



·脉冲功率技术·

# 基于光导开关的激光二极管触发三电极气体开关研究\*

付佳斌<sup>1,2</sup>, 王凌云<sup>1</sup>, 何 决<sup>1</sup>, 冯传均<sup>1</sup>, 谢卫平<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 流体物理研究所 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中国工程物理研究院 研究生院, 北京 10088)

**摘 要:** 为实现激光二极管对气体开关的触发, 采用从主回路开关两侧取电的基于光导开关一体化激光二极管触发气体开关结构, 并对基于光导开关一体化激光二极管触发三电极气体开关进行了初步实验, 实现了激光二极管输出能量 83  $\mu\text{J}$  条件下 40 kV/8 kA 三电极气体开关的可靠触发, 证明了技术可行性。但实验中的实测光导开关的工作寿命仅约数百次。

**关键词:** 气体开关; 激光二极管触发; 光导开关; 工作寿命

中图分类号: TM89

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210536

## LD triggered three-electrode gas switch based on photoconductive semiconductor

Fu Jiabin<sup>1,2</sup>, Wang Lingyun<sup>1</sup>, He Yang<sup>1</sup>, Feng Chuanjun<sup>1</sup>, Xie Weiping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Pulse Power, Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China;

2. Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

**Abstract:** To trigger the gas switch with one fiber, a kind of LD (laser diode) triggered three-electrode gas switch based on photoconductive semiconductor without trigger charge source is presented in this paper. The principle of this switch is that a GaAs PCSS, which is triggered by LD, is used to control the trigger pulse generation of the trigger capacitor discharge circuit (CDC). The capacitor in CDC is charged with the energy of the main circuit directly. As a result, this switch can work without trigger charge power source, which means this switch can be made more compact compared with traditional electrical trigger switch. A prototype designed for three-electrode gas switch working under 40 kV/8 kA and PCSS triggered with 83  $\mu\text{J}$  laser energy is described in this paper in detail. The experimental result proves the feasibility of the switch. The experimental result also shows the life of the photoconductive semiconductor is just several hundred shots. The life of the photoconductive semiconductor will be improved in next phase of our research.

**Key words:** gas switch, LD trigger, photoconductive semiconductor, work life

高功率开关在脉冲功率系统中具有重要地位, 它决定了脉冲功率装置的输出特性, 是保证脉冲功率系统可靠、有效运行的重要部件<sup>[1-2]</sup>。现在常用的高功率外触发气体开关需要高压触发脉冲电源或者激光器, 带来额外的体积、质量和成本要求。由于光导开关具有闭合时间快、抖动时间小、体积及质量小、控制时间精度高和光电隔离等诸多优势, 尤其是工作于非线性模式的光导开关, 其所需触发光能量仅需  $\mu\text{J}$  甚至亚  $\mu\text{J}$  量级<sup>[3-6]</sup>, 故有望采用激光二极管通过光纤或者利用激光器经过光纤分光触发非线性光导开关, 进而触发气体开关放电, 从而实现气体开关及触发系统的小型化<sup>[7]</sup>。

美国圣地亚国家实验室的 F. J. Zutavern 团队<sup>[8-9]</sup> 以及国内 Wang Langning<sup>[10]</sup>、Wang Zhiguo<sup>[11]</sup> 等人采用激光二极管通过光纤触发非线性光导开关, 进而触发气体开关特性进行了研究, 实现了数十千伏到百千伏的三电极和场畸变开关触发控制。不过大部分实验中光导开关是作为触发电源的放电开关, 所以仍需要对触发电容充电的高压直流

\* 收稿日期: 2021-11-29; 修订日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52007176); 国防技术基础科研项目 (JSJL2018212A001)

联系方式: 付佳斌, fujiabin23@163.com。

通信作者: 谢卫平, wpxie88@126.com。

电源。本文提出了从主回路开关两侧取电的基于光导开关一体化激光二极管触发气体开关,其触发储能电容通过分压从主电路取电,所以不需对触发电容充电的高压电源,仅需一个激光二极管就可以实现对光导开关的控制,进而控制触发极电压以实现高功率气体开关的导通。该技术路线通过选择合适的工作条件使光导开关工作于非线性模式,故可以采用小型的高功率激光二极管替代庞大且维护较为复杂的激光器作为触发光源,其潜在优势为触发系统的体积可以大大缩小、触发控制与高电压实现光电隔离、有利于气体开关和触发系统的一体化、便于实现大规模甚至超大规模的气体开关的同步触发。

## 1 拓扑结构及数值仿真

对基于RC取电结构的激光二极管触发气体开关实用电路建立仿真电路图,如图1所示,其中 $C$ 为主回路储能电容, $R$ 为主回路电阻, $L$ 为主回路电感,红色方框内是三电极模型(仅考虑触发极与地电极放电,未考虑主间隙导通), $C_H$ 为触发极与高压电极的结构电容, $C_L$ 为触发极与地电极的结构电容,蓝色方框内是触发电路模型,其中高压臂电阻 $R_H$ 、低压臂电阻 $R_L$ 和触发电容 $C_t$ 形成阻容分压电路,通过选择合适的电阻电容参数使得当主回路电容 $C$ 充电到额定电压时,触发电容 $C_t$ 也充电到光导开关PCSS的工作电压,此时激光二极管通过光纤照射光导开关使之导通,触发储能电容高压端接地,在气体开关触发极产生负极性的触发脉冲。这种触发管型气体开关触发结构的优点是触发极先对地电极放电,光导开关被短路,这样即使开关主间隙导通,触发电路的光导开关也不会耐受高压。

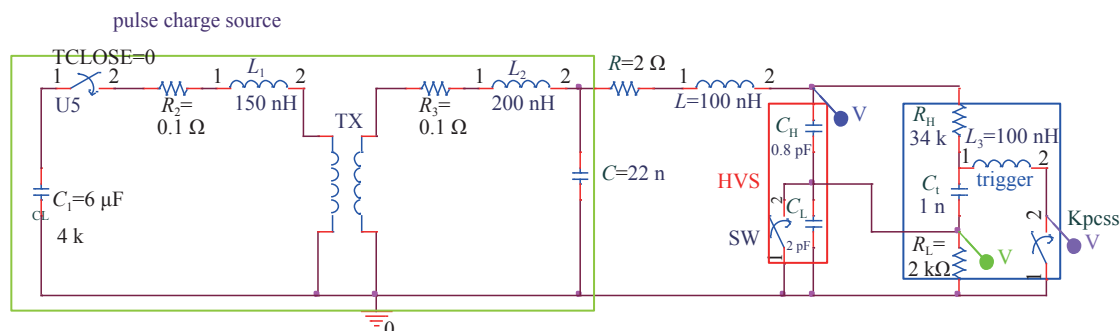


Fig. 1 Simulation circuit of LD triggered three-electrode gas switch

图1 激光二极管触发三电极气体开关的仿真模型图

仿真电路中主要元件参数设置为:高压臂电阻 $R_H=34\text{ k}\Omega$ ,低压臂电阻 $R_L=2\text{ k}\Omega$ ,触发电容 $C_t$ 容量为 $1\text{ nF}$ ,光导开关暗态电阻设为 $10\text{ M}\Omega$ ,导通电阻设为 $20\text{ }\Omega$ ,闭合时刻设置为 $t=34\text{ }\mu\text{s}$ 。三电极触发极与地电极之间并联一个开关以模拟触发极对地放电,其断路电阻设为 $100\text{ M}\Omega$ ,闭合时刻设置为 $t=34.03\text{ }\mu\text{s}$ 。其仿真计算结果如图2所示,其中图2(a)中蓝色曲线为主回路储能电容的电压,紫色曲线为触发电容的电压,绿色为气体开关触发极上的电压,由于开关触发时刻很短,故单独放大开关触发时刻波形。图2(b)中红色曲线为光导开关电流,由于其幅值相对较小,故单独作图画出,主脉冲前有一段小的振荡,用局部放大图进行了标识,此振荡源于光导开关导通电流,主电流脉冲源于触发电极与地电极击穿后触发储能电容回路放电。

## 2 实验装置

触发管三电极开关三维结构如图3所示,开关尺寸为 $\Phi 90\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ ,开关主间隙为 $7.1\text{ mm}$ ,触发极与地电极平齐(图中为了显示清晰,其中外壳设置为透明,触发极较地电极略有突出),绝缘气体为 $0.15\text{ MPa}$ 氮气。触发电极形状设计为圆盘状。

实验中采用的光导开关为体结构非掺杂VGF工艺的半绝缘砷化镓开关,尺寸为电极间隙 $6\text{ mm}$ ,宽度 $6\text{ mm}$ ,厚度 $3\text{ mm}$ ,电极位于开关两侧,开关电阻率大于 $1\times 10^7\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ,采用高阻仪测得光导开关在 $5\text{ kV}$ 直流电压下暗态电阻约 $80\text{ M}\Omega$ 。为了提高光导开关沿面耐电压强度,实验中光导开关置于变压器油中。采用波长 $905\text{ nm}$ 的激光二极管作为触发光源,通过光纤传输并触发光导开关。实验所用激光二极管如图4(a)所示,其输出光能量为 $83\text{ }\mu\text{J}$ ,光脉宽为 $90\text{ ns}$ ,波形如图4(b)所示。

实验回路及测试位置如图5所示,主回路电容为 $22\text{ nF}$ ,高压臂电阻为 $34\text{ k}\Omega$ ,触发储能电容为 $1\text{ nF}$ ,低压臂电阻为 $2\text{ k}\Omega$ ,约 $32\text{ }\mu\text{s}$ 充到额定电压时,同步延时机输出控制脉冲使得激光二极管通过耦合能量输出激光触发光导开关,光导开关导通后在触发极产生负极性的触发脉冲。

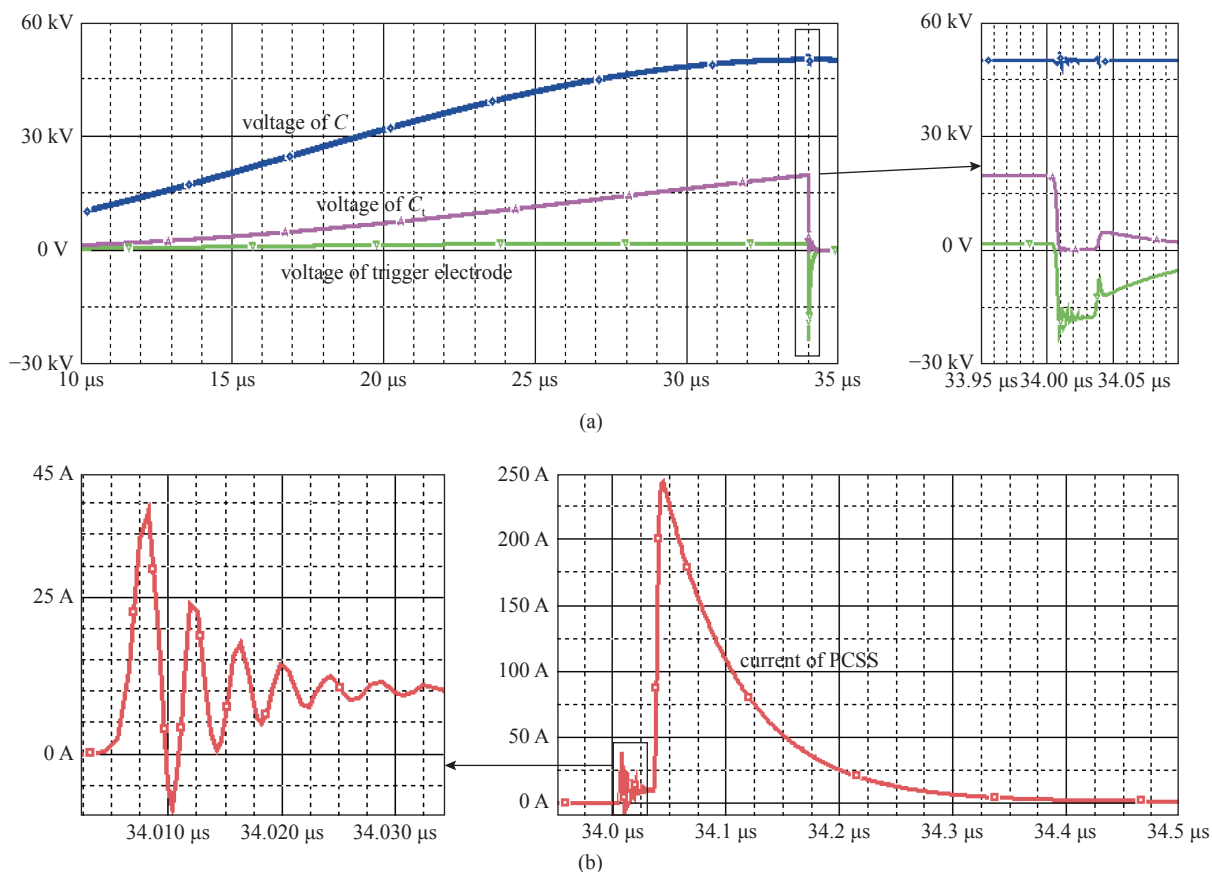


Fig. 2 Simulation results of LD triggered three-electrode gas switch

图2 激光二极管触发三电极气体开关的仿真结果

### 3 实验结果

典型的触发极电压波形和对应情况的光导开关电流波形如图6所示,其中图6(a)表示触发极和地电极间隙未击穿情况,这种情况下光导开关电流约数十A,脉宽小于10ns,触发电压上升沿约8ns,图6(b)表示触发极和地电极间隙击穿情况,光导开关与前述数值模拟结果类似,存在两个脉冲,第一个是光导开关导通电流,后一个是触发电极与地电极击穿后触发储能电容回路放电脉冲,后一个电流脉冲幅值约200A,脉宽约60ns。如果触发电极与地电极击穿发生在触发脉冲上升沿过程,则两个脉冲会叠加在一起。

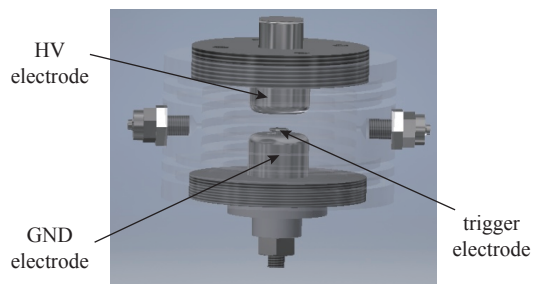
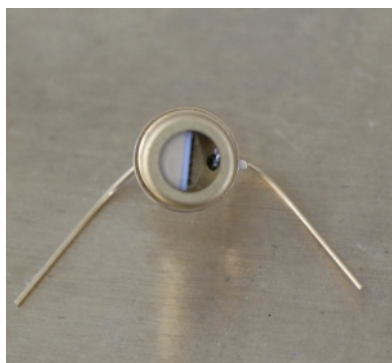
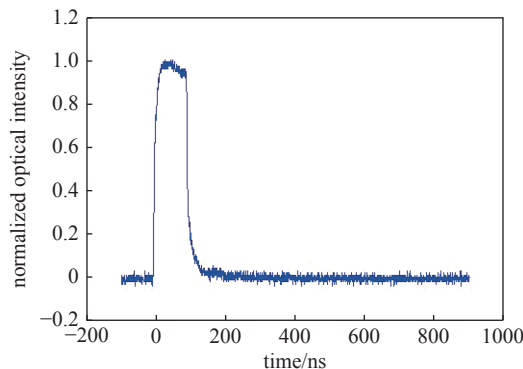


Fig. 3 Structure of three-electrode gas switch

图3 三电极气体开关结构图



(a)



(b)

Fig. 4 Photo and output waveform of LD

图4 激光二极管照片和输出光波形图

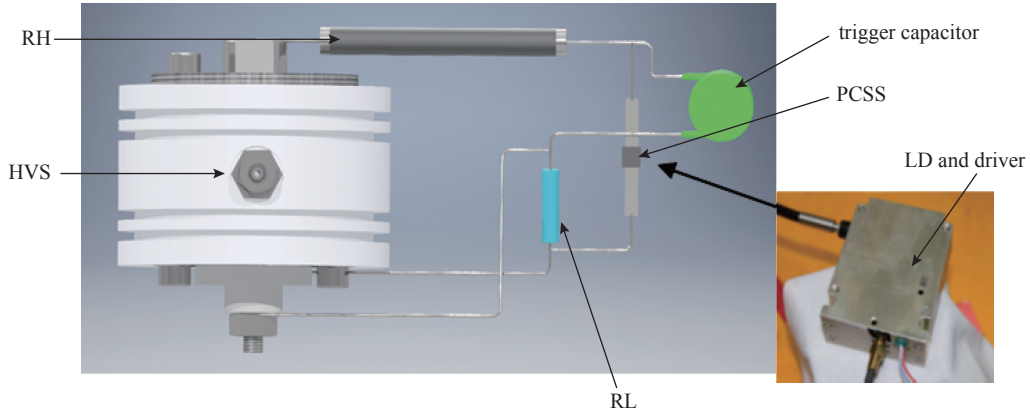


Fig. 5 Schematic of LD triggered three-electrode gas switch

图 5 激光二极管触发三电极气体开关的结构图

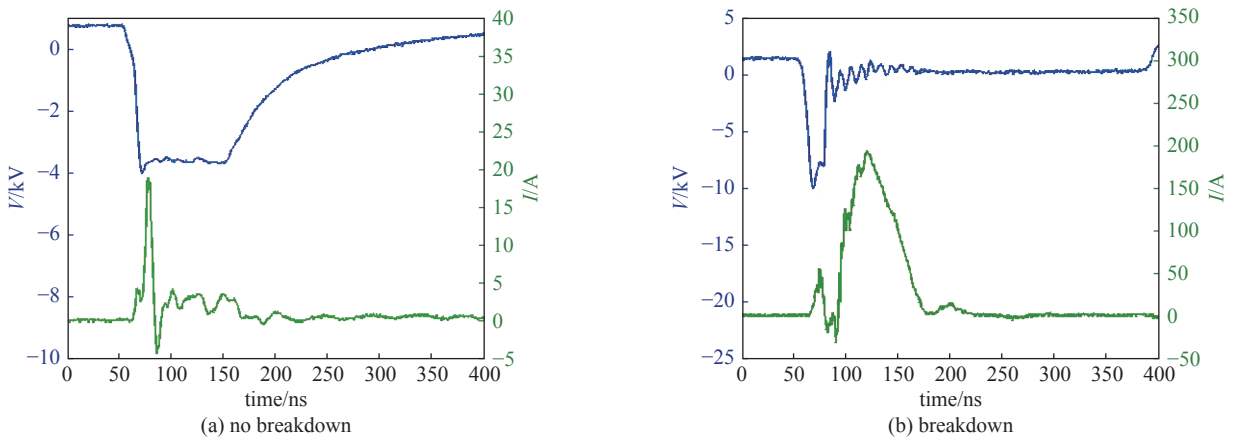


Fig. 6 Waveforms of trigger electrode voltage and PCSS current of LD triggered gas switch

图 6 激光二极管触发三电极气体开关触发极电压和光导开关电流波形

激光二极管触发三电极气体开关实验的典型波形如图 7 所示, 其中图 7(a) 中  $V_{\text{trig}}$  为触发极电压,  $V_c$  为电容电压, 图 7(b) 中  $I_{\text{pcss}}$  为光导开关电流,  $I_{\text{sw}}$  为气体开关放电回路电流, 四个波形均为同一发次的实验数据。可见主回路充电电压 40 kV, 主回路电流 8.2 kA, 触发脉冲电压 14.5 kV, 光导开关放电电流 274 A, 脉宽 54 ns, 触发脉冲到主开关导通放电电流的延时约为 110 ns。

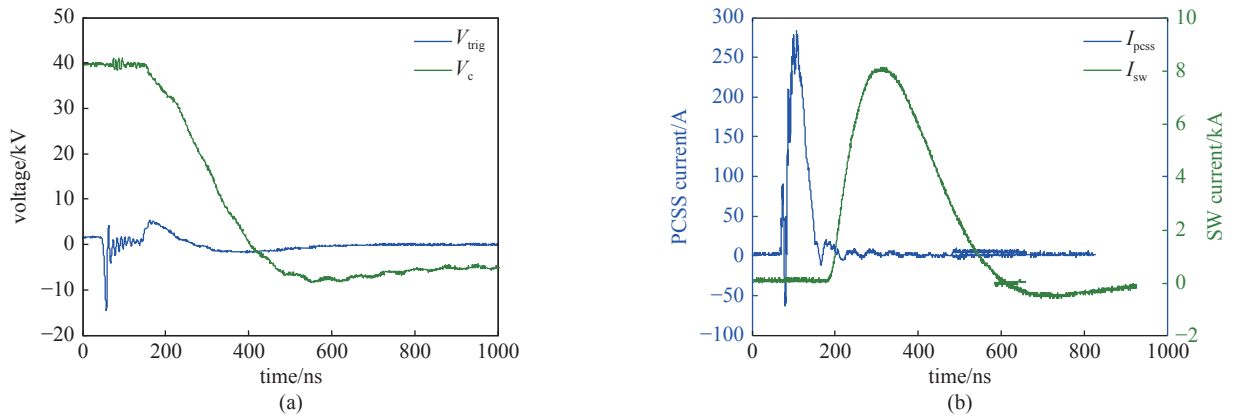


Fig. 7 Typical waveforms of LD triggered three-electrode gas switch tests

图 7 激光二极管触发三电极气体开关实验的典型波形

0.2 Hz 重频进行 50 发实验波形如图 8 所示, 图中波形时间零时刻对应激光二极管驱动的控制信号上升沿 2 V 处, 由实验可得, 按照波形上升沿幅值 50% 处读取波形的时延数据, 可得相对激光二极管驱动的控制信号光导开关对应的电流上升沿平均延时为 75 ns, 抖动标准差为 3.1 ns, 开关电流平均延时为 314 ns, 抖动标准差为 28.5 ns。



通过改变激光二极管驱动的控制信号脉冲宽度可以改变激光二极管输出能量和脉宽,每个状态在 0.2 Hz 重频 50 发,实验中主回路充电电压均为 40 kV,结果如表 1 所示,可见,激光能量和脉宽降低到一定程度后对触发可靠性和延时有影响。

此外,实验中还发现激光二极管触发三电极气体开关中使用的光导开关存在寿命问题。对 3 个光导开关样品(分别为 1#, 2#, 3#)的激光二极管触发三电极气体开关进行了寿命测试,3 个样品寿命测试后的光导开关图片(经光学显微镜放大)如图 9 所示。实测寿命 1#, 2#, 3#光导开关寿命分别为 157 次, 233 次和 192 次。

#### 4 结论

本文设计的从主回路开关两侧取电的基于光导开关的一体化激光二极管触发三电极气体开关,不需要触发电容的充电电源,仅需高功率激光二极管通过光纤即可实现对气体开关的控制,实测触发光能仅 83  $\mu\text{J}$  条件下,实现了 40 kV/8 kA 三电极气体开关的可靠触发。电参数测试显示光导开关导通前耐压 15 kV,放电电流约 200A,脉宽约 60 ns,光导开关的工作寿命约数百次,下一步需进一步提高光导开关放电寿命。

表 1 不同触发光脉宽和能量的实验结果

Table 1 Results of different laser width and energy experiments

$V_c/\text{kV}$	laser width/ns	laser energy/ $\mu\text{J}$	misfire	delay/ns	jitter/ns
40	90	83	0	312	28.5
40	45	41	1	314	29.1
40	22	19	9	361	93.0

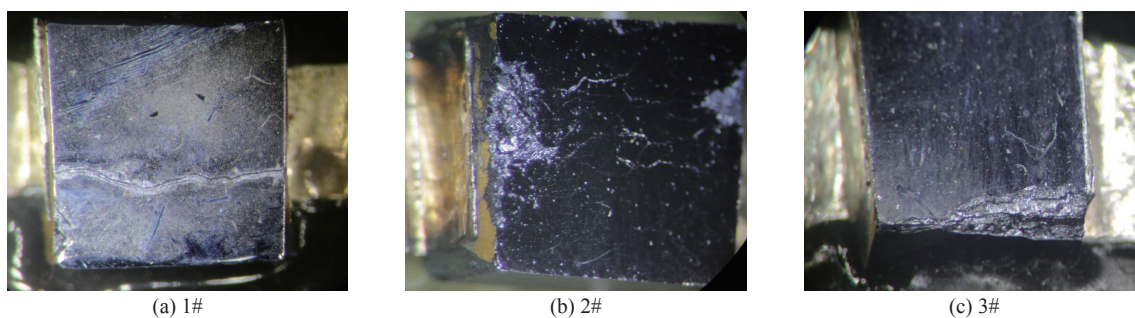


Fig. 9 Photos of PCSS after life tests

图 9 寿命测试后的光导开关图片

根据光导开关导通过程及寿命测试后的损坏情况分析,为了能使 15 kV/200 A 量级光导开关能够采用触发能量仅数十  $\mu\text{J}$  的激光二极管进行触发,光导开关需要工作在线性模式,而工作于非线性模式的光导开关导通过程中会在内部形成高电流密度的电流丝,电流丝局部高温对光导开关造成烧蚀,所以光导开关寿命有限。

目前考虑下一步工作中可以从 3 个方向开展工作以提高光导开关寿命:一是降低光导开关的电流,由于触发管型气体开关的触发性能与触发脉冲电流息息相关,故考虑触发场畸变开关构型的气体开关并对光导开关增加限流电阻;二是增加触发光能量,例如采用多个激光二极管并联照射触发光导开关;三是调控光导开关内部通道过程,例如在光导开关电流垂直方向施加偏置磁场,使得电流丝偏转,以提高同等条件下的光导开关寿命。

#### 参考文献:

- [1] Bluhm H. 脉冲功率系统的原理与应用[M]. 江伟华,张弛,译.北京:清华大学出版社,2008. (Bluhm H. Pulsed power systems: principles and applications[M]. Jiang Weihua, Zhang Chi, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2008)
- [2] 曾正中. 实用脉冲功率技术引论[M]. 西安:陕西科学技术出版社,2003. (Zeng Zhengzhong. Introduction to practical pulsed power technology[M]. Xi'an:

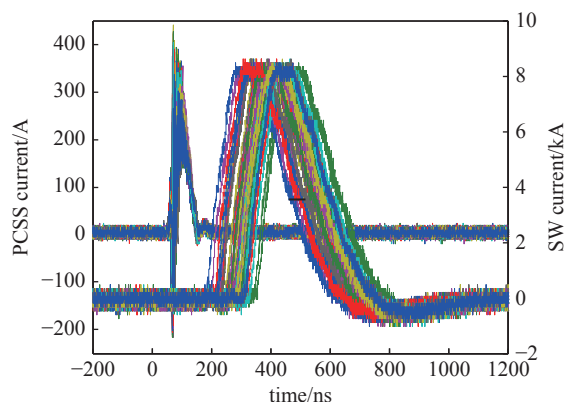


Fig. 8 Repetition frequency experiment waveform of LD triggered gas switch

图 8 激光二极管触发三电极气体开关实验的重频实验波形

Shaanxi Science and Technology Press, 2003)

- [3] Xu Ming, Liu Xiaofei, Li Mengxia, et al. Transient characteristics of interdigitated GaAs photoconductive semiconductor switch at 1-kHz excitation[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2019, 40(7): 1136-1138.
- [4] Majda-Zdancewicz E, Suproniuk M, Pawlowski M, et al. Current state of photoconductive semiconductor switch engineering[J]. *Opto-Electronics Review*, 2018, 26(2): 92-102.
- [5] Luan Chongbiao, Feng Yuanwei, Huang Yupeng, et al. Research on a novel high-power semi-insulating GaAs photoconductive semiconductor switch[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(5): 839-841.
- [6] 吴朝阳, 陈志刚, 薛长江, 等. 激光二极管触发光导开关实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(3): 635-638. (Wu Zhaoyang, Chen Zhigang, Xue Changjiang, et al. Experimental research on GaAs photoconductive semiconductor switches triggered by laser diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 635-638)
- [7] Zutavern F J, Loubriel G M, Hjalmarson H P, et al. Properties of high gain GaAs switches for pulsed power applications[C]//11th IEEE International Pulsed Power Conference. 1997: 959-964.
- [8] Glover S F, Zutavern F J, Swalby M E, et al. Pulsed- and DC-charged PCSS-based trigger generators[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2010, 38(10): 2701-2707.
- [9] Zutavern F J, Glover S F, Reed K W, et al. Fiber-optically controlled pulsed power switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2533-2540.
- [10] Wang Langning, Jia Yongsheng, Liu Jinliang. Photoconductive semiconductor switch-based triggering with 1 ns jitter for trigatron[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, 3(5): 256-260.
- [11] Wang Zhiguo, Sun Fengju, Qiu Aici, et al. A 80 kV gas switch triggered by a 17  $\mu$ J fiber-optic laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91: 056104.