

# 用于 HF 激光器的气体火花开关特性研究

唐影<sup>1,2</sup>, 易爱平<sup>1</sup>, 朱峰<sup>1</sup>, 黄珂<sup>1</sup>, 于力<sup>1</sup>, 钱航<sup>1</sup>, 傅汝廉<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024; 2. 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 气体火花开关是放电激励脉冲 HF 激光器的关键部件之一, 其性能直接影响激光器的正常运转。本文介绍了气体火花开关的设计, 并对其静态自击穿特性和动态触发特性进行了实验研究。实验结果表明: 在开关工作气压为 0.1 ~ 0.4 MPa 情况下, 静态自击穿电压约 10 ~ 30 kV, 且稳定性较好; 在触发电压前沿约 20 ns, 幅值约 45 kV 的情况下, 欠压比大于 80% 时, 开关时延小于 120 ns, 开关抖动小于 6 ns; 开关具有较大的工作范围, 约为 55% ~ 60%。开关用于放电激励脉冲 HF 激光器, 实现了激光器稳定运行。

**关键词:** 气体火花开关; 自击穿; 触发; 开关时延; 开关抖动

**中图分类号:** TN243; TM836

**文献标识码:** A

## Study on characteristics of spark gap switch for HF laser

TANG Ying<sup>1,2</sup>, YI Ai-ping<sup>1</sup>, ZHU Feng<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>1</sup>, YU Li<sup>1</sup>

QIAN Hang<sup>1</sup>, FU Ru-lian<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Xi'an 710024, China;

2. Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Spark gap switch is a key element of discharge initiated pulsed HF laser, which contributes much to the laser's stable operation. The design of the spark gap switch is introduced in the paper, and the static self-breakdown characteristics and the dynamic triggering characteristics of the spark gap switch have been studied experimentally. It shows good stability with static self-breakdown voltage within 10 ~ 30 kV at a pressure of 0.1 ~ 0.4 MPa. A delay time shorter than 120 ns and a jitter time lower than 6 ns have been obtained as the trigger voltage rise-time is 20 ns and the voltage is 45 kV. The developed spark gap switch has a wide working range of approximately 55% ~ 60%. Using the developed spark gap switch, steady operating of HF laser has been realized.

**Key words:** spark gap switch; self-breakdown; trigger; delay time; jitter time

## 1 引言

气体火花开关具有工作电压高, 通流能力强, 可实现高重复频率运行等优点, 是脉冲功率装置中的关键部件, 被广泛应用于高能 X 射线、强流粒子加速器、高功率微波和高功率激光等研究领域<sup>[1-2]</sup>。在放电激励脉冲 HF 激光研究中, 气体介质均匀体放电是实现激光器高效能输出的前提<sup>[3]</sup>, 这就要求加载于激光间隙主电极上的脉冲电压前沿快、幅值高。此时, 除放电回路的紧凑设计外, 减小气体火花开关的电感非常重要。此外, 激光器的重复频率<sup>[4-5]</sup>稳定运行还要求开关的时延及抖动小, 工作范围大。因而, 小电感、低抖动, 大工作范围的气体

火花开关研制是放电激励脉冲 HF 激光研究的关键。

本文主要介绍用于放电激励脉冲 HF 激光器的气体火花开关设计, 重点研究了开关单次工作的静态自击穿特性和动态触发特性。

## 2 开关设计与实验布局

### 2.1 开关结构设计

气体开关设计为触发针型三电极开关, 主要由主电极、触发电极、绝缘筒等几部分构成, 图 1 为气

作者简介: 唐影 (1974 -), 女, 硕士, 从事激光技术研究。E-mail: tang\_y1012@163.com

收稿日期: 2010-04-18

体火花开关实物照片。

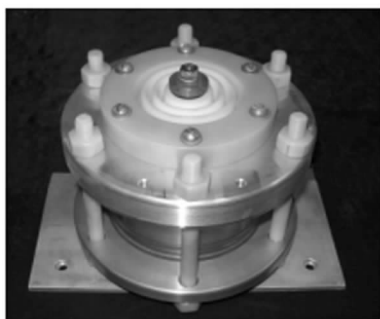
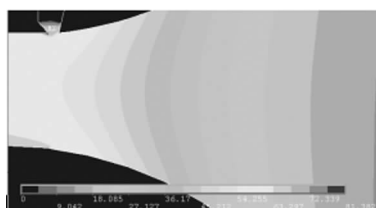


图1 开关照片

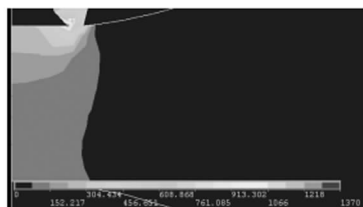
Fig. 1 photography of spark gap switch

主电极采用黄铜材料,电极直径  $\phi 40$  mm 的半球头型结构,主电极之间的距离在  $0 \sim 5$  mm 可调。触发电极位于地电极内部,触发电极设计为盘形尖棱结构,既增强了触发效果,又有效增加了触发电极的烧蚀周长,提高了开关的使用寿命<sup>[6-7]</sup>。电极材料为耐烧蚀的铜钨合金,触发电极的表面略低于地电极表面约 1 mm,尽可能避免主电流对触发电极的烧蚀。触发电极和地电极之间采用尼龙盖板径向绝缘,盖板表面设计了多个凹槽,以增加沿面闪络距离,防止触发电极与地电极端法兰之间的沿面滑闪。开关绝缘筒为内径  $\phi 58$  mm、厚度 25 mm、高度 55 mm 的有机玻璃。为减小开关电感,在保持绝缘的条件下,应尽量增大电极直径和减小开关长度。开关中绝缘介质为加压高纯  $N_2$  或者干燥空气,工作压力约  $0.1 \sim 0.5$  MPa。

触发针型三电极开关的触发特性与触发电极结构密切相关,为了缩短开关的放电时延和抖动,必须提高开关间隙中电场的畸变程度。利用有限元分析软件对开关的静电场进行了仿真,图 2(a)为开关在



(a) without trigger voltage



(b) with trigger voltage

图2 开关球头部分电场分布

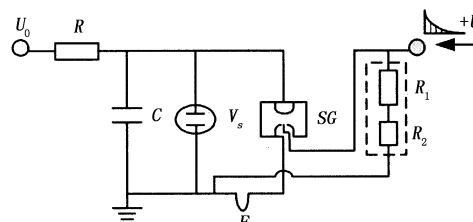
Fig. 2 distribution of electrical field of switch

直流充电  $-30$  kV 时的电场分布。图 2(b) 为开关在触发时刻的电场分布,此时主电极电压为  $-30$  kV,触发电压为 45 kV。

从图中可以看出,开关在直流充电时电极间电场比较均匀,为稍不均匀电场,开关最大场强约为  $81$  kV/cm,而在触发时刻,开关的最大场强约为  $1370$  kV/cm。可见触发时刻开关间隙中电场畸变非常明显,仿真结果表明盘形尖棱结构触发电极设计既可以有效延长开关的使用寿命,又有利于触发电极与地电极的导通,获得良好的预电离效果,缩短开关的放电时延和抖动。

## 2.2 实验布局

开关放电特性实验布局如图 3 所示。主要由高压直流电源、储能电容器、脉冲触发系统及开关四部分组成。直流高压电源输出电压为  $-70 \sim 70$  kV;储能电容器为陶瓷电容器,额定工作电压 100 kV,电容量  $0.04 \mu\text{F}$ ,电感量  $0.02 \mu\text{H}$ ;充电电阻为水电阻,电阻阻值约  $50$  k $\Omega$ 。



$U_0$ -HV Power  $C$ -storage capacitor  $R$ -charging resistor

$V_s$ -electrostatic meter  $SG$ -spark gap switch

$R_1, R_2$ -resistor divider  $F$ -shunt

图3 开关放电特性实验布局

Fig. 3 schematic diagram of discharge characteristics experiment

开关静态自击穿电压、放电电流、放电时延、抖动和触发电压是开关的重要参数。自击穿电压用静电电压表测量;放电电流用分流器测量,取样电阻为  $0.11 \Omega$ ;触发电压用电阻分压器测量;灵敏度为  $1.8$  kV/V。本实验的开关放电时延  $\tau_d$  定义为从触发电极上有触发电压开始到开关出现电流时刻为止所需要的时间,抖动  $\tau_j$  为开关放电时延的标准偏差。

开关放电特性实验中的脉冲触发系统提供的触发信号必须幅值高、前沿快,有一定的脉冲宽度且可以重复频率工作。触发信号的前沿、幅值和脉宽是影响开关触发性能的重要参数,在开关触发特性实验中,采用西北核技术研究所研制的 SPG-50 脉冲功率源建立了触发系统,其脉冲输出电压约 45 kV,脉冲宽度约 80 ns,前沿约 20 ns,重复频率  $0 \sim 2000$  Hz。图 4 是触发脉冲信号的典型波形。

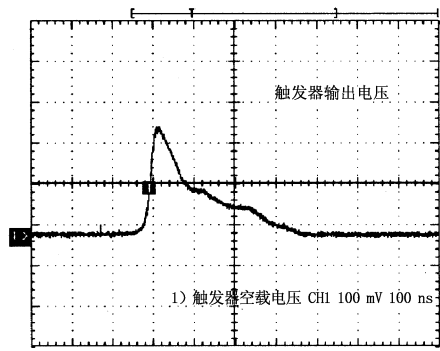


图 4 触发电压信号典型波形  
Fig. 4 the type waveform of trigger voltage

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 开关电感

利用放电回路电流对开关电感进行了估算。开关电感与充电电压关系如表 1 所示。实验表明开关电感较小,约 23 ~ 27 nH。实验发现的另一结果是开关电感随充电电压的变化不是很明显,这是因为开关放电通道体积较小,随着充电电压的增大,放电等离子体通道随着电流的增加而向外膨胀的程度较小,不足以引起火花电感产生较大变化的缘故。

表 1 开关电感实验估算

Tab. 1 experimental estimate for switch inductance

|                         |                |     |      |      |      |
|-------------------------|----------------|-----|------|------|------|
| Charging voltage/kV     | 10             | 15  | 17.5 | 22.5 | 27.5 |
| Trigger voltage/kV      | Self-breakdown | 45  | 45   | 45   | 45   |
| Circuit inductance/nH   | 362            | 360 | 358  | 358  | 359  |
| Capacitor inductance/nH | 20             | 20  | 20   | 20   | 20   |
| Other inductance/nH     | 315            | 315 | 315  | 315  | 315  |
| Switch Inductance/nH    | 27             | 25  | 23   | 23   | 24   |
| Switch resistor/mΩ      | 489            | 448 | 436  | 448  | 453  |

#### 3.2 开关静态自击穿特性

开关气体介质为高纯 N<sub>2</sub>,在开关气压为 0.1 ~ 0.4 MPa,主电极间隙为 3 mm 的情况下,研究了其静态自击穿特性。

图 5 为开关在正负两种电压极性条件下,静态自击穿电压随气压的变化关系曲线。由图可知,两种电压极性的开关静态击穿电压基本相当,且均随着开关气压的增加而呈近似线性升高。这是因为电子的平均自由行程与气体密度有关,开关气压增大导致电子的平均自由行程减小,主电极间电子碰撞引起电离的概率减小,从而削弱了气体电离过程的缘故<sup>[8]</sup>。在开关气压为 0.1 ~ 0.4 MPa 时,开关自击穿电压约 10 ~ 30 kV。

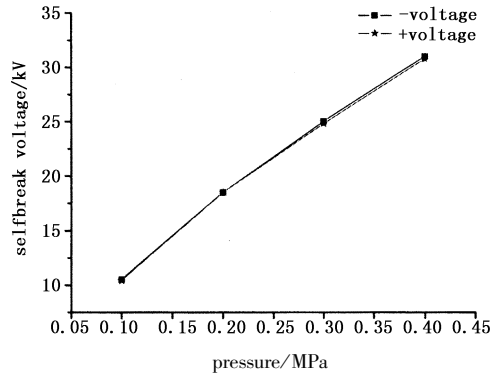


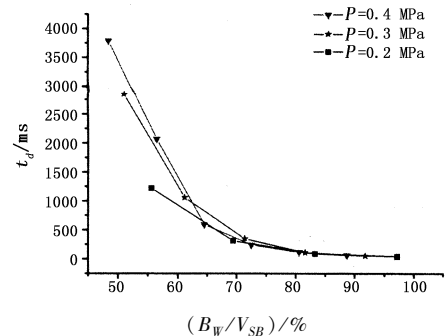
图 5 自击穿电压随气压的变化曲线  
Fig. 5 self-breakdown voltage vs pressure

由于开关两个主电极的曲率半径相同,地电极中心处的触发电极略低于地电极表面,对电极间隙的场分布影响不大,因而两种电压极性时开关静态自击穿电压相差不大。

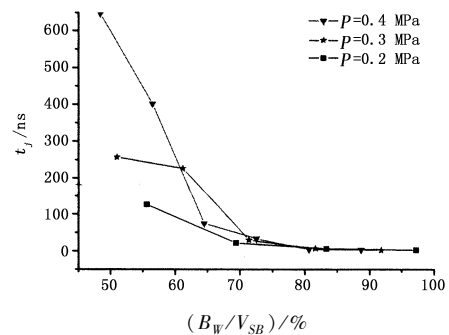
#### 3.3 开关触发特性

气体火花开关的特点在于其触发特性受欠压比及气压影响大,表现为放电时延、抖动随欠压比增大而减小,随气压升高而增大。根据这一特点,在开关调试过程中,参考不同欠压比及气压条件下的放电时延、抖动来判断开关的工作状态。

实验研究了在不同欠压比条件下开关的触发特性。图 6 为开关放电时延、抖动随欠压比变化规律曲线。从中可以发现,在任意气压条件的情况下,欠



(a) delay time



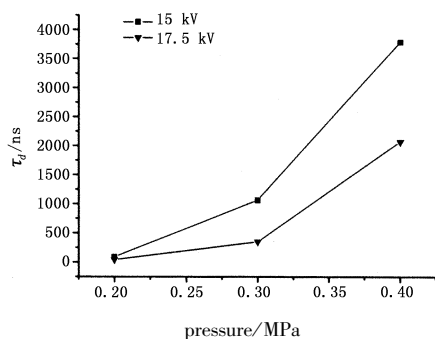
(b) jitter time

图 6 开关间隙时延及抖动随欠压比变化关系

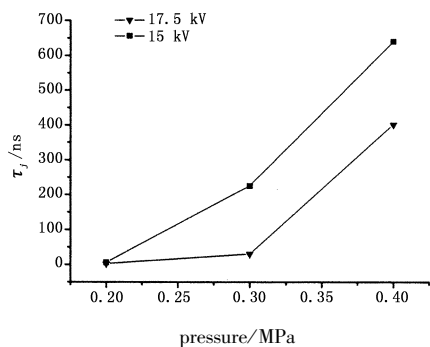
Fig. 6 delay time and jitter time vs working voltage ratio

压比小于 70% 时,开关放电时延、抖动均随欠压比增大迅速减小,欠压比大于 80% 时,开关放电时延、抖动都相对较小且两者减小速率变缓,时延小于 120 ns、抖动小于 6 ns。这是因为欠压比较低时,主电极间电子碰撞电离产生有效电子的概率低,初始电子崩形成时间较长,同时其发展的随机性较强,导致开关放电时延、抖动增大。因而随着欠压比增大,初始电子崩形成时间不断缩短,同时其发展的随机性减弱,开关放电时延、抖动减小。当欠压比大于 80% 时,尽管欠压比增大,但是由于初始电子崩形成时间趋于最短,致使放电形成时间呈饱和状态,开关放电时延、抖动减小速率变缓。

图 7 是开关放电时延、抖动随气压的变化规律曲线。从图中可以得出对任意工作电压的开关,放电时延、抖动均随着气压的升高而迅速增大。这是因为在外加电压相同的情况下,随着开关气体升高,电子的平均自由行程减小,主间隙电子碰撞引起电离的概率减小,初始电子崩形成和发展到流注所需的时间增加,使得开关放电时延、抖动增加。



(a) delay time



(b) jitter time

图 7 开关时延及抖动随气压的变化曲线

Fig. 7 delay time and jitter time vs pressure

### 3.4 开关工作范围

开关工作范围表征了开关能够正常工作的电压范围,工作范围可由公式(1)计算:

$$\eta = \frac{U_{br} - U_{min}}{U_{br}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\eta$  是工作范围(%);  $U_{br}$  是不同气压下自击穿电压(kV);  $U_{min}$  是不同气压下最低工作电压(kV)。

图 8 为不同气压时开关工作范围曲线,可以看出随着气压的增加,最低工作气压基本呈线性增加,同时开关工作范围增大。在开关气压为 0.1 ~ 0.4 MPa 时,最低工作电压约为 4 ~ 14 kV,开关具有较大的工作范围,约为 55% ~ 60%。

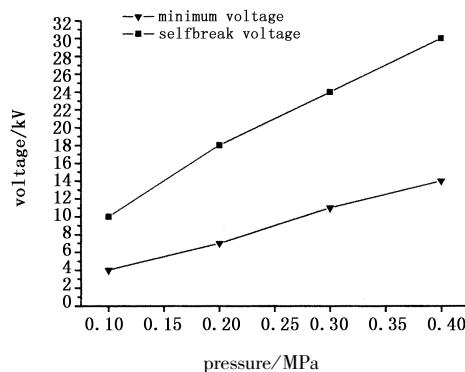


图 8 开关工作范围随气压的变化曲线

Fig. 8 working range vs pressure

### 3.5 初步应用

图 9 为所设计开关应用于放电激励脉冲 HF 激光器的实验装置照片。本实验是在西北核技术研究所研制的放电激励脉冲 HF 激光器装置上进行的,主要由触发系统、充电电源、储能电容器、激光气室和开关五部份组成。

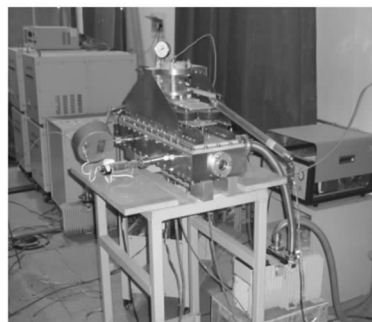


图 9 放电激励脉冲 HF 激光器

Fig. 9 photography of discharge initiated pulsed HF laser

对 HF 激光器放电电压、放电电流进行了初步调试。在开关工作电压为 27 kV, 气压为 0.4 MPa 的条件下,实验获得的激光器放电电压  $U_d$ 、放电电流  $I_d$  以及峰化电容器电压  $U_{cp}$  的典型波形如图 10 所示。上述波形表明激光器电极间隙之间形成了较为均匀的辉光放电<sup>[9]</sup>, 放电过程包括主放电、剩余电压维持和振荡放电三个阶段,激光器稳定运行,开关状态良好。

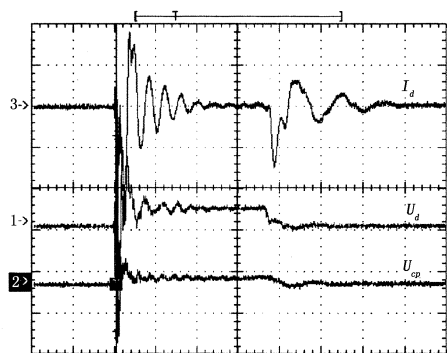


图10 激光器放电典型波形

Fig. 10 the type waveform of laser discharge

#### 4 结 论

研制了用于放电激励脉冲 HF 激光器的气体火花开关,介绍了开关的设计,实验研究了开关的静态自击穿特性和动态触发特性。在开关工作气压为 0.1 ~ 0.4 MPa 的情况下,静态自击穿电压约 10 ~ 30 kV,且稳定性较好;在欠压比大于 80% 的情况下,开关放电时延小于 120 ns,抖动小于 6 ns;开关具有较大的工作范围,约为 55% ~ 60%。实验结果证明,所设计开关性能稳定。

开关用于放电激励脉冲 HF 激光器,实现了激光器稳定运行。

#### 参考文献:

- [1] Zeng Z Z. Practical pulsed power technology [M]. Xi'an, Shanxi Science and technology Press, 2003. (in Chinese)  
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.
- [2] H Bluhm. Pulsed power systems principles and application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)  
H Bluhm. 脉冲功率系统的原理与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [3] Tang Y, Yi A P, Liu J R, et al. Experimental study on a hydrogen fluoride (HF) laser initiated by electron beam [J]. Laser & Infrared, 2008, 38(7): 647 - 650. (in Chinese)  
唐影, 易爱平, 刘晶儒, 等. 电子束激励氟化氢激光实验研究 [J]. 激光与红外, 2008, 38(7): 647 - 650.
- [4] J M Lehr, M D Abdalla. Design and development of a 1 MV, compact, self-break switch for high repetition rate operation [C] // Proceedings of the 12<sup>th</sup> IEEE Pulsed Power Conference, 1999.
- [5] H Akiyama, M Kristiansen. Current-voltage characteristics of a high-current pulsed discharge in air [J]. IEEE Transactions on plasma science, 1988, 16(2): 312 - 316.
- [6] Chen W Q, Zeng Z Z, Zou L L, et al. Selection of gas spark gaps electrode material under microsecond 100 kA current pulse [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(2): 239 - 242. (in Chinese)  
陈维青, 曾正中, 邹丽丽, 等. 100 kA 微秒级气体火花开关电极材料熔蚀研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(2): 239 - 242.
- [7] Luo M, Jiang J S, Chang A B, et al. Study on mechanism of electrode erosion of high-power gas spark gap switch [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2004, 16(6): 781 - 786. (in Chinese)  
罗敏, 江金生, 常安碧, 等. 高功率气体火花开关电极烧蚀机理研究 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(6): 781 - 786.
- [8] Zhu D H, Yan Z. High voltage insulation [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1992. (in Chinese)  
朱德恒, 严璋. 高电压绝缘 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [9] Zhu F. Experimental investigation on influence factors of gas discharge and output energy of non-chain HF laser [D]. Northwest Institute of Nuclear Technology, 2008. (in Chinese)  
朱峰. 非链式 HF 激光器气体放电和输出能量影响因素实验研究 [D]. 西北核技术研究所, 2008.