

doi:10.3788/gzxb20184708.0847006

火花放电辅助-激光诱导击穿光谱技术中的 放电通道特性研究

董博,何小勇,王亚蕊,陈钰琦,李润华

(华南理工大学 物理与光电学院,广州 510641)

摘 要:以门控脉冲高压电源作为火花放电电源,研究了火花放电辅助-激光诱导击穿光谱中放电通道与火花放电相对于激光脉冲之间延时的关系.研究表明:在合理的剥离激光能量和电极空间布置下,调节该延时可以实现由“V”字形放电到平行放电的转变.在“V”字形放电时,火花放电会扩大烧蚀坑洞的直径、破坏横向空间分辨率;而在平行放电情况下,火花放电不会扩大烧蚀坑洞的直径,从而保证其横向空间分辨率仅由激光剥离来决定.在平行放电的条件下开展了铝合金中铬元素的火花放电辅助-激光诱导击穿光谱定量分析,其检出限达到了 8.8 ppm,比单纯的激光诱导击穿光谱技术的分析结果改善了 8 倍.在火花放电辅助-激光诱导击穿光谱技术中采用带外触发控制的火花放电模式,可以实现平行放电和高横向空间分辨的样品表面元素分析.

关键词:火花放电辅助-激光诱导击穿光谱;火花放电;放电通道;元素分析

中图分类号:O433

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)08-0847006-7

Characteristics of Discharge Channel in Spark Discharge Assisted Laser-induced Breakdown Spectroscopy

DONG Bo, HE Xiao-yong, WANG Ya-ru, CHEN Yu-qi, LI Run-hua

(School of Physics and Optoelectronics, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The relationship between the discharge channel and the time delay between the spark discharge and the laser pulse in spark discharge assisted laser-induced breakdown spectroscopy was investigated by using a gate-able pulsed high-voltage power source as the power supplier of the spark discharge. It was demonstrated that under suitable laser pulse energy and geometrical arrangement of the electrodes, it was possible to change the discharge channel from “V-shaped” type to parallel type by adjusting this time delay. In the “V-shaped” discharge, the spark discharge was able to increase the diameters of the craters and deteriorate the lateral resolution. However, in the parallel discharge, the spark discharge did not increase the diameters of the craters ensuring that the spatial resolution in this technique was only determined by laser-ablation. Under the condition of parallel discharge, quantitative analysis of chromium in aluminum alloy with spark discharge assisted laser-induced breakdown spectroscopy was carried out and the limit of detection of chromium reached 8.8 ppm, which was 8 times better than that obtained in LIBS without the assistance of the spark discharge. By using spark discharge under external trigger mode in the spark discharge assisted laser-induced breakdown spectroscopy, it is convenient to realize parallel discharge and surface elemental analysis of samples under high spatial resolution.

Key words: Spark discharge assisted laser-induced breakdown spectroscopy; Spark discharge; Discharge channel; Element analysis

OCIS Codes: 300.6210; 300.6360; 300.6365

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No.2012CB921900),国家自然科学基金(Nos.11274123,11304100)资助

第一作者:董博(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电子学与光电技术.Email:197546435@qq.com

导师(通讯作者):李润华(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为光电子学与光电技术.Email:rhli@scut.edu.cn

收稿日期:2018-04-18;录用日期:2018-06-04

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

0 引言

激光诱导击穿光谱(Laser-induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)是一种具有快速分析能力的等离子体光谱分析技术,被广泛应用于物质的成分分析^[1-2]、环境监测、珠宝鉴定和考古等诸多领域.但是传统的LIBS技术由于受到等离子体中较强的电子韧致辐射导致背景干扰,灵敏度较低.为此人们尝试了多种方法来提高LIBS技术的信号强度和光谱分析灵敏度,其中主要有双脉冲LIBS(DP-LIBS)^[3-4]、空间受限增强LIBS^[5-6]、微波增强LIBS^[7-8]以及LIBS与激光诱导荧光(LIF)联用^[9-10]等技术.利用火花放电也能显著增强LIBS的信号并提高其光谱分析灵敏度,该技术称为火花放电辅助-激光诱导击穿光谱(Spark Discharge assisted Laser-induced Breakdown Spectroscopy, SD-LIBS)^[11-13].在Nassef等开展的SD-LIBS的研究中,采用微法量级的储能电容,放电持续时间达到几十微秒的量级,电脉冲的峰值功率不高^[11];Sobral等采用脉冲方波来产生火花放电,避免了在火花放电回路中出现电流振荡,提高了激发效率^[12];Alexander等采用带开关的火花放电回路,可以控制火花放电的延时以便在大的延时条件下研究分子光谱^[13].浙江师范大学周卫东教授的研究小组采用纳法的储能电容实现了持续时间为纳秒至数微秒量级的火花放电来增强激光等离子体中的原子辐射,取得了较好的分析效果^[14].

火花诱导击穿光谱(Spark-induced Breakdown Spectroscopy, SIBS)是一种与LIBS类似的原子光谱分析技术,它利用高压火花放电来剥离和击穿样品并进行光谱分析.由于高压电源相比于激光器便宜,也适宜于野外和在线分析,因此也获得了广泛的应用^[15-16].LIBS与SIBS联合运用的光谱技术依据具体实验条件的不同可采用不同的术语.当激光能量较高,激光已完成了样品剥离,而火花放电起到进一步增强原子辐射强度的作用时,这种情形可以用SD-LIBS来描述;而当激光能量较低,激光主要起到剥离样品兼点火的作用,而样品的进一步击穿和谱线增强主要由火花放电来完成的这一种情形则可以用激光剥离-火花诱导击穿光谱(Laser-ablation Spark-induced Breakdown Spectroscopy, LA-SIBS)^[17-18]或激光点火辅助-火花诱导击穿光谱(Laser-ignition assisted Spark-induced Breakdown Spectroscopy, LI-SIBS)来描述^[19-20].

为了能够利用SD-LIBS技术来实现高空间分辨、高灵敏的样品表面元素分析,有必要细致研究火花放电对增强等离子体中原子辐射信号的同时是否会破坏元素分析时的空间分辨本领,也就是说是否会进一步烧蚀样品从而形成更大的烧蚀坑洞.一种理想的情形是采用正交的几何配置,即激光从垂直于样品表面的方向入射以剥离样品,火花放电从平行于样品表面的方向来进行进一步击穿样品和增强原子辐射.开展SD-LIBS或LA-SIBS的研究一般可以采用两种放电方式:即基于电容储能的激光等离子体触发式的火花放电^[11,14,17-18]和基于脉冲高压电源的外触发式的火花放电^[19-20].前者的放电时间由电压和电极间距等条件决定的,不能随意控制;而后者则有可能通过外触发信号来控制火花放电的起始时间,从而实现平行放电,保证火花放电不剥离样品并不损害样品表面元素分析时的横向空间分辨率.

本文中,采用一台门控脉冲高压电源作为火花放电的电源,以铝合金为代表样品,在合理的激光剥离条件和电极空间布置下研究了火花放电的通道与火花放电延时时间以及电压的关系,验证了平行放电的可行性,并评估了在平行放电的前提下SD-LIBS技术对铝合金中铬元素定量分析的灵敏度.

1 实验

图1是SD-LIBS的实验装置示意图.一台脉宽为12 ns、重复频率为5 Hz的电光调Q Nd:YAG激光器作为LIBS的激光光源.该激光器所输出的基频光($\lambda=1\ 064\ \text{nm}$)被一个球透镜 L_1 (BK7,焦距 $f=150\ \text{mm}$)聚焦到样品表面,以实现样品的剥离并在放电电极间产生等离子体.分束片BS将一小部分激光反射到光电二极管PD上,光电二极管产生同步信号用于触发数字存储示波器和脉冲延时信号发生器,脉冲延时信号发生器连接一台高压脉冲电源(电压 $0\sim 4\ 500\ \text{V}$,最大电流 $50\ \text{A}$),以控制其脉冲高压输出的起始时间和脉宽.

实验中,样品安装在一个二维运动平台上并与平台保持绝缘,平台保持 $0.5\ \text{mm/s}$ 速度匀速运动从而使每一次激光剥离和火花放电都在样品的不同位置,避免了由于激光长时间作用于一点对样品造成过度烧蚀,也保证了产生等离子体的稳定性.两根直径为 $2\ \text{mm}$ 的放电钨针水平放置在距离样品表面约 $2\ \text{mm}$ 处,针尖之间的距离为 $2.5\ \text{mm}$,钨针尖表面被打磨成半圆球形,两根钨针分别作为放电的阳极和阴极同高压脉冲电源相连.聚焦的激光首先在样品表面产生等离子体,然后在高压作用下,电子经过激光等离子体通道而产生

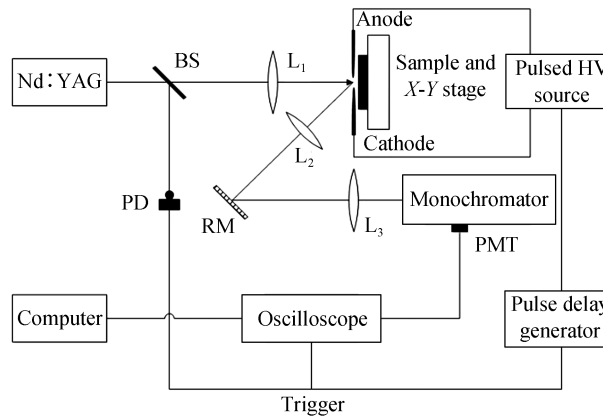


图1 SD-LIBS 实验装置示意图

Fig.1 Diagram of the experimental setup of SD-LIBS

火花放电,产生一个强的等离子体火焰,其光辐射经由球透镜 L_2 (石英,焦距 $f=100\text{ mm}$)、 L_3 (石英,焦距 $f=150\text{ mm}$) 和反射镜 RM 组成的光学系统收集到一台焦距为 50 cm 的单色仪的入射狭缝处,单色仪的衍射光栅刻线密度为 $2\ 400\text{ L/mm}$,实验中其光谱分辨本领优于 0.2 nm .光电倍增管输出的电信号被一台 250 MHz 的数字存储示波器监测记录,其波形数据经 GPIB 接口传输到计算机进行分析。

2 结果与讨论

2.1 放电通道

火花放电的通道总是沿着电阻最小的路径.观察表明,在 SD-LIBS 中,由于激光剥离产生的等离子体的存在,放电通道依据不同的实验条件有“V”字形放电和平行放电两种形式,如图 2 所示.“V”字形放电,是指火花放电的通道由阳极经过样品表面的等离子体中心然后到达阴极;而平行放电则是直接由阳极到达阴极,其放电通道平行于样品表面.预计“V”字形放电与平行放电相比更易于扩大激光烧蚀坑洞直径从而破坏空间分辨本领.因此为了确保空间分辨本领仅由激光剥离过程来决定,SD-LIBS 中应尽量采用平行放电。

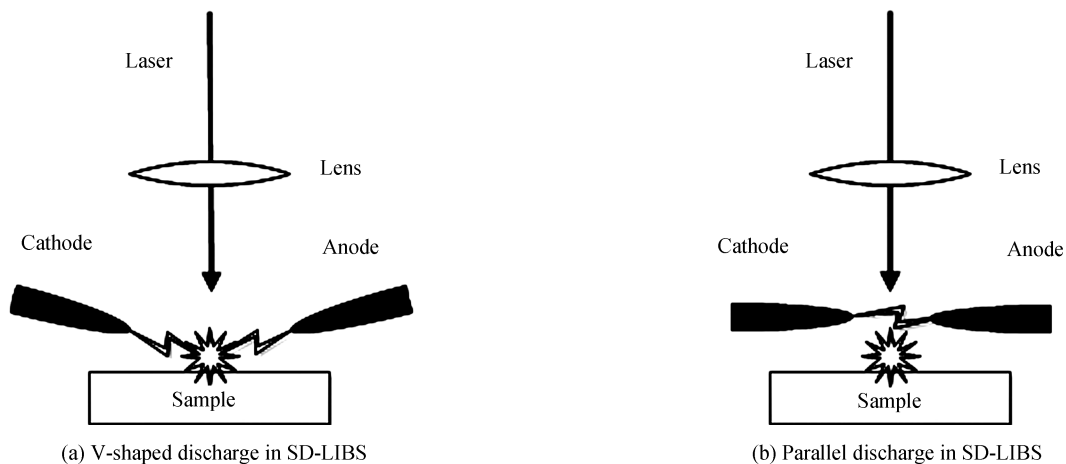


图2 SD-LIBS 中的放电通道

Fig.2 The discharge channels in SD-LIBS

在 SD-LIBS 中,究竟呈现出“V”字形放电还是平行放电由多个实验参数来决定,包括激光等离子体体积大小、电极到样品表面的垂直距离、阴极与阳极的水平距离以及放电的延时时间(即电脉冲与激光脉冲之间的延迟时间)以及放电电压的大小五个参数.为了简化问题,可以将前三个参数设置在合理的状态,仅对延时时间和电压的影响开展研究,以明确其中的规律.其中激光能量根据所需要剥离样品的多少或者烧蚀坑洞的大小来设定,为提高表面元素分析时的横向空间分辨率,选择尽可能低的激光能量;电极空间布局根据存在激光等离子体的条件下, $1\ 000\sim 4\ 000\text{ V}$ 的高压就可以实现火花放电的要求来设置。

实验研究了在不同放电电压下,脉冲延时时间对放电通道的影响.实验中火花放电的放电通道是直接通过肉眼观察确定的.表1为激光单脉冲能量为4.5 mJ,火花放电的脉冲宽度为50 μs ,电压为3 000 V时,脉冲延时时间与放电通道之间的关系.电压为1 000 V和2 000 V时,情况与3 000 V大致相同.可以看出,在设定的激光能量和电极空间配置下,通过控制火花放电的延时时间可以实现由“V”字形放电到平行放电的转变.在延时较小时为“V”字形放电;随着延时时间的增加,放电通道可以转变为平行放电.由此可见利用门控脉冲高压电源,可以随意控制火花放电的起始时间,便于实现平行放电.

表1 SD-LIBS中放电通道对火花放电与激光脉冲相对延时时间的依赖关系

Table 1 Relation of discharge channel with time delay between the spark-discharge and the laser pulse in SD-LIBS

Time delay/ μs	Discharge type
1	V-shaped
5	V-shaped
10	Intermediate case
15	Intermediate case
20	Parallel
25	Parallel

2.2 火花放电对样品烧蚀的影响

为了研究SD-LIBS技术中两种放电通道模式下火花放电对样品表面的烧蚀情况,使用扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)观察在两种放电形式下样品表面烧蚀坑洞的形貌并与单独激光剥离所形成的坑洞进行了对比.结果见图3,其中激光单脉冲能量为4.5 mJ,放电电压为3 000 V,脉冲宽度为50 μs ，“V”字形放电时的延时为5 μs ;平行放电时的延时为20 μs ,每一坑洞由20个重复脉冲作用形成.可以看出,只有激光剥离时,烧蚀坑洞的直径为104.2 μm ;平行放电时,烧蚀坑洞的直径为104.7 μm ,与前者相比仅扩大了0.48%;而在“V”字形放电时,烧蚀坑洞的直径扩大到112.3 μm ,扩大了7.7%.这一实验表明,在“V”字放电的情形下,火花放电的确会剥离出更多的样品,使烧蚀坑洞直径扩大,从而降低样品表面的空间分辨率.当采用门控的高压电源,通过控制放电的起始时间并合理设置放电电极的空间布置实现平行放电时,火花放电对样品表面的烧蚀程度可以降至很低的水平,基本上不破坏空间分辨率,因此SD-LIBS技术中空间分辨率才可以仅由激光剥离来决定.

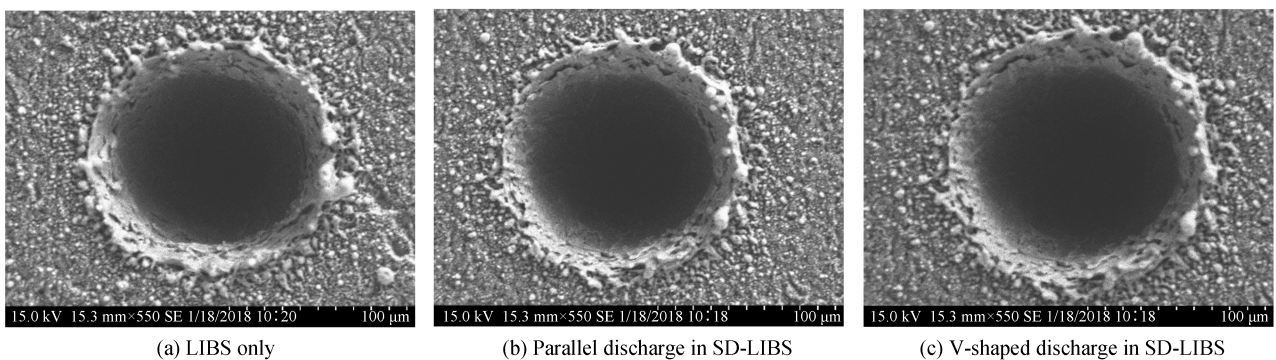


图3 烧蚀坑洞的SEM图

Fig.3 SEM photos of the craters formed on sample's surface

2.3 时域图

实验在激光单脉冲能量为4.5 mJ,放电电压为3 000 V,电脉冲相对激光脉冲延时为10 μs (此时对应于“V”字形放电),脉冲宽度为50 μs 的条件下,对比观测了铝原子线394.4 nm和背景波长393.0 nm处的等离子体辐射的时域图.如图4所示.图4(a)中,0~10 μs 区间的信号为激光等离子体在394.4 nm处的辐射,包括铝原子辐射和连续的背景辐射,该范围内的信号即为单纯的LIBS的信号;10~80 μs 区间的信号为火花放电产生的等离子体在相同波长处的辐射.图4(b)显示的是393.0 nm处的背景辐射的时域图,其中在60 μs 时的尖峰脉冲是由高压电源的开关效应所引起^[18].图4(c)为外触发信号示意图.经实验观测,电压的波形近似为与外触发信号同步的方波.由对比可以看出,采用此脉冲高压电源实现的火花放电与纯LIBS相比,在整

个高压脉冲作用的时间范围内,铝原子的信号峰值强度得到明显的改善,使得其辐射时间得以延长,因而时间积分的信号强度能够获得显著的增强.此外,在几乎整个高压脉冲作用的时间范围内,除了首尾因为开关效应而产生的反冲,背景都很低,因此通过时间分辨的信号检测技术,选取合适的信号采样门,既可以避开高压电源的开关效应的影响,也可以消除韧致电子辐射造成的背景干扰,获得较高的信号/背景比.后文中在处理信号的时间积分强度时,采样门均选择在从放电开始后的 $10\sim 40\ \mu\text{s}$ 的时间范围,即比放电起始时间延时 $10\ \mu\text{s}$,采样门宽为 $30\ \mu\text{s}$,以避免韧致电子辐射干扰和高压电源开关效应所引起的反冲信号的影响.该条件下采集到的积分信号强度约为 $4\ 465$, LIBS 中在 $2\sim 10\ \mu\text{s}$ 区间的时间积分信号强度约为 561 ,相比有约 8 倍的增强.可见火花放电可以显著增强原子辐射的时间积分信号强度.对照该延时条件下样品表面烧蚀坑洞的情况可知,火花放电对等离子体原子辐射信号的增强主要是由于电子碰撞效应而增强了原子辐射强度并延长了其辐射时间,而来自于增加的剥离样品质量的贡献非常小.

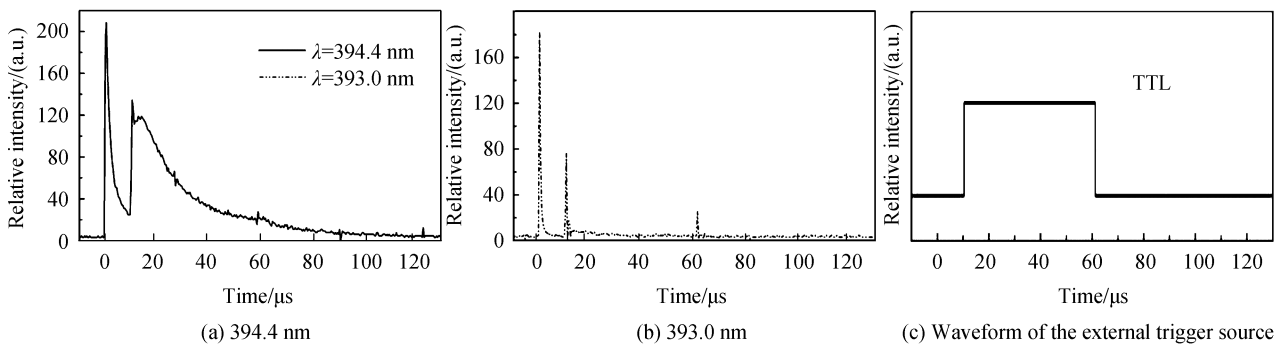


图 4 监测波长为 $394.4\ \text{nm}$ 和 $393.0\ \text{nm}$ 时等离子体辐射的时域图

Fig.4 Temporal profiles of plasma emission observed at $394.4\ \text{nm}$ and $393.0\ \text{nm}$

2.4 火花放电的延时时间对信号强度的影响

在放电电压为 $3\ 000\ \text{V}$ 时,实验研究了火花放电的延时时间对铝原子辐射信号积分强度的影响.在激光脉冲能量为 $4.5\ \text{mJ}$,脉冲宽度为 $50\ \mu\text{s}$ 的条件下,实验得到的铝原子辐射的信号积分强度与火花放电延时之间的关系如图 5 所示.随着延时时间的增加,铝原子辐射的信号积分强度单调减小.这是由于随着延时的增加,激光等离子体的温度下降.放电通道改变导致被剥离样品减少以及部分样品飞离火花放电作用区间这三个因素造成的.对比表 1 中放电通道与延时时间的关系及图 5 的结果可知,当延时时间为 $20\ \mu\text{s}$,放电通道平行于样品表面时,信号强度大约衰减到 $1\ \mu\text{s}$ 延时的“V”字形放电时最大信号强度的一半.

2.5 放电电压对信号强度的影响

在保证平行放电的前提下,实验研究了 SD-LIBS 中铝原子在 $394.4\ \text{nm}$ 波长的辐射信号积分强度与高压脉冲电源电压的关系.其中激光单脉冲能量为 $4.5\ \text{mJ}$,脉冲延时 $20\ \mu\text{s}$,脉冲宽度为 $50\ \mu\text{s}$,电压源最大电压 $4\ 000\ \text{V}$,最大电流 $50\ \text{mA}$.实验结果如图 6 所示.可见在 SD-LIBS 中,由于激光的作用,大大降低了火花放电所需的电压,电压在 $1\ 000\ \text{V}$ 以上即可实现击穿.随着放电电压的升高,通过火花放电注入到激光等离子体中的电能随之增加,铝原子辐射的信号积分强度随着放电电压的升高而增强.

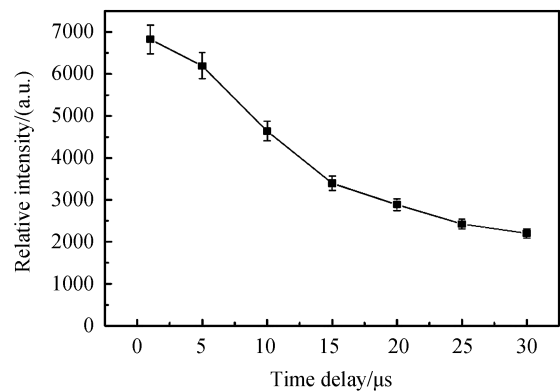


图 5 SD-LIBS 中铝原子 $394.4\ \text{nm}$ 波长的信号强度与火花放电的延时时间之间的关系

Fig.5 Plot of signal intensity of aluminum atomic emission at $394.4\ \text{nm}$ versus time delay of the spark discharge in SD-LIBS

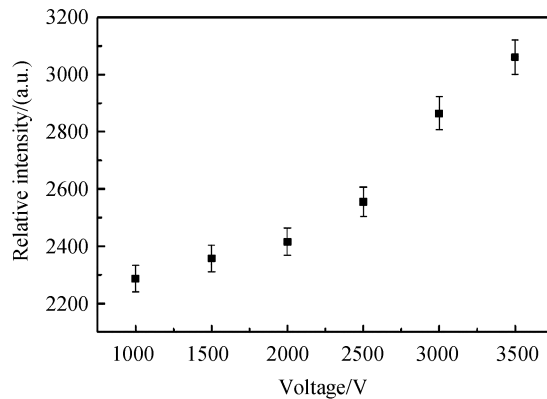


图6 SD-LIBS中铝原子394.4 nm波长的信号积分强度与放电电压的关系

Fig.6 Plot of signal intensity of aluminum atomic emission at 394.4 nm versus discharge voltage in SD-LIBS

2.6 铝合金中Cr元素定量分析

为了评估SD-LIBS技术对铝合金中痕量铬(Cr)元素的分析灵敏度,实验分别在SD-LIBS和LIBS的情形下,制定了Cr的校正曲线,结果如图7.此时的激光单脉冲能量为4.5 mJ,脉冲延时20 μ s,脉冲宽度为50 μ s,放电电压为3 000 V,Cr原子的分析线波长为425.43 nm.

分析灵敏度通常采用元素的检出限来衡量.元素的检出限(Limit of Determination, LOD)由 3σ 原则来确定,即

$$\text{LOD} = 3\sigma_B / s \quad (1)$$

式中 s 为元素校正曲线的斜率, σ_B 为背景的标准偏差.

实验在背景波长424.0 nm处反复测量10次并统计得到相应的背景标准偏差,根据实验数据计算得到,当采用SD-LIBS技术时,Cr的检出限为8.8 ppm;而对于LIBS,在该激光能量和相同检测条件下Cr的检出限为68.0 ppm.由此可见,与采用LIBS相比,SD-LIBS技术使得Cr元素的检出限改善了近8倍,显著提高了元素分析的灵敏度.值得说明的是,如果提高激光的单脉冲能量,采用LIBS技术获得的铬的检出限远低于68.0 ppm^[21].这里之所以采用较低的激光能量,是为了在进行样品表面元素分析时能够获得较高的横向空间分辨率.

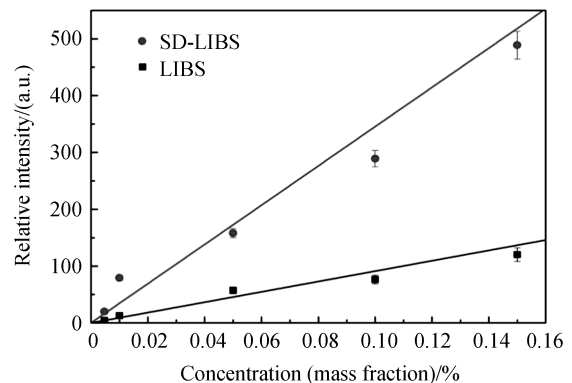


图7 采用LIBS和SD-LIBS技术分析铝合金中铬元素的校正曲线

Fig.7 Calibration curves of chromium in aluminum alloy obtained with LIBS and SD-LIBS techniques

3 结论

通过上述研究可以得出以下几个有意义的结论:1)以门控脉冲高压电源作为火花放电电源,在合适的激光能量和电极空间配置的条件下,通过控制火花放电的延时时间可以实现由“V”字形放电到平行放电的转变.延时较小时为“V”字形放电;增大延时可转变为平行放电,但平行放电时信号强度比“V”字形放电时有所降低.2)“V”字形放电情形下,火花放电会剥离出少量固体样品,扩大烧蚀坑洞的直径;而在平行放电情形下几乎不会剥离出多的样品,因而火花放电不会破坏表面元素分析时的空间分辨率.3)在平行放电条件下,等离子体原子辐射信号强度随电压的增加而增强,随延时的增加而减小.因此,如果要想在样品表面获得高的横向空间分辨率,宜采用外触发式的火花放电模式.以上研究结果可以拓展应用于高重复频率的LA-SIBS中,实现固体样品表面元素分布的高分辨快速成像分析.

参考文献

- [1] CHEN Jin-zhong, MA Rui-ling, WANG Jing, *et al.* Detection of the elements Mn and Ni in a steel sample by laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1214001.

- 陈金忠, 马瑞玲, 王敬, 等. 激光诱导击穿光谱技术测定钢样品中元素 Mn 和 Ni[J]. 光子学报, 2011, **43**(12): 1214001.
- [2] SHEN Qin-mei, ZHOU Wei-dong, LI Ke-xue. Determination of Cr and Ba in soil using laser induced breakdown spectroscopy with artificial neural networks[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(12): 2134-2138.
沈沁梅, 周卫东, 李科学. 激光诱导击穿光谱结合神经网络测定土壤中的 Cr 和 Ba[J]. 光子学报, 2010, **39**(12): 2134-2138.
- [3] BABUSHOK V I, DELUCIA Jr F C, GOTTFRIED J L, *et al*. Double pulse laser ablation and plasma: Laser induced breakdown spectroscopy signal enhancement[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2006, **61**(9): 999-1014.
- [4] HOHREITER V, HAHN D W. Dual-pulse laser induced breakdown spectroscopy: Time-resolved transmission and spectral measurements[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, **60**(7-8): 968-974.
- [5] SHEN X K, SUN Jian, LIN Hao, *et al*. Spatial confinement effects in laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(8): 081501.
- [6] POPOV A M, COLAO F, FANTONI R. Enhancement of LIBS signal by spatially confining the laser-induced plasma [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2009, **24**(5): 602-604.
- [7] VILJANEN J, SUN Zhi-wei, ALWAHABI Z T. Microwave assisted laser-induced breakdown spectroscopy at ambient conditions[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2016, **118**: 29-36.
- [8] KHUMAENI A, MOTONOBU T, KATSUAKI A, *et al*. Enhancement of LIBS emission using antenna-coupled microwave[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(24): 29755-29768.
- [9] YI Rong-xing, LI Jia-ming, YANG Xin-yan, *et al*. Spectral interference elimination in soil analysis using laser-induced breakdown spectroscopy assisted by laser-induced fluorescence[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, **89**(4): 2334-2337.
- [10] LI Chang-mao, HAO Zhong-qi, ZOU Zhi-min, *et al*. Determinations of trace boron in superalloys and steels using laser-induced breakdown spectroscopy assisted with laser-induced fluorescence[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(8): 7850-7857.
- [11] NASSEF O A, ELSAYED-ALI H E. Spark discharge assisted laser induced breakdown spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2005, **60**(12): 1564-1572.
- [12] SOBRAL H, ROBLEDO-MARTINEZ A. Signal enhancement in laser-induced breakdown spectroscopy using fast square-pulse discharges[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2016, **124**: 67-73.
- [13] ALEXANDER A, BOL'SHAKOV, MAO Xiang-lei, *et al*. Spectral emission enhancement by an electric pulse for LIBS and LAMIS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2017, **32**(3): 657-370.
- [14] ZHOU Wei-dong, LI Ke-xue, SHEN Qin-mei, *et al*. Optical emission enhancement using laser-ablation combined with fast pulse discharge[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(3): 2573-2578.
- [15] HUNTER A J R, DAVIS S J, PIPER L G, *et al*. Spark-induced breakdown spectroscopy: A new technique for monitoring heavy metals[J]. *Applied Spectroscopy*, 2000, **54**(4): 575-582.
- [16] TAEFI N, KHALAJI M, TAVASSOLI S H. Determination of elemental composition of cement powder by spark induced breakdown spectroscopy[J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, **40**(7): 1114-1119.
- [17] LI Ke-xue, ZHOU Wei-dong, SHEN Qin-mei, *et al*. Laser ablation assisted spark induced breakdown spectroscopy on soil samples[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2010, **25**(9): 1475-1481.
- [18] HE Xiao-yong, DONG Bo, CHEN Yu-qi, *et al*. Analysis of magnesium and copper in aluminum alloys with high repetition rate laser-ablation spark-induced breakdown spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2018, **141**: 34-43.
- [19] CHEN Yu-qi, ZHANG Qian, LI Guan, *et al*. Laser ignition assisted spark-induced breakdown spectroscopy for the ultra-sensitive detection of trace mercury ions in aqueous solutions[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2010, **25**(12): 1969-1973.
- [20] LI Guan, JIANG Jie, ZHANG Qian, *et al*. High sensitive detection of trace Hg (II) in natural water with laser ignition assisted spark-induced breakdown spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(7): 0715002.
李关, 姜杰, 张谦, 等. 水环境中痕量汞的激光点火辅助火花诱导击穿光谱高灵敏检测[J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0715002.
- [21] LI Hong-kun, LIU Ming, CHEN Zhi-jiang, *et al*. Quantitative analysis of impurities in aluminum alloys by laser-induced breakdown spectroscopy without internal calibration[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, **18**(1): 222-226.

Foundation item: National Basic Research Program (No. 2012CB921900) and National Natural Science Foundation of China (Nos. 11274123, 11304100)

引用格式: DONG Bo, HE Xiao-yong, WANG Ya-rui, *et al*. Characteristics of Discharge Channel in Spark Discharge Assisted Laser-induced Breakdown Spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(8): 0847006

董博, 何小勇, 王亚蕊, 等. 火花放电辅助-激光诱导击穿光谱技术中的放电通道特性研究[J]. 光子学报, 2018, **47**(8): 0847006