

基于感应叠加原理的模块化脉冲电源的研制

程 显^{1,2}, 夏荣翔^{1,2}, 葛国伟^{1,2}, 连昊宇^{1,2}, 吕彦鹏^{1,2}, 陈 硕^{1,2}

(1. 郑州大学电气工程学院, 郑州 450001;

2. 河南省输配电装备与电气绝缘工程技术研究中心, 郑州 450001)

摘 要: 针对等离子体及其应用对于高可靠性、小型化高压重频脉冲电源的需求, 研制了一种基于感应叠加原理的模块化脉冲电源。该脉冲电源采用绝缘栅门极晶体管(insulated gate bipolar translator, IGBT)作为主开关, 基于脉冲变压器升压和感应叠加原理实现多个单元模块的脉冲电压叠加, 从而获得高压短脉冲。首先基于 PSpice 软件验证该拓扑结构的可行性并为元件选型提供理论指导, 最终研制出基于感应叠加原理的脉冲电源的样机, 其输出脉冲参数为: 幅值为 0~15 kV 可调, 重复频率为 1~10 kHz 可调, 脉宽为 5~7 μs 。脉冲电源采用模块化设计, 在保证各模块之间绝缘的前提下, 可以通过增加模块数量方便地提高最大输出电压。依托该脉冲电源开展介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体试验, 验证了该脉冲电源产生等离子体的可靠性。

关键词: 固态开关; 脉冲变压器; 脉冲感应叠加; 模块化; 介质阻挡放电等离子体

Development of Modular Pulse Generator Based on Inductive Adding Principle

CHENG Xian^{1,2}, XIA Rongxiang^{1,2}, GE Guowei^{1,2}, LIAN Haoyu^{1,2}, LÜ Yanpeng^{1,2}, CHEN Shuo^{1,2}

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan Engineering Research Center of Power Transmission & Distribution Equipment and Electrical Insulation, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To meet the demands of plasma and its application for high-reliability and miniaturized high-voltage repetitive frequency pulse power supply, a modular pulse power supply based on the principle of inductive adder is developed. In the pulse supply, an insulated gate bipolar translator(IGBT) is used as the main switch, and the pulse voltage overlay of multiple units is realized based on the principle of pulse transformer boost and inductive adder so as to obtain high-voltage short pulses. The feasibility of the topology structure is verified firstly based on the PSpice software so as to provide theoretical guidance for component selection. Finally, a prototype of pulse power supply based on principle of inductive-adder is developed, whose output pulse parameters are as follows: the amplitude is 0 to 15 kV adjustable, the repetition frequency is 1 to 10 kHz adjustable, and the pulse width is 5 to 7 μs . The pulse power supply is designed in modular, and the maximum output voltage can be easily increased by adding the number of modules on the premise of ensuring insulation between modules. Moreover, the dielectric barrier discharge(DBD) plasma experiment is carried out by using the pulse power supply. The reliability of plasma generated by the pulse power supply is verified.

Key words: solid-state switch; pulse transformer; inductive-adder; modular; dielectric barrier discharge plasma

0 引言

近年来, 等离子体技术被广泛应用于生物医学、能源环境、材料处理等前沿领域且成效显著^[1-3], 与其配套的高压驱动电源也受到越来越多关注^[4-5]。相较于正弦激励, 脉冲激励的放电等离子体在能量效率方面更具优势^[6], 同时脉冲激励更有利于在大

气压下产生大体积均匀等离子体^[7]。因此研制出小型化、快前沿、参数灵活可调且成本适中的脉冲电源, 已成为等离子体技术研究及其应用的重要研究方向之一。

对于研制等离子体所需的高压重频脉冲电源, 目前常见的脉冲产生方式有 Marx 发生器^[8-11]、脉冲变压器^[12-13]、直线型变压器驱动源(linear transformer driver, LTD)电路^[14]等。基于固态开关的 Marx 发生器所构成的脉冲电源适合小型化、高重频应用场合, 但其多级隔离驱动及大功率高压直流电源供

基金资助项目: 国家自然科学基金(51977195; 52007172); 中国博士后科学基金(2020M672273)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51977195, 52007172), China Postdoctoral Science Foundation (2020M672273).

电的方式成本较为昂贵^[15]。传统脉冲变压器与电容器、气体火花开关组成的谐振放电回路可产生重频高压脉冲,但其频率受限于气体火花开关介质恢复速度且体积较大^[16-17]。基于 LTD 原理的全固态脉冲电源采用 1:1 的脉冲变压器进行同步叠加,能够在较大程度上降低漏感对脉冲上升沿的影响,但由于受到磁芯饱和与电源单模块的低升压比的影响,其输出脉宽、幅值有所受限。采用电力电子器件如绝缘栅门极晶体管(insulated gate bipolar translator, IGBT)、金属氧化物半导体场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET)等半导体器件作为主开关,可以获得更高的重复频率。实际使用中,为了满足应用要求,通常需要采用串、并联方式提高耐压通流能力及输出功率。中国科学院电工所邵涛等设计了一种小型紧凑型微秒脉冲电源,电源采用级联型电压叠加方式提高输出脉冲电压幅值,采用 40 个重复单元模块叠加,输出参数为脉冲电压 0~20 kV、频率 0~10 kHz、脉宽 5~30 μs ^[18];复旦大学刘克富等设计了一种双极性 Marx 电路与脉冲变压器结合的电路拓扑结构,以 Marx 电路和脉冲变压器为升压方式,降低了对大功率高压直流电源的需求,在负载侧产生了幅值为 0~25 kV、频率为 0.1~5 kHz 的双极性脉冲^[19]。重庆大学姚陈果等为了提高脉冲电源的脉冲电流输出能力,设计了一种多匝直线型变压器驱动源,其单级主开关采用 18 个 MOSFET 并联,在负载侧可输出脉冲电压为 5 kV、脉宽为 0.2~5 μs ,频率为 10 Hz,脉冲电流可达 500 A^[20]。

为了降低对高压直流电源的使用需求以及对驱动单元中隔离供电模块数量和隔离电压等级的要求,本文研制了一种基于感应叠加原理的模块化脉冲电源,该电源采用感应叠加及脉冲变压器升压的方式,对脉冲电压进行升压叠加输出,从而获得高压短脉冲;为了提高主开关的通流能力及开关频率,脉冲电源单级采用多个 IGBT 并联的方式。同时由于采用感应叠加原理对脉冲变压器次级侧进行感应叠加输出,相较于采用单个高匝数比脉冲变压器^[21],降低匝数比一方面改善了脉冲变压器的杂散参数,降低了对初级侧输入电压幅值的要求,进而减小了脉冲变压器磁芯体积,实现了脉冲电源的小型、紧凑化。本文通过 Pspice 仿真软件对电源的拓扑结构进行仿真验证,对样机进行试验测试,并开展同轴

DBD 等离子体试验,验证了该装置的可靠性及有效性。

1 脉冲电源样机拓扑结构及工作原理

1.1 脉冲电源电路设计

脉冲感应叠加是将多个脉冲发生装置进行同步叠加以获得超过单机工作能力的短脉冲^[22]。本文研制了一种基于感应叠加原理的模块化脉冲电源,通过脉冲变压器次级串联的方式进行脉冲电压的叠加,兼顾了成本和电源带载能力。

图 1 为脉冲电源电路示意图,其中 C_0 、 C_1 为充电电容, S_1 — S_8 为 IGBT 开关, R_{P0} 、 R_{P1} 为保护电阻, T_1 、 T_2 分别为脉冲电源 2 个模块的脉冲变压器。图中 1 个单元模块的输出参数为:幅值为 0~7 kV;重复频率为 0~10 kHz;脉宽为 5~7 μs 。每级的脉冲形成单元都集中在单块的印刷电路板(printed circuit board, PCB)上,以尽量减小甚至消除引线电感等杂散参数对输出波形的影响,同时便于多模块之间进行级联。如图 1 所示,在保证各模块之间绝缘的前提下,将多个模块单元次级侧串联即可获得多倍的脉冲电压输出。为了提高回路主开关的通流能力,每级模块中采用 4 个 IGBT 开关并联。

1.2 脉冲电源工作原理

脉冲电源的工作原理如图 2 所示。图 2(a)为脉冲电源的充电过程,通过直流充电电源给充电电容 C_0 、 C_1 充电,充电过程中 IGBT 驱动电路不提供触发信号,IGBT 开关 S_1 — S_8 均处于关断状态。此时,充电电容上的电压 U_{C0} 、 U_{C1} 等于直流电源的充电电压 U_0 。

放电过程如图 2(b)所示,此时 IGBT 驱动电路提供 1 个触发信号,IGBT 开关 S_1 — S_8 导通,缓冲支路中的快速恢复二极管 D_{S0} 、 D_{S1} 反向截止,充电

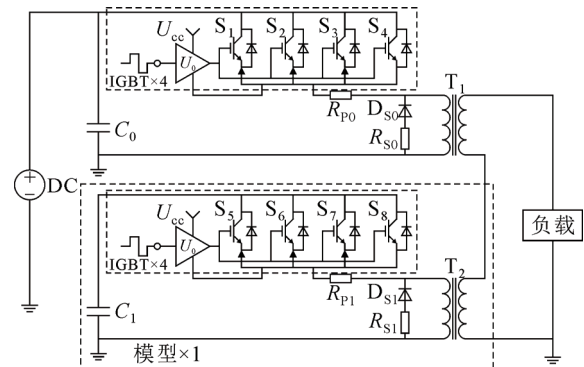


图 1 脉冲电源原理示意图

Fig.1 Circuit schematic of pulse generator

电容 C_0 、 C_1 经保护电阻 R_{P0} 、 R_{P1} 分别对脉冲变压器 T_1 、 T_2 初级侧线圈施加脉冲电压，经脉冲变压器升压，在次级侧线圈产生脉冲电压 U_2 ，最后经多模块叠加后在负载上输出电压 U_{out} 为

$$U_{out} = nkU_1 \quad (1)$$

式中： k 为脉冲变压器工作变比； n 为该脉冲电源含有的模块数； U_1 为脉冲变压器初级侧电压。

2 仿真分析

为了验证基于感应叠加原理的脉冲电源的可行性，同时为元器件选型提供理论支撑，本文首先使用了 Pspice 对图 1 电路进行仿真，仿真中负载设置为 $5\text{ k}\Omega$ 线性电阻。

仿真电路中每级采用 4 个 IGBT 开关并联作为脉冲形成回路中的主开关。变压器磁芯设置为线性变压器磁芯，用来模拟脉冲变压器工作在磁芯饱和前的工作状态。

仿真电路中单级和 2 级叠加输出电压波形对比如图 3 所示，设置参数输入电压 350 V 、触发脉宽为 $5\text{ }\mu\text{s}$ ，则仿真结果中单级输出脉冲电压峰值为 7.2 kV ，2 级叠加输出脉冲电压峰值为 14.5 kV ，2 级叠加输出电压的峰值是单级输出的 2 倍，与理论设计相符。经仿真结果验证，采用感应叠加技术能够实现拓扑结构，满足设计的电压叠加输出效果。不同充电电压下仿真电路中输出波形参数如图 4 所示，在充电电压为 $50\sim 350\text{ V}$ 范围内 2 级叠加脉冲电源输出电压是充电电压的 40 倍。

通过上述仿真验证可以看出采用感应叠加技术的脉冲电源是可行的。同时，仿真为元件计算选型提供了理论指导。

3 器件选型

3.1 固态开关选型

本文要求脉冲电源具有高重复频率，且固态开关要能承受较高的脉冲电流。IGBT 相较于 MOSFET 有着更高的脉冲电流耐受裕量和更低的成本，同时其通断能力达到数十至数百 kHz。

因此，本文选用 FGL40N120ANDTU 型 IGBT 作为主开关器件。其集射极阻断电压为 1 200 V ，集电极直流电流的通流能力为 40 A ，可重复脉冲电流通流能力为 160 A 。

3.2 储能电容计算选型

2 级叠加的脉冲电源电路中的充电电容起着能

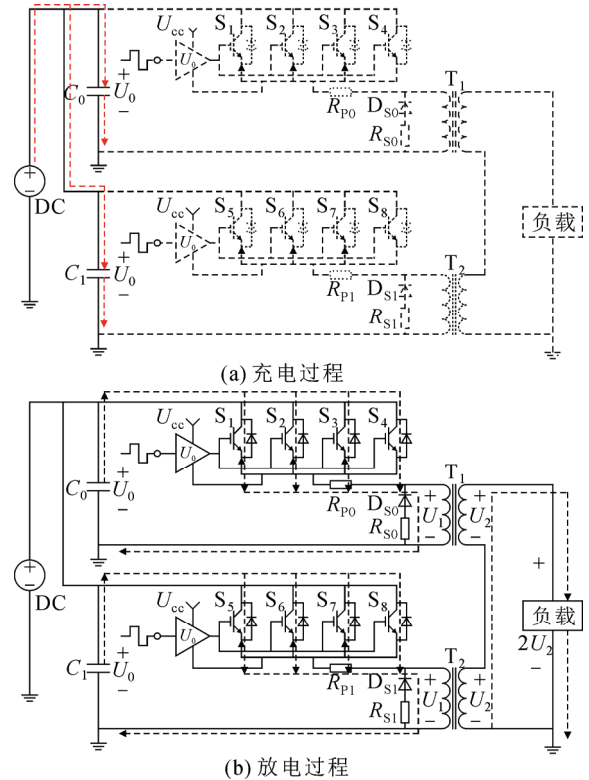


图2 脉冲感应叠加原理的脉冲电源充放电过程示意图
Fig.2 Schematic diagram of pulse generator charging and discharging process

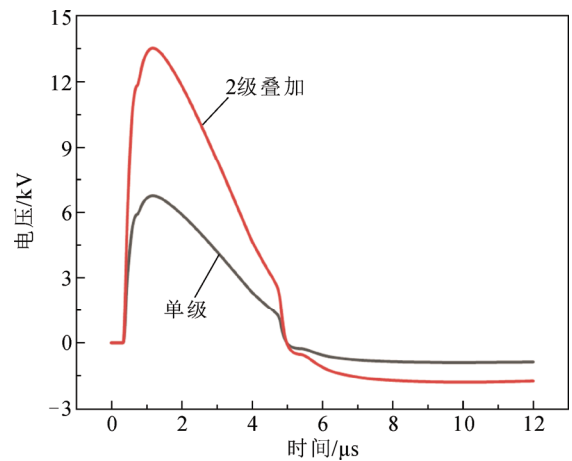


图3 单级与 2 级叠加仿真输出电压
Fig.3 Single and two-stage adding simulation output voltages

量存储和传输的作用，对其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按不低于单级 IGBT 开关器件工作电压来选取，因此储能电容的耐压值应该选择 800 V 以上。

对于储能电容的电容量选取则主要由放电时间常数来决定，即要求脉冲电源在脉宽最大情况下放电时，储能电容上的电压下降幅值不高于所要求

的最小电压降落值。按照设计要求, 在最大脉冲宽度和最大频率下脉冲形成回路允许输出脉冲电压有 10% 的电压降落, 储能电容器的最小电容量需要满足式(2), 即

$$C \geq 2U_{out}^2 \tau / (0.1U_{DC}^2 R_L \eta) \quad (2)$$

式中: τ 为最大脉冲宽度; U_{DC} 为直流电源输入电压幅值; U_{out} 为输出脉冲电压幅值; R_L 为负载电阻; η 为脉冲变压器能量传输效率。根据式(2)计算得到每个储能电容器的电容值须 $\geq 1 \mu\text{F}$ 。同时, 为了尽量减小脉冲形成回路中的杂散电感, 在留有一定裕量的情况下, 选择等效串联电感更小的储能电容器。因此, 本文选用 $4.7 \mu\text{F}$ 、工作电压为 $1\ 000 \text{ V}$ 的无感电容器作为脉冲电源的储能电容。

图 5 为 IGBT 的驱动电路原理图, 由于采用脉冲变压器作为升压方式, 降低了隔离供电模块对隔离电压等级的要求, 驱动板上隔离电压 $\leq 800\text{V}$, 因此本文选用 IH2415S 隔离电源模块, 其隔离电压为 $1\ 000 \text{ V}$ 能满足使用要求。同时, 为了降低主回路放电对控制信号的影响, 控制单元和驱动单元之间采用光纤隔离控制。

3.3 磁芯选择

对于采用脉冲变压器作为升压方式的脉冲电源, 脉冲变压器对于脉冲电源的输出特性起着至关重要的作用。脉冲变压器铁芯的带材应满足以下要求: 饱和磁通密度高、剩余磁通密度低、矫顽力低、磁导率高^[23]。常见的软磁材料通常包括硅钢、铁氧体、坡莫合金、非晶态和纳米晶软磁合金。从最佳性能的角度来看, 铁基纳米晶合金性能是最合适的, 其在脉冲状态下有着较高的磁感应增量和脉冲磁导率。为此本文选用 1k107 带材绕制的铁基纳米晶磁芯。磁芯为环形, 初级绕组和次级绕组均耦合在环形磁芯上。为了保证绝缘选用了带护壳的磁芯, 初级和次级侧绕组采用硅橡胶绝缘线绕制。

脉冲变压器磁芯设计应满足伏秒积公式^[23], 因此单个脉冲变压器采用 2 块 1k107 带材绕制的环形磁芯制作而成, 脉冲变压器的相关参数由阻抗分析仪测得, 具体参数如表 1 所示。

4 试验验证及分析

4.1 阻性负载输出特性

试验测试中采用整流桥对 220 V 交流电进行整流的方式为脉冲电源提供直流供电。测试过程中采用高压无感电阻 ($10 \text{ k}\Omega$) 作为负载, 测试了单级、2

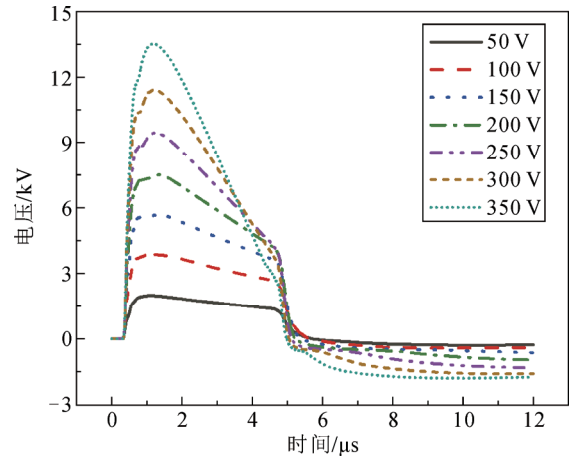


图 4 不同充电电压下的仿真输出电压波形

Fig.4 Simulation output voltages under different charging voltages

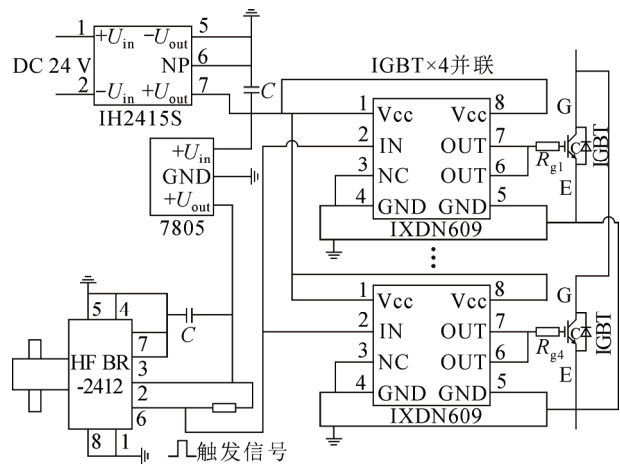


图 5 驱动电路原理图

Fig.5 Schematic diagram of drive circuit

表 1 脉冲变压器主要特性

Table 1 Key characteristics of each pulse transformer

参数	数值
磁芯型号	1k107
磁芯数目	2
磁芯尺寸	80 mm×50 mm×25 mm
初级侧匝数 N_1	2
次级侧匝数 N_2	42
初级侧电感 $L_1/\mu\text{H}$	460
次级侧电感 L_2/mH	205
初级侧漏感 μH	5.3
次级侧漏感 mH	0.71

级叠加的脉冲电源样机在不同触发时间、不同输入电压下的波形参数。试验测试中的电压电流信号分别由泰克 P6015A 高压探头、力科 PP024 电压探头及 CP8150A 有源电流探头进行采集, 示波器采用泰克 TPS 2024B。

单级测试和 2 级叠加测试输出电压波形对比如图 6 所示, 其中模块 1 和模块 2 对应的波形分别为图 1 脉冲电源原理图中 2 个模块的脉冲变压器 T_1 、 T_2 高压侧的试验波形, 测试输入电压为 300 V、触发信号脉宽为 5 μs 。从图 6 中可以看出单级输出脉冲电压峰值为 7 kV, 2 级叠加脉冲电压峰值为 12 kV 左右, 其叠加后脉冲电压波形没有发生畸变且输出峰值相对于单级输出, 提升了 1.7 倍, 略低于仿真中 2 倍的提升效果; 同时, 单级输出脉冲电压脉宽和 2 级叠加输出脉冲电压在脉冲下降沿有 500 ns 时延, 这可能由于脉冲变压器次级侧的串联漏感使得脉冲下降沿变缓所导致, 而在脉冲关断时刻适当的使磁芯工作在饱和状态下, 则能够在一定程度上改善其脉冲下降沿。

图 7(a)是在 5 μs 触发信号、不同输入电压下负载侧的电压波形。在不同触发信号下, 脉冲波形的一致性较好, 此时电压脉冲的上升沿在 1 μs 左右。当输入电压在 50~300 V 区间时, 负载电阻上的脉冲电压在 20 μs 处出现迅速下降, 随后幅值下降变缓并降至 0 V, 这是由于 IGBT 关断后, 缓冲支路的作用使其脉冲电压的下降沿出现 1 个缓慢下降的过程。图 7 中, 当输入电压为 350 V 时, 负载电阻上的脉冲电压在还未到达关断时刻时已经出现明显下降, 并在 20 μs 时刻产生了 1 个反向振荡。这由于在输入电压为 350 V 时, 脉冲变压器磁芯已经趋于饱和, 脉冲变压器初级侧的感抗迅速下降, 同时导致缓冲支路没有发挥作用, 反映到负载上的脉冲电压波形即在关断信号产生前便出现电压迅速下降。图 7(b)为不同触发信号下输出电压波形的对比, 在不同触发信号下随着施加触发信号脉宽的增加, 输出电压脉冲下降沿的拖尾时间会显著降低。当触发信号为 1 μs 时, 电压脉冲拖尾至 24 μs 时刻; 当触发信号为 6 μs 时, 电压脉冲拖尾至 21 μs 时刻, 脉冲的下降沿拖尾随着触发信号脉宽的增加而减小, 同理是由于随着脉宽增加磁芯饱和程度改变所导致。

脉冲电源输出的 1 和 10 kHz 脉冲波形如图 8 所示, 可以看出输出电压波形稳定, 电压幅值波动小, 满足设计使用要求。同时, 脉冲变压器输出单极性脉冲时, 相邻脉冲间隔需要足够时间使脉冲变压器磁芯复位, 为此, 微秒脉冲发生器的最大工作频率限定为 10 kHz。

4.2 容性负载输出特性

为了验证基于感应叠加技术的微秒脉冲电源

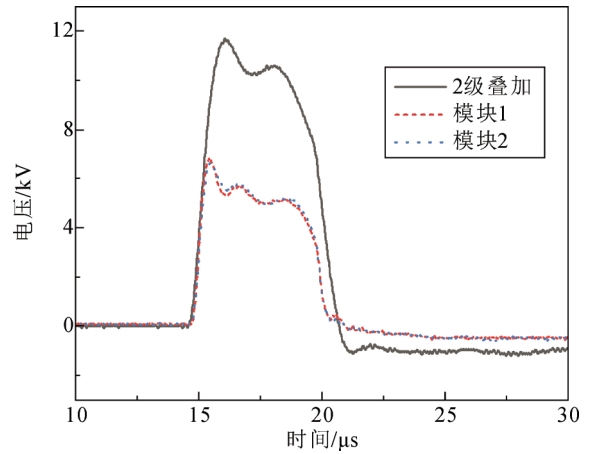
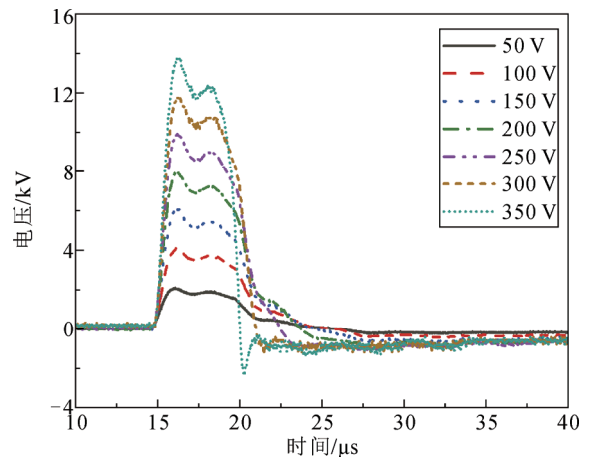
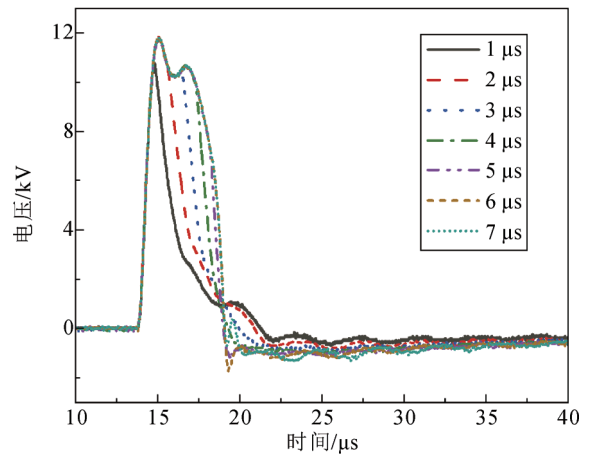


图 6 单级与 2 级叠加输出电压对比

Fig.6 Comparison of single and two-stage adding output voltages



(a) 不同充电电压下阻性负载端电压波形



(b) 不同触发信号下阻性负载端电压波形

图 7 不同触发信号及充电电压下阻性负载端电压波形

Fig.7 Output voltage under different charging voltages and trigger pulse widths

对于同轴电缆、DBD 反应器等容性负载的带载能力, 本文选用高压无感电容为负载对电源的容性负载带载能力进行测试。

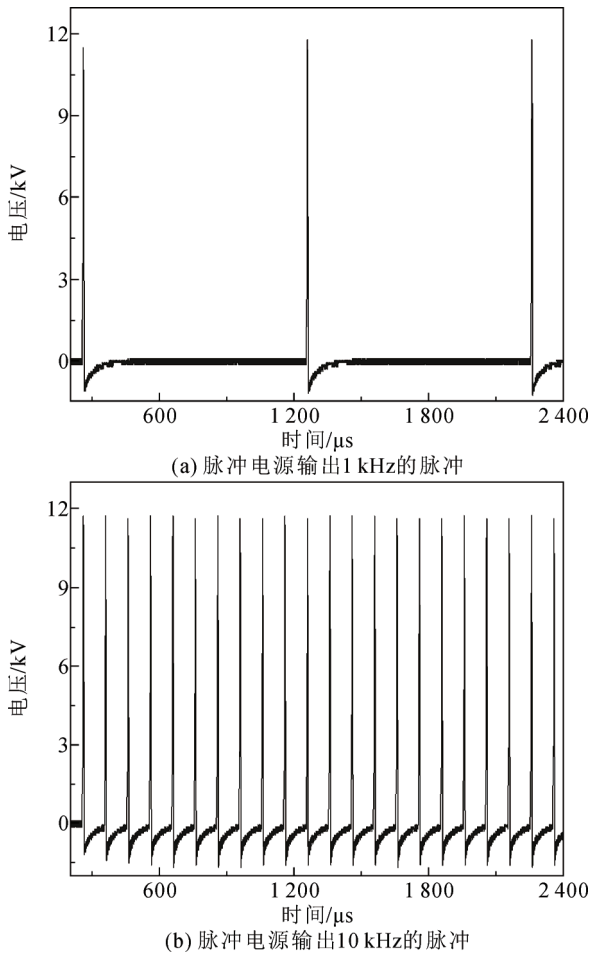


图8 脉冲电源输出1和10 kHz的脉冲

Fig.8 Pulse generator outputs pulses of 1 kHz and 10 kHz

图9是触发信号脉宽为 $4\ \mu\text{s}$ 时, $60\ \text{pF}$ 容性负载上测得的脉冲波形, 相较于阻性负载, 脉冲上升沿由 $1\ \mu\text{s}$ 上升至 $2\ \mu\text{s}$ 。随着充电电压幅值的增加, 脉冲变压器磁芯饱和程度改变, 脉冲下降沿变短。不同大小容性负载端电压波形对比如图10所示, 充电电压为 $300\ \text{V}$, 触发信号为 $4\ \mu\text{s}$ 。随着容值的增加, 脉冲上升沿增加, 脉冲峰值电压会减小。在等效容性负载为 $360\ \text{pF}$ 时, 电源的带载能力可以输出 $10\ \text{kV}$ 以上的脉冲电压。

4.3 DBD 负载试验

微秒脉冲电源驱动的同轴 DBD 放电特性试验如图11所示。该试验系统包括电源系统、低温等离子体发生装置和测量装置。电源系统为基于感应叠加原理的微秒脉冲电源, 等离子体发生装置采用同轴 DBD 放电结构, 其中高压电极为直径为 $3\ \text{mm}$ 的不锈钢电极, 阻挡介质为外径 $7\ \text{mm}$ 、内径 $5\ \text{mm}$ 的石英管, 接地电极为螺旋线结构, 采用线径为 $0.3\ \text{mm}$ 的聚酯漆包线绕制。同轴 DBD 放电图像采用佳能 EOS60D 拍摄, 曝光时间为 $0.1\ \text{s}$ 。

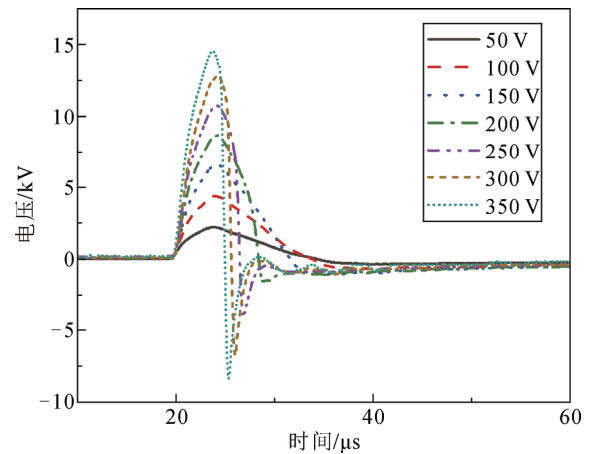


图9 不同充电电压下容性负载端电压波形

Fig.9 Output voltage of capacitive load under different charging voltages

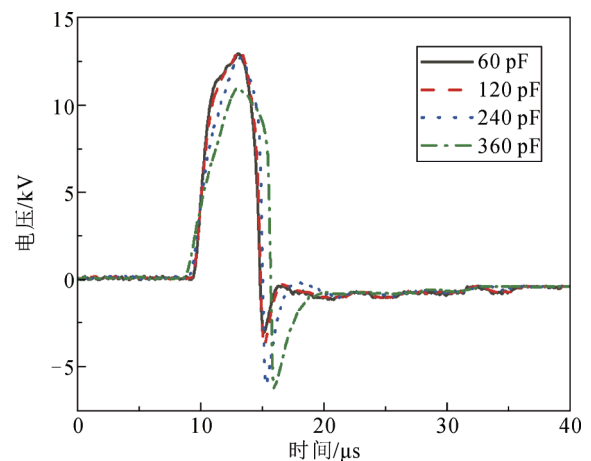


图10 不同大小容性负载端电压波形

Fig.10 Output voltage on capacitive load with different capacitance values

由放电图像可以看出, 在频率为 $500\ \text{Hz}$ 时, 放电呈现类似电晕放电, 同时仅有少量放电细丝通道; 随着频率的升高, 放电变得剧烈, 放电细丝变得明亮, 同时放电细丝通道增多, 照亮整个同轴 DBD 放电管。

微秒脉冲驱动下的同轴 DBD 放电的典型电压-电流波形及放电图像如图12所示。触发信号为 $5\ \mu\text{s}$, 充电电压为 $300\ \text{V}$, 频率为 $10\ \text{kHz}$ 。由电流-电压波形图可以看出放电发生在脉冲电压的上升沿及下降沿, 脉冲电流大小在多个放电周期内呈现为随机, 幅值在 $10\sim 50\ \text{A}$ 之间, 且表现为多次放电。

5 结论

1) 采用脉冲变压器及感应叠加原理升压的方

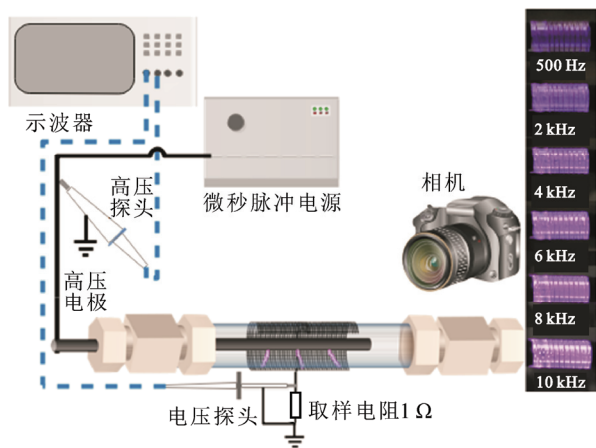


图 11 脉冲 DBD 放电试验装置及不同频率下放电图像

Fig.11 Schematic diagram of pulse DBD discharge experiment and different frequencies of discharge images

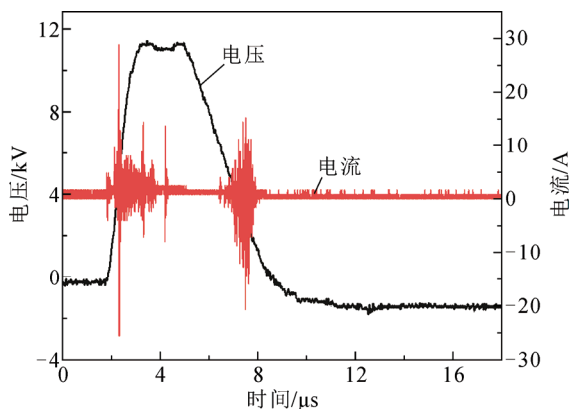


图 12 典型电流-电压波形

Fig.12 Typical current-voltage waveform

式降低了对高压直流电源以及对隔离供电模块数量、隔离电压等级的要求,降低了电源成本,减小了脉冲变压器磁芯体积,实现了脉冲电源的小型紧凑化。

2) 2级叠加的脉冲电源样机输出参数如下:输出电压为0~15 kV可调;频率为0~10 kHz可调;脉宽为5~7 μs。样机在阻性负载和容性负载上进行了试验,输出参数与设计较相符。

3) 将样机用于DBD负载进行了试验,验证了该脉冲电源可在大气压下稳定地产生等离子体。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 戴栋, 宁文军, 邵涛. 大气压低温等离子体的研究现状与发展

趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9.

- DAI Dong, NING Wenjun, SHAO Tao. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9.
- [3] 汪立峰, 张波, 刘峰, 等. 纳秒脉冲悬浮电极介质阻挡放电作用下人体阻抗模型及参数确定[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 4122-4129.
WANG Lifeng, ZHANG Bo, LIU Feng, et al. Determination of human body impedance model and parameters under floating-electrode dielectric barrier discharge excited by nanosecond pulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 4122-4129.
- [4] 程显, 徐晖, 王瑞雪, 等. 等离子体复合薄膜沉积抑制金属微粒启举[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4672-4681.
CHENG Xian, XU Hui, WANG Ruixue, et al. Composite thin film deposited by plasma to inhibit the lifting of metal particles[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4672-4681.
- [5] CHEN B, TAN Z Y, SONG X X, et al. Characteristics of atmospheric-pressure helium barrier pulse discharges[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(10): 1949-1957.
- [6] 冯卫强, 刘振, 刘百良, 等. 双极性脉冲臭氧发生的实验研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 3083-3088.
FENG Weiqiang, LIU Zhen, LIU Bailiang, et al. Experimental study of ozone generation by using bipolar pulse power supply[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 3083-3088.
- [7] UNFER T, BOEUF J P. Modeling and comparison of sinusoidal and nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharges for flow control[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2010, 52(10): 124019.
- [8] 刘克富. 固态 Marx 发生器研究进展[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781-1787.
LIU Kefu. Research progress in solid-state Marx generators[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1781-1787.
- [9] 王艺麟, 马剑豪, 董守龙, 等. 协同纳微秒的全固态脉冲发生器研制[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 4061-4068.
WANG Yilin, MA Jianhao, DONG Shoulong, et al. Development of all-solid-state pulse generator for generating synergistic nanoseconds/microseconds[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4061-4068.
- [10] 饶俊峰, 皮特尔, 李孜, 等. 带截尾开关的高频纳秒脉冲功率源设计[J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1800-1807.
RAO Junfeng, PI Teer, LI Zi, et al. Design on high-frequency nanosecond pulse power source with truncated switch[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1800-1807.
- [11] 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.
- [12] 米彦, 桂路, 邓胜初, 等. 模块化双极性指数衰减脉冲电压源研制[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3721-3729.
MI Yan, GUI Lu, DENG Shengchu, et al. Development of modular bipolar solid-state exponential decay pulse voltage source[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3721-3729.
- [13] REED J L. Note: tesla transformer damping[J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(7): 076101.
- [14] 冯昱, 毛越波, 罗海云, 等. 全固态高重复频率 LTD 的性能测试和特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(4): 045001.
FENG Yu, MAO Yuebo, LUO Haiyun, et al. Performance test and analysis based on solid-state high repetitive frequency LTD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30(4): 045001.

- [15] 王昌金, 姚陈果, 董守龙, 等. 基于 Marx 和 LTD 拓扑的全固态复合模式脉冲源的研制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3089-3097. WANG Changjin, YAO Chenguo, DONG Shoulong, et al. The development of all solid-state mixed pulse generator based on Marx and LTD topologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3089-3097.
- [16] 程 显, 王俊启, 屠 昕, 等. 场畸变触发开关新型触发电极的设计与实验[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 34-41. CHENG Xian, WANG Junqi, TU Xin, et al. A novel trigger electrode design and experiment of field distortion spark switch[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 34-41.
- [17] ZHANG T Y, CHEN D Q, LIU J L, et al. A compact, high-voltage pulsed charging system based on an air-core pulse transformer[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 094706.
- [18] 韩 静, 高迎慧, 孙鹤鸿, 等. 级联型高压重频微秒脉冲电源的研制[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3762-3768. HAN Jing, GAO Yinghui, SUN Yaohong, et al. Design of cascade high-voltage repeated-frequency microsecond-pulse power supply[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3762-3768.
- [19] WANG Y G, TONG L Q, LIU K F, et al. Repetitive high-voltage pulse modulator using bipolar Marx generator combined with pulse transformer[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018, 46(10): 3340-3347.
- [20] 董守龙, 王艺麟, 曾伟荣, 等. 一种全固态多匝直线型变压器驱动源的研制[J]. 电工技术学报, 2020, 35(7): 1584-1591. DONG Shoulong, WANG Yilin, ZENG Weirong, et al. The development of all solid-state multi-turn linear transformer driver[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(7): 1584-1591.
- [21] FANG Z, SHI Y W, LIU F, et al. Compact microsecond pulsed power generator driven by solar energy for dielectric barrier discharge applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 390-396.
- [22] 马 勋, 李洪涛. 基于感应叠加原理的充电电源初步研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(4): 116-118. MA Xun, LI Hongtao. Development of power supply based on inductive adding technique[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(4): 116-118.

- [23] 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.



CHENG Xian
Ph.D., Professor



XIA Rongxiang



GE Guowei
Ph.D.
Corresponding author

程 显

1982—, 男, 博士, 教授, 博导
从事开关设备与绝缘技术研究, 着重研究混合断路器技术、多断口真空开关技术
E-mail: chengxian@zzu.edu.cn

夏荣翔

1997—, 男, 硕士生
从事开关设备与绝缘技术研究
E-mail: 786701440@qq.com

葛国伟(通信作者)

1987—, 男, 博士, 讲师
从事智能化高压电器及高新技术研究, 着重研究多断口真空开关技术、中压直流开断技术
E-mail: ggw@zzu.edu.cn

收稿日期 2020-10-29 修回日期 2020-12-16 编辑 曾文君