



·高电压及脉冲功率技术·

双极性直线型变压器驱动源的研制*

唐 潇^{1,2}, 孙文杰¹, 何明祖¹, 姚陈果¹, 余 亮¹, 董守龙¹

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 国网浙江省电力有限公司 杭州供电公司, 杭州 311225)

摘 要: 针对双极性脉冲电压介质阻挡放电 (DBD) 的应用需求, 提出了一种基于直线型变压器驱动源 (LTD) 的全固态双极性纳秒脉冲形成拓扑。脉冲产生期间各开关的驱动电路均可靠接地极大降低了高低压隔离需求, 因此与传统单极性 LTD 一样理论上可实现脉冲子模块的无限制叠加以获得更高电压的双极性脉冲输出。各脉冲子模块上集成数量相等但具有相反电压极性的储能电容, 使隔离磁心的励磁电流在不同脉冲极性下正负交变, 有效提高了磁心的利用率, 不再需要设置专门的磁通复位电路。最后研制了一套模块化紧凑型双极性 LTD 原理验证样机, 可输出脉冲参数为: 电压幅值 $0 \sim \pm 2$ kV, 脉冲电流 80 A, 脉冲宽度 50~200 ns, 所有脉冲参数可通过上位机灵活可调, 通过增加 LTD 子模块数量可获得更高的脉冲电压。

关键词: 纳秒脉冲源; LTD; 纳米晶磁心; 固态开关; 双极性脉冲

中图分类号: TM81; TM83; TM89

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210078

A bipolar nanosecond pulse source based on liner transformer driver

Tang Xiao^{1,2}, Sun Wenjie¹, He Mingzu¹, Yao Chenguo¹, Yu Liang¹, Dong Shoulong¹

(1. State Key Laboratory of Transmission and Distribution Equipment and System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 311225, China)

Abstract: Aiming at the application demand of bipolar pulse voltage DBD discharge, an all-solid-state bipolar nanosecond pulse forming topology based on linear transformer driver (LTD) is proposed. The control circuit of each switch does not require additional high voltage isolated power supply in the operating state. In theory, it can achieve unlimited stacking of modules like the traditional unipolar LTD to obtain higher voltage bipolar pulse output. Each module integrates same number of energy storage capacitors with opposite voltage polarity, which makes the magnetic core's exciting current alternate between positive and negative directions under different pulse polarity, thus effectively improves the utilization rate of the magnetic core, and does not need an additional magnetic flux reset circuit. Finally, a modular compact bipolar LTD principle verification prototype was developed. The key parameters of the prototype are as follows: amplitude 0 to ± 2 kV, pulse width of top flat 50 ns–200 ns, burst repetition frequency 500 kHz. All the pulse parameters can be flexibly adjusted through the host computer.

Key words: nanosecond pulse generator; linear transformer driver; nanocrystalline magnetic core; solid-state switch; bipolar polarity

近年来, 大气压非平衡等离子体因其独特的优势, 在工业臭氧制取^[1-2]、生物医学^[3-5]、薄膜沉积^[6]、聚合材料表面改性^[7-8]、等离子体流动控制^[9-11]等领域得到了广泛应用。介质阻挡放电因能够在大气压条件下产生大面积均匀辉光放电或是汤森放电而极具工业应用价值, 所产生的等离子体特性主要由激励电源所决定。高压纳秒脉冲电源因为能够有效抑制放电从辉光放电到电弧放电的过渡, 可以在更宽的参数范围内获得更加均匀的非平衡等离子体, 所以通常将其作为一种高效的等离子体激励电源^[12-14]。

有研究表明, 当激励电压为双极性脉冲时, 在正极性脉冲 nsDBD 放电结束之后, 介质材料表面会累积一定的残余电荷, 残余电荷所形成的空间电场与随后施加的负极性脉冲电场同向从而使得起始放电电压明显降低, 更有

* 收稿日期: 2021-03-11; 修订日期: 2021-05-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51877022); 国家自然科学基金青年基金项目 (51807016)

作者简介: 唐 潇 (1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事脉冲功率技术及其生物医学应用研究。

通信作者: 董守龙 (1989—), 男, 副教授, 主要从事脉冲功率技术及其应用、电气设备在线监测与故障诊断技术、生物医学中的电工新技术及高压新技术等研究。

利于激发介质阻挡放电^[15-17]。

因此研制多参数宽范围可调的双极性纳秒脉冲电源对研究双极性 nsDBD 的放电规律具有重要意义。传统的火花球隙开关、磁开关等功率器件因其可控性、重复性和稳定性较差已不能满足脉冲功率技术的应用需求。随着电力电子技术的发展,基于半导体器件的纳秒脉冲源有望为该应用领域提供高品质的激励源。

国内外学者对全固态双极性脉冲发生器进行了一定的研究。其中最简便的方法是利用全桥或者半桥结构对高压电源进行斩波输出^[18-20]。此种拓扑结构不具有升压功能,所以为了获得更高的脉冲电压幅值,全桥或半桥通常需由多个 IGBT/MOSFET 串联堆叠而成。而且各个开关对地的杂散电容不同,这可能会导致开关导通或关断出现不同步,因此需要采用复杂的动态均压电路^[21-22]。为此,有学者直接使用全桥模块进行 Marx 功率叠加以获得更高的脉冲电压幅值^[23-24],但是当叠加级数增多之后,各子模块开关的栅极驱动电路面临着同低压控制端的高压隔离问题,且此种方案使用的半导体开关数量较多,使得控制策略较为复杂,在一定程度上增大了系统失效的风险。

本文基于单极性 LTD 拓扑^[25],提出了一种新型双极性 LTD 脉冲形成电路,保留了单极性 LTD 电路的优点,即脉冲放电期间各开关的驱动电路均可靠共地降低高低压隔离需求,即理论上脉冲子模块可无限制叠加以获得更高电压的双极性脉冲输出。饶俊峰等^[26]提出了一种利用两个相同的 LTD 模块经过副边绕组反向串联构成,能够产生双极性灵活可调纳秒窄脉冲。但由于不同极性模块的二次侧绕组直接串联,当其中一个模块工作时容易对另一个模块产生电磁干扰,并且需要设置磁通复位电路。本文设计的电路拓扑中的磁心励磁电流在不同极性脉冲下正负对称交变,有效提高了磁心的利用率,高频输出模式下不需要再设置专门的磁通复位电路。

本文首先详细分析了此双极性 LTD 脉冲拓扑的工作原理,然后确定了磁心以及相关器件的参数选择原则。最后研制了一台原理验证样机,测试了不同类型负载下的输出脉冲波形并进行了分析。

1 双极性 LTD 脉冲发生器的基本原理

单极性 LTD 脉冲形成电路的等效拓扑如图 1(a) 所示,其基本原理为磁感应叠加,可以有效解决传统全固态 Marx 电路在脉冲电压升高时所面临的开关高位悬浮驱动问题。在单极性 LTD 电路中,因为各脉冲子模块储能电容的充电电压极性相同,因此隔离磁心的工作磁通仅在磁化曲线的第一象限单方向直流脉动,磁心的利用率不高,在高频输出下需要考虑磁心的有效复位。

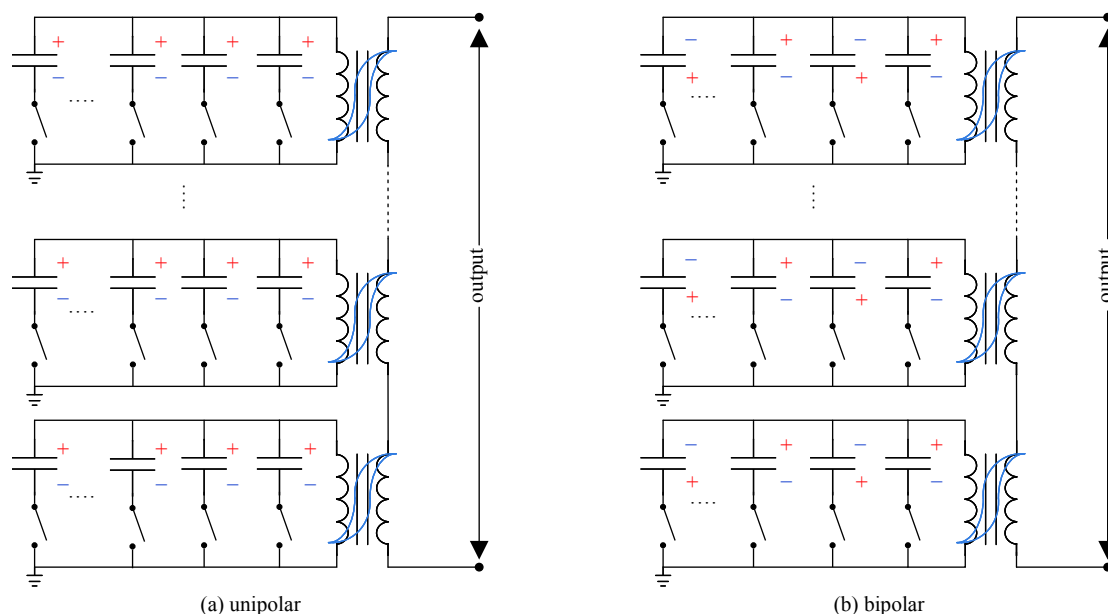


Fig. 1 Basic structure of LTD

图 1 LTD 电路原理

本文提出的双极性 LTD 脉冲形成电路的等效拓扑如图 1(b) 所示,各脉冲子模块由具有相反电压极性的储能电容与开关组成,分别对应相反极性的脉冲输出。与单极性 LTD 原理相同,各脉冲子模块通过磁感应叠加使得所有开关的驱动电路均处于地电位。且该脉冲发生器在不同极性的脉冲输出下,隔离磁心的工作磁通在磁化曲线的第一、三象限对称交变,有效提高了磁心的利用率。本文基于 MOSFET 所设计的双极性 LTD 等效主电路拓扑如

图 2 所示,各脉冲子模块由多个电容、开关并联组成以增强带载能力。该等效电路将图 1(b) 双极性 LTD 原理图中的变压器一次侧和二次侧的位置进行了镜像处理,即图 2~图 4 的变压器一次侧输入侧实际上是在磁心的右边,所以负载 R_L 的位置体现在磁心的左边。下面将以 3 级 LTD 模块叠加为例,详细分析正极性和负极性两种脉冲输出模式的工作原理。

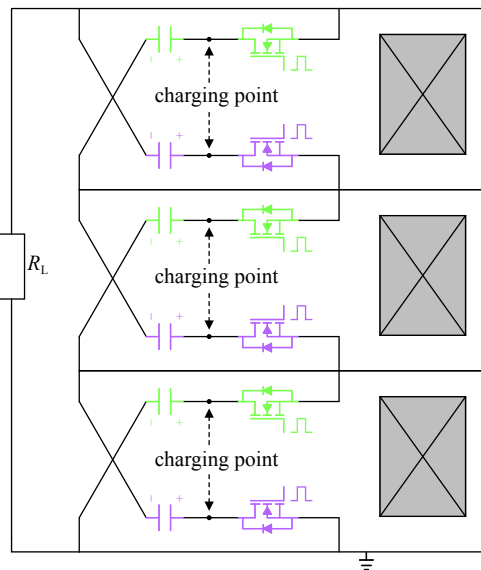


Fig. 2 Topology of solid-state bipolar LTD pulse generator equivalent circuit
图 2 全固态双极性 LTD 等效电路拓扑

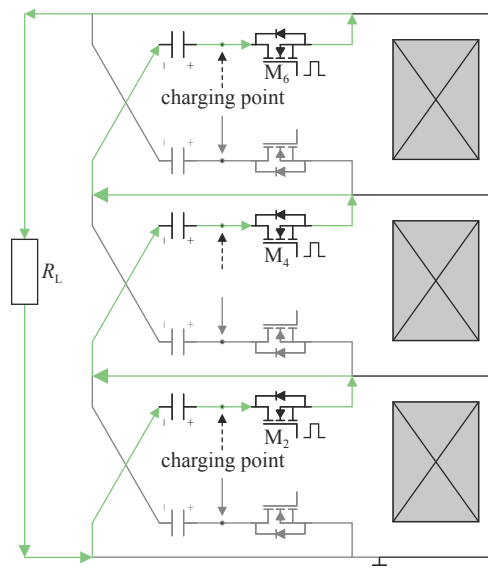


Fig. 3 Circuit of positive polarity discharge
图 3 正极性放电电路图

1.1 正极性放电模式

正极性放电电路如图 3 所示,假定在各 MOSFET 触发导通之前,各储能电容电压均已达到稳态值 U_{dc} 。随后控制 M_2, M_4, M_6 导通,则各级具有相同电压极性的储能电容依次串联连接,因为高磁导率磁心的脉冲隔离作用,使得储能电容优先对负载 R_L 放电,如绿色放电回路所示。输出的脉冲电压为

$$U_L = 3U_{dc} \quad (1)$$

1.2 负极性模式

负极性放电电路如图 4 所示。在正极性放电结束,经过一定的死区时间之后,控制 M_1, M_3, M_5 导通,各级具有相同电压极性的储能电容依次串联连接,如红色放电回路所示。输出的脉冲电压为

$$U_L = -3U_{dc} \quad (2)$$

可以从上图中看到各级脉冲子模块的正极性放电和负极性放电时 MOSFET 均共源极连接,各脉冲模块之间利用磁心进行隔离。在脉冲放电期间,对一次侧而言,因为磁心的磁隔离作用,各级 MOSFET 的源极均处于地电位,不同于固态 Marx 发生器在脉冲放电时每级开关的源极处于高位悬浮状态使驱动需要强电气隔离,极大降低了高低压隔离需求。

2 双极性 LTD 脉冲发生器设计

2.1 磁心的设计

隔离电感将直接影响脉冲发生器的性能,下面以单级 LTD 模块为例,详细介绍隔离电感的设计,单级 LTD 正极性放电电路如图 5(a) 所示。在正极性放电期间,磁心未饱和因此具有较高的磁导率,相比于负载回路磁心回路只有较小的励磁电流,在磁化曲线中,当工作磁通处于正向时磁感应强度基本维持在第一象限,如图 6 所示。由励

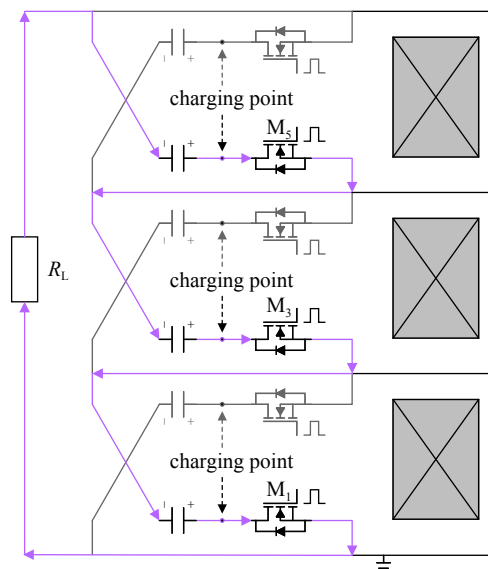


Fig. 4 Circuit of negative polarity discharge
图 4 负极性放电电路图

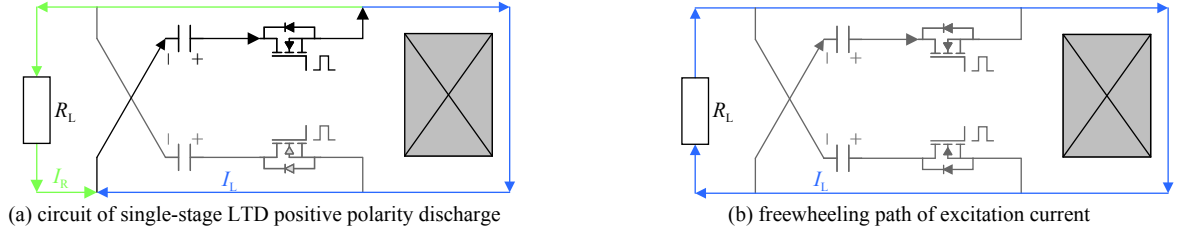


Fig. 5 Positive polarity discharge process of single module

图 5 单模块正极性放电过程

磁电流表达式(3)可以看出,为尽量减小励磁电流可选用具有高磁导率的磁心材料。

$$I_L = \int \frac{U_c l}{\mu S} dt \quad (3)$$

$$l = \frac{2\pi(r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4)$$

式中: U_c 为电容电压, μ 为磁心磁导率, S 为磁心截面积, l 为环形磁心的等效磁路长度, r_2 和 r_1 分别为环形磁心的外径和内径。

为避免在规定脉冲宽度 t_w 时间内磁心饱和并且留有一定裕度, 设定在 t_w 时间内, 磁心能达到的最大磁感应强度 $B_{set} = 0.7B_s$, 其中 B_s 为磁心的磁饱和感应强度, 磁心的填充系数为 α 。则磁心的最小截面积应为

$$S_{min} = \frac{U_c t_w}{\alpha B_{set}} \quad (5)$$

正极性放电结束之后, 励磁电流经负载续流, 如图 5(b) 所示。经过时间 t_f 后励磁电流减小到零, 如图 6 所示。

$$t_f \approx 5\tau = \frac{5n\mu S}{R_L l} \quad (6)$$

式中: n 为 LTD 的级数。

在一个放电周期内, 磁心所消耗的能量为

$$W = \int_{\text{onecycle}} U_c i_L dt = \int_{\text{onecycle}} \left(S \frac{dB}{dt} \right) (Hl) dt = Sl \int_{\text{onecycle}} H dB \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 单位体积的磁心损耗正比于磁滞回线所包围的面积。因此在磁心最小截面 S_{min} 确定的前提下, 为尽量减小磁心损耗可选用具有较小等效磁路长度的磁心。为了尽量减小系统的杂散电感, 在满足磁心伏秒积的前提下选用磁导率高、矫顽力小、磁滞损耗小的北京首冶生产的纳米晶合金磁心。通过该磁心的数据手册可知其磁饱和感应强度约为 1.2 T, 磁心填充系数为 0.78, 本文设计的脉冲源脉冲最大输出宽度为 200 ns, 单级高压直流充电电压为 500 V, 通过式(5)可以计算出磁心的最小横截面积为 152.6 mm²。最后通过定制得到磁心的尺寸为高 12 mm、内直径 $r_1 = 20$ mm、外直径 $r_2 = 35$ mm、横截面积 $S = 180$ mm², 整个磁心是由厚约 20 μ m 的带材绕制而成, 并且采用绝缘胶带缠绕磁心以减小磁心的整体体积从而降低漏感对脉冲前沿的影响。

同理, 单极 LTD 负极性放电电路如图 7 所示, 在磁化曲线中, 当工作磁通处于反向时磁感应强度基本维持在第三象限, 如图 6 所示。显然, 对比单极性 LTD, 双极性 LTD 有效提高了磁心的利用效率。

2.2 储能电容

储能电容是瞬时高功率脉冲的主要能量来源, 起到能量储存和传输的作用, 对其的选取主要考虑其耐压值和电容量两方面因素。储能电容的耐压值应大于每一级 MOSFET 最大工作电压, 因此储能电容的耐压值应选择 500 V 以上。电容量选取则主要由放电时间常数来决定, 在最大脉冲宽度输出下允许有 5% 的电压降。在电容放电期间在负载上可以等效为每级电容进行串联, 则每级储能电容的最小容值为^[14]

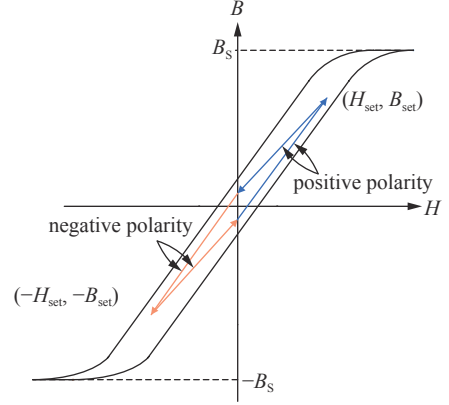


Fig. 6 Hysteresis curve

图 6 磁滞曲线图

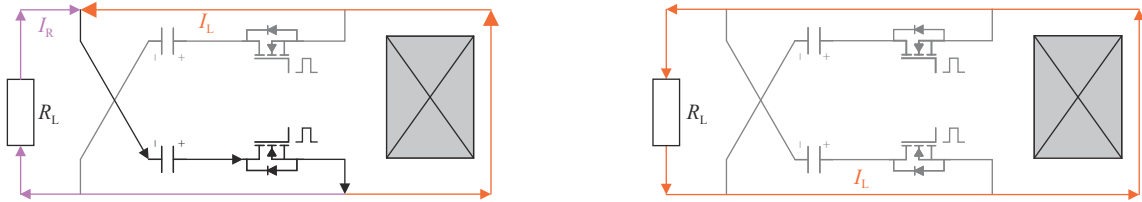


Fig. 7 Negative polarity discharge process of single module

图 7 单模块负极性放电过程

$$\frac{C_{\min}}{n} \geq \frac{\tau}{\varepsilon R_L} \quad (8)$$

式中： C_{\min} 为每级电容的最小容值， ε 为允许脉冲电压顶降系数， n 为 LTD 模块数， τ 为输出脉冲的最大宽度， R_L 为负载电阻。通过计算可以得到 C_{\min} 需大于 160 nF，为了保留充足裕度，每级电容取值 500 nF。本文选取 5 个容值为 100 nF、耐压 1000 V 的贴片陶瓷电容 X7R 进行并联作为每级 LTD 的储能元件。

2.3 高压直流电源

高压直流电源的选择主要满足充电电压最大值和平均功率 2 个参数需求。为了减小系统体积，选用定制的天津东文公司生产的型号为 DW-P052-30F76 为高压直流充电电源，其最高输出电压 500 V，输出电流 30 mA。该直流电源具有高调节精度、高稳定性和采用伏频转换控制的高智能化，适用于脉冲电源的可靠充电设置。

2.4 开关和驱动电路设计

MOSFET 相对于 IGBT 具有更快的导通关断时间，更小的开关损耗以及能达到更高的重复频率。本文设计的脉冲源采用型号为 STB20N90K5 的 SiC-MOSFET 作为主开关，其最高耐压为 900 V，运行电流 20 A，上升时间 13 ns，下降时间 16 ns。由于设计的脉冲发生器最高输出电流为 80 A，所以每级采用 8 个开关进行并联。驱动芯片采用型号为 MCP1407 的互补推挽集成电路，其最高峰值电流为 6 A，具有较高驱动能力。为了降低主电路放电对驱动信号的电磁干扰，该脉冲源采用 Firecmmms 系列数据率为 50 Mbd 的光纤发射器 FT50MHIR 和光纤接收器 FR50MHIR 进行光电隔离，其输出 TTL 信号的上升时间 t_r 和下降时间 t_p 只有 5 ns，有利于形成脉冲快前沿特性。

2.5 系统设计

为实现输出脉冲参数的灵活调整，本文基于 FPGA_EP4CE15 搭建了人机交互控制平台，如图 8 所示。控制系统输出的控制信号经过光电转换后到达各脉冲子模块的栅极驱动电路，以减小脉冲主电路对弱电控制系统的强电磁干扰；采用幅值/频率转换电路，精准调节高压直流电源的输出并对输出状态进行实时监测。

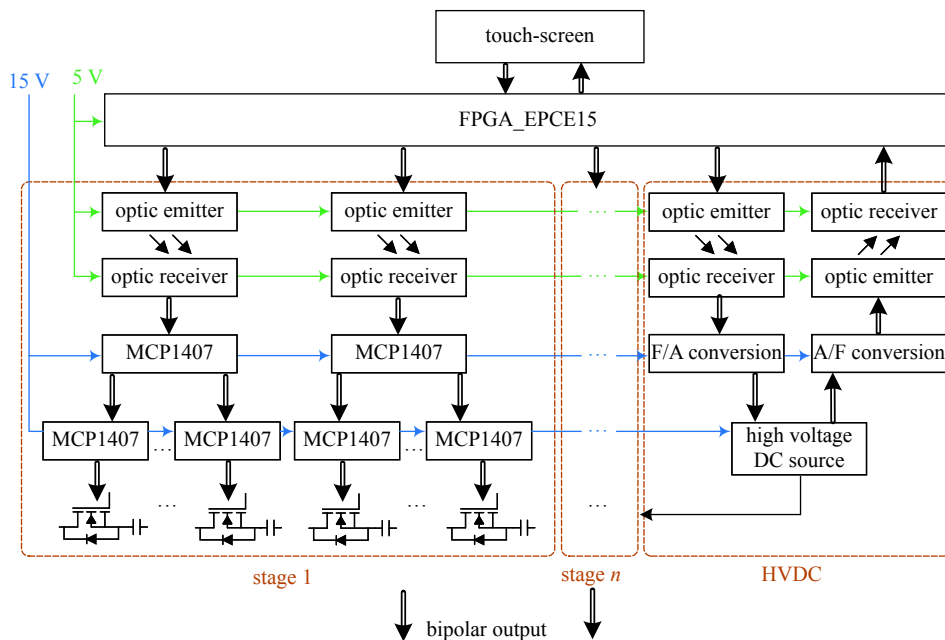


Fig. 8 Structure of prototype system

图 8 样机系统图

本试验研制了一台原理验证样机,如图9所示。

3 结果与分析

使用具有 500 MHz 带宽和 10 GS/s 采样率的力科示波器 HDO6054、力科高压探头 PPE6KV 和皮尔森电流传感器 6600 进行脉冲源的性能测试。

双极性 LTD 典型的输出电压电流波形如图 10 所示,由 2 个 $50\ \Omega$ 无感电阻并联组成负载电阻。输出脉冲电压为 $\pm 2000\ \text{V}$, 脉冲电流幅值为 $\pm 80\ \text{A}$, 正负脉冲之间的延时时间为 1000 ns。负极性脉冲电压前沿振荡比正极性脉冲前沿振荡更加严重,原因在于进行 PCB 板绘制时,采用 4 层板结构,顶层和底层分别是正极性和负极性脉冲放电回路,中间两层为电源层和地层,由于顶层和底层走线不一致,可能导致负极性脉冲放电回路的杂散电感比正极性脉冲放电回路的杂散电感更大,所以会引起其前沿更大振荡,在后续的研究中会进一步优化 PCB 布局,使顶层和底层的走线尽量对称。双极性 LTD 输出的不同宽度脉冲波形如图 11 所示,最大脉宽 200 ns,最小脉宽 50 ns,不同宽度的脉冲均为较标准的方波脉冲。输出的脉冲上升沿波形如图 12 所示,其上升时间(10%~90%)约为 17 ns。此外,正极性和负极性脉冲之间的延时时间 400~1000 ns 灵活可调,如图 13 所示。高频输出模式下的脉冲波形如图 14 所示,其串内脉冲频率 500 kHz,脉冲宽度 200 ns。由于受到高压直流电源的充电速率限制,在高重频条件下的一个周期内储能电容的充电速度不能跟上其放电速度,所以脉冲电压幅值会出现不断下降的现象。

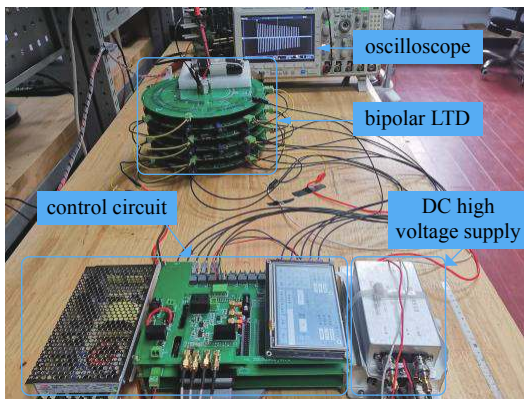


Fig. 9 Prototype image

图 9 样机图

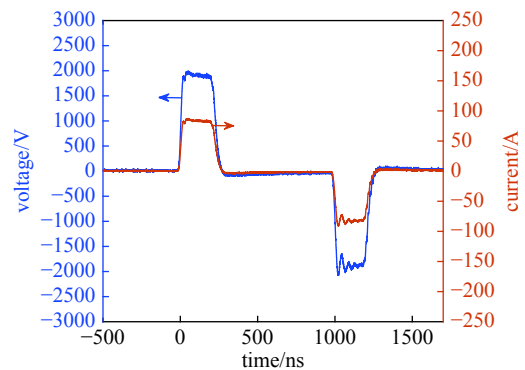


Fig. 10 Typical voltage waveform and current waveform

图 10 双极性 LTD 脉冲源典型的输出电压和电流波形

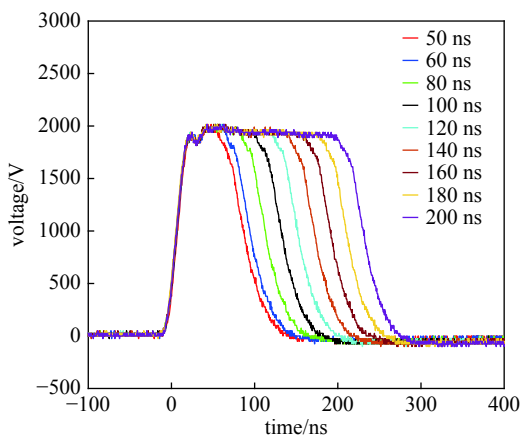


Fig. 11 Output voltage of the pulse generator with variable width

图 11 不同脉宽的输出电压波形

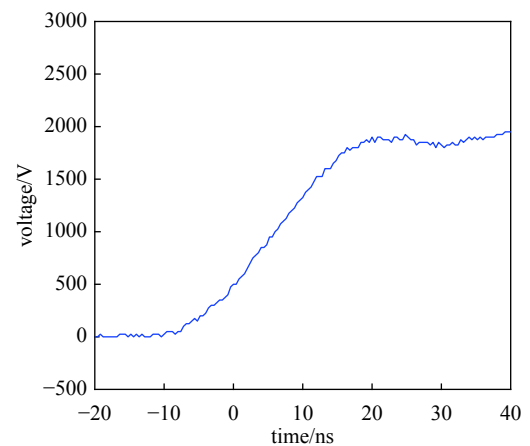


Fig. 12 Local magnification of the rising edge of the pulse

图 12 脉冲上升沿局部放大图

通常对于 ns 级脉冲,负载电容不能忽略,因此测试了该双极性 LTD 在阻容负载下的脉冲输出性能。由图 15(a) 可以看出,当在电阻上并联的电容值从 0.5 nF 到 3 nF 时,负载的 RC 放电时间常数逐渐增大,脉冲下降沿时间从 100 ns 到 800 ns 逐渐变长,而脉冲上升沿几乎不受影响,如图 15(b)所示。

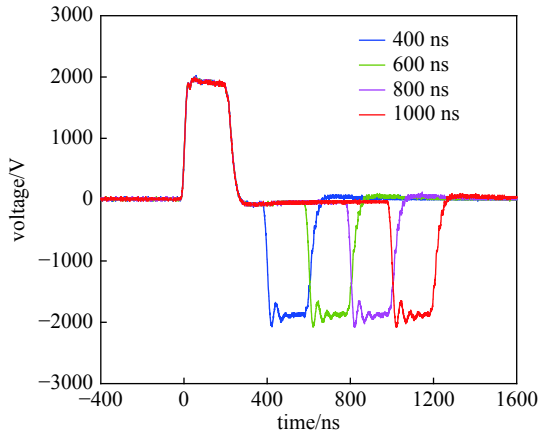


Fig. 13 Different delay waveforms of positive/negative polarity pulse

图 13 正/负极性脉冲不同延时波形图

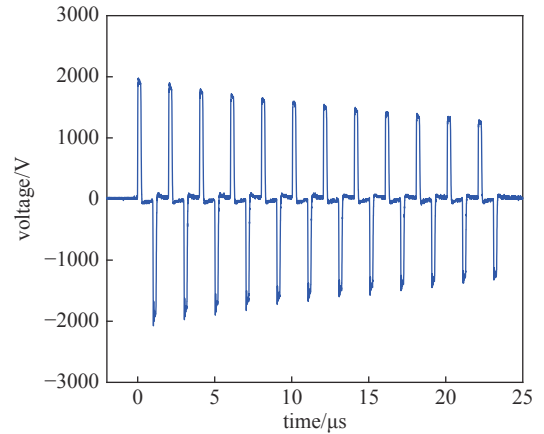
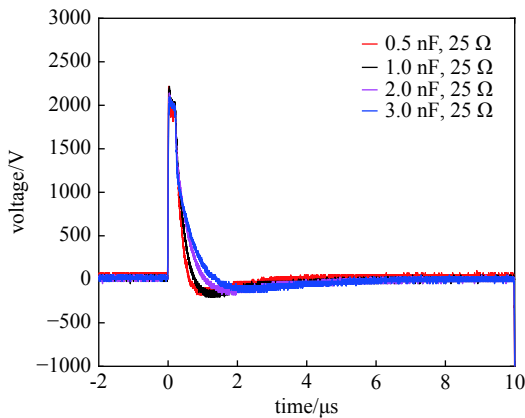
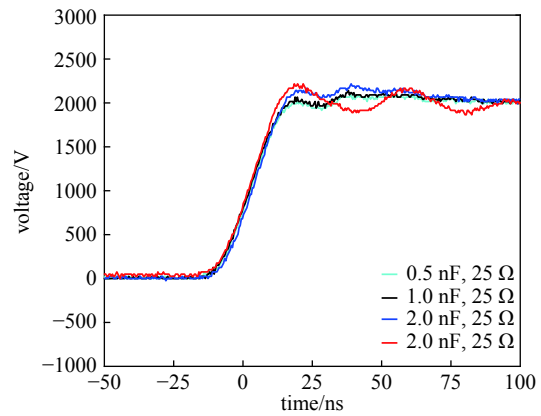


Fig. 14 High frequency bipolar pulse train

图 14 高频双极性脉冲串



(a) waveform of falling edge comparison



(b) waveform of rising edge comparison

Fig. 15 Pulse waveforms of different R-C loads

图 15 不同阻容负载测试波形

4 结 论

本文以 nsDBD 放电应用为导向, 基于单极性 LTD 电路拓扑提出了一种双极性 LTD 脉冲形成电路, 解决了传统双极性脉冲电源各脉冲子模块开关在高压脉冲产生期间所面临的高位悬浮驱动问题, 理论上可以实现模块数的无限制叠加以获得高电压双极性脉冲输出, 并且降低了双极性脉冲发生器所需要的开关数量, 同时双极性脉冲输出使隔离磁心的工作磁通在磁化曲线的第一、三象限对称交变, 有效地提高了磁心的利用率并且不需要单独设计磁通复位电路, 提高系统的稳定性和可靠性。最后研制了一台原理验证样机, 测试了样机在不同负载下的性能, 验证了该拓扑结构的可行性。

参考文献:

- [1] 商克峰, 王美威, 鲁娜, 等. 沿面/体介质阻挡放电装置的放电及臭氧生成特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 353-359. (Shang Kefeng, Wang Meiwei, Lu Na, et al. Discharge characteristics and ozone generation of surface/volume hybrid dielectric barrier discharge devices[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 353-359)
- [2] Yanallah K, Pontiga F, Fernández-Rueda A, et al. Experimental investigation and numerical modelling of positive corona discharge: ozone generation[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 065202.
- [3] 徐晗, 陈泽煜, 刘定新. 大气压冷等离子体处理水溶液: 液相活性粒子检测方法综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3561-3582. (Xu Han, Chen Zeyu, Liu Dingxin. Aqueous solutions treated by cold atmospheric plasmas: a review of the detection methods of aqueous reactive species[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3561-3582)
- [4] Kim G C, Kim G J, Park S R, et al. Air plasma coupled with antibody-conjugated nanoparticles: a new weapon against cancer[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 032005.
- [5] 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(4): 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(4): 1339-1358)
- [6] Peter S, Günther M, Hauschild D, et al. Low temperature plasma enhanced chemical vapor deposition of thin films combining mechanical stiffness, electrical insulation, and homogeneity in microcavities[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 108: 043303.
- [7] Akishev Y, Grushin M, Napartovich A, et al. Novel AC and DC non-thermal Plasma sources for cold surface treatment of polymer films and fabrics at atmospheric pressure[J]. *Plasmas and Polymers*, 2002, 7(3): 261-289.
- [8] 吴世林, 杨庆, 邵涛. 低温等离子体表面改性电极材料对液体电介质电荷注入的影响[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(16): 3494-3503. (Wu Shilin, Yang Qing, Shao Tao. Effect of surface-modified electrode by low temperature plasma on charge injection of liquid dielectric[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(16): 3494-3503)
- [9] Roupasov D V, Nikipelov A A, Nudnova M M, et al. Flow separation control by plasma actuator with nanosecond pulsed-periodic discharge[J]. *AIAA Journal*, 2009, 47(1): 168-185.
- [10] 毛枚良, 江定武, 陈亮中, 等. 受DBD等离子体控制的低速流动数值模拟方法研究[J]. *空气动力学学报*, 2011, 29(2): 129-134, 162. (Mao Meiliang, Jiang Dingwu, Chen Liangzhong, et al. Study of numerical simulation method for low speed flow with DBD plasma[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2011, 29(2): 129-134, 162)
- [11] Moreau E, Debien A, Benard N, et al. Nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge plasma actuator for airflow control along an NACA0015 airfoil at high Reynolds number[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(11): 2803-2811.
- [12] Pendleton S J, Kastner J, Gutmark E, et al. Surface streamer discharge for plasma flow control using nanosecond pulsed power[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(11): 2072-2073.
- [13] 李志军, 张雅雯, 高迎慧, 等. 级联型高压重复频率微秒脉冲源的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 085001. (Li Zhijun, Zhang Yawen, Gao Yinghui, et al. Development of cascade high voltage repetitive frequency microsecond pulse power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 085001)
- [14] 董守龙, 姚陈果, 杨楠, 等. 基于Marx电路的全固态纳秒脉冲等离子体射流装置的研制[J]. *电工技术学报*, 2016, 31(24): 35-44. (Dong Shoulong, Yao Chenguo, Yang Nan, et al. The development of solid-state nanosecond pulsed plasma jet apparatus based on Marx structure[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(24): 35-44)
- [15] Tang Kai, Wang Wenchun, Yang Dezheng, et al. Effect of dielectric material on bipolar nanosecond pulse diffuse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2013, 112: 223-227.
- [16] 赵远涛, 张若兵, 王黎明, 等. 双极性脉冲电压下介质阻挡放电及其涤纶表面改性[J]. *高电压技术*, 2009, 35(9): 2238-2242. (Zhao Yuantao, Zhang Ruobing, Wang Liming, et al. Application of bipolar pulsed power to ADBD and terylene surface modification[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(9): 2238-2242)
- [17] 米彦, 万佳仑, 卞昌浩, 等. 基于磁脉冲压缩的DBD高频双极性纳秒脉冲发生器的设计及其放电特性[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(24): 244-256. (Mi Yan, Wan Jialun, Bian Changhao, et al. Design of DBD high-frequency bipolar nanosecond pulse generator based on magnetic pulse compression system and its discharging characteristics[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(24): 244-256)
- [18] Elgenedy M A, Darwish A, Ahmed S, et al. A transition arm modular multilevel universal pulse-waveform generator for electroporation applications[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(12): 8979-8991.
- [19] Yao Chenguo, Dong Shoulong, Zhao Yajun, et al. High-frequency composite pulse generator based on full-bridge inverter and soft switching for biological applications[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, 23(5): 2730-2737.
- [20] 熊兰, 杨子康, 胡国辉, 等. 一种采用全固态开关的高压双极性脉冲源[J]. *电机与控制学报*, 2015, 19(9): 73-80. (Xiong Lan, Yang Zikang, Hu Guohui, et al. One type of high voltage bipolar square pulser based on all-solid-state switch devices[J]. *Electric Machines and Control*, 2015, 19(9): 73-80)
- [21] Kim J H, Min B D, Shendery S, et al. High voltage Marx generator implementation using IGBT stacks[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(4): 931-936.
- [22] Biela J, Aggeler D, Bortis D, et al. Balancing circuit for a 5-kV/50-ns pulsed-power switch based on SiC-JFET super cascode[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2012, 40(10): 2554-2560.
- [23] 王晓雨, 董守龙, 马剑豪, 等. 一种新型的双极性Marx高重复脉冲发生器[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(4): 799-806. (Wang Xiaoyu, Dong Shoulong, Ma Jianhao, et al. A novel high-frequency pulse generator based on bipolar and Marx topologies[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(4): 799-806)
- [24] Sakamoto T, Akiyama H. Solid-state dual Marx generator with a short pulsewidth[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(10): 2649-2653.
- [25] Jiang Weihua, Sugiyama H, Tokuchi A. Pulsed power generation by solid-state LTD[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3603-3608.
- [26] 饶俊峰, 吴施蓉, 朱益成, 等. 双极性固态直线变压器驱动器的研制[J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33: 0450. (Rao Junfeng, Wu Shirong, Zhu Yicheng, et al. Development of bipolar solid-state linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, 33: 0450)