

文章编号: 1001-4322(2004)08-1078-05

## 等离子体源参数对长导通等离子体 断路器性能的影响\*

陈 林, 孙承纬, 姜 巍, 丰树平, 吴守东, 姚 斌, 李 晔, 徐 敏

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 研制了可工作在长导通时间(约  $1\mu\text{s}$ )的等离子体断路器,实验研究了等离子体源参数,包括等离子体枪与主回路之间的触发延时、等离子体枪的工作电压以及等离子体枪的数目对开关性能的影响规律。研究表明,开关导通时间和开关电压随触发延时、枪工作电压和数目的增加而增加,但当开关导通时间接近主回路电流四分之一周期时,开关电压呈下降趋势。当 Marx 发生器工作电压为  $120\text{kV}$  且采用 4 个等离子体枪时,实验获得的最大电压倍增系数约为 1.8。

**关键词:** 等离子体断路器; 等离子体枪; 延时; 导通时间

**中图分类号:** O53 **文献标识码:** A

断路器在电感储能系统中作为功率调节单元是最关键的部件之一,其作用主要有预脉冲抑制、脉冲压缩及电压和功率倍增等<sup>[1]</sup>。对于一个 TW 级的电感储能系统,断路器必须能够传导 MA 级甚至数十 MA 级的电流,再在远小于其导通时间的时间间隔内(小于  $100\text{ ns}$ )迅速将电流切换到负载上,并且在负载上产生数 MV 的电压。等离子体融蚀断路器(PEOS,简称 POS)是具备此种特性的最具发展前景的断路器技术之一。

如图 1 所示,PEOS 开关由阴极、阳极以及将等离子体注入到阴阳极间隙的等离子体源组成<sup>[2]</sup>。在 PEOS 闭合时发生器作为电流源将能量储存在电感储能系统中,图 1 所示的 PEOS 开关为同轴结构,外导体由透明度较高的金属网或鼠笼式的金属棒构成。等离子体通过外导体流向中心导体,在一个有限长度内填充一个环形区域,负载在 PEOS 下游。在发生器点火前数  $\mu\text{s}$  开始对 PEOS 阴阳极间隙充入等离子体,这样,在发生器输出脉冲到达开关以前,等离子体已将 PEOS 阴阳极间隙短路。理想情况下,PEOS 完全传导了发生器输出电流,将负载完全隔离,在电流超过某一阈值(该阈值主要与初始等离子体密度、空间分布、离子种类以及电极间的磁场有关)时,开关断路,将电流切换到负载上,且由于电感的存在,在负载上还将产生很高的电压。对于优化了的负载阻抗,负载上产生的功率可超过发生器直接带匹配负载时可产生的功率。功率倍增系数即定义为使用 PEOS 时在负载上产生的功率与发生器直接带匹配负载时的功率之比。PEOS 的功率倍增系数一般为  $2\sim 3$ ,有些报告中功率倍增系数达到了 5。

等离子体融蚀断路器是 1977 年由 Sandia National Laboratories(SNL)的 C. W. Mendel 和 S. A. Goldstein<sup>[3]</sup>提出并试验的。1983 年 Naval Research Laboratory(NRL)的 R. A. Meger 等人<sup>[4]</sup>首次在 Gamble 和 Gamble 上采用 PEOS 证实了其在电感储能、脉冲压缩和功率倍增等方面的应用。随后,前苏联、日本、德国、法国、罗马尼亚以及以色列等国相继开展了这方面的研究工作。

由于长导通时间 PEOS 具有简化系统结构、缩小系统体积和降低费用等优点<sup>[5]</sup>,从 80 年代末,研究重点逐步从短导通时间 PEOS(NPOS,即 ns 等离子体断路器)转移到长导通时间 PEOS(MPOS,即  $\mu\text{s}$  等离子体断路器)方面。1992 年 NRL 的 P. J. Goodrich 等人<sup>[6]</sup>在 HAWK 发生器上采用 PEOS 在导通时间  $900\text{ ns}$  内

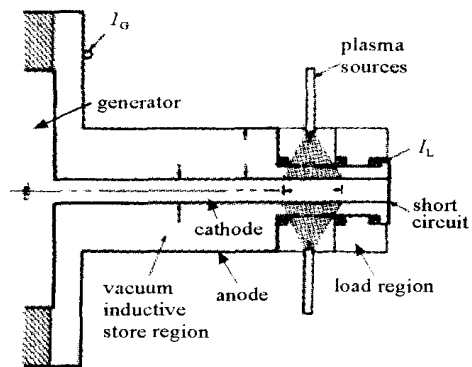


Fig. 1 Schematic diagram of typical PEOS configuration

图 1 典型的 PEOS 开关结构示意图

\* 收稿日期:2004-02-02; 修订日期:2004-05-08

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题(4210509)

作者简介:陈 林,(1970—),男,副研究员,博士研究生,从事脉冲功率技术应用研究工作;绵阳 919-108 信箱;E-mail:chenlin-mail@21cn.com。

截断了 600kA 的发生器电流,负载电流上升时间为 40ns,电流转换效率达到 80%,负载功率为 0.4~0.7TW。1997 年俄罗斯的 B. M. Kovalchuk 等人<sup>[7]</sup>在 GIT12(设计用来驱动 Z-Pinch 负载的发生器)上采用 PEOS,在导通时间 800ns 内截断了 2.4MA 的发生器电流,开关断路时间仅为 50ns,开关断路阻抗为 0.6 。2001 年,日本的 K. Murayama 等人<sup>[8]</sup>在 ASO-X 上采用 PEOS 进行了喷气 Z-Pinch 研究,研究了热斑(hot spots)的空间稳定性以及 X 光谱和等离子体不稳定性的改善。2001 年,美国 PI 公司已建成 DECADE 装置的 1/4 模块,并且准备在该装置上利用集成等离子体断路器<sup>[9]</sup>开展 8 MA 以上的等离子体辐射源(PRS)内爆负载和韧致辐射实验。迄今为止,我国在此方面的研究起步较晚,基本上还处于初期阶段。

等离子体断路器性能及工作状态主要取决于电极几何形状、等离子体密度及其分布、通过的电流幅度以及导通时间<sup>[10]</sup>,等等。鉴于等离子体开关中密度测量较为困难,本文在电极几何形状、主回路峰值电流幅度以及峰值导通时间保持不变的情况下,通过改变等离子体注入源参数,从而间接改变注入开关区中的等离子体密度,在此基础上研究了开关主要性能参数的变化规律。

## 1 实验装置简介

### 1.1 等离子体注入枪

实验中采用电缆等离子体枪作为开关区的等离子体注入源。电缆等离子体枪是一种基于表面闪络放电的等离子体注入器。其设计相对简单,主要由一对同轴电极和它们之间的绝缘子组成。当高压加在电极上时,绝缘子表面上发生闪络,由于阻抗加热以及辐射烧蚀而产生等离子体,并且在电磁力以及流体压力的作用下,使等离子体得以很高的速度向外喷射。典型的等离子体喷射速度为 3~7cm/ $\mu$ s,电子密度为  $10^{12} \sim 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。正是由于这种类型的等离子体枪可产生较宽范围的等离子体密度,因而国外所开展的等离子体断路器实验中经常用它作为等离子体注入源。

图 2 是电缆等离子体枪的等效电路,4 只枪分别由 4 台 30kV、0.6 $\mu$ F 脉冲电容器供能。4 个回路并联。每一台电容器各通过一个 10k $\Omega$  充电电阻被充电至 20~30kV,然后被同一个场畸变开关触发放电。通过每一只等离子体枪的最大电流幅值约为 20kA,四分之一周期约为 1.2 $\mu$ s。图 3 是电缆等离子体枪的横截面示意图,电缆等离子体枪的中心电极是  $\phi$ 3mm 的铜丝,外面是  $\phi$ 8mm 的聚乙烯绝缘子,黄铜喷嘴有一个  $\phi$ 3mm 的孔,在注入的一侧成锥形。当场畸变开关被触发时,在铜丝和接地喷嘴之间发生击穿放电,等离子体枪电流开始从聚乙烯表面流动,并产生等离子体,产生的等离子体通过喷嘴被注入到真空室。枪电流  $I_{pg}$  通过 Rogowski 线圈进行测量。

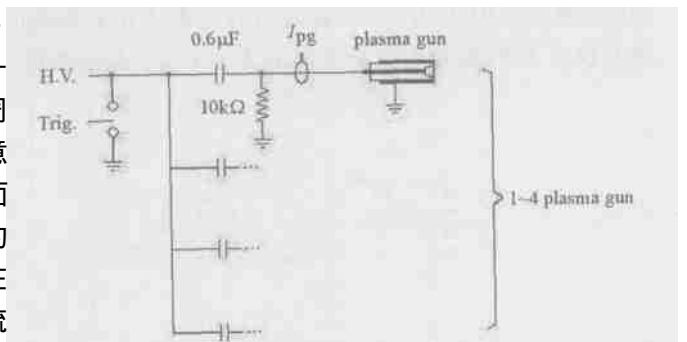


Fig. 2 Equivalent electrical circuit of plasma gun system

图 2 等离子体枪系统等效电路

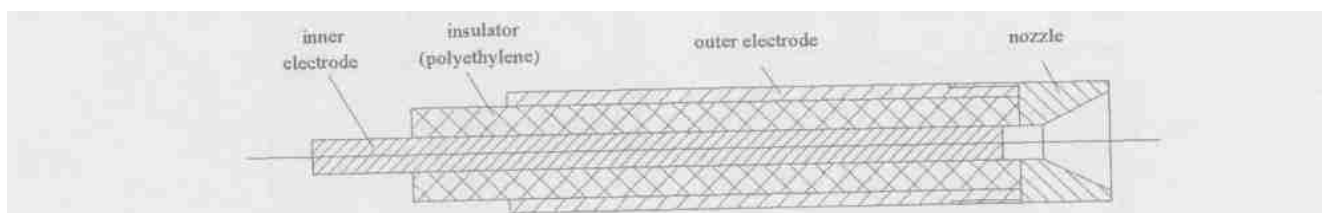


Fig. 3 Cross-sectional view of plasma gun

图 3 电缆等离子体枪结构示意图

### 1.2 主放电回路

图 4 所示为带等离子体断路器的主回路等效电路图。其中电容器储能模块是由一个四台电容器组成的 Marx 发生器,其中每一台电容器参数为 100kV、1  $\mu$ F。发生器标称输出电压为 400kV,总储能为 20kJ,采用正负充电的方式,输出极性为负。当 Marx 发生器对从 PEOS 处短路的回路电感进行放电时,产生的正弦电流波形四分之一周期约为 0.87 $\mu$ s。当 Marx 工作电压为 120kV 时,主回路峰值电流约为 45kA。实验中采用 200nH 同轴电感作为等离子体断路器负载。

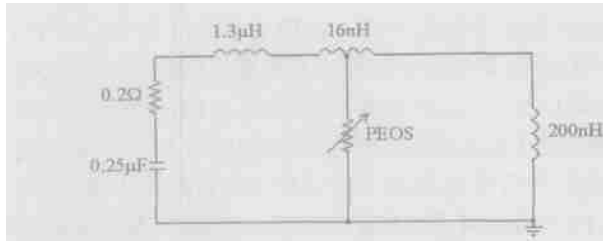


Fig. 4 Equivalent electrical circuit with PEOS for the experiment  
图 4 带等离子体断路开关的主回路等效电路图



Fig. 5 Photograph of the PEOS in the experiment  
图 5 实验中采用的等离子体断路开关装置照片

图 5 所示为实验中的等离子体断路开关装置照片。根据发生器的输出电流水平,设计等离子体断路开关的阴极直径为 20mm,阳极直径为 100mm,开关区长度为 50mm。最多可采用 8 只等离子体枪同时从 8 个方向通过鼠笼阳极(85%透明度)向中心阴极注入等离子体,等离子体枪喷口至等离子体断路开关中心阴极表面的距离约为 80mm。本文所涉及的实验中只分别开展了 1、2 和 4 只等离子体枪同时放电的情形。

实验中分别采用了 Rogowski 线圈测量主回路放电电流,采用 B-dot 探针测量了负载电流,采用电阻分压器测量断路开关断路时在负载上产生的感应电压。实验前通过 Rogowski 线圈对 B-dot 探针进行了在线标定。

## 2 实验结果及讨论

为了研究等离子体断路开关的断路性能,曾经试验了各种不同的等离子体注入方法,实质上是改变注入到开关区的等离子体密度,包括改变触发延迟时间(指触发等离子体枪与触发主回路之间的时间间隔)、枪电压(或电流)幅度以及枪的数目。

如图 6 所示为实验中获得的典型的等离子体枪电流、主回路电流、等离子体开关电压以及负载电流波形。实验时主回路 Marx 工作电压为 120kV,实际输出电压约为 110kV。4 个等离子体枪同时放电,枪工作电压为 27kV,触发延时为 2.2μs。此时的等离子体开关导通时间为 0.860μs,断路时开关感应电压为 219kV,电压倍增系数为 1.8,负载电流上升时间为 87ns,负载电流峰值为 39kA,对应的电流转换效率为 86.7%。

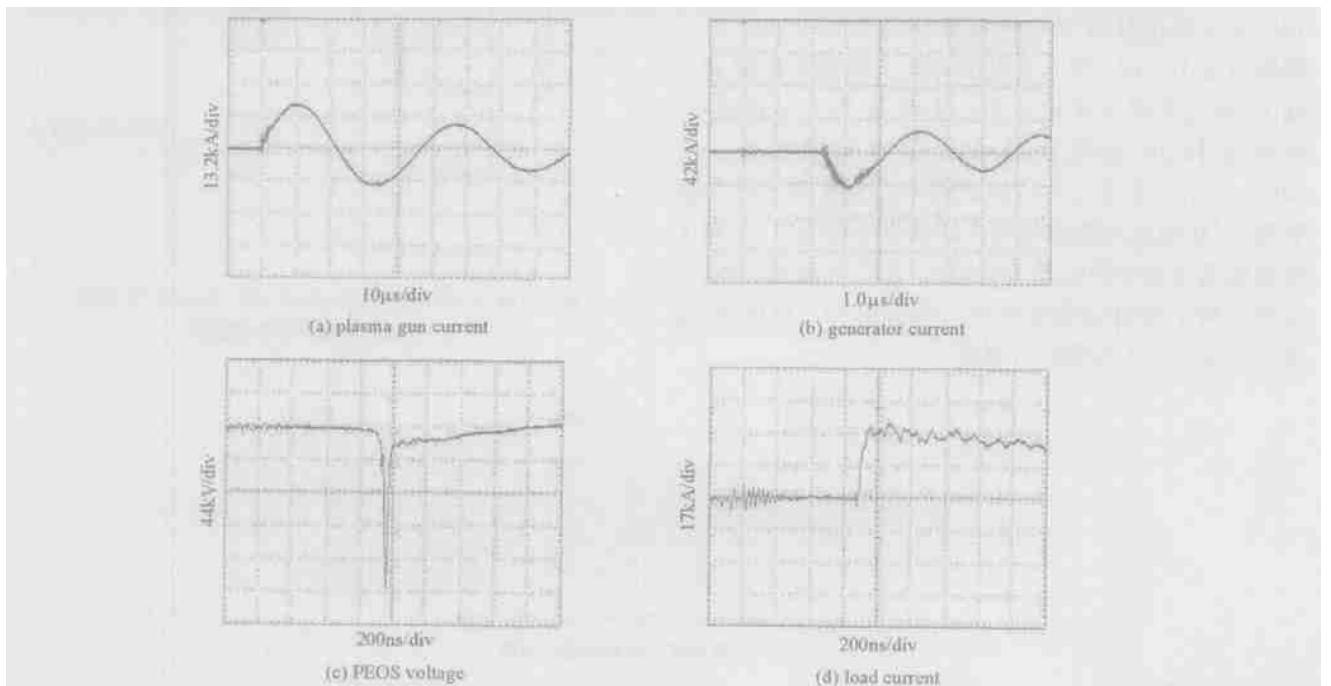


Fig. 6 Typical waveforms of plasma gun, generator and load currents and PEOS voltage in the experiments  
图 6 实验中典型的等离子体枪电流、主回路电流、等离子体开关电压以及负载电流波形

图 7 所示为当 Marx 工作电压为 120kV,采用 4 个等离子体枪时,在不同的等离子体枪工作电压下对应的开关导通时间和开关电压  $V_{pos}$  随枪与主回路之间的触发延时的变化关系。由图可知,随着枪与主回路之间触发延时的增加,开关导通时间增加,断路开关电压也增加,但在接近主回路电流峰值时刻,开关电压呈下降趋势;随着枪电压的增加,开关导通时间和开关电压增加,不同的枪电压下对应的增加趋势(斜率)基本一致。在

接近主回路电流峰值时刻,开关电压水平基本接近。

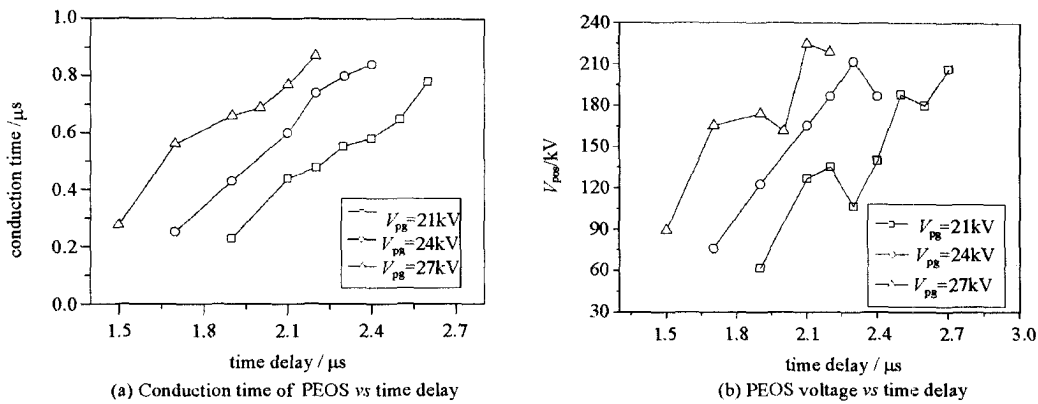


Fig. 7 Conduction time and voltage of PEOS vs time delay at different working voltage of the four plasma guns

图 7 实验中采用 4 个等离子体枪时得到的等离子体开关导通时间和电压与触发延时以及枪工作电压的关系曲线

正如文献[11]中对电缆等离子体枪的密度测试结果一样,等离子体枪被触发后随着时间(至少在 0 ~ 8 $\mu\text{s}$ 之内)的增加,在开关区测得的等离子体密度也逐渐增加。这样,随着实验中触发延时的增加,当主电流到来时对应的开关区等离子体密度也在升高,等离子体被磁压驱动至开关区末端所需的时间就越长。一般说来,导通时间越长,对应的电流就越大,开关断路时在电感负载上产生的电流变化率  $dI/dt$  就越大,相应的开关电压就越高。然而随着触发延时的继续增加,开关电压并非持续往上增长。在临近主电流峰值时刻,电压反而呈下降趋势,此结果与文献[12]中得到的结果相似。

J. R. Goyer 根据其在 DPM1 和 DM1 上的实验结果,认为在 POS 导通阶段初期由于磁压的作用,在电流通道后面已经形成了真空间隙,就像在雪耙模型中的磁压推动作用一样,在雪耙阵面之后等离子体基本上被清空。然而随着导通时间的增加,由于来自阴极的二次等离子体向中心扩展,或者来自于等离子体注入源的继续扩散,使得真空间隙的两边界逐渐往中心收缩,因而间隙尺寸随着时间的增加而逐渐减小。于是就出现了实验中观察到的现象,即随着导通时间的增加,开关电压反而呈下降趋势。从实验结果来看,通过调整触发延时使开关导通时间在 0.7 ~ 0.8 $\mu\text{s}$  时,开关电压达到最高。

图 8 所示当 Marx 工作电压为 120kV、等离子体枪工作电压  $V_{pg} = 24\text{kV}$  以及在不同数目的等离子体枪同时放电时对应的开关导通时间和开关电压  $V_{pos}$  随枪与主回路之间的触发延时的变化关系。由图可知,随着枪数目的增加,开关导通时间和开关电压增加,枪数越多,增加趋势越快。在接近主回路电流峰值时刻,枪数越多,开关电压水平越高。

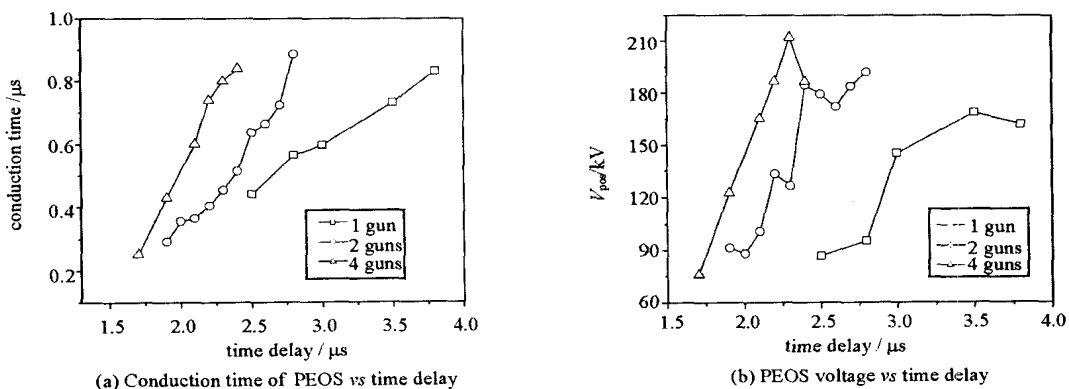


Fig. 8 Conduction time and voltage of PEOS vs time delay with different plasma gun numbers at 24kV working voltage

图 8 实验中等离子体枪工作电压为 24kV 时得到的等离子体开关导通时间和电压与触发延时以及枪数的关系曲线

由于开关区的等离子体密度随着触发延时的增加而增加,枪的数目增加一倍,叠加到开关区的密度也增加一倍,因而枪数越多,开关的导通时间和开关电压增加趋势就越快。而枪数越多,沿开关区环形区域的密度就越均匀,对称性就越好,这就使得开关断路时沿中心电极一周产生磁绝缘间隙的同步性越高,在电感负载上产生的电流变化率  $dI/dt$  越大,相应的开关电压就越高。

### 3 结 论

本文主要研究了在电极几何形状、主回路峰值电流幅度以及峰值导通时间保持不变的情况下,通过改变等离子体枪与主回路之间的触发延时以及等离子体枪的数目和工作电压从而改变等离子体密度而得到开关主要性能参数的变化规律。得到的结论如下:随着等离子体枪与主回路之间触发延时的增加,开关导通时间增加,同时断路开关电压也增加,但在接近主回路电流峰值时刻,开关电压呈下降趋势;随着等离子体枪工作电压的增加,开关导通时间和开关电压增加,不同的枪工作电压下其增加趋势(斜率)基本一致。在接近主回路电流峰值时刻,开关电压水平基本接近;随着枪数目的增加,开关导通时间和开关电压增加,枪数越多,随触发延时而增加的趋势越快。在接近主回路电流峰值时刻,枪数越多,开关电压水平越高;当主回路工作电压为 120kV、采用 4 个等离子体枪且枪工作电压为 27kV 时,断路时最高开关感应电压为 219kV,对应的电压倍增系数为 1.8,负载电流上升时间为 87ns,负载电流峰值为 39kA,对应的电流转换效率为 86.7%。

#### 参考文献:

- [1] Cooperstein G, Ottinger P F. Fast opening vacuum switches for high-power inductive energy storage[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1987, **15**(6): 629—634.
- [2] Weber B V, Commisso R J, Cooperstein G, et al. Plasma erosion opening switch research at NRL[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 1987, **15**(6): 635—648.
- [3] Mendel C W, Goldstein S A. A fast-opening switch for use in REB diode experiments[J]. *J Appl Phys*, 1977, **48**(3): 1004—1006.
- [4] Meger R A, Boller J R, Colombant D, et al. Application of plasma erosion opening switches to high power accelerators for pulse compression and power multiplication[A]. Proceedings of the 4th International Pulsed[C]. 1983. 335—341.
- [5] Weber B V, Boller J R, Commisso R J, et al. Microsecond-conduction-time POS experiments[A]. Proceedings of the 9th International Conference on High Power Particle Beams[C]. 1992. 375—384.
- [6] Goodrich P J, Fisher R C, Hinshelwood D D, et al. Microsecond plasma opening switch experiments on Hawk with an e-beam diode load[A]. Proceedings of the 9th International Conference on High Power Particle Beams[C]. 1992. 609—614.
- [7] Kovalchuk B M, Kokshenev V A, Kim A A, et al. GIT16: state of project in 1995-1997[A]. Proceedings of the 11th International Pulsed Power Conference[C]. 1997. 715—723.
- [8] Murayama K, Teramoto Y, Katsuki S, et al. X-ray spectrum and spatial stability of hot spots in gas-puff z-pinch plasmas driven by inductive energy storage pulsed power generator with a plasma opening switch[A]. Proceedings of the 13th International Pulsed Power Conference[C]. 2001. 769—772.
- [9] Rix W, Altes B, Childers K, et al. Final design and initial pulsed power results for the Decade Quad plasma radiation source machine configuration [A]. Proceedings of the 13th International Pulsed Power Conference[C]. 2001. 573—576.
- [10] Dolgachev G I, Ushakov A G. Limiting parameters of the plasma opening switch[J]. *Plasma Physics Reports*, 2001, **27**(2): 110—118.
- [11] Rix W, Thompson J, Crumley R, et al. Microsecond plasma opening switch performance at currents above 2 MA[A]. Proceedings of the 10th International Pulsed Power Conference[C]. 1995. 192—201.
- [12] Goyer J R, Kortbawi D. Observations and implications of gap closure in plasma opening switch operation[J]. *J Appl Phys*, 1994, **76**(6): 3321—3325.

## Influence of the plasma source parameters on the performances of long-conduction-time plasma opening switch

CHEN Lin, SUN Cheng-wei, JIANG Wei, FENG Shu-ping, WU Shou-dong, YAO Bin, LI Ye, XU Min  
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-108, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** A plasma erosion opening switch (PEOS) which works in long-conduction-time (about 1 $\mu$ s) has been developed. The influence of plasma source parameters including the time delay between plasma gun and Marx generator, the working voltage and the number of plasma guns on the performances of PEOS has been investigated in experiments. As a result, the conduction time and the PEOS voltage increase with increasing Marx-plasma gun time delay, the working voltage and the number of plasma guns. Nevertheless, when the conduction time is close to the quarter period of the main electrical circuit, the PEOS voltage drops abruptly. With Marx voltage of 120kV and four plasma guns, the maximal voltage multiplication factor is about 1.8.

**Key words:** Plasma erosion opening switch; Plasma gun; Time delay; Conduction time