

文章编号: 2095-4980(2024)10-1168-04

## 一种 10 kV/10 ns/20 A 全固态脉冲源设计

石小燕<sup>a,b</sup>, 杨浩<sup>a,b</sup>, 郑强林<sup>a,b</sup>, 闫二艳<sup>a,b</sup>, 鲍向阳<sup>a,b</sup>

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为获得等离子体研究所需的半高宽约 10 ns 的高压高重复频率脉冲输出, 采用金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关串联构成的 2 组高压开关模块, 利用传统电容储能脉冲产生电路和脉冲切尾电路相结合产生窄脉冲。结合开关实际工作要求, 开展了窄脉冲产生电路适应性设计及仿真优化; 依据优化结果, 搭建窄脉冲产生电路实验装置。经测试, 在 500  $\Omega$  负载上获得了峰值电压约 10 kV、半高宽约 10 ns、前沿约 6 ns 的脉冲输出。

**关键词:** 全固态脉冲源; 窄脉冲发生器; 10 ns 半高宽; 等离子体应用

中图分类号: TN788

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023064

## Design of a 10 kV/10 ns /20 A all solid state pulse generator

SHI Xiaoyan<sup>a,b</sup>, YANG Hao<sup>a,b</sup>, ZHENG Qianglin<sup>a,b</sup>, YAN Eryan<sup>a,b</sup>, BAO Xiangyang<sup>a,b</sup>

(a.Institute of Applied Electronics; b.Key Laboratory of High Power Microwave Technology,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** To obtain the high-voltage high-repetition-rate pulse output with a half-width of about 10 ns required for plasma research, two sets of high-voltage switch modules composed of Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET) switches in series are used. By combining traditional capacitor energy storage pulse generation circuits with pulse tail cutting circuits, narrow pulses are generated. Based on the actual working requirements of the switches, adaptive design and simulation optimization of the narrow pulse generation circuit are carried out; according to the optimization results, an experimental device for narrow pulse generation circuit is built. After testing, a pulse output with a peak voltage about 10 kV, a half-width about 10 ns, and a front edge about 6 ns is obtained on a load of 500  $\Omega$ .

**Keywords:** all-solid-state pulse source; narrow pulse generator; duration 10 ns at half maximum voltage; plasma application

利用高重复和快前沿脉冲源产生的等离子体, 具有在开放空间产生、等离子体流场控制能量更为稳定、电子能量和反应活性更为显著等特点, 因此, 研究具有 ns 级前沿和脉宽的脉冲源放电等离子体的粒子活性、电离电位和特征扩散长度等特性在生物医学、材料改性、甲烷转化等领域的应用具有重要意义<sup>[1-4]</sup>。要实现重复频率为百 kHz 以上的纳秒脉冲源, 需采用固态开关。本文将高速金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关器件串联, 实现高压高重复频率脉冲输出。实际电路中, 存在大量杂散电容和电感参数, 且负载阻抗较大时, 输出脉冲下降沿时间将极大增加; 另受 MOSFET 器件内部米勒电容影响, 关断延时也较长, 因此难以达到 10 ns 左右宽度的高压脉冲输出。故基于 MOSFET 器件的高压脉冲源在国内外的报道中, 输出脉冲宽度大多为 100 ns 左右<sup>[5-9]</sup>。本文采用基于 MOSFET 的 2 组高压开关组件实现输出 10 ns 左右脉宽的高压脉冲: 一组为主电路, 采用传统的电容储能的脉冲发生器设计; 另一组为切尾电路, 为主电路提供一个快速放电回路, 使输出波形后沿宽度显著缩短。经调试, 可实现半高宽约 10 ns, 前沿约 6 ns, 幅度约 10 kV/20 A 的脉冲输出。

### 1 窄脉冲源工作原理

窄脉冲高压脉冲发生器的原理如图 1 所示。开关  $Q_1$ 、 $Q_2$  导通前,  $U_c$  通过电阻  $R_c$  为电容  $C_1$  充电。当开关  $Q_1$  导

收稿日期: 2023-03-27; 修回日期: 2023-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62001442)

通时，电容  $C_1$  的能量通过  $Q_1$  传输到负载  $R_L$ ，负载  $R_L$  上获得一个瞬态高压脉冲，脉冲的持续时间符合  $RC$  电路的放电时间规律。由于线路中存在分布电容，当导通控制信号  $V_{tr1}$  断开时， $Q_1$  不能及时关断，引起脉冲后沿严重拖尾现象，这既影响了脉冲重复频率提高，也造成输出脉冲宽度增加。相对于导通瞬间，因储能电容远大于杂散电容，故并不会对脉冲前沿造成较大影响。

为输出极窄宽度的脉冲，需对后沿进行电路优化。如果在控制信号  $V_{tr1}$  断开后给分布电容一个低阻泄放通道，则负载输出脉冲后沿快速下降。通过控制低阻泄放通道的开启时间，可控制脉冲的输出宽度。当图 1 中的开关  $Q_2$  支路导通时，则为  $C_1$ 、 $Q_1$ 、 $R_L$  放电回路提供了分布电容的一个低阻泄放通道。

依据图 1 建立仿真线路，如图 2 所示，图 2(a) 中  $C_1$  为主电路储能电容， $C_2$ 、 $C_3$  为开关线路的分布电容。图 2(b) 为仿真结果，可以看出，带切尾开关的电路可以去掉负载输出后沿拖尾，实现半高宽为 10 ns 的脉冲输出。

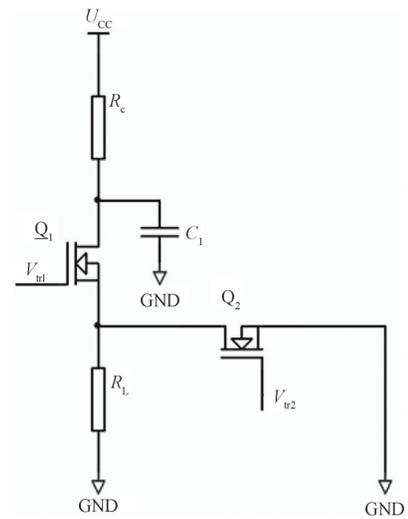


Fig.1 Circuit diagram of narrow pulse generator  
图 1 窄脉冲发生器原理图

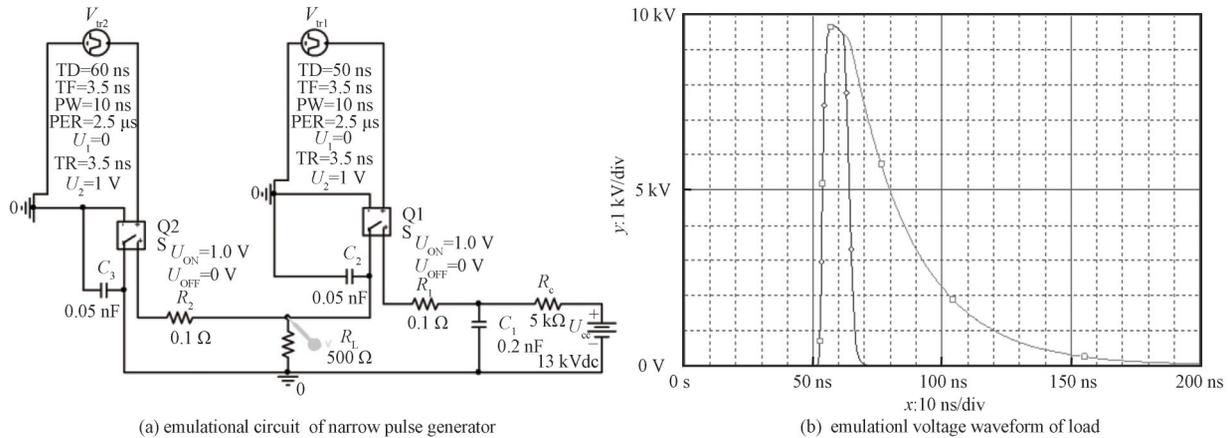


Fig.2 Emulational circuit of narrow pulse generator & emulational result  
图 2 窄脉冲发生器仿真电路及模拟结果

## 2 实验电路设计

从图 2 可以看出，利用切尾电路可以实现窄脉冲的输出，但实际应用中，需考虑开关器件导通所需  $V_{tr}$  的最短时间、关断延时时间、开关耐压、开关工作最大电流及耗散功率等特性，因此需对图 1 电路进行优化。优化后，输出幅度为 10 kV，脉冲半高宽为 10 ns，输出电流为 20 A 的窄脉冲源实验电路如图 3 所示。电路工作原理为：控制信号  $V_{tr1}$ 、 $V_{tr2}$  导通前， $C_1$ 、 $C_2$  完成充电储能；之后， $V_{tr1}$  导通， $C_1$  的能量通过  $Q_1$ 、 $R_2$  泄放至负载，在  $Q_1$  导通 10 ns 后， $V_{tr2}$  导通，开关  $Q_2$  导通，此时在负载上输出了半高宽约 10 ns 的高压脉冲；最后  $V_{tr1}$ 、 $V_{tr2}$  断开。线路完成了个工作周期。

实际线路中，开关  $Q_1$ 、 $Q_2$  导通所需的最小控制信号  $V_{tr1}$ 、 $V_{tr2}$  远大于 10 ns，故  $Q_1$  导通 10 ns 后并不会关断，其导通时间主要由  $V_{tr1}$  的导通时间决定。当开关  $Q_2$  导通时， $Q_1$  仍然导通，此时电容  $C_1$  中的能量通过  $Q_1$ 、 $R_2$  至  $R_L$  和  $Q_2$ 、 $R_3$ 、 $C_2$  这 2 条线路同时泄放至地，若  $C_1$  电荷不能及时放完，则在负载上形成一个台阶；同时，因  $R_L$  负载远大于  $Q_2$ ，导通后形成低阻抗泄放通道，使流过开关的电流急速增大。为此，图 3 中增加限流电阻  $R_2$ 、 $R_3$ ，辅助电源  $U_2$ 、辅助储能电容  $C_2$ ，优化输出负载波形后沿及限定通过开关的电流在安全范围内。

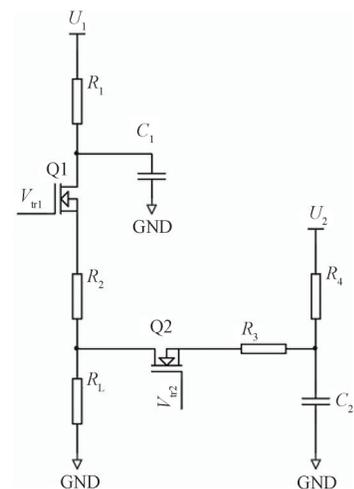


Fig.3 Circuit diagram of narrow pulse generator  
图 3 窄脉冲发生器原理图

依据实际需求建立实验电路仿真模型,如图4(a)所示。实际工作中,开关 $S_1$ 、 $S_2$ 导通所需控制信号 $V_1$ 、 $V_2$ 的最小时间为50 ns。经仿真优化,调整限流电阻为 $R_1=30\ \Omega$ 、 $R_2=100\ \Omega$ ,主电路储能电容为 $C_2=0.5\ \text{nF}$ ,泄放电容为 $C_1=1\ \text{nF}$ ,主电路电容充电电压为14 kV,辅助电源为-5.5 kV。仿真结果显示,该电路在500  $\Omega$ 负载 $R_3$ 上可输出半高宽约10 ns、幅度约10 kV的脉冲,如图4(b)所示;流过切尾开关 $S_1$ 的电流约100 A,如图4(c)所示。因通流时间极短,满足器件总耗散功率要求,不会引起开关损坏。

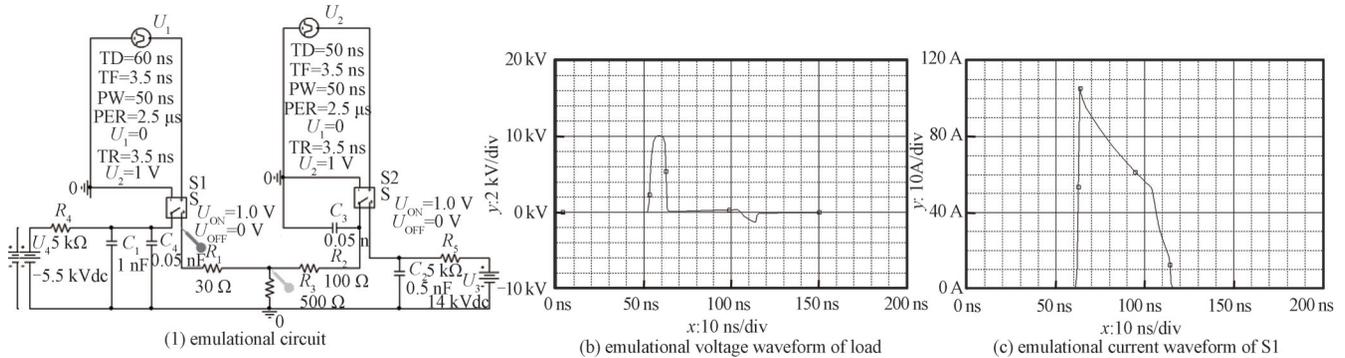


Fig.4 Emulational circuit of experimental narrow pulse generator  
图4 实验窄脉冲发生器仿真电路

### 3 实验装置及测试结果

依据设计及仿真,搭建了窄脉冲发生器的实验装置,如图5(a)所示。装置包括2组高压直流电源、2组高压开关模块、1个时序控制模块。高压开关模块由15个耐压1 kV、导通时间约4 ns的高速MOSFET串联组成,如图5(b)所示。实验装置采用风冷模式。高压宽带匹配衰减器匹配负载500  $\Omega$ ,经衰减变换阻抗至50  $\Omega$ 时注入带宽1 GHz的示波器进行测试。为对比有无切尾电路的输出波形,在相同主电路储能电容时,去除了切尾电路的负载测试波形如图5(c)所示,测试脉冲半高宽度91.7 ns,幅度9.57 kV;有切尾开关负载输出波形如图5(d)所示,测试脉冲半高宽度10.6 ns,前沿6 ns,幅度9.98 kV。在实时测试下,半高脉宽变化范围为10.2~11.1 ns,幅度变化范围为9.5~10.2 kV。在burst模式下,该脉冲源可运行于400 kHz。

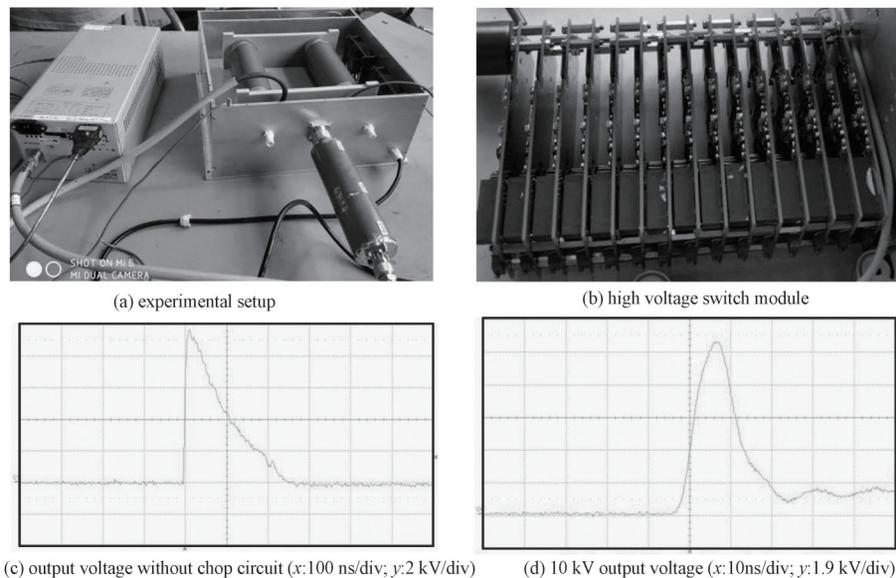


Fig.5 Experimental setup of narrow pulse generator & output voltage of load  
图5 窄脉冲发生器实验装置及负载输出电压波形

### 4 结论

本文在基于传统电容储能脉冲发生器的基础上,利用2组开关,一组产生脉冲,另一组构成脉冲后沿切尾电路,实现窄脉冲输出。结合实际开关器件的特性开展了仿真,搭建了实验装置,在负载500  $\Omega$ 上实现了幅度约

10 kV、脉冲前沿约 6 ns、脉冲半高宽约 10 ns 的窄脉冲输出。该电路在风冷时, burst 模式下, 可实现 400 kHz 的重复频率输出。作为全固态线路, 在良好的散热方式下, 有望突破 MHz 重复频率。目前, 该实验装置已用于大气放电产生等离子体的实验, 通过调节输出脉冲重复频率、输出电压等参数, 开展了多项等离子体特性研究。下一步, 将依据等离子体实验要求, 开展等离子体产生脉冲源的优化设计。

#### 参考文献:

- [1] 于维鑫,朱文超,程晓,等. 纳秒脉冲等离子体合成射流激励器的流场特性分析[J]. 气体物理, 2021,6(2):38-45. (YU Weixin, ZHU Wenchao, CHENG Xiao, et al. Analysis of flow field of nanosecond pulsed plasma synthetic jet[J]. Physics of Gases, 2021,6(2):38-45.) doi:10.19527/j.cnki.2096-1642.0821.
- [2] 邵涛,章程,王瑞雪,等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016,42(3):685-705. (SHAO Tao, ZHANG Cheng, WANG Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016,42(3):685-705.) doi:10.13336/j.1003-6520.hve.20160308018.
- [3] OUARAS K, MAGNE L, PASQUIERS S, et al. OH density measured by PLIF in a nanosecond atmospheric pressure diffuse discharge in humid air under steep high voltage pulses[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018,27(4):101987. doi:10.1088/1361-6595/aab4b7.
- [4] 吴云,李应红. 等离子体流动控制研究进展与展望[J]. 航空学报, 2015,36(2):381-405. (WU Yun, LI Yinghong. Progress and outlook of plasma flow control[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015,36(2):381-405.) doi:10.7527/S1000-6893.2014.0246.
- [5] 李玺钦,吴红光,栾崇彪,等. 基于 MOSFET 的纳秒级全固态脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束, 2017,29(4):82-86. (LI Xiqin, WU Hongguang, LUAN Chongbiao, et al. Design of nanosecond all-solid-state pulse source based on MOSFET semiconductor switch[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017,29(4):82-86.) doi:10.11884/HPLPB201729.160475.
- [6] COOK E G. Review of solid-state modulators[DB/OL]. (2000-08-19) [2023-03-17]. <http://export.arxiv.org/abs/physics/0008189>.
- [7] 郭帆,贾伟,谢霖燊,等. 基于半导体开关和 LTD 技术的高重复频率快沿高压脉冲源[J]. 强激光与粒子束, 2016,28(5):113-117. (GUO Fan, JIA Wei, XIE Linshen, et al. High power high repetitive frequency generator based on MOSFET and LTD technology[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016,28(5):113-117.) doi:10.11884/HPLPB201628.055002.
- [8] JIANG W H, OSHIMA N, YOKOO T, et al. Development of repetitive pulsed power generators using power semiconductor devices [C]// 2005 IEEE Pulsed Power Conference. Monterey, CA, USA: IEEE, 2005:1167-1172. doi:10.1109/PPC.2005.300545.
- [9] PANG Lei, LONG Tianjun, HE Kun, et al. A compact series-connected SiC MOSFETs module and its application in high voltage nanosecond pulse generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019,66(12):9238-9247. doi:10.1109/TIE.2019.2891441.

#### 作者简介:

石小燕(1971-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为固态脉冲功率产生及应用技术. email: 368229630@qq.com.

杨浩(1992-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为等离子体特性研究.

郑强林(1983-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波产生及应用技术.

闫二艳(1978-), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为等离子体特性研究.

鲍向阳(1973-), 男, 硕士, 实验员, 主要研究方向为微波高功率实验.