第16卷第11期
2026年11月

中国无机分析化学
Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry

Vol. 16, No. 11
2118～2124

doi: 10. 20236/j. CJIAC. 2026. 11. 015

纪景浩，王秋云，王喜瑞，等. 激光辅热时间对激光诱导Cu等离子体辐射特性的影响[J]. 中国无机分析化学，2026，16(11)：2118-2124.

Ji Jinghao, Wang Qiuyun, Wang Xirui, et al. Effect of Laser-assisted Heating Duration on the Emission Characteristics of Laser-induced Cu Plasma[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2026, 16(11): 2118-2124.

激光辅热时间对激光诱导Cu等离子体辐射特性的影响

纪景浩[1]　王秋云[1*]　王喜瑞[1]　高　勋[1,2*]

（1.长春理工大学 物理学院，长春 130022；
2.长春理工大学 中山研究院，广东 中山 528400）

摘　要　激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy，LIBS)具有快速、无需样品制备和多元素同步分析等优势，在材料分析、环境监测等领域具有广泛应用前景。然而，LIBS信号强度易受到激光与物质相互作用效率、材料烧蚀过程以及等离子体演化行为的影响，限制了检测灵敏度和稳定性。因此，发展简单有效的等离子体调控方法，揭示其对LIBS辐射特性的影响机制具有重要意义。本文采用激光辅助加热方法调控Cu等离子体辐射特性，研究辅助加热时间对等离子体发射行为及参数演化规律的影响。通过构建CO_2连续激光辅助加热与Nd：YAG纳秒LIBS相结合的实验系统，分析了不同辅助加热时间下Cu等离子体发射光谱、信背比(Signal-to-background Ratio，SBR)、激发温度及电子密度。结果表明，随着辅助加热时间的增加，Cu等离子体辐射强度逐渐增强。当辅助加热时间达7. 5 min时，Cu Ⅰ 521. 82 nm谱线峰值强度较未辅助加热时提高约2. 1倍，SBR提高了约1. 85倍。同时，等离子体激发温度由1.02×10^4 K提升至1.13×10^4 K，电子密度由7.19×10^{16} cm^{-3}增至7.59×10^{16} cm^{-3}。激光辅助加热通过提高Cu靶材初始温度、增强材料烧蚀效率，并对形成的Cu等离子体进行再加热，促进电子与粒子间的碰撞激发和电离过程，从而增强等离子体辐射。研究结果表明，激光辅助加热能够有效提升LIBS光谱信号强度和分析性能。

关键词　激光诱导击穿光谱；激光辅助加热；Cu等离子体；信背比；等离子体参数

要点

1）构建了激光辅助加热增强LIBS实验方法。

2）揭示了辅助加热时间对Cu等离子体辐射特性的影响规律。

3）阐明了靶材加热与等离子体再加热的增强机制。

中图分类号：O657. 38　O433. 4　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2095-1035(2026)11-2118-07

收稿日期：2026-08-17　**修回日期**：2026-08-24　**录用日期**：2026-08-29　**在线出版日期**：2026-09-02

Received：2026-08-17　**Revised**：2026-08-24　**Accepted**：2026-08-29　**Online published**：2026-09-02

基金项目：国家自然科学基金-面上基金资助项目(62575035)；国家自然科学基金-青年科学基金项目(C类)(62605041)

Fund：Supported by the National Natural Science Foundation of China-General Project (62575035)； National Natural Science Foundation of China-Young Scientists Fund (C) (62605041)

作者简介：纪景浩，男，在读研究生，主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail：1036926846@qq. com

Author：Ji Jinghao, male, graduate student, mainly engaged in research in the interaction between laser and matter. E-mail：1036926846@qq. com

*通信作者：王秋云，女，讲师，主要从事水中重金属污染元素检测方面的研究。E-mail：wangqiuyun@cust. edu. cn；
高勋，男，教授，主要从事激光等离子体光谱技术与应用、表面增强拉曼光谱、光电对抗等领域研究。E-mail：lasercust@163. com

*Corresponding author：Wang Qiuyun, female, lecturer, mainly engaged in research in the detection of heavy metal pollutants in water. E-mail：wangqiuyun@cust. edu. cn

Gao Xun, male, professor, mainly engaged in laser plasma spectroscopy and its applications, surface-enhanced Raman spectroscopy (SERS), and optoelectronic countermeasures. E-mail：lasercust@163. com

©Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry Editorial Department 2026. This is an open access article under the CC-BY-NC-ND 4.0 License.

激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy，LIBS)是一种基于激光诱导等离子体发射光谱分析的元素检测技术。当高能脉冲激光作用于样品表面时，样品吸收激光能量并发生熔融、汽化和电离，形成高温等离子体。通过分析等离子体冷却过程中发射的特征光谱，可实现样品中多元素的快速检测[1-2]。由于具有无需复杂样品预处理、分析速度快、可原位检测以及多元素同步分析等优势，LIBS已广泛应用于材料分析、环境监测、工业检测等领域[3-9]。然而，LIBS信号强度易受到激光与物质相互作用效率、样品烧蚀过程以及等离子体演化行为的影响。在激光作用过程中，部分能量通过反射、散射和热传导等方式损失，导致材料烧蚀效率降低；同时，瞬态等离子体具有快速膨胀和冷却特性，导致激发态粒子数减少，限制了LIBS检测灵敏度和稳定性。因此，提高激光能量利用效率、增强等离子体辐射强度是改善LIBS性能的重要途径。近年来，研究人员提出了多种LIBS信号增强方法，包括双脉冲LIBS、磁场约束LIBS、空间约束LIBS以及表面增强LIBS等[10-19]。然而，这些方法通常需要复杂的实验装置或特殊样品处理。因此，开发简单有效的LIBS信号增强方法仍具有重要意义。

提高样品初始温度被认为是一种简单有效的LIBS信号增强方法。预热可改变激光与材料的相互作用，提高材料烧蚀效率并增强等离子体辐射。已有研究表明，提高样品温度可增大等离子体体积、增强特征谱线强度，并提高检测灵敏度[20-25]。然而，传统加热方法通常需额外加热装置，存在加热效率低、温度控制困难，且可能引起样品氧化和结构变化等问题。相比之下，激光辅助加热具有非接触、局部化和快速响应等优势，可实现激光与物质相互作用及等离子体演化过程的动态调控[26-27]。辅助激光不仅能够提高样品表面初始温度，降低材料的烧蚀阈值，促进样品蒸发和等离子体形成；同时，在等离子体形成后，辅助激光还可与等离子体发生能量耦合，通过再加热提高电子能量，增强粒子的碰撞激发和电离，从而增强等离子体辐射强度[28-30]。因此，激光辅助加热为增强LIBS信号提供了一种简单有效的方法。

本文采用激光辅助加热结合纳秒LIBS技术，以Cu靶为研究对象，系统研究辅助加热时间对Cu等离子体发射特性的影响。通过分析Cu Ⅰ 521.82 nm谱线强度、信背比(Signal-to-background Ratio，SBR)、等离子体激发温度和电子密度的变化规律，揭示激光辅助加热中靶热积累和等离子体再加热对LIBS信号增强的作用机制，为提升LIBS检测性能提供理论依据。

1　实验装置

激光辅助加热LIBS实验装置如图1所示。实验系统主要由纳秒激光烧蚀系统、CO_2激光辅助加热系统、光谱采集系统以及同步控制系统组成。采用调Q Nd：YAG激光器(Continuum Power 8000)作为LIBS激发光源，输出波长为1 064 nm，脉冲宽度为10 ns，重复频率为10 Hz。激光束首先经过由半波片和Glan激光偏振棱镜组成的能量调节系统，以实现激光能量的精确控制，实验中单脉冲能量设置为60 mJ，对应激光能量密度为30.6 J/cm^2。随后，激光经反射镜导向，并通过焦距为125 mm的石英透镜(L1)聚焦于Cu靶材表面，透镜焦点位置位于样品表面附近。为实现激光辅助加热，采用CO_2激光器(永力激光RLT-35)作为辅助热源，其中心波长为10.6 μm，脉冲宽度为200 μs，重复频率为5 kHz，激光光斑直径约为(2.0±0.2) mm，最大输出功率为30 W。CO_2激光与纳秒激光共同作用于Cu靶材表面，通过改变辅助加热时间研究其对Cu等离子体辐射特性的影响。实验设置辅助加热时间分别为0、2.5、5.0和7.5 min。CO_2激光与样品表面呈45°角。Cu靶材固定于三维电控移动平台(PI M-415.DG)上，通过控制样品移动实现激光扫描烧蚀，使每个激光脉冲作用于新鲜表面，从而降低连续烧蚀引起的累积效应。实验过程中，所有测试均在室温大气环境下进行。等离子体发射光谱通过焦距为200 mm的收集透镜

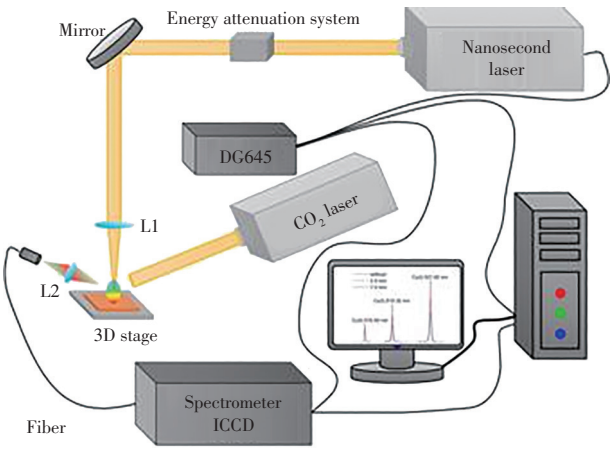


图1　激光辅助加热LIBS实验装置示意图

Figure 1　Schematic diagram of the laser-assisted heating LIBS experimental setup.

(L2)进行采集，并经光纤传输至光谱仪(Princeton Instruments SP-500i)进行分光。分光后的光信号由增强型CCD探测器(ICCD) (Princeton Instruments ST133，256×1024像素)记录。实验时序由数字延迟发生器(Stanford Research Systems DG645)进行同步控制，实现纳秒激光、辅助加热激光以及光谱采集系统之间的精确同步，以保证实验结果的重复性。为提高光谱信噪比和实验稳定性，每个实验条件下均采集11次连续激光脉冲信号，并对所得光谱进行平均处理。

2 结果与讨论

图2为不同激光辅助加热时间下Cu等离子体发射光谱。由图2可见，在不同辅助加热条件下，均检测到明显的Cu特征发射谱线，主要包括Cu Ⅰ 510.55 nm、Cu Ⅰ 515.32 nm和Cu Ⅰ 521.82 nm等特征峰。随着激光辅助加热时间的增加，Cu等离子体整体辐射强度逐渐增强，各特征谱线峰值均呈现明显增强趋势。上述结果表明，激光辅助加热能够有效增强Cu等离子体的光谱辐射特性，并且增强效果与辅助加热时间密切相关。为了进一步定量分析辅助加热时间对Cu特征谱线强度的影响，选取辐射强度较高且谱线分离度较好的Cu(I)521.82 nm作为分析谱线，其峰值强度变化如图3所示。

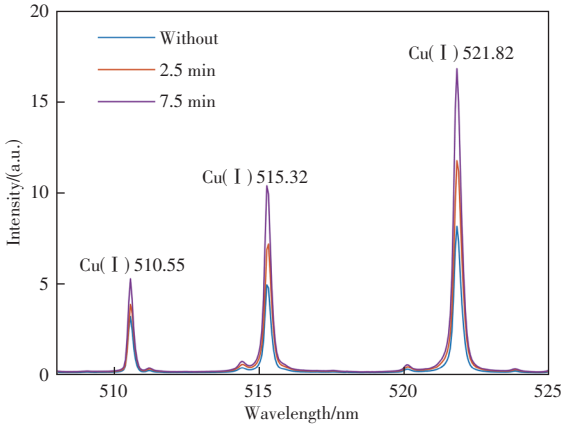


图2 不同激光辅热时间下Cu等离子体辐射光谱

Figure 2 Emission spectra of Cu plasma under different laser-assisted heating durations.

图3展示了不同激光辅助加热时间下Cu Ⅰ 521.82 nm谱线峰值强度的变化规律。由图3可知，随着辅助加热时间由0增至7.5 min，Cu Ⅰ 521.82 nm谱线强度呈持续增加趋势。其中，未辅助加热条件下谱线强度最低，而在辅助加热7.5 min时

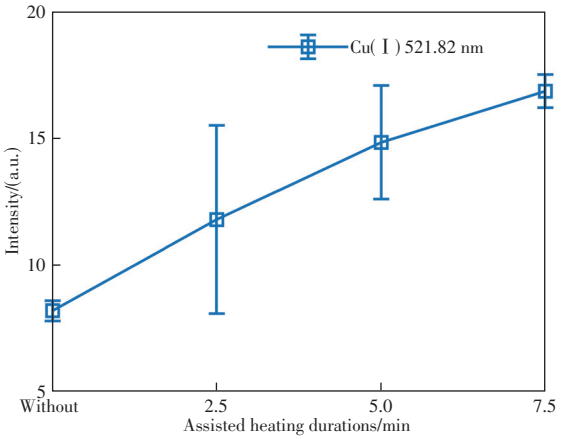


图3 不同激光辅热时间下Cu Ⅰ 521.82 nm的峰值强度

Figure 3 Peak intensity of Cu Ⅰ at 521.82 nm under different laser-assisted heating durations.

达到最大值，较未辅助加热时提高约2.1倍。上述结果表明，延长激光辅助加热时间可有效提高Cu等离子体的辐射强度。激光辅助加热增强Cu等离子体辐射强度主要与靶材热积累和等离子体再加热过程有关。一方面，随辅助加热时间增加，CO_2激光持续向Cu靶材输入热量，提高了样品表面的初始温度，使材料更易发生熔融、汽化和烧蚀，从而增加进入等离子体区域的Cu蒸气量，提高发光粒子的数量。另一方面，辅助激光可与纳秒激光诱导的Cu等离子体发生能量耦合，持续加热等离子体，使电子获得更高能量，增强电子与Cu原子的碰撞激发，促进激发态Cu原子的形成。因此，随着辅助加热时间的增加，等离子体内部能量不断积累，最终使Cu Ⅰ 521.82 nm特征谱线强度增强[28-30]。

图4展示了不同激光辅热时间下Cu Ⅰ 521.82 nm特征谱线SBR的变化规律。由图4可知，随着辅助加热时间的增加，Cu Ⅰ 521.82 nm谱线的SBR呈现逐渐升高的趋势。在未进行激光辅助加热时，Cu Ⅰ 521.82 nm谱线的SBR最低；随着辅助加热时间由0 min增至2.5 min和5 min，SBR逐步提升；当辅助加热时间达7.5 min时，SBR达到最大值，相比未辅助加热条件提高约1.85倍。与图3中谱线强度变化趋势一致，SBR的提升表明激光辅助加热不仅增强了Cu特征谱线辐射强度，同时改善了LIBS光谱质量。由于SBR综合考虑了特征峰强度和背景噪声水平，其变化能够更有效地反映LIBS检测性能的改善程度。实验结果表明，随辅助加热时间增加，等离子体辐射信号增强幅度明显高于背景信号的变化，使得特征谱线具有更高的辨识度和检测灵敏度。

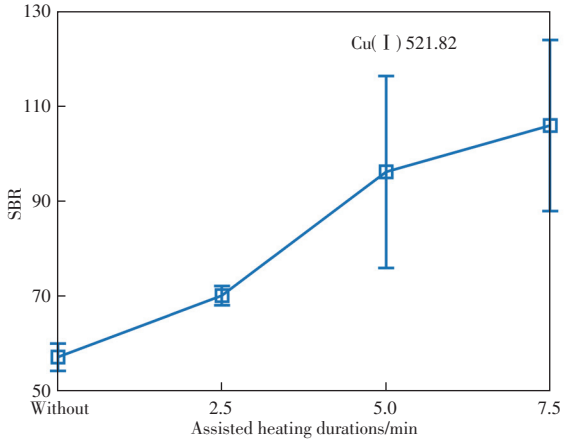


图4　不同激光辅热时间下Cu I 521. 82 nm的SBR

Figure 4　SBR of Cu I at 521. 82 nm under different laser-assisted heating durations.

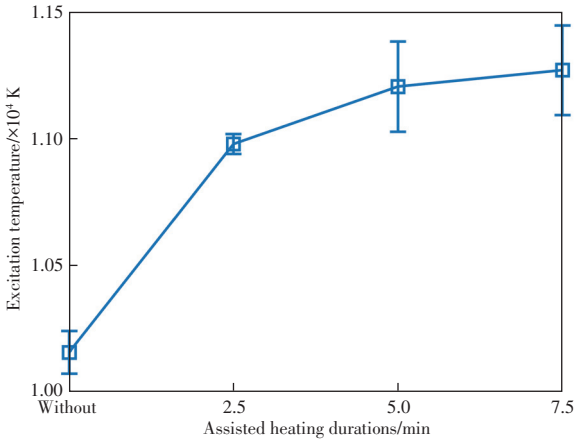


图5　不同激光辅热时间下Cu等离子体激发温度

Figure 5　Plasma excitation temperature of Cu plasma under different laser-assisted heating durations.

等离子体激发温度和电子密度是表征激光诱导等离子体能量状态的重要参数。激发温度反映了等离子体中原子激发态粒子的能量分布，而电子密度则能够表征等离子体电离程度及粒子碰撞过程。二者直接影响等离子体中激发态原子的产生数量以及特征谱线的辐射强度，因此，研究激发温度和电子密度的变化规律对于揭示激光辅助加热过程中等离子体演化机制具有重要意义。

在局部热平衡(Local Thermodynamic Equilibrium，LTE)条件下，等离子体中不同能级粒子的分布满足玻尔兹曼分布，因此可采用玻尔兹曼图法(Boltzmann Plot Method)计算等离子体激发温度。根据发射谱线强度与上能级粒子数之间的关系，可得到：$\ln(\lambda I/gA)=-E/k_{\mathrm{B}}T_{\mathrm{e}}+C$[31-33]。其中，$I$、$\lambda$、$A$、$g$、$E$分别表示谱线强度(W/m^3)、波长(nm)、跃迁概率(s^{-1})、统计权重以及上能级激发能(eV)，k_{B}为玻尔兹曼常数，T_{e}为等离子体激发温度。通过选取多条Cu原子特征谱线进行线性拟合，根据拟合直线斜率可计算得到等离子体激发温度：$T_{\mathrm{e}}=-1/kk_{\mathrm{B}}$。其中，$k$为玻尔兹曼拟合直线的斜率。

图5展示了不同激光辅助加热时间下Cu等离子体激发温度的变化规律。由图5可知，随着辅助加热时间增加，Cu等离子体激发温度逐渐升高。在无辅助加热条件下，等离子体激发温度约为1.02×10^4 K；当辅助加热时间增加至7. 5 min时，激发温度达到最大，为1.13×10^4 K。结果表明，激光辅助加热能够有效提高Cu等离子体的激发温度。激发温度升高主要归因于激光辅助加热过程中能量输入的增加。一方面，CO_2激光持续作用于Cu靶材表面，提高了样品初始温度，使材料更易发生熔融、汽化和烧蚀，增加了进入等离子体区域的Cu蒸气量；另一方面，辅助激光能够与纳秒激光诱导产生的Cu等离子体发生能量耦合，通过吸收激光能量对等离子体进行再加热，提高自由电子能量，增强电子与Cu原子的碰撞激发。因此，随着辅助加热时间增加，等离子体内部能量不断积累，激发态粒子数量增加，使激发温度逐渐升高。

在LIBS等离子体中，电子密度通常可通过谱线的Stark展宽进行计算。由于电子与发射粒子之间的碰撞会导致能级扰动，使发射谱线产生Stark展宽，其展宽程度与电子密度密切相关。电子密度可由以下公式计算：$N_{\mathrm{e}}=\Delta\lambda_{1/2}/2\omega\times10^{16}$[34]。其中，$N_{\mathrm{e}}$为电子密度，$\Delta\lambda_{1/2}$为谱线半高宽，$\omega$为Stark展宽参数。实验中选取Cu Ⅰ 521. 82 nm特征谱线进行电子密度计算，该谱线具有较高的发射强度和较好的谱线孤立性，能够有效降低谱线重叠对展宽测量的影响。

图6展示了不同激光辅助加热时间下Cu Ⅰ 521. 82 nm谱线对应电子密度的变化规律。由图6可知，随着辅助加热时间由0增至2. 5 min，电子密度由7.19×10^{16} cm^{-3}快速增至约7.59×10^{16} cm^{-3}。继续延长辅助加热时间至5 min和7. 5 min，电子密度分别保持在约7.58×10^{16} cm^{-3}和7.52×10^{16} cm^{-3}，整体呈先升高后趋于稳定的变化趋势。电子密度的增加表明激光辅助加热增强了等离子体中的电离过程。其原因可能包括两个方面：一方面，辅助激光提高了Cu靶材表面的温度，使更多Cu材料蒸发并参与等离子体形成，增加了等离子体中可电离粒子数量；另一方面，辅助激光可对形成的Cu等离子体进行再加热，提高自由电子能量，增强电子与Cu原子间的碰撞电

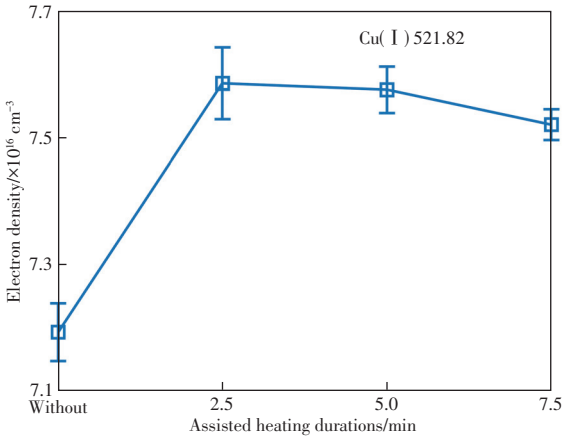


图6 不同激光辅热时间下Cu I 521.82 nm的电子密度

Figure 6 Electron density of Cu I at 521.82 nm under different laser-assisted heating durations.

离，从而提高等离子体电子密度。结合激发温度变化结果可知，激光辅助加热能有效改善Cu等离子体的能量状态，提高电子密度和激发温度，从而促进激发态Cu原子的生成，最终增强Cu特征谱线的辐射强度。

3 结论

本文采用激光辅助加热结合LIBS技术，系统研究了不同辅助加热时间对Cu等离子体辐射特性的影响，并分析了激光辅助加热增强LIBS信号的机制。结果表明，随着辅助加热时间的增加，Cu等离子体发射强度和SBR均明显提升。当辅助加热时间达到7.5 min时，Cu Ⅰ 521.82 nm谱线峰值强度较未辅助加热时提高约2.1倍，SBR提高了约1.85倍，说明激光辅助加热能有效增强LIBS特征信号并改善光谱质量。进一步分析等离子体参数发现，随着辅助加热时间增加，Cu等离子体激发温度由1.02×10^4 K升至1.13×10^4 K，电子密度由7.19×10^{16} cm^{-3}增至7.59×10^{16} cm^{-3}，表明辅助激光作用增强了等离子体内部的能量耦合和粒子碰撞。激光辅助加热对Cu等离子体辐射的增强主要源于靶材热积累与等离子体再加热的协同作用：辅助激光提高Cu靶材表面温度，促进材料蒸发与烧蚀，提高等离子体中Cu粒子的数量；同时，辅助激光与形成的等离子体发生能量耦合，通过再加热提高电子能量，促进Cu原子的激发和电离，从而增强特征谱线辐射。结果表明，激光辅助加热是一种简单有效的LIBS信号增强方法，为通过热调控改善等离子体特性、提升LIBS分析性能提供了新思路。

参考文献

[1] Gaft M, Nagli L, Gornushkin I, et al. Review on recent advances in analytical applications of molecular emission and modelling[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2020, 173: 105989. DOI: 10.1016/j.sab.2020.105989.

[2] 李暾, 何亚雄, 汪金凤, 等. 基于激光诱导击穿光谱的Nb_3Sn成相过程中Ta对Sn扩散的影响研究[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(9): 1418-1426.
Li Tun, He Yaxiong, Wang Jinfeng, et al. Study on the influence of Ta on Sn diffusion during Nb_3Sn phase formation process based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(9): 1418-1426.

[3] Wang Qiuyun, Chen Anmin, Gao Xun. Sensitivity improvement of laser-induced breakdown spectroscopy to detect heavy metals in water by Tesla coil discharge[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2024, 39(1): 261-268.

[4] 谭金宝, 何亚雄, 钱自然, 等. 激光诱导击穿光谱(LIBS)测定混凝土中氯元素的实验参数优化[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(9): 1463-1471.
Tan Jinbao, He Yaxiong, Qian Ziran, et al. Optimization of experimental parameters for chlorine determination in concrete by laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS)[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(9): 1463-1471.

[5] Harilal S S, Brumfield B E, LaHaye N L, et al. Optical spectroscopy of laser-produced plasmas for standoff isotopic analysis[J]. Applied Physics Reviews, 2018, 5(2): 021301. DOI: 10.1063/1.5016053.

[6] 李茂刚, 周奎, 杏艳, 等. 激光诱导击穿光谱(LIBS)结合随机森林算法(RF)快速定量含油污泥重金属元素[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(6): 767-775.
Li Maogang, Zhou Kui, Xing Yan, et al. Laser-induced breakdown spectroscopy combined with random forest algorithm for rapid quantification of heavy metals in oil sludge[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(6): 767-775.

[7] Carter S, Fisher A, Garcia R, et al. Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and functional materials[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2016, 31(11): 2114-2164.

[8] Sancey L, Motto-Ros V, Busser B, et al. Correction: corrigendum: laser spectrometry for multi-elemental imaging of biological tissues[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 24377. DOI: 10.1038/srep24377.

[9] 彭莎, 何亚雄, 温起帆, 等. 激光诱导击穿光谱(LIBS)技术融合机器学习快速鉴别土壤重金属污染等级[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(9): 1295-1303.

Peng Sha, He Yaxiong, Wen Qifan, et al. Rapid identification of soil heavy metal pollution levels based on LIBS technology integrated machine learning[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2025, 15(9): 1295-1303.

[10] 徐水秀，喻子彧，覃淮青，等. 基于激光诱导击穿光谱的煤质快速分析研究及应用[J]. 量子电子学报，2021，38(6)：727-750.
Xu Shuixiu, Yu Ziyu, Qin Huaiqing, et al. Research and application of rapid analysis of coal quality by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2021, 38(6): 727-750.

[11] Aguirre M A, Legnaioli S, Almodóvar F, et al. Elemental analysis by surface-enhanced laser-induced breakdown spectroscopy combined with liquid-liquid microextraction[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2013, 79/80: 88-93.

[12] Yang Xinyan, Hao Zhongqi, Shen Meng, et al. Simultaneous determination of La, Ce, Pr, and Nd elements in aqueous solution using surface-enhanced laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Talanta, 2017, 163: 127-131.

[13] 刘雁宾，赵上勇，侯宗余，等. 样品加热结合空间约束的飞秒激光诱导击穿光谱用于合金元素定量分析研究[J]. 冶金分析，2020，40(12)：21-26.
Liu Yanbin, Zhao Shangyong, Hou Zongyu, et al. The quantitative analysis of alloy element by femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy with sample heating and spatial confinement[J]. Metallurgical Analysis, 2020, 40(12): 21-26.

[14] Lin Xiaomei, Li Han, Yao Qinghua. Signal detection of carbon in iron-based alloy by double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Plasma Science and Technology, 2015, 17(11): 953-957.

[15] Rashid B, Ahmed R, Ali R, et al. A comparative study of single and double pulse of laser induced breakdown spectroscopy of silver[J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(7): 073301. DOI: 10.1063/1.3599591.

[16] Chen Anmin, Wang Ying, Sui Laizhi, et al. Optical emission generated from silicon under dual-wavelength femtosecond double-pulse laser irradiation[J]. Optics Express, 2015, 23(19): 024648. DOI: 10.1364/oe.23.024648.

[17] Dai Yujia, Li Mingliang, Song Chao, et al. Accuracy improvement of Fe element in aluminum alloy by laser induced breakdown spectroscopy under spatial confinement combined with gradient descent[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(20): 205204. DOI: 10.7498/aps.70.20210792.

[18] Zhao Shangyong, Song Chao, Gao Xun, et al. Quantitative analysis of Pb in soil by femtosecond-nanosecond double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Results in Physics, 2019, 15: 102736. DOI: 10.1016/j.rinp.2019.102736.

[19] Wang Ying, Chen Anmin, Li Shuchang, et al. Enhancement of laser-induced Fe plasma spectroscopy with dual-wavelength femtosecond double-pulse[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2016, 31(2): 497-505.

[20] Eschlböck-Fuchs S, Haslinger M J, Hinterreiter A, et al. Influence of sample temperature on the expansion dynamics and the optical emission of laser-induced plasma[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2013, 87: 36-42.

[21] Wang Qiuyun, Chen Anmin, Qi Hongxia, et al. Femtosecond laser-induced breakdown spectroscopy of a preheated Cu target[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 121: 105773. DOI: 10.1016/j.optlastec.2019.105773.

[22] 陈金忠，王敬，宋广聚，等. 样品温度对激光诱导土壤等离子体辐射特性的影响[J]. 光子学报，2015，44(5)：52-56.
Chen Jinzhong, Wang Jing, Song Guangju, et al. The effect of sample temperature on the laser-induced plasma radiation characteristics[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 52-56.

[23] Tavassoli S H, Gragossian A. Effect of sample temperature on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Optics & Laser Technology, 2009, 41(4): 481-485.

[24] Liu Yang, Tong Yue, Li Suyu, et al. Effect of sample temperature on laser-induced semiconductor plasma spectroscopy[J]. Chinese Optics Letters, 2016, 14(12): 123001-123005.

[25] Liu Yang, Tong Yue, Wang Ying, et al. Influence of sample temperature on the expansion dynamics of laser-induced germanium plasma[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(12): 125501. DOI: 10.1088/2058-6272/aa8acc.

[26] Li Yeqiu, Wu Rina, Dai Qin, et al. Enhancement of long wavelength preheating in dual-beam laser induced breakdown spectroscopy[J]. AIP Advances, 2018, 8(9): 095112. DOI: 10.1063/1.5048975.

[27] Shoursheini S Z, Sajad B, Parvin P. Determination of gold fineness by laser induced breakdown spectroscopy with the simultaneous use of CW-CO_2 and Q-SW Nd: YAG lasers[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(1): 89-95.

[28] Shoursheini S Z, Parvin P, Sajad B, et al. Dual-laser-beam-induced breakdown spectroscopy of copper using simultaneous continuous wave CO_2 and Q-switched Nd: YAG lasers[J]. Applied Spectroscopy, 2009, 63(4): 423-429.

[29] Cristoforetti G, Legnaioli S, Palleschi V, et al. Influence of ambient gas pressure on laser-induced breakdown spectroscopy technique in the parallel double-pulse configuration[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59(12): 1907-1917.

[30] Ujihara K. Reflectivity of metals at high temperatures[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(5): 2376-2383.
[31] 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): 88-94.
Xu Donghua, Song Chao, Zhao Shangyong, et al. Magnetic confinement effect on femtosecond laser-induced copper plasma[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(8): 88-94.
[32] Wang Ying, Chen Anmin, Wang Qiuyun, et al. Influence of distance between focusing lens and target surface on laser-induced Cu plasma temperature[J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(3): 033302. DOI: 10.1063/1.5010076.
[33] Yang Dapeng, Li Suyu, Jiang Yuanfei, et al. Temperature and electron density in femtosecond filament-induced Cu plasma[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(11): 115201. DOI: 10.7498/aps.66.115201.
[34] 林泽浩, 李润华, 姜银花, 等. 靶增强正交双脉冲激光诱导击穿光谱的信号增强机制研究[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 175-181.
Lin Zehao, Li Runhua, Jiang Yinhua, et al. Signal enhancement in target-enhanced orthogonal double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 175-181.

Effect of Laser-assisted Heating Duration on the Emission Characteristics of Laser-induced Cu Plasma

Ji Jinghao[1], Wang Qiuyun[1*], Wang Xirui[1], Gao Xun[1,2*]

(*1. School of Physics, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;*
2. Zhongshan Institute, Changchun University of Science and Technology, Zhongshan, Guangdong 528400, China)

Abstract Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) has been widely applied in material analysis and environmental monitoring due to its advantages of rapid analysis, minimal sample preparation, and simultaneous multi-element detection. However, LIBS signal intensity is strongly affected by laser-matter interaction efficiency, material ablation processes, and plasma evolution dynamics, which limits its detection sensitivity and stability. Therefore, developing simple and effective plasma regulation strategies and understanding their effects on LIBS emission characteristics are of great significance. In this study, laser-assisted heating was employed to regulate the emission characteristics of Cu plasma, and the influence of heating duration on plasma emission behavior and parameter evolution was systematically investigated. A hybrid experimental system combining continuous CO_2 laser-assisted heating with nanosecond Nd: YAG LIBS was established. The emission spectra, signal-to-background ratio (SBR), excitation temperature, and electron density of Cu plasma under different heating durations were analyzed. The results showed that the emission intensity of Cu plasma gradually increased with increasing heating duration. When the heating duration reached 7.5 min, the peak intensity of the Cu I 521.82 nm emission line increased by approximately 2.1 times compared with that without auxiliary heating, while the SBR was enhanced by approximately 1.85 times. Meanwhile, the excitation temperature of the plasma increased from 1.02×10^4 K to 1.13×10^4 K, and the electron density increased from 7.19×10^{16} cm^{-3} to 7.59×10^{16} cm^{-3}. Laser-assisted heating enhanced plasma emission by increasing the initial temperature of the Cu target, improving material ablation efficiency, and reheating the generated Cu plasma, thereby promoting electron-particle collisional excitation and ionization processes. The results demonstrate that laser-assisted heating can effectively enhance both the spectral signal intensity and analytical performance of LIBS.

Keywords laser-induced breakdown spectroscopy; laser-assisted heating; Cu plasma; signal-to-background ratio; plasma parameters

HIGHLIGHTS

1) An enhanced LIBS method based on laser-assisted heating was developed.
2) The influence of heating duration on Cu plasma emission characteristics was revealed.
3) The synergistic enhancement mechanism of target heating and plasma reheating was clarified.