



·脉冲功率技术·

## 基于磁隔离驱动的亚微秒高压脉冲电源\*

饶俊峰, 宋子鸣, 王永刚, 姜松, 李孜

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 为满足不可逆电穿孔对高压纳秒脉冲电源的需求, 并且突破电源模块耐压的限制, 提出了一款以正极性 Marx 为主电路、具有 ns 级前沿的高重复频率的亚微秒高压脉冲电源。该脉冲电源使用光纤传输信号, 经过驱动芯片放大信号后, 利用磁芯变压器传递驱动信号给 MOSFET。磁芯变压器给电路提供了磁隔离, 使驱动电路不会受高压输出的影响, 提高了电路的耐压水平。驱动电路设计简单, 所需元器件较少, 可提供负压偏置, 使开关管可靠关断, 提高电路的抗电磁干扰能力, 保障电路稳定运行。此电源由 16 级电路构成, 实验表明: 在 10 k $\Omega$  纯阻性负载上, 当输入电压为 630 V 时, 即可得到 10 kV 的高压输出。其最小脉宽为 300 ns, 频率 1 Hz~10 kHz 可调。该脉冲电源结构紧凑, 能够做到输出电压、脉宽、频率可调。研究了磁芯材料和匝数对驱动脉宽的影响。结果表明: 匝比的增加会影响信号脉宽, 在一定的条件下, 单匝电感量的差异和磁芯材料的不同对信号脉宽的影响较小。

**关键词:** 亚微秒脉冲; 磁隔离; 脉冲电源; 脉冲变压器

**中图分类号:** TM832

**文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202133.210332

## Sub-microsecond high voltage pulse power supply based on magnetic isolated driving

Rao Junfeng, Song Ziming, Wang Yonggang, Jiang Song, Li Zi

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

**Abstract:** To meet the demand of irreversible electroporation for nanosecond pulse power supply, this paper proposes a sub-microsecond high voltage pulse power supply with high repetition frequency, which is based on positive Marx circuit and has ns rising time. The pulse power supply uses optical fiber to transmit signals. After the driver chip amplifies the signal, the magnetic core transformer is used to transmit the drive signal to the MOSFET. The magnetic core transformer provides magnetic isolation to the circuit, so that the drive circuit will not be affected by the high voltage output and the withstand voltage level of the circuit is improved. The design of drive circuit is simple, and it requires fewer components. It provides negative bias voltage so that the switch can be reliably turned off and can effectively improve the electromagnetic compatibility. A 16-stage prototype has been built. The experiment showed that 10 kV square pulses were obtained over 10 k $\Omega$  resistive load when the input voltage was 630 V. Its minimum pulse width is 300 ns, and the frequency is adjustable from 1 Hz to 10 kHz. The pulse power supply is compact, and can flexibly adjust the voltage amplitude, pulse width and frequency. The influence of the magnetic material and number of turns of the windings of the magnetic core are also studied. The increase of turns ratio will affect the signal pulse width. Under certain conditions, the difference of single turn inductance and magnetic core material have little effect on signal pulse width.

**Key words:** sub-microsecond pulse; magnetic isolation; pulsed power supply; pulsed transformer

近几十年来,随着科学技术的进步与发展,脉冲功率技术逐渐应用于环保、农业、工业、生物医学等领域<sup>[1]</sup>。不同工作频率、输出不同量级脉宽和电压幅值的脉冲功率发生器正在不同的领域里发挥着越来越重要的作用。

\* 收稿日期:2021-07-30; 修订日期:2021-10-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0119100);上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1431100);上海理工大学-上海交通大学医学院医工交叉重点支持项目(2021005)

联系方式:饶俊峰,raojunfeng1985@163.com。

脉冲电场以其独特的细胞调控功能引起了研究学者的关注,逐渐应用到肿瘤的局部微创治疗中<sup>[2]</sup>,可以利用陡化前沿的脉冲电场不可逆的电击穿效应杀死肿瘤细胞、抑制癌细胞的生长和转移<sup>[3]</sup>。微秒脉冲电场作用于细胞膜形成纳米孔,诱导细胞毒性物质来消融肿瘤<sup>[4]</sup>。纳秒脉冲电场会产生生物电效应<sup>[5]</sup>,透过细胞膜使细胞内部的细胞器跨膜电位快速增加,引起细胞核内 DNA 断裂等,导致细胞死亡<sup>[6-8]</sup>。随着纳秒脉冲输出幅值的增大,完成电穿孔所需的时间就会减少<sup>[9]</sup>。学者们对高压纳秒脉冲电源的研究越来越深入,驱动方式对高压 ns 脉冲的产生至关重要,而驱动中较为重要的问题即是绝缘、可靠性、电磁干扰。

赵君科等人采用脉冲形成线(PFL)和磁开关相结合的方法,外加复位电流保证磁开关完全复位,最终得到一个脉冲半高宽约 250 ns 的脉冲电压<sup>[10]</sup>。周启明等人研制的高压脉冲电源采用变压器油隔离的方法,开关为充高纯氮气的火花隙开关,由控制箱控制电磁阀放气触发。最终在 50  $\Omega$  负载上得到了 ns 级上升前沿的高压脉冲电源<sup>[11]</sup>。李玺钦等人利用匝比为 1:3 的环形脉冲变压器,将一个 500 V 的负脉冲触发信号变为 1500 V 左右的正脉冲信号,去触发高压脉冲形成电路中的氢匝流管。最终对负载产生一个幅值为 10~20 kV、脉宽大于 500 ns、脉冲前沿小于 10 ns 的负极性高压脉冲<sup>[12]</sup>。Liu Ying 等人使用光纤和 IR 2214SS 驱动,利用 DC-DC 模块进行隔离,得到了一个脉宽范围为 0~1 ms 的双极性高压脉冲。此驱动方案驱动供电电源需要多路隔离<sup>[13]</sup>。嵇保健等人用数字信号处理器(DSP)产生驱动信号,利用磁芯进行磁隔离后通过驱动芯片传输信号给 IGBT,得到了最大幅值 10 kV、最小脉宽 400 ns、频率 0.3~1 kHz 可调的高压脉冲<sup>[14]</sup>,但其电路级数多、体积大、电路内部损耗较大、频率可调节范围小。本文采用正极性 Marx 作为主电路,由 FPGA 产生驱动信号,利用光纤提供信号和信号的隔离,用一个开关电源给所有的驱动芯片供电,用磁芯变压器传输信号以及对驱动和高压输出进行隔离。驱动电路和供电简单、结构紧凑、工作稳定、电路损耗低,但此驱动由于使用了磁芯变压器进行隔离,最大脉宽会受到磁芯的限制,目前只能做到 10  $\mu$ s。

## 1 主回路拓扑结构

### 1.1 Marx 主电路

图 1 为本文所用的主电路结构,为正极性 Marx。图中所示为三级 Marx 的示意图,每级电路由两个开关管、一个主电容、一个快恢复二极管以及一个电感组成。电路中的电感  $L_1$  和  $L_2$  不参与充电回路也不参与放电回路,可以抑制开关管直通时的局部电流<sup>[15]</sup>。

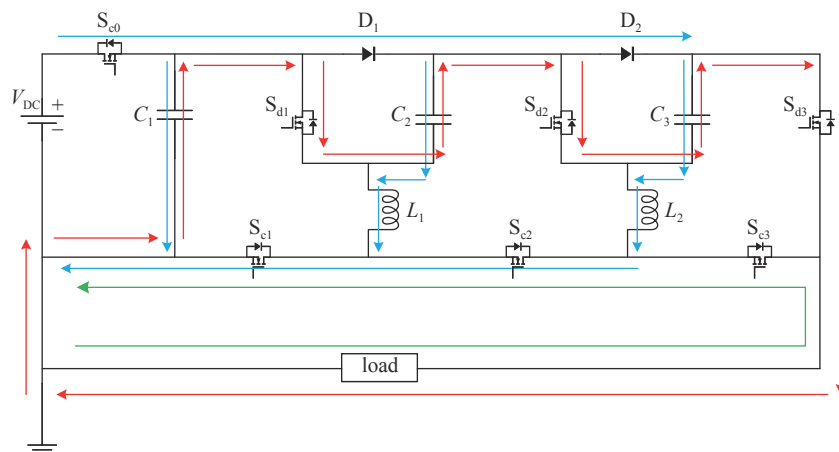


Fig. 1 Marx type main circuit

图 1 Marx 主电路图

### 1.2 Marx 电路的工作过程

(1) 充电过程。充电过程如图 1 中蓝色箭头所示,充电管  $S_{e0}$ ,  $S_{c1}$ ,  $S_{c2}$ ,  $S_{c3}$  开通。直流充电源经过二极管  $D_1$ ,  $D_2$  和电感  $L_1$ ,  $L_2$  对主电容  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  进行并联充电,使每个主电容上的电压达到直流源电压  $U_0$ 。电感  $L_1$ ,  $L_2$  在充电回路中抑制浪涌电流的同时,又不会影响充电效率。

(2) 放电过程。充电结束后,所有的充电管关断,放电管  $S_{d1}$ ,  $S_{d2}$ ,  $S_{d3}$  导通。此时电路中的主电容  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  串联起来对负载进行放电,如图 1 中红色箭头所示,输出电压为所有电容电压之和  $3U_0$ 。电感  $L_1$ ,  $L_2$  不参与放电回路。负载上的分布电容会使脉冲的下降沿变得缓慢,因此电路需要截尾开关管给负载提供一个快速放电的低阻抗通

道,以得到快速的下降沿。图1中绿色箭头即为截尾通路,此过程发生在放电管关断后。

### 1.3 参数设计及元器件的选取

主电路中的每一级电路都有一个充电主电容,在设计电源时需要考虑级数以及每一级元器件的耐压值,级数的增加和对元器件参数的高要求都会增加成本。因此,本文选择直流充电电压 630 V, Marx 发生器为 16 级,以产生 10 kV 的高压输出。本电路使用的开关管为 SiC MOSFET,采用 CREE 公司的 C2M0080120,其门极阈值电压为 3.2 V,前沿 13.6 ns,后沿 18.4 ns,耐压 1200 V,门极电容 950 pF。Marx 主电路放电时,二极管的最高隔离电压为 630 V,为了保证电路的可靠性并提高充电效率,选用耐压 1 kV 的快恢复二极管 FR157。主电路中的电感为 10  $\mu$ H。

充电电容串联放电形成高压脉冲输出。电容的大小由放电时间常数以及在最大脉冲宽度下可承受的输出高压脉冲的最大降幅决定。主电容的选取有如下公式

$$C_N = \frac{C}{N} \leq \frac{\tau V_0}{\Delta V R_L} \quad (1)$$

式中:  $C_N$  为等效串联电容,  $\tau$  为最大脉冲宽度,  $V_0$  为输出脉冲电压幅值,  $\Delta V$  为输出脉冲电压允许降落幅值,  $R_L$  为负载电阻,  $N$  为开关单元的级数<sup>[6]</sup>。实验所用负载为 10 k $\Omega$  纯阻负载,若最大脉宽时允许的电压降为输出电压的 1%,根据式(1)可得,电容容量小于 320 nF。因此选用容值为 220 nF、工作电压 1.2 kV 的电容器作为 Marx 电路的储能主电容。

## 2 驱动电路

### 2.1 驱动电路设计

图2为驱动电路的设计电路图。电路的驱动信号由 FPGA 产生,为了保证各个开关管信号的同步性,信号先经过光纤电路板传给光纤发射头,再经光纤线传给主板上的光纤接收头。光纤主要利用磁光晶体的法拉第效应,通过光纤回波反射的光能够被很好地隔离,因此使用光纤有着高隔离度和高可靠度,杜绝了信号的干扰。

16 级主电路中共有 33 个开关管,本文的驱动设计是用一个光纤驱动两个开关管,因此使用了 IXDN614 驱动芯片来提高驱动能力,其最大输出电流可达 14 A。光纤和驱动芯片的供电由开关电源提供,光纤供电为 5 V,驱动芯片的供电电压范围为 4.5~35 V,实验选用输出为 5 V 和 24 V 的开关电源。开关管在参与主回路的充、放电过程时会处于高电位,而驱动芯片一直处于几十 V 的低电位,为了隔离开低电位的驱动电压和高电位的输出电压,采用了磁芯作为驱动变压器,对驱动电路和主电路进行磁隔离。

图3为驱动负压产生示意图。驱动芯片和变压器原边之间串联的隔直电容  $C_{a1}$  可以防止在驱动电路只有直流供电时,变压器的原边电感将驱动芯片的输出和地短路,使驱动芯片损坏。变压器的副边电路也串联了一个电容  $C_{a2}$ 。在驱动电路有信号时,  $C_{a2}$  上会积聚电荷,信号停止后,由于开关管的栅极、源极之间并联了双向稳压管,  $C_{a2}$  上的电压没有泄放回路,  $C_{a2}$  会反向并联到开关管 G、S 之间,使开关管得到负压电压偏置,其电压值与电容  $C_{a2}$  上的电压值相等,保证开关管可靠关断。由于驱动芯片的供电电压为 24 V,因此两个稳压管的取值分别为 15 V 和 9 V,对 24 V 进行分压,产生一个正压 15 V、负压 9 V 的驱动信号。电容  $C_{a1}$  和  $C_{a2}$  均采用容值为 100 nF 的贴片电容。若副边电容  $C_{a2}$  容值过小,储存电荷的能力会变差,没有驱动波形;若副边电容  $C_{a2}$  容值过大,驱动的脉宽会变宽。

驱动电路的隔离包括信号的隔离和驱动电源的隔离。此驱动方案靠光纤进行信号隔离,靠磁芯变压器的磁隔

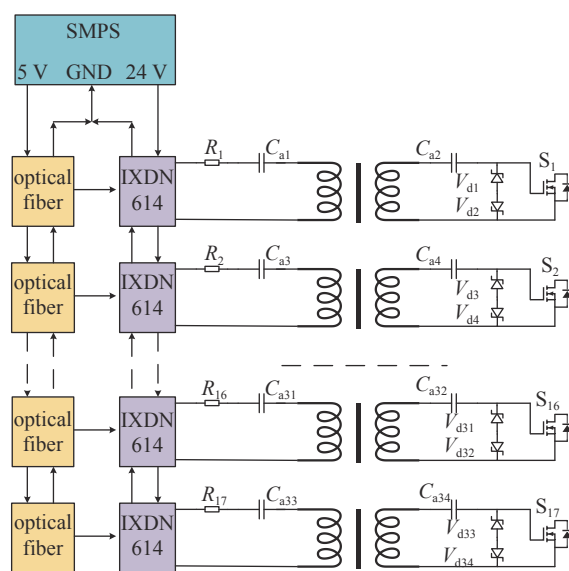


Fig. 2 Proposed synchronous drive circuit with magnetic isolation after the drivers

图2 驱动芯片后磁隔离同步驱动电路图

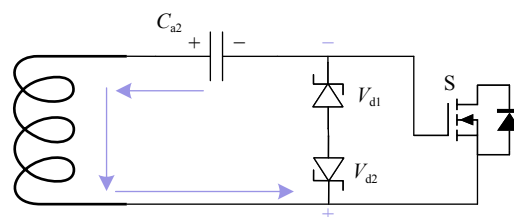


Fig. 3 Schematic of negative voltage of drive

图3 驱动负压产生示意图

离提供高压的绝缘。由于磁隔离的存在,所有光纤接收器的 5 V 和驱动芯片的 24 V 供电都可以共地,使得供电非常简单。这种磁隔离驱动方式可以让电路可靠地工作在 10 kV 以上的高电压水平。

## 2.2 磁芯参数对驱动脉宽的影响

为了研究驱动信号经过磁芯后原副边驱动脉宽的变化以及副边脉宽与磁芯参数变化的关系,设计了如下一系列实验。所选用的三款磁芯的型号如表 1 所示,分别是两款不同尺寸的铁基非晶磁芯和 PC40 铁氧体磁芯,实验中具体的磁芯参数如表 2 所示。

信号板给的信号频率为 10 kHz,脉宽 200 ns,经过示波器的测量,以下实验磁芯变压器原边的信号脉宽均为 200 ns,故图中所示为对变压器副边的信号脉宽进行测量分析。第 1, 2, 3, 4 组磁芯实验的磁芯材料均为铁基非晶,磁芯单匝电感量为 7.77  $\mu\text{H}$ ,得到的驱动波形如图 4 所示。可以看出,当匝比为 1:1 时,信号的前沿约为 30 ns,半高宽约为 210 ns;当匝比为 3:3 时,信号的前沿约为 50 ns,半高宽约为 220 ns;当匝比为 5:5 时,信号的前沿约为 70 ns,半高宽约为 250 ns;当匝比为 7:7 时,信号的前沿约为 100 ns,半高宽约为 300 ns。随着磁芯匝比的增加,信号脉宽会增大。这是由于匝比的增加会增大电感量,驱动的前后沿会变得缓慢,脉宽就会增加。

经过实际测量发现,当匝比为 3:3 时,驱动最大可用脉宽临界值为 2  $\mu\text{s}$ ;当匝比增加到 7:7 时,驱动最大可用脉宽临界值为 10  $\mu\text{s}$ ,表明随着磁芯匝数的增加,磁芯更不易饱和,从而使最大信号脉宽增大。

第 3, 5, 6 组磁芯实验的驱动波形如图 5 所示。如图所示,在匝比为 3:3、磁芯材料均为铁基非晶的条件下,三组驱动的前沿均为 50 ns,后沿均约为 60 ns,半高宽分别为 220, 230, 235 ns,半高宽相差不超过 20 ns。在匝比相同、磁芯的材料也相同时,磁芯单匝电感量的细微差异对信号脉宽产生的影响较小。

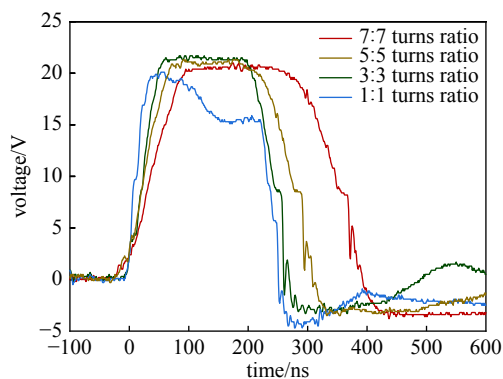


Fig. 4 Driving waveforms of the same magnetic core with different turn ratios

图 4 同一个磁芯不同匝比的驱动波形图

表 1 三款磁芯型号  
Table 1 Three core models

No. of core	material of core	size of core
I	Fe-based amorphous	16 mm $\times$
	alloy	26 mm $\times$ 5 mm
II	Fe-based amorphous	12 mm $\times$
	alloy	20 mm $\times$ 8 mm
III	ferrite	12 mm $\times$ 20 mm $\times$ 8 mm

表 2 实验中磁芯参数表  
Table 2 Table of magnetic core parameters in the experiment

No. of experiment	type of core	single turn inductance of core/ $\mu\text{H}$	turns ratio
1	I	7.77	7:7
2	I	7.77	5:5
3	I	7.77	3:3
4	I	7.77	1:1
5	I	6.22	3:3
6	I	9.10	3:3
7	II	7.77	7:7
8	II	7.77	5:5
9	II	7.77	3:3
10	II	7.77	1:1
11	III	7.37	7:7
12	III	7.37	5:5
13	III	7.37	3:3
14	III	7.37	1:1

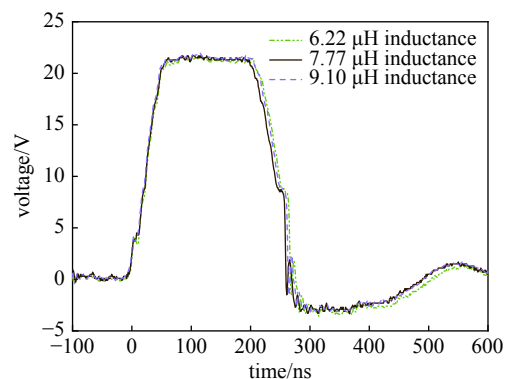


Fig. 5 Driving waveform of different single turn inductance of the same type of core material

图 5 同款磁芯材料不同单匝电感量的驱动波形

第 3, 9, 13 组磁芯实验的驱动波形如图 6 所示。从图中可以看出,在匝比为 3:3、磁芯单匝电感量几乎相同的条件下,三款磁芯驱动信号的前沿均约为 50 ns, I 号磁芯和 II 号磁芯驱动信号的半高宽约为 220 ns, III 号磁芯信号的半高宽约为 230 ns,三款磁芯驱动信号的半高宽相差不超过 10 ns。在磁芯单匝电感量相近、匝比相同的情况下,磁芯材料对信号脉宽的影响较小。



### 3 实验结果分析

图 7 为放电管的驱动波形，脉宽为 300 ns。想要使 SiC MOSFET 正常地开通和关断，驱动电压需要有快速的上升沿和下降沿，关断时需要一个负压防止开关管的误导通<sup>[17]</sup>，回路阻抗和寄生电感尽可能低，并选择适当的驱动电阻。因为栅极驱动电阻的大小会影响开关管开关时间的大小，驱动电阻越小，驱动时间越短，但过快的开关速度会导致驱动回路的震荡<sup>[18]</sup>。

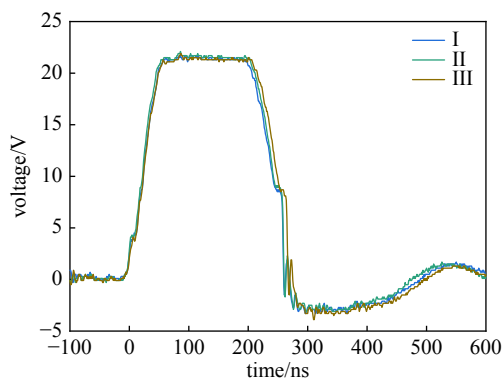


Fig. 6 Driving waveforms of different magnetic cores at the same turn ratio and the same single-turn inductance

图 6 不同款磁芯在相同匝比相同单匝电感量时的驱动波形

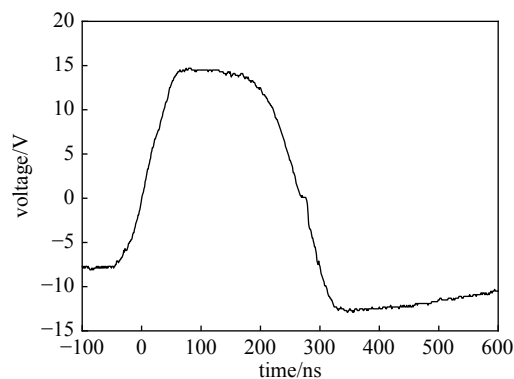


Fig. 7 Discharge switch drive waveform with pulse width of 300 ns

图 7 300 ns 脉宽的放电管驱动波形

图 8 为本文提出的 16 级亚微秒 Marx 发生器实物图。图 9 为 Marx 发生器在 10 kΩ 纯阻性负载下，脉宽 500 ns，频率 10 kHz，在 130 ~ 630 V 范围内调节工作电压，得到 2~10 kV 不同幅值的输出脉冲波形。直流充电源为 630 V 时即可得到 10 kV 的高压输出。图 10 为 10 kHz 频率下，亚微秒 Marx 发生器在不同脉宽下输出 10 kV 的波形图。脉宽分别为 300, 500, 1000, 1500, 2000, 2500 ns。图 9 和图 10 说明该 Marx 发生器输出电压幅值和脉宽可调，具有较好的灵活性。

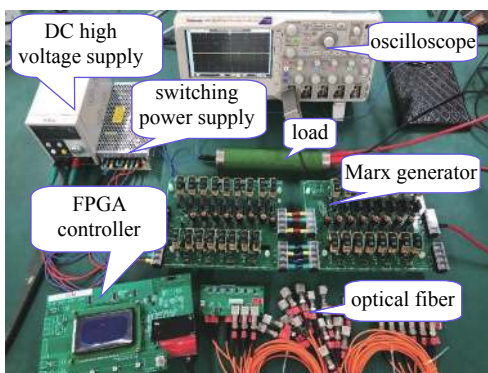


Fig. 8 Photo of submicrosecond Marx generator

图 8 亚微秒 Marx 发生器实物图

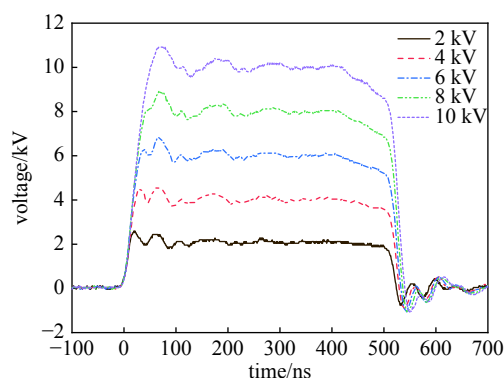


Fig. 9 Different output voltage waveforms at pulse width of 500 ns

图 9 脉宽 500 ns 下输出不同电压波形图

图 11 为 10 kHz 频率下的重频脉冲波形，输出幅值为 10 kV，输出波形稳定。表明该 Marx 发生器在重频条件下能够稳定工作。

Marx 发生器接介质阻挡放电 (DBD) 负载进行了实验，图 12 为 DBD 放电时的实物图像。DBD 为典型的板对板电极结构，电极间距 1.5 mm，其中介质为厚 1 mm 的有机玻璃，空气间隙 0.5 mm，放电频率为 10 kHz。电压达到 8 kV 时开始出现击穿放电，随着电压的升高，放电现象越来越明显，最终整个电极区域都随机均匀出现放电细丝，放电现象强烈。图 13 为 10 kV 方波脉冲下 DBD 负载上的单个脉冲的电压和电流波形，可见前沿处对应的放电电流高达 15 A，后沿处也有近 10 A 的电流峰值，比交流高压激发的 DBD 放电电流幅值高很多。

### 4 结论

本文设计了一款驱动芯片后接磁隔离的正极性亚微秒 Marx 脉冲电源。通过理论分析和实验验证可以得到以下结论：(1) 该脉冲电源结构紧凑，驱动电路和光纤接收器可用同一个直流电源模块供电，结构简单，仅靠驱动芯

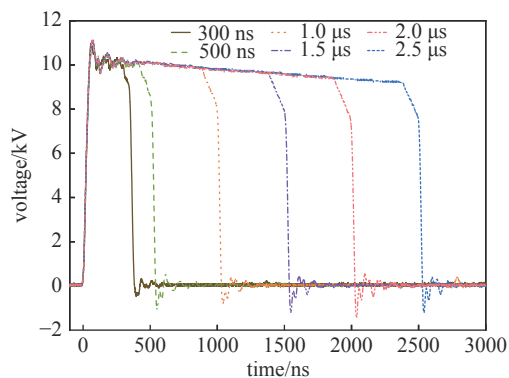


Fig. 10 Waveforms of 10 kV output voltage with different pulse widths

图 10 不同脉宽输出 10 kV 电压波形图



Fig. 12 Photo of DBD excited by the High voltage pulses from the Marx generator

图 12 Marx 发生器介质阻挡放电实物照片

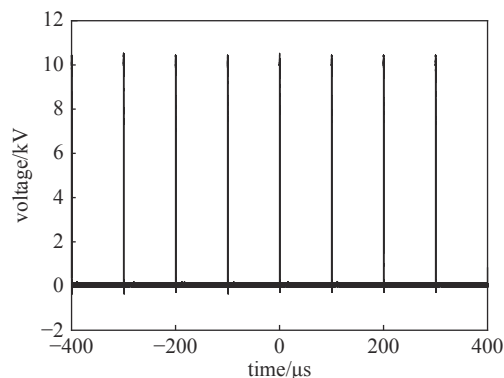


Fig. 11 Voltage waveforms of 10-kV pulses at the frequency of 10 kHz

图 11 输出电压 10 kV 重复频率 10 kHz 的脉冲电压波形

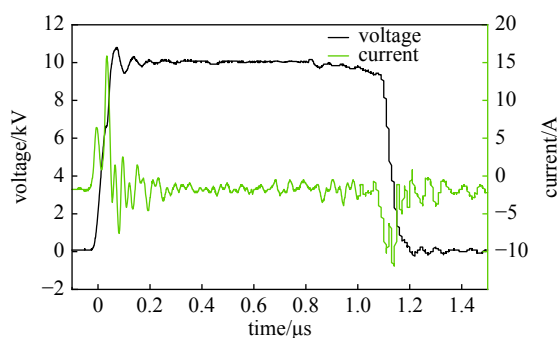


Fig. 13 Output voltage and current waveform of the Marx generator to DBD

图 13 Marx 发生器介质阻挡放电电压电流波形

片后的磁芯变压器即可实现 10 kV 以上的高压绝缘；(2)该脉冲电源的输出脉冲前后沿均低于 50 ns，脉宽 300 ns~2 μs 可调，频率 1 Hz~10 kHz 可调，对不同性质的负载均可放电，可灵活调节主要脉冲参数；(3)该驱动方案可以对多个开关进行同步驱动，其缺点是驱动信号的最大脉宽会受磁芯饱和的限制。

#### 参考文献：

- [1] 卢新培, 严萍, 任春生, 等. 大气压脉冲放电等离子体的研究现状与展望[J]. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2011, 41(7): 801-815. (Lu Xinpei, Yan Ping, Ren Chunsheng, et al. Review on atmospheric pressure pulsed DC discharge[J]. SCIENTIA SINICA Phys, Mech & Astron, 2011, 41(7): 801-815)
- [2] Miklavčič D, Sersa G, Breclj E, et al. Electrochemotherapy: technological advancements for efficient electroporation-based treatment of internal tumors[J]. Medical & Biological Engineering & Computing, 2012, 50(12): 1213-1225.
- [3] Magori Y, Ohta S, Kagetama T, et al. In vivo experiment of applying nanosecond pulsed electric fields on solid tumor[C]//IEEE Pulsed Power Conference. 2011: 1253-1257.
- [4] 姚陈果, 宁郡怡, 刘红梅, 等. 微/纳秒脉冲电场靶向不同尺寸肿瘤细胞内外膜电穿孔效应研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 115-124. (Yao Chenguo, Ning Junyi, Liu Hongmei, et al. Study of electroporation effect of different size tumor cells targeted by micro-nanosecond pulsed electric field[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 115-124)
- [5] Beebe S J, Fox P M, Rec L J, et al. Nanosecond, high intensity pulsed electric fields induce apoptosis in human cells[J]. Faseb Journal, 2003, 17(9): 1493-1495.
- [6] Schoenbach K H, Katsuki S, Stark R H, et al. Bioelectrics—New applications for pulsed power technology[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(1): 293-300.
- [7] Schoenbach K H, Joshi R P. Ultrashort electrical pulses open a new gateway into biological cells[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7): 1122-1137.
- [8] Schoenbach K H, Nuccitelli R, Beebe S J. ZAP: Extreme voltage could be a surprisingly delicate tool in the fight against cancer[J]. IEEE Spectrum, 2006, 43(8): 20-26.
- [9] 唐靖超, 殷海荣, 马佳路, 等. 纳秒电脉冲作用下KcsA-膜蛋白体系电穿孔的分子动力学模拟[J]. 真空电子技术, 2019, 4(1): 14-20. (Tang Jingchao, Yin Hairong, Ma Jialu, et al. Electroporation of KcsA membrane protein system under nanosecond pulsed electric field: A molecular dynamics simulation[J]. Vacuum Electronics, 2019, 4(1): 14-20)
- [10] 赵君科, 夏连胜, 任先文, 等. 陡前沿纳秒脉冲电源的研制[J]. 高电压技术, 1999(2): 44-46. (Zhao Junke, Xia Liansheng, Ren Xianwen, et al. Research on pulsed power source with nanoseconds risetime[J]. High Voltage Engineering, 1999(2): 44-46)

- [11] 周启明, 孙庚晨, 罗学金, 等. 100kV高压ns陡脉冲源的研制[J]. *高电压技术*, 2002, 28(6): 37-39. (Zhou Qiming, Sun Gengchen, Luo Xuejin, et al. Development of a nanosecond high voltage pulse power of 100kV and 50Ω loading[J]. *High Voltage Engineering*, 2002, 28(6): 37-39)
- [12] 李玺钦, 丁明军, 吴红光, 等. 低抖动快前沿重复频率高压脉冲触发源研制[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 095001. (Li Xiqin, Ding Mingjun, Wu Hongguang, et al. Development of low jitter fast fall time and repetitive high voltage pulsed trigger[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 095001)
- [13] Liu Y, Fan R, Zhang X, et al. Bipolar high voltage pulse generator without H-bridge based on cascade of positive and negative Marx generators[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(2): 476-483.
- [14] 嵇保健, 王若冰, 洪峰, 等. 基于Marx电路的纳秒级高压脉冲电源设计[J]. *高电压技术*, 2016, 42(12): 3758-3762. (Ji Baojian, Wang Ruobing, Hong Feng, et al. Design of nanosecond high-voltage pulsed power source based on Marx generator[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(12): 3758-3762)
- [15] Richard L C, Palo A. High voltage pulsed power supply using solid state switches with voltage cell isolation: United States, US7550876B2[P]. 2009-06-30.
- [16] Wang Jianjing, Chung S H. Impact of parasitic elements on the spurious triggering pulse in synchronous buck converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(12): 6672-6685.
- [17] 纪圣儒, 朱志明, 周雪珍, 等. MOSFET隔离型高速驱动电路[J]. *电焊机*, 2007, 37(5): 6-9,77. (Ji Shengru, Zhu Zhiming, Zhou Xuezheng, et al. Electrical-isolated high-speed MOSFET driver circuit[J]. *Electric Welding Machine*, 2007, 37(5): 6-9,77)
- [18] 徐建清, 高勇, 杨媛, 等. SiC MOSFET驱动电路设计及特性分析[J]. *半导体技术*, 2020, 45(5): 352-358,408. (Xu Jianqing, Gao Yong, Yang Yuan, et al. Driving circuit design and performance analysis for SiC MOSFET[J]. *Semiconductor Devices*, 2020, 45(5): 352-358,408)