

磁空混合约束激光诱导 Cu 等离子体光谱特性

李百慧 高勋 宋超 林景全

Laser induced plasma spectral characteristics of Cu with magnetically and spatially combined confinement

Li Bai-Hui Gao Xun Song Chao Lin Jing-Quan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 235201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.235201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.235201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I23>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杨树叶片的飞秒等离子体丝诱导击穿光谱研究

[Analysis of heavy metals in poplar leaves by femtosecond filament-induced breakdown spectroscopy](#)

物理学报.2015, 64(17): 175203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.175203>

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

[Detection of heavy metal Cr in soil by the femtosecond filament induced breakdown spectroscopy](#)

物理学报.2014, 63(9): 095203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.095203>

激光冲击波压缩稠密铝辐射不透明度实验研究

[Experimental studies on the opacity of dense aluminum compressed by a laser-driven shock waves](#)

物理学报.2013, 62(12): 125202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.125202>

土壤中重金属元素的双脉冲激光诱导击穿光谱研究

[Analyses of heavy metals by soil using dual-pulsed laser induced breakdown spectroscopy](#)

物理学报.2013, 62(4): 045202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.045202>

强脉冲激光在 AZ31B 镁合金中诱导冲击波的实验研究

[Experimental study of shock waves induced by high-power pulsed laser in AZ31B magnesium alloy](#)

物理学报.2010, 59(8): 5602-5605 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.59.5602>

磁空混合约束激光诱导Cu等离子体光谱特性*

李百慧¹⁾ 高勋^{1)†} 宋超²⁾ 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)

(2016年8月7日收到; 2016年9月5日收到修改稿)

本文基于发射光谱法对磁空混合约束铜等离子体光谱特性进行了研究, 分析了磁空混合约束条件下铜等离子体光谱强度演化过程以及等离子体光谱轴向和横向分布. 实验结果表明, 在磁空混合约束和空间约束条件下等离子体光谱均出现增强, 对原子光谱 Cu I 521.8 nm 的最大增强因子分别为 2 和 1.2, 磁空混合作用等等离子体离子光谱增强效果大于纯空间约束情形. 在磁空混合约束作用下, 光谱增强在小延时来源于磁场约束产生, 而大延时为空间约束产生. 结合光学阴影成像法, 分析了 Cu I 521.8 nm 谱线强度的轴向和横向空间强度分布, 由于空间约束作用的冲击波反射压缩, 使等离子体羽横向膨胀方向存在约束, 使等离子体内原子数密度最大空间位置前移, 造成了磁空混合约束下 Cu I 521.8 nm 谱线强度的轴向最大空间位置远离铜表面.

关键词: 激光等离子体, 磁空混合约束, 光谱增强, 冲击波压缩

PACS: 52.55.-s, 52.50.Lp, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.65.235201

1 引言

激光诱导击穿光谱技术 (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS), 将高能量脉冲激光束聚焦到样品表面, 烧蚀样品生成具有高亮度的高温等离子体, 通过采集高温等离子体辐射出的光, 分析被测样品组成成分和各个元素含量. LIBS 在固体、液体和气体等元素分析方面是一种具有材料制备简单、快捷和可同时进行多种元素分析等优势的新型的光谱分析技术^[1-3]. 虽然 LIBS 技术有着长达半个多世纪的研究和发展, 但仍有一些技术方面的缺陷和不足, 如强连续背景、谱线自吸收现象和探测灵敏度低等. 为提高 LIBS 的探测灵敏度, 科研人员开展了一系列方法, 如冲入气体^[4]、双脉冲激发^[5]、空间约束和磁场约束等外加不同约束条件提高 LIBS 光谱信号的信背比. Harilal 等^[6] 探究了在强磁场中的激光诱导等离子体膨胀时间演化过程, 发现在强磁场中的等离子体发射光谱存在增强

现象, 并且随着延时时间增大等离子体羽体受磁场力束缚作用出现压缩现象. Gao 等^[7] 研究发现 Cu 等离子体在铝板约束下光谱出现增强现象, 不同板间距对应的光谱增强延时也不同. 在外加磁场情况下, 等离子体膨胀不仅受到磁场的作用, 同时也受到来自空间的约束. 通过研究磁场-空间混合约束环境下的激光诱导等离子体膨胀动力学, 对提高 LIBS 技术的探测灵敏度有着重要的意义. 本文对磁场和空间双板组成的磁空混合约束作用下的激光诱导铜等离子体发射光谱特性进行了研究, 探讨和分析了磁空混合约束作用下 Cu 等离子体发射光谱的时间和空间分布规律以及光谱增强机理.

2 实验装置

磁空混合约束激光诱导铜等离子体光谱实验装置如图 1 所示. 实验采用输出波长 1064 nm, 重复频率 10 Hz, 脉宽 8 ns 的 Nd:YAG 激光器 (美国 Continuum, 型号 Power8000) 作为诱导铜等离子

* 国家自然科学基金 (批准号: 61575030) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lasercust@163.com

体光源, 激光光束通过焦距为100 mm的平凸石英透镜聚焦到Cu靶材表面, 激光光束聚焦光斑直径0.5 mm. 为避免样品过度烧蚀, 将铜靶固定于XYZ三维平移台上, 使每个激光脉冲作用在新的靶材位置, 确保实验过程中获得稳定的铜等离子体. 激光诱导击穿铜等离子体的光辐射信号, 经焦距为75 mm的透镜1:1.2成像耦合至配有ICCD探测器的(Spectra Pro500i)光谱仪采集. 光纤探头收集位置在距离铜靶表面3 mm空间位置处. 实验通过数字延时触发器(stanford research, DG645)同步触发激光器和ICCD探测器, 实现激光诱导铜等离子体发射光谱的时间分辨测量. 实验在标准大气压、室温22 °C、相对湿度为30%环境下开展.

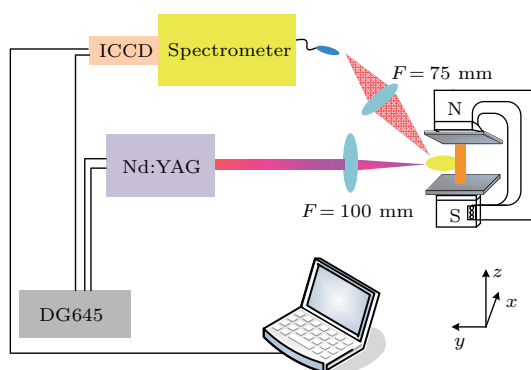


图1 磁空混合约束激光诱导铜等离子体实验装置图

Fig. 1. The experiment setup of laser-induced breakdown plasma of Cu with spatial and magnetic combined confinement.

铜靶的几何尺寸为65 mm(X)-6 mm(Y)-4 mm(Z), 纯度为99.9%. 铜靶放置在间距为20 mm的两块极性相反的永磁铁(几何尺寸为60 mm(X)-55 mm(Y)-35 mm(Z))组成的磁场中间, 同时磁铁间平行放置相距为10 mm的两块高透磁性的不锈钢板(几何尺寸为150 mm(X)-100 mm(Y)-2.5 mm(Z)). 铜靶所处的空间位置形成中心强度为1.1 T并向四周渐弱的非均匀磁场, 激光诱导击穿的铜等离子体在膨胀过程中则受到磁场和不锈钢板组成的磁空混合约束作用. 由于激光诱导铜等离子体尺寸小于磁场间距, 因此等离子体膨胀区域近似认为磁场强度恒定.

3 实验结果与讨论

照射在铜靶表面的激光脉冲能量密度 35.39 J/cm^2 (功率密度 $4.4 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$), 时间延

时 $3 \mu\text{s}$, ICCD门宽200 ns, 在磁空混合约束、空间板约束和空气环境下, 距离铜靶表面3 mm位置处的激光诱导铜等离子体发射光谱如图2所示. 在495—535 nm波长范围内, 实验观测到的铜等离子体谱线, 其中有四条铜原子谱线Cu I 510.6 nm, Cu I 515.3 nm, Cu I 521.8 nm, Cu I 529.3 nm和两条铜离子谱线Cu II 501.7 nm, Cu II 507.6 nm. 相对于空气无约束条件下, 在磁空混合约束和空间板约束下等离子体光谱的原子和离子谱线强度均有不同程度的增强, 并且磁空混合约束条件下的谱线增强大于空间约束情形.

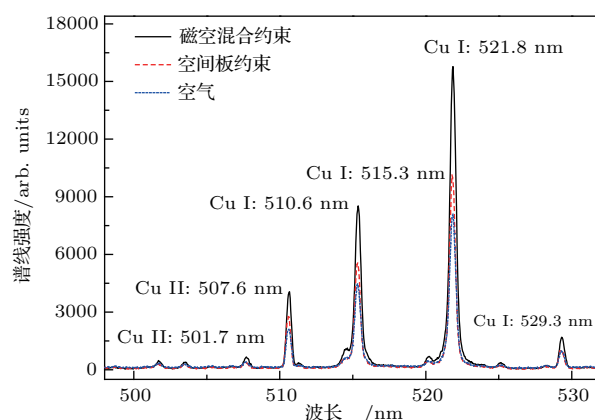


图2 (网刊彩色) 约束环境下激光诱导铜等离子体发射光谱(时间延时 $3 \mu\text{s}$, 门宽200 ns)

Fig. 2. (color online) Laser-induced breakdown plasma spectroscopy of Cu in a constrained environment (delay time $3 \mu\text{s}$, gate width 200 ns).

相对于无约束下等离子体谱线强度而言, 空间约束下原子谱线出现增强, 而离子谱线增强不明显, 其中Cu I 521.8 nm的谱线增强因子($I_{\text{空间约束}}/I_{\text{空气}}$)最高为1.2. 磁空混合约束下铜等离子体的原子和离子光谱均出现了增强, 并且Cu I 521.8 nm和Cu II 507.6 nm的谱线增强因子($I_{\text{磁空混合约束}}/I_{\text{空气}}$)分别为2和1.4. 实验结果表明, 磁空混合约束下, 磁场和空间对等离子体光谱增强都有作用, 并且磁场作用对等离子体中原子谱线的增强有重要影响. 原子谱线和离子谱线的增强因子不同, 这是由于铜离子(20.29 eV)电离能高于铜原子(7.7 eV)电离能, 在激光脉冲能量密度相同的情况下, 电离产生高价离子困难, 从而处于激发态的离子数目小于原子数目.

磁空混合约束和空间板约束环境下的激光诱导铜等离子体原子谱线Cu I 521.8 nm的光谱强度时间演化如图3所示. 随着延时时间的增加, 等

离子体向外膨胀, 激光诱导铜等离子体原子谱线 Cu I 521.8 nm 的光谱强度总体呈下降变化. 在 1—5 μs 时间范围内, 磁空混合约束下原子谱线 Cu I 521.8 nm 光谱强度最强, 在 10—13 μs 时间范围内, 磁空混合约束和空间板约束下的光谱出现增强现象. 空间约束出现光谱增强是由于激光诱导的铜等离子体冲击波遇到空间板的反射, 从而压缩等离子体造成等离子体密度增加, 从而使等离子体发射光谱增强 [8–10]. 在磁空混合约束环境下, 根据磁流体动力学 (magneto-hydrodynamics, MHD) 原理, 铜等离子体中带负电的电子和带正电的离子均受到磁场洛伦兹力的作用 [11], 带电粒子在磁场中作拉莫尔回旋运动, 从而约束等离子体羽的快速膨胀. 磁场的约束以及空间冲击波的反弹压缩, 使局部等离子体内部的电子和离子的碰撞复合概率增大, 另一方面造成高速运动的电子和原子发生碰撞, 造成原子产生电离, 因此磁空混合约束下的铜等离子体原子光谱强度最强, 并出现离子光谱增强现象 [12,13].

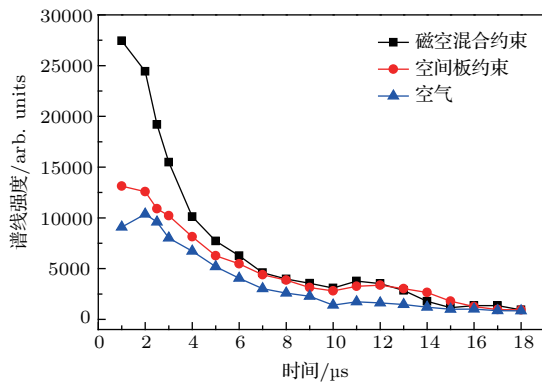


图3 (网刊彩色) 约束环境下 Cu I 521.8 nm 光谱强度的时间演化

Fig. 3. (color online) Temporal evolution of Cu I 521.8 nm spectral intensity in a constrained environment.

图4为延时时间 10 μs 时的磁空混合约束、空间约束及空气环境下激光诱导铜等离子体光谱 Cu I 521.8 nm 谱线强度的轴向空间分布. 由图4可知, 等离子体羽沿轴向膨胀造成等离子体谱线强度在距离靶材表面 1.5—5 mm 范围内最大, 这是因为在等离子体膨胀过程中, 等离子体内粒子满足 Maxwell 速度分布 [14]. 在延时 10 μs 时, 磁空混合约束下 Cu I 521.8 nm 谱线强度最强, 空间约束次之. 沿轴向空间 0—2.5 mm 和 6—7 mm 范围内, 磁空混合约束下的光谱强度最弱. 在磁空混合约束条件下, 由于激光诱导等离子体内带电粒子受磁场

洛伦兹力的作用, 以及等离子体羽在受到空间约束冲击波压缩的综合作用下, 大量带电粒子被束缚在 2.5—4 mm 空间范围内, 电子和离子的复合概率增加, 使此范围内的铜原子数目密度增大, 造成等离子体原子光谱出现增强 [15,16].

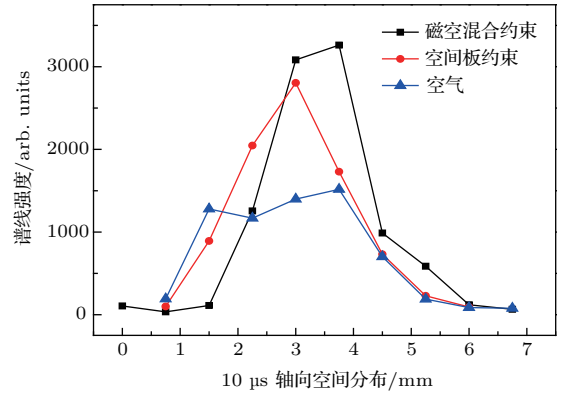


图4 (网刊彩色) 约束环境下 Cu I 521.8 nm 光谱强度的轴向空间分布

Fig. 4. (color online) Axial spatial distribution of Cu I 521.8 nm spectral intensity in a constrained environment.

图5为延时时间 10 μs 的磁空混合约束、空间约束及空气环境下激光诱导铜等离子体光谱 Cu I 521.8 nm 谱线强度的横向空间分布. 由图可知, 在磁空混合约束和空间约束环境下的 Cu I 521.8 nm 的光谱横向分布空间区域小于空气环境情形, 而磁空混合约束和空间约束下光谱强度尺寸横向分布相同为 4 mm. 这是由于等离子体冲击波遇到空间板反射从而压缩等离子体羽, 从而使等离子体羽的横向尺寸缩小, 造成等离子体内原子数目增加, 使 Cu I 521.8 nm 谱线出现增强.

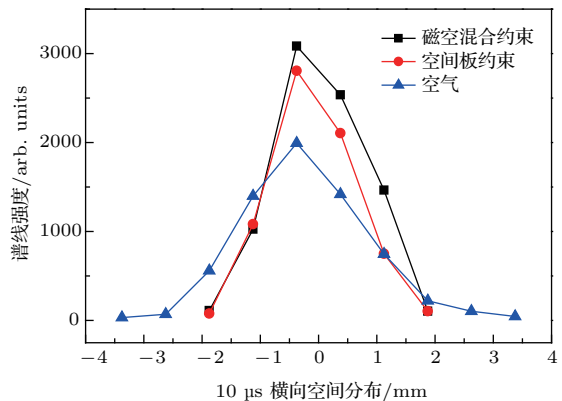


图5 (网刊彩色) 约束环境下 Cu I 521.8 nm 光谱强度的横向空间分布

Fig. 5. (color online) Transverse spatial distribution of Cu I 521.8 nm spectral intensity in a constrained environment.

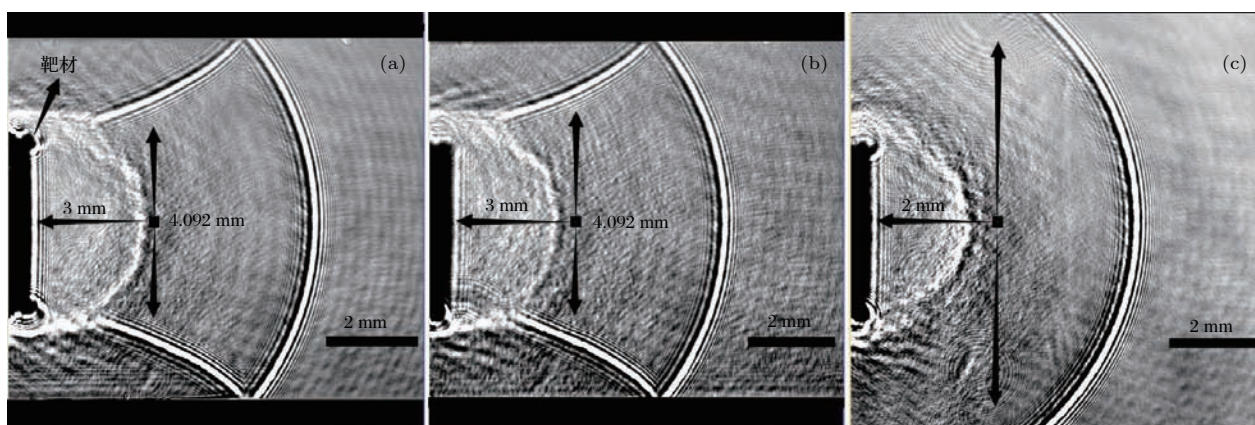


图6 延时时间为10 μs 激光诱导铜等离子体阴影图像 (a)磁空混合 (b)空间板 (c)空气

Fig. 6. Laser induced breakdown plasma of Cu by shadow-graph with delay time at 10 μs : (a) Magnetic-spatial; (b) spatial; (c) air.

图6为采用光学阴影成像法获得的延时时间10 μs 的磁空混合约束(a)、空间板约束(b)和空气(c)环境下的激光诱导铜等离子体膨胀图像。图6中黑色正方形为等离子体发射光谱实验的光纤探头收集位置,距离靶材表面3 mm。在图6(a)和(b)两种环境下的激光诱导铜等离子体向外膨胀,沿垂直方向膨胀的等离子体冲击波,遇空间不锈钢板面反射压缩等离子体羽,使等离子体羽膨胀形状发生变化。如图6所示,在(a)和(b)环境下,延时时间10 μs 时等离子体羽呈柱状向外膨胀,并且在(a)约束下等离子体羽轴向膨胀距离大于(b)中情形,而(c)环境下等离子体羽呈球形向外膨胀,沿轴向膨胀距离最小。如图6(a)和(b)环境下的等离子体羽受冲击波压缩作用,等离子体羽的横向膨胀尺寸变窄。延时时间为10 μs 的等离子体羽受冲击波压缩作用后横向尺寸为4.1 mm,这与图5中的等离子体光谱Cu I 521.8 nm的光谱强度的横向分布相符合。

4 结 论

本文对在磁空混合约束环境下的激光诱导铜等离子体发射光谱特性进行了研究。在磁空混合约束环境下,激光诱导铜等离子体的内部带电粒子受磁场洛伦兹力作用,使铜等离子体受到磁约束作用,同时受到铜等离子体产生的冲击波遇空间板反射并压缩羽体的空间约束作用。等离子体在磁约束和空间约束的混合作用下,造成等离子体内电子与离子复合概率增加,以及电子与原子的碰撞概率增

加,使原子和离子光谱出现增强现象。在磁空混合约束作用下,铜原子光谱Cu I 521.8 nm的光谱强度的时间演化曲线与空间约束不同,在小延时光谱增强是由于磁约束产生的,而大延时为空间约束产生。基于铜原子光谱Cu I 521.8 nm的光谱强度的空间分布,表明磁空混合约束等离子体的横向分布受到压缩,使等离子体内原子数密度最大空间位置前移,和光学阴影成像图像相符合。通过研究磁空混合约束下的激光诱导铜等离子体发射光谱空间分布特性,对提高激光诱导等离子体光谱技术的探测灵敏度提供了坚实的理论基础。

参考文献

- [1] Hemmerlin M, Meilland R, Falk H, Wintjens P, Paulard L 2001 *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* **56** 661
- [2] Michel A P, Lawrence Snyder M, Angel S M, Chave A D 2007 *Appl. Opt.* **46** 2507
- [3] Hanafi M, Omar M M, Gamal E D 2000 *Radiat. Phys. Chem.* **57** 11
- [4] Asimellis G, Hamilton S, Giannoudakos A, Kompitsas M 2005 *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* **60** 1132
- [5] Du C, Gao X, Shao Y, Song X W, Zhao Z M, Hao Z Q, Lin J Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 045202 (in Chinese) [杜闯,高勋,邵妍,宋晓伟,赵振明,郝作强,林景全 2013 物理学报 **62** 045202]
- [6] Harilal S S, Tillack M S, O' Shay B, Bindhu C V, Najmabadi F 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026413
- [7] Gao X, Liu L, Song C, Lin J Q 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 175205
- [8] Li C, Gao X, Liu L, Lin J Q 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 145203 (in Chinese) [李丞,高勋,刘潞,林景全 2014 物理学报 **63** 145203]
- [9] Wang Z, Hou Z, Lui S L, Jiang D, Liu J, Li Z 2012 *Opt. Express* **20** 1011

- [10] Shen X K, Sun J, Ling H, Lu Y F 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 081501
- [11] Guo L B, Hu W, Zhang B Y, He X N, Li C M, Zhou Y S, Cai Z X, Zeng X Y, Lu Y F 2011 *Opt. Express* **19** 14067
- [12] Li Y, Hu C, Zhang H, Jiang Z, Li Z 2009 *Appl. Opt.* **48** B105
- [13] Pagano C, Hafeez S, Lunney J G 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 155205
- [14] Li C, Zhang L Y, Qian S W 1979 *Thermology* (Beijing: Higher Education Press) p72 (in Chinese) [李椿, 章立源, 钱尚武 1979 热学 (北京: 高等教育出版社) 第 72 页]
- [15] Qindeel R, Bidin N, Zia R, Daud Y M 2011 *Optoelectron. Adv. Mat. Rapid Commun.* **5** 331
- [16] Tillack M S, Harilal S S, Najmabadi F, O' Shay J 2005 *IFSA* **5** 45

Laser induced plasma spectral characteristics of Cu with magnetically and spatially combined confinement*

Li Bai-Hui¹⁾ Gao Xun^{1)†} Song Chao²⁾ Lin Jing-Quan¹⁾

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

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

(Received 7 August 2016; revised manuscript received 5 September 2016)

Abstract

In order to explore and understand the spectroscopic characteristics of laser induced plasma and spectral intensity distribution under magnetic-spatially combined confinement, in this paper, the laser induced breakdown plasma spectral characteristics of Cu with magnetic-spatially combined confinement, obtained by the optical emission spectroscopy and the optical shadow graph are studied. The temporal evolutions of spectral intensity and the axial and transversal distributions of Cu I 521.8 nm plasma spectrum with magnetic-spatially combined confinement are analyzed. The experimental results show that the laser induced Cu plasma spectra are all enhanced under the conditions of magnetic-spatially combined confinement and spatial confinement. In addition, the maximum enhancement factors of Cu I 521.8 nm in these two kinds of confinement conditions are 2 and 1.2, respectively. The enhanced effect of plasma ion spectrum in the magnetic-spatial field is stronger than that of spatial confinement. Under the effect of magnetic-spatially combined confinement, spectral enhancement mechanisms are derived from the magnetic field and spatial mixed actions. At the early stage of plasma expansion, the magnetic field action is a dominant factor. The charged particles in plasma are affected by the Lorentz force in the magnetic field which induces the charged particles to do the Lamor cyclotron motion, then the plasma expansion is restrained and the plasma volume decreases. The frequency of collisions between the electron and ion in the plasma increases. Therefore, the spectral intensities of atoms and ions are strengthened. For the case of the larger delay time, the spectral enhancement is caused by the spatial confinement. The axial and transversal spatial intensity distributions of Cu I 521.8 nm are analyzed by the optical shadow graph method. The plasma is compressed by the shock wave because the shock wave generated by the Cu plasma is reflected by the space plate. The transversal expansion of plasma plume is constrained by the spatial confinement, which causes the spatial position of the plasma internal atoms with high density to move forward, and also induces the maximum axial spatial location of Cu I 521.8 nm spectral intensity to be far from the Cu metal surface. The results indicate that the axial distribution of plasma plume, obtained from the optical shadow graph is corresponding to the axial distribution of plasma spectrum obtained by the optical emission spectroscopy. In summary, the spectrum enhancement of laser induced plasma with the magnetic-spatial combined confinement is influenced by two forces: one is the magnetic force and the other is the compressive force caused by the shock wave. The study of the laser induced breakdown plasma spectral characteristics of Cu with magnetic-spatially combined confinement provides a simple and powerful tool for improving the sensitivity of laser induced breakdown spectroscopy.

Keywords: laser induced plasma, magnetic-spatial combined confinement, spectral enhancement, shock wave compression

PACS: 52.55.-s, 52.50.Lp, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.65.235201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61575030).

† Corresponding author. E-mail: lasercust@163.com