

文章编号: 100124322(2004)1121481204

基于 MOSFET 的固体开关技术实验研究^X

赵军平, 章林文, 李 劲

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 106 室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 采用两只 1kV MOSFET 器件及驱动模块和高带宽光纤收发对, 研究了固体开关技术中的触发信号高压隔离、功率 MOSFET 器件栅极驱动及 MOSFET 串并联使用等关键技术。单器件开关获得了 1kV, 13A, 4MHz 重复频率的脉冲串输出。两器件并联开关获得了 130A, 2MHz 的输出。两器件串联开关获得了 116kV, 2MHz 重复频率脉冲串输出。

关键词: FDTD; MHz 重复频率; MOSFET; 固体开关

中图分类号: TL531.1 **文献标识码:** A

高重复频率的脉冲功率源技术一直是脉冲功率技术的研究热点, 在加速器、高功率微波、医用和环保等领域具有潜在的应用前景, 其中的关键技术是高重复频率的开关技术。目前, 高重复频率的固体开关技术成为脉冲功率领域研究的重点之一。美国、日本等国近年来都对兆赫兹的固体开关技术进行了大量的研究。大型固体开关装置的应用实例有 LLNL 的 ARM2II 调制器装置及 DARHT2II 的 Kicker 系统等。

目前, 高电压、高平均功率的固体开关一般由大量的功率电子器件构成。适合构成兆赫兹重复频率固体开关的功率电子器件有金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)、砷化镓光导开关 (GaAs2PCSS) 等。此类功率电子器件具有高速通断能力、低触发能量、脉宽可调的特性, 构成的固体开关具有高重复频率、脉宽可调、长寿命、可靠性高等优点。单个功率电子器件的耐压和电流有限, 就 MOSFET 而言, 目前的器件电压一般在 1kV, 电流在数十安培的水平。高电压、高功率的固体开关需要对大量的功率电子器件进行串联和并联使用, 以提高开关整体的电压和电流。

功率电子器件串联和并联使用时涉及到触发信号的高压隔离技术、驱动信号同步技术及功率器件的动态和静态电压均衡技术。本文采用功率 MOSFET 器件, 对上述相关技术进行初步的试验研究。

1 实验电路

单器件开关实验装置结构如图 1 所示。考虑到多个 MOSFET 工作时, 可能会产生相互干扰, 而对触发电路采用了光纤隔离, 即将信号源信号经过光纤发射器电光转换后, 通过光纤传输由光纤接收器接收, 将光信号转换为电信号, 控制功率回路部分。试验装置采用安捷伦 (Agilent) 公司生产的光纤收发对 HFBR21119T/HFBR22119T, 50 μ m 内芯的多模光纤、DEI 公司生产的功率 MOSFET 器件 DE4752102N21A 和 MOSFET 驱

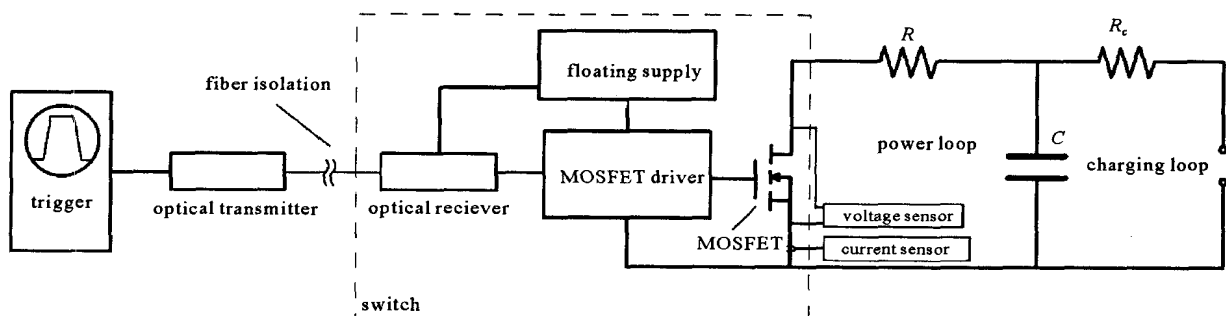


Fig. 1 Test circuit of single MOSFET switch

图 1 单器件开关试验线路

X 收稿日期: 2004206207; 修订日期: 2004208205

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 赵军平 (1979 -), 男, 陕西咸阳人, 硕士研究生, 主要从事加速器脉冲功率系统领域的研究工作。四川绵阳 919 信箱 106 分箱;

E2mail: flamefish@sina.com.

动模块 DEIC420。试验线路功率回路采用时间常数 $\tau = 1.5\text{ms}$ 的 RC 放电回路,远大于试验中单脉冲几百 ns 的脉冲宽度,使几个脉冲的幅度基本相同。用高频高压探头测量开关上的电压波形,高频电流探头测量 RC 放电回路的电流来研究开关性能。

MOSFET 器件串联开关试验线路如图 2 所示。每个 MOSFET 器件采用独立的光纤隔离系统和驱动电路。并联开关线路与串联开关线路类似,同样采用独立的光纤隔离系统和驱动电路,每个 MOSFET 的漏极与漏极、源极与源极直接连接。

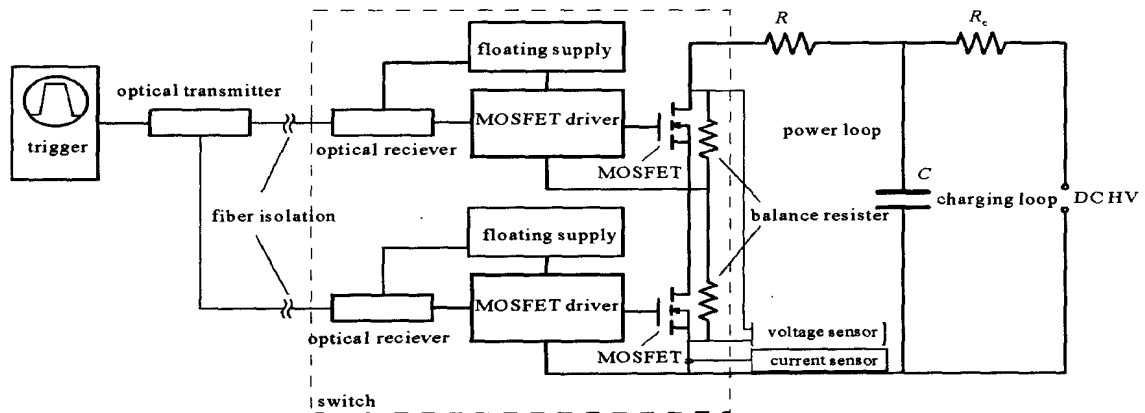


Fig. 2 Test circuit of series MOSFET switch

图 2 MOSFET 器件串联开关试验线路

信号源给出的是 TTL 电平的信号,光纤发射器的输入电平和光纤接收器的输出电平都是 PECL 电平,MOSFET 驱动芯片的输入电平是 TTL 电平,触发信号的光纤发射部分和接收部分主要功能是进行逻辑电平转换,以满足不同芯片的输入要求。

2 实验结果与分析

2.1 触发信号光纤隔离线路性能测试

光纤本身是由绝缘材料制成,具有很好的高电压隔离能力,同时还具有很强的抗干扰能力,多路光纤信号传输的同步性也非常好,非常适合单一信号触发多个 MOSFET 器件对信号高压隔离和同步性的要求。光纤隔离线路所选芯片的上升时间均小于 2ns ,在输入信号达到隔离线路芯片的导通阈值之后,输出信号的状态可以在 2ns 内迅速切换,从而使输出信号的前后沿均小于 2ns 。触发脉冲宽度为 250ns 的波形经两路光纤隔离线路后的输出波形如图 3 所示。图中两路信号的脉宽均与源信号相等,其不同步时间为 700ps ,是由传输线路及隔离线路中的芯片延时不同和芯片本身的抖动造成。

驱动芯片输出电压的抖动会进一步增大多路 MOSFET 栅极驱动电压的不同步。图 4 是同一触发信号经两路光纤隔离后在两路 MOSFET 栅极上的驱动电压波形,两个驱动电压的不同步时间增大到 2.4ns 。相对于开关 ns 量级的导通时间, 2.4ns 的不同步性不会造成较大的影响,可以保证两个 MOSFET 器件在开关过程中同步动作,使动态过程中两器件上的压降基本相同,不会因动态过程电压分配不平衡在 MOSFET 器件上产生瞬态过电压。

MOSFET 器件的栅极驱动过程类似于驱动电路对栅极电容的充放电过程,因此栅极驱动电压波形的前后沿明显大于触发信号。

实验结果发现,栅极驱动电压的前后沿对开关的前后沿影响不大,只对多路驱动的不同步性有较大影响。影响开关前后沿的主要因素是栅极驱动电压的幅度,驱动电压幅度越高可以获得更小的导通时间。为减小驱动电压的前后沿,提高多路驱动的不同步性,驱动回路设计为回路电阻略小于临界阻尼电阻的欠阻尼回路。

2.2 单器件开关驱动线路及开关性能测试

试验通过测量 MOSFET 开关上的电压和功率回路中的电流来研究开关的性能。

开关外加高压为正电压,测得开关电压信号为负向的脉冲信号。图 5 为 MOSFET 单器件开关在触发脉冲分别为 250ns , 167ns 和 125ns 时的电压和电流波形。从图示波形可见,开关的电压、电流波形脉宽均与对应的触发脉宽近似相等。图示电压波形的前沿均为 19ns ,后沿稍慢,均为 30ns 。该试验结果表明开关的导通时间可

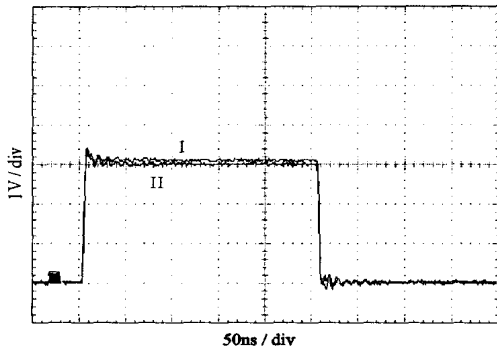


Fig. 3 Output voltage of two fiber isolation circuits

图 3 经过光纤隔离系统后的两路触发信号

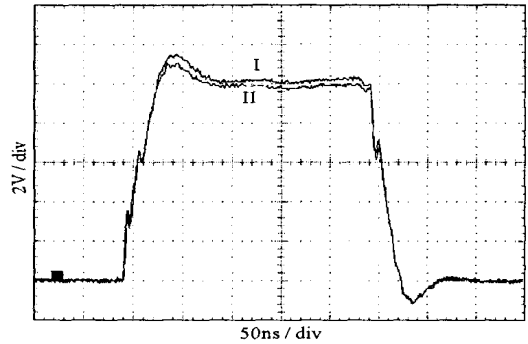


Fig. 4 Voltage of two gate driving circuits

图 4 两路驱动信号的电压波形

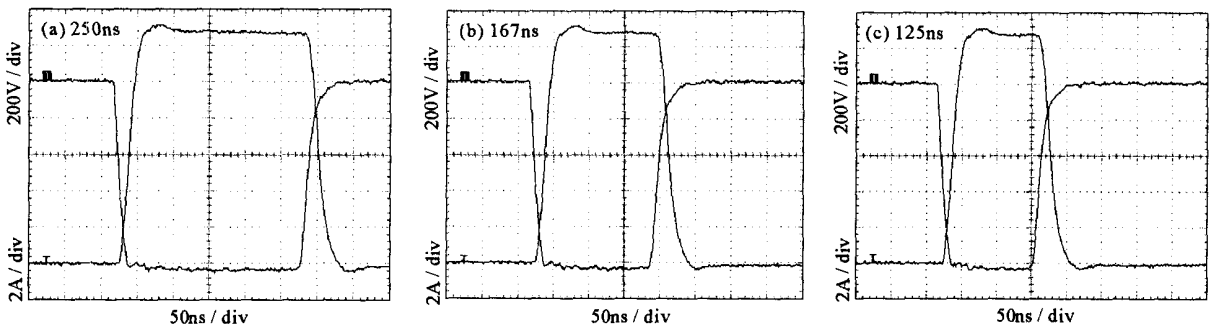


Fig. 5 Voltage and current of single MOSFET switch triggered by pulses of different width

图 5 不同触发脉冲宽度下的开关电压和电流波形

以通过触发脉冲的宽度加以控制。

限制开关重复频率的因素有 MOSFET 器件的开关速度、驱动电路性能以及功率器件的散热条件等。在只需要几个输出脉冲的应用场合,可以不考虑散热条件。根据目前试验条件及线路设计,单器件开关可以在小于 5MHz 的重复频率下工作,在触发源以 BURST 工作方式,4MHz 重复频率输出 4 个触发脉冲时的开关电压电流波形如图 6 所示。开关电压为 1kV,输出电流为 13A。从图示波形可见开关电压及电流脉冲波形具有良好的一致性。

2.3 两 MOSFET 器件串联和并联的 MOSFET 开关的性能测试

串联使用 MOSFET 器件静态电压均衡由图 2 所示的均压电阻实现,选用 500k 的电阻可以达到较好的均压效果。动态过程的电压均衡主要依赖驱动信号的同步性来实现。在相同驱动条件下,两个 MOSFET 串联后的电压和电流波形的前后沿与单 MOSFET 开关相比稍有增大。两器件串联后,由于驱动信号并不是严格同步,在确保 MOSFET 器件不会过压的情况下,以 BURST 方式、2MHz 重复频率可以获得 1.6kV,250ns 脉宽的 4 个脉冲输出,如图 7 所示。串联使用的两个开关之间存在相互耦合,会使驱动电压振荡增大,导致串联后开关的前后沿均有增大(前沿约 30ns,后沿约 40ns)。振荡同时可能使 MOSFET 工作点由可变电阻区进入恒流区,使开关两端电压升高,使导通时开关电压波形平顶部分有较大的毛刺。

单个 MOSFET 器件可以通过的电流是有限的,过大的电流会影响 MOSFET 器件的驱动电路正常工作,降低开关工作速度;严重的过电流会造成器件损坏。在本试验所采用的线路中,单器件开关的工作电流上限为 80A,更高的电流将导致驱动电路不能正常工作。可以通过使用多个 MOSFET 器件并联来降低单个器件中的电流使开关能正常工作,并获得更大的开关总电流。两器件并联时,以 BURST 方式、2MHz 重复频率可以获得 250ns 脉宽、130A 的 4 个电流脉冲,如图 8 所示。试验线路以 1kV 电压获得 130A 的电流,由于回路中电阻较

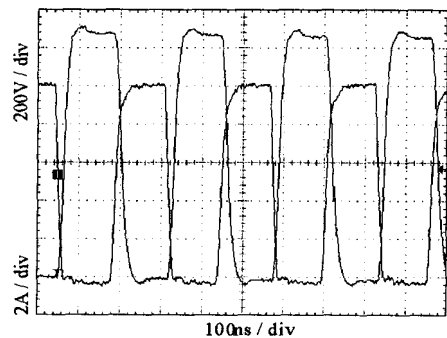


Fig. 6 Voltage and current of MOSFET switch

图 6 BURST 方式 4MHz 重复频率下的开关电压电流波形

小,分布电感的影响比较明显,使电流波形前后沿增大。

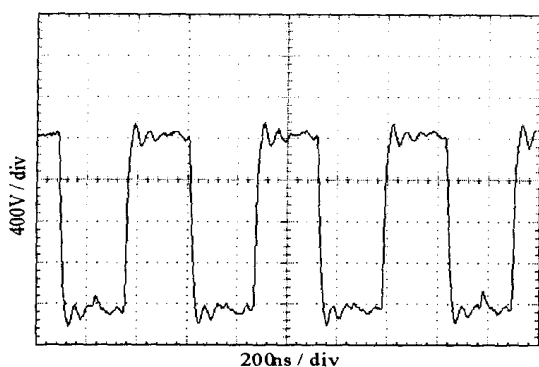


Fig. 7 Voltage of two series MOSFET switch
图 7 两个 MOSFET 器件串联开关电压波形

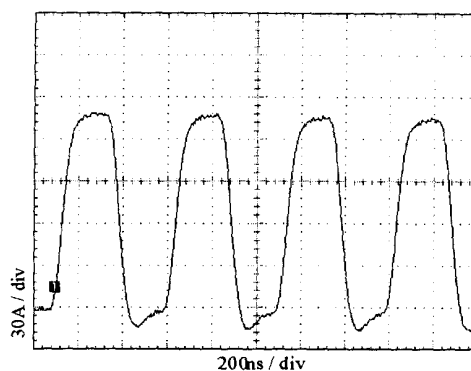


Fig. 8 Current of two parallel MOSFET switch
图 8 两个 MOSFET 器件并联开关电流波形

3 结 语

试验表明,采用的光纤隔离措施很有效;开关通断状态可以通过触发脉冲控制;单 MOSFET 器件开关可以在 10V 栅极驱动电压下以 BURST 方式获得 1kV, 13A, 4MHz 重复频率的 4 脉冲输出;串、并联使用 MOSFET 器件构成更高电压和更大电流开关的技术途径已被证实。

最影响 MOSFET 开关性能的是驱动回路的品质。MOSFET 开关电路印刷电路板中,控制电路极易受到功率回路的干扰;驱动电路由于要求尽可能大的电流,所以要尽量减小阻抗,而这样又容易引起驱动电路振荡,提高阻抗又降低了驱动电流,降低了开关的开关速度和重复频率,在实际的电路设计中往往要在驱动品质与抑制振荡能力之间做折中选择。开关试验中存在的问题如减小波形前沿,抑制波形平定振荡等正在深入探索。

参考文献:

- [1] Saethre R, Kirbie H, Caporaso G, et al. Optical control, diagnostic and power supply system for a solid state induction modulator[A]. Proceedings of 11th IEEE International Pulsed Power Conference[C]. Baltimore Maryland, 1997. 1397—1402.
- [2] Kirbie H, Caporaso G, Gierz D, et al. MHz repetition rate solid2state driver for high current induction accelerators[A]. 1999 Part Accel Conf[C]. New York City, 1999. 423—427.
- [3] Yee H P. An EMI suppression MOSFET driver[A]. Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition[C]. Twelfth Annual, 1997. 242—248.
- [4] Chitta V, Hng S. Series connection of IGBT's with active voltage balancing[J]. IEEE Transaction on Industry Application, 1999, 33(4): 917—923.
- [5] 甘孔银,汤宝寅,王小峰,等. 绝缘栅双极晶体管固体开关技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 954—956. (Gan K Y, Tang B Y, Wang X F, et al. Resarch on IGBT solid state switch. High Power Laser and Particle Beams. 2002, 14(6): 954—956)

Experiment on MOSFET solid state switch

ZHAO Jun2ping, ZHANG Lin2wen, LI Jin

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 9192106, Mianyang 621900, China)

Abstract: The key technologies of building a high repetition rate solid state switch were studied with two power MOSFET components, two MOSFET drivers, and fiber as high voltage isolator and optical data link. These technologies are trigger signal high voltage isolation technology, power MOSFET drive technology, power MOSFET parallel link and series link technology. Outputs of 1kV, 13A, 4MHz repetition rate on single MOSFET switch, 1.6kV, 2MHz repetition rate on two series MOSFET switch, and 130A, and 2MHz repetition rate output on two parallel MOSFET switch have been got.

Key words: MHz repetition; MOSFET; Solid state switch