

文章编号: 1001-4322(2010)04-0803-04

12 kV 高压反向触发双极晶闸管开关组件*

何小平, 王海洋, 周竞之, 陈维青, 薛斌杰, 汤俊萍, 邱爱慈

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘 要: 介绍了反向触发双极晶闸管(RSD)开关的结构和触发工作原理,分析了 RSD 组件设计要求,利用两级触发原理研制了 12 kV 高压 RSD 组件及其触发系统,工作电压 10~12 kV。试验结果表明:该高压 RSD 串联组件触发稳定,工作可靠,12 kV 工作电压下峰值电流可达 133 kA,传输电荷 24 C,电流变化率可达 4.12 kA/ μ s,导通的峰值功率可达 1.6 GW。

关键词: 反向触发双极晶闸管开关; 固态开关; 磁开关; 大电流; 大库仑量

中图分类号: TN78; TM56 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102204.0803

在高功率激光、电磁发射、加速器等高功率大电流脉冲电源系统中,常用的闭合开关主要有气体火花开关、真空开关、引燃管和晶闸管类半导体开关等。美国圣地亚国家实验室(SNL)利用一个 24 kV, 2 MJ 脉冲形成网络对这些开关的性能进行了比较^[1]。结果表明:火花开关结构简单,成本相对低廉,由于电极熔蚀,需要经常更换电极和绝缘支撑,维护成本比较高;引燃管由于采用液态汞做电极,如果损坏,很容易造成环境污染,在很多场所下无法应用,而且寿命有限,自放电几率高;真空触发开关也容易发生电极熔蚀现象,因而寿命较短。固态半导体开关,特别是反向触发双极晶闸管(RSD)半导体固态开关不但通流能力强,而且具有高可靠性、长寿命等优点。因此,SNL 的学者认为对于这种大电流、大库仑传输量的场合,RSD 开关无疑将逐步取代上述其它类型的开关。本文主要介绍 12 kV RSD 组件的研制情况。

1 RSD 器件的结构特点及其触发工作原理

RSD 是由俄罗斯科学家于 20 世纪 80 年代研发的一种新型高功率半导体闭合开关器件^[2-11]。RSD 是一种 4 层结构的硅半导体器件,类似晶闸管,但 RSD 是一种两端器件,没有晶闸管中的控制门极。RSD 的阳极是由重掺杂的 p^+ 和 n^+ 材料交替组成,因此,RSD 可以看成是由大量的 p^+npn^+ 结构的晶闸管和 n^+pnn^+ 结构的双极晶体管交替并联组成。RSD 的结构和工作原理电路如图 1 所示^[4]。

RSD 的主回路和触发电路之间通过一个磁开关实现脉冲隔离,触发前在 RSD 器件阴极 A、阳极 K 电极间加正向电压, pn 结反偏,器件呈高阻状态。当触发电路外加反向脉冲电压时,由于双极管的发射结 n^+p 结两侧均为高浓度掺杂,反向耐压很低,因而很小的外加反向电压就会使其击穿,于是双极管的集电结处于正向偏置状态,电流迅速增大,器件内部表现为等离子体向两种器件共用的 n 基区注入横向扩展,覆盖整个 pn 结。当磁开关饱和后,外加电压再恢复到正向,在电场作用下,等离子体层中的电子和空穴分别向 n 基区和 p 基区漂移,形成类似晶闸管导通时的控制极注入电流,不过不是从控制极向横向逐步扩展,而是在整个芯片面积上同时到达发射结,所有小的晶闸管以及每个晶闸管发射结上的每一点同时导通。不仅如此,如果尺寸合适,由于 n 层少数寿命较长,扩散长度大于 n 型层厚度,因而双极管的 n 型层中也充满等离子体,即双极管也处于导通状态,整个器件面积全部用于导通,器件完成了触发和导通过程。

RSD 器件应用时除了应提供足够的触发电流外,还应保证反向触发电流和正向导通在时间上有一个适当

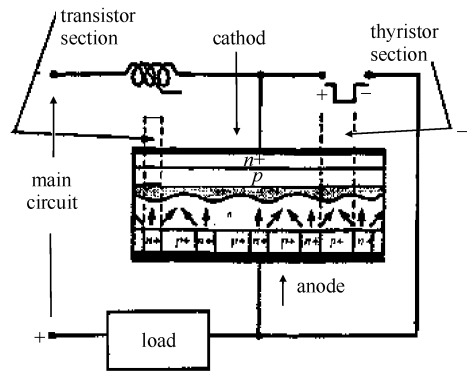


Fig. 1 Structure and working principle of reversely switched dynistor(RSD) semiconductor switch

图 1 RSD 的结构和工作原理

* 收稿日期:2009-11-06; 修订日期:2010-02-09
作者简介:何小平(1965—),男,研究员,长期从事脉冲功率技术研究;ninthxp@sohu.com。

的延迟,确保触发电流能够形成足够的触发等离子层。这个时间延迟一般是通过磁开关 L 来实现。如果磁开关延迟时间过短,那么形成的触发等离子体密度不够强,会造成触发不充分,导通损耗高,导致器件烧毁;如果磁开关延迟时间过长,存储在 pn 结的等离子体会因复合而减少,从而会导致触发失败,当然可以通过增加触发电流时间脉宽来避免这种情况发生,但这样会增加触发电路的难度和损耗。

为了确保 RSD 器件低损耗下在整个面上一致导通,触发电流必须在一定的时间内提供充足的电荷,触发电荷应满足^[5]

$$Q_R = 3.4 \times 10^{-14} dJ/dt \quad (1)$$

式中: Q_R 为单位面积的触发电荷的临界电荷量,单位 C/cm^2 ,实际触发电荷量必须大于 Q_R ; dJ/dt 为单位面积导通正向电流的上升率。

研究表明触发电流的脉宽在 $0.5 \sim 2.5 \mu s$ 之间比较合适,当然如果能提高触发电流的上升率和幅值,就可以减小磁开关的延迟时间,从而提高整个电路的效率,降低开关组件的体积和重量。

RSD 器件的两端结构以及电流触发特性使得串联应用非常方便。RSD 串联组件的设计最关键的技术在于研制先进的触发系统,并与精确设计的磁开关相匹配,实现组件触发高效、可靠以及组件稳定工作。

2 12 kV 高压 RSD 组件设计

RSD 开关组件采用全固态触发电路设计,具体电路采用图 2 所示两级 RSD 触发技术^[11]。

主脉冲回路 RSD 由 7 只耐压 2.4 kV, 76 mm 管径 RSD 元件串联而成,每只管子并一个 $300 k\Omega$ 电阻来实现均压;触发回路 RSD1 由 8 只耐压 2 kV, 16 mm RSD 元件串联而成,每只管子并一个 $500 k\Omega$ 电阻来实现均压; T 为 1:16 可饱和变压器,磁芯采用 1k101 非晶态合金,截面积为 $4 cm^2$; CC 表示初级触发电路,采用快速晶闸管放电,在饱和脉冲变压器初级产生脉冲电压; MRC 表示去磁电路,去磁采用直流方式; L_0 为磁开关,磁芯采用 1k101 非晶态合金,截面积为 $125 cm^2$ 。RSD 开关组件电路主要由主脉冲回路 $C_0-L_0-RSD-Z_1$ 和辅助触发回路 $C_1-RSD1-R-T$ 组成。

主脉冲回路电容 C_0 和触发回路电容 C_1 (C_1 远小于 C_0) 充电相同的电压 U_0 , 初级触发电路导通,在饱和变压器 T 次级产生一个短脉冲电压 U_{w2} , $U_{w2} > U_0$, 给 RSD1 提供一个触发电流 I_{c1} , 随着变压器 T 的磁芯迅速饱和, RSD1 无延迟开通,当变压器次级电流达最大值时, C 上的电压反相, RSD 反向阻抗非常低,存储在饱和变压器次级的能量为 RSD 提供一个快速上升的触发电流,随着磁开关 L_0 饱和, RSD 快速导通,实现主电容 C_0 对负载 Z_1 的快速放电。

要保证上述电路稳定工作,关键在于:(1)为 RSD 和 RSD1 提供足够触发电荷;(2)实现 RSD1 的触发电流与变压器 T 饱和时间以及 RSD 触发电流与磁开关 L_0 饱和时间之间的精确匹配。

图 3 分别为 10 kV 和 12 kV 时触发系统波形。ch1 为电容 C_1 电压波形, ch2 为 $C_1-RSD1-T-R_1$ 回路电流, ch3 为 RSD 的触发电流。从波形上可以看出,当 C_1 充 10 kV 时,脉冲变压器给 C_1 正向充上的电压约 1.68 kV, RSD1 触发电流大小为 188 A, 脉冲宽度约 $2.0 \mu s$, $C_1-RSD1-T-R_1$ 回路峰值电流 1.71 kA, 电流上升时间 933 ns, 当电容上电压开始反向时, 存储在辅助触发回路电感上的能量为 RSD 提供触发电流, 电流峰值为 2.28 kA, 电流上升时间约 640 ns; 当 C_1 充 12 kV 时, 脉冲变压器给 C_1 正向充上的电压约 1.11 kV, RSD1 触发电流大小为 155 A, 脉冲宽度约 $1.71 \mu s$, $C_1-RSD1-T-R_1$ 回路峰值电流 1.93 kA, 电流上升时间 $1.33 \mu s$, RSD 的触发电流峰值为 2.69 kA, 电流上升时间约 640 ns。

3 高压 RSD 组件大电流试验

利用 1.76 mF 电容器组对 RSD 组件的通流能力进行测试, 10 kV 工作电压下总共开展了 360 多次试验, RSD 组件性能稳定可靠。图 4(a)为 10 kV 试验电压下触发电流和主回路放电波形, 触发电流约 2 kA, 脉宽约

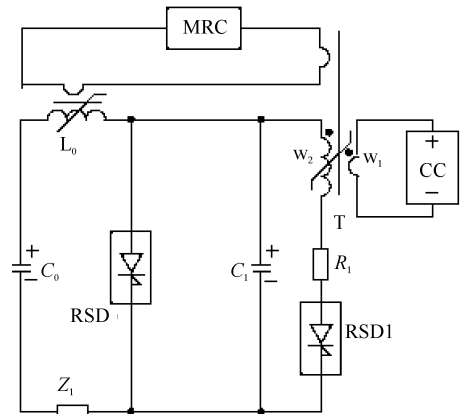


Fig. 2 Circuit diagram of RSD assembly

图 2 RSD 开关组件电路图

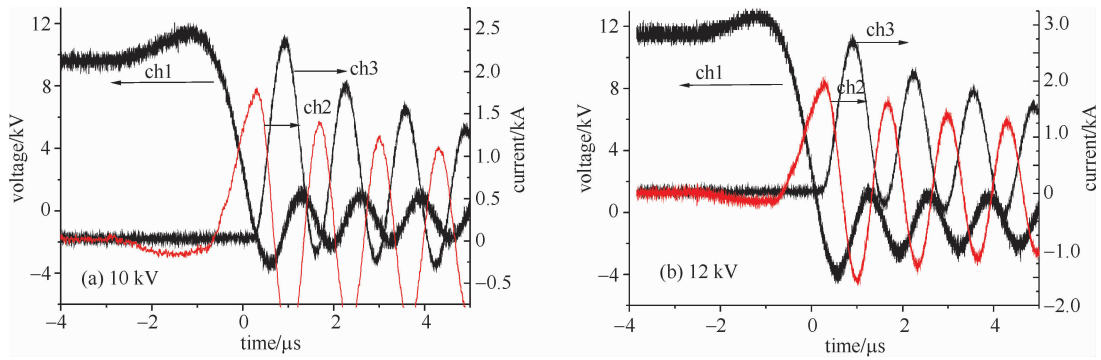


Fig. 3 Waveforms of trigger system for RSD assembly

图 3 RSD 组件触发系统波形

$1 \mu\text{s}$, 主回路放电电流约 110 kA , 脉宽约 $300 \mu\text{s}$, di/dt 约 $3.65 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 。图 4(b) 为 12 kV 试验电压下触发电流和主回路放电波形, 触发电流约 2.7 kA , 脉宽约 $1 \mu\text{s}$, 主回路放电电流约 133 kA , di/dt 约 $4.12 \text{ kA}/\mu\text{s}$ 传输电荷约 24 C , 导通的峰值功率约 1.6 GW 。

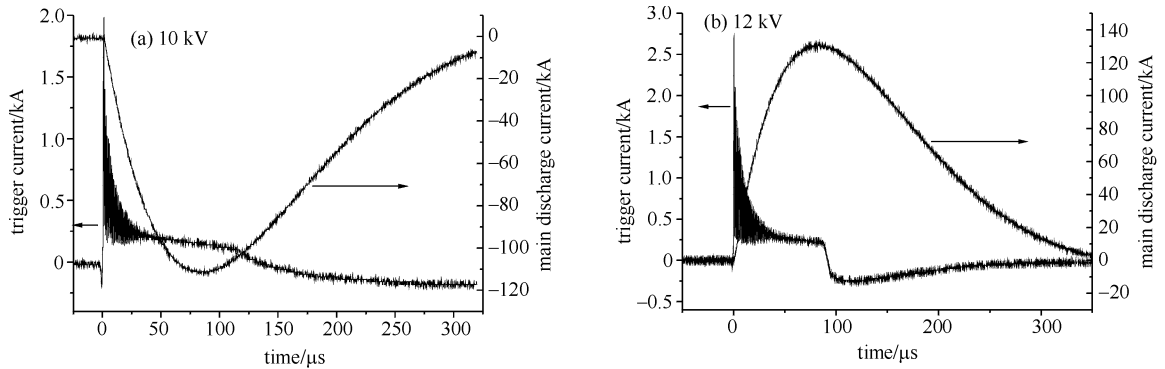


Fig. 4 Experimental waveforms of RSD assembly

图 4 RSD 组件试验波形

4 结 论

利用两级触发原理研制了 12 kV 高压 RSD 组件及其触发系统, 工作电压 $10 \sim 12 \text{ kV}$ 。试验结果表明: 该高压 RSD 串联组件触发稳定, 工作可靠, 12 kV 工作电压下峰值电流可达 133 kA , 传输电荷 24 C , 电流变化率可达 $4.12 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 导通的峰值功率可达 1.6 GW 。

参考文献:

- [1] Savage M E. Final results from the high-current, high-action closing switch test program at Sandia National Laboratories[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2000, **28**(5):1451-1455.
- [2] Gorbatyuk A V, Grekhov I V, Nalivkin A V. Theory of quasi-diode operation of reversely switched dynistor[J]. *Solid-State Electronics*, 1988, **31**(10): 1483-1491.
- [3] Grekhov I V. Mega and gigawatts-ranges, repetitive mode semiconductor closing and opening switches[C]//Proc 11th IEEE Int Pulsed Power Conf. 1997:425-429.
- [4] Schneider S, Podlesak T F. Reverse switching dynistor pulsers[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2000, **28**(5): 1520-1523.
- [5] Korotkov S V. Switching possibilities of reverse switched-on dynistors and principles of RSD circuitry[J]. *Instrument and Experimental Techniques*, 2002, **45**(4): 437-470.
- [6] Grekhov I V, Kozlov A K, Korotkov S V. High-voltage RSD switch of submegaampere current pulses of microsecond duration[J]. *Instrument and Experimental Techniques*, 2003, **46**(14): 48-53.
- [7] Chumakov G D, Galakhov I V, Gudov S N, et al. Switching of high-power current pulses up to 250 kA and submillisecond duration using new silicon devices-reverse switched dynistors[C]//Proc 10th IEEE Int Pulsed Power Conf. 1995: 1103-1108.
- [8] 何小平, 徐日, 汤俊萍, 等. 新型大功率半导体 RSD 开关[C]//第八届高功率粒子束暨高压学术交流文集. 2001: 59-61. (He Xiaoping, Xu Ri, Tang Junping, et al. A high power semiconductor reversely switching dynistor//Proc of 8th National Symposium on High Power Particle Beam and High-Voltage. 2001:59-61)
- [9] 周郁明, 余岳辉, 梁琳, 等. 超高速大电流半导体开关实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(3): 447-450. (Zhou Yuming, Yu Yuehui,

- Lian Lin. Experimental investigation of ultrafast and high current semiconductor switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18** (3): 447-450
- [10] 王海洋, 何小平, 徐燕. 基于反向开关晶体管的重复频率脉冲电流源[J]. 强激光与粒子束, 2007, **19**(6): 1053-1056. (Wang Haiyang, He Xiaoping, Xu Yan. A rep-frequency pulsed-current source based on reversely switching dynistor. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(6): 1053-1056)
- [11] Wang Haiyang, He Xiaoping, Chen Weiqiang, et al. A high current high di/dt pulse generator based on reverse switching dynistors[J]. *IEEE Trans on Plasma Science*, 2009, **37**(2): 356-358.

12 kV high voltage reversely switched dynistor assembly

He Xiaoping, Wang Haiyang, Zhou Jingzhi, Chen Weiqing, Xue Binjie, Tang Junping, Qiu Aici
(Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-10, Xi'an 710024, China)

Abstract: The structure and working principle of reversely switched dynistor(RSD) semiconductor closing switch are introduced. Design techniques of the high voltage RSD assembly are analyzed. A 12 kV RSD assembly and its trigger system have been designed and constructed, which can operate at 10~12 kV. Test results show the stable and reliable operation of this assembly. Under 12 kV, the peak amplitude of current could reach 133 kA, with 24 C charge transferred and current rising rate of 4.12 kA/ μ s, and the peak power switched could reach 1.6 GW.

Key words: reversely switched dynistor; solid-state switch; magnetic switch; high current; high coulomb