

文章编号: 1001-3806(2017)01-0024-05

激光触发真空开关光谱和导通特性实验研究

林华中¹, 王英^{1*}, 何正浩², 樊文芳^{2,3}

(1. 华中科技大学 激光技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 武汉 430074; 3. 国家电网天津市电力公司 城东公司, 天津 300010)

摘要: 为了研究激光触发真空开关的靶材激光诱导击穿光谱和电弧光谱, 分析影响时延抖动的微观因素, 利用单脉冲纳秒激光轰击位于开关阴极的靶材激发等离子体, 采用滤光片和光电倍增管组合使用的方法, 取得了离散波长光强的数据, 建立拟合曲线, 进行了理论分析。结果表明, 脉冲激光能量增大可以提高靶材激光诱导击穿光谱的强度, 但几乎不影响电弧光谱的强度; 增大开关两端电压可以提高电弧光谱强度; 在开关强电场作用下, 电弧等离子体碰撞激发, 等离子体的成分比例随电压大小发生变化; 时延抖动与电压大小无关, 与自由电子运动状态和电弧离子种类无关, 主要在触发阶段受影响, 而相比激光能量, 开关电压大小对导通时的电压下降沿陡度起主要作用。这一结果对激光触发真空开关中激光与靶材相互作用、脉冲电弧和时延抖动的进一步研究是有帮助的。

关键词: 光谱学; 激光触发真空开关特性; 光谱曲线拟合; 电弧光谱; 时延抖动; 等离子体

中图分类号: O433.4

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2017.01.006

Experimental study on spectrum and conduction properties of laser triggered vacuum switch

LIN Huazhong¹, WANG Ying¹, HE Zhenghao², FAN Wenfang^{2,3}

(1. State Key Laboratory of Laser Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Chengdong Company, Tianjin Electric Power Company, State Grid, Tianjin 300010, China)

Abstract: In order to study laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and arc spectrum of laser-triggered vacuum switch (LTVS), and analyze the micro factors affecting delay jitter. By using single-pulse ns laser to bombard the target plasma located on switch cathode and the combined method of photoelectric multiplier tube and optical filters, the data of light intensity of discrete wavelengths and the fitting curve were gotten. After theoretical analysis, the results show that the increase of the pulsed laser energy could improve the strength of target LIBS, but almost don't affect the strength of arc spectrum. The increase of switch voltage can improve the intensity of arc spectrum. Arc plasma collides and excites in the strong electric field at the switch. The ingredient proportion of plasma changes with the change of voltage. Jitter is independent of voltage magnitude, motion status of free electrons and races of arc plasmas. The main affection takes place in the triggering period. Not laser energy but switch voltage plays a major role in the steepness of voltage drop. The results are useful for the further study about laser-target interaction, pulsed-arc and delay-jitter of LTVS.

Key words: spectroscopy; characteristics of laser triggered vacuum switch; spectral curve fitting; arc spectrum; delay jitter; plasma

引言

激光触发真空开关 (laser-triggered vacuum switch, LTVS) 是一种新型的高压大电流装置中的控制器件, 结合了激光技术和脉冲功率技术, 是未来强流开关的

重要发展方向之一, 已有许多相应的研究^[1-6]。其基本原理是用脉冲激光照射位于开关阴极的靶材, 激发出少量的初始等离子体, 在开关强电场作用下, 粒子加速、相互之间碰撞产生大量的自由电子和离子, 从而使开关导通。它相比传统的触发开关有许多优势。电弧是一种重要的气体放电现象, 已有许多关于电弧光谱的分析研究^[7-9], 但基本上研究的都是在均匀气体介质中的电弧放电现象, 没有针对激光触发真空高压开关的电弧光谱和靶材激光诱导击穿光谱 (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) 研究, 而 LIBS 在激光触

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51377071)

作者简介: 林华中 (1991-), 男, 硕士研究生, 现主要从事激光触发真空开关导通特性研究。

* 通讯联系人。E-mail: wy@mail.hust.edu.cn

收稿日期: 2015-12-03; 收到修改稿日期: 2016-03-04

发真空开关技术中是关键的节点。LIBS 是把激光能量聚焦于被测样品表面,产生等离子体且发射光谱,通过检测发射光谱来对样品进行定性或定量分析。LIBS 至今已应用于工业、农业等多个领域^[10-12],关于优化测量或数据处理方法以提高结果准确性和稳定性的研究^[13-15]也有很多。

作者尝试利用 LTVS 导通时产生的脉冲电弧的光谱研究脉冲激光对钛和氯化钾混合触发靶材的作用,以及利用光谱分析不同脉冲激光能量和开关电压对电弧等离子体状态的影响;同时研究宏观上触发激光能量、开关电压以及微观上电子、离子状态与时延抖动和导通电压下降沿的关联性,揭露影响时延抖动和电压下降沿的主要因素,为后续进一步研究提供参考。

作者研究了靶材 LIBS 和开关电弧光谱的曲线。分析在不同能量脉冲激光的触发下,开关中钛和氯化钾 1:1 混合靶材的 LIBS 曲线的区别和趋势;分析在不同脉冲激光能量和开关电压条件下,开关电弧光谱曲线的区别和趋势;比较分析 LIBS 曲线和电弧光谱曲线的关联性和区别;通过光谱曲线尝试研究脉冲激光能量和开关电压对实验中高温等离子体气团的成分、数量密度等的作用;研究电弧等离子体中自由电子运动状态和离子种类等与开关时延抖动的关系,发现影响抖动的主要导通阶段,更进一步认识 LTVS 的导通机理。

1 实验研究

1.1 实验系统

LTVS 的光谱探测分析实验系统如图 1 所示。实验中采用了一台可输出毫焦量级能量的 Nd:YAG 激光器,工作波长为 1064nm,激光脉冲的半峰全宽(full width at half maximum, FWHM)为 18ns,激光可实现单脉冲输出,可随供电电压的改变在一定范围内变化。同时采用了一台赛凡光电公司的型号为 7ID101-CR131 的光电倍增管(photomultiplier tube, PMT),波长范围为 185nm ~ 900nm,最大响应波长为 400nm,增益为 6×10^6 。在光电倍增管的进光口处加装了一套

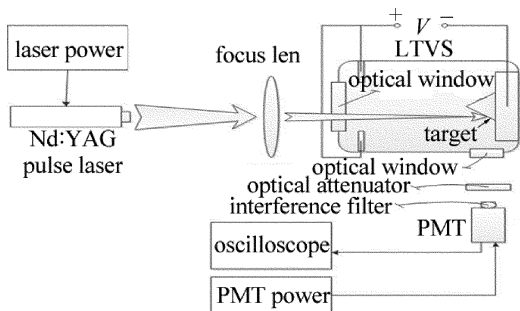


Fig. 1 Schematic diagram of spectrum analysis experimental system of LTVS

THORLABS 公司的带通滤光片套件,包括 10 块等间隔中心波长的带通滤光片,范围为 350nm ~ 800nm,中心波长间隔大小为 50nm,且各滤光片的 FWHM 均为 10nm,实验中轮换和 PMT 组合使用。本实验中还采用了一台 Agilent 公司的型号为 DSO-X3104A 的示波器。图 2 是 LTVS 触发时延的探测原理图,使用的光电探测器是 THORLABS 公司的 DET10A 型号探测器。图 3 是实验系统的电路图。图 4 是示波器记录的光谱探测信号波形图。图 5 是时延波形图。

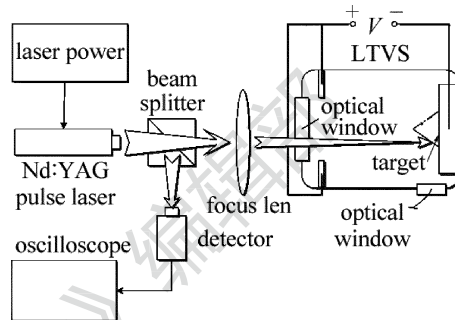


Fig. 2 Schematic diagram of delay detection of LTVS

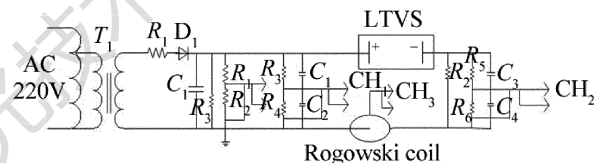


Fig. 3 Circuit diagram of arc spectrum analysis experimental system of LTVS

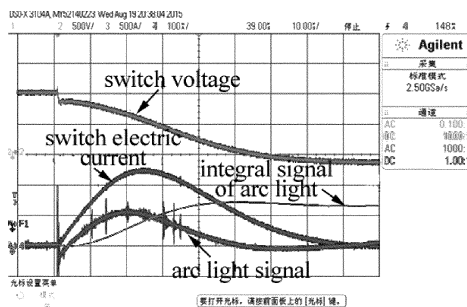


Fig. 4 Waveform chart of spectrum signal recorded by an oscilloscope

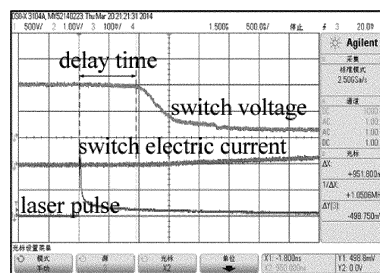


Fig. 5 Waveform chart of delay signal recorded by an oscilloscope

1.2 实验方案

本研究中主要进行了两个实验:(1) LIBS 实验分析研究,目的是分析激光脉冲能量对轰击靶材产生的初始等离子体特性参量的影响;(2) 电弧光谱实验分

析研究,目的是分析不同激光脉冲能量和开关电压对电弧等离子体特性参数的影响。

在 LTVS 的 LIBS 探测分析实验中,固定脉冲激光能量,通过组合不同波长的滤光片和 PMT 测得 10 个波长光的强度,之后改变脉冲激光能量重复上述测量,测量完成后对离散波长光强拟合成光谱曲线。LTVS 电弧光谱探测分析实验流程大体相同,只是每次用激光脉冲触发开关导通前需要让电路充电在开关两端施加一定的电压,实验电路如图 3 所示。当激光照射靶材触发开关导通后,两端电压迅速降为零,同时在回路中出现一个巨大的电流脉冲,同时在开关两极间产生一个极短的脉冲电弧,示波器记录波形如图 4 所示。

探测在不同电压和激光脉冲能量条件下的开关时延,每种条件下记录 10 个时延数据,然后利用这些数据求出每种条件下的时延抖动。

在探测 LIBS 和电弧光谱过程中,需要用光衰减片控制进光量以防烧坏光电倍增管,利用示波器记录特定波长的光脉冲信号,对光脉冲信号进行积分获得特定波长的光的辐射量或强度。实验中,激光入射光路光轴与辐射光接收系统光轴相互垂直。聚焦透镜的焦距 $f=200\text{mm}$ 。

图 5 为触发时延信号波形图,本文中定义激光器发射脉冲激光的上升沿到开关电压下降沿的起点为触发时延。本文中在不同条件下各记录 5 次时延,然后计算出时延抖动,抖动为时延的均方差。

2 结果分析

靶材 LIBS 探测(开关电压 $U=0\text{V}$)和电弧光谱探测(开关电压 U 分别为 1000V , 3000V , 5000V)需要光衰减片的衰减程度不同,光谱强度分别进行归一化。

2.1 靶材 LIBS 分析

靶材的 LIBS 拟合曲线如图 6 所示。触发激光脉冲的能量分别为 0.414mJ , 0.952mJ , 1.624mJ 和 2.435mJ , PMT 的工作电压为 -300V 。图 6 中,光谱拟合曲线的范围是 $350\text{nm} \sim 800\text{nm}$,谱线的强度基本随激光脉冲能量的增大而增强,且不同曲线在长波段的趋势基本一致,但在短波段随能量增强比例不是非常一致。甚至在 $400\text{nm} \sim 550\text{nm}$ 区间内, 1.624mJ 能量对应光谱强度大于 2.435mJ 能量对应光谱强度,这个问题需后续进一步研究。从图中可以看出, 400nm , 500nm , 600nm , 700nm 和 800nm 处有各曲线的极大值点,说明各点附近存在线状谱线。谱线整体的增强是由于照射靶材激光脉冲的能量增大,使激发等离子体的密度、温度和数量都有了较大的增加,而连续光谱和线状谱线的强度都得到了增加。

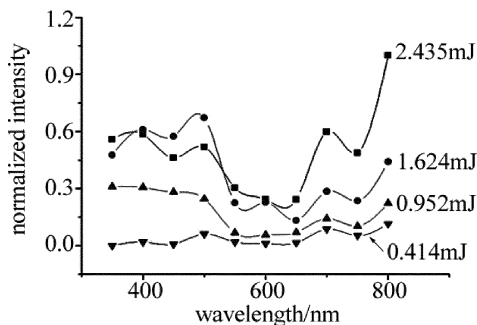


Fig. 6 Fitting curve of target LIBS

2.2 电弧光谱和导通参数的分析

开关电弧光谱拟合曲线如图 7 所示。其中,图 7a ~ 图 7c 分别是开关电压为 1000V , 3000V , 5000V 时测得的电弧光谱拟合曲线,且在每个电压下有对应 0.414mJ , 0.952mJ , 1.624mJ 和 2.435mJ 这 4 种不同激光脉冲触发能量的光谱拟合曲线;图 7d 是在激光脉冲能量相同且为 2.435mJ 、开关电压为 1000V , 3000V , 5000V 时测得的电弧光谱拟合曲线, PMT 的工作电压为 -300V 。图 7a ~ 图 7c 中,相同的开关电压、不同激光脉冲能量的电弧光谱强度和轮廓基本相同,说明脉冲激光产生的初始等离子体作为电弧中碰撞激发的种子源,其数量差异表现在最终电弧光谱上的强度差异,可以忽略不计,电弧光谱的强度主要由开关电压大小决定;拟合曲线的两端有明显的翘起,中间相对平缓。图 7d 中开关电压越大,电弧谱线的强度有明显的增大,这是因为开关内部电场强度越大,粒子的相互碰撞会越频繁,自由电子的雪崩效应随之越强,产生的等离子体也会越多。

等离子体要达到完全热平衡的条件很苛刻,但在实验条件下,可以获得局域热力学平衡体系,此时等离子体体系接近或达到局部的热力学平衡态,根据 Griem 的判据,电弧放电等离子体属于局部热平衡等离子体^[16]。于是,本文中研究的电弧等离子体状态可用 Saha 方程描述:

$$\frac{(n_{i+1})n_e}{n_i} = \frac{2g_{i+1}}{\Lambda^3 g_i} \exp\left(\frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{k_B T}\right) \quad (1)$$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{h^2}{2\pi m_e k_B T}} \quad (2)$$

式中, n_{i+1} 是 $i+1$ 价离子的数量密度, n_i 是 i 价离子的数量密度, n_e 是电子数量密度, g_{i+1} 是 $i+1$ 价离子的配分函数, g_i 是 i 价离子的配分函数, Λ 是电子的德布罗意热波长, ε_{i+1} 是 $i+1$ 价离子的电离势, ε_i 是 i 价离子的电离势, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是温度, m_e 是电子质量, h 是普朗克常数。

分析(1)式和(2)式可知,等离子体温度会对内部不同离子的比例产生影响,电压越大,电弧温度越高,

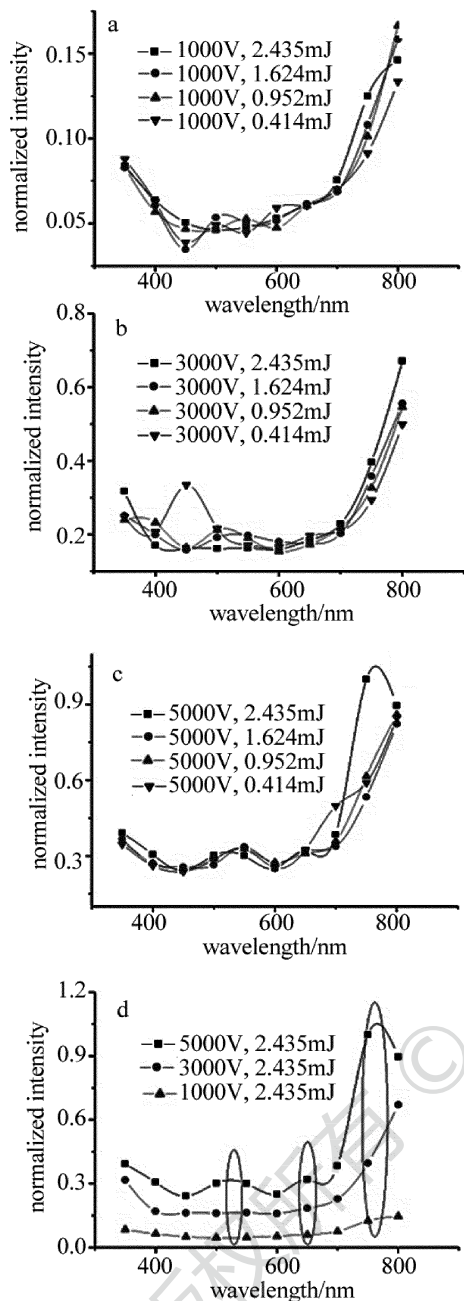


Fig. 7 Arc spectral fitting curves at different switch voltages and pulse powers

碰撞粒子能量越大,更容易产生 2 价或 3 价离子。图 7d 中 5000V 的拟合曲线在 500nm, 650nm 和 750nm 处相比 1000V 和 3000V 有更明显的凸起,附近原有的线状谱线得到极大增强,说明开关电压(或内建电场)的增大不是对所有等离子体均匀放大,而是使特定等离子体相比其它等离子体更易产生,开关电压(内建电场)大小对电弧等离子体的产生可能具有一定的筛选。这是因为开关电压的大小会影响电弧等离子体的碰撞剧烈程度,从而导致不同的电弧等离子体温度,最终影响不同等离子体的产生比例。

如图 8 所示,在不同能量激光脉冲触发下,时延抖动随电压变化没有明显的趋势,但当激光能量下降到

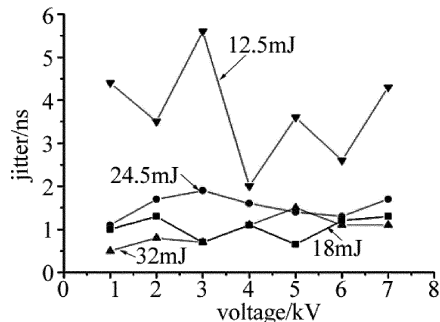


Fig. 8 Delay jitter of LTVS at different voltages and pulse laser energies

一定阈值时,时延抖动会有明显的增大,说明了触发阶段对时延抖动的重要影响。而且,电脉冲触发真空开关(electrical triggered vacuum switch,ETVS)相比 LTVS 的时延抖动大^[17],两种开关的区别主要是触发机理的不同。这证明不同的触发激光能量和触发机制(两者均作用在触发阶段)会对时延抖动产生重要影响,而开关电压对时延抖动的影响较小。这是因为不同的激光能量和触发机制会对初始等离子体的数量、密度和能量产生决定影响。激光能量较小或用电脉冲触发可能无法在特定电极表面区域产生大密度的初始等离子体(如图 6 所示),从而无法快速有效地产生后续的碰撞等离子体并导通开关,表现为较大的时延和时延抖动。电弧是开关稳定导通的证明,是在最初的电子到达阳极导通回路后表现出的现象,因此其等离子体种类和密度与触发时延关联性不大,但电弧强度越大表明内部传递的自由电荷越多,导致开关电压的下降沿越陡,提升开关性能。而如图 7 所示,电压越大导致电弧光谱强度越大,而不同触发激光能量对电弧光谱强度基本无影响,表明开关电压大小对开关导通时电压下降沿陡度这一开关性能有重要影响,而触发激光能量对电压下降沿陡度基本无影响。

2.3 靶材 LIBS 和电弧光谱的比较分析

靶材 LIBS 和 5000V 开关电压下电弧光谱的拟合曲线的趋势及轮廓比较如图 9 所示,触发激光脉冲的能量均为 2.435mJ。观察拟合曲线的对比图,发现范围两端的频率成分强度均比中间大;曲线均有多个峰值,表明有不少峰值数的线状谱线,这是因为激光照射靶材和开关电弧均产生了多种离子或等离子体,然而两条拟合曲线的趋势没有完全重合,峰值对应波长有所偏差,两者线状谱线的位置有所不同,激光照射靶材所产生的离子或等离子体不同种类激发比例与之后其作为种子源的电弧的离子或等离子体不同种类激发比例不相同,初始等离子体在强电场条件下的碰撞激发使等离子体的数量密度和成分比例发生了变化。猜测这种成分比例变化主要是等离子体激光吸收加热碰撞(高频电磁场作用)和静电场加速碰撞两种作用机

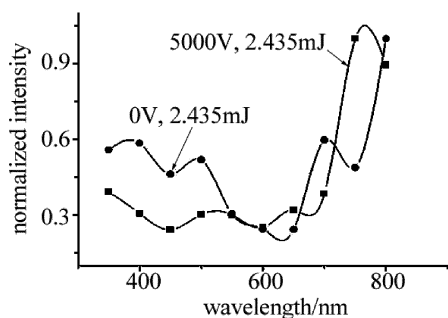


Fig. 9 Fitting curves of target LIBS and arc spectrum at switch voltage of 5000V

制的不同所导致,具体的机理还需进一步的研究。

3 结 论

脉冲激光能量的增大促进了等离子体气团的能量吸收和相互间的碰撞以及复合,提高了靶材 LIBS 的连续谱和线状谱的强度。在开关两端施加大电压促使开关导通条件下,脉冲激光能量的区别对导电电弧光谱的强度几乎没有影响,电弧光谱强度随开关电压的增大有明显的提高,而且增大电压对不同线状谱线的增强效果是不同的,即不是均匀地提高不同等离子体的密度和数量,这是由于不同的电压导致不同的电弧等离子体碰撞剧烈程度或温度,从而导致离子成分比例的变化。触发时延抖动与电压大小无明显关联,微观层面表现为与自由电子最终运动状态以及电弧离子种类无关,与触发阶段的作用机理和触发能量有关。靶材 LIBS 和电弧光谱的峰值位置有所偏差,两者的等离子体密度和成分比例有所不同,这是脉冲激光轰击靶材产生的初始等离子体在强电场作用下不断碰撞使密度提高和对等离子体种类筛选的结果,可能是由于激光吸收加热碰撞(高频电磁场作用)和静电场加速碰撞两种作用机制的不同所导致的。下一步将采用高速摄像机对等离子气团的发展和运动状态进行观测,以及采用定量分析,更加细致深入地研究等离子体的状态与触发激光脉冲和光谱的关系,更有针对性地研究触发阶段对开关导通时延抖动的影响因素。

参 考 文 献

[1] BRANNON P J, RILEY M E. A model for the operation of a laser-triggered vacuum-low-inductance switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1989, 17(6): 859-862.

[2] ZHOU Z, LIAO M, ZOU J, *et al.* Initial plasma development of field-breakdown triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(1): 360-363.

[3] WILLIAMAND P F, GUENTHER A H. Triggering of a gas filled spark gaps[J]. Plenum Press, 1990, 3(3): 145-149.

[4] EARLEY L M, SCOTT G L. Firing characteristics of a low-jitter miniature laser-triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990, 18(2): 247-249.

[5] SUGAWARA A, SATOU K, ITOU T, *et al.* Effects of electrode materials for arc-firing probability and switching time in UV-laser triggered vacuum gap[C]//Eleventh International Symposium of High Voltage Engineering 1999. New York, USA: IEEE, 1999: 383-385.

[6] WARREN T, DICKENS J, NEUBER A, *et al.* Development of improved triggered vacuum switches[C]//Pulsed Power Conference, 1999. New York, USA: IEEE, 1999: 1264-1267.

[7] XIE W Ch, JIANG W B, GAO Y Q. Spectral analysis of Ar plasma-arc under different experimental parameters[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2013, 124(5): 420-424.

[8] BILLOUX T, BORETSKI V, CRESSAULT Y, *et al.* Emission spectrum of the electric arc discharge in CO₂ between copper electrodes[C]//XXI th International Symposium Plasma Chemistry. Cairns, Australia: ISPC, 2013: 17-29.

[9] WEGLOWSKI M S. Investigation on the arc light spectrum in GTA welding[J]. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2007, 20(1/2): 519-522.

[10] DONG M. Properties of laser-induced breakdown spectroscopy between liquid steel and solid steel[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 263-268 (in Chinese).

[11] NUNES L C, da SILVA G A, TREVIZAN L C, *et al.* Simultaneous optimization by neuro-genetic approach for analysis of plant materials by laser induced breakdown spectroscopy[J]. Spectrochimica Acta, 2009, B64(6): 565-572.

[12] WANG Y, ZHAO N J, MA M J, *et al.* Chromium detection in water enriched with graphite based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 808-811 (in Chinese).

[13] ZHAO X X, LUO W F, ZHANG X W, *et al.* Measurement of brass plasma parameters based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 93-96 (in Chinese).

[14] AHMED R, BAIG M A. A comparative study of single and double pulse laser induced breakdown spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(3): 033307.

[15] WANG Q. Experimental comparison investigation on emission spectra of reheating double and single pulses laser-induced Fe plasmas[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(10): 1030002 (in Chinese).

[16] CHEN W P. Experimental research to control the temperature of arc discharge plasma used to produce NO[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011: 13-14 (in Chinese).

[17] LIAO M F, DUAN X Y, ZOU J Y. Analysis on heat conduction model of surface-flashover triggered vacuum switch[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(15): 118-122 (in Chinese).