



·高电压及脉冲功率技术·

双极性固态直线变压器驱动器的研制*

饶俊峰, 吴施蓉, 朱益成, 李 孜, 姜 松, 王永刚

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

摘 要: 在针对脉冲电磁场肿瘤消融的应用场合, 双极性脉冲比单极性脉冲效果更均匀, 而要产生 ns 级前沿的双极性高压纳秒或亚微秒脉冲难度大, 电磁干扰强, 控制要求更高。设计了一台双极性全固态直线型变压器驱动源 (SSLTD), 双极性 SSLTD 由结构完全相同的 LTD 模块经过副边绕组反向串联构成, 在负载上实现双极性窄脉冲。双极性 SSLTD 输出波形稳定的脉冲的关键在于磁芯复位, 通过电阻负载实验, 重点对比分析了复位电流的形式对复位效果的影响, 以及采用直流复位时幅值、脉宽、正负脉冲时间间隔、单级模块中开关管并联数量、复位电流大小对双极性 SSLTD 输出的影响。实验结果表明, 所设计的双极性 SSLTD 能够在 500 Ω 负载上稳定产生重频双极性纳秒脉冲, 输出电压 0~ ± 5 kV 可调, 脉宽 200~400 ns 可调, 正负脉冲时间间隔 0~1 ms 可调, 上升沿和下降沿 20~50 ns; 反向串联的直流复位电路结构简单、复位效果好。该脉冲源使用模块化设计, 结构紧凑, 电气绝缘要求较低, 可灵活输出双极性、正极性与负极性高压亚微秒脉冲。

关键词: 固态直线型变压器驱动源; 脉冲电源; 双极性脉冲; 纳秒脉冲

中图分类号: TM83

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.200323

Development of bipolar solid-state linear transformer driver

Rao Junfeng, Wu Shirong, Zhu Yicheng, Li Zi, Jiang Song, Wang Yonggang

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

Abstract: In the application of tumor ablation with pulsed electric field, bipolar pulses can ablate tumors more homogeneously than unipolar pulses. However, it is difficult to generate bipolar high voltage nanosecond or sub-microsecond pulses due to the strong electromagnetic interference and strict requirements of control precision. In this paper, a bipolar Solid-State Linear Transformer Driver (SSLTD) is designed. The SSLTD is composed of many LTD modules with the same structure and their secondary windings are reversely connected in series to generate bipolar narrow pulses over the load. To generate stable pulses, the reset of the pulsed transformers is the key technique in bipolar SSLTD. Through the resistive load experiments, the influence of the forms of reset current on the reset effect is compared and analyzed, and the influence of the voltage amplitude, pulse width, interval between positive and negative pulses, the number of parallel switches in each module, and the reset current amplitude on the output pulses is analyzed. Experimental results show that the designed bipolar SSLTD can generate repetitive bipolar nanosecond pulses with voltage amplitude up to 5 kV, adjustable pulse widths of 80–400 ns, the rising and falling 20–50 ns over 500 Ω load. Besides, reverse series DC reset circuit which is simple in structure has a better reset effect than pulsed reset circuit. The bipolar SSLTD can generate nanosecond pulses with any polarity and has many advantages such as compact size, modularity, low electric stress.

Key words: solid-state linear transformer driver; pulse generator; bipolar pulses; nanosecond pulses

脉冲功率技术在环境工程^[1]、生物医疗^[2-4]、材料表面处理^[5-7]、光源领域^[8]、国防军工^[9]、食品工业^[10]等领域有广泛的应用。随着脉冲功率技术的推广和普及, 脉冲功率源将向模块化、通用化、智能化发展^[11]。脉冲功率技术中主要的开关器件有气体开关^[12]、磁开关^[13]、半导体开关等, 气体开关、磁开关导通关断灵活性差、重复频率低的缺点不能满足现今应用需求, 而采用半导体器件开关的全固态脉冲发生器以可控性高、模块化、体积小、寿命长

* 收稿日期: 2020-11-30; 修订日期: 2021-03-04

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFC0119100); 国家自然科学基金青年基金项目 (51707122); 上海市青年科技英才扬帆计划 (20YF1431100)

通信作者: 饶俊峰 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事全固态高压脉冲发生器和低温等离子体应用等方面的研究工作。

等优势被越来越多的学者研究。全固态脉冲发生器主要以 Marx^[14-15]和直线型变压器驱动源(LTD)^[16-18]为主。Marx通过电容的并联充电和串联放电,实现容性电压叠加,产生高压脉冲,对半导体开关的电气绝缘要求很高;而LTD是将多个脉冲变压器的副边绕组串联,通过感应叠加在副边的负载上产生高压脉冲,对电气绝缘要求较低,由于磁饱和的限制,适合产生高压短脉冲^[16]。根据最新研究发现,不可逆电穿孔临床应用中,高频双极性脉冲电场能改善电场分布不均和肌肉收缩问题^[18];在冷却水中抑制微生物、藻类应用中,高频双极性脉冲抑制效果明显^[19]。因此,双极性全固态脉冲发生器的研究具有较好的应用前景。

目前,单/双极性固态 Marx 发生器、脉冲叠加器、单极性固态 LTD 国内外研究较多^[15-24]。刘克富研制了一台最高脉冲电压为 150 kV,脉宽 1~5 μs 可调,上升沿在 500 ns 以内的单极性 Marx 发生器^[21]。王晓雨研制一台输出脉冲 ± 5 kV,脉宽 200 ns~10 μs ,前沿 200 ns 的双极性 Marx 发生器^[22]。L. M. Redondo 通过 Marx 单元级联的方式研制了输出脉冲 ± 5 kV,脉宽 2.5 μs ,前沿 200 ns 的双极性 Marx 发生器^[23]。虞超群基于移相控制技术研制了输出 50 kV,上升沿宽 90 ns,脉宽 60 ns 的 Marx 发生器^[23]。葛劲伟研制了电源输出 ± 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^[24]。江伟华研制了一台能输出脉冲电压 29 kV、电流 240 A,脉宽 50~170 ns 可调的单极性 LTD^[25]。Landon Collier 研究了 8 kV 单极性 LTD 并与 Marx 对比^[26]。双极性固态 LTD 研究较少。

综上所述,双极性 SSLTD 可用来肿瘤消融应用并需要研究其电路特性,本次实验以 500 Ω 电阻模拟细胞负载,以不同极性 LTD 模块串联结构对双极性固态 LTD 开展初步研究,重点研究磁芯饱和带来的影响和不同极性的 LTD 模块之间的相互影响。设计并研制了一台 12 级模块组成,输出电压、脉宽和正负脉冲时间间隔均灵活可调的双极性全固态 LTD,稳定性强,可增加模块级数,提高脉冲电压。

1 双极性全固态 LTD 设计

1.1 双极性全固态 LTD 基本原理

LTD 的基本原理是通过变压器一次侧的每个 LTD 模块中并联多路开关管和电容,降低电源内阻,实现快脉冲输出,多个 1:1 的脉冲变压器的二次侧首尾串联起来,当所有 LTD 模块的原边绕组放电均一致时,通过磁感应叠加可在负载上输出单极性高压脉冲^[18]。若将一部分 LTD 模块的原边反向,使其在不同时刻导通,就能实现双极性脉冲输出,但是这两种不同极性模块的二次侧绕组是直接串联,其上产生的感应电流有很强的磁耦合,会对其它模块造成影响,这是双极性 SSLTD 设计中需要注意的问题。

双极性全固态 LTD 等效电路如图 1 所示,原边上侧代表正极性 LTD 模块,下侧代表负极性模块。每部分 LTD 模块都由一定数量并联的基本电路和 1:1 变压器组成,每个基本电路由一个电容和一个开关管串联构成。变压器一次侧绕组上部分绿色点线为正极性 LTD 模块电容充电回路,当开关管导通时,电容放电,放电回路如红色的实线所示,在二次侧电压感应叠加输出正极性波形。在这个过程中正极性 LTD 模块的磁芯一直处于去饱和状态,负极性 LTD 模块的磁芯一直处于饱和状态,因此正极性输出时几乎不受负极性 LTD 模块的影响。图 1 中橙色实线为负极性 LTD 模块放电回路,同理,负极性输出原理与正极性输出类似,负极性输出不受正极性 LTD 模块的影响。

蓝色虚线为磁芯复位电流回路,图 1 中展示的是直流复位电流示意图,直流复位电流经过单匝绕组反向串联正负极性的 LTD 模块。脉冲复位电流经过单匝绕组直接串联正负极性的 LTD 模块,但由于脉冲复位电路结构复杂,对变压器一、二次侧干扰严重,且对复位电路冲击也很大,推荐采用直流电流复位的方式。

正极性 SSLTD 截面原理图如图 2 所示,显示一条正极性 LTD 并联支路。其中, D_1 为磁芯的续流二极管,起到续流和保护 SSLTD 模块中开关管的作用。A 是充电点,连接在直流充电母线上,使电容器 C_1 通过 D_1 和原边绕组充电。当开关管 Q_1 导通时,电容器 C_1 根据红色箭头实线所示的回路通过 Q_1 和变压器的一次绕组,通过磁耦合到二次绕组向负载放电。为了提高放电效率和能量利用率,磁芯选择低负载阻抗和高品质的纳米晶材料^[17]。

1.2 双极性全固态 LTD 设计

图 1 充分表明,双极性 SSLTD 中正极性 LTD 模块和负极性的结构完全相同,但是相对于副边绕组,原边的整体方向是相反的。本部分将介绍全固态 LTD 模块上器件的选型和参数以及全固态 LTD 模块的结构。

单级全固态 LTD 模块中包括 14 条并联支路,每条支路包括 1 个开关管和 2 个电容器。表 1 中列出单级全固态 LTD 模块上的驱动芯片、开关管、储能电容、磁芯、光纤型号的参数、型号和数量。

为保证 LTD 模块中 14 个开关单元驱动的同步性和开关性能的可靠性,14 个开关单元均由同一路信号源控

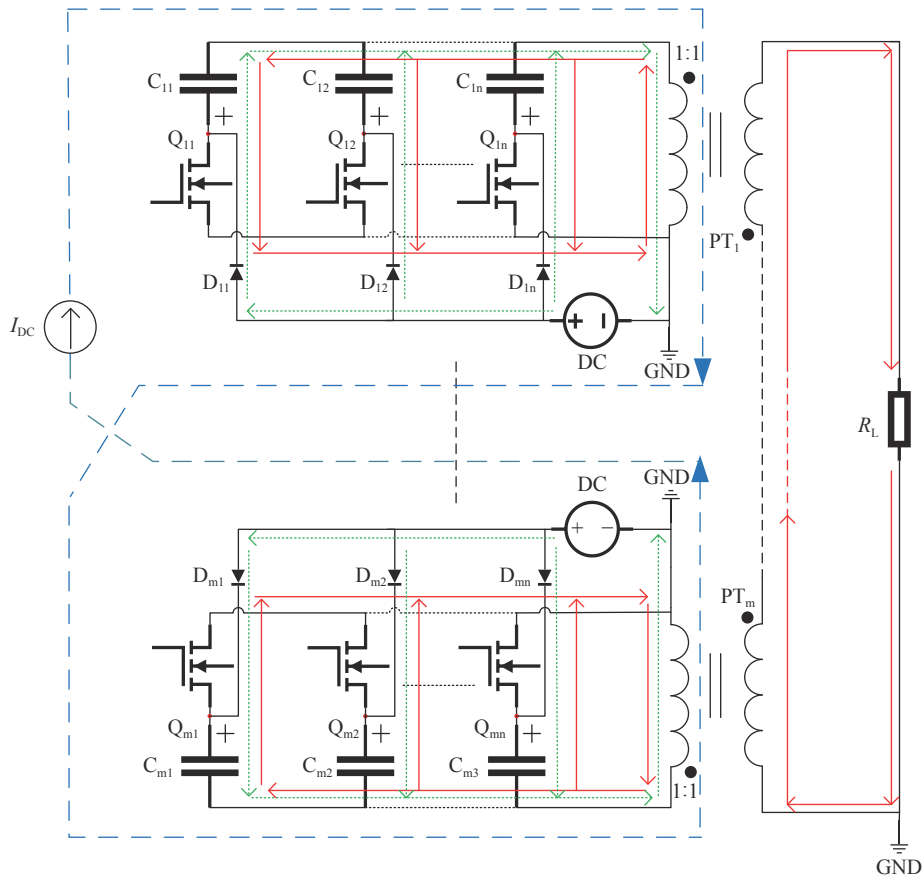


Fig. 1 Equivalent circuit of a m-stage bipolar all-solid-state LTD

图 1 多级双极性全固态 LTD 等效电路

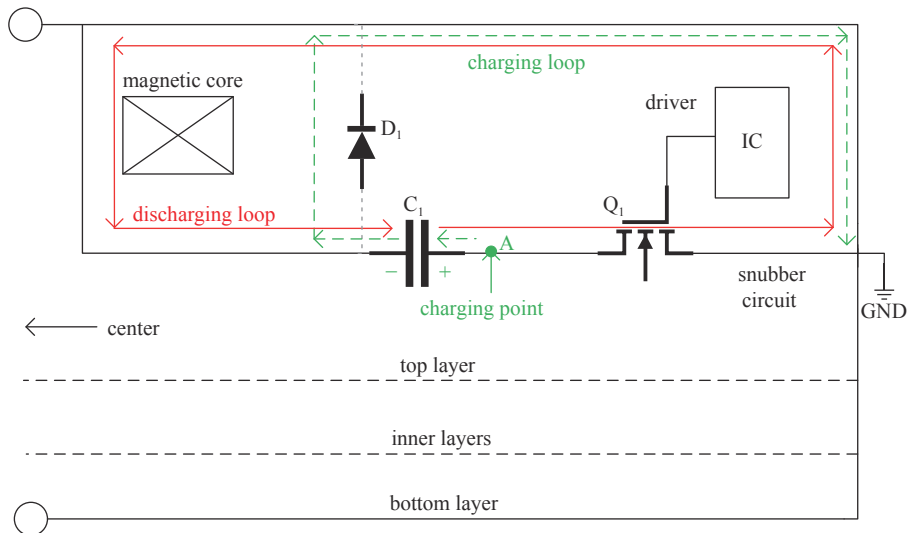


Fig. 2 Schematic of half sectional view of positive all-solid-state LTD

图 2 正极性全固态 LTD 截面原理图

表 1 单级全固态 LTD 模块上的主要器件

Table 1 Main devices on single all-solid-state LTD Module

device	model	parameter	number
driver IC	MCP1407	15 V, 6 A	15
SiC MOSFET	C2M0080120	1200 V, 31.6 A	14
capacitor	2220AC104KAT1A	1000 V, 100 n	28
magnetic core	1K107	130.5 mm × 86.5 mm × 13.5 mm	1
opt receiver	T1521Z/R2521Z	5 Mb/s	1

制,并且驱动芯片要求体积小、驱动能力强。控制系统中的信号经过等长的光纤传输到各个 LTD 模块上的驱动芯片进行功率放大,再经过每路开关单元的驱动芯片,保证开关同步工作。驱动芯片选用小体积的光耦驱动芯片 MCP1407,供电电压为 15 V,输出峰值电流 6 A,有很强的驱动能力。开关管选用 Cree 公司生产的 C2M0080120 型号的 SiC MOSFET,直流通流能力 31.6 A,漏源击穿电压 1200 V,保证单个模块有 14 路并联,最大输出电流超过 400 A。储能电容的选取考虑体积、耐压值和电容量,选用 1000 V 耐压,200 nF 容量的多层陶瓷电容器(MLCC, X7R)作为储能电容。LTD 模块中的磁芯材料要求高磁导率、低损耗、低矫顽力,选用外径 130.5 mm,内径 86.5 mm,高度 13.5 mm 的非晶态铁基纳米晶合金 1K107 磁芯。

LTD 主要产生大功率脉冲,因此在 LTD 设计过程中要减小系统的杂散电感和漏感。图 3 是全固态 LTD 模块俯视图。为了使变压器一次侧的漏感达到最小,中间的黄色磁环由铜箔作为一次绕组固定在 PCB 的纳米晶磁芯上,所有支路都均匀对称分布在磁芯周围的外围区域,每一条分支都有一个初级绕组,电容器直接向它放电。不同层的外部圆环回路包括直流充电母线、驱动电源母线和驱动信号母线。直流充电母线与直流电压源相连,为各支路的电容器提供直流电源;驱动电源母线和驱动信号母线位于 PCB 内层,分别为同一模块的 14 条支路的驱动提供电源和驱动信号。同一模块中所有支路的所有开关都是同步运行的。所有元件都直接集成在直径 31.5 cm 的四层印刷电路板上。PCB 中间穿过高压输出总线和直流复位电流,圆环外圈铺地,每级 SSLTD 模块之间用 6 根铜柱固定连接,整个设计减小回路电感,降低电磁辐射。

同样的 12 级全固态 LTD 模块,其中 6 级正面朝上作为正极性 LTD 模块,另外 6 级正面朝下作为负极性 LTD 模块,堆叠起来,通过副边绕组串联形成双极性 SSLTD。

1.3 复位电路结构

复位电路是实现双极性 SSLTD 的关键,保证双极性 LTD 模块的脉冲变压器磁芯一直处于去饱和状态,为实验验证需要本文使用了脉冲复位电路和直流复位电路。

脉冲复位电路采用全桥结构,脉冲复位电流经过单匝绕组直接串联对正负极性的 LTD 模块进行复位。如图 4 所示,通过控制 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 开关管的时序控制交流复位电流的脉宽,配合 LTD 主电路正负脉冲时间间隔。通过改变输入直流电源大小改变交流复位电流大小。当 Q_1 和 Q_4 管导通时,脉冲复位电路产生正极性脉冲,正极性 LTD 模块磁芯处于去饱和状态,负极性 LTD 模块处于饱和状态,同理产生负脉冲。其中, L_1 用来保护脉冲复位电路。 PT_1 指正极性 LTD 模块上的脉冲变压器磁芯, PT_m 指负极性 LTD 模块上的脉冲变压器磁芯。整个结构简单,开关器件少,控制方式容易。

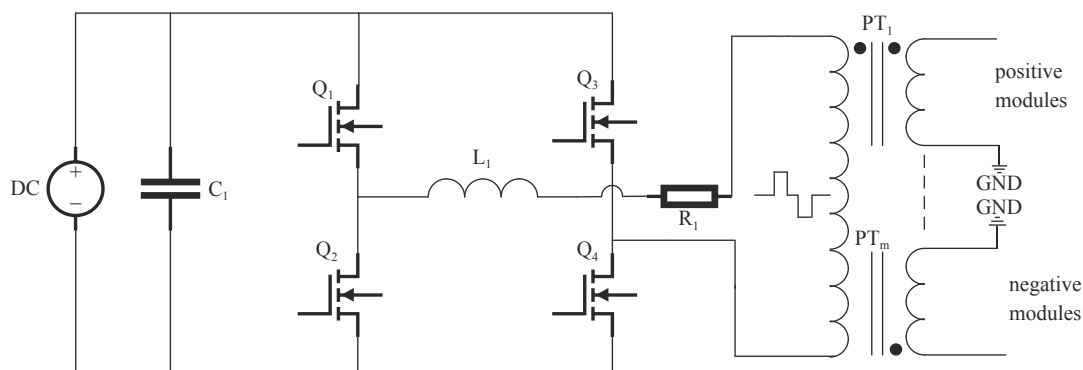


Fig. 4 Schematic of pulse reset circuit

图 4 脉冲复位电路原理图

脉冲复位电流和双极性 LTD 输出脉冲的时序是实现脉冲复位的关键。如图 5 所示,实线为双极性 LTD 输出脉冲,虚线为脉冲复位电流。 t_0 表示脉冲复位电流的脉宽, t_1 表示 LTD 输出脉宽, t_2 表示脉冲复位电流的死区时

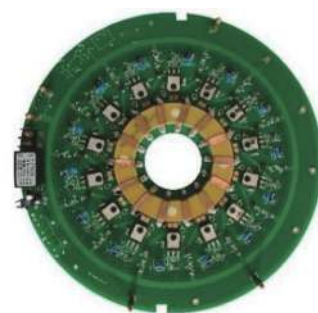


Fig. 3 Photo of the top view of an all-solid-state LTD module

图 3 全固态 LTD 模块俯视图

间, t_3 表示正负 LTD 输出脉冲时间间隔。时序控制注意保证脉冲复位电流脉宽大于 LTD 输出脉宽, 并且在正负 LTD 脉冲输出之前有充裕的复位电流时间, 即正负 LTD 模块脉冲变压器磁芯完成去饱和。

直流复位电路的结构简易, 如图 6 所示, 直流复位电流回路中串联 L_2 保护电感和 R_2 电阻。电流经过单匝绕组反向直接串联对正负极性的 LTD 模块进行复位, 保证复位电流的方向和变压器一次侧绕组放电电流方向相反。

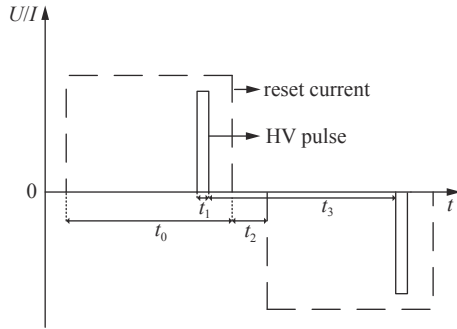


Fig. 5 Diagram of pulse reset current and bipolar LTD output pulse sequence

图 5 脉冲复位电流及双极性 LTD 输出脉冲时序图

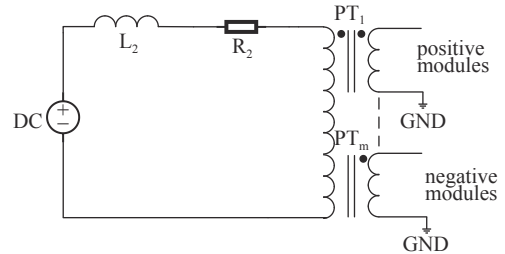


Fig. 6 Schematic of DC reset circuit

图 6 直流复位电路原理图

2 实验结果与分析

本文将重点对双极性 SSLTD 进行性能测试和实验分析, 对比分析复位电流的形式对复位效果的影响, 在直流复位条件下调节幅值、脉宽、正负脉冲时间间隔、单级模块中开光管并联数量、直流复位电流大小等影响因素, 并对实验背景进行简单的介绍。

2.1 应用背景分析与实验条件设计

在生物医疗消融实验中的靶向细胞等效模拟中, 纳秒级别上升沿的频谱丰富, 不同脉宽下的高压脉冲施加在细胞上对于各个部位会呈现不同的作用效果。对于细胞的等效电路模型, 现代实验中常用的是五层电解质模型, 其中无论是不可逆微秒电穿孔作用的细胞膜还是纳秒脉冲作用的细胞核膜, 其膜等效电路模型基本如图 7 所示^[27]。在现有的仿真、实验的验证下以及脉冲电场下动植物细胞阻抗谱分析, 重庆大学董守龙在双极性马铃薯块茎组织消融实验中总结出高压脉冲作用于马铃薯块茎组织时, 能很好的用来表征脉冲电场作用下的消融效果^[28], 重庆大学赵亚军用平行板电极使得处理区域电场较为均匀, 避免不均匀电场带来的介电变化的不均匀分布, 并分析脉冲电场处理后的介电变化^[29]。实验用 $500\ \Omega$ 电阻能代替马铃薯块茎的等效阻值, 由于马铃薯块茎在平板脉冲放电实验中容易因放电参数设置不合理产生热效应阻抗变化和发出啸叫, 故实验用 $500\ \Omega$ 低感水泥电阻作为负载来验证脉冲电源的性能。

由 6 级正极性 SSLTD 模块和 6 级负极性 SSLTD 模块组成的 12 级双极性 SSLTD 测试环境如图 8 所示, 在整个系统性能测试中使用具有 200 MHz 带宽, 1 GS/s 采样频率的数字示波器 DPO2024B (Tektronix, USA) 和高压探头 P6015A (Tektronix, USA) 对数据进行测量。充电直流电源使用 1000 V/1 A 的稳压电源, 脉冲输出频率 10 Hz。

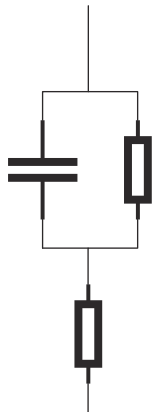


Fig. 7 Membrane equivalent circuit

图 7 膜等效电路

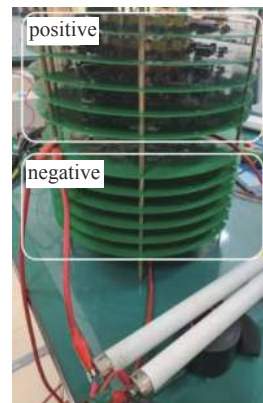


Fig. 8 Test environment of bipolar all-solid-state LTD

图 8 双极性全固态 LTD 测试环境

2.2 复位电路对比实验结果

首先测试脉冲复位电流脉宽对磁芯去饱和的影响,如图9所示,在全桥脉冲复位电路中回路电感、开关管器件的限制下,1 ms的1 A脉冲复位电流为三角波。但是实验过程中由于复位时间短,双极性LTD磁芯饱和,无双极性脉冲输出。如图10所示,全桥脉冲复位电路产生30 ms的1 A交流脉冲电流,复位时间充裕,因此双极性LTD磁芯一直处于去饱和状态,双极性LTD正常工作。

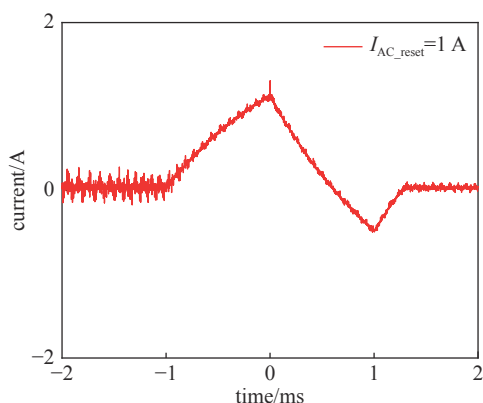


Fig. 9 1 ms, 1 A pulse reset current waveform

图 9 1 ms, 1 A 脉冲复位电流波形

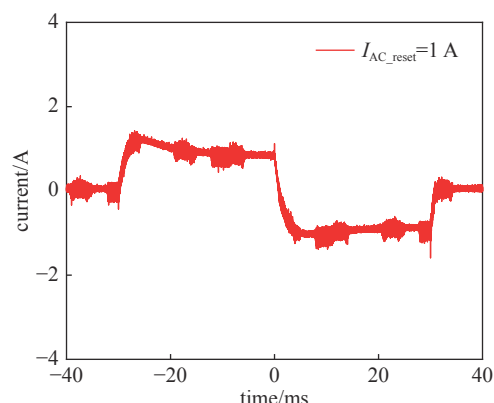


Fig. 10 30 ms, 1 A pulse reset current waveform

图 10 30 ms, 1 A 脉冲复位电流波形

对不同复位电流的形式进行测试。选用都为1 A的直流复位电流和30 ms脉冲复位电流。不同复位电流形式对双极性全固态LTD输出电压波形如图11所示,为了能清晰看出纳秒脉冲的波形,将正负脉冲分别在两张图中显示。使用脉冲复位电流的双极性全固态LTD输出电压略高,磁芯去饱和化的效果更好,但是总体对比,交流复位电流和直流复位电流效果差别不大。而直流复位电流实验安全高、可靠性强、操作便捷,脉冲复位电流对时序要求高,脉冲脉宽越短,对复位电流大小要求越高。因此测试幅值、脉宽、正负脉冲时间间隔、单级模块中开关管并联数量、直流复位电流大小等影响因素实验时选用直流复位电路。

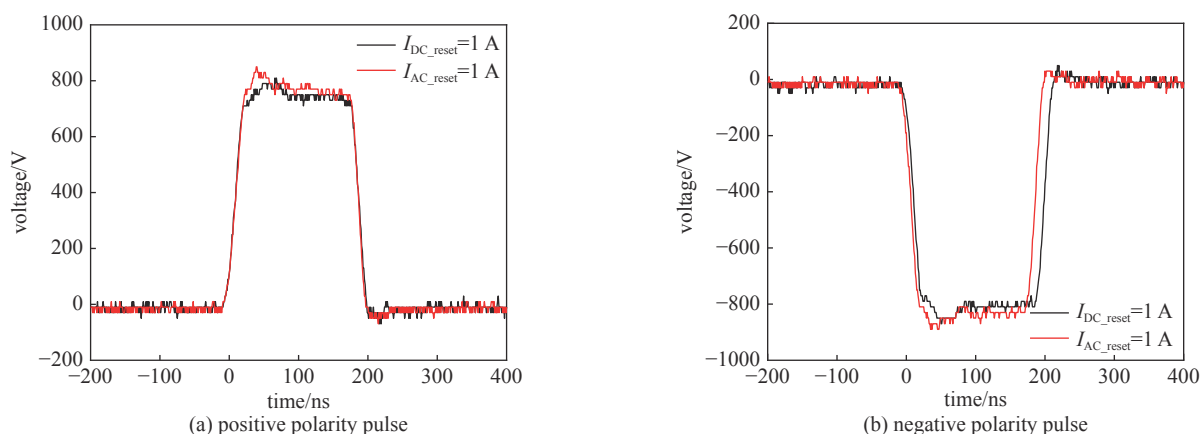


Fig. 11 Different output voltage waveforms with DC and pulse reset current

图 11 不同复位电流形式双极性全固态LTD输出电压波形

2.3 直流复位下实验结果

对不同幅值脉冲电压进行测试,直流充电电压为200~800 V。双极性全固态LTD输出不同幅值电压波形如图12所示,脉冲(10%~90%)上升时间和下降时间为20~30 ns。如图12(a), (b)所示,当直流充电电压为200~600 V时,正极性和负极性输出电压较平稳,脉冲顶部和脉冲尾部的过冲和震荡较小,电压损耗较小,符合6级输出;但是当直流充电电压为800 V时,正极性和负极性输出分别有300, 500 V压降。

对不同脉宽脉冲电压进行测试,脉冲脉宽为100~400 ns。双极性全固态LTD输出不同脉宽电压波形如图13所示,脉宽设置为200~400 ns能准确输出,脉冲顶部和脉冲尾部的过冲和震荡正负极性脉冲类似。脉宽设置为100 ns时,半高宽约80 ns,在100 ns处电压还未泄放完全,160 ns处放电完成,脉冲尾部的过冲和震荡正极性脉冲比负极性脉冲更显著。受开关管动作时间、放电回路杂散电感等因素影响,电压幅值越高、脉宽越窄,脉冲震荡更严重。

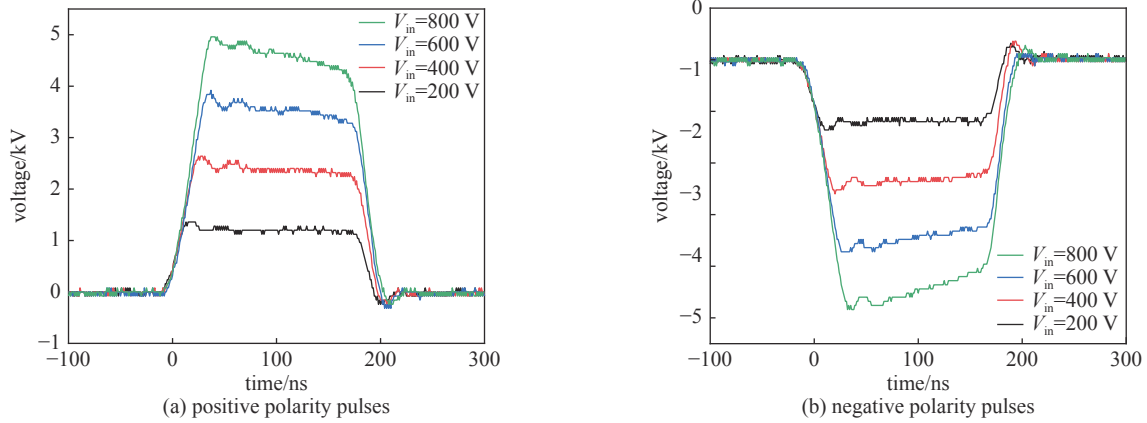


Fig. 12 Different voltage waveforms with variable charging voltages

图 12 双极性全固态 LTD 输出不同幅值电压波形

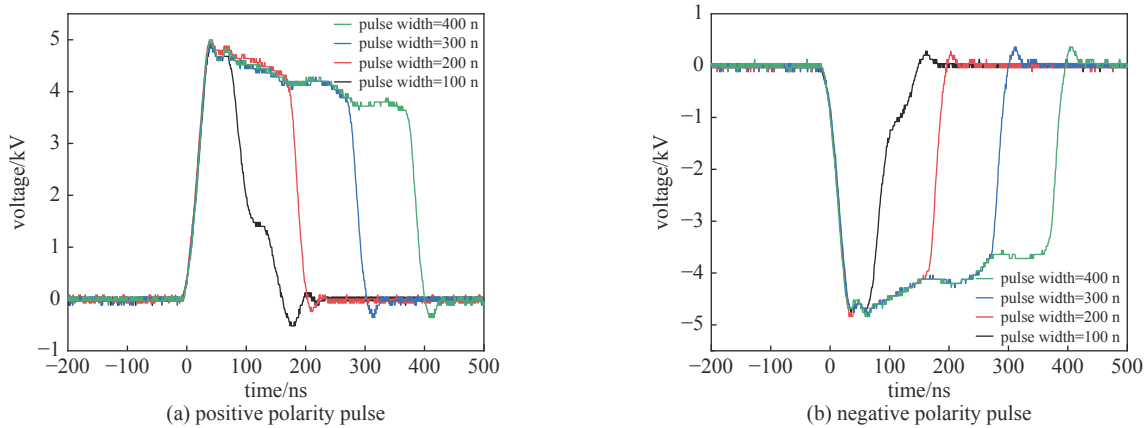


Fig. 13 Different output voltage waveforms with width variable

图 13 双极性全固态 LTD 输出不同脉宽电压波形

对不同开关管并联数量的脉冲电压进行测试。不同开关管并联数量双极性 SSLTD 输出电压波形如图 13 所示, 图 14(a) 中 4, 8, 12 路开关管并联的正极性波形上升沿分别为 35, 30, 20 ns, 下降沿均为 50 ns, 12 路开关管并联的正极性波形顶部、尾部过冲分别最大达到 5.6, -1 kV。图 14(b) 中 4, 8, 12 路开关管并联的负极性波形上升沿分别为 30, 20, 20 ns, 下降沿均为 50 ns, 12 路开关管并联的负极性波形脉冲顶部、尾部过冲分别最大达到 5.6, -1.7 kV。正极性 8, 12 路开关管并联和负极性 12 路开关管并联情况下在 130 ns 有电压明显掉落。实验说明开关管并联数量越多, 脉冲前沿速度越快, 脉冲顶部和脉冲尾部的过冲和震荡越明显, 整个回路中电磁干扰的影响更严重。

对不同脉冲时间间隔的脉冲电压进行测试, 正负脉冲时间间隔 0~1 ms。所提供的触发信号每个周期内都是

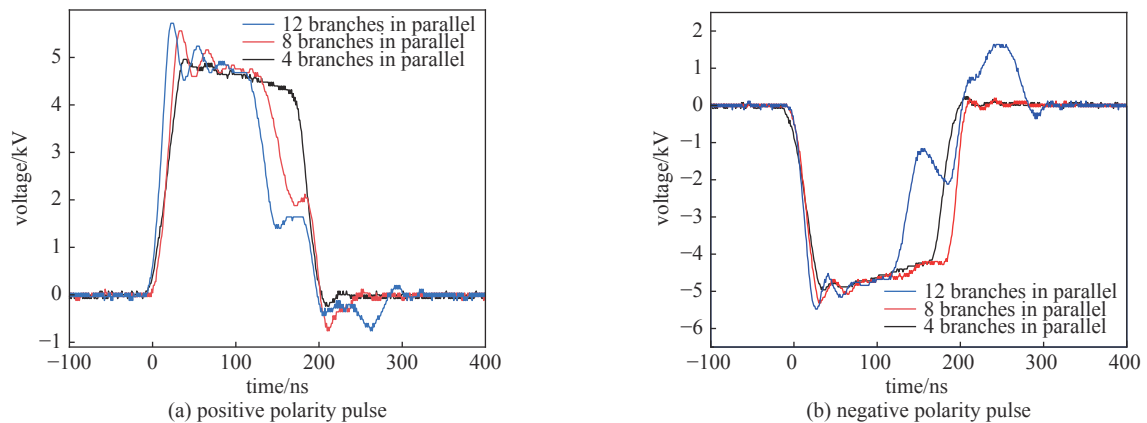


Fig. 14 Different output voltage waveforms with the number of parallel mosfet variable

图 14 不同开关管并联数量双极性全固态 LTD 输出电压波形

先触发正极性 SSLTD 模块,再经过延时后触发负极性 SSLTD 模块。因此正极性模块有足够的时间使磁芯复位,但受正极性脉冲的影响,负极性模块中磁芯受正负脉冲间隔的影响不能完全复位。不同脉冲时间间隔双极性全固态 LTD 输出电压波形如图 9 所示,图 15(a)为正负脉冲时间间隔为 0 时的双极性脉冲波形,负极性脉冲顶部有明显掉落。当时间间隔分别为 1, 5, 20, 50 μs 时,如图 15(b)所示,负极性脉冲输出有先有明显的顶降后有明显的回升,当正负脉冲时间间隔为 0.1~1 ms 时,无此现象。表明正极性复位电流时间过短,正极性磁芯还未饱和,对负极性脉冲输出造成影响。

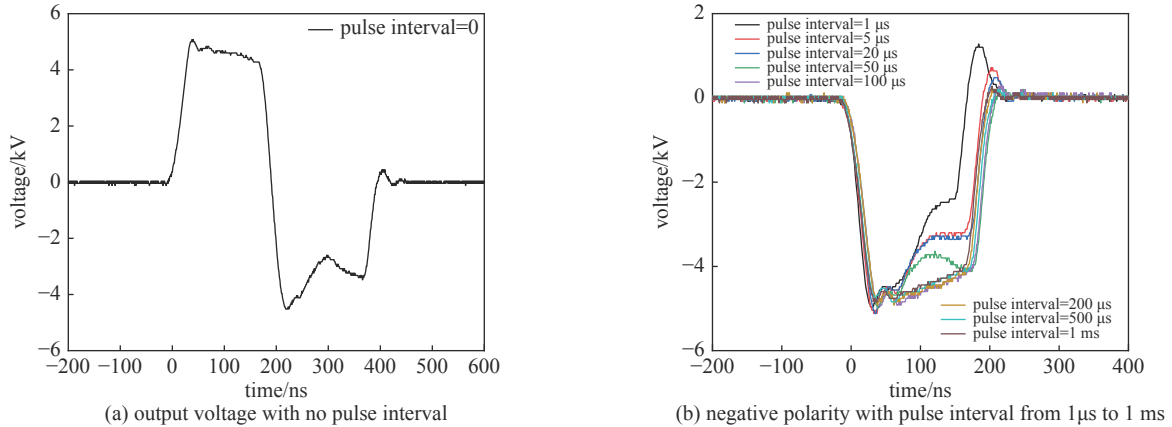


Fig. 15 Different output voltage waveforms with pulse interval variable

图 15 不同脉冲时间间隔双极性全固态 LTD 输出电压波形

对不同的直流复位电流大小进行测试,直流复位电流大小为 1~5 A。不同直流复位电流大小双极性全固态 LTD 输出电压波形如图 16 所示,复位电流越大,压降越小,但是整体差异并不明显。值得注意的是当直流复位电流为 5 A 时,正极性输出在 130 ns 时有一个电压维持过程,而直流复位电流为 1 A 和 2 A 时无此现象。

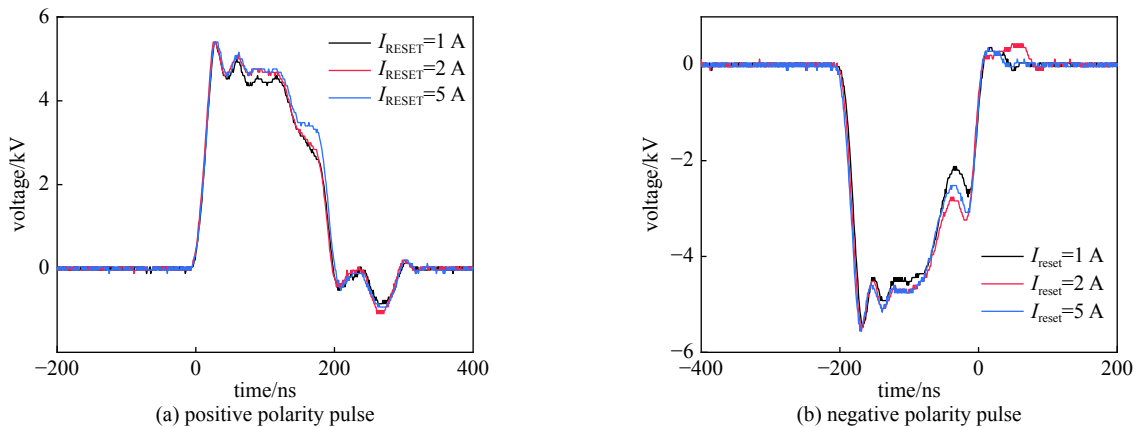


Fig. 16 Different output voltage waveforms with DC reset current variable

图 16 不同直流复位电流大小双极性全固态 LTD 输出电压波形

2.4 实验现象分析

选取 8 路开关管并联条件下,强电磁干扰环境中能明显观察到正极性脉冲在 130 ns 时有明显的压降,并且在脉冲尾部都有过冲和震荡现象。下面将对这一现象进行分析。

实验仅给正极性 LTD 模块信号,改变变压器二次侧输出结构,测试正极性 LTD 模块单独接负载、负极性 LTD 模块单独接负载、双极性 LTD 输出和负极性 LTD 模块上 MOSFET 管上 DS 间电压。如图 17 所示,不同变压器副边结构 LTD 输出电压波形中,正极性 LTD 模块单独接负载时,负载波形为较理想的方波,在 130 ns 时无压降现象,脉冲尾部也没有过冲和震荡。在没有给负极性 SSLTD 模块触发信号的前提下,负极性 SSLTD 模块单独接负载时,130 ns 时出现 -1.8 kV 负压。正负极性 LTD 模块波形叠加为双极性 SSLTD 的输出波形,表明负极性 SSLTD 模块确实有误导通放电,因此在双极性 LTD 负载上出现压降。

如图 18 所示,双极性 LTD 输出电压波形及负极性模块 MOSFET 两端波形图中,在 130 ns 时刻双极性 LTD 输

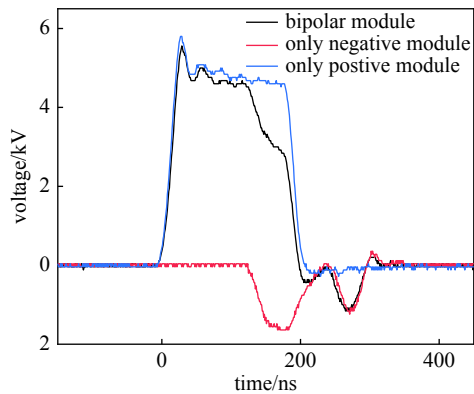


Fig. 17 Different output voltage waveforms with secondary side variable

图 17 不同副边结构 LTD 输出电压波形

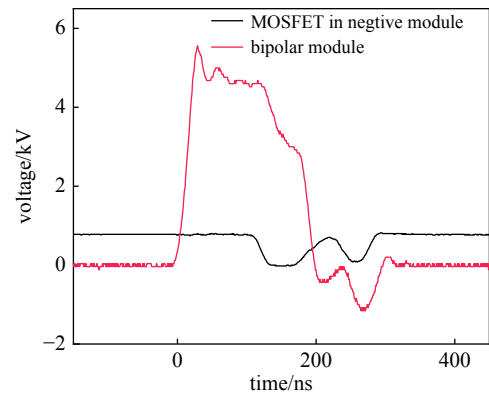


Fig. 18 Waveforms with output voltage of bipolar and MOSFET in negative module

图 18 双极性 LTD 输出电压波形及负极性模块 MOSFET 两端波形

出电压开始下降, 负极性模块上 MOSFET 也导通, 并且脉冲尾部的过冲和震荡和负极性模块上的 MOSFET 电压两端保持一致的趋势。因此在正极性波形中 130 ns 时刻的压降现象和脉冲尾部过冲、震荡现象本质上是由于电磁干扰引起负极性模块上 MOSFET 误导通。

3 结论

本文研制了双极性 SSLTD 并进行测量和分析, 得出如下结论: (1) 本文设计的双极性 SSLTD 由于副边输出和结构的操作性强, 对极性的输出切换极具灵活性。通过改变模块间的叠加方式和接地点, 实现正极性、负极性、双极性的脉冲输出, 在肿瘤消融中有很好的应用前景。(2) 所设计的双极性 SSLTD 系统可行性在电阻负载上能稳定产生输出电压、脉宽和正负脉冲时间间隔均可调的双极性脉冲。(3) 双极性全固态 LTD 正负脉冲输出需要一定的时间间隔, 否则会使磁芯不能充分复位, 从而在后触发的脉冲平顶会有明显电压降落。

参考文献:

- [1] 谢瑞, 刘军, 何湘宁. 脉冲功率技术在环境保护中的应用[J]. 电力电子技术, 2010, 44(4): 59-60, 92. (Xie Rui, Liu Jun, He Xiangning. Pulsed power technology in environmental applications[J]. Power Electronics, 2010, 44(4): 59-60, 92)
- [2] 陈新华, 孙军辉, 殷胜勇, 等. 脉冲电场与生物医药技术的交叉及其对肿瘤治疗模式的改变[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3746-3754. (Chen Xinhua, Sun Junhui, Yin Shengyong, et al. Interaction of pulsed electric field and biomedicine technology and the influence on solid tumor therapy[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3746-3754)
- [3] 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)
- [4] Yin Shengyong, Chen Xinhua, Hu Chen, et al. Nanosecond pulsed electric field (nsPEF) treatment for hepatocellular carcinoma: a novel locoregional ablation decreasing lung metastasis[J]. Cancer Letters, 2014, 346(2): 285-291.
- [5] Shao Tao, Zhang Cheng, Long Kaihua, et al. Surface modification of polyimide films using unipolar nanosecond-pulse DBD in atmospheric air[J]. Applied Surface Science, 2010, 256(12): 3888-3894.
- [6] 律方成, 詹振宇, 张立国, 等. 等离子体氟化改性微米 AlN 填料对环氧树脂绝缘性能的影响[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3522-3531. (Lü Fangcheng, Zhan Zhenyu, Zhang Ligu, et al. Effect of plasma fluorinated modified micro-AlN filler epoxy resin on the insulation properties[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3522-3531)
- [7] Madhukar A, Rajanikanth B S. Augmenting NO_x reduction in diesel exhaust by combined plasma/ozone injection technique: a laboratory investigation[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 60-66.
- [8] Ewing J J. Excimer laser technology development[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1061-1071.
- [9] 崔绍颖, 王书强, 马志毅. 脉冲分流器的发展现状研究[J]. 宇航计测技术, 2016, 36(6): 82-88. (Cui Shaoying, Wang Shuqiang, Ma Zhiyi. Research on development status of pulse current shunts[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2016, 36(6): 82-88)
- [10] 吕泽琦, 谢彦珍, 杨海亮. 消毒灭菌的电离辐射与电磁辐射等物理技术比较分析[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 059001. (Lü Zeqi, Xie Yanzhao, Yang Hailiang. Comparison and analysis of the electromagnetic radiation, ionizing radiation and other physical technologies for disinfection and sterilization[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 059001)
- [11] 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. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (VI) typical applications[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 030201)
- [12] 姜晓峰, 丛培天, 周文渊, 等. 用于 FLTD 的陶瓷封装多间隙气体开关[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 035007. (Jiang Xiaofeng, Cong Peitian, Zhou

- Wenyuan, et al. Ceramic packaged multi-gap gas switch for fast linear transformer driver[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 035007)
- [13] Rao Junfeng, Liu Kefu, Qiu Jian. All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(4): 1123-1128.
- [14] Rao Junfeng, Zhang Wei, Jiang Song, et al. Nanosecond pulse generator based on cascaded avalanche transistors and Marx circuits[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(2): 374-380.
- [15] 饶俊峰, 李成建, 李孜, 等. 全固态高重复高压脉冲电源[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 035001. (Rao Junfeng, Li Chengjian, Li Zi, et al. All solid state high-frequency and high voltage pulsed power supply[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 035001)
- [16] Jiang Weihua, Sugiyama H, Tokuchi A. Pulsed power generation by solid-state LTD[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3603-3608.
- [17] Canacsinh 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.
- [18] 江伟华. 高重复频率脉冲功率技术及其应用: (7)主要技术问题和未来发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 010201. (Jiang Weihua. Repetition rate pulsed power technology and its applications: (VII) Major challenges and future trends[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 010201)
- [19] RaoJunfeng, Zhu Yicheng, Wang Yonggang, et al. Study on the basic characteristics of solid-state linear transformer drivers[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(9): 3168-3175.
- [20] 马龙. 单/双极性高压脉冲源的研制及抑藻实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015: 9-29. (Ma Long. Developing a monopolar/bipolar high voltage pulser and doing experimental research on its effect on microalgae cell inactivation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015: 9-29.)
- [21] 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)
- [22] 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)
- [23] 虞超群, 嵇保健, 孙柯, 等. 基于移相控制技术的纳秒级高压窄脉冲电源研究[J]. *电工电能新技术*, 2016, 35(9): 55-59. (Yu Chaoqun, Ji Baojian, Sun Ke, et al. Design of high voltage pulsed power generator based on technology of phase-shifted control[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2016, 35(9): 55-59)
- [24] 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(4): 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(4): 1305-1312)
- [25] 江伟华. 基于半导体开关的高重复LTD[J]. *高电压技术*, 2015, 41(6): 1776-1780. (Jiang Weihua. High-frequency repetitive LTD based on semiconductor switches[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(6): 1776-1780)
- [26] Collier L, Dickens J, Mankowski J, et al. Performance analysis of an all solid-state linear transformer driver[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2017, 45(7): 1755-1761.
- [27] 米彦, 孙才新, 姚陈果, 等. 基于等效电路模型的细胞内外膜跨膜电位频率响应[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(6): 6-11. (Mi Yan, Sun Caixin, Yao Chenguo, et al. Frequency response of transmembrane potential on cell inner and outer membrane based on equivalent circuit model[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2007, 22(6): 6-11)
- [28] 董守龙. 高频双极性微秒脉冲电场不可逆电穿孔消融肿瘤的实验与机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017: 39-58. (Dong Shoulong. Experiments and mechanism research of irreversible electroporation by high frequency bipolar microsecond pulse for tumor ablation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017: 39-58.)
- [29] 赵亚军. 复合脉冲消融肿瘤致组织介电与阻抗特性动态变化机理及实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018: 23-46. (Zhao Yajun. Experimental and mechanism study on the dynamic change of tissue dielectric and impedance caused by composite pulsed electric field for tumor ablation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018: 23-46.)