

doi: 10.3788/gzxb20184708.0847012

磁约束飞秒激光诱导铜等离子体特性研究

许东华¹, 宋超², 赵上勇¹, 高勋¹, 林景全¹

(1 长春理工大学 理学院, 长春 130022)

(2 长春理工大学 化学与环境工程学院, 长春 130022)

摘 要: 建立磁约束飞秒激光诱导铜等离子体辐射光谱采集系统, 通过发射光谱法分析磁约束效应对飞秒激光诱导铜等离子体特性的影响. 在强度为 0.67 T 的稳磁场约束下, 等离子体辐射连续谱和分立谱均有增强, 分立谱线增强更显著; 铜原子上能级越高, 其辐射的原子谱线增强因子越大, 具有最高上能级的 Cu I 507.6 nm 增强因子最大, 为 2.8; 等离子体铜原子谱线持续时间明显延长, 在等离子体演化初期, 谱线增强显著, 在较大延时, 谱线增强迅速减弱; 等离子体电子温度和电子密度均有提高.

关键词: 飞秒激光诱导击穿光谱; 磁约束; 光谱增强; 电子温度; 电子密度

中图分类号: O433

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2018)08-0847012-7

Magnetic Confinement Effect on Femtosecond Laser-induced Copper Plasma

XU Dong-hua¹, SONG Chao², ZHAO Shang-yong¹, GAO Xun¹, LIN Jing-quan¹

(1 School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 School of Chemical and Environmental Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The spectroscopy collection system of femtosecond laser-induced copper plasma with magnetic confinement was established. The magnetic confinement effects in the femtosecond laser-induced Cu plasma were investigated by optical emission spectroscopy. When plasma was confined by magnetic field with intensity of 0.67 T, the plasma emission continuous and discrete spectrum enhanced meanwhile the discrete spectrum enhanced more significantly. The enhancement factor of Cu atomic line with higher upper level energy is larger. The Cu I 507.6 nm is emitted from the highest upper level energy; its enhancement factor is largest and could be up to 2.8. The persistence duration of copper atomic spectra last longer. The copper atomic spectra enhanced significantly in the early delay time and weakly in late delay time. The electron temperature and number density of plasma in magnetic filed improved.

Key words: Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy; Magnetic confinement; Spectral enhancement; Electron temperature; Electron density

OCIS Codes: 140.3440; 320.7090; 350.5400

0 引言

近年来, 激光诱导击穿光谱 (Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS) 已经发展为一种可以对固体、液体和气体进行快速定量分析的检测技术^[1-3], 其是通过将脉冲激光光束聚焦到样品表面诱导等离子体, 向外辐射出分立光谱叠加在连续光谱上的等离子体光谱, 分析等离子体光谱中的分立光谱的波长和强度, 测量被测样品的元素成份及其含量. 由于 LIBS 具有分析快速、无损、待测样品不需要特别制备、非接触,

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61575030), 吉林省自然科学基金 (No. 20180101283JC) 和长春理工大学科技创新基金 (No. XJLJG-2017-10) 资助

第一作者: 许东华 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞秒激光诱导击穿光谱技术. Email: 805111271@qq.com

导师 (通讯作者): 高勋 (1978-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为激光诱导击穿光谱技术及其应用. Email: lasercust@163.com

收稿日期: 2018-06-23; **录用日期:** 2018-08-11

<http://www.photon.ac.cn>

远程遥感监测、多元素同时测定等优点^[4],现已成为痕迹元素测量的研究热点.但存在的探测灵敏度低、他人重复性差等缺点严重限制了 LIBS 的快速发展及广泛应用.近年来,许多科研工作者开展了大量实验,来提高 LIBS 的探测灵敏度,如双脉冲激发^[5]、共振激发^[6]、放电加热^[7]、冲入惰性气体^[8]、空间约束^[9]和磁约束^[10]等方法.由于磁约束装置具有结构简单,成本较低,能够大幅度实现 LIBS 光谱增强,且能实现约束等离子体形态稳定性增强,已经被许多科研工作者用于提高 LIBS 的探测灵敏度.在稳定的磁场中,等离子体内部存在的带电粒子受到洛伦兹力,做圆周或螺旋运动,使等离子体羽膨胀减缓或者停止膨胀,提高了电子-离子的复合几率,从而使辐射光谱强度增强,进而提高了 LIBS 的探测灵敏度.另外,等离子体在完全演化之前,其内部一直存在带电粒子,均会受到磁场的约束效应,光谱在全延时增强,增强现象可重复性高,且谱线强度较稳定. SHEN^[11]等使用强度 0.8 T 的稳磁场对纳秒激光诱导的铝和铜等离子体进行了约束,等离子体辐射光谱增强显著,铝原子谱线增强因子最大为 2,铜原子谱线增强因子可达 6~8.李丞^[12]等使用强度为 0.67 T 的稳磁场约束纳秒 Nd:YAG 激光诱导铜等离子体辐射光谱增强显著,存在铜原子谱线增强因子为 3~4,铜离子谱线增强因子可达 6~8. HAIL^[13]等基于荧光成像法和时间飞行谱发现真空环境下磁约束纳秒诱导铜等离子体的羽体膨胀变缓,且粒子飞行速度变慢.到目前为止,广大科学工作者主要开展了磁约束纳秒激光诱导等离子体特性方面的研究,而磁约束飞秒激光诱导等离子体光谱特性方面尚未见报道.

由于飞秒激光烧蚀效率高和热影响区小等优点,飞秒激光作为光源的 fs-LIBS 技术已用于环境污染^[14]、土壤重金属^[15]、生物病菌^[16]等方面.与纳秒脉冲激光相比,飞秒激光具有低且精准的击穿阈值,从而飞秒激光等离子体辐射光谱强度具有较高的稳定性,所以 fs-LIBS 具有高的检测精确性和他人实验重复性.但是,由于飞秒激光的脉宽小于电子热能传递晶格的弛豫时间,飞秒激光完全辐照样品之后,在皮秒量级时间内,表面才会形成等离子体,飞秒激光不存在与等离子体的相互作用,这导致飞秒等离子体寿命较短,一般只有几个微秒.本文使用强度为 0.67 T 的稳磁场约束对飞秒激光诱导的铜等离子体,使等离子体辐射光谱强度有明显增强,并且辐射光谱持续时间有延长.研究结果将对 fs-LIBS 的快速应用提供一定的技术支撑.

1 实验

1.1 实验样品

实验中铜样品均为可用于光谱分析的国家标准物质,表面平整清洁,纯度 99.99% 以上.

1.2 实验装置

磁约束飞秒激光诱导铜等离子体实验装置图如图 1 所示.实验中飞秒激光器 (Coherent Libra, 美国),输出中心波长 800 nm,脉宽 50 fs,重复频率 1 kHz,最大激光能量 3.5 mJ.飞秒激光光束经 M1(800 nm 高反)和二向色镜 M2(800 nm 高反,400~800 nm 高透)的反射,由距二向色镜 50 mm 远的透镜 L1($f=50$ mm)聚焦到磁铁 N、S 极中心位置处铜靶材(长 65 mm 宽 6 mm 厚 4 mm)表面内部 1 mm,诱导击穿产生铜等离子体,铜表面辐照区域飞秒激光峰值功率密度为 7.12×10^{13} W/cm².铜样品固定在三维平移台 (Princeton Instruments, 美国)上以 1 mm/s 的速度运动,使每发激光脉冲烧蚀新的位置.两块间距为 20 mm 的方形永磁铁(长 60 mm 宽 55 mm 厚 35 mm)形成一个中心场强为 0.67 T 周围逐渐变弱的非均匀磁场,处于中心区

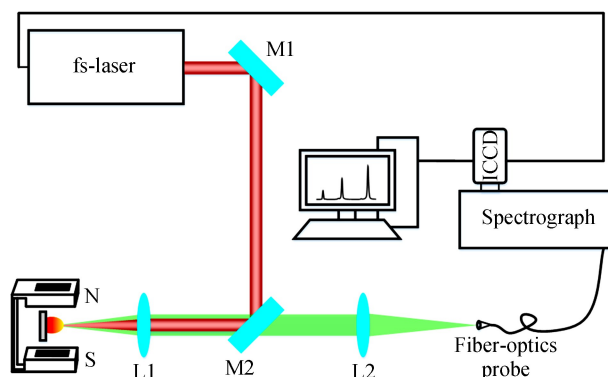


图 1 磁约束飞秒激光诱导铜等离子体装置

Fig.1 Schematic diagram of experimental setup used for femtosecond laser induced Cu plasma with magnetic confinement

域的等离子体羽尺寸远小于磁铁间距,等离子体区域可近似认定为稳磁场.等离子体辐射光谱通过透镜 L1 (800 nm HR)和二向色镜 M2(800 nm HR,400~800 nm HT),由透镜 L2(K9, $f=75$ mm)聚焦耦合到光谱仪(Spectra Pro500i,PI Action)的光纤探头(芯径 200 μm).为保证激光诱导等离子体与光谱仪 ICCD 时间同步,使用飞秒激光触发光谱仪.光谱仪使用序列模式,ICCD 探测器门宽 20 ns,光谱收集时间范围 1~4 μs .为提高光谱数据稳定性,ICCD 探测器累计脉冲为 50 个.实验在标准大气压、温度 22 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 40%的环境下开展.

2 实验结果与分析

2.1 光谱增强

光谱仪采集延时 1.3 μs ,有无磁场约束环境下峰值功率密度 $7.12 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 诱导的铜等离子体发射光谱如图 2 所示.在波长 500~532 nm 范围内存在 7 条分立谱,分别为 Cu I 501.7 nm、Cu I 503.4 nm、Cu I 507.6 nm、Cu I 510.6 nm、Cu I 515.3 nm、Cu I 521.8 nm 和 Cu I 529.3 nm.

由图 2 可知,在磁场约束下,铜等离子体发射光谱中分立谱线(原子谱线)和连续谱线(复合辐射)强度均有增强,其中分立谱线强度增强更明显.在高峰值功率密度的飞秒激光辐照下,放置于稳磁场中的铜样品表面被诱导出高速膨胀的等离子体,等离子体中高速运动的带电粒子(电子和离子)在洛伦兹力作用下而做高速螺旋圆周运动,使等离子体羽膨胀距离缩短^[11].磁场作用下等离子体内电子和离子做相向运动,电子-离子复合几率增加,使激发态铜原子密度增加,同时向外辐射连续谱.所以在磁场约束下,铜等离子体发射光谱出现增强.

2.2 原子谱线能级与增强因子

表 1 为铜原子谱线与光谱增强因子关系,原子谱线参数均来自于 NIST 原子光谱数据库.Cu I 501.7、503.4、507.6 和 529.3 nm 对应为电子从 $3d^9 4s(^3D)5s$ 跃迁到 $3d^9 (^2D)4s4p(^3P^0)$ 上辐射的分立谱线,而辐射波长的差异主要来源于跃迁前后的上、下轨道上电子的角动量(自旋和轨道角动量)的不同,光谱增强因子分别为 2.4、2.7、2.8 和 2.6.Cu I 515.3 和 521.8 nm 对应为电子从 $3d^{10} 4d$ 跃迁到 $3d^{10} 4p$ 上辐射的分立谱线,光谱增强因子分别为 1.7 和 1.6.Cu I 510.5 nm 对应为电子从 $3d^{10} 4p$ 跃迁到 $3d^9 4s^2$ 上辐射的分立谱线,其光谱增强因子为 1.4.

由表 1 可知,铜原子谱线的光谱增强因子与能级跃迁能级有关,激发态铜原子跃迁前后外层电子所处的电子轨道越高(即铜原子激发态越高),增强因子越大.这是因为,在磁场约束下飞秒激光诱导铜等离子体羽体积较小,羽体内部能量不能通过等离子体膨胀向外辐射,这些能量会被等离子体内低激发态铜原子吸收,从而跃迁到高激发态,并且铜原子激发态越高越容易被再激发,所以磁约束下等离子体中低激发态铜原子更趋向于跃迁至高激发态,高激发态铜原子浓度增加更为明显,同时谱线强度增强更为明显,增强因子也越大.这与 LI 等^[17]空间约束等离子体的实验结果相类似.

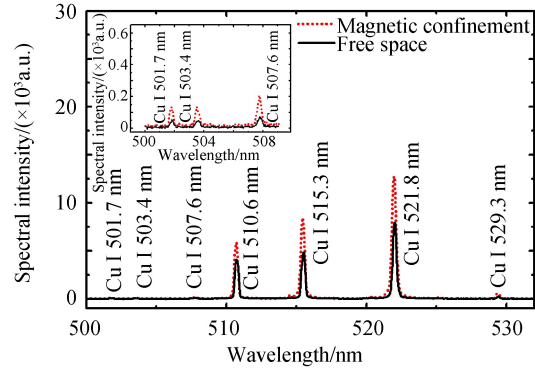


图 2 有无磁场约束的飞秒激光诱导铜等离子体辐射光谱
Fig.2 The time-integrated femtosecond laser-induced Cu plasma spectra with and without steady magnetic confinement

表 1 铜原子谱线能级参数与光谱增强因子

Table 1 Enhancement factors and energy level parameters of Cu atomic lines

Wavelength	Upper level conf., E_k/eV	Lower level conf., E_i/eV	Enhancement factor
Cu I 501.7 nm	$3d^9 4s(^3D)5s$, 7.993	$3d^9 (^2D)4s4p(^3P^0)$, 5.522	2.4
Cu I 503.4 nm	$3d^9 4s(^3D)5s$, 7.883	$3d^9 (^2D)4s4p(^3P^0)$, 5.421	2.7
Cu I 507.6 nm	$3d^9 4s(^3D)5s$, 8.016	$3d^9 (^2D)4s4p(^3P^0)$, 5.574	2.8
Cu I 529.3 nm	$3d^9 4s(^3D)5s$, 7.737	$3d^9 (^2D)4s4p(^3P^0)$, 5.395	2.6
Cu I 515.3 nm	$3d^{10} 4d$, 6.191	$3d^{10} 4p$, 3.785	1.7
Cu I 521.8 nm	$3d^{10} 4d$, 6.192	$3d^{10} 4p$, 3.816	1.6
Cu I 510.5 nm	$3d^{10} 4p$, 3.816	$3d^9 4s^2$, 1.388	1.4

2.3 铜原子谱线强度演化

图3分别为Cu I 510.5、515.3、521.8和529.3 nm在时间延时1~4 μs 范围内的有无磁场约束时的谱线强度时间演化,等离子体光谱强度均随着时间延时增加而逐渐减弱变化.无磁场约束时,谱线Cu I 510.5 nm的存在时间小于3 μs ,谱线Cu I 515.3和Cu I 521.8 nm的存在时间小于2.5 μs ,谱线Cu I 529.3 nm的存在时间小于2 μs .结果表明谱线跃迁能级越高,等离子体辐射谱线存在时间越短,这是因为处于高能级的激发态原子极不稳定,会迅速跃迁到较低能级.在磁场约束下,等离子体膨胀初期的铜原子谱线均有明显增强,但随着时间延时增加,电子-离子复合过程消耗了大量电子离子,等离子体内带电粒子数目快速下降,磁约束效应减弱,从而光谱增强变小.在磁约束下,谱线Cu I 510.5 nm的存在时间大于4 μs ,谱线Cu I 515.3和521.8 nm的存在时间大于3.2 μs ,谱线Cu I 529.3 nm的存在时间大于2.5 μs .相比于无磁场约束,铜等离子体发射谱线持续时间有明显延长,NEOGI A等^[18]通过实验分析这一现象是由于磁约束下等离子体内的三体结合过程、复合辐射过程、电荷交换过程以及磁流体动力不稳定性综合因素引起的.SHEN等^[11]通过理论分析发现,复合辐射过程是造成这一现象的主要因素.

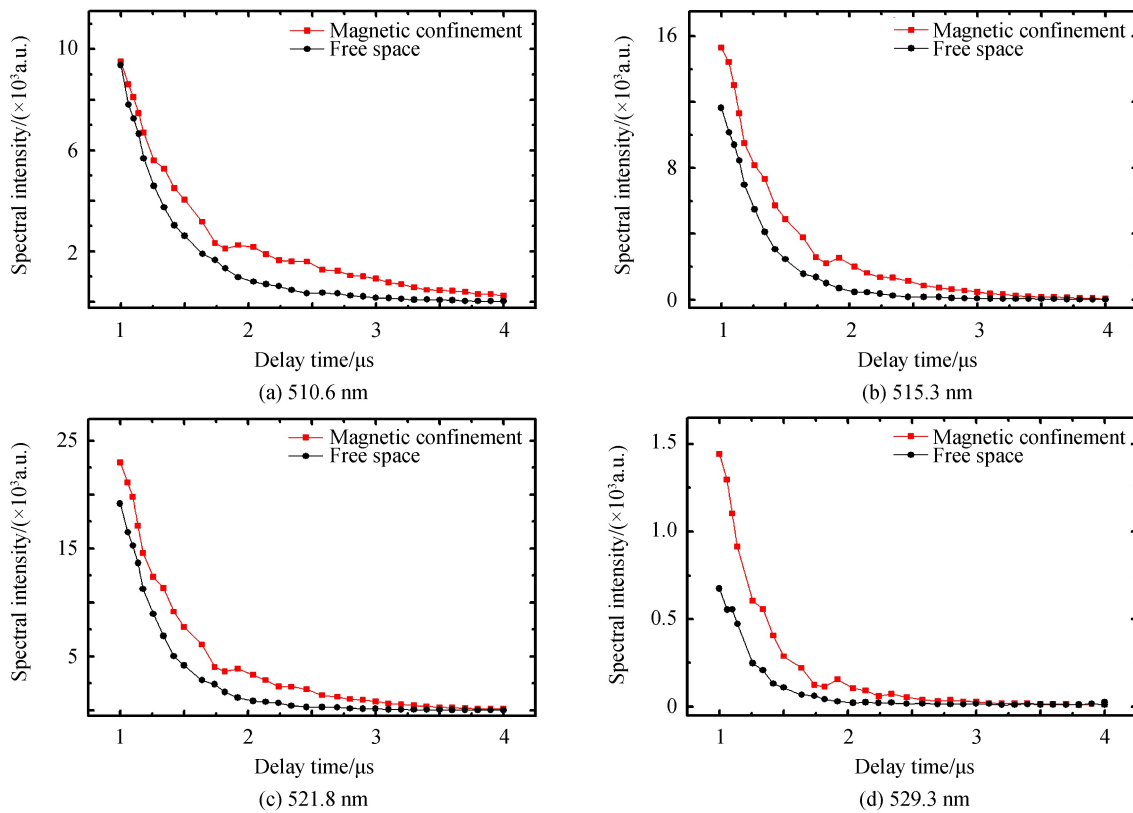


图3 有无磁场约束的飞秒激光诱导铜等离子体辐射强度演化

Fig.3 Emission intensities for Cu atomic lines as a function of the time delay with and without steady magnetic confinement

2.4 等离子体电子温度与电子密度

电子温度和电子密度是等离子体的两个重要特征参数,通过对比分析有无磁场约束的等离子体的电子温度和电子密度,可以更深入的研究磁约束增强等离子体辐射光谱的物理机制.

等离子体电子温度可以通过玻尔兹曼斜线法计算得出^[19]

$$\ln \frac{I_{mn} \lambda_{mn}}{A_{mn} g_m} = \ln \left[\frac{N(T)}{U(T)} \right] - \frac{E_m}{\kappa T}$$

式中, λ 和 I 分别为铜原子谱线的中心波长及其对应的强度, A 和 g 分别为跃迁几率和统计权重, E 为上能级, κ 为玻尔兹曼常数.根据获得的实验数据,为减小计算误差,选取四条铜原子谱线(Cu I 510.6 nm, 515.3 nm, 521.8 nm and 529.3 nm)进行计算,并将四个坐标点($\ln \frac{I\lambda}{Ag}$, E)拟合成一条直线,这条斜线成为玻尔兹曼斜线,如图4所示,其斜率是 $-1/\kappa T$.使用玻尔兹曼斜线法计算得出的等离子体电子温度的时间演化如图5(a).

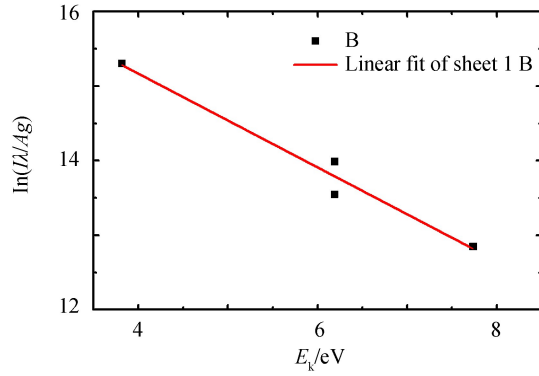


图4 玻尔兹曼斜线
Fig.4 Boltzmann plot

等离子体内电子密度与谱线加宽有关.在假定局部热平衡(Local Thermal Equilibrium, LTE)的情况下,等离子体谱线加宽主要为 Stark 加宽,因此,电子密度 N_e 与谱线宽度 $\Delta\lambda_{1/2}$ 存在^[20]

$$\Delta\lambda_{1/2} = 2W \frac{N_e}{10^{16}}$$

式中, W 为斯塔克展宽系数.实验选取 Cu I 521.8 nm 计算等离子体电子密度,其对应的斯塔克展宽系数为 0.22 nm.计算得出的等离子体电子密度时间演化如图 5(b)所示.

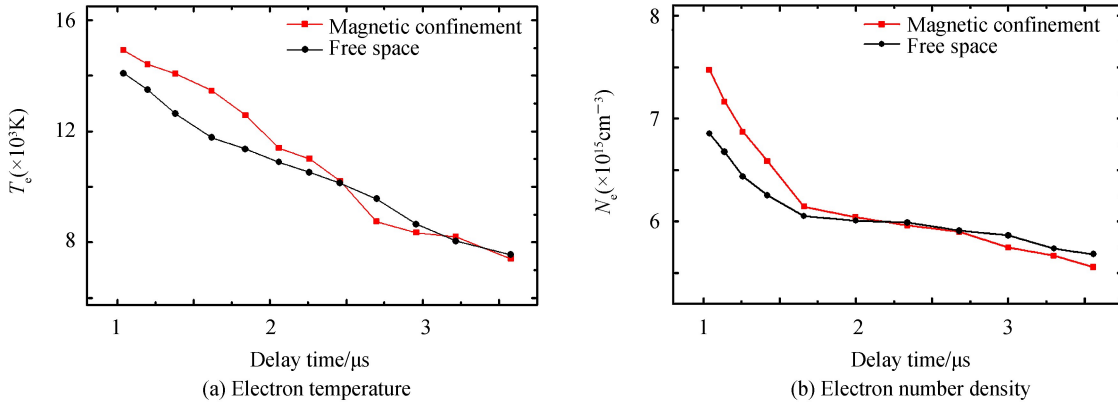


图5 有无磁场约束的飞秒激光诱导铜等离子体电子温度与电子密度

Fig.5 The electron temperature and number density of femtosecond laser-induced copper plasma in presence and absence of steady magnetic field

根据图 5 中等离子体电子温度和电子密度的时间演化,等离子体电子温度和电子密度均随延时逐渐降低.但与无磁场约束相比,磁约束下等离子体电子温度和电子密度仅在延时 2.5 μs 之前均有增强.这是由于在延时 2.5 μs 之前,等离子体内的带电粒子受到了洛伦兹力的约束作用,等离子体羽体积被磁场约束在较小体积,增加了粒子间碰撞几率,产生磁场加热,使等离子体内能增加,同时谱线宽度变大,所以等离子体电子温度和密度有明显增强.这也是磁约束下等离子体辐射光谱增强的主要因素之一.等离子体经过 2.5 μs 的演化之后,等离子体内大量的电子和离子复合形成的中性激发态的原子,不再受到洛伦兹力.电子离子数量的快速减小,磁约束作用减弱,这是磁约束下等离子体电子温度和密度不能长时间处于较高水平的主要原因.

2.5 局部热平衡

等离子体区域处于局部热平衡状态时,其内部各个能级上的粒子布居数是满足玻尔兹曼分布的,这也是 LIBS 应用于元素定量分析的前提条件^[21].根据 Mc Whirter^[22] 准则可判断等离子体是否处于局部热平衡状态

$$N_e > 1.6 \times 10^{12} T^{1/2} (\Delta E_{nm})^3$$

式中, N_e 为等离子体电子密度(cm^{-3}), T 为等离子体电子温度(K), ΔE_{nm} 为谱线的上、下能级差(eV).

计算得到等离子体电子温度介于 7 404~14 917 K,选取最大的谱线能级差 ΔE_{nm} 为 2.42 eV,将其带入

McWhirter 准则, 得出满足局部热平衡的电子密度最大为 $2.77 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 根据图 5(b), 实验计算得出的电子密度范围介于 $5.55 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \sim 7.47 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, 表明等离子体区域满足局部热平衡, 光谱数据可用于元素定量分析。

3 结论

通过光谱法对磁约束飞秒激光诱导铜等离子体特性进行了研究。在磁场约束下, 等离子体辐射铜原子谱线和连续谱均有增强。电子离子复合几率的增加是等离子体辐射分立谱和连续谱强度增强的主要因素之一。同时引入了等离子体内低激发态和基态原子再激发理论和电子轨道跃迁理论, 解释了不同中心波长铜原子谱线增强因子和寿命有差异的原因。通过计算分析等离子体电子温度和电子密度发现, 电子温度和密度的增强是磁约束等离子体辐射光谱强度增强的另一重要原因。实验满足局部热平衡条件。通过磁场对等离子体进行约束有效提高了辐射光谱强度, 为以后提高飞秒激光诱导击穿光谱检测灵敏度提供了实验基础和理论支持。

参考文献

- [1] NICOLAS G, MATEO M P, PIÑON V, *et al.* 3D chemical maps of non-flat surfaces by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2007, **22**:1244-1249.
- [2] SUYANTO H, RUPIASIH N N, WINARDI T B, *et al.* Qualitative analysis of Pb liquid sample using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)[C]. Conference Proceedings, 2013, **1555**(1): 14-16.
- [3] HOHREITER V, HAHN D W. Calibration effects for laser-induced breakdown spectroscopy of gaseous sample streams: analyte response of gas-phase species versus solid-phase species[J]. *Analytical chemistry*, 2005, **77**(4): 1118-1124.
- [4] TOGNONI E, PALLESCI V, CORSI M, *et al.* Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches[J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, **57**(7):1115-1130.
- [5] 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**(04):357-362.
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**(04):357-362.
- [6] BIERSTEDT A, PANNE U, RIEDEL J. Confinement and enhancement of an airborne atmospheric laser-induced plasma by an ultrasonic acoustic resonator[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, **31**(1):135-140.
- [7] ZHOU W D, LI K X, SHEN Q M, *et al.* Optical emission enhancement using laser ablation combined with fast pulse discharge[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3): 2573-2578.
- [8] REZAEI F, TAVASSOLI S H. Quantitative analysis of aluminum samples in He ambient gas at different pressures in a thick LIBS plasma[J]. *Applied Physics B*, 2015, **120**(3), 563-571.
- [9] GAO X, LIU L, SONG C, *et al.* The role of spatial confinement on nanosecond YAG laser-induced Cu plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, **48**(17):175205.
- [10] HAO Z Q, GUO L B, LI C M, *et al.* Sensitivity improvement in the detection of V and Mn elements in steel using laser-induced breakdown spectroscopy with ring-magnet confinement[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2014, **29**(12):2309-2314.
- [11] SHEN X K, LU Y F, GEBRE T, *et al.* Optical emission in magnetically confined laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(5):3662.
- [12] LI C, GAO X, LI Q, *et al.* Spectral enhancement of laser-induced breakdown spectroscopy in external magnetic field [J]. *Plasma Science and Technology*, 2015, **17**(11):919-922.
- [13] HARILAL S S, TILLACK M S, O'SHAY B, *et al.* Confinement and dynamics of laser-produced plasma expanding across a transverse magnetic field[J]. *Physical Review E*, 2004, **69**(2): 026413.
- [14] MYRIAM B, HAO Z Q, MATTHIEU B, *et al.* Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy for detection of trace elements in sophora leaves[J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(12): 3466.
- [15] GAO Xun, DU Chuang, LI Cheng, *et al.* Detection of heavy metal Cr in soil by the femtosecond filament induced breakdown spectroscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(09):265-269.
高勋, 杜闯, 李丞, 等. 基于飞秒激光等离子体丝诱导击穿光谱探测土壤重金属 Cr 元素含量[J]. *物理学报*, 2014, **63**(09): 265-269.
- [16] MATTHIEU B, JIN Y, MYRIAM B, *et al.* Discrimination of microbiological samples using femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(16): 163903.
- [17] LI C M, GUO L B, HE X G, *et al.* Element dependence of enhancement in optics emission from laser-induced plasma under spatial confinement[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2014, **29**(4), 638-643.
- [18] NEOGI A, THAREJA R K. Dynamics of laser produced carbon plasma expanding in a nonuniform magnetic field[J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, **85**(2):1131-1136.

- [19] CIUCCI A, CORSI M, PALLESCHI V, *et al.* New procedure for quantitative elemental analysis by laser-induced plasma spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 1999, **53**(8), 960-964.
- [20] GRIEM H R. Principles of plasma spectroscopy[M]. Cambridge University Press, 1997.
- [21] FAN Juan-juan, HUANG Dan, WANG Xin, *et al.* Research on the identification method of LTE condition in the laser-induced plasma[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, **34**(12):3183-3187.
樊娟娟, 黄丹, 王鑫, 等. 激光诱导等离子体 LTE 态判定方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(12):3183-3187.
- [22] PAGANO C, HAFEEZ S, LUNNEY J G. Influence of transverse magnetic field on expansion and spectral emission of laser produced plasma[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, **42**(15): 155205.

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (No. 61575030), Natural Science Foundation of Jinlin Province (No. 20180101283JC) and Science Foundation of Changchun University of Science and Technology (No. XJLJG-2017-10)

引用格式: XU Dong-hua, SONG Chao, ZHAO Shang-yong, *et al.* Magnetic Confinement Effect on Femtosecond Laser-induced Copper Plasma[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8):0847012

许东华, 宋超, 赵上勇, 等. 磁约束飞秒激光诱导铜等离子体特性研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(8):0847012