2019 年 4 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2019)02-0343-05

10 kV 高重频开关组件设计

石小燕,任先文,丁恩燕,杨周炳,梁勤金

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要:设计了一种基于功率金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)的高压开关组件。通 过串联20只1 kV的RF MOSFET单元电路,获得耐压10 kV以上的高速、高重复频率的开关组件。开 展了高压开关组件的结构设计和1 kV的RF MOSFET单元电路设计及散热设计。利用开关组件进行 了10 kV脉冲源实验装置设计,测试结果发现脉冲前沿较仿真结果变缓。

关键词: 高压开关组件; 高重复频率; 高速; 串联电路; 散热设计

中图分类号: TN788 文献标志码: A doi: 10.11805/TKYDA201902.0343

Design of high repeat frequency switch module with 10 kV

SHI Xiaoyan, REN Xianwen, DING Enyan, YANG Zhoubing, LIANG Qinjin (Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A design of high voltage switch module based on a stack of Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor(MOSFET) is put forward. By stacking 20 RF MOSFETs with U_{ds} of 1 kV, the switch module shows high speed and high repeat frequency, and can operate above 10 kV. The structure of high voltage switch module, a unit circuit using one RF MOSFET switch and a method of cooling the switch are designed. A pulse generator circuit based on the high voltage switch module is simulated. A 10 kV pulse generator is created by the stack. The turn-on time of pulse generated by experimental device is lower than simulated result.

Keywords: high voltage switch module; high repeat frequency; high speed; in series; cooling circuit

高重复频率高压脉冲源在高速瞬态特性测试仪、脉冲群测试仪、电脉冲肿瘤消融系统、快速移动目标的测速测距等众多测试仪器、等离子体发生器及激光器驱动等领域具有广泛应用。高重复频率高压脉冲源对输出脉冲波形(特别是上升时间和脉宽)和重复频率的要求较高。受器件材料的限制,高重复频率、高速开关一般耐压较低,为获得高耐压、高重复频率、高速、大功率的脉冲输出,常用的脉冲产生方法有:多个开关器件串并联、电压叠加(Marx发生器、直线变压器、层叠 Blumlein线等)和不同开关器件的组合线路 3 种方式。国外研究主要侧重在雪崩三极管、MOSFET、快速离化二极管(Fast Ionization Dynistors, FID)等开关器件的极限使用及性能提高、新型半导体器件、新型电路拓扑等方面。英国 Kentech 公司推出了基于雪崩三极管和场效应管的高压脉冲源,单模块峰值电压可达 10 kV,最高重复频率为 30 kHz,通过模块串并联可提高峰值电压,但受开关功率限制,脉宽仅为 15 ns 以内^[1]。基于 MOSFET 的非瞬态工作高压脉冲源,脉宽一般在 100 ns, 10 kV 及以上,大电流的脉冲前沿大多在 20 ns 以上^[2-5]。德国 FID 公司利用俄罗斯发明的非商业化推广器件 FID、漂移阶跃恢复二极管离化开关,研制出重复频率 50 Hz~3 MHz,电压 1~300 kV 的脉冲源。随着电压及脉宽的增加,其重复频率急剧下降,在 10 kV 时,当脉宽在 10 ns 以上,其前沿可做到 3 ns 以下,重复频率一般不超过 1 kHz^[6]。国内从事高重频固态脉冲源研制采用开关有雪崩管类、MOSFET、闸流管等,基于雪崩管的脉冲源单元可产生 1~10 kV,脉冲半高宽在 5 ns 以下,重复频率 1~200 kHz^[7-8];基于非瞬态工作模式下的高重复频率、快脉冲的 MOSFET 的纳秒脉冲源仍处于研究阶段,电压一般在几百~10 kV,重复频率在 100 kHz 以下^[9-12]。

基于多个单开关串并联堆叠技术的高重复频率高速开关组件是脉冲发生器一项重要研究。开关组件可作为一

个开关使用,能同时满足脉冲源的脉冲宽度、前沿、重频、电压等参数宽范围调节。国外很早就开始了低压高速 开关的串并连研究,其中以德国 BEHLKE 公司为典型代表,其 10 kV 高压开关模块的瞬态重复频率为 3 MHz, 最快上升时间为 5 ns,峰值电压更高的开关则在上升时间和重复频率指标上有所降低^[13]。国内对高重复频率、高 速、高压的串并联开关目前还处于研究阶段,研制的开关组件耐压在几百~10 kV,重复频率在 100 kHz 以下,前 沿 20~100 ns^[14-15]。

本文将设计一组耐压 10 kV 以上,电流 20 A,前沿小于 5 ns,最高重复频率可达 400 kHz 的高压开关组件。 由于要求开关工作时的脉冲源宽度大于 10 ns,因此本项目将采用高速 MOSFET 串联的方式,对组件的结构、散 热、驱动、应用等进行设计。

1 高压开关组件结构设计

高压开关组件结构如图 1 所示。采用 20 个 1 kV 的 MOSFET 开关串联成一个高压开关组件。每个开 关加上其外围电路构成一个单元电路,每个单元电 路包括光电转换触发输入、触发信号延时调节电 路、MOSFET 驱动电路等外围电路和为外围电路供 电的电源电路、MOSFET 开关。

单元板电路如图 2 所示。外围供电电源采用 220 V_{ac}/50 Hz 市电, 经整流滤波产生约 311 V_{dc} 的 电压,通过隔离变压器为单元开关电路提供控制电路电源。相对于从 MOSFET 的 D 极取电,采用这样的电路更复杂,但对开关组件的高压供电电源的 变化范围无要求,即高压供电电源可宽范围工作。



Fig.1 Structure diagram of switch module 图 1 开关组件构成示意图



图 2 单元开关电路组成示意图

为避免各单元板之间的干扰,采用光耦隔离驱动 MOSFET。高压光耦采用 OPTEK 公司 20 kV 隔离度的高速 光耦 OPI1268,最高工作频率可至 2 MHz,为 TTL(Transistor Transistor Logic)兼容性输出,但其 *t*_{PHL}-*t*_{PLH} <50 ns,因此各单元触发信号可能有 50 ns 的时间偏移,为此在其输出后增加延时调节电路。延时调节芯片采用 8 位数字可编程集成调节芯片,若以 200 ps 为延时步长,则整个延时可调范围为 51 ns,满足使用要求。

从电气绝缘及分布参数考虑,每个单元板之间的连接采用2根长宽约2 cm 的导体连接。开关组件的尺寸估 算为120 mm×100 mm×380 mm。外部接口为220 V_{ac}市电接入口、高压开关组件 MOSFET 的 D,S 极接口、控制 开关工作重复频率的外触发信号接口、地端子等5个接口。其中,多路电源、控制电路、DC-DC 变换器开关管 与高压开关置于不同的密封空间。

2 高压开关导通时间计算

当 MOSFET 导通时,驱动电流为栅极电容 C_{GS} 、栅漏电容 C_{GD} 充电,其输入电容 $C_{ISS}=C_{GS}+C_{GD}$,根据厂家 提供的 MOSFET 曲线和数据表格,在 500~800 V 时,栅极总的充电电荷 $Q \in X$ 勒效应的影响,随着 U_{GS} 的增加 而增大,如图 3(a)所示。此外,因脉冲输出电流≥20 A,则 $U_{GS} \ge 8$ V,如图 3(b)所示。





驱动器输出驱动电流随 U_{GS} 的增大而增大,如图 4 所示。由于栅极充电总电荷随栅极电压增加,因此需要在 实验中进行优化,选择一个使导通时间最短的最佳值,进行一个粗略的估算。根据图 3~图 4, U_{GS} =12 V 时,栅 极总电荷估算约 55 nC,驱动器的驱动电流由图 4(b)知约 17 A,则导通时间 $t_{on} = Q/I = 50 \times 10^{-9}/17 = 2.94$ ns;关断 时间 $t_{off} = Q/I = 55 \times 10^{-9}/21 = 2.62$ ns。





3 高压开关组件散热设计

MOSFET 功率耗散包括开关管的导通、关断时间段的开关损耗和直流损耗。在高频窄脉冲运行时,其导通、 关断时间段的开关损耗很大。MOSFET 的导通时间、关断时间可估算为脉冲的前后沿时间,根据设计指标,其 导通时间应不大于 5 ns,则导通功率耗散为:

$$P_{\rm ton} = \frac{1}{2} t_{\rm on} f U_{\rm DS-off} I_{\rm L} \tag{1}$$

式中: t_{on} 为导通时间;f为工作频率; U_{DS-off} 为 MOSFET 的工作电压; I_L 为负载电流。

经计算,当开关工作于 400 kHz, *I*_L=20 A, *t*_{on}=5 ns 时,选用 MOSFET 的导通损耗约 16 W,假设关断时间与导通时间相同,则 MOSFET 的功率耗散约 32 W。每个 MOSFET 在实验室环境温度下,无散热器可承受功率耗散约 5 W。根据以上计算,MOSFET 需要增加散热器来进行功率耗散。

散热量:

$$Q_W = \Delta T / R_{\rm th} \tag{2}$$

式中: *R*_{th} 为热阻, 表示每瓦功率耗散使开关管温度升高的度数; Δ*T* 为温差, 表示开关管与环境温度间的温差。 直流损耗:

$$P_{\rm dc} = I_{\rm L}^2 R_{\rm DS(ON)} \tau f \tag{3}$$

式中: $R_{DS(ON)}$ 为 MOSFET 的导通电阻; τ 为脉冲宽度。若频率为 400 kHz, 脉宽为 10 ns, 则 P_{dc} =2.56 W。随着脉 宽的增加, 直流损耗成比例增长。

2.54 ℃/W。则由图 5 可知,对于紧凑结构的开关组件来说,若工 作于高重复频率模式,采用铝基板,则散热器很大,安装困难。为 此,可采用风扇加速散热,或液体直接冷却技术。散热的具体方式 根据开关组件的使用条件决定,此处不再赘述。

高压开关组件应用设计 4

利用该开关管产生窄脉冲的设计如图 6 所示。开关 K1 为高压 开关组件,根据触发延时精确度、触发抖动等因素,设定其导通时 间为 3.5 ns; 20 个开关导通电阻设定为 32 Ω_{\circ} L_{24} 为开关分布电感,为开关引线电感和各连接导通的电感之和, 经计算约 140 nH。L₂₅为负载 400 Ω 连接到储能电容的连接电感。电容 C₅为开关的分布电容,为各单元板瞬态吸 收电容和开关板对地电容之和。经仿真计算,输出脉冲前沿约4ns。



图 7 脉冲源输出波形

根据模拟线路,在实验时搭建了测试线路。示波器采用 LeCroy104Xi,高压探头采用 Tektronik P6015A。在 400 Ω负载上,测试波形如图 7 所示。从图 7 可知, 20 级输出脉冲前沿约 14 ns,脉冲半高宽约 30 ns。当单级脉 冲源工作时,输出脉冲前沿约 3.5 ns,可见多级输出使前沿变慢。经分析,初步估算为开关组件结构造成的分布 电容估算不足、开关同步精确度随时间有较大漂移现象所致。

5 结论

本文对高压开关组件的构成、单元电路、散热、脉冲源产生应用进行了设计。实际装置测试发现、脉冲源前 沿相对于模拟仿真变缓。初步分析为开关组件结构造成的分布电容估算不足、开关同步精确度随时间有较大漂移 现象所致。除以上设计,开关管组件的设计还包括重要的电磁兼容设计,其设计和结构息息相关,除简单的电磁 屏蔽技术,可能还有其他未知因素,如使用器件的耐干扰程度,分析、测试干扰信号,这需要在调试中逐步解决。

第17卷



thickness of 1.5 mm

3 mm

图 5 铝制散热器水平放置散热面积与热阻的关系

本文设计的高压开关组件具有脉冲宽度、频率及电压宽范围调节的优点,且开关速度快,只需简单的外围电路即 可产生所需的高压脉冲,具有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] Kentech Instruments Ltd. High voltage avalanche pulser summary[EB/OL]. (2016-12-20). http://www.kentech.co.uk/pulser_summary.html.
- [2] CHUNG Y H,KIM H J,YANG C S. MOSFET switched 20 kV,500 A,100 ns pulse generator with energy recovery circuit[C]// PPPS-2001 Pulsed Power Plasma Science. Las Vegas,USA:IEEE, 2001:1237-1240.
- [3] WATSON A,COOK E G,CHEN Y J,et al. A solid-state modulator for high speed kickers[C]// Proceeding of the 2001 Particle Accelerator Conference. Chicago,USA:IEEE, 2001:3738-3740.
- [4] COOK E G. Review of solid-state modulators[C]// 21th International Linac Conference. Monterdy, CA:[s.n.], 2012:663-667.
- [5] BARNES M J,WAIT G D. A 25 kV 75 kHz kicker for measurement of muon lifetime[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004,32(5):1932–1944.
- [6] EFANOV V. Pulse generators based on FID technology[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2016.
- [7] 刘春平,龚向东,黄虹宾,等. 纳秒和亚纳秒级固态器件高压脉冲源的研制[J]. 电讯技术, 2009,49(8):6-8. (LIU Chunping, GONG Xiangdong,HUANG Hongbin, et al. Development of a nano and sub-nanosecond solid state device high voltage pulser[J]. Telecommunication Engineering, 2009,49(8):6-8.)
- [8] 石小燕,曹晓阳,梁勤金,等. 多路窄脉冲功率线路合成[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(4):699-722. (SHI Xiaoyan,CAO Xiaoyang,LIANG Qinjin, et al. Power synthesization of multi-channel narrow pulses by circuitry[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(4):699-722.)
- [9] 朱会柱,汪秀,袁斌. 基于 MOS 开关的高频高压脉冲源中电磁兼容问题研究[J]. 电子技术, 2011(3):34-36. (ZHU Huizhu, WANG Xiu,YUAN Bin. Investigation on the EMC in HF-HV pulse generator based on MOS switch[J]. Electronics Design & Application, 2011(3):34-36.)
- [10] 韩永林,梁伟,胡永宏.用金属氧化物半导体场效应晶体管器件实现的高重复率电光 Q 模块设计[J].中国激光, 2006, 33(10):1329-1332. (HAN Yonglin,LIANG Wei,HU Yonghong. Design of high repetition rate electro-optically Q-switched module with vertical metal oxide semiconductor field effect transistor component[J]. Chines Journal of Lasers, 2006,33(10): 1329-1332.)
- [11] 陈静,周晓青. 基于固态开关器件的新型高压脉冲驱动源[J]. 现代电子技术, 2012,35(4):208-210. (CHEN Jing, ZHOU Xiaoqing. New high-voltage pulse driving source based on solid switch device[J]. Modern Electronics Technique, 2012,35(4):208-210.)
- [12] 赵鑫,张乔根,白雁力,等. MOSFET 在感应叠加型高压双方波脉冲发生装置中的应用[J]. 高电压技术, 2015,41(12):
 4066-4072. (ZHAO Xin,ZHANG Qiaogen,BAI Yanli,et al. Application of MOSFET in high voltage double square-wave pulses generator with inductive adder configuration[J]. High Voltage Engineering, 2015,41(12):4066-4072.)
- [13] Germany Behlke Company. Fast high voltage transistor switches[EB/OL]. (2017-01-10). http://www.behlke.com.
- [14] 李成祖. 基于 MOSFET 串联的高频高压脉冲方波源的研制[D]. 武汉:华中科技大学, 2013. (LI Chengzu. Development of high frequency and high voltage pulse square wave source based on MOSFET series[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2013.)
- [15] 高然. 输出串联型高压脉冲电源的研制[D]. 西安:西安交通大学, 2010. (GAO Ran. Development on module-cascaded high voltage pulse generator[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2010.)

作者简介:



石小燕(1971-), 女,四川省绵阳市人,高级工程师,主要研究方向为固态脉冲功率技术. email:368229630@qq.com.

杨周炳(1968-),男,四川省绵阳市人,研究员,主要研 究方向为高功率脉冲功率产生及应用产生技术。 任先文(1974-),男,四川省绵阳市人,高级 工程师,主要研究方向为高功率脉冲功率产生 技术.

丁恩燕(1978-), 女,四川省绵阳市人,工程师,主要研究方向为高功率超宽带产生技术.

梁勤金(1963-),男,四川省绵阳市人,研究员,主要研究方向为固态脉冲功率技术、微波产生技术、信号处理等.