

## 铁电体触发灭火花开关实验研究

丁恩燕<sup>1,2</sup>, 李爱萍<sup>1</sup>, 范植开<sup>1</sup>, 金晓<sup>1</sup>, 杨周炳<sup>1</sup>, 高凤琴<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 919-1015 信箱 621900;

2. 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

**摘要:** 本文阐述了铁电体触发开关的工作原理, 进行了铁电体触发开关的实验研究。得出了气压与开关导通时间和延时的关系, 并对此实验结果进行了分析。在开关间距为 3mm、真空度为 2.5Pa、阴极腔的深度为 19mm、小孔直径为 4mm 的条件下测得开关的抖动小于 3ns。实验结果表明触发电压的高低对开关抖动的影响很大, 随着触发电压的升高开关的抖动越来越小。当触发电压达到 6kV 左右时, 开关的抖动小于 1ns。

**关键词:** 灭火花开关; 空心阴极; 铁电体触发极

中图分类号: TM56

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2008)04-0073-04

### 引言

自上个世纪 80 年代以来, 灭火花开关的研究有了很大进展<sup>[1-3]</sup>。灭火花放电是工作在巴申曲线最低点左侧的低气压空心阴极放电, 灭火花开关的放电过程是相当复杂的, 这一放电现象是由德国埃尔兰根-纽伦堡大学物理研究所于 1979 年首次报道并命名的, 当时只是将这种放电用作离子和电子束源。已有的研究表明, 灭火花放电过程分为 5 个阶段, 分别是预放电(汤逊放电)、空心阴极(正电荷积累)、超发射、金属蒸气电弧和介质恢复阶段。灭火花开关具有氢气闸流管和高压气体开关的双重优点, 工作气压一般为 1~100Pa 的粗真空。其电流导通能力和上升速度( $10^{12}$  A/s) 接近高压气体开关, 对称电极结构可以通过 100% 的反向电流, 且可以高重复工作。作为一种高重复频率高电压大电流的快速反应开关, 灭火花开关已在气体激光器、粒子加速器、电集尘设备、体外碎石机等装置中得到成功应用, 成为一种重要的脉冲功率闭合开关。铁电阴极材料有很多优势<sup>[4-10]</sup>: 常温、非真空环境下发射密度比较大而且不易中毒, 铁电陶瓷制作工艺简单、成本低廉、功函数低、而且抗辐射能力强、极化稳定。铁电体作为触发极具有触发电压低、抖动小的特点。用铁电体作为触发极的开关在国际上已经受到人们

越来越多的重视。为研究铁电体作为灭火花开关触发极的工作性能, 开展了铁电体触发灭火花开关的初步实验研究。

### 1 铁电体触发灭火花开关设计

开关结构如图 1<sup>[11,12]</sup>, 阴极腔直径为 36mm, 深度大小可调, 可调范围为 9.0~29.0mm, 腔的壁厚为 4mm, 材料为黄铜, 铁电体触发极位于阴极腔内。阳极腔深为 25mm, 直径为 36mm, 材料为黄铜, 如果不需要反向电流, 阳极也可以更换为中心不开孔的电极。开关间距可调, 可调范围为 1.0~10.0mm。电极中心孔的直径为 2.0~5.0mm, 上下中心孔对正同轴。真空度由 ZDF-III 宽量程真空计与 ZJ-52T 热偶电阻规进行测量。气压的高低通过调节抽气孔前面的真空阀来控制。

开关中采用的铁电体触发极为片状, 材料为掺杂的 PLZT(掺镧的锆钛酸铅), 结构如图 2。试片的外径为  $\phi 25$ mm, 厚度为 2mm。厚度为 1 $\mu$ m 的铜电极外径为  $\phi 13$ mm, 采用溅射等方式镀在片状铁电陶瓷的两个表面。栅极的条纹宽度和间隔都为 400 $\mu$ m, 电极的宽度与陶瓷厚度的比例决定了陶瓷内部电场分布, 合适的比例可使极间产生极化反转的数量比较多。若电极间隙过宽, 会产生不发射电子的区域, 即孤岛效应, 但若电极间隙过窄, 会减小有效发

收稿日期: 2008-03-31

作者简介: 丁恩燕(1978-), 女, 山东籍, 助理工程师, 主要从事超宽带技术研究工作;

范植开(1965-), 男, 湖北籍, 研究员, 博士。

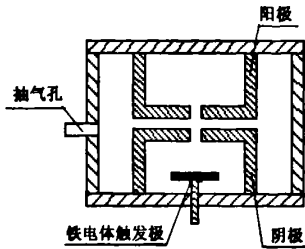


图 1 开关结构示意图

Fig.1 Schematic of switch

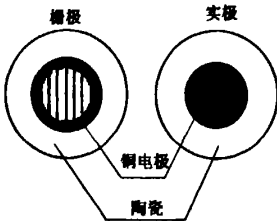


图 2 铁电体触发极

Fig.2 Trigger electrode of switch

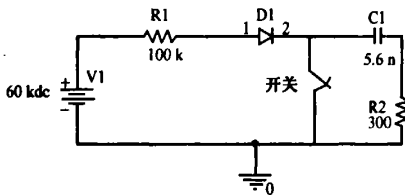


图 3 开关自验电路

Fig.3 Test circuit of switch

射面积,因而,选择合适的电极宽度与电极间隙就很重要。经过实验,条状电极的栅极的条纹宽度和间隔都为  $400\mu\text{m}$  的电极发射性能比较好。当铁电体触发极栅极加一负高压脉冲时,铁电体触发极栅极发射具有一定初动能的电子束。发射电子的能量不仅取决于激励电压和阳极电压的大小,也与两者的极性有关。利用负脉冲激励时,D.Flechter 等人得到了近  $1\text{keV}$  的发射能,但大部分报道认为初始动能为几十  $\text{eV}$ 。在实验中测得的电子发射的最大电流密度为  $31\text{A}/\text{cm}^2$ 。

开关的自验电路如图 3<sup>[13]</sup>,  $60\text{kV}$  直流电源通过  $R1$ 、 $R2$  对  $C1$  充电,直流电源与调压器相接,通过调压器控制  $C1$  所充电压的高低。当开关被触发导通时, $C1$  通过开关、负载电阻  $R2$  放电。通过测量负载电阻  $R2$  上的电压得知开关的导通时间。 $D1$  的作用

是防止充电回路形成震荡回路, $R1$ 、 $R2$  在充电时起到限流的作用。为了减小回路电感带来的开关导通波形的失真,电路中使用的电阻为高频无感电阻、电容为无感电容、电缆为高频屏蔽电缆。为了减小放电回路的电感,应尽量减小放电回路的长度。

## 2 实验结果

质火花开关工作在低气压 ( $1 \sim 100\text{Pa}$ ) 和窄间隙 (几个  $\text{mm}$ ) 条件下。工作气压对其耐受电压和导通特性有很大影响。用铁电体作为触发极,在触发电压和阳极电压都比较低时,开关可以触发导通。当阳极电压从  $20\text{kV}$  降至几  $\text{kV}$  时,开关可以稳定地触发导通,开关的工作范围比较宽。

铁电体触发质火花开关的导通的基本过程为<sup>[14,15]</sup>:铁电体触发极在触发脉冲作用下发射电子,在阴阳极之间电场的作用下,电子从阴极向阳极运动,并在运动过程中与气体分子碰撞发生电离。离子则从阳极向阴极运动。再加上电子的迁移率、扩散系数远大于离子,从而在阴极附近产生离子积累,形成虚阳极。碰撞产生的电子进入虚阳极后大部滞留下来,这样虚阳极的尖端向阴极扩展,这与 Lucas 提出的模型一致<sup>[16]</sup>。虚阳极内部的电离作用也同样强烈,这里形成的低动能的电子和离子将促使等离子体区迅速扩大,虚阳极进入阴极孔。虚阳极进入空心阴极后,将引起空心阴极内电势的升高和电场的快速增强。此时很小的虚阳极体积和空心阴极特殊的几何结构,为电子围绕轴线的上下振荡运动提供很大的空间,电子的电离效率很高。虚阳极进入空心阴极后,主放电将在极短时间内迅速发生。开关导通的条件是要在阴极附近有正离子积累,形成虚阳极。

气压与开关导通时间和延时的关系如表 1,表中的数据是在阴极腔深为  $19\text{mm}$ 、小孔直径为  $4\text{mm}$ 、阳极为无孔电极、开关间距为  $3\text{mm}$  时多次实验的平均值。这里所说的开关导通时间是开关从预放电到开关导通通道完全建立的时间。所谓延时指的是触发电压的起始时刻到开关建立预放电之间的时间。

表 1 气压与导通时间及延时的关系

Tab.1 Relation among air pressure rise time and delay time

气压/ $\text{Pa}$	开关导通时间/ $\text{ns}$	延时/ $\text{ns}$
1.5	$110 \pm 1$	$149 \pm 1$
2.5	$74 \pm 1$	$137 \pm 1$
4.1	$46 \pm 1$	$98 \pm 1$

延时主要有两个方面原因:第一方面触发极的电子发射与触发时间相比有一个延时,这是因为极化反转需要时间,大概为几十 ns,延时多少与气压基本上没有关系,在铁电体电子发射实验中已经得到证实。第二方面是从触发极发射电子到阴极附近虚阳极的形成需要时间。从表中可以看出,随着气压的升高,开关导通时间与延时都在减小。这主要是由于随着开关腔内气压的升高,气体的密度增加,增加了电子与气体分子的碰撞电离。气压的升高,虚阳极的形成时间缩短,扩散速度加快,所以开关导通时间和延时相应地减小。但是随着气压的升高,开关的自击穿电压迅速降低。当气压高于 10Pa 时,开关的自击穿电压降至 2kV 以下,电极间为均匀的辉光放电。在实际应用中,应根据需要综合考虑,选择合适的开关工作气压。

表 2 为阳极电压与开关的导通时间及延时的关系,此实验结果是在其它实验条件不变只改变阳极电压的条件下得出的。从表中可以看出,随着阳极电压的增加,开关的导通时间延长但是开关的延时缩短。在预放电阶段,空心阴极内铁电体触发极发射的电子在电场作用下,经阴极孔飞向阳极,这一阶段空间电荷场很弱,电场主要由阴阳极间的电势差和空心阴极的几何尺寸决定,碰撞电离主要发生在阴阳极之间。由于电子的雪崩,在靠近阳极一侧产生的碰撞电离要比阴极孔附近的多得多,电离产生的电子被阳极收集。增加阳极电压,增加了阴阳电极之间的碰撞电离,减小了开关的延时。从表中可以看出电压对开关延时的影响非常小,在对延时要求不是特别严格的条件下,电压对延时的影响可以忽略。

表 2 阳极电压与导能时间及延时的关系

Tab.2 Relation among anode voltage rising time and delay time

阳极电压/kV	开关导通时间/ns	延时/ns
9.6	97 ± 1	135 ± 1
12	112 ± 1	133 ± 1
18.1	134 ± 1	132 ± 1

阴极腔的深度对开关的延时也有很大的影响,阴极腔越深,开关延时越大。在同样的实验条件下,阴极腔的深度为 9.0mm,延时为 134ns;阴极腔的深度为 29.0mm,延时为 214ns。阴极腔的深度对开关的自击穿电压与开关的抖动基本上没有影响,通过调节阴极腔的深度可以比较好地控制开关的延时。

图 4 是在开关间距为 3mm,开关腔内的气压为

2.5Pa,阴极腔深度为 19mm,小孔直径为 4mm 的条件下测得的,这是 4 次开关导通波形的叠加。所加触发电压为 3.55kV,开关的阳极电压为 15.3kV。开关的阳极电压与触发电压波形由高压探头 (Tektronix P6015A,带宽 75MHz) 测量。用示波器测量时,用触发源的波形对示波器进行触发,开关的导通波形的叠加在时间轴上的分散就是抖动。由于开关的导通时间比较长,从图中看不出开关的抖动的具体值。测量开关抖动时,是在示波器上将时间轴拉开,可以很准确地测量开关的抖动。用上述的方法对开关导通波形进行测量,测得开关的抖动小于 3ns。通过大量的实验发现触发电压的高低对开关抖动的影响很大,随着触发电压的升高开关的抖动越来越小,当触发电压达到 6kV 左右时,开关的抖动小于 1ns。这主要是由铁电体触发极自身的发射特性决定的,随着电压的升高,发射方式发生了变化,由极化反转发射转变为场致发射。

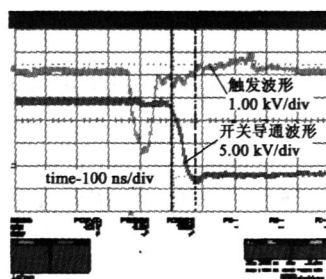


图 4 开关导通波形

Fig.4 Voltage wave of switch

### 3 结论

铁电体触发火花开关可以在触发电压和阳极电压都比较低时触发导通,开关的工作范围比较宽。随着开关腔内气压的升高,开关的导通时间与延时减小。增加阴极腔的深度,可以增加开关的延时。触发电压的高低对开关抖动的影响比较大,增大触发电压可以减小开关的抖动,当触发电压达到 6kV 左右时,开关的抖动小于 1ns。

#### 参考文献 (References):

- [1] D B loess. The triggered pseudo-spark chamber as a fast switch and as a high-intensity beam source [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1983, 205: 173-184.
- [2] H Riege, E Boggasch. High-power, high-current pseudo-spark switches [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1989, 17 (5): 775-777.

- [3] K Flank. High-power pseudo-spark and BLT switches [J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 1988, 16 (2): 317-323.
- [4] H Godel. Fast polarization changes in ferroelectrics and their application in acceleration [J]. Nuclear Instrument Methods Phys., 1989, A280(1): 1-6.
- [5] G Rosen. Electron emission from ferroelectrics and its application [J]. Ferroelectrics, 1992, 133(1-4): 235-240.
- [6] J D Avers, D. Fletcher, C Golkowski. Ferroelectric electron beam source [A]. Tri-Service/NASA Cathode Workshop [C]. USA: NASA, 1994.
- [7] H Riege. A new beam source based on electron emission from ferroelectric ceramics [J]. Bull Am Phys, 1989, 34(2): 193-195.
- [8] J Hatano, F Suda, H Futama. Improved powder-pattern technique for delineating ferroelectric domains [J]. Appl. Phys, 1973, 12: 1644-1649.
- [9] Y S Ng, A D Mc Donald. X-ray diffraction studies of domain alignments in modified PZT [J]. Ferroelectrics, 1985, 62: 167-173.
- [10] J Fousek. A new dew method for revealing ferroelectric domains [J] Appl. Phys. Lett., 1966, 8: 192-195.
- [11] 赵会良, 解子凤, 罗承沐 (Zhao H L, Xie Z F, Luo C M). 单级火花开关耐受电压的研究 (Self-breakdown voltage characteristic of the single gap pseudo-spark switch) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 1998, 17(4): 5-8.
- [12] 吴汉基 (Wu Hanji). 触发真空开关及其应用 (Triggered vacuum switch and its application) [J]. 电工电能新技术 (Adv. Tech. of Elec. Eng. & Energy), 1992, 11(3): 26-32.
- [13] Leland H Bowen, Juan M Elizondo, Jane Lehr. High-voltage, high rep-rate, low jitter, UWB switch with a ferroelectric trigger switch [A]. 12th IEEE International Pulsed Power Conference [C]. Monterey, CA, USA, 1999.
- [14] 祝大军, 刘盛纲, 石金水, 等 (Zhu D J, Liu S G, Shi J S, et al.). 假火花开关初始放电过程的理论计算 (Simulation of the initial discharge courses of a pseudospark switches) [J]. 强激光与粒子束 (High power laser and particle beam), 1996, 8(1): 123-130.
- [15] 张红卫, 蒙林, 郗杨, 等 (Zhang H W, Meng L, Yan Y, et al.). 虚火花放电初始过程的 PIC 模拟 (Simulation of the initial discharge of a pseudospark discharge) [A]. 第四届高能电子学学术交流会 (4th Proseminar of High Energy Electronics) [C]. 2005. 376-382.
- [16] P Choi, H Chuaqui, M Favre, et al. Breakdown formation in a transient hollow cathode discharge — a statistical study [J]. IEEE Trans. Plasma Sci, 1995, 23(3): 221-228.

## Experimental study of pseudospark-switch with ferroelectric trigger

DING En-yan<sup>1,2</sup>, LI Ai-ping<sup>1</sup>, FAN Zhi-kai<sup>1</sup>, JIN Xiao<sup>1</sup>, YANG Zhou-bing<sup>1</sup>, GAO Feng-qin<sup>1</sup>

(1. Institute of Applied Electronics, CAEP, P.O.Box 919-1015, Mianyang 621900, China;

2. Postgraduate Department, CAEP, Beijing 100088, China)

**Abstract:** As the key part of the pulse power technology, at the present time the development of high voltage switch is using the technology of high repetition and low jitter. In this paper, the work principle of the ferroelectric switch and its experiment results were introduced. The relation among the pressure, rising time and delay time is found through the experiment and the paper analyses the reason that causes the relation among the pressure, rising time and delay time. The jitter of the switch was less than 3ns when the gap between the anode and cathode is 3mm, the vacuum is 2.5 Pa, the height of the hollow cathode is 19mm, the diameter of the pore is 4mm and the trigger voltage is 3.55kV in the experiment. The value of the trigger voltage has important affect on the jitter of the switch, as the jitter of the switch is reduced with the increase of the trigger voltage. The jitter of the switch was less than 1ns when the trigger voltage is about 6kV.

**Key words:** pseudospark switch; hollow cathode; ferroelectric trigger electrode

## 书 讯 (New Book Info.)

宋涛, 霍小林, 吴石增. 生物电磁特性及其应用. 北京: 北京工业大学出版社, 2008.8.  
16开, 435千字, 55元。