



·脉冲功率技术·

基于 Marx 的任意极性方波脉冲电源设计*

姜 松, 黄利飞, 饶俊峰, 王永刚, 李 孜

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘 要: 设计了一种基于 Marx 电路的方波脉冲电源, 该电源采用磁环隔离驱动方案与全桥 Marx 电路相结合, 实现了正极性、负极性和双极性高压方波脉冲的输出, 解决了常规脉冲电源只能输出特定极性脉冲的限制。对电路的运行模式进行了理论分析, 并搭建了 16 级实验样机。实验结果表明: 在空载条件下, 实现了频率 1 kHz, 幅值 10 kV 的正极性、负极性及双极性高压方波脉冲输出。其最小脉宽 1 μ s, 极性可调。该脉冲电源结构紧凑, 可以实现输出电压、脉宽、脉冲极性可调。最后使用该方波脉冲电源驱动平行板介质阻挡放电反应器。结果表明: 该方波脉冲电源可以作为介质阻挡放电驱动源。

关键词: 方波; 脉冲电源; 脉冲功率技术; 脉冲极性; 介质阻挡放电

中图分类号: TM832

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210405

Design of arbitrary polarity rectangular pulse power supply based on Marx

Jiang Song, Huang Lifei, Rao Junfeng, Wang Yonggang, Li Zi

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

Abstract: Low temperature plasma produced by dielectric barrier discharge (DBD) is widely used in plasma medicine, environmental governance and other fields. The common driving source is high voltage pulse power supply. A rectangular pulse power supply based on Marx circuit is designed. The power supply combines the magnetic ring isolation drive scheme with the full-bridge Marx circuit to realize the output of positive, negative and bipolar high voltage rectangular pulses, which solves the limitation that the conventional pulse power supply can only output specific polarity pulses. The operation mode of the circuit is analyzed theoretically and the experimental prototype is built. Under no-load conditions, the pulse polarity can be adjusted and the amplitude of 10 kV high voltage pulse output is realized. The parallel plate dielectric barrier discharge reactor was successfully driven by the pulse power supply, which further verified the feasibility of the scheme.

Key words: rectangular pulse, pulse generator, pulse power technology, pulse polarity, dielectric barrier discharge

介质阻挡放电在大气压下产生的低温等离子体含有大量活性粒子, 因而广泛应用于材料合成与加工^[1]、环境治理^[2]、等离子体医学^[3-4]等领域。传统介质阻挡放电由交流电源驱动^[5], 随着电力电子技术的发展, 脉冲功率技术广泛应用于介质阻挡放电。脉冲电源下介质阻挡放电具有更高的瞬时功率沉积、更低的总功耗和更高的能量效率, 并且放电更加均匀和稳定^[6]。方波脉冲下由于沉积电荷的二次放电, 相比传统脉冲电源更具有明显优势, 且单极性脉冲和双极性在不同的应用条件下各自具有优势^[7-9]。

目前, 单/双极性固态 Marx 发生器、脉冲叠加器、单/双极性直线型变压器驱动源(LTD)研究较多, 其中能在容性负载下输出方波脉冲的较少^[10-13]。刘克富设计了一台输出脉冲电压为 150 kV, 脉宽 1~5 μ s 的单极性 Marx 发生器^[10]。L. M. Redondo 设计了一台输出脉冲电压 \pm 5 kV、脉宽 2.5 μ s 的双极性 Marx 发生器^[11]。饶俊峰设计了一台输出脉冲电压 12.5 kV、电流幅值为 250 A、脉宽 220 ns 的单极性方波脉冲电源^[12]。葛劲伟设计了一台输出脉冲电压 \pm 4 kV、最小脉宽 600 ns 的方波窄脉冲的全固态高压双极性脉冲叠加器^[13]。关于可以输出不同极性的方波脉冲电

* 收稿日期: 2021-09-10; 修订日期: 2021-12-20
基金项目: 上海市扬帆计划项目 (19YF1435000)
联系方式: 姜 松, jecifer@163.com。
通信作者: 饶俊峰, jrfo@usst.edu.cn。

源研究较少。本文设计的高压方波脉冲电源采用金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)作为主开关,并使用磁环隔离驱动方案为MOSFET提供同步驱动信号。分析了该电路拓扑结构的工作原理,并搭建了实验样机,利用该脉冲电源成功驱动平行板介质阻挡放电反应器,进一步验证了该方案的可行性。

1 方波脉冲电源主电路设计

1.1 Marx主电路

全桥结构的Marx主电路如图1所示,直流源充电电压为 V_{DC} 。每级电路由5个MOSFET开关S、主电容C以及一个快恢复二极管D组成^[14]。每级电路中的全固态MOSFET开关用于控制电路的充放电状态。一般情况下,一个 n 级全桥结构Marx发生器由 $5n$ 个全固态开关、 n 个主电容和 n 个快恢复二极管构成。全桥结构Marx主电路虽然结构复杂,但控制灵活,使其分别输出单极性和双极性方波脉冲成为可能。

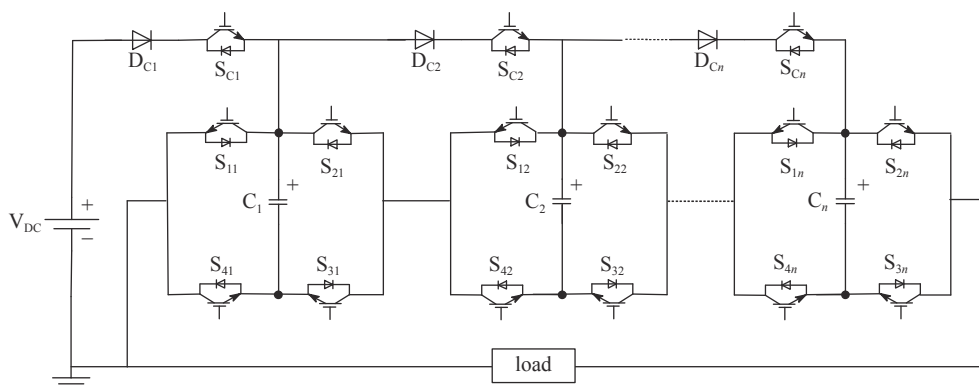


Fig. 1 Marx circuit

图1 Marx主电路

1.2 工作原理

充电回路如图2蓝色线条所示,在电容充电阶段,无论正极性、负极性还是双极性,主电容充电时 $S_{11} \sim S_{1n}$, $S_{21} \sim S_{2n}$ 开关全部断开,开关 $S_{c1} \sim S_{cn}$, $S_{31} \sim S_{3n}$, $S_{41} \sim S_{4n}$ 全部导通,使电容通过充电二极管 $D_{c1} \sim D_{cn}$, $S_{c1} \sim S_{cn}$, $S_{31} \sim S_{3n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 进行并联充电,使主电容电压等于达到直流电源充电电压值。由于二极管导通时存在压降,故主电容电压会略低于直流源电压,随着级数增多充电电压下降越明显。

传统双极性Marx全桥电路控制时序如图3所示,正极性放电时,开关 $S_{21} \sim S_{2n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 全部同步导通;负极性放电时,开关 $S_{11} \sim S_{1n}$ 和 $S_{31} \sim S_{3n}$ 全部导通。该控制方案因简单可靠而广泛使用,但由于该控制方案下的正、负脉冲存在明显拖尾,且存在预脉冲,无法在容性负载下获得方波脉冲。通过在正极性脉冲和负极性脉冲结束时提供截尾回路,可以在容性负载下获得双极性方波脉冲^[15]。全桥结构电路截尾回路灵活多样,然而截尾回路的选取不当将会导致双极性方波脉冲存在正负偏压^[13]。最后改进的控制时序如图4所示,理论上将双极性脉冲的正脉冲和负脉冲的控制时序分离出来就可以输出单极性正、负方波脉冲,但是由于全桥结构Marx实际电路中开关管的结电容和电路杂散参数的影响,在单极性正脉冲或者负脉冲放电结束,进入下一周期充电时, $S_{31} \sim S_{3n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 并不能完全同步导通,进而导致结电容对负载放电。因而在设计单极性脉冲时序时,必须在单极性脉冲放电结束时,将 $S_{31} \sim S_{3n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 开关管的结电容电荷释放。

正极性脉冲放电回路如图2中红色线条所示,在正极性脉冲放电时,开关管控制时序如图4(a)所示,开关 $S_{c1} \sim S_{cn}$, $S_{11} \sim S_{1n}$ 和 $S_{31} \sim S_{3n}$ 全部关断,开关 $S_{21} \sim S_{2n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 全部导通,通过主电容串联进行放电,输出电压幅值等于每级电容电压 V_{DC} 相加,理论上正极性输出电压幅值为 nV_{DC} 。开关 $S_{c1} \sim S_{cn}$ 关断,且内部自带的反并联二极管时反相截止,对级间电压和直流充电电源进行隔离。由于二极管的存在,即使由于某一级MOSFET不能正常

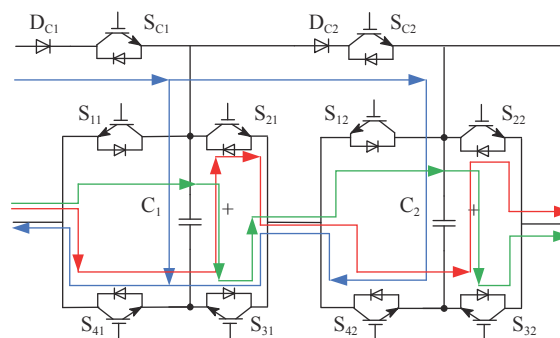


Fig. 2 Two-stage sub-modules of Marx circuit

图2 Marx主电路两级子模块

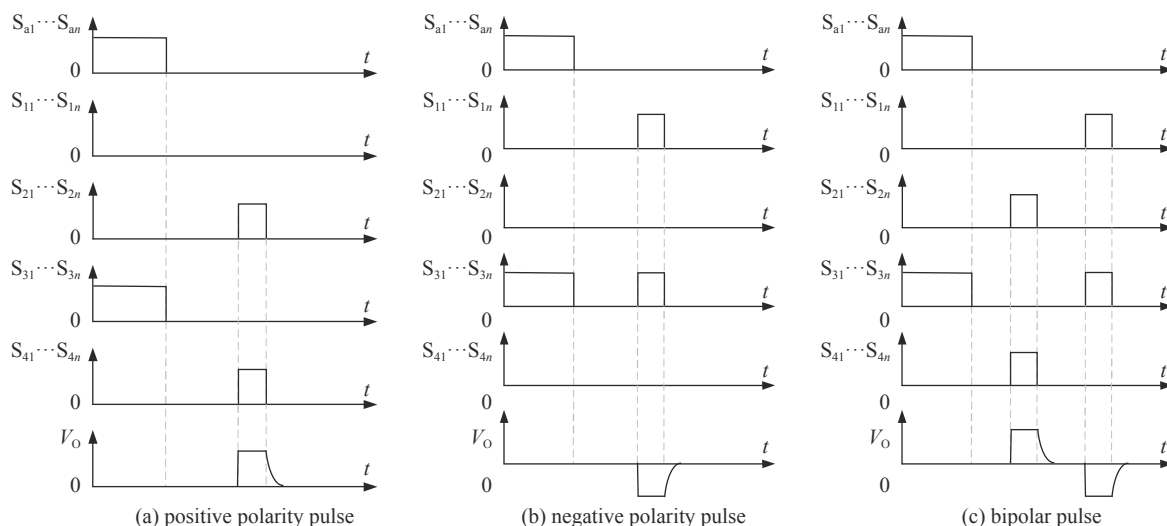


Fig. 3 Time sequence diagram of traditional control scheme

图3 传统控制方案时序图

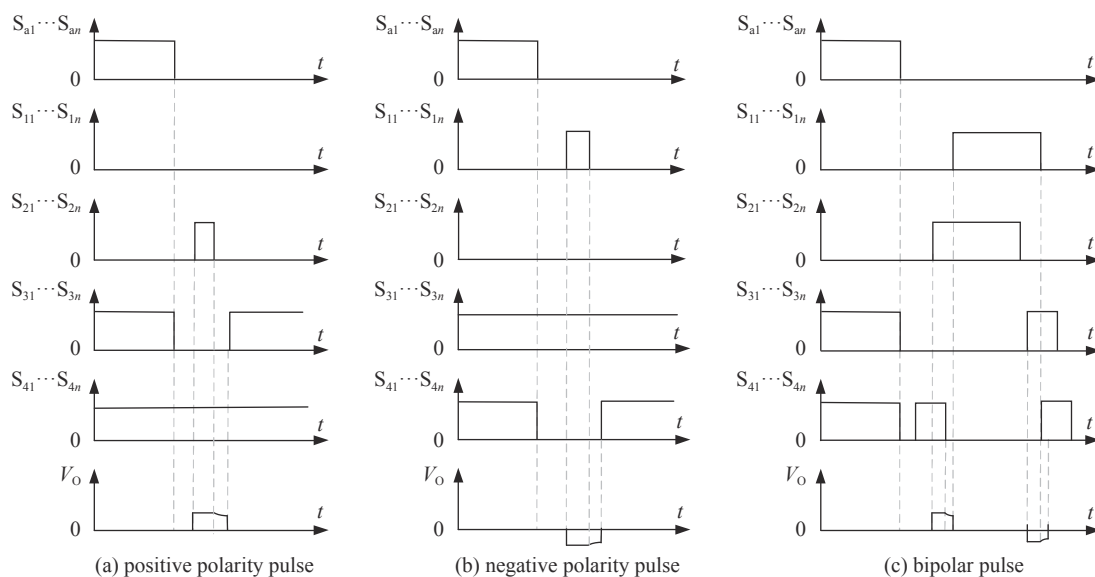


Fig. 4 Time sequence diagram of improved control signal

图4 改进不同脉冲极性控制时序图

工作,二极管导通并旁路本级 MOSFET 开关,然后直接与下一级串联放电,此时输出电压为 $(n-1)V_{DC}$ 。

负极性脉冲放电回路如图 2 绿色线条所示,在负极性脉冲放电时,开关管控制时序如图 4(b)所示,开关 $S_{c1} \sim S_{cn}$, $S_{21} \sim S_{2n}$ 和 $S_{41} \sim S_{4n}$ 全部关断,开关 $S_{11} \sim S_{1n}$ 和 $S_{31} \sim S_{3n}$ 全部导通,通过主电容串联进行放电,输出电压幅值等于每级电容电压相加,理论上负极性输出电压幅值等于 nV_{DC} 。此时开关 $S_{c1} \sim S_{cn}$ 关断,且内部自带的反并联二极管此时反相截止,对级间电压和直流充电电源进行隔离。由于开关的 $S_{c1} \sim S_{cn}$ 存在,即使由于某一级 MOSFET 不能正常工作,二极管导通并旁路本级 MOSFET 开关,然后直接与下一级串联放电,此时输出电压为 $(n-1)V_{DC}$ 。

在双极性脉冲放电时,开关管控制时序如图 4(c)所示,双极性脉冲的正脉冲导通原理与正极性放电一致,双极性负脉冲放电原理与负极性放电一致,同样具有电压钳位功能。但双极性脉冲的正脉冲放电结束后, $S_{11} \sim S_{1n}$, $S_{21} \sim S_{2n}$ 开关需保持开通,对放电管结电容上的电荷进行截尾释放,避免形成正负偏压和容性负载下的拖尾。

1.3 驱动电路设计

MOSFET 开关管信号由现场可编程逻辑门阵列 (FPGA) 产生, FPGA 抗干扰能力强,信号不易受干扰。驱动信号传输到 MOSFET 驱动电路进行功率放大。驱动电路必须进行高压隔离和保持同步,因而采用串心磁环隔离驱动方案^[16-17]。驱动电路如图 5 所示,驱动电路主要由 2 个 MOSFET 和一个驱动变压器构成,变压器一次侧串联连接,保证了驱动的同步性,通过磁隔离进行高压隔离。以充电管 $S_{c1} \sim S_{cn}$ 为例对驱动电路工作原理进行解释。当充电

管开通信号 Turn-on 传递到驱动变压器二次侧,如图中 5 中红色线条所示,开关 S_{1-2} 承受正压开通,导通信号通过 D_{1-1} , S_{1-2} 传递到 S_{c1} , 触发 S_{c1} 导通。由于正负信号死区时间内 S_{1-1} 和 S_{1-2} 保持关闭,开关 S_{c1} 维持在高电平,保持导通。当 Turn-off 信号到达时,如图 5 中蓝色线条所示,开关 S_{1-1} 导通,关断信号通过 D_{1-2} , S_{1-1} 传递到 S_{c1} , 触发 S_{c1} 关闭并使其维持负压。

1.4 参数设计

直流电源输出电压最高为 1 kV, 为获得 10 kV 的高压输出, 该方波脉冲电源选用级数为 16 级。根据充电电压的需求及考虑到经济性, 本电路的 MOSFET 采用 CREE 公司生产的 C2M0080120D 碳化硅功率 MOSFET, 其额定电压 1200 V, 额定电流 31.6 A。为了保证电路充电可靠性并提高充电效率, 充电二极管采用 LRC 公司生产的 FR157 快恢复二极管, 最大反向峰值电压 1000 V, 最大平均正向电流 1.5 A。电容通过导通的 MOSFET 串联放电, 主电容的大小由最大脉冲宽度和放电时间常数确定, 主电容的选取公式为

$$C_{eq} = C_n / 16 > I_L \Delta t_d / \Delta U \quad (1)$$

式中: I_L 为流过负载的电流; Δt_d 为最大脉冲宽度; ΔU 为输出脉冲最大降幅。在电阻负载为 1 k Ω , 假设最大脉宽 5 μ s 时允许电压的电压降落为输出电压的 20%, 根据式(1)可得, 电容容量不小于 400 nF。因此选取容值为 470 nF、工作电压 1200 V 的陶瓷贴片电容为主电容。

2 实验验证

为了验证本文所设计电源的可行性, 搭建了 16 级的样机进行验证, 实物图如图 6 所示。通过调节直流电压源实现输出脉冲幅值的调节, 由 FPGA 信号板可以实现脉冲极性、脉宽等参数的调节。

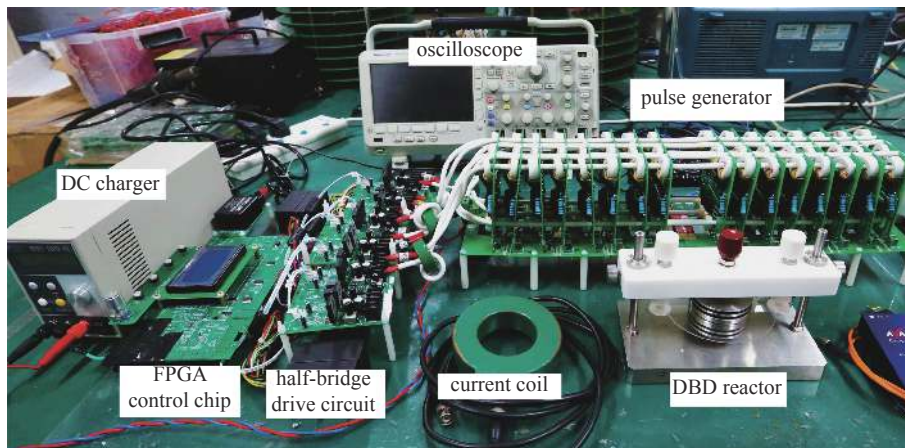


Fig. 6 Experimental hardware platform

图 6 实验硬件平台

实验结果如图 7 和图 8 所示, 从图中可以看出, 电压幅值从 0~10 kV 可调, 实现了正极性、负极性和双极性高压方波脉冲的输出。通过 FPGA 控制信号时序输出实现不同脉宽的高压脉冲输出, 图 7 为在电压 8 kV 时, 正极性、负极性和双极性脉冲不同脉宽下的输出电压波形。

图 8 为在不同极性高压方波脉冲输出的电压波形, 从中可看出在正极性、负极性和双极性方波脉冲宽度 2 μ s, 在脉冲上升沿存在轻微过冲, 这是由于电路杂散参数的影响, 但是在高压情况可以忽略, 满足脉冲输出性能。

图 9 为在频率 1 kHz 条件下正极性、负极性和双极性重频输出波形。由于一个放电周期内主电容充电一次以及双极性正脉冲和负脉冲放电回路的不同, 导致双极性脉冲负脉冲幅值略低于正脉冲。

3 DBD 实验

用该方波脉冲电源驱动平行板 DBD 反应器, 反应器采用单介质覆盖地电极, 介质材料为石英玻璃, 介质厚度

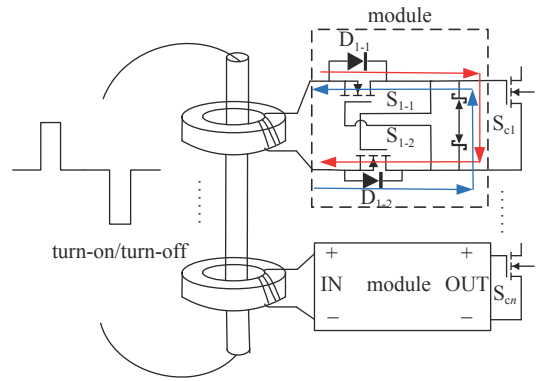


Fig. 5 Drive circuit diagram

图 5 驱动电路图

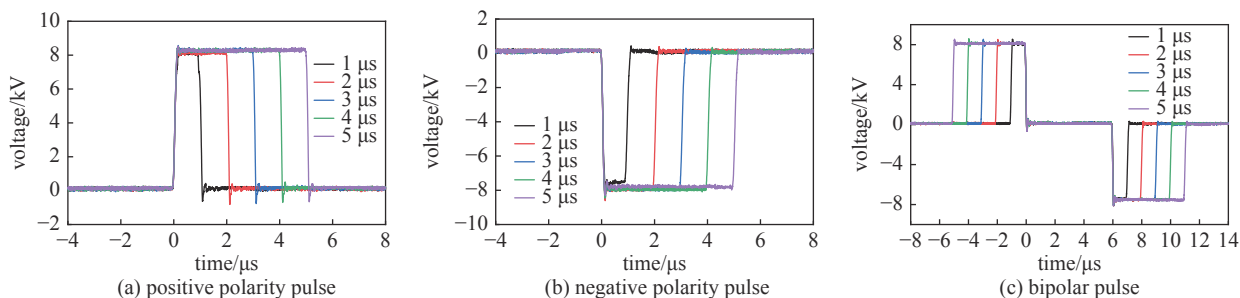


Fig. 7 Output pulse waveform under different pulse widths

图 7 不同脉宽下输出脉冲波形

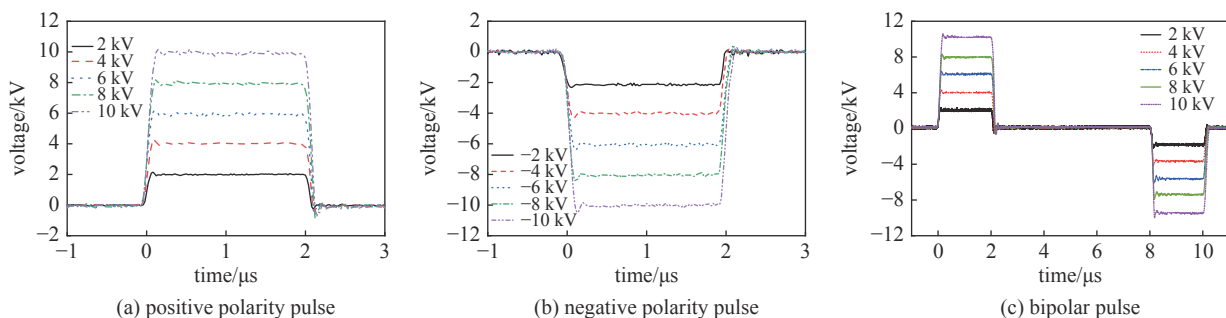


Fig. 8 Output voltage waveforms under different polarity

图 8 不同极性下的输出电压波形

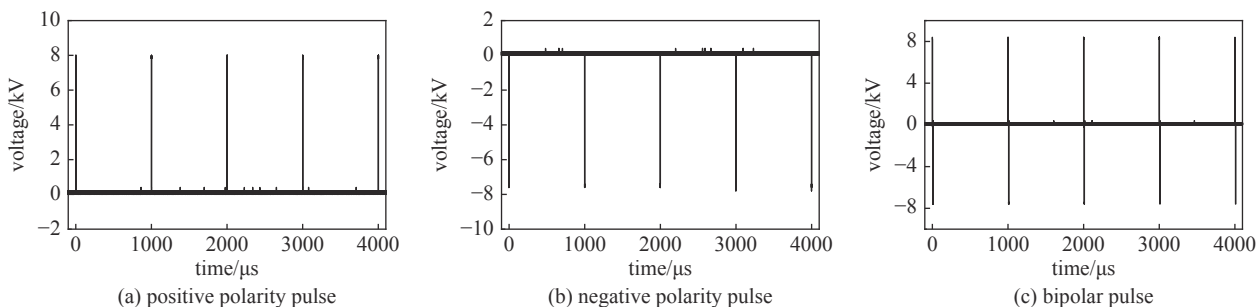


Fig. 9 1 kHz output voltage waveforms

图 9 1 kHz 下输出电压波形

1 mm, 空气间隙 0.5 mm, 反应器等效电容值约为 60 pF。在频率 1 kHz、电压幅值 8 kV 条件下, 在不同脉冲极性下电压电流波形如图 10 所示。由图可知, 在单极性正脉冲和负脉冲的上升沿和下降沿均发生了放电, 一次放电主要由电源提供能量, 二次放电的发生主要由于介质表面沉积电荷引起^[7], 正极性脉冲下二次放电电流略大于负极性脉冲下二次放电电流, 可能是由于流光极性和电极结构所引起。在双极性脉冲下, 一个周期下发生四次放电, 第一次和第三次放电由电源提供能量, 第二次和第四次放电主要由沉积电荷引起。

图 11 是在频率 1 kHz、电压幅值 8 kV 条件下, 方波脉冲电源驱动平行板 DBD 反应器的放电现象图, 从图中可

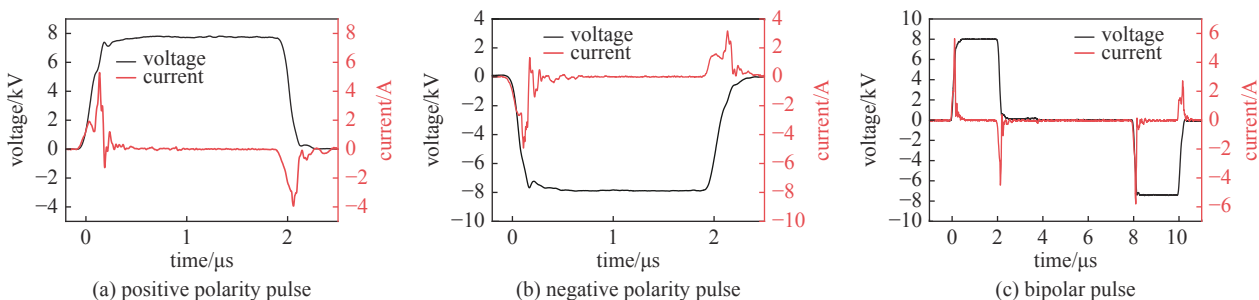


Fig. 10 Voltage and current waveforms of dielectric barrier discharge under different polarity pulses

图 10 不同极性脉冲下介质阻挡放电电压电流波形

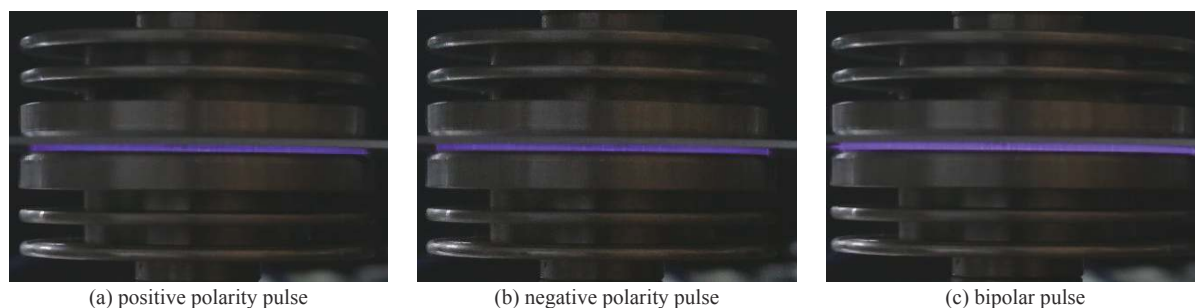


Fig. 11 Dielectric barrier discharge under different polarity pulses

图 11 不同极性脉冲下介质阻挡放电

以观察到明显的放电现象。由图可以看出,图 11 均为丝状放电,丝状放电的形成主要是由于气隙局部击穿而随机形成大量的微放电通道,微放电通道的寿命通常只有几十 ns。由图 11 可知,由于双极性脉冲下,击穿电压低,且在介质表面沉积电荷更多,所以双极性脉冲下的放电强度大且更加均匀;可能是由于流光极性的影响,所以在正极性方波脉冲放电强度略大于负极性。

4 结 论

本文设计了一种基于 Marx 电路的方波脉冲电源,由磁环隔离提供同步驱动信号并实现了高压隔离。对电路的运行模式进行了理论分析。并搭建了实验样机,得到了脉冲极性、脉宽、幅值可调的高压方波脉冲,解决了常规脉冲电源只能输出特定极性脉冲的限制。实现频率 1 kHz、幅值 10 kV 的正极性、负极性、双极性高压方波脉冲输出;同时利用该脉冲发生器驱动平行板介质阻挡放电反应器,验证该电源在正极性、负极性以及双极性电压下都能实现介质阻挡放电,在低温等离子体应用领域有广阔的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Yang W X, Sun M X, Song H J, et al. A novel method to synthesize luminescent silicon carbide nanoparticles based on dielectric barrier discharge plasma[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(47): 16949-16956.
- [2] Iervolino G, Vaiano V, Palma V. Enhanced removal of water pollutants by dielectric barrier discharge non-thermal plasma reactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, 215: 155-162.
- [3] Gershman S, Harreguy M B, Yatom S, et al. A low power flexible dielectric barrier discharge disinfects surfaces and improves the action of hydrogen peroxide[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 4626.
- [4] 梅丹华, 方志, 邵涛. 大气压低温等离子体特性与应用研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(04): 1339-1358. (MEI Danhua, FANG Zhi, SHAO Tao. Recent progress on characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(04): 1339-1358)
- [5] Miao C, Liu F, Wang Q, et al. Investigation on the influence of electrode geometry on characteristics of coaxial dielectric barrier discharge reactor driven by an oscillating microsecond pulsed power supply[J]. *The European Physical Journal D*, 2018, 72: 57.
- [6] Wang Q, Liu F, Miao C, et al. Investigation on discharge characteristics of a coaxial dielectric barrier discharge reactor driven by AC and ns power sources[J]. *Plasma Sci. Technol.*, 2018, 20: 035404.
- [7] Liu S H, Neiger M. Excitation of dielectric barrier discharges by unipolar submicrosecond square pulses[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001, 34(11): 1632-1638.
- [8] Zhang L, Yang D Z, Wang W C, et al. Atmospheric air diffuse array-needles dielectric barrier discharge excited by positive, negative, and bipolar nanosecond pulses in large electrode gap[J]. *J Appl Phys*, 2014, 116: 113301.
- [9] Yuan D, Ding C, He Y, et al. Characteristics of dielectric barrier discharge ozone synthesis for different pulse modes[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2017, 37(4): 1165-1173.
- [10] 雷宇, 邱剑, 刘克富. 150kV全固态高压脉冲发生器设计[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(3): 673-677. (Lei Yu, Qiu Jian, Liu Kefu. Design of 150 kV all-solid-state high voltage pulsed power generator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(3): 673-677)
- [11] Canaesinh H, Redondo L M, Silva J F. Marx-type solid-state bipolar modulator topologies: performance comparison[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2603-2610.
- [12] 饶俊峰, 姜松, 李孜. 基于Marx和磁开关的方波脉冲电源的研制[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(05): 136-140. (Rao Junfeng, Jiang Song, Li zi, et al. Rectangular pulse generator based on Marx and magnetic switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(05): 136-140)
- [13] 葛劲伟, 姜松, 饶俊峰, 等. 全固态高压双极性方波脉冲叠加器的研制[J]. 高电压技术, 2019, 45(04): 1305-1312. (Ge Jinwei, Jiang Song, Rao Junfeng, et al. Development of all-solid-state bipolar pulse adder with high voltage rectangular wave pulses output[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(04): 1305-1312)
- [14] 魏新芳, 郭政良, 王浩然. 双极性高频高压方波脉冲电源研究述评[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(06): 36-46. (Wei Xinlao, Guo Zhengliang, Wang Haoran.

- Commentary on the research of bipolar high-frequency and high-voltage square wave pulse power supply[J]. *Journal of Chongqing University*, 2017, 40(06): 36-46)
- [15] 李柳霞. 容性负载下全固态脉冲源的特性研究[D]. 复旦大学, 2013: 65-72. (Li Liuxia. Capacitive loads of all-solid-state pulse source characteristics research [D]. Fudan University, 2013: 65-72)
- [16] Rao J F, Guo L Y, Liu H T, et al. Design of high-voltage square pulse generator based on cascade switches and time-delay driver[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(9): 4329-4334.
- [17] Zhou Z W, Li Z, Rao J F, et al. A high-performance drive circuit for all solid-state marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(11): 2779-2784.