

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.03.007

激光触发真空开关的微电流研究

黄祖成^{1,2}, 向彬³, 曹祥薇⁴, 宗云⁵, 张予³, 毛晓坡³

(1. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074; 2. 广州智光电气股份有限公司, 广州 510000;
3. 国网湖北省电力公司电力科学研究院, 武汉 430077; 4. 武汉黄鹤楼新材料科技开发有限公司, 武汉 430040;
5. 石家庄信息工程职业学院通信工程系, 石家庄 050035)

摘要:从微电流的角度分析激光触发真空开关(laser triggered vacuum switch,LTVS)的触发特性。通过设计微电流测试电路,在开关两端施加一定的电压,施加电压值不能使开关导通,这样可以更好的分析开关导通前,开关内部初始等离子体的发展情况。通过实验发现,在双脉冲激光作用下,平面型LTVS的微电流随着施加电压的增加而增加,连续两次脉冲激光照射平面型LTVS的目标材料,产生更多的初始等离子体。结果表明,双脉冲激光的触发模式,有利于降低开关导通所需的触发能量,微电流的产生是ns级,使得开关可以高速稳定的导通,从而有利于开关整体装置的小型化与实用化设计。

关键词:激光触发真空开关(LTVS); 微电流; 初始等离子体

Research on the Micro-current of the Laser Triggered Vacuum Switch

HUANG Zucheng^{1,2}, XIANG Bin³, CAO Xiangwei⁴, ZONG Yun⁵, ZHANG Yu³, MAO Xiaopo³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China; 2. Guangzhou Zhiguang Electric Co., Ltd., Guangzhou 510000 China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Hubei Electric Power Corporation, Wuhan 430077, China; 4. Huanghelou New Materials Science Technology Development Co., Ltd., Wuhan 430040 China; 5. Communication Engineering Department, Shijiazhuang Information Engineering Vocational College, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract: The triggering characteristics of LTVS (laser triggered vacuum switch,LTVS) were analyzed in the view of micro-current. A micro-current test circuit was designed, and a constant voltage, which is unable to turn on the switch, was applied on the switch to analyze the development of initial plasma within the switch before it turned on. The experiment revealed that under the effect of dual-pulse laser, the micro-current of flat-type LTVS increased with the increase in the applied voltage, and continuous twice irradiation of pulsed laser on the target material of the flat-type LTVS produced more initial plasma, so that the conduction time delay and jitter time delay of the switch reached nanosecond level. The result shows the dual-pulse laser trigger mode is beneficial to reduction of the triggering energy required for conduction of the switch, and the mode also contributes to the miniaturization of the overall switch device and its practical design.

Key words: laser triggered vacuum switch(LTVS); micro-current; primary plasma

0 引言

激光触发真空开关(laser triggered vacuum switch,

LTVS)是一种先进的脉冲功率控制装置,具有绝缘恢复速度快、脉冲上升沿陡和耐受高压强流的特点^[1-10]。真空触发开关由于采用电气触发方式,使得开关存在导通时延长、抖动时延长和误触发的缺点^[11-15],把

收稿日期:2016-11-21; 修回日期:2017-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51377071),中央高校基本科研业务费资助项目(HUST:2010JC018)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51377071),the Fundamental Research Funds for the Central Universities Program(HUST:2010JC018).

激光应用于触发真空开关的导通,可以有效解决上述的问题。但开关在激光的作用下,初始等离子体如何发展和初始电流增值的情况,需要进一步的研究,以降低激光触发装置的体积。文中在开关未导通的情况下,从而减小开关电极的烧蚀情况,以及消除主放电对初始等离子体特性的影响,从微电流的角度,分析了平面型 LTVS 微电流的发展情况,获得初始等离子体和初始电流增值发展趋势的特点。选用双脉冲激光器作为触发设备,在第一个脉冲激光的作用下,目标材料表面产生电子、金属离子、金属蒸汽和微粒;当第 2 个激光波形到达时,进一步电离金属蒸汽和微粒,产生更多的初始等离子体^[16-18]。双脉冲激光的触发模式,有利于降低开关导通所需的触发能量,从而有利于开关整体装置的小型化与实用化设计。

1 实验装置

对初始等离子体微电流的检测,是通过大功率无感电阻将其转化为电压进行测量的,实验中采用 $0.1 \mu\text{F}$ 的电容 C ,电容两端施加电压值较小(开关未导通放电),目标材料发射初始等离子体电路结构图见图 1。图 1 中电源、调压箱与变压器、保护电阻 R_1 、硅堆 D 和电容 C 构成充电电路,电容 C 、LTVS 和测量电阻 R_2 构成放电电路。测量电阻 R_2 是氧化膜电阻,型号为 RY-50W-100R,尺寸为 $27 \text{ mm} \times 185 \text{ mm}$,阻值为 100Ω ,阻值精度 $\pm 1\%$,功率为 50 W ,最高冲击电压为 5 kV ,该电阻功率密度大、过负荷性能好、无感性好、抗潮、性能稳定,可以满足高电压、大功率、高阻、无感等使用要求。Agilent 示波器探头型号为 N2890A,探头为比值 10:1,带宽为 500 MHz ,电阻为 $10 \text{ M}\Omega$,电容为 11 pF 。电容 C 为脉冲电容器,型号为 MMJ100-0.1,标称容量 $0.1 \mu\text{F}$,容量偏差 $\pm 5\%$,额定电压 100 kV 。通过给电容施加一定的电压值(小于 70 V),测量当激光触发目标材料时,流经电阻 R_2 两端的电压值。实验基本光路框图见图 2。采用 Nd:YAG 电光调 Q 激光器,波长为 1064 nm ,激光能量是 6.19 mJ 。开关的结构见图 3,采用平面型 LTVS^[19-22]。

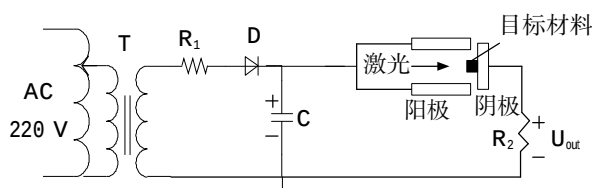


图 1 微电流测试电路图

Fig. 1 Drawing of the micro-current test circuit

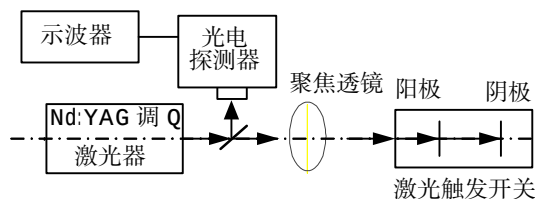


图 2 实验基本光路框图

Fig. 2 Drawing of the experimental basic light path

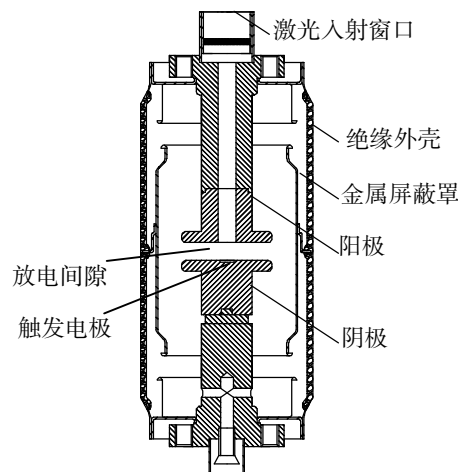


图 3 平面型 LTVS 结构示意图

Fig. 3 Drawing of the flat-type LTVS

2 实验及其结果分析

实验中激光波形是双脉冲见图 4。当第 1 个激光波形接触目标材料时,局部高温使得目标材料蒸发,产生电子、金属离子、金属蒸汽和微粒;当第 2 个激光波形到达时,进一步电离金属蒸汽和微粒,产生更多的初始等离子体。在连续两个激光脉冲的作用下,该激光器有利于开关的导通,降低开关导通所需的激光能量,使得开关导通更加稳定可靠,对于激光器的小型化和 LTVS 的实用化提供了基础。

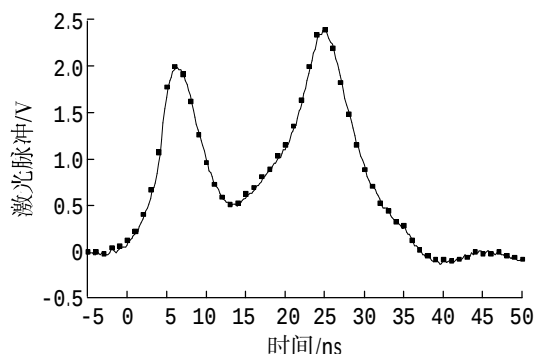


图 4 双脉冲激光波形

Fig. 4 Double pulse laser waveform

2.1 平面型 LTVS 微电流分析

双脉冲激光照射平面型 LTVS 的波形见图 5。图 5 中:CH₁ 是激光脉冲波形;CH₂ 是电阻 R_2 两端的电压波形;CH₄ 是开关两端的电压波形。从图 5 中

可以看出,开关两端的电压为 20 V,当激光照射到目标材料时,开关两端的电压急剧下降,电阻 R_2 两端的电压快速上升;之后,开关两端电压基本恢复为原值,略有减小。电阻 R_2 两端的电压最大值为 21 V,即微电流最大值为 0.21 A。图 5 中微电流上升到最大值后,开始逐渐下降,从峰值经历大约 1 μ s 后,微电流又开始上升,说明此时开关内部的等离子体数量有所增加。整个微电流持续时间约 6 μ s,由于开关没有导通,最后开关两端的电压下降为 17.5 V。从局部放大图分析,第 1 个脉冲激光接触目标材料时,电阻 R_2 两端就有微电流产生(ns 级),开关内部快速产生初始等离子体,初始等离子体数量不断发生变化,第 1 个脉冲过后,初始等离子体数量变化趋势是减少,当第 2 个脉冲到来后,初始等离子体数量又快速增加,总体趋势是增加。从开始产生初始等离子体到微电流达到峰值,经历的时间约为 180 ns。

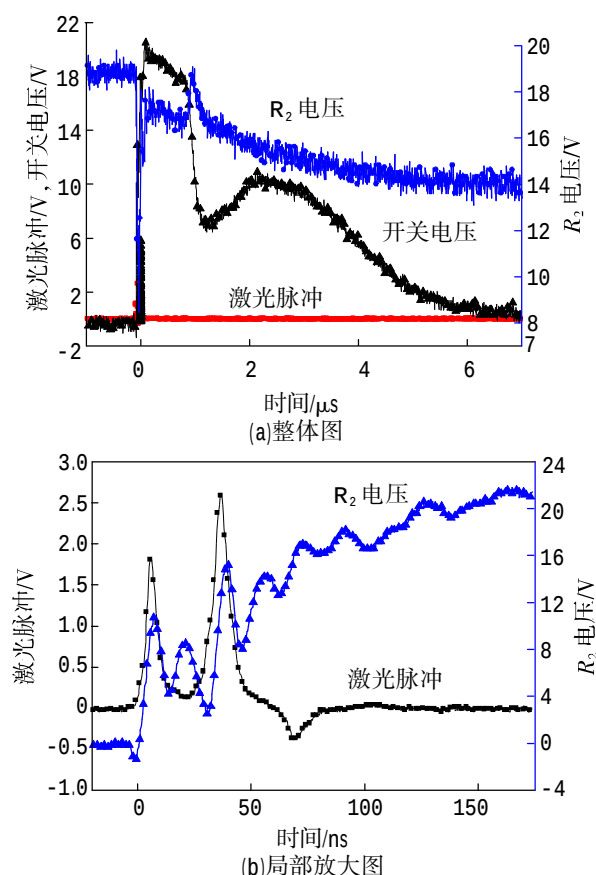


图 5 平面型 LTVS 微电流测试波形

Fig. 5 Parallel disc type LTVS micro-current test waveform

2.2 平面型 LTVS 的微电流大小

平面型 LTVS 的微电流大小见表 1。从表 1 中可以看出,微电流大小基本是开关两端施加的电压除以电阻 R_2 (100 Ω)。随着施加电压的增大,微电流峰值逐渐增大,达到峰值的时间基本稳定不变,说明采

表 1 平面型 LTVS 的微电流大小

Table 1 Micro-current value of the parallel

disc type LTVS

开关两端电压/V	电阻 R_2 两端微电流/A
10	0.11
20	0.21
30	0.31
40	0.42
50	0.51
60	0.62
70	0.72

用双脉冲激光触发真空开关的方式,性能稳定,抖动时间短。

3 结论

文中通过设计微电流测试电路,在双脉冲激光作用下,得到以下结论:

1)微电流的产生是 ns 级,电流的上升沿比较陡有利于开关的快速导通放电,开关导通时延和抖动时延都是 ns 级。

2)第 1 个脉冲激光接触目标材料时,开关内部快速产生初始等离子体,初始等离子体数量不断发生变化,第 1 个脉冲过后,初始等离子体数量变化趋势是减少,当第 2 个脉冲到来后,初始等离子体数量又快速增加,总体趋势是增加。

3)平面型 LTVS 的微电流随着开关两端施加电压的增加而增加,并且微电流的增加几乎呈线性增加。

4)双脉冲激光器降低了 LTVS 导通所需激光能量,有利于开关整体装置的小型化和实用化设计。

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): 859-862.
- [2] 何正浩, 魏良才, 毛晓坡, 等. 激光触发真空开关配置特性的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 215-219.
HE Zhenghao, WEI Liangcai, MAO Xiaopo, et al. Research on the polarity configuration of laser triggered vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 215-219.
- [3] BRANNON P J, COWGILL D F. Low jitter laser-triggered vacuum switch using a composite target[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1988, 16(2): 325-327.
- [4] MAO Xiaopo, HE Zhenghao, YING Wang, et al. Research on the interaction of primary plasma and main electrode for laser triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(11): 3592-3597.

- [5] MAO Xiaopo, HE Zhenghao, XU Xinya, et al. Research on the time delay characteristics of the laser triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2005-2010.
- [6] EARLEY L M, BARNES G A. Low-jitter, high-voltage, infrared, laser-triggered, vacuum switch[C]//Pulse Power Conference, Digest of Technical Papers, Eighth IEEE International, Digital Object Identifier.[S.l.]:IEEE, 1991:900-903.
- [7] 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.
- [8] 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 on High Voltage Engineering.[S.l.]: IET, 1999:383-385.
- [9] MAKAREVICH A. A vacuum spark gap with laser firing [J]. Instruments and Experimental Techniques, 1973, 16(1/6): 1716-1717.
- [10] FUKUSHI I, WATANABE M, HOTTA E, et al. Characteristics of laser triggered vacuum switch[J]. Discharges and Electrical Insulation in Vacuum Proceedings, 2000(2): 511-514.
- [11] 王 珏, 邵建设, 严 萍, 等. 激光触发真空沿面闪络开关的初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(6): 1027-1030.
WANG Jue, SHAO Jianshe, YAN Ping, et al. Experimental study on laser triggered surface flashover switch in vacuum[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(6): 1027-1030.
- [12] 杨兰索, 李 敏, 王晓琴, 等. 真空开关触头结构形式对磁感应强度和电磁力的影响[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 193-198.
YANG Lansuo, LI Min, WANG Xiaoqin, et al. Effects of vacuum switchgear contact structure on magnetic flux density and electromagnetic force[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 193-198.
- [13] 谢昌明, 尚绍环, 谈效华, 等. 高性能触发真空开关的研究综述[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 131-138.
XIE Changming, SHANG Shaohuan, TAN Xiaohua, et al. Review of the researches on high-performance triggered vacuum switch[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 131-138.
- [14] 吴国林, 徐国顺, 张 勇, 等. 脉冲大电流下的 CuCr 触头温度场计算[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 68-73.
WU Guolin, XU Guoshun, ZHANG Yong, et al. Temperature field computation of CuCr contact under large impulse current[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 68-73.
- [15] BULGIN V. Laser-triggered vacuum switch[J]. Soviet Physics Technical, 1975, 20(4): 561-563.
- [16] FELLERSellers R. A laser triggered vacuum gap for high energy applications[C]//IEEE Procedures Southeastcon'80. Tenn., USA: [s.n.], 1980:315-318.
- [17] WATANABE M, MAEHARA J, FUKUSHI I, et al. Behavior of ablated plasma in laser-triggered vacuum switch[J]. Pulsed Power Plasma Science, 2001(2): 1425-1428.
- [18] 廖敏夫, 李文浩, 蒋西平, 等. 激光触发多级气体真空混合开关[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 91-95.
LIAO Minfu, LI Wenhao, JIANG Xiping, et al. Laser triggered multistage gas-vacuum mixed switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 91-95.
- [19] ZHOU Zhengyang, DUAN Xiongying, LIAO Minfu, et al. Operational characteristics of a field-breakdown triggered vacuum switch[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1): 564-567.
- [20] HUTSEL B T, BENWELL A, KOVALESKI S D, et al. Runtime and jitter on a laser-triggered spark-gap switch[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 2541-2545.
- [21] 毛晓坡, 何正浩, 王 英, 等. 多棒型激光触发真空开关时延特性的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(5): 106-110.
MAO Xiaopo, HE Zhenghao, WANG Ying, et al. Research on the time delay characteristics of the six-gap rod electrode laser triggered vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(5): 106-110.
- [22] 毛晓坡, 何正浩, 王 英, 等. 平面圆盘型激光触发真空开关触发机制研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(9): 87-90.
MAO Xiaopo, HE Zhenghao, WANG Ying, et al. Research on the trigger mechanism of parallel disc type laser triggered vacuum switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(9): 87-90.

黄祖成(1973—), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术、脉冲功率技术。

毛晓坡(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为高电压绝缘与放电、脉冲功率技术。