

Investigation on the Signal Enhancement of DP-LIBS in Bulk Water

Wenping Li, Weidong Zhou

Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua Zhejiang
Email: 2835540332@qq.com

Received: Apr. 4th, 2019; accepted: Apr. 17th, 2019; published: Apr. 24th, 2019

Abstract

In order to enhance the spectral intensity of underwater LIBS, two Q-switched Nd:YAG lasers operating at 1064 nm were used and combined in orthogonal beam geometry to carry out the DP-LIBS experiment in sodium chloride solution. Firstly, the temporal evolution of the spectra has been studied in the time range of 100 - 10,000 ns. The result showed that the signal-to-noise ratios are very high when the acquisition delay is within the range of 500 - 700 ns, and it is very suitable for spectral acquisition. Additionally, the effects of inter-pulse delay and laser energy on the signal enhancement were carefully investigated, and the optimized experimental parameters were obtained. Finally, under the optimized experimental conditions, we observed the narrower DP-LIBS spectral line with lower noise level, the plasma emission lasted longer than 10 μ s, and the spectral line intensity of Na 588.9 nm and Na 589.6 nm enhanced 19 and 15 times respectively, compared to that of single-pulse laser induced breakdown spectroscopy. At the same time, we also found that the relative standard deviation of spectral intensity reached 2.4%, which was less than that of the previous single-pulse experiment and the double-pulse experiment on the liquid surface. All of these indicate that using DP-LIBS can effectively improve the signal intensity and repeatability of underwater LIBS detection.

Keywords

DP-LIBS, Na, Underwater, Signal Enhancement

水下双脉冲LIBS光谱信号增强的实验研究

李文平, 周卫东

浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华
Email: 2835540332@qq.com

收稿日期: 2019年4月4日; 录用日期: 2019年4月17日; 发布日期: 2019年4月24日

摘要

为了增强水下LIBS探测的光谱信号强度, 实验中使用两台波长为1064 nm的Nd:YAG调Q激光器, 对NaCl溶液样品开展了水下正交双脉冲LIBS实验。首先在100 ns~10,000 ns的延时范围内探究了光谱的时间演化规律, 实验结果表明, 当采集延时在500 ns~700 ns的范围内时谱线的信噪比很高, 有利于进行光谱采集。接着探究了脉冲间延时与激光能量对光谱信号增强的影响, 得到了优化的实验参数。最后在优化的实验条件下, 观察到双脉冲LIBS的光谱噪声水平下降, 谱线展宽变窄, 光谱信号持续时间更长(大于10 μ s), 且两条Na原子谱线(588.9 nm和589.6 nm)的信号强度分别比单脉冲LIBS的增强了19倍和15倍。同时还发现光谱信号强度的相对标准偏差达到2.4%, 远小于此前的单脉冲实验以及在液体表面进行的双脉冲实验, 这说明采用双脉冲技术能有效提升水下LIBS测量的信号强度与稳定性。

关键词

双脉冲LIBS, Na, 水下, 信号增强

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光诱导击穿光谱技术(Laser-induced breakdown spectroscopy, 简称 LIBS)于 1962 年被 Brech 和 Cross 等人首次提出, 作为一种新型的光谱检测技术, 能够对不同状态的样品进行分析(固体、气体和液体样品均可)。目前, LIBS 对固体和气体样品的检测分析已广泛应用到实际生活中, 但是对液体样品的 LIBS 检测起步较晚, 直到 1984 年, Cremers 等人首次采用 1064 nm 波长的激光对溶液样品进行了水下 LIBS 光谱分析[1], 标志着水下 LIBS 技术的诞生。2003 年, Giacomo 等人采用一台脉冲能量为 400 mJ 的 Nd:YAG 激光器对 4 种不同的金属溶液样品进行了水下单脉冲 LIBS (SP-LIBS)检测[2], 实验中获得的光谱信号强度较弱, 持续时间较短, 谱线的展宽较大, 并且具有很高的背景噪声水平。这主要是由于以下几个方面原因所导致的: 众所周知, 与空气相比水体具有较高的热传导率并且难以被压缩[3], 因此, 在水下 LIBS 探测中, 激光诱导产生的水下等离子体会受到周围水体强烈的挤压和淬灭作用, 最终导致发射谱线强度变弱, 谱线展宽增大。同时, 水体的淬灭作用还会导致水下等离子体快速冷却, 缩短等离子体辐射的持续时间。此外, 绝大多数入射激光的能量消耗于水体的汽化过程, 以及气泡和冲击波的振荡过程, 只有很小一部分激光能量被等离子体吸收并产生特征辐射光[4], 从而降低了激光对溶液样品的激发效率。由于这些原因, 最终限制了 LIBS 技术在水下检测应用方面的进一步发展。

双脉冲 LIBS 技术(DP-LIBS)作为一种光谱增强技术于 1969 年被首次提出[5], 该技术既保留了 LIBS 本身的许多优点, 同时又可以有效提高 LIBS 的检测能力。1970 年, Scott 与 Strasheim 等人采用双脉冲 LIBS 技术对铝合金样品进行了分析[6], 发现双脉冲与样品的能量耦合效率较单脉冲有所提高。随后, Cremers 等人采用共线双脉冲 LIBS 技术对液体样品进行了检测分析[7], 使水下 LIBS 光谱信号得到增强, 其增强机理与在空气中进行的双脉冲 LIBS 实验不同[6] [8] [9], 一般可以解释为第一束激光首先在水体中形成一个空化气泡, 经过一定的脉冲延时后, 第二束激光在空化气泡中激发, 产生的等离子体可以被约束在气泡中, 所以水体对等离子体的淬灭作用大大减弱, 从而使光谱信号得到增强。

目前, 对 LIBS 信号增强机制的研究主要针对固体或气体样品。为了进一步深化对水下双脉冲 LIBS 信号增强机制的理解, 在本研究中使用两台独立的 Nd:YAG 激光器, 对氯化钠溶液样品进行了水下正交(垂直)双脉冲 LIBS 实验。为了得出优化的实验参数, 在实验中系统地探究了光谱的采集延时、双脉冲的脉冲延时以及激光能量对光谱信号的影响。接着, 在优化的条件下对单双脉冲 LIBS 的信号强度和光谱持续时间进行了比较研究, 并分析了水下双脉冲 LIBS 的信号稳定性。

2. 实验装置

水下正交双脉冲 LIBS 的实验装置如图 1 所示。激光光源为两台 Nd:YAG 调 Q 激光器, 输出波长均为 1064 nm, 脉冲重复频率都设置为 1Hz, 激光能量可以根据实验需要进行调节。两束激光在同一水平面上相互垂直, 分别通过两个凸透镜 L1 ($f=25.4$ mm)和 L2 ($f=38.1$ mm)聚焦到样品溶液中, 其焦点位置相互重合并位于液面下 1cm 处(样品溶液装在透明的样品池中)。两束激光脉冲之间的延时由数字脉冲延时发生器 DG535 控制。当激光在水溶液中发生击穿时, 产生的等离子体辐射光经过二向色镜 DM 反射, 再经过收集透镜 L3 耦合进光纤, 最后通过光纤传输到光谱仪(Andor, SR303)中进行分光, 光谱仪的光栅刻痕密度为 1200 g/mm, 其最小分辨率为 0.1 nm。水下双脉冲 LIBS 光谱图像由一台带有门控功能的 ICCD 进行拍摄, ICCD 采用外触发模式, 通过 DG535 保持与第二束激光脉冲同步, 采集延时与采集门宽可以通过仪器的操作软件进行设置。实验中分析谱线的强度定义为光谱峰值减去光谱背景后的强度, 谱线的噪声定义为光谱背景的标准偏差, 信噪比定义为谱线强度与噪声的比值。实验样品为 1000 mg/L 的氯化钠溶液, 由氯化钠和蒸馏水配制而成。

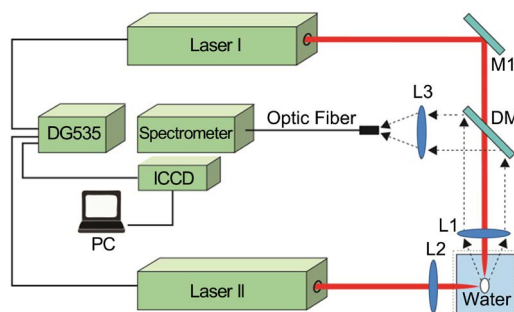


Figure 1. Schematic diagram of the experimental setup for orthogonal DP-LIBS in bulk water (L1, L2 and L3: focusing lens; M1: Reflect Mirror; DM: Dichroic Mirror)

图 1. 水下正交双脉冲 LIBS 实验装置示意图(图中 L1、L2 和 L3 表示聚焦透镜, M1 表示反射镜, DM 表示二向色镜)

在双脉冲 LIBS 实验中, 实验的时序控制很重要, 如图 2 所示, E_1 和 E_2 分别表示第一束激光脉冲和第二束激光脉冲, ΔT 表示两束激光间的脉冲延时, t_d 为相对于第二束激光脉冲的采集延时(Gate delay), t_b 为采集门宽(Gate width)。

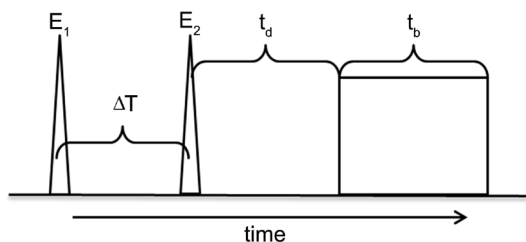


Figure 2. Detail of timing scheme utilized for DP-LIBS experiments

图 2. 双脉冲 LIBS 实验时序示意图

3. 水下双脉冲 LIBS 实验参数的优化

3.1. 光谱的时间演化规律

为了得到优化的双脉冲光谱采集延时, 在实验中首先对波长为 588.9 nm 和 589.6 nm 的 Na 原子谱线的时间演化特性进行了研究。两束激光之间的脉冲延时设置为 240 μs , 光谱仪的采集门宽为 15 μs , 双脉冲激光能量均为 60 mJ。图 3 展示了不同采集延时下的双脉冲 LIBS 光谱, 通过观察可以发现, 在较短的采集延时下, 两条 Na 原子的特征谱线较强, 同时光谱的背景噪声水平较高, 随着采集延时的不断增大, 特征谱线强度不断下降, 背景噪声也快速下降, 直到 t_d 等于 10,000 ns 时, 光谱背景下降到很低的水平, 仍然可以看到两条清晰的 Na 原子谱线。

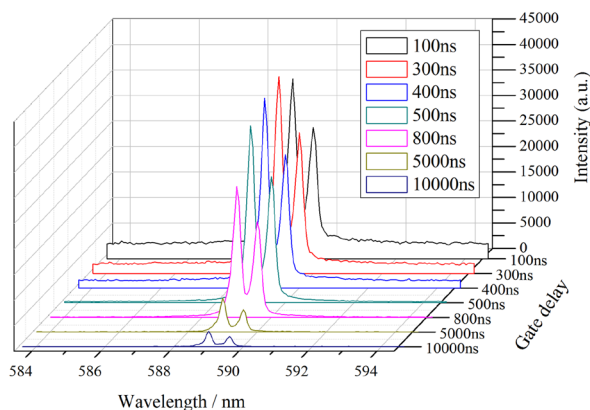


Figure 3. Spectra of DP-LIBS at different gate delay time
图 3. 双脉冲 LIBS 光谱时间演化图

图 4(a)给出了谱线信号强度随时间的变化趋势, 在 100 ns~300 ns 的延时范围内两条 Na 原子线的信号强度逐渐上升, 在 300 ns~2000 ns 时快速下降, 在 2000 ns 以后下降速度减慢。这与理论研究相吻合[10], 在产生的等离子体向外膨胀扩散并逐渐冷却的过程中, 由于等离子体中的一部分电子会与离子发生碰撞并复合, 使激发态的原子数增加, 所以原子线会在较短的延时条件下出现增长, 之后随着等离子体的冷却, 谱线信号强度快速下降, 但是由于双脉冲的增强作用, 水下等离子体辐射可以持续较长的时间。谱线信噪比的时间演化趋势如图 4(b)所示, 在 100 ns~400 ns 时两条谱线的信噪比缓慢上升, 在 400 ns~500 ns 时信噪比快速上升, 都上升了 3 倍左右, 之后趋于平稳, 在 700 ns 时达到最大值, 然后快速下降。所以对 Na 元素进行水下 LIBS 光谱采集的最佳延时范围为 500 ns~700 ns。

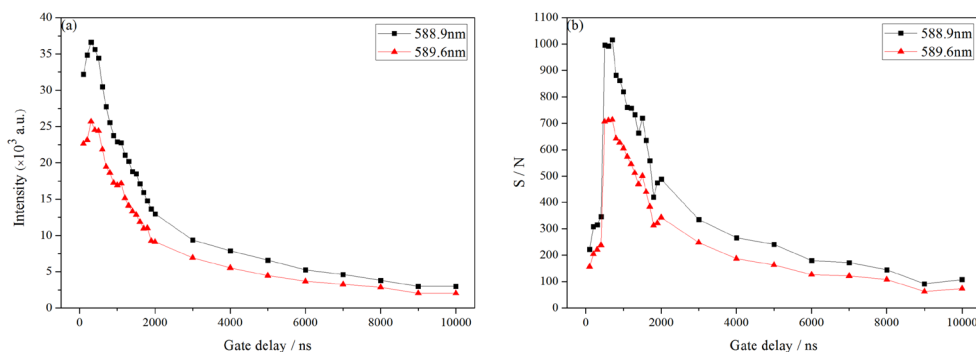


Figure 4. Intensities (a) and signal-to-noise ratios (b) of DP-LIBS as a function of gate delay time
图 4. 水下双脉冲 LIBS 谱线强度(a)与信噪比(b)随采集延时的变化趋势

此外, 为了减小光谱背景对水下双脉冲 LIBS 测量的影响, 下面将研究光谱背景随时间的演化规律。通过观察图 5 可以发现, 在较短的延时条件下(0 ns~400 ns)光谱具有很高的背景, 但是背景的下落速度很快。当 t_d 等于 500 ns 时, 光谱背景下降到较低的水平, 对水下双脉冲 LIBS 测量的影响大大减小。继续增加延时, 光谱背景缓慢下降, 在 1000 ns 时光谱背景下降到很低的水平, 其影响几乎可以忽略。

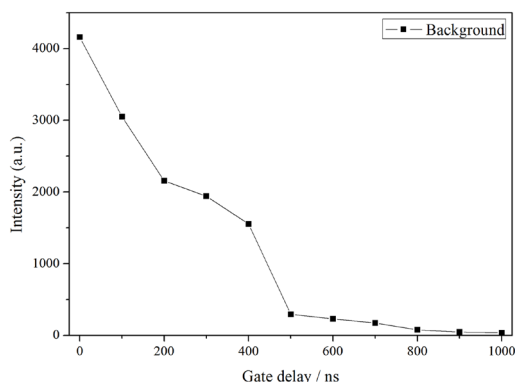


Figure 5. The background emission intensity of DP-LIBS as a function of gate delay time
图 5. 水下双脉冲 LIBS 光谱背景随采集延时的变化趋势

3.2. 脉冲延时的优化

相关研究表明, 无论是在空气中还是在水体中进行的双脉冲 LIBS 实验, 脉冲延时对谱线信号的增强都有较大的影响[6] [8]。所以本实验在 0 μ s~300 μ s 的时间范围内, 探究了脉冲延时对水下双脉冲 LIBS 光谱信号的影响。实验中两束激光的能量均为 60 mJ, 光谱仪的采集延时设置为已经优化的 600 ns。实验结果如图 6 所示, 当两束激光脉冲同时击发时($\Delta T = 0$ μ s), 得到的光谱具有较高的背景, 并且由于谱线展宽过大导致无法区分两条 Na 原子线, 这种情况其实跟水下单脉冲 LIBS 光谱类似[2], 这也从一个侧面印证了水下双脉冲 LIBS 对信号的增强机制, 即产生空化气泡对改善信号质量起到了至关重要的作用。之后随着脉冲延时的增大, 光谱背景下降, 谱线展宽变窄, 出现了两条十分规则的 Na 原子线。当 ΔT 等于 40 μ s 时, 两条谱线的信号较强, 继续增大延时, 谱线强度经历了先下降后上升的变化趋势, 当 ΔT 等于 240 μ s 时, 谱线强度达到最大值, 然后快速下降。这种光谱强度随脉冲延时的变化趋势可能跟第一束激光产生的水下空化气泡的演化过程有关, 在优化的脉冲延时下更有利于第二束激光在气泡中激发产生等离子体[11]。所以本实验中优化的脉冲延时为 240 μ s。

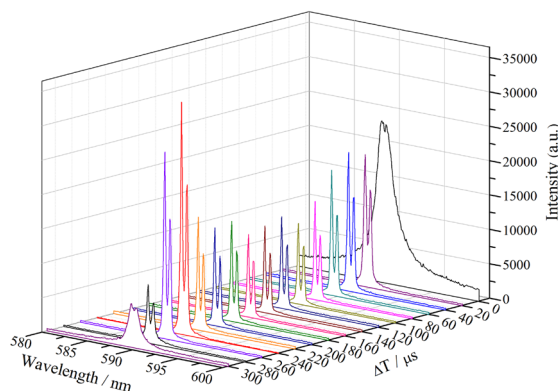


Figure 6. Spectra of DP-LIBS at different inter-pulse delay time
图 6. 不同脉冲延时下的双脉冲 LIBS 光谱

3.3. 激光能量对信号增强的影响

通常在 LIBS 实验中采用相对较大的激光能量可以提高光谱信号的强度。为了增强水下双脉冲 LIBS 的信号强度, 在下面的实验中探究了第一束激光脉冲能量 E_1 对光谱强度的影响, 第二束激光脉冲的能量设置为 60 mJ, 两束激光脉冲之间的延时为 240 μs , 光谱仪的采集延时为 600 ns。

实验结果如图 7 所示, 当第一束激光的脉冲能量从 40 mJ 增加到 50 mJ 时, 两条 Na 原子线的谱线强度随着能量的增大而快速上升; 当 E_1 等于 50 mJ 时, 谱线强度达到最大值; 当 E_1 大于 50 mJ 时, 谱线强度随着激光能量的增大反而快速下降, 直到 E_1 等于 70 mJ 时, 谱线强度下降到较低的水平, 其变化趋势才趋于平缓。这种先上升后下降的变化趋势是由于第一束激光能量对水下空化气泡的影响所导致的[12]。在水下激光诱导击穿过程中, 不同能量的激光脉冲在水中产生空化气泡的位置不同, 并且气泡的侧向膨胀半径也不同。当 E_1 较小时, 将在焦点位置产生一个具有较大侧向半径的球形气泡。这时再用第二束激光脉冲在气泡中激发, 大部分的激光能量将耦合进入气泡, 产生较强的水下等离子体, 对应较大的信号强度。当 E_1 较大时, 由于动态击穿效应, 使得水下空化气泡的产生位置偏离焦点, 同时气泡的侧向半径减小, 这些原因最终导致耦合进气泡的第二束激光能量大大减少, 水体对第二束激光产生的等离子体的淬灭效应更加显著, 从而减弱水下双脉冲 LIBS 信号。所以本实验优化的第一束激光能量为 50 mJ。

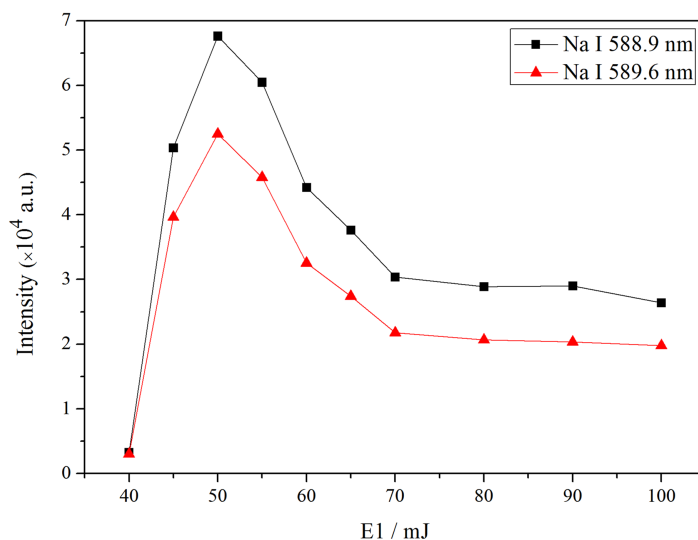


Figure 7. Intensities of Na I 588.9 nm & Na I 589.6 nm as a function of the first laser energy
图 7. 两条 Na 原子谱线(588.9 nm 和 589.6 nm)的信号强度随第一束激光能量的变化

4. 水下双脉冲 LIBS 的光谱特性

4.1. 光谱信号强度与展宽

图 8(a)和图 8(b)分别展示了单双脉冲激发下的波长为 588.9 nm 和 589.6 nm 的 Na 元素特征谱线。其中, 单脉冲激发时的激光能量为 60 mJ, 采集延时为 600 ns。双脉冲激发时的第一束激光能量为 50 mJ, 第二束激光能量为 60 mJ, 脉冲延时为 240 μs , 采集延时为 600 ns。通过比较可以发现单脉冲的谱线信号强度较弱, 谱线展宽更大, 且由于谱线展宽过大, Na 原子谱线的双峰发生部分重叠, 不利于进行光谱分析。当采用双脉冲时, 光谱噪声水平下降, 谱线展宽变窄, 能观察到很规则的两条谱线, 且两条谱线的信号强度分别比单脉冲的增强了约 19 倍和 15 倍。

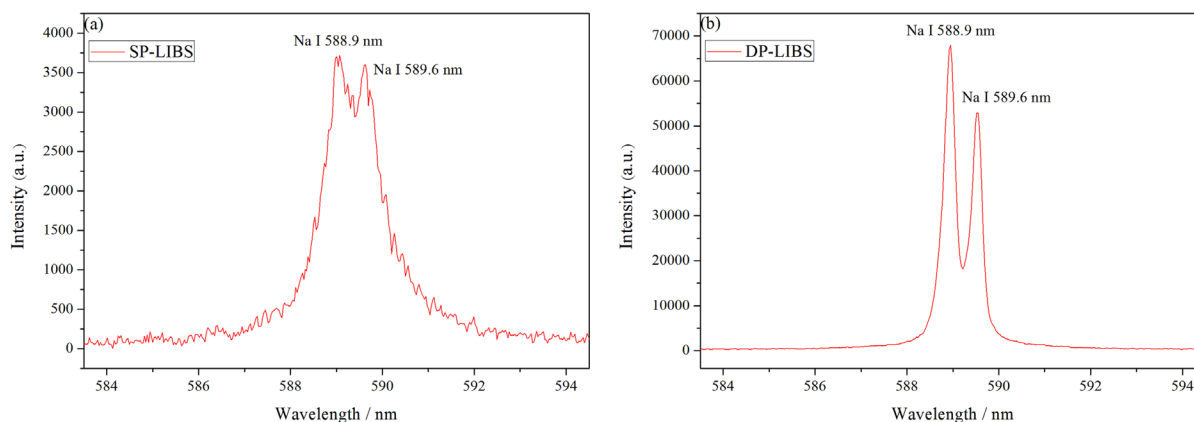


Figure 8. The comparison between SP-LIBS (a) and DP-LIBS (b)

图 8. 水下单脉冲 LIBS 光谱(a)与双脉冲 LIBS 光谱(b)的比较

通过对单双脉冲 LIBS 的光谱进行比较, 结果表明采用水下双脉冲 LIBS 技术可以极大地提高谱线的信号强度, 同时还可以减小谱线展宽对光谱分析的影响。这是因为在双脉冲实验中, 第二束激光脉冲烧蚀产生的等离子体可以被约束在第一束激光产生的空化气泡中, 这样可以有效地抑制水体对等离子体的压缩与淬灭作用, 从而使等离子体的发射谱线大大增强[3]。相反地, 在单脉冲实验中, 由于周围水体对等离子体的挤压作用导致等离子体的体积减小, 电子密度增加, 最终使谱线的展宽增大[13]。

4.2. 光谱信号的持续时间

等离子体衰减速度的快慢将影响 LIBS 谱线信号的持续时间。图 9 为 Na 元素的单双脉冲 LIBS 光谱, 其采集延时都为 $5 \mu\text{s}$, 通过比较可以发现, 在单脉冲的情况下几乎检测不到 Na 元素的特征谱线了, 只能看到较高的光谱背景, 但是在双脉冲的情况下依然能够观察到较强的谱线, 即使 t_d 增大到 $10 \mu\text{s}$ 时仍然可以看到两条清晰的 Na 原子谱线(如图 3 所示), 这说明采用水下双脉冲 LIBS 技术可以延长水下等离子体辐射的持续时间, 同时这也是光谱信号增强的原因之一[14]。

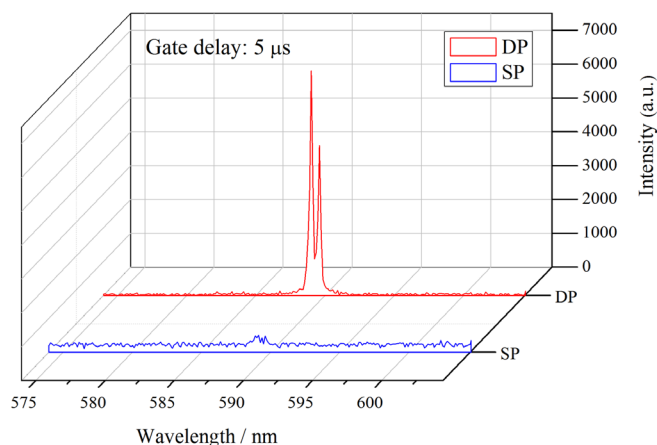


Figure 9. Spectrum of SP-LIBS and DP-LIBS ($t_d = 5 \mu\text{s}$)

图 9. 水下单双脉冲 LIBS 光谱($t_d = 5 \mu\text{s}$)

4.3. 光谱信号的稳定性

图 10 给出了水下双脉冲 LIBS 二十次测量的信号重复性, 图中每个数据点表示一次测量的谱线强度,

直线表示二十次测量的平均值, 通过计算得出波长为 588.9 nm 和 589.6 nm 的两条 Na 原子谱线的信号强度相对标准偏差(RSD)分别为 2.4%和 3.6%。此前, 姚明印和 Barreda 等人采用单脉冲对溶液样品进行了 LIBS 检测[15] [16], 得到信号的相对标准偏差分别为 7.6%和 20%。Kuwako 等人进行了液体表面的双脉冲 LIBS 实验[17], 得到 Na 元素谱线的 RSD 为 15%~20%。与之相比, 水下双脉冲 LIBS 的信号稳定性更好, 这是因为激光在溶液样品的表面击穿时会产生表面激波, 这种表面激波会导致样品的溅射, 对信号的稳定性有较大的影响。而采用水下双脉冲 LIBS 技术, 不但可以提高谱线信号的强度, 还可以有效避免样品溅射对 LIBS 信号稳定性的影响, 最终使 LIBS 对溶液样品的检测能力得到较大提升。

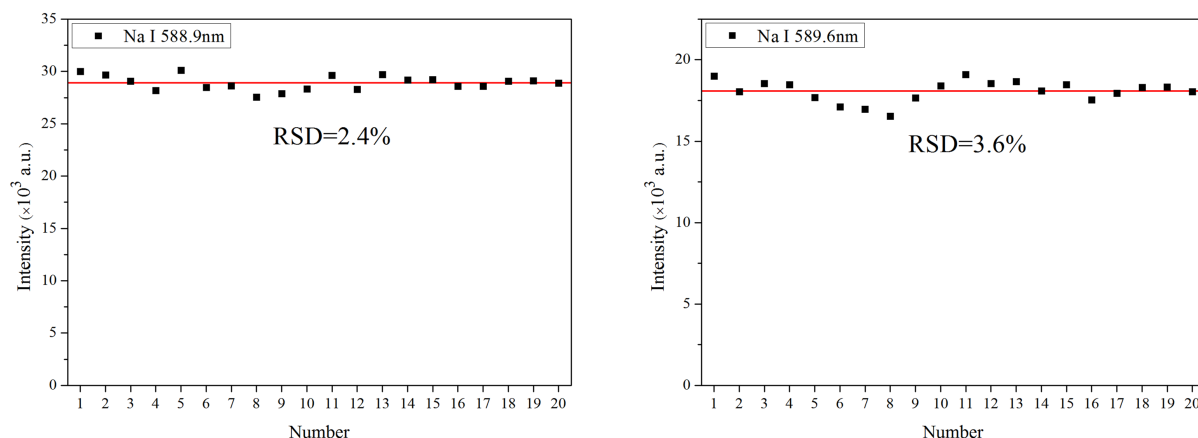


Figure 10. Signal repeatability of DP-LIBS in bulk water

图 10. 水下双脉冲 LIBS 的信号重复性

5. 结论

本文采用水下正交双脉冲激光诱导击穿光谱技术对 NaCl 溶液进行了光谱分析, 并系统地探究了光谱的采集延时、双脉冲之间的脉冲延时以及激光能量等实验参数对 Na 原子谱线(588.9 nm、589.6 nm)的影响。实验结果表明, 当采集延时在 500 ns~700 ns 的范围内时谱线的信噪比很高, 有利于进行光谱采集与分析, 可以称之为水下双脉冲 LIBS 光谱探测的时间窗口。接着, 研究了脉冲延时对光谱信号增强的影响, 当双脉冲之间的延迟时间为 240 μ s 时, 谱线强度达到最大值。此外, 在激光能量的优化实验中, 观察到谱线强度随第一束激光能量的增大呈现出先上升后下降的趋势, 当第一束激光能量为 50 mJ 时增强效果最好。最后, 在优化的双脉冲实验条件下, 两条 Na 原子谱线的信号强度分别比单脉冲的增强了约 19 倍和 15 倍, 同时谱线的持续时间更长, 信号的稳定性优于此前的单脉冲实验以及在液体表面进行的双脉冲实验, 这说明采用双脉冲技术能有效地提升水下 LIBS 测量的信号强度与稳定性, 为双脉冲 LIBS 技术应用于水体中金属元素的检测提供了依据。

基金项目

国家自然科学基金(61178034)。

参考文献

- [1] Yu, X., Li, Y., Gu, X., *et al.* (2014) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy Application in Environmental Monitoring of Water Quality: A Review. *Environmental Monitoring & Assessment*, **186**, 8969-8980. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4058-1>
- [2] De Giacomo, A., Dell'Aglio, M. and De Pascale, O. (2004) Single Pulse-Laser Induced Breakdown Spectroscopy in Aqueous Solution. *Applied Physics A*, **79**, 1035-1038. <https://doi.org/10.1007/s00339-004-2622-1>

- [3] Musazzi, S. and Perini, U. (2014) Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: Theory and Applications. Springer, Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-45085-3>
- [4] Vogel, A., Noack, J., Nahen, K., *et al.* (1999) Energy Balance of Optical Breakdown in Water at Nanosecond to Femtosecond Time Scales. *Applied Physics B*, **68**, 271-280. <https://doi.org/10.1007/s003400050617>
- [5] Piepmeier, E.H. and Malmstadt, H.V. (1969) Q-Switched Laser Energy Absorption in the Plume of an Aluminum Alloy. *Analytical Chemistry*, **41**, 700-707. <https://doi.org/10.1021/ac60275a014>
- [6] Babushok, V.I., DeLucia, F.C., Gottfried, J.L., *et al.* (2006) Double Pulse Laser Ablation and Plasma: Laser Induced Breakdown Spectroscopy Signal Enhancement. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **61**, 999-1014. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2006.09.003>
- [7] Cremers, D.A., Radziemski, L.J. and Loree, T.R. (1984) Spectrochemical Analysis of Liquids Using the Laser Spark. *Applied Spectroscopy*, **38**, 721-729. <https://doi.org/10.1366/0003702844555034>
- [8] De Giacomo, A., Dell'Aglio, M., Colao, F., *et al.* (2004) Double Pulse Laser Produced Plasma on Metallic Target in Seawater: Basic Aspects and Analytical Approach. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **59**, 1431-1438. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2004.07.002>
- [9] Sakka, T., Tamura, A., Nakajima, T., *et al.* (2012) Synergetic Effects of Double Laser Pulses for the Formation of Mild Plasma in Water: Toward Non-Gated Underwater Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Journal of Chemical Physics*, **136**, Article ID: 174201. <https://doi.org/10.1063/1.4709391>
- [10] 陆同兴, 路铁群. 激光光谱技术原理及应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [11] De Giacomo, A., Dell'Aglio, M., Gaudiuso, R., *et al.* (2012) Effects of the Background Environment on Formation, Evolution and Emission Spectra of Laser-Induced Plasmas. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, **78**, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2012.10.003>
- [12] Lazic, V., Jovicevic, S., Fantoni, R., *et al.* (2007) Efficient Plasma and Bubble Generation Underwater by an Optimized Laser Excitation and Its Application for Liquid Analyses by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy*, **62**, 1433-1442. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.10.019>
- [13] Hou, H., Tian, Y., Li, Y., *et al.* (2013) Study of Pressure Effects on Laser Induced Plasma in Bulk Seawater. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, **29**, 169-175. <https://doi.org/10.1039/C3JA50244A>
- [14] 宋矫健, 田野, 卢渊, 等. 532 和 1064nm 激光的水下 LIBS 探测对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 3104-3108.
- [15] Yao, M., Lin, J., Liu, M., *et al.* (2012) Detection of Chromium in Wastewater from Refuse Incineration Power Plant near Poyang Lake by Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Optics*, **51**, 1552-1557. <https://doi.org/10.1364/AO.51.001552>
- [16] Barreda, F.-A., Trichard, F., Barbier, S., *et al.* (2012) Fast Quantitative Determination of Platinum in Liquid Samples by Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, **403**, 2601-2610. <https://doi.org/10.1007/s00216-012-6019-2>
- [17] Kuwako, A., Uchida, Y. and Maeda, K. (2003) Supersensitive Detection of Sodium in Water with Use of Dual-Pulse Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Applied Optics*, **42**, 6052-6056. <https://doi.org/10.1364/AO.42.006052>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7567, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: app@hanspub.org