第 31 卷第 9 期
2019 年 9 月

强 激 光 与 粒 子 束
HIGH POWER LASER AND PARTICLE BEAMS

Vol. 31, No. 9
Sep., 2019

# MHz 高压脉冲电源设计*

姜 松, 吴 彤, 李 孜, 饶俊峰

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘 要:** 设计了一款基于金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关的高压高频脉冲发生器,采用多个以光纤信号隔离触发的串联 MOSFET 作为高压开关,并由 FPGA 提供控制信号。该发生器由相同的 MOSFET 管部分组成,并联并按顺序触发,与参考信号同步。所述电路和工作模式克服了 MOSFET 管发生器的功耗限制,使脉冲重复率显著提高。详细介绍了该 MHz 高压脉冲发生器的工作原理和制作过程,然后进行了初步试验,验证了该发生器的性能。该电路在 1 MHz 的高重复率下,输出上升时间为十几 ns、脉宽为百 ns、电压幅值大于 1 kV 的平顶脉冲。

**关键词:** 脉冲电源; 功率 MOSFET; ns 脉冲; 1 MHz 重频; 脉冲合成

**中图分类号:** TM832 **文献标志码:** A **doi:**10.11884/HPLPB201931.190152

# Design of MHz high voltage pulse power supply

Jiang Song, Wu Tong, Li Zi, Rao Junfeng

(*School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai* 200093, *China*)

**Abstract:** In this paper, a high voltage and high frequency pulse generator based on metal oxide semiconductor field effect transistor (MOSFET) switch is designed. Several series MOSFETs triggered by optical fiber signal isolation are used as high voltage switches, and the control signal is provided by the FPGA. The generator is composed of the same MOSFET tube, triggered in parallel and in sequence, synchronized with the reference signal. The circuit and working mode overcome the power consumption limitation of the MOSFET tube generator and significantly improve the pulse repetition rate. This paper introduces the working principle and fabrication process of the MHz high voltage pulse generator in detail. The preliminary test was carried out to verify the performance of the generator. Under the high repetition rate of 1 MHz, the output flat-top pulse had the rise time more than 10 ns, the pulse width 100 ns, and the voltage amplitude greater than 1 kV.

**Key words:** pulse power supply; power MOSFET; nanosecond pulse; 1 MHz repetition frequency; pulse synthesis

**PACS:** 84.30.Ng; 84.70.+p

随着脉冲功率源应用范围的逐渐扩展(如材料、环保、生物医疗、光源和高能加速器领域等方面[1]),脉冲重复频率的重要性日益显现。脉冲的重复频率通常决定系统的工作速率和效益,因此,高重复频率脉冲功率的产生已成为脉冲功率技术领域里的一个重要课题。脉冲功率技术发展到今天,高重复频率脉冲功率技术已经从 kHz 水平向 MHz 发展,高功率单脉冲功率源已经具有了很高的水平,但是高功率的装置目前大都只能达到几 kHz 到数十 kHz 的重复频率[2]。要实现高功率、高重复频率的脉冲功率源,在技术上的主要难点是高重复率开关技术。在 MHz 重复频率脉冲功率技术研究领域,目前主要以 MHz 猝发的方式输出脉冲,重频模式的研究较少[3-6],对于重频工作模式下的高重复频率 ns 脉冲源的研究,一般在电压几百伏,重复频率 100 kHz 以下[7]。

目前,随着半导体技术,特别是金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)开关和绝缘栅双极晶体管(IGBT)开关技术的发展,高频高压脉冲发生器的实现变得越来越简单和廉价[8-10]。MOSFET比IGBT具有

* **收稿日期:**2019-03-25; **修订日期:**2019-07-03
**基金项目:**上海市扬帆项目(19YF1435000); 国家自然科学基金青年项目(51707122)
**作者简介:**姜 松(1989—),男,博士,从事脉冲功率及低温等离子体应用技术; jecifer@163.com。
**通信作者:**吴 彤(1993—),女,硕士研究生,研究方向为脉冲功率技术; 946460986@qq.com。

更短的导通关断时间和更高的工作频率，更适合生成上升、下降时间小于十几 ns、脉冲宽度为几十 ns 的 MHz 重复频率脉冲。但是，受制于 MOS 管的器件性能，单个开关管很难同时兼顾高频和高压两个方面。利用 MOSFET 脉冲源产生高重频脉冲，随着重复频率增加，电路输出功率会相应提高，MOSFET 的功率损耗也会增大。开关过程中的开关损失和导通过程中的欧姆损失是造成器件温升的主要原因。对于高重复频率下连续工作的 MOSFET 管，其器件温度会迅速升高，导致器件损坏，因此半导体开关的最高重复工作频率有时取决于热学因素，而不是电学因素[11]。因而，在系统连续运行中，脉冲速率实际上仍限制在几百 kHz。本文利用频率叠加的新思路来实现高重频脉冲输出，采用多路脉冲源共同承担总功率，实验结果表明，这种提高频率的技术具备良好的可行性，实现了 1 MHz 重频模式下 1.5 kV 的脉冲输出。

## 1 脉冲发生器的设计

### 1.1 主电路结构

高重频高压脉冲系统主要由高压直流充电电源部分、高压脉冲源部分和 MOSFET 驱动电路部分等组成。系统结构原理如图 1 所示。多个高压脉冲源分别产生高压脉冲，通过主电路并联到同一负载，并通过控制触发信号的延迟时间控制高压脉冲在时域上的依次输出。由基于 FPGA 的 MOSFET 时序产生部分为每一路高压脉冲源提供触发信号，并按顺序触发每个高压脉冲源，从而实现频率叠加，提高输出脉冲的重复频率。

MOSFET 管的开关损耗随着脉冲电源频率的提高而增加，可以通过散热在一定程度上减轻，但在连续运行中，器件仍可能因温度过高而损坏[11]。同时，器件开关损耗的增加必然导致电源的效率降低。要实现整个脉冲电路输出的高频化，可以将 $N$ 路工作在相对较低频率情况下的高压脉冲源经过不同的时间延迟合成一路高频脉冲输出。最终可在负载上获得的输出频率是单个高压脉冲源输出频率的 $N$ 倍。这样可以摆脱 MOSFET 管自身性质的限制，有利于脉冲源的工作频率的提高，而且分散了器件的损耗，使单个脉冲源的寿命提高，提高经典电路的性能。开关器件的工作频率低更有利于器件的关断，延长器件的使用寿命。频率叠加原理如图 2 所示。

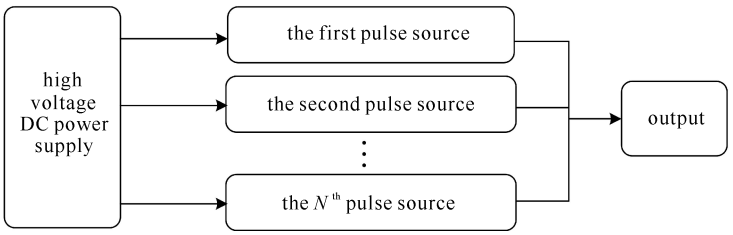



Fig. 1 Schematic diagram of system structure

图 1 系统结构原理图

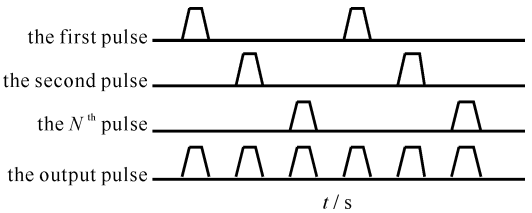



Fig. 2 Schematic diagram of frequency superposition

图 2 频率叠加原理图

该电路由 $N$ 个相同的高压脉冲源组成，通过主电路并联到同一负载，并按时序依次循环触发。触发信号与控制信号同步。一个高压脉冲源由一个电容器和一个 MOSFET 单元组成，MOSFET 单元是由 3 个串联的 MOSFET 组成，如图 3 所示。图 4 是带截尾的 MOSFET 开关电路图，通过截尾操作，可获得更快的脉冲后沿。

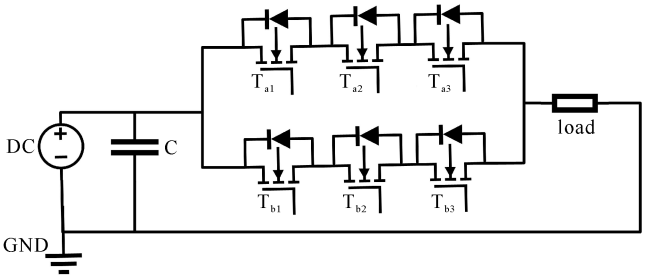



Fig. 3 MOSFET switching circuit

图 3 MOSFET 开关电路

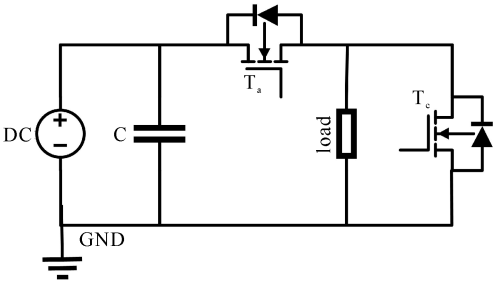



Fig. 4 MOSFET switching circuit with truncation

图 4 带截尾的 MOSFET 开关电路

电容器的主要用途是储存能量和稳定电压供应。在选择电容器时，必须考虑其耐受电压和电容。首先，在输出脉冲电压为 2 kV 的情况下，储能电容器的耐压值选择在 2 kV 以上。其次，电容器的电容主要由放电时间常数决定。每次脉冲输出到负载后，需要 1%范围内的电压降值。存储电容器的最小电容满足[12]

$$C \geqslant \frac{\tau V_0}{\Delta V_d R_L} \tag{1}$$

式中：$C$ 为存储电容器的电容，$\tau$ 为最大导通时间(200 ns)，$V_0$ 为突发电压幅度(2 kV)，$\Delta V_d$ 为脉冲突发的允许电压降($1\%V_0$)，$R_L$ 为负载电阻(200 Ω)。利用该方程计算出，电容器的电容不小于 200 nF，在一定裕度的情况下，选择工作电压为 2 kV，400 nF 的电容器。

主电路开关选用 SiC MOSFET(C2M0080120D，1200 V)，具有速度快、反向阻断电压高、输出电容低、通态电阻小等特点，为保证每个开关单元的电压大于 2 kV，应串联 3 个 MOSFET。

### 1.2　驱动电路及控制方案

MOSFET 由驱动电路驱动，其开通性能受到驱动电路性能的直接影响。MOSFET 驱动电路如图 5 所示。触发信号由光接收器(HFBR 2412TZ)将光信号转换为电信号 TTL。然后将控制信号发送到栅极驱动芯片(MCP1407)，驱动芯片根据来自光接收器的命令信号打开或关闭 MOSFET。所选用的驱动芯片具有良好的驱动特性，体积小、外围电路简单、可靠性高。传输到驱动电路的所有控制信号都经过光纤进行，使得控制电路与驱动电路间具有良好的电气隔离，抑制了电磁干扰。此外，为了实现 SiC MOSFET 的隔离门驱动，光接收器和栅极驱动芯片的电源由隔离的 DC-DC 转换器(F1205S 和 F1215S)提供，参考地连接到 MOSFET 源端，这样可以同时取得高压绝缘和抗干扰的效果。这些转换器提供高达 3 kV 的隔离，足以进行目前的实验。

为了精准控制电路中所有开关管的导通和关断，本文利用 FPGA 输出触发脉冲信号控制一路脉冲源上的三个开关管 $T_{a1}$，$T_{a2}$，$T_{a3}$ 同时导通，调节延时时间，输出另一路脉冲源中 $T_{b1}$，$T_{b2}$，$T_{b3}$ 的触发信号，使两路脉冲源交错导通。各开关对应的控制时序如图 6 所示。

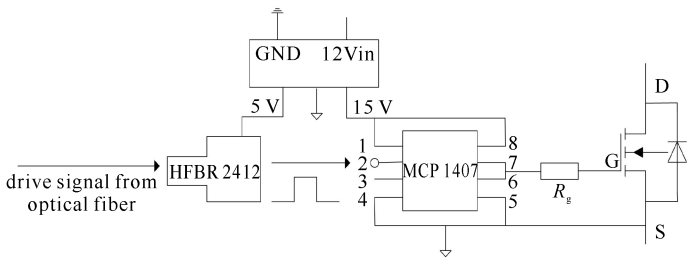



Fig. 5　Driver circuit of the MOSFET

图 5　MOSFET 的驱动电路

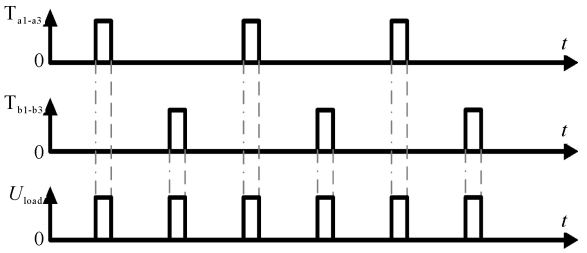
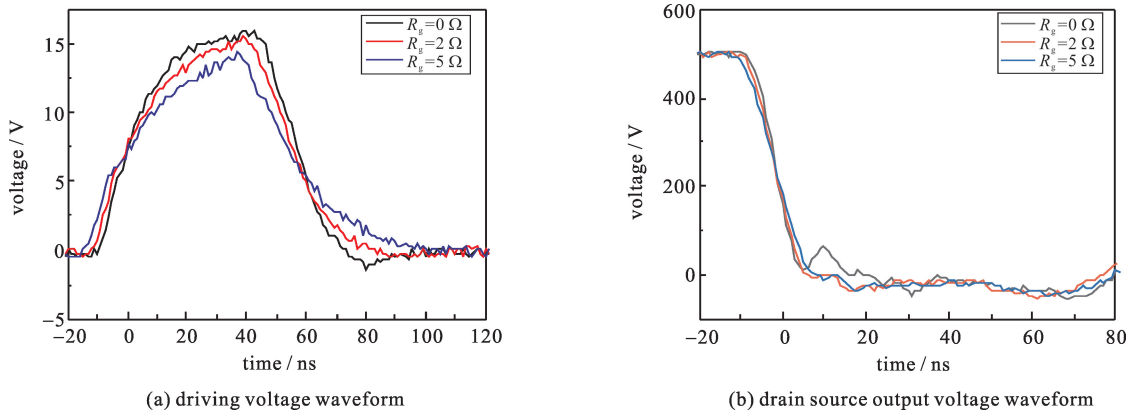



Fig. 6　MOSFET control sequence diagram

图 6　MOSFET 控制时序图

## 2　实验结果分析

为了获得更快的脉冲上升沿，需要对驱动电路进行分析。在设计驱动电路 PCB 时，要重点考虑回路电感量的大小对驱动波形快慢的影响，因此，在设计时驱动芯片要尽量贴近开关管，以减小回路面积及回路电感量。如图 5，在不改变回路时，实际能调整的只有串联在 MCP1407 输出和 MOSFET 栅极间的阻尼电阻 $R_g$。图 7 为驱动电路供电 15 V、脉宽 60 ns、在 $R_g$ 不同时的驱动电压波形和漏源极输出电压波形。




(a) driving voltage waveform　　(b) drain source output voltage waveform

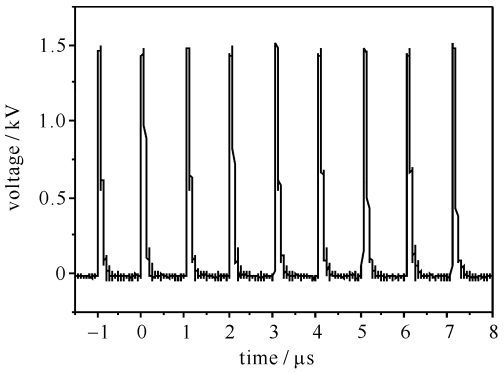
Fig. 7　Driving voltage waveform and drain source output voltage waveform at different $R_g$ values

图 7　不同 $R_g$ 值时的驱动电压波形和漏源极输出电压波形

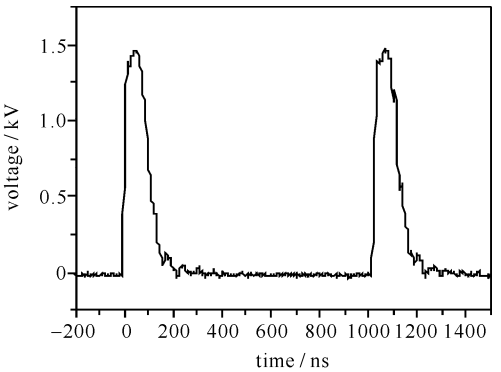
从图 7 可以看出，随着 $R_g$ 的增大，驱动电压的上升时间变大，漏源极输出电压的下降沿变慢。因此，应该

在允许的范围内，为了获得快的输出波形，需尽量使用比较小的阻尼电阻。从输出电压的波形上看，增大阻尼电阻有利于减小输出电压的平顶振荡，代价是输出电压的前沿变慢。综合前沿、稳定性、波形质量等因素，最后将阻尼电阻选定为 2 Ω。对于本文所使用的驱动电路，可以通过增大阻尼电阻 $R_g$ 来增大充电的时间常数，也可以相对缓和栅极驱动电压波形上由串扰带来的振荡。

利用多路脉冲的频率叠加实验来验证提高重复频率的可行性。图 8 为两路脉冲叠加，在 200 Ω 阻性负载上的实验测试波形。可以看出，输出脉冲上升时间为 16 ns，下降时间为 76 ns，脉宽为 100 ns，重复频率高达 1 MHz。两路高压脉冲源交替工作，单路工作在 500 kHz 的工作频率下，与单路高频工作的情况相比，其开关频率降低一半，开关损耗也随之降低。输出的两脉冲具有较好的一致性，脉冲波形稳定，上升和下降时间受到相关高杂散电容的限制。可通过增加高压脉冲源的数量，将所述原理扩展到更高的重复率。




(a) repeat waveform of output pulse




(b) waveform of output pulse

Fig. 8　Two pulse superposition waveforms (1 MHz)

图 8　两路脉冲叠加波形(1 MHz)

当负载电阻变大时，发生在负载上的电压下降时间越长，而上升时间没有明显变化。这种情况被认为是负载的电容充电引起的，脉冲持续时间的延长，会影响脉冲重复率。为了获得更快的脉冲后沿，在电路中添加了截尾管，结构如图 4 所示，其控制信号比放电管信号延时 50 ns。当截尾管导通时，负载上的残余电荷沿着截尾管迅速泄放。图 9 是在负载阻值为 400 Ω 时实验波形，截尾后输出波形与未截尾时相比，脉冲下降时间缩短一半。对于整个系统来说，由于多了两路截尾开关，电路中的杂散电感量增大，输出脉冲的上升时间增加。重频波形如图 10 所示。

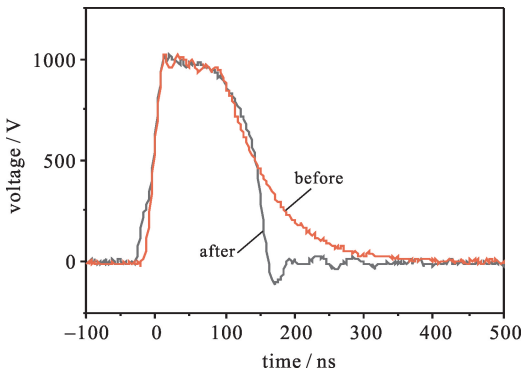



Fig. 9　Output waveform before and after adding truncated switch

图 9　加截尾管前后输出波形

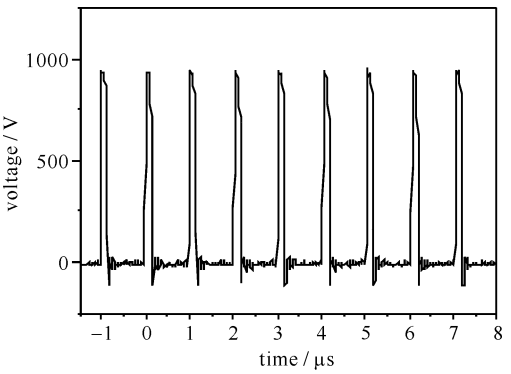



Fig. 10　Superimposed waveforms of two pulses after adding truncated switch (1 MHz)

图 10　加截尾管后两路脉冲叠加波形(1 MHz)

## 3　结　论

本文采用串联 MOSFET 电路设计了一台 MHz 频率的高重频高压脉冲电源，通过优化驱动电路，光纤隔离驱动的方式，提高电路的可靠性。文中提出了一种由多个串联 MOSFET 管构成的脉冲电源来提高脉冲重复率的方法，并演示了它在 1 MHz 下的工作情况。其产生脉冲幅值大于 1 kV、脉冲上升沿为十几 ns、脉宽小于 100 ns、下降沿小于 50 ns 的脉冲输出，输出波形近似于方波，重频输出脉冲波形良好。经实验验证，该 MHz

高压脉冲电源可稳定可靠地工作在 1 MHz，该电源结构紧凑、小巧轻便，可适用于多种应用场合。

**参考文献：**


[1] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用：(6)代表性的应用[J]. 强激光与粒子束，2014，26：030201.（Jiang Weihua. High repetition frequency pulse power technology and its applications：(6) representative applications. High Power Laser and Particle Beams，2014，26：030201）

[2] 李劲，李欣，李远，等. 三脉冲功率系统模块[J]. 强激光与粒子束，2012，24(4)：893-897.（Li Jin，Li Xin，Li Yuan，et al. Three-pulse power system module. High Power Laser and Particle Beams，2012，24(4)：893-897）

[3] Wake M. Switching power supply for induction accelerators[C]//Proceedings of PAC07. 2007.

[4] Brooksby C，Caporaso G，Goerz D，et al. MHz repetition rate solid-state driver for high current induction accelerators[C]//IEEE Particle Accelerator Conference. 1999.

[5] Saethre R，Kirbie H，Hickman B，et al. Optical control，diagnostic and power supply system for a solid state induction modulator[C]//IEEE International Pulsed Power Conference. 1997.

[6] 李劲，李欣，刘小平，等. MHz 重复频率脉冲功率技术[J]. 强激光与粒子束，2010，22(4)：725-729.（Li Jin，Li Xin，Liu Xiaoping，et al. MHz repetitive frequency pulse power technology. High Power Laser and Particle Beams，2010，22(4)：725-729）

[7] 石小燕，丁恩燕，梁勤金，等. 20 kV/20 kHz/100 A 高压脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束，2018，30：045002.（Shi Xiaoyan，Ding Enyan，Liang Qinjin，et al. 20 kV/20 kHz/100 A high voltage pulse source design. High Power Laser and Particle Beams，2018，30：045002）

[8] Hidayat D，Setiantos，Suhendi N，et al. MOSFET-based high voltage short pulse generator for ultrasonic transducer excitation[C]//The 1st International Conference and Exhibition on Powder Technology Indonesia (ICePTi). 2018.

[9] Du J Y，Song Y，Guo M A，et al. Design of high-speed and high-voltage pulse generator based on MOSFET[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology，2014，34(7)：842-845.

[10] Jiang W. Fast high voltage switching using stacked MOSFETs[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2007，14(4)：947-950.

[11] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用：(4)半导体开关的特长与局限性[J]. 强激光与粒子束，2013，25(3)：537-543.（Jiang Weihua. High repetition rate pulse power technology and its applications：(4) the advantages and limitations of semiconductor switches. High Power Laser and Particle Beams，2013，25 (3)：537-543）

[12] Kim J H，Min B D，Shenderey S，et al. High voltage Marx generator implementation using IGBT stacks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2007，14(4)：931-936.