

## 磁场约束下激光诱导等离子体光谱强度演化研究\*

李丞 高勋<sup>†</sup> 刘潞 林景全

(长春理工大学理学院, 长春 130022)

(2014年1月17日收到; 2014年3月4日收到修改稿)

对磁场约束下激光诱导铜等离子体光谱强度演化进行了实验研究, 分析了在磁场约束环境下的等离子体光谱强度演化过程以及激光能量对光谱增强的影响. 实验结果表明: 在磁场约束下铜等离子体内原子光谱和离子光谱均有所增强, 在磁场约束下 Cu I 510.55 nm 谱线强度时间演化过程中在 1.2—5.7  $\mu\text{s}$  时间范围内附近出现双峰结构, 在距离靶材表面 0—1.4 mm 空间范围内磁场约束 Cu I 510.55 nm 光谱增强明显. Cu I 510.55 nm 和 Cu I 515.32 nm 光谱增强因子随激光能量的增加呈单调递减变化, 激光能量 20 mJ 时增强因子最大分别为 11 和 8. 对磁场约束下等离子体发射光谱强度增强的物理原因进行了探讨.

**关键词:** 激光等离子体, 光谱增强, 磁场约束**PACS:** 52.55.Dy, 42.62.Fi, 52.40.Mj**DOI:** 10.7498/aps.63.145203

## 1 引言

近年来, 激光诱导等离子体光谱在激光痕量分析、激光薄膜沉积、表面刻蚀和惯性约束核聚变等领域有着广泛的应用. 对于研究激光等离子体的空间和时间膨胀动力学过程, 开展激光诱导等离子体光谱的时空演化研究有着重要意义. 激光诱导等离子体光谱的研究虽然得到了长足的发展, 但有一些不足: 如较高的探测限、高连续背景、重复精度低和谱线的自吸收等. 为提高激光等离子体光谱的探测灵敏度, 科研人员发展了一系列方法, 如充入缓冲气体<sup>[1]</sup>、偏振分辨<sup>[2,3]</sup>、双脉冲激发<sup>[4]</sup>、外加约束条件等来提高光谱的信背比. Harilal 等<sup>[5]</sup>在真空环境下采用强磁场对等离子体进行约束, 发现磁场下等离子体羽的膨胀符合磁场流体力学方程(MHD)模型, 且等离子体光谱均有增强现象, 磁场对离子光谱的时间演化没有太大影响, 而原子光谱的时间演化呈多峰分布. Guo 等<sup>[6]</sup>基于磁场约束与空间约束相结合实现了金属钴激光诱导击穿光谱增强, 提

高了光谱探测能力. Li 等<sup>[7]</sup>研究发现磁场约束环境下铜等离子体光谱增强大小与入射激光脉冲能量密度成反比变化. 由于在磁场约束条件下, 涉及磁场对激光诱导击穿形成的等离子体作用过程, 其物理过程极其复杂, 尚无理论清晰解释磁场约束条件下磁场对等离子体发射光谱增强的影响, 需要进一步深入研究.

本文开展了对在磁场约束下纳秒激光诱导铜等离子体发射光谱的时间演化过程的研究, 分析磁场约束对铜等离子体发射光谱强度的影响机制; 实验发现在磁场约束下铜等离子体中原子光谱和离子光谱均有所增强, 探讨磁场约束对等离子体发射光谱强度增强的物理原因, 并研究了激光脉冲能量对光谱增强的影响.

## 2 实验装置

磁场约束下激光诱导等离子体光谱实验装置如图 1 所示, 激光光源为输出波长 1064 nm 的 Nd:YAG 激光器(美国 Continuum, 型号 Pow-

\* 国家自然科学基金(批准号: 11074027, 61178022, 11211120156)、吉林省科技厅项目(批准号: 201215132)和教育部博士点基金-新教师项目(批准号: 20112216120006)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: [lasercust@163.com](mailto:lasercust@163.com)

er8000), 重复频率 10 Hz, 脉宽约 10 ns, 作用在靶面的激光能量用二分之一波片和激光格兰棱镜组成的能量衰减系统调节. 实验采用 Cu 靶, 并将 Cu 靶放置于两块永磁铁组成的磁场环境中 (如图 1 所示). 激光经焦距为 150 mm 的平凸 K9 玻璃透镜聚焦到 Cu 靶表面, 激光光斑直径 0.1 mm. 铜靶激光等离子体的光谱信号由配有 ICCD 探测器的 Spectra Pro500i 光谱仪进行采集. 铜等离子体光谱通过垂直于入射激光光路方向上放置的焦距 75 mm 的平凸 K9 玻璃透镜, 1 : 1 成像耦合到光谱仪的光纤探头. 激光器的调 Q 信号同步触发 ICCD 进行光谱时间分辨采集, 通过光谱仪软件设置延时和门宽参数. 铜样品固定于 XYZ 三维平移台上, 在 X 方向做匀速运动, 使每束激光脉冲作用在样品新的表面位置. 实验环境为标准大气压、室温 22 °C, 相对湿度为 30%.

在铜样品上下两端放置相距 20 mm 的两块极性相反的永磁铁, 永磁铁的几何尺寸为 63 mm (X) × 36 mm (Y) × 37 mm (Z), 通过不导磁钢支架固定, 形成中心强度为 0.67 T 并向四周渐弱的非均匀磁场, 利用高斯计 (型号: 亨通 HT20) 测量的磁场空间分布如图 2 所示. 铜样品放置在磁场中心位置 ( $x = y = 0$  位置). 近似认为在等离子体膨胀的局部磁场区域内, 磁场强度恒定. 铜样品的纯度为 99.9%, 在实验中切成 50 mm (X) × 7 mm (Z) × 3 mm (Y) 长条形, 固定在 XYZ 三维平移台开展实验.

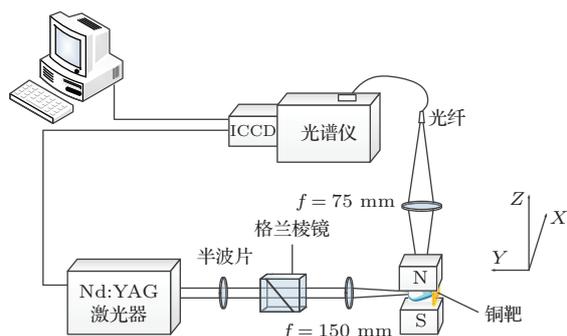


图 1 磁场约束激光等离子体发射光谱实验装置

### 3 结果与讨论

在磁场约束和无磁场约束条件下铜样品的纳秒激光诱导击穿的铜等离子体光谱如图 3 所示. 实验中磁场强度为 0.67 T, 脉冲能量 20 mJ, 光谱仪 ICCD 探测器的门宽和探测延时均为 1 μs. 在

437—530 nm 范围内, 观察到了铜原子谱线 Cu I 510.55 nm, Cu I 515.32 nm, Cu I 521.82 nm, 铜一价离子谱线 Cu II 507.23 nm, Cu II 508.82 nm 和二价离子谱线 Cu III 437.71 nm, Cu III 438.64 nm.

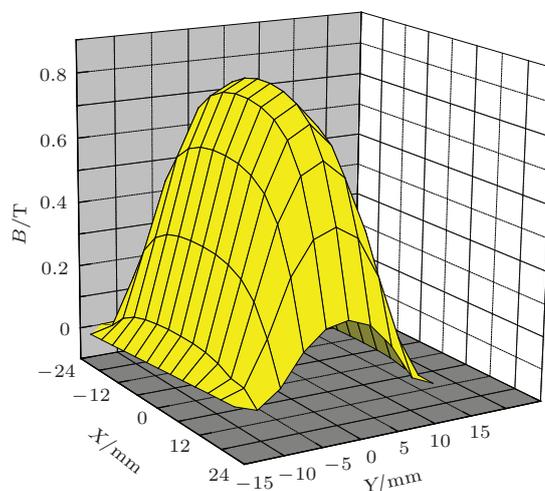


图 2 磁场强度分布

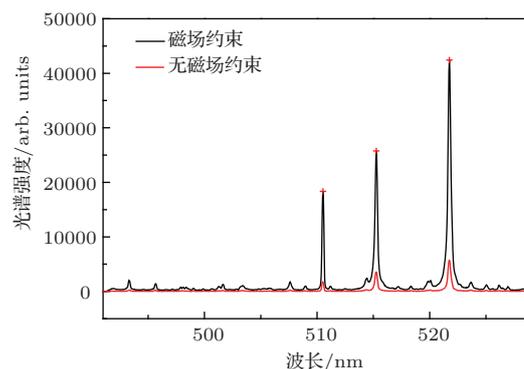
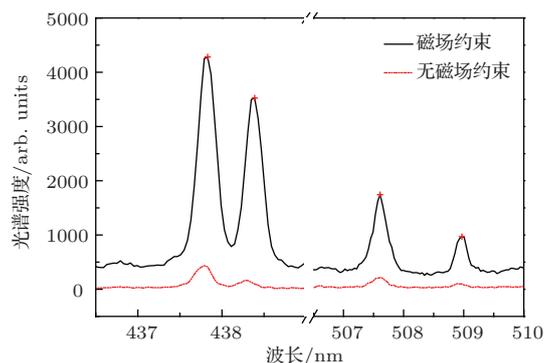


图 3 (网刊彩色) 磁场约束与无约束条件下铜等离子体发射光谱

从图 3 看出, 相对于无磁场约束, 磁场约束下铜等离子体内原子光谱和离子光谱均有所增强, 铜等离子体原子光谱 Cu I 510.55 nm 增强约 11 倍, Cu I 515.32 nm 增强约 8 倍, Cu I 521.82 nm 增强 7 倍. 铜一价电离离子光谱 Cu II 507.23 nm 增强 10

倍, 二阶电离离子光谱 Cu III 437.71 nm 增强 8 倍. 从图中还可以看出, 铜原子光谱强度普遍高于一价离子光谱强度, 而一价离子光谱强度要大于二价离子光谱强度. 这是由于  $\text{Cu}^+$  的电离能 20.29 eV 大于 Cu 的电离能 7.7 eV, 在同样激光作用条件下, 电离产生高价离子困难, 从而处于激发态的高价离子数量小于原子个数.

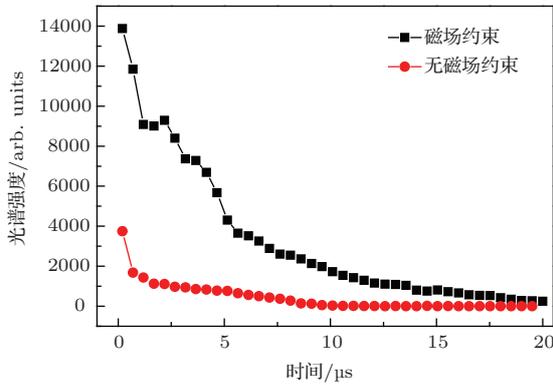


图 4 有磁场和无磁场情形下 Cu I 510.55 nm 光谱强度的时间演化

在脉冲能量 30 mJ 激光作用下, 探测距铜靶表面 1 mm 位置处的等离子体光谱 Cu I 510.55 nm 光谱强度的时间演化曲线如图 4 所示, 光谱仪 ICCD 探测器门宽为 500 ns. 从图 4 可知, 在 0.2—20  $\mu\text{s}$  时间范围内, Cu I 510.55 nm 谱线强度在有磁场约束和无磁场约束情形下均随时间的增加呈降低趋势, 在时间大于 15  $\mu\text{s}$  后光谱强度变化缓慢, 且磁场约束作用下的等离子体光谱强度均大于无磁场情形下. 在磁场约束下, Cu I 510.55 nm 光谱强度在 1.2—5.7  $\mu\text{s}$  范围内出现增强, 与无磁场约束相比有一个持续时间为 4.5  $\mu\text{s}$  左右的弛豫过程, 等离子体光谱强度时间演化轮廓呈现双峰结构, 这与 Harilal 在 0.64 T 的磁场下观察到的实验现象类似<sup>[5]</sup>, 随后光谱强度随时间缓慢衰减. 等离子体膨胀过程中存在冲击波, 冲击波的扩展速度在  $10^4$ — $10^5$  m/s 量级<sup>[8]</sup>, 激光烧蚀产生的铜等离子体在磁场中间位置, 磁场空间大小为 20 mm, 则等离子体冲击波在两磁极间传输时间约为 2  $\mu\text{s}$ , 因此在磁场约束下光谱出现双峰结构, 可能是由于两磁极对等离子体存在空间约束作用<sup>[9]</sup>, 等离子体冲击波对铜等离子体再次激励, 使铜等离子体光谱出现增强, 从而在光谱强度时间演化过程中在时间 2  $\mu\text{s}$  附近出现双峰结构.

图 5 为激光脉冲能量 30 mJ, ICCD 门宽 1  $\mu\text{s}$ ,

延时 1  $\mu\text{s}$  条件下有磁场和无磁场情形下 Cu I 510.55 nm 光谱强度的空间分布. 从图 5 可知, 存在磁场条件下和无磁场条件下, Cu I 510.55 nm 光谱强度均随着距铜靶表面的距离的增加呈先增加后下降, 出现光谱强度最大的空间位置均在距靶表面 1.5 mm 附近, 但在 0—1.4 mm 范围内磁场环境下等离子体 Cu I 510.55 nm 光谱强度出现明显增强, 由于诱导产生的铜等离子体在磁场中沿轴向 (Y) 方向膨胀, 等离子体内的电子和离子在洛伦兹力作用下沿 (X) 方向相向分离运动, 等离子体在  $J \times B$  力作用下在轴向 (Y) 方向膨胀受到抑制, 因此磁场约束使等离子体内碰撞概率增加, 出现了铜原子光谱增强.

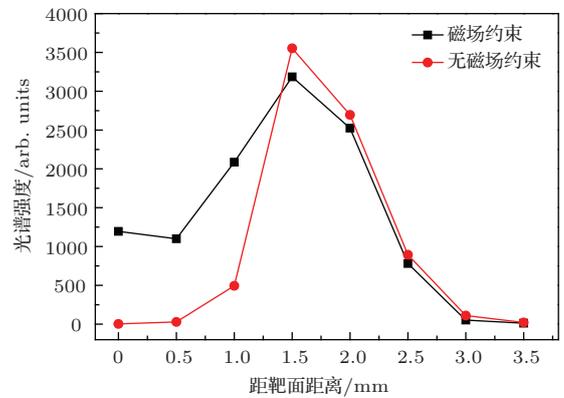


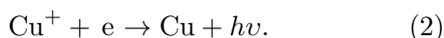
图 5 有磁场和无磁场情形下 Cu I 510.55 nm 光谱强度的空间分布

在磁场约束下, 等离子体光谱出现了增强, 这是由于激光烧蚀铜诱导产生的铜等离子体以半球形状向外膨胀受到磁场约束, 等离子体内离子和电子在磁场中受到洛伦兹力影响, 等离子体膨胀速度变慢. 等离子体在磁场中膨胀和扩散, 满足欧姆定律<sup>[10]</sup>

$$E + V \times B = J/\sigma_0 + (J \times B)/n_e e, \quad (1)$$

其中  $E$  和  $B$  分别为等离子体内部电场强度、磁场强度,  $J$  为电流密度,  $\sigma_0$  为电导率,  $n_e$  为电子密度,  $V$  是质流速度.  $J \times B$  称为霍尔电流项,  $J \times B$  作用力推动等离子体向外膨胀, 直至磁压力与等离子体压力达到平衡. 在此过程中, 等离子体离子和电子从磁场中获取能量, 通过焦耳加热方式使电子动能增加, 高能电子激发原子电离产生高电离态离子. 因此磁场约束促使电子碰撞电离的概率增加, 进而离子数目增多, 引起离子光谱强度增强. 电子通过磁场焦耳加热获得的能量, 通过碰撞几乎将全部能量

交给了离子, 电子和离子复合产生新的铜原子, 从而出现了铜原子光谱增强现象<sup>[11]</sup>.



在铜离子和电子复合过程中产生了铜原子, 多余的能量以光子的形式向外释放, 因此相对于无磁场约束下, 除了观察到等离子体光谱增强的同时, 连续光谱强度也在增强, 如图3所示.

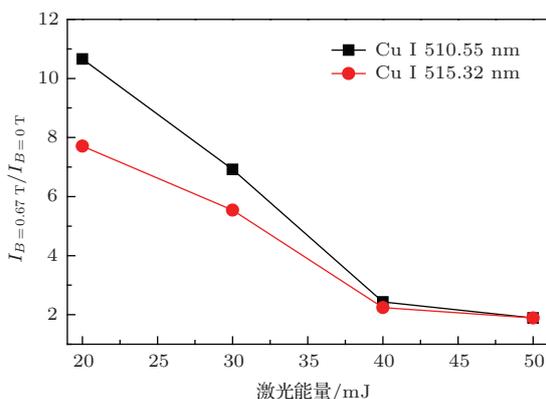


图6 磁场约束下光谱增强因子随激光能量变化关系

磁场约束下光谱增强与入射激光能量密度有关系<sup>[12]</sup>. 光谱增强因子定义为有磁场约束和无磁场约束下的光谱积分强度之比<sup>[7]</sup>. 光谱仪ICCD门宽1 μs, 时间延时1 μs, 在靶材表面前1 mm位置采集等离子体光谱. 磁场约束下Cu I 510.55 nm和Cu I 515.32 nm光谱增强因子随激光能量的变化曲线如图6所示. 在实验条件下, 在激光能量20—50 mJ范围内, Cu I 510.55 nm和Cu I 515.32 nm光谱增强因子随激光能量的增加单调递减, 在激光能量20 mJ时增强因子分别约为11和8, 之后随着激光能量的增加, 增强因子均逐渐减小. 当激光能量大于40 mJ后, 磁场约束下光谱增强因子变化缓慢. 等离子体在磁场约束作用下, 等离子体内的电子和离子在洛伦兹力作用下, 在等离子体前端区域内粒子密度变大. 当激光能量增大, 等离子体的磁场约束作用减弱. 由MHD方程<sup>[13]</sup>知等离子体参数

$$\beta = \frac{8\pi n_e k T_e}{B^2},$$

$T_e$ 为电子温度,  $k$ 为玻尔兹曼常数. 激光能量越大对样品的烧蚀量越大<sup>[14]</sup>, 进而铜等离子体电子密度 $n_e$ 和电子温度 $T_e$ 变大, 最终导致粒子压强 (particle pressure) 增大, 在磁压 (magnetic field pressure) 固定的情况下, 等离子体膨胀压力增大, 等离子向外扩张越明显. 等离子体前沿位置向前膨

胀, 造成探测区域的粒子密度降低, 因而在固定等离子体探测位置时, 激光等离子体光谱增强因子随激光能量增加而降低.

## 4 结 论

本文对磁场约束下激光诱导铜等离子体光谱强度演化进行了实验研究. 相对于无磁场条件下, 受到磁场约束的铜等离子体内的电子通过磁场焦耳加热获得能量, 碰撞加剧, 同时离子电子复合概率增加, 磁场约束下铜等离子体内原子光谱和离子光谱均有所增强, 铜等离子体原子光谱Cu I 510.55 nm增强11倍, Cu I 515.32 nm增强8倍, Cu I 521.82 nm增强7倍. 铜一阶电离离子光谱Cu II 507.23 nm增强10倍, 二阶电离离子光谱Cu III 437.71 nm增强8倍. 由于两磁极对等离子体存在空间约束作用, 使铜等离子体光谱出现增强, 从而在磁场约束下, 铜原子510 nm谱线强度时间演化过程中在1.2—5.7 μs时间范围内附近出现双峰结构. 在磁场约束下, Cu I 510.55 nm和Cu I 515.32 nm光谱增强因子随激光能量的增加单调递减变化, 激光能量20 mJ时增强因子最大分别为11和8.

## 参考文献

- [1] Kitaoka C, Wagatsuma K 2009 *Meta. Ana.* **3** 003
- [2] Agnes N, Tao H Y, Hao Z Q, Sun C K, Gao X, Lin J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 014209
- [3] Liu J, Tao H Y, Gao X, Hao Z Q, Lin J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 044206
- [4] 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]
- [5] Harilal S S, Tillack M S, O'shay B, Bindhu C V, Najmabadi F 2004 *Phys. Rev. E* **69** 026413
- [6] 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. Exp.* **19** 14067
- [7] Li Y, Hu C, Zhang H, Jiang Z, Li Z 2009 *Appl. Opt.* **48** B105
- [8] Chen Z, Bogaerts A 2005 *J. Phys.* **97** 063305
- [9] Shen X K, He X N, Huang H, Lu Y F 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 081501
- [10] Neogi A, Thareja R K 1999 *Phys. Plasma* **6** 365
- [11] Bittencourt José A 2004 *Fundamentals of Plasma Physics Fund* (New York: Springer Press) pp470–477
- [12] Rai V N, Rai A K, Yueh F Y, Singh J P 2003 *Appl. Opt.* **42** 2085

[13] Chen F F, Lieberman M A 1984 *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (New York: Plenum Press) pp184–189

[14] Nolte S, Momma C, Jacobs H, Tünnermann A, Chichkov B N, Wellegehausen B, Welling H 1997 *J. Opt. Soc. Am. B* **14** 2716

## Evolution of laser-induced plasma spectrum intensity under magnetic field confinement\*

Li Cheng Gao Xun<sup>†</sup> Liu Lu Lin Jing-Quan

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

( Received 17 January 2014; revised manuscript received 4 March 2014 )

### Abstract

In this paper, the evolution of laser-induced copper plasma spectrum intensity under magnetic field confinement is studied. The evolution process of plasma spectrum intensity and laser energy effect on spectral enhancement are analyzed. Experimental results show that the atomic spectrum and ion spectrum of copper plasma are enhanced as magnetic field increases. In the spectral intensity evolution plot of Cu I 510.55 nm there appears double peak structure in a time range from 1.2  $\mu$ s to 5.7  $\mu$ s. The spectral intensity of Cu I 510.55 nm is significantly enhanced in a space range from 0 mm to 1.4 mm away from the target surface. The spectral enhancement factors of Cu I 510.55 nm and Cu I 515.32 nm monotonically decrease with the laser pulse energy increasing, and the maximum enhancement factors for Cu I 510.55 nm and Cu I 515.32 nm are 11 and 8 respectively at the laser energy 20 mJ. The enhancement mechanism of magnetic confinement plasma spectrum is also discussed.

**Keywords:** laser plasma, optical enhancement, magnetic confined

**PACS:** 52.55.Dy, 42.62.Fi, 52.40.Mj

**DOI:** 10.7498/aps.63.145203

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11074027, 61178022, 11211120156), the Natural Science Foundation of Jilin Province, China (Grant No. 201215132), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of High Education of China (Grant No. 20112216120006).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [lasercust@163.com](mailto:lasercust@163.com)