

文章编号: 1001-4322(2003)10-1033-04

10kV 绝缘栅双极型晶体管固体开关的研制*

甘孔银¹, 汤宝寅¹, 王浪平¹, 王小峰¹, 王松雁¹, 卢和平², 黎明², 朱剑豪³

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;

3. 香港城市大学 应用物理和材料科学系, 香港特别行政区)

摘要: 采用 8 只 IXL F19N250A 绝缘栅双极型晶体管串联研制成功了 10kV 固体开关。试验表明: 该固体开关最高输出电压为 14kV, 最高输出脉冲电流为 20A, 输出脉冲宽度可在 2112 μ s 之间以 1 μ s 步长变化, 脉冲重复频率范围为 1Hz~4kHz, 短时间可以工作到 8.6kHz。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 固体开关; 串联

中图分类号: TN602

文献标识码: A

由于高重复频率固体开关在加速器、雷达发射机、高功率微波和污染控制等领域具有潜在优势, 美国、英国、日本和韩国都对固体开关技术进行了大量研究^[1~4], 从而成为近年脉冲功率领域研究的重点之一。从固体元件电路结构上固体开关可以分成两种类型: 串联结构和累加器结构。采用串联结构的固体开关比较著名的单位有 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) 和 DTI (Diversified Technology Inc.), 采用累加器结构固体开关比较著名的是美国的 LLNL 和 First Point Scientific Inc^[5]。

根据不同的应用需求, 固体开关中的单元功率器件也不相同, 如果要求固体开关具有很快的开关速度和很高的重复频率, 那么单元功率器件一般会采用功率 MOSFET 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)。IGBT 固体开关同时具有开路开关和闭路开关特性, 基本上接近于理想开关, 因此可以输出任意脉冲宽度的脉冲波形; 此外 IGBT 还具有 MOS 和双极型晶体管的优点, 与其他开关相比, IGBT 固体开关在能耗、控制等方面都具有优势, 同时固体开关在许多方面有潜在的应用, 故我们在几家单位的资助下研制了 10kV IGBT 固体开关。

1 固体开关技术设计

研究 IGBT 固体开关时, 考虑到资助方有不同应用需求, 因此确定了固体开关技术参数: 最大输出脉冲电流 10A; 脉冲宽度为 2~100 μ s, 可调步长为 1 μ s; 重复频率 100Hz~2kHz; 上升时间 t_{up} 1 μ s (纯阻性负载)。

基于以上技术参数, 我们对世界上主要 IGBT 生产厂家的 IGBT 进行了大量调研, 并对其中的 IGBT 进行了试验。选用 IGBT 一般遵从以下原则: (1) 鉴于 IGBT 同步技术上的困难和驱动成本, IGBT 的工作电压应当较高; (2) 开关速度要快, 一般可以选用总开关电荷和输入电容小的 IGBT; (3) 综合价格因素。

10kV IGBT 固体开关的单元设计与文献[6]中讨论的基本一样, 因此仅给出该固体开关电路示意图, 如图 1 所示。10kV IGBT 固体开关由 8 只 IXL F19N250A IGBT 组成, 8 只 IGBT 的控制采用光纤来实现, 光纤控制的好处在于可以很好地解决高压隔离、同步和噪音抑制方面的问题; Module1-1, Module1-2...Module1-8 是电源模块, 其功能是向 IGBT 驱动电路模块提供电源; Module2-1, Module2-2...Module2-8 是驱动模块, 其功能是接收通过光纤传送来的控制信号, 并输出信号来控制 IGBT 的开关动作; Module3-1, Module3-2...Module3-8 是 IGBT 的静态和动态电压平衡模块, 该类模块可以实现静态动平衡和抑制导通时间相差 500ns 时 IGBT 上的过压。

2 试验结果和讨论

图 2 是固体开关试验电路图, 图中的固体开关是用一个 open-switch 和 close-switch 来表示。在固体开关导通时, 图 2(a) 中的固体开关两端都处在高电位; 而图 2(b) 中的固体开关则处于低电位。图 2 中的固体开关

* 收稿日期: 2002-11-18; 修订日期: 2003-06-02

基金项目: 中国工程物理研究院院基金资助课题; 香港城市大学研究基金资助课题

作者简介: 甘孔银(1967-), 男, 博士研究生, 主要从事固体开关技术和等离子体表面处理技术研究; E-mail: Tangby@hope.hit.edu.cn

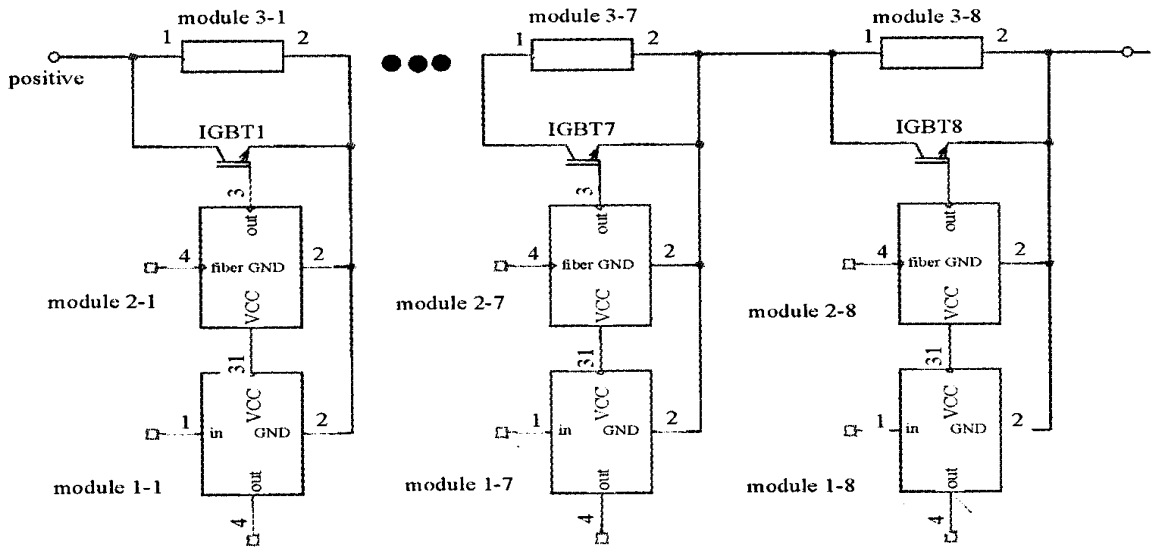


Fig. 1 Block circuits of 10kV solid state switch

图 1 10kV 固体开关电路结构示意图

具体工作情况是：控制器（没有在电路中给出）向光发射器输入不同脉冲宽度和不同频率的电控制信号，由光发射器将电信号转化为控制 IGBT 的光信号，通过光纤传输到 IGBT 驱动电路中的光接收器，由光接收器输出电信号，然后再通过 IGBT 驱动模块来控制 IGBT。通过测量取样电阻上的电压波形来确定 1k 无感阻性负载上的电压和电流波形。

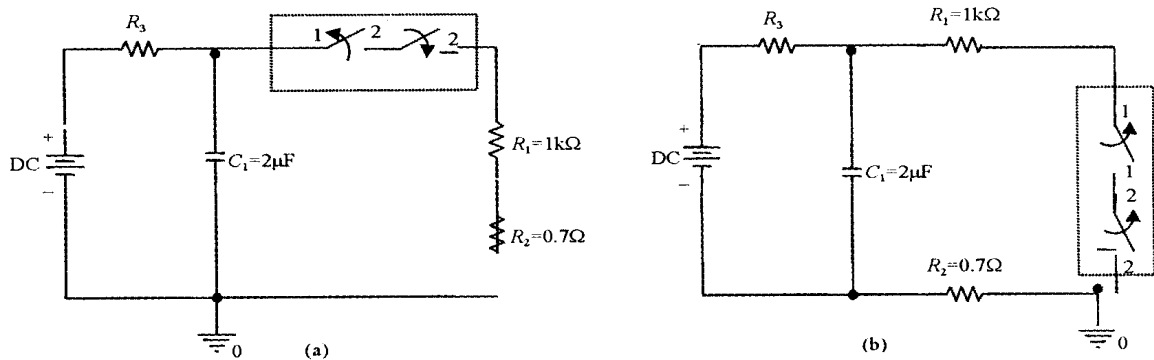


Fig. 2 Experimental circuits of the solid-state switch

图 2 固体开关试验电路图

在试验时，测量了各 IGBT 门上的驱动信号，然后再加高压，测量电阻 R_2 上电压波形。然后将 10kV DC 电源改变极性，再重复上述试验步骤。

1# 和 2# IGBT 驱动门上的驱动信号如图 3 所示。图中的驱动波形上有一负脉冲，该负脉冲的作用是加快 IGBT 的关断，降低 IGBT 的关断损耗。以光发射信号为时间基准来测量各 IGBT 的相对延迟，然后来确定各驱动信号之间的同步误差，并检验同步设计和动态电压设计是否达到设计指标。

表 1 各 IGBT 门驱动信号技术参数

Table 1 Technical specifications of the driving signal for IGBT

IGBT No.	1	2	3	4	5	6	7	8
rise time / ns	543	534	529	529	529	528	549	542
fall time / ns	266	263	265	265	265	266	264	266
amplitude / V	14.66	14.70	14.72	14.72	14.74	14.75	14.91	14.88
delay / ns	272	269	270	270	270	271	268	275
pulse width / μs	19.420	19.432	19.438	19.439	19.439	19.441	19.419	19.420

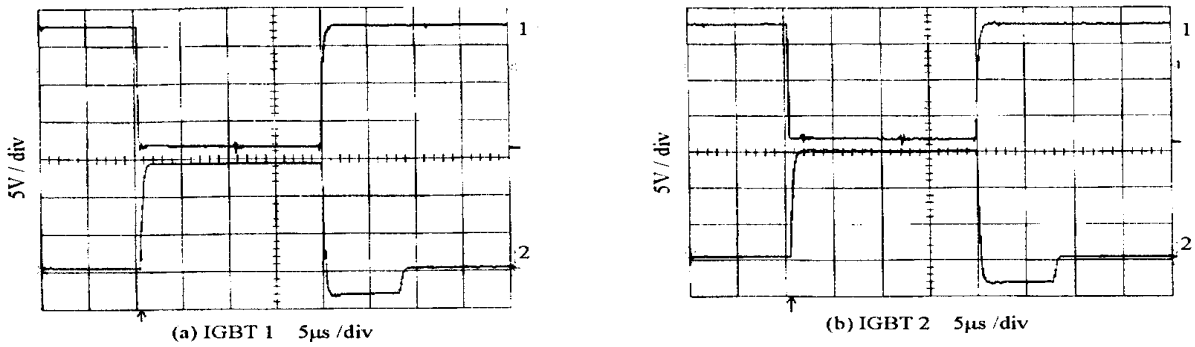


Fig. 3 Voltage waveforms measured on the optical transmitter (1) and gates of the IGBT (2)

图 3 光纤发射器上的电压波形(1)和 IGBT 驱动门上的电压波形(2)

表 1 给出了测量的 8 路 IGBT 驱动信号的主要技术参数。可以看到,8 只 IGBT 门驱动电压波形的参数一致性比较好。上升时间之差最大为 20ns,下降时间之差最大为 2ns,与光驱动信号的平均延迟为 271.6ns,相对延迟最大相差 6ns。由于第 8 路光纤比其他路光纤长 1m,那么第 8 路的相对延迟应当为 272ns,因此相对延迟最大相差仅为 3ns。平均脉冲宽度为 19.431μs,脉冲宽度相差最大为 22ns。将上升时间、下降时间、相对延迟和脉冲宽度都考虑在内,IGBT 驱动门上驱动信号的时间差最大为 47ns。按照我们的设计,电压平衡模块在导通时间相差 500ns 时也可以抑制 IGBT 上的过压,因此该开关不会出现过压问题。

图 4 是在取样电阻上测到的电压波形,分压比约为 1/400。图 4 (a,b,c)是 DC 电源极性为负时测到的波形,图 4 (d)是 DC 电源极性为正时测出的。波形图下的电压幅度是由阻容分压器测出的数值。一般情况下,上升时间小于 300ns,下降时间小于 2μs,相对于光发射信号延迟为 500ns 左右。实验中还发现:随着电压升高,相对延迟、上升时间和下降时间逐渐增大。当电压为 8kV 时,相对延迟约为 470ns,上升时间为 218ns,下降

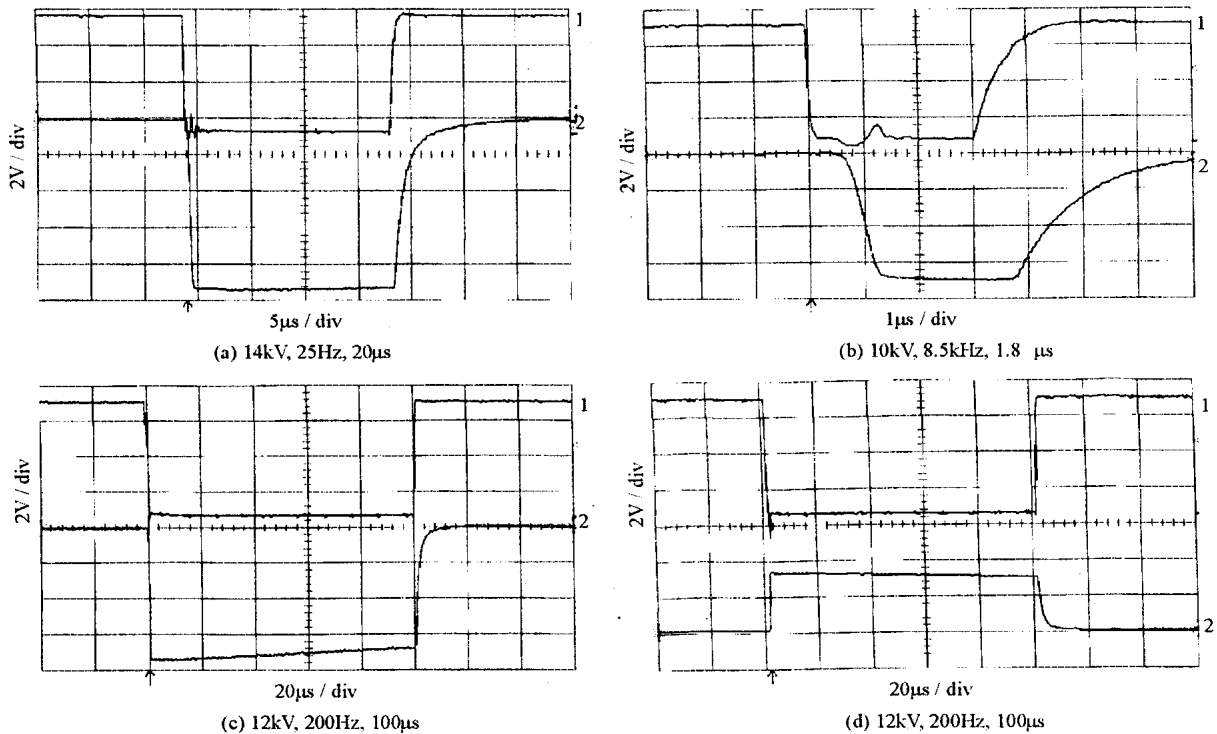


Fig. 4 Voltage waveforms (2) measured on the sample resistor under different operation parameters and voltage waveforms measured on the optical transmitter (1)

图 4 不同脉冲宽度、不同重复频率和不同电压负载电阻上的电压波形 (2)和光纤发射器驱动信号(1)

时间为 1.25μs;但电压升高到 14kV,相对延迟变成了 520ns,上升时间为 300ns,而下降时间则变成了 3.5μs。造成 IGBT 高压固体开关下降沿增加的原因在于 IGBT 器件中的恢复时间随外加电压增加而增加。

根据厂家给出的技术参数,当工作电压为 1.5kV、感性负载、电流 19A、驱动电压 ±15V、驱动回路电阻 47

时,IGBT 开关延迟 200ns,上升时间为 100ns,下降时间为 50ns。由于实验中 IGBT 驱动信号相对于光纤发射信号延迟约 270ns,因此实验中 IGBT 开关延迟约为 230ns,与厂家给出的数值比较一致,但下降时间相差比较大。

3 总结

研制成功了 IGBT 串联的 10kV 固体开关,实验测试表明:该开关的实际性能达到甚至优于我们的设计指标。此外,在测试中还发现 IGBT 串联固体开关的延迟随工作电压增加而增加,以及下降时间与厂家给出的技术数据有比较大的差异。对上述现象还将继续进行研究和模拟,并要在固体开关的可靠性方面进行大量工作,以便为研制更高电压的固体开关打下基础。

致谢 该课题得到了中国工程物理研究院基金,香港城市大学研究基金的资助,并感谢中国工程物理研究院的孙壁英高级工程师在研制固体开关方面所给予的大力帮助。

参考文献:

- [1] Gaudreau, M P J, Casey J, Hawkey T J, et al. Solid-state modulators for plasma immersion ion implantation applications[J]. *J Vac Sci Technol*, 1999, B17(2): 888—894
- [2] Saethre R, Kirbie H, Caporaso G, et al. Optical control, diagnostic and power supply system for a solid state induction modulator [R]. DE98058828, 1997.
- [3] Kirbie H, Caporaso G, Goerz D, et al. MHz repetition rate solid-state driver for high current induction accelerators[A]. Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference[C]. 1999. 625—627.
- [4] Maulat O, Roche M, Pelletier J, et al. New line of high voltage high current pulse generators for plasma-based ion implantation[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology*, 1999, B17(2): 879—882.
- [5] Cook E. Review solid state switch[A]. XX International Linac Conference[C]. Monterey, California, 1999. 663 - 667.
- [6] 甘孔银,汤宝寅,王浪平,等. 固体开关研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 954—956. (Gan K Y, Tang B Y, Wang L P, et al. Research on IGBT solid state switch. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 954—956)

Development on the 10kV solid-state switch

GAN Kong-yin¹, TANG Bao-yin¹, WANG Lang-pin¹, WANG Xiao-feng¹, WANG Song-yan
LU He-pin², LI Ming², CHU Paul³

(1. Key State Laboratory of the Modern Welding Production Technology,

Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Institute of the Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics.

P. O. Box 919-1014, Mianyang 621900, China;

3. Department of the Material Science and Applied Physics,

City University of Hong Kong, Kowloon Hong Kong, China)

Abstract: A 10kV solid-state switch for high pulse power application has been developed. The prototype makes use of switches made of arranged in series. The output voltage can be adjusted from 1 to 10kV and the pulse width can be varied from 2 to 110 microseconds, the pulsing frequency in the initial design can be changed from 1Hz to 4kHz. Experimental results show that the solid-state switch can operate in the frequency up to 8.6kHz and in the voltage up to 14kV. The typical rise time is less than 300ns and the typical fall time is about 1.25 μ s.

Key words: Isolated gate bipolar transistor (IGBT); Solid-state switch; Series