谱线进行拟合,通过线性拟合的斜率就可以计算出等离子体电子温度。

如果这几条谱线属于同一个电离级次,比如都是原子或一价离子谱线,此时总粒子数密度 $N(T)$ 和配分函数 $U(T)$ 相同,因而 $-1/kT$ 和 $\ln[N(T)/U(T)]$ 都是常数,可以用(1)式计算等离子体温度。反之,若几条谱线不是相同的电离态,选用的谱线既有原子谱线又有离子谱线,其配分函数 $U(T)$ 不相等,并且激发能量 E_k 不是在同一标准下,如一价离子和原子激发能之间相差一个电离能级,就不能再用(1)式来计算等离子体温度。

选 Ca 元素的 6 条离子谱线来测定电子温度,表 1 列出了这 6 条 Ca 一价离子的谱线参数。

图 3 为利用 6 条 Ca 离子发射谱线得到的 Ca 样品 Boltzmann 斜线,谱图采集条件是在积分延迟 0.2 μs,两激光器之间出光脉冲间隔 2.8 μs,光谱仪积分时间 1.1 ms 实验条件下获得的 Ca 离子谱线光谱所做的 Boltzmann 斜线,其中横坐标为相应跃迁

上能级的能量,单位为 eV,纵坐标为 $\ln \frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}$ 的值,通过最小二乘法拟合得到的直线斜率为 -1.0842,从而计算出电子温度为 10703 K。

表 1 Ca 元素谱线的谱线参数

Table 1 Spectrum parameters of Ca

	NIST wavelength /nm	$A_{ki}/(10^8 \text{ Hz})$	E_{ek}/eV	g_k
Ca II	315.887	3.1	7.047168	2
Ca II	317.933	3.6	7.04955	4
Ca II	370.603	0.88	6.467875	2
Ca II	373.731	1.7	6.467875	2
Ca II	393.366	1.47	3.150984	2
Ca II	396.847	1.4	3.123349	2

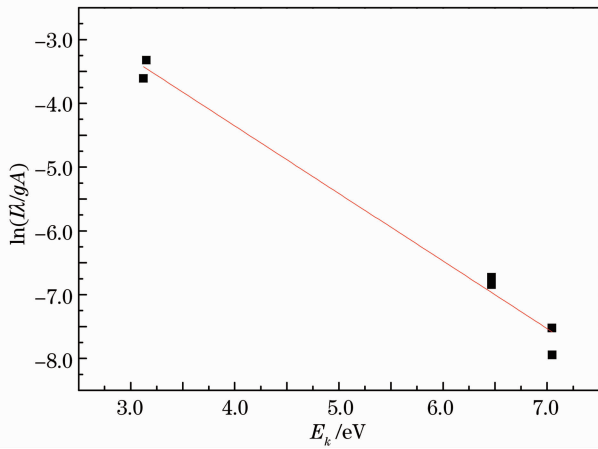


图 3 Ca II 的 Boltzmann 图

Fig. 3 Boltzmann figure of Ca II

通过做 Boltzmann 斜线得到单脉冲和双脉冲激光作用下等离子体电子温度随积分延时的变化如图 4 所示,等离子体温度变化和积分延时存在着关联,随着积分延时的增加,等离子体电子温度近似单调地上升到最大后开始缓慢下降,由于单脉冲 LIBS 在积分延时 2.5 μs 后信号较弱,无法得到此后的等离子体电子温度。两台激光器单独作用时(单脉冲 LIBS)的等离子体电子温度比双脉冲激光作用时的等离子体电子温度要低 1000~2000 K,也就是说激光器单独作用时,激光器能量越低,等离子体电子温度就越低。同时由于激光器 II 的能量较高,得到的温度轮廓形状和双脉冲 LIBS 的温度轮廓相似,可以说明在实验中双脉冲 LIBS 信号的增强可能和第二束激光有较大关系。在 0.5 μs 左右单脉冲激光作用和双脉冲激光作用时等离子体温度都达到了最大值,结合谱线信号随积分时间变化,此时可能是背景辐射降到较低的水平,谱线强度达到最大,因此通过谱线强度计算得到的等离子体温度也达到最大

值。对于单脉冲 LIBS,等离子体温度在 7500~10000 K 之间变化,比固体 Ca 样品^[19]的双脉冲激光作用时等离子体温度低 2000~3000 K,虽然固体样品中使用的激光能量较低,但其等离子体温度仍比液体中高,因此认为液体中样品等离子体温度较低可能原因是由于液体使正在扩张的等离子体快速冷却,同样 Rifai 等^[20,21]也得到了相似的实验结果。

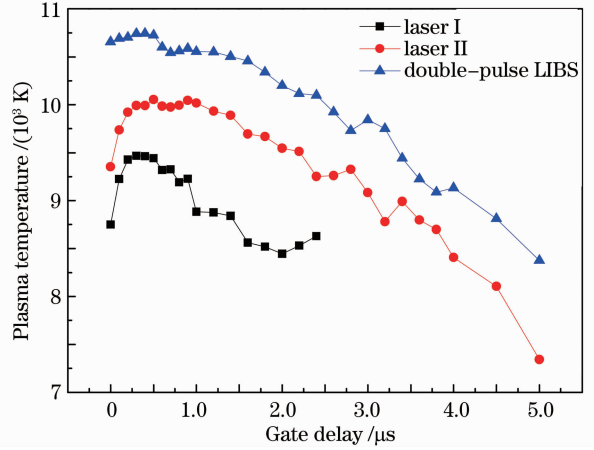


图 4 单脉冲和双脉冲激光作用下等离子体电子温度随延时时间变化

Fig. 4 Single- and double-pulse LIBS plasma electron temperature changing with different gate delay

图 5 为单脉冲和双脉冲激光作用下等离子体温度随脉冲间隔变化曲线,为了比较双脉冲在不同脉冲间隔时的增强情况,图 5(b)中 4 个点代表双脉冲在不同脉冲间隔下的 4 次单脉冲实验。从图中可以看到随着脉冲间隔的增加,等离子体电子温度和谱线强度随脉冲间隔变化的增长方式类似,先是快速

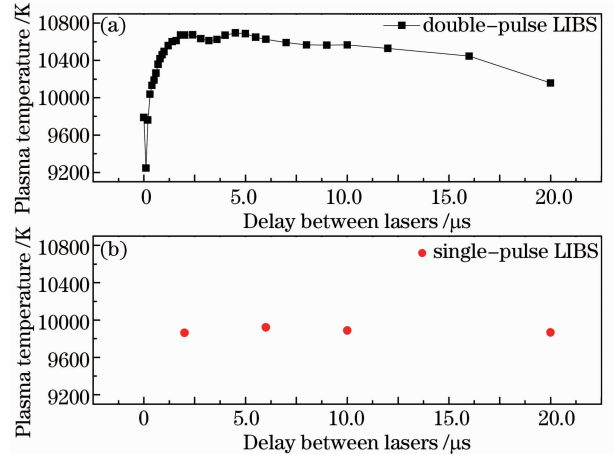


图 5 单脉冲和双脉冲激光作用下等离子体温度随脉冲间隔变化

Fig. 5 Single- and double-pulse LIBS plasma electron temperature changing with different delay between two lasers

地单调增加,在 $2\sim 5\ \mu\text{s}$ 时达到最大之后缓慢地下降,这和 Ahmed 等^[22]得到的实验结果是一致的。根据谱线强度随脉冲间隔变化的分析,这可能是由于双脉冲激光同时激发时,其中一束光在击穿液体射流时使液流发生较大的抖动,第二束光不能很好地聚焦在液流上,使得此时双脉冲激光作用时的等离子体电子温度偏低,谱线强度不强。随着脉冲间隔的增加激光器 I 的作用逐渐减小,到 $20\ \mu\text{s}$ 后双脉冲激光则可以看作单脉冲激光。此外,双脉冲激光激发的等离子体电子温度比各单脉冲激光激发的等离子体电子温度在相同延时条件下要大几百开尔文,则说明了双脉冲激光对信号的增强和等离子体温度增加有作用。

3.3 等离子体电子密度的求解

在等离子体中原子发射光谱线的线型与其所处的环境有非常复杂的关系,它与电子密度、温度也有关系。谱线的主要展宽机制有 Doppler 展宽和 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 $10^{-3}\ \text{nm}$ 量级,本实验使用的光谱仪分辨率为 $0.13\ \text{nm}$,和 Doppler 展宽相比相差较大,因此谱线的展宽机制主要是 Stark 展宽,其线型为 Lorentz 线型,属于 Stark 平方展宽。Griem^[23]已经给出的等离子体辐射光谱中由于 Stark 展宽导致的谱线宽度为

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

其中第一项是电子展宽,第二项是离子加宽修正, ω 为电子碰撞参数, A 为离子碰撞参数, N_e 为电子数密度,其中 $\Delta\lambda_{1/2}$ 为谱线的半峰全宽(FWHM), N_D 是 Debye 球粒子数,表示为

$$N_D = 1.72 \times 10^9 \frac{T_e^{3/2}}{N_e^{1/2}}. \quad (3)$$

考虑到离子对谱线展宽的贡献远远小于电子对谱线展宽的贡献,原子谱线的 Stark 展宽与电子数密度的关系可以简化为

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2\omega\left(\frac{N_e}{10^{16}}\right). \quad (4)$$

Griem^[23]对许多元素谱线的电子碰撞半峰全宽和线移以及离子展宽等参数做了计算,从文献中可以得到 Ca 的电子碰撞参数 ω 。

在讨论谱线的展宽时,实际谱线线宽 $\Delta\lambda_i$ 为实验测量的谱线线宽 $\Delta\lambda_0$ (通常是谱线强度的 FWHM) 与仪器线宽 $\Delta\lambda_s$ 的卷积,可以近似用实测谱线线宽和仪

器线宽的差表示:

$$\Delta\lambda_i = \Delta\lambda_0 - \Delta\lambda_s. \quad (5)$$

实验中仪器线宽 $\Delta\lambda_s$ 也就是光谱仪线宽 $0.13\ \text{nm}$ (使用标准低压汞灯测量 Hg 线 FWHM 来标定)。

图 6 为使用 Lorentz 线形拟合 Ca II 393.366 nm 谱线并利用(4)式计算得到的等离子体电子数密度随不同积分延时的变化,在信号出现的早期,对于较短的脉冲间隔(小于 $100\ \text{ns}$),电子密度在双脉冲 LIBS 中比单脉冲 LIBS 要低,较长延时双脉冲 LIBS 变得比单脉冲 LIBS 电子数密度高,这和 Pinon 等^[24]的实验结果是一致的,从一定程度上说明了双脉冲 LIBS 信号的增强和等离子体密度增加有关,同时认为在较短脉冲间隔时,由于双脉冲同时作用于等离子体羽,第二束激光在第一束激光激发的等离子体还未完全扩张开来时就将它激发,因此获得的电子数密度较小。除此以外,单脉冲 LIBS 电子密度比双脉冲 LIBS 衰减得快,这和双脉冲 LIBS 冷却速率较慢有关。从图 6 中还可以得到,实验中的等离子体电子数密度均在 $10^{17}\ \text{cm}^{-3}$ 量级,和固体双脉冲 LIBS^[11,25]相比,电子数密度较低但数量级是一致的,同样也说明了液体对等离子体起到快速冷却的作用。

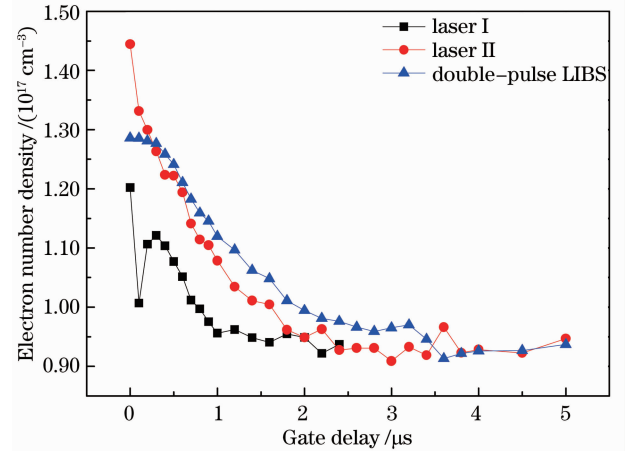


图 6 电子数密度随积分延时变化

Fig. 6 Electron number density changing with gate delay

3.4 局部热力学平衡分析

求解等离子体电子温度和电子数密度,都要求等离子体满足局部热力学平衡,建立 LTE 所需的最小电子数密度需满足^[26]

$$N_e \geq 1.6 \times 10^{12} T_e^{1/2} (\Delta E)^3, \quad (6)$$

式中 ΔE 为谱线跃迁的上下能级差, N_e 、 T_e 和 ΔE 的单位分别为 cm^{-3} 、K 和 eV。

从表 1 中可以得到电离能最大的是谱线 Ca II

(315.887 nm),其值为 3.923819 eV。通过计算出的等离子体温度 10^4 K,利用(6)式右边表达式计算得到满足局部热平衡状态的最小电子数密度值约为 10^{14} cm^{-3} 数量级,比实验测量数据在(4)式下计算得到的电子密度值 10^{17} cm^{-3} 要小 3 个数量级左右,因此实验测量数据计算得到的电子数密度远远大于局部热平衡状态的所需电子数密度的最小值,所以和假设等离子体处于局部热平衡状态是一致的,因此求解等离子体温度和求解电子密度的假设成立,可以认为在整个实验中等离子体均处于局部热平衡状态。

4 结 论

通过研究液体射流 Ca 的双脉冲 LIBS 发射光谱,发现双脉冲激光作用时比单脉冲作用 Ca 的发射光谱信号强度有数倍的增加,可以进一步提高污染物的探测灵敏度。通过选定 Ca 的几条特征离子谱线,用 Boltzmann 斜线法得到了双脉冲激光诱导击穿等离子体温度约 10^4 K,并选定一条离子线通过 Lorentz 拟合得到谱线半峰全宽,根据(4)式推算出双脉冲 LIBS 等离子体电子密度约为 10^{17} cm^{-3} 。等离子体电子温度和电子数密度在一定程度上也说明了双脉冲 LIBS 在信号强度方面优于单脉冲 LIBS。理论证明了 Ca 实验中等离子体均处于局部热平衡状态。

参 考 文 献

- 1 S. Kyuseok, L. Yong-Ill, J. Sneddon. Applications of laser-induced breakdown spectrometry [J]. *Appl. Spectroscopy Rev.*, 1997, **32**(3): 183~235
- 2 J. Gruber, J. Heitz, H. Strasser *et al.*. Rapid *in-situ* analysis of liquid steel by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2001, **56**(6): 685~693
- 3 D. A. Cremers, L. J. Radziemski. Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy [M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2006, 1~16
- 4 P. J. Singh, N. S. Thakur. Laser Induced Breakdown Spectroscopy [M]. Oxford: the Netherland Linacre House, 2007, 1~19
- 5 P. Stavropoulos, C. Palagas, G. N. Angelopoulos *et al.*. Calibration measurements in laser-induced breakdown spectroscopy using nanosecond and picosecond lasers [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2004, **59**(12): 1885~1892
- 6 E. Pérez-tijerina, J. Bohigas, R. Machorro. Density and temperature maps of an aluminium plasma produced by laser ablation [J]. *Revista Mexicana DE FI'Sica*, 2005, **51**(2): 153~156
- 7 X. Z. Zhao, L. J. Shen, T. X. Lu *et al.*. Spatial distributions of electron density in microplasmas produced by laser ablation of solids [J]. *Appl. Phys. B*, 1992, **55**(4): 327~330
- 8 B. Y. Man. Particle velocity, electron temperature, and density profiles of pulsed laser-induced plasmas in air at different ambient

- pressures [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 241~245
- 9 Tang Xiaoshuan, Li Chunyan, Zhu Guanglai *et al.*. Experimental investigation on the electron density and electron temperature of laser-induced Al plasmas [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6): 687~692
- 唐晓闫, 李春燕, 朱光来 等. 激光诱导 Al 等离子体中电子密度和温度的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 687~692
- 10 Yang Boqian, 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**(5): 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
- 11 Zhang Shudong, Chen Guanying, Chen Hui *et al.*. Laser-produced Al plasmas temperature at different laser energy [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2001, **18**(1): 46~49
- 张树东, 陈冠英, 陈辉 等. 激光诱导 Al 等离子体温度随激光能量变化特性研究 [J]. *量子电子学报*, 2001, **18**(1): 46~49
- 12 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*, 2011, **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*, 2011, **39**(2): 0215001
- 13 V. N. Rai, F. Y. Yueh, J. P. Singh. Study of laser-induced breakdown emission from liquid under double-pulse excitation [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(12): 2094~2101
- 14 Lin Zhaoxiang, Wu Jinqian, Gong Shunsheng. Spectroscopic study on the air plasma induced by delayed dual laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(11): 5892~5898
- 林兆祥, 吴金泉, 龚顺生. 延迟双脉冲激光产生的空气等离子体的光谱研究 [J]. *物理学报*, 2006, **55**(11): 5892~5898
- 15 Zhang Qiao, Hu Zhenhua, Ding Lei *et al.*. Study on the liquid jet dual-pulse laser-induced Ca plasma emission spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, **40**(2): 0215002
- 张巧, 胡振华, 丁蕾 等. 液体射流双脉冲激光诱导 Ca 等离子体发射光谱研究 [J]. *中国激光*, 2013, **40**(2): 0215002
- 16 A. A. I. Khalil, M. Richardson, L. Johnson *et al.*. Titanium plasma spectroscopy studies under double-pulse laser excitation [J]. *Laser Physics*, 2009, **19**(10): 1981~1992
- 17 V. I. Babushok, F. C. Delucia, J. L. J. Gottfried *et al.*. Double-pulse laser ablation and plasma laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, **61**(9): 999~1014
- 18 A. H. Galmed, M. A. Harith. Temporal follow up of the LTE conditions in aluminum laser induced plasma at different laser energies [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **91**(3-4): 651~660
- 19 Li Jie, Lu Jidong, Lin Zhaoxiang *et al.*. Experimental investigation on plasma temperature of Ca by laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(5): 689~693
- 李捷, 陆继东, 林兆祥 等. 激光诱导 Ca 等离子体温度的实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(5): 689~693
- 20 K. Rifai, S. Laville, F. Vidal *et al.*. Quantitative analysis of metallic traces in water-based liquids by UV-IR double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *J. Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, **27**(2): 276~283
- 21 O. Samek, D. C. S. Beddows, J. Kaiser. Application of laser-induced breakdown spectroscopy to *in situ* analysis of liquid samples [J]. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, 2000, **39**(8): 2248~2262
- 22 R. Ahmed, M. A. Baig. A comparative study of single and double pulse laser induced breakdown spectroscopy [J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(3): 1~7
- 23 H. R. Griem. Plasma Spectroscopy [M]. New York: McGraw-Hill, 1964

- 24 V. Pinon, D. Anglos. Optical emission studies of plasma induced by single and double femtosecond laser pulses [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2009, **64**(10): 950~960
- 25 A. Mansoori, B. Roshanzadeh, M. Khalaji *et al.*. Quantitative analysis of cement powder by laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Opt. Lasers Eng.*, 2011, **49**(3): 318~323
- 26 C. Aragon, J. A. Aguilera. Characterization of laser induced plasmas by optical emission spectroscopy: a review of experiments and methods [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2008, **63**(9): 893~916

栏目编辑：李文喆