

# 激光触发多级多通道开关研究\*

李洪涛, 丁伯南, 谢卫平, 邓建军, 王玉娟, 秦卫东, 傅 贞,  
万步勇, 王厚明, 龚德森, 任 靖, 孟维涛, 丁 胜

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 研究了 200kV 激光触发多级多通道开关的运行机理, 该开关在直流电压下以四倍频 Nd: YAG 激光器为触发电源进行的实验结果表明: 开关触发延迟时间及其抖动随开关电压、激光能量和充气压力上升呈指数下降趋势, 对混合气体则随气体密度上升而上升。随透镜焦距的增大延迟时间及其抖动呈上升趋势。该开关实现了多通道放电。

**关键词:** 延迟时间; 抖动; 多通道; 触发阈值; 激光触发

**中图分类号:** TN248

**文献标识码:** A

开关技术是脉冲功率技术研究的重点。激光触发多级多通道开关由激光触发间隙和多个自击穿间隙串联组成。当激光脉冲聚焦于触发间隙时, 焦点及其附近的绝缘气体电离形成等离子体, 在电场作用下迅速发展成为火花放电通道, 使触发间隙闭合, 在串联的自击穿间隙上形成向下传播的过电压波, 自击穿间隙在过电压作用下击穿且过电压倍数逐级增加, 整个击穿过程是非线性的。由于自击穿间隙上的过电压倍数很高, 间隙中形成多个并联的放电通道, 减小了开关的导通电感、电阻及电极烧蚀, 同时减小了延迟时间及其抖动。该型开关集激光触发开关、火花隙、多通道开关的优点于一身, 具有耐压高、导通电流大、导通电感电阻小、触发延迟及其抖动小、预击穿概率低等优点, 是多模块高压强流大功率脉冲装置同步开关的主要类型之一。美国 Sandia 实验室 1983 年为 PBFA-2 研制成功 6.5MV 激光触发多级多通道开关<sup>[1]</sup>, 随后进行了改进并推广应用到 Hermes-3, Saturn, PBFA-Z 上<sup>[2~5]</sup>。国内清华大学仿照 Rimfire 原型开关设计并进行了开关自击穿实验<sup>[6]</sup>。原子能研究院<sup>[7]</sup>对 KrF 激光触发火花隙进行了研究并在此基础上设计并实验研究了激光触发 V/N 型多级多通道开关, 进行了开关的两维静态场分布计算和导通时间的 Martin 经验公式验算。我们研制了 200kV 激光触发多级多通道开关, 计算分析了开关的两维静态场分布, 研究了四倍频 Nd: YAG 激光触发多级多通道开关的运行机理, 研究了开关触发阈值、延迟时间及其抖动与工作气体种类、充气压力和开关电压等实验参数之间的依赖关系。该开关触发延迟时间抖动小于 1ns。

## 1 开关结构

200kV 激光触发多级多通道开关由激光触发间隙和 8 级过压自击穿间隙组成(图 1)。触发间隙电极为球面电极, 正电极为有激光输入孔的不锈钢电极; 负电极本体材料为不锈钢, 激光作用区域为铜钨合金。自击穿间隙电极设计为有效工作区域剖面为中部平顶双侧弧面(冰壶形剖面)的环形不锈钢电极, 电极之间的绝缘子为两端带凸柱的圆饼形尼龙块。开关外筒为抛光有机玻璃筒。绝缘子和开关外筒及紧固部件将自击穿间隙电极位置固定形成等间距火花隙。激光脉冲经外光路引导调整后沿光路套筒轴线馈入, 经置于光路套筒内的聚焦透镜聚焦于触发间隙中心。

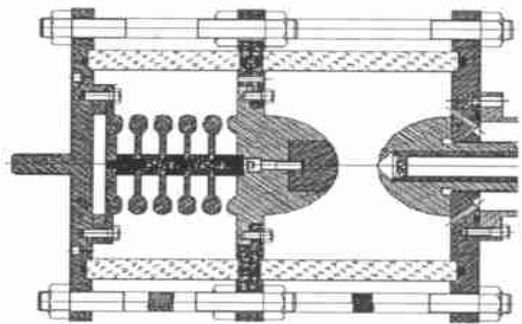


Fig. 1 Sketch of the switch

图 1 开关结构示意图

## 2 实验线路

实验线路如图 2(a) 所示, K 为待试开关, 为 Rogowski 线圈,  $R_L$  为负载,  $C_1$  为正高压充电脉冲电容器

\* 收稿日期: 2002-07-17; 修订日期: 2003-03-13

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题(2000-0210)

作者简介: 李洪涛(1968-), 男, 博士生, 副研, 现从事核技术及其应用研究; 绵阳市 919-108 信箱。

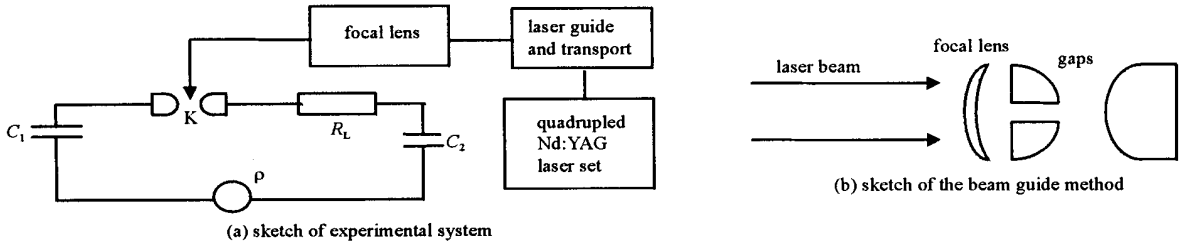


Fig. 2 Sketch of experimental device

图 2 实验装置示意图

(100kV/1.5μF),  $C_2$  为负高压充电脉冲电容器(100kV/1.5μF)。四倍频 Nd:YAG 激光器输出的激光脉冲由分光棱镜、反射棱镜等组成的光路系统引导传输,经聚焦透镜聚焦于充有  $N_2$ ,  $SF_6$  等绝缘气体的激光触发间隙中(图 2(b)),焦点及其附近一定区域内的气体介质分子电离产生自由电子和离子,自由电子在电场作用下形成流注并发展为火花放电使触发间隙导通,在自击穿间隙上形成过电压波使之击穿。所有自击穿间隙全部击穿后开关导通。在实验过程中监测电流、电流微分、电容器充电电压、激光脉冲能量及脉冲幅度等参量。

### 3 耐压特性

#### 3.1 实验方法

开关完成 50 次小电流逐级升压老练实验后,开始进行耐压实验。开关引出电极上分别加正负极性电压,直至开关自击穿。开关与 5 Ω 水电阻负载串联以限制电流减小电极烧损。

#### 3.2 数据处理方法

通过耐压实验来检验开关的自击穿电压及其稳定性。在同一条件下,重复多次自击穿实验,取得该条件下自击穿电压的样本  $V_{sbi}$ ,该条件下开关的自击穿电压  $V_{sb}$ 、自击穿电压极差  $V_{max}$ 、自击穿电压标准差  $V$ 、归一化极差  $sm$ 、归一化标准差  $s$  分别定义如下

$$V_{sb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_{sbi} \tag{1}$$

$$V_{max} = \max / V_{sbi} - V_{sb} / \tag{2}$$

$$V = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (V_{sbi} - V_{sb})^2 \right]^{1/2} \tag{3}$$

$$sm = \frac{V_{max}}{V_{sb}} \tag{4}$$

$$s = \frac{V}{V_{sb}} \tag{5}$$

式中  $n$  为同一条件下开关的实验次数,一般取为 10。

#### 3.3 耐压特性

实验结果如图 3 所示(图中误差棒均为极差  $V_{max}$ ):以 Ar 为工作介质时,在 0.1~0.5MPa(绝对气压)的气压范围内,自击穿电压归一化极差小于等于 4.49%、归一化标准差均小于 2.00%;以  $N_2$  为工作介质时,在 0.1~0.3MPa(绝对气压)的气压范围内,自击穿电压归一化极差小于等于 6.88%,归一化标准差均小于 3.00%;以  $SF_6-N_2$  混合气为工作介质时,自击穿电压归一化标准差小于等于 4.00%。开关耐压特性可拟合如下:

工作介质为  $N_2$  时

$$V_{sb} = 7.88 + 474.8p \tag{6}$$

工作介质为 Ar 时

$$V_{sb} = 3.06 + 87.5p \tag{7}$$

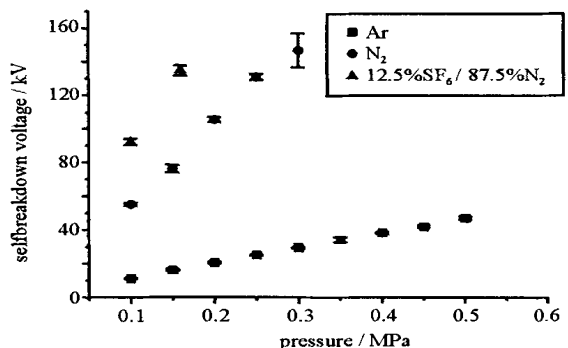


Fig. 3 Self-breakdown voltage vs gas pressure

图 3 开关耐压特性曲线

式中  $V_{sb}$  为自击穿电压, 单位 kV;  $p$  为充气压力, 单位 MPa。实验值与以有限元法计算的最大场强结合气体介电强度得出的理论预测值基本吻合。

## 4 延迟及抖动特性

### 4.1 实验方法

使用四倍频 Nd: YAG 激光器可获得脉宽为 20ns, 最大脉冲能量为 60mJ 的四倍频 Nd: YAG 激光(波长 266nm), 利用波长为 266nm 的半反射镜和全反射镜, 并通过调节氙灯电压等措施在开关处可获得最大脉冲能量为 35mJ 的激光脉冲。由分光棱镜、266nm 的半反镜和全反镜构成的激光传输及光路调整系统使激光脉冲完成紫光与绿光的分离并沿开关光路套筒轴线导入激光触发多级开关的触发间隙中, 使用聚焦透镜将激光脉冲聚焦于触发间隙中心。利用 266nm 激光脉冲研究触发延迟、抖动及最低可触发阈值与气压、电压、激光脉冲能量等参数间的关系。

### 4.2 实验结果

Guenther 和 Bettis 指出激光触发气体开关的击穿是气体在电场中的放电过程, 可以用汤生雪崩理论和流注理论描述<sup>[7]</sup>。根据汤生雪崩理论和流注理论开关延迟  $t_d$  可表示为

$$t_d = \frac{\ln N_c - \ln N_0}{v_e} + \frac{d - X_c}{v_b} \quad (8)$$

在  $20 \leq E/p \leq 36$  ( $V \cdot cm^{-1} \cdot Torr^{-1}$ ) 的条件下, 以单质气体  $N_2$  为工作介质的阴极充电的激光触发火花隙的延迟时间  $t_d$  可通过

$$t_d = Kp^{-1} (E/p)^{-8.47} + C \quad (9)$$

预测。式中:  $N_c$  为开始形成流注时的带电粒子数;  $N_0$  为激光入射后形成的初始带电粒子数;  $\alpha$  为汤生第一电离系数;  $v_e$  为电子在电场中的漂移速度;  $d$  为隙距;  $X_c$  为形成流注时电子崩头的位置;  $v_b$  为流注的传输速度;  $E$  为间隙中电场强度;  $p$  为充气压力;  $t_d$  为开关延迟时间;  $K, C$  由气体第一汤生电离系数等气体特性参量决定的常量。Martin<sup>[9]</sup>认为开关延迟  $t_d$  可表示为

$$t_d = 7.4 \times 10^{14} (\rho / E)^{3.44} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为气体密度, 单位  $kg/m^3$ ;  $E$  为开关间隙的平均电场强度, 单位  $V/m$ ;  $t_d$  为开关触发延迟时间, 单位  $s$ 。

以  $N_2, N_2/SF_6$  为工作介质的实验结果表明: 开关延迟时间和抖动随电压上升呈指数衰减, 如图 4(a) 所示, 以纯  $N_2$  为工作介质在欠压比小于 80% 时延迟时间与公式(9)的预测基本一致, 欠压比大于 85% 时延迟时间与公式(10)的预测基本一致; 以  $N_2/SF_6$  混合气为工作介质时延迟时间与公式(10)的预测基本一致。对于单质气体  $N_2$  在等  $E/p$  (或  $E/\rho$ ) 值的情况下, 充气压力(密度)上升延迟时间趋向下降, 如图 4(b) 所示, 与 Guenther 和 Bettis<sup>[7]</sup>及 Martin<sup>[8]</sup>的预测是一致的; 延迟时间随充气压力的变化速率与选定的  $E/p$  值点及激光脉冲能量 ( $E_{laser}$ ) 密切相关, 气压较低时  $E/p$  值和激光脉冲能量越高, 延迟时间随充气压力上升而下降的速率越大; 充气压力较高时  $t_d/p$  曲线趋向平坦, 其变化速率对  $E/p$  值和激光脉冲能量的依赖性趋弱; 触发阈值与自击穿电压的比值 ( $V_{th}/V_{sb}$ ) 对充气压力无明显依赖关系。延迟时间随激光脉冲能量上升呈指数衰减趋势(见图5), 且

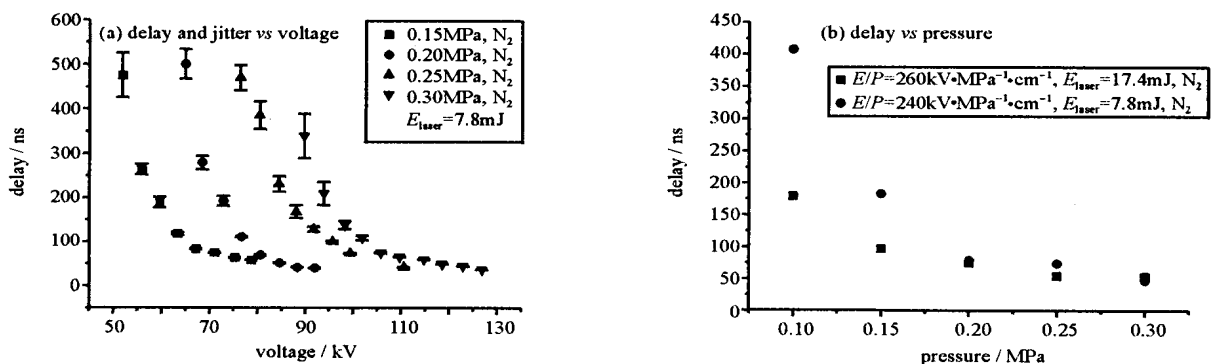


Fig. 4 Delay and jitter vs voltage and pressure of pure  $N_2$  gas

图4 纯  $N_2$  的延迟和抖动与充电电压、充气压力的关系

充电电压越低  $t_d - E_{laser}$  曲线的负指数越大,延迟时间随激光脉冲能量上升而下降的速度更快;  $V_{th}/V_{sb}$  随激光脉冲能量上升呈指数衰减,在 10mJ 附近趋向饱和。对于  $N_2/SF_6$  混合气触发延迟时间在等  $E/p$  值的情况下,气体密度下降,延迟时间趋向下降(见图 6),符合 Martin<sup>[9]</sup> 的预测趋势;对  $SF_6$  百分含量 ( $N$ ) 在 12.5% ~ 100% 的  $N_2/SF_6$  混合气,开关自击穿电压 ( $V_{sb}$ ) 和触发阈值 ( $V_{th}$ ) 对  $N$  的依赖关系近似为线性函数,而  $t_d - N$  则为指数函数,因此使用混合气是减小开关触发延迟时间及其抖动的有效途径。以  $N_2$  为工作介质时触发延迟时间与聚焦透镜焦距之间也存在一定的依赖关系,焦距增长触发延迟时间上升(见图 7);欠压比越高触发延迟时间对焦距的依赖关系越弱;触发阈值随焦距增长趋向上升。以  $N_2/SF_6$  混合气为工作介质时触发延迟时间对焦距的依赖关系较弱。

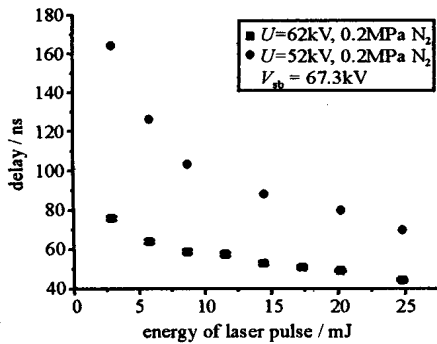


Fig. 5 Delay vs energy of laser pulse

图 5 延迟时间与激光脉冲能量的关系

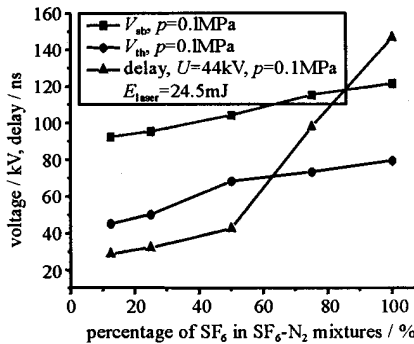


Fig. 6 Voltage and delay vs SF6 percentage

图 6 自击穿电压、触发电压阈值、触发延迟时间与 SF6-N2 混合气中 SF6 百分含量之间的关系

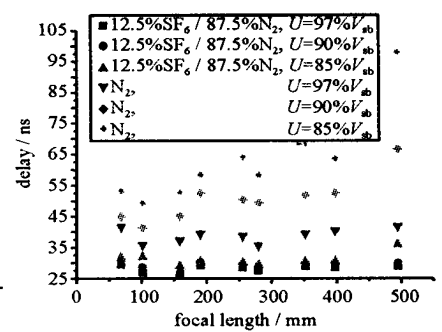


Fig. 7 Delay vs focal length

图 7 延迟时间与透镜焦距的关系

### 5 多通道放电

激光触发多级多通道开关的重要特点之一是开关运行过程中过压自击穿间隙在高倍数过压情况下形成多通道放电。图 8 中以  $SF_6$  为工作介质时串联自击穿间隙的同一间隙内可见多个放电光点,说明自击穿间隙实现了多通道导通。在以  $Ar, N_2$  为工作介质的情况下也实现了多通道导通。多次放电后,过压自击穿间隙环状冰壶形电极平顶工作区域表面烧蚀痕迹分布均匀。

### 6 讨论

以四倍频 Nd:YAG 激光器为触发源研究了激光触发多级多通道开关运行机理,实验结果表明匀场结构的激光触发多级多通道开关耐压特性稳定,以多种气体为工作介质的耐压实验中耐压极差小于 7%。开关的触发延迟和抖动随电压和激光脉冲能量上升呈指数衰减趋势。以氮气 ( $N_2$ ) 为工作介质的触发延迟特性研究表明,单质气体  $N_2$  在等  $E/p$  (或  $E'$ ) 值的情况下,充气压力(密度)上升,延迟时间趋向下降。充气压力和激光脉冲能量上升开关触发延迟时间的下降速率与所选择的  $E/p$  值有一定关系,  $E/p$  值越大  $t_d - p, t_d - E_{laser}$  曲线越平坦。

对于  $N_2/SF_6$  混合气等  $E/p$  值的情况,气体密度 ( $\rho$ ) 下降,延迟时间趋向下降。焦距越大焦点面积越大,焦点的激光脉冲功率密度越小,因此开关触发延迟时间与聚焦透镜焦距之间也存在一定的依赖关系,焦距增长触发延迟时间上升,以  $N_2$  为工作介质时,该现象较为明显。以  $SF_6$  百分含量为 12.5% 的  $N_2/SF_6$  为工作介质时,由于  $SF_6$  激励电位较高,触发延迟时间对焦距的依赖关系较弱。

引入过电压波概念对实验结果进行分析,开关导通过程理解为:激光触发间隙中的气体介质在激光脉冲作用下电离,自由电子和离子在电场作用下形成流注在间隙中发展并形成火花放电通道使激光触发间隙导通,如果激光触发间隙放电通道的形成时间远小于激光触发间隙电感、电阻、紧邻激光触发间隙的自击穿间隙对地电容构成的回路的时间常数,则在串联的自击穿间隙上形成过电压波,自击穿间隙的击穿过程为高过电压击穿,开

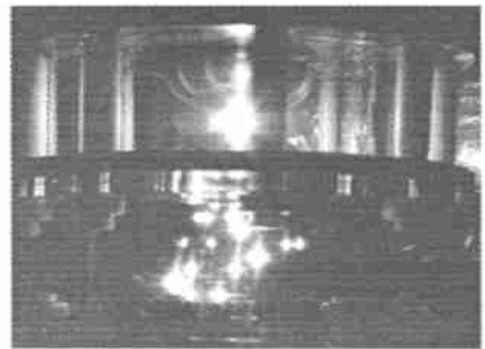


Fig. 8 Integral photograph of discharging of the switch

图 8 激光触发多级多通道开关放电过程积分像 (下半部分为串联自击穿间隙)

关触发延迟时间及其抖动较小;否则,激光触发间隙导通后,开关电压将在自击穿间隙上以准稳态形式重新分配,自击穿间隙的击穿过程为低过压击穿,开关触发延迟时间及其抖动较大。因此,减小激光触发多级开关延迟时间及抖动的关键在于减小激光触发间隙的延迟时间及其抖动。开关以 Ar, N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub> 及 Ar/ N<sub>2</sub>, SF<sub>6</sub>/ N<sub>2</sub> 混合气为工作介质的情况下均实现了多通道导通,表明该型开关承载电流能力较大。

### 参考文献:

- [1] Adams R G, Hore W B, Woodworth J R, et al. Ultraviolet laser triggering of a 5 megavolts multistage gas switch[A]. 4<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. 1983. 613—616.
- [2] Humphreys D R, Penn K J, Cap S J, et al. Rimfire: a six megavolt laser-triggering gas-filled switch for PBFA-2[A]. 5<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. Arlington, USA, 1985. 262—265.
- [3] Wilson J M, Donovan G L. Laser-triggering gas switch improvements on PBFA-2[A]. 6<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. Arlington, Virginia, USA, 1987. 361—364.
- [4] Denison G J. Performance of the Hermes-3 laser-triggered gas switch[A]. 7<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. Monterey, California, USA, 1989. 579—582.
- [5] Spielman R B, Long F, Martin T H, et al. Pulsed power performance of PBFA-Z[A]. 11<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. Baltimore, Maryland, USA, 1997. 709—714.
- [6] 白秀庭,温松涛,王佳,等. 多级多通道开关研究[A]. 高功率粒子束十年文集[C]. 1985. 210—217. (Bai X T, Wen S T, Wang J, et al. A study on multi-stage multi-channel switch. The decade selected works of high pulsed power in China. 1985. 210—217)
- [7] 赵荣生,王晓军,姜兴东,等. KrF 激光触发气体开关的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(1): 23—28. (Zhao R S, Wang X J, Jiang X D, et al. Experimental investigation of KrF laser triggered gas switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994, 6(1): 23—28)
- [8] Guenther A H, Bettis J R. The laser triggering of high voltage switches[J]. *J Phys D: Appl Phys*, 1978, 11: 1557—1613.
- [9] Martin T H. An empirical formula for gas switch breakdown delay[A]. 7<sup>th</sup> IEEE international pulsed power conference[C]. Monterey, California, USA, 1989. 73—79.

## Study on the laser triggered multi-stage and multi-channel switch

LI Hong-tao, DING Bo-nan, XIE Wei-ping, DENG Jiarr-jun, WANG Yu-juan, QING Wei-dong,  
FU Zhen, WAN Buryong, WANG Hour-ming, GONG De-sen, REN Jing, MENG Wei-tao, DING Sheng  
(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** This paper reported the design and experimental results of a 200kV laser triggered multi-stage and multi-channel switch. When a quadruple Nd:YAG laser set was used as a trigger source, it was found that the delay decreased exponentially as the charging voltage, pressure or the energy of laser pulse increased when N<sub>2</sub> was filled in gaps. The delay increased as the density of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixtures increased and as the focal length of lens increased for N<sub>2</sub>, but it is not obvious for SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> mixture. The discharging phenomenon of multi-channel was observed.

**Key words:** Delay; Jitter; Multi-channel; Threshold; Laser triggering