



·高电压及脉冲功率技术·

全固态双极性纳秒脉冲电源研制及应用*

李帅康^{1,2}, 黄邦斗¹, 章程^{1,2}, 邵涛^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所等离子体科学和能源转化北京市国际科技合作基地, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研制了一种双极性交替的纳秒高压脉冲电源, 进行了双极性纳秒脉冲放电产生等离子体研究。该电源先通过固态开关 IGBT 将直流电压截断成电压脉冲, 通过可饱和脉冲变压器拓扑, 实现升压并缩短脉冲上升沿。该电源可在一个周期内输出极性相反的 2 个脉冲, 且时序可以灵活控制。通过优化调整器件参数, 研制了两种不同输出性能参数的双极性纳秒脉冲电源: ①峰值电压 10 kV、爆发模式脉冲重复频率 500 kHz (正负脉冲间隔 2 μs)、连续重复频率 1 kHz; ②峰值电压 25 kV、爆发重频 200 kHz、连续重频 600 Hz。测试电源的运行性能, 发现电源存在温度升高的情况, 但长时间 (>0.5 h) 运行温度趋于稳定。10 kV 电源连续运行在 1 kHz 时最高温度点 50.5 °C; 25 kV 电源连续运行在 600 Hz 时最高温度点 60 °C。利用该电源驱动线板电极阵列和表面介质阻挡放电结构, 证实了该电源可以用于常压空气条件下产生大面积等离子体。

关键词: 双极性脉冲电源; 磁压缩; 固态开关; 纳秒脉冲放电; 大气压等离子体

中图分类号: TM832; O539

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210008

Development and application of all-solid-state bi-polar nanosecond pulse generators

Li Shuaikang^{1,2}, Huang Bangdou¹, Zhang Cheng^{1,2}, Shao Tao^{1,2}

(1. Beijing International S & T Cooperation Base for Plasma Science and Energy Conversion, Institute of

Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A nanosecond pulse generator with alternating output voltage polarity is developed, and the study of plasma generated by bipolar nanosecond pulse discharge is carried out. The generator first cuts DC voltage into a voltage pulse through solid-state switches IGBT, and uses a saturable pulse transformer to boost the voltage and shorten the pulse rising edge. The generator can output two pulses with opposite polarities in one cycle, and the timing can be flexibly controlled. By choosing devices with proper parameters, two bipolar nanosecond pulse generators with optimized output parameters are developed: ① The peak voltage is 10 kV, and the pulse repetition frequency in burst mode is 500 kHz (interval between positive and negative pulses is 2 μs), with continuous repetition frequency of 1 kHz; ② The peak voltage is 25 kV, with 200 kHz burst frequency, and the continuous frequency is 600 Hz. The operating performance of the generators is tested, and it is found that the temperature of the generators tends to increase to a stable point during long-duration (more than half an hour) operation. When the 10 kV generator continuously works at 1 kHz, its highest temperature is 50.5 °C. For the 25 kV generator continuously working at 600 Hz, the highest temperature point is 60 °C. The result of using the generators to drive the wire-to-plate electrode and the surface dielectric barrier discharge proves that the generators can be used to generate large-area plasma in atmospheric air.

Key words: bi-polar pulse generator; magnetic compression; solid-state switch; nanosecond pulse discharge; atmospheric-pressure plasma

脉冲功率技术的迅速发展使得脉冲放电产生等离子体的研究得到了迅速推进。等离子体在许多领域表现出优异的性能, 如等离子体助燃^[1-2]、材料表面改性^[3-4]、生物医学^[5]、飞行器流动控制^[6-7]、能源化工^[8]等。相比于传统

* 收稿日期: 2021-01-30; 修订日期: 2021-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51925703, 51637010, 51907190)

作者简介: 李帅康 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事气体放电等离子体相关研究。

通信作者: 黄邦斗 (1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事脉冲功率技术、等离子体诊断、反应动力学相关研究。

的交流激励放电,脉冲放电等离子体更均匀,瞬时功率可达 GW 级,但是其平均功率偏低,单脉冲能量只能达到几十 mJ。为提高脉冲放电等离子体的平均功率,获得更大尺寸的等离子体,必须提高注入放电的功率。

国内上海理工大学饶俊峰等^[9]提出了一种自触发驱动的紧凑型正极性全固态 Marx 发生器,脉冲前沿约 328 ns,重复频率 100 Hz。中国科学院电工研究所邵涛等^[10]设计了一种紧凑型正极性微秒脉冲电源,峰值电压 20 kV,重复频率 10 kHz。西安交通大学赖雨辰等^[11]研制了峰值电压 38.2 kV,脉冲前沿约 7.1 ns,重复频率 400 kHz 的负极性脉冲电源。国外以色列研究人员 L. M. Merensky 等^[12]研制了一种正极性脉冲电源,其上升时间约 1 ns,重复频率达到了 1 MHz,但其电压幅值只能达到 2.2 kV。日本研究人员 Weihua Jiang 等^[13]研制了一种电压幅值达 29 kV,脉冲重复频率可达 3.3 MHz 的脉冲电源。

前人的研究在极大程度上提升了脉冲电源的峰值电压、极限工作频率、升压时间等参数,在很大程度上推动了脉冲放电等离子体的研究进展^[14]。但目前研制的脉冲电源大多数是单极性脉冲电源,只能输出单极性电压脉冲。在单极性重复电压脉冲作用下,由于存在残余电荷和亚稳态粒子,高重频放电的击穿电压降低,脉冲注入能量变小,存在记忆效应^[15]。也有研究发现,表面介质阻挡放电中残余电荷致使先前放电对随后放电的发展起到一定的抑制作用^[16]。若两个相邻脉冲的极性相反,则带电粒子在两脉冲的作用下运动方向相反,先前放电对随后放电的抑制作用变小。相比于单极性重复脉冲放电,双极性脉冲放电受限于电源极性^[17],对于其放电机理、放电现象的探索相对较少。综上所述,双极性脉冲放电对于研究纳秒脉冲放电机理和推进纳秒脉冲放电等离子体的大规模应用有着十分积极意义^[18],有必要开展双极性纳秒脉冲放电产生等离子体的研究。

本工作研制了能实现双极性输出的电源,开展了双极性放电实验研究。基于全固态开关和磁压缩技术,设计制作了不同参数的紧凑型双极性纳秒脉冲电源,其中一种爆发模式下脉冲重复频率可达 500 kHz,电压幅值 10 kV,上升沿(20%~80%)约为 50 ns,脉宽(半高全宽)约为 104 ns;另一种电源脉冲重复频率 200 kHz,电压幅值可达 25 kV,上升沿约为 90 ns,脉宽约为 254 ns。并用其开展了表面介质阻挡放电和大面积均匀放电实验,证明了双极性高重频高压脉冲电源在驱动等离子体方面具有优良性能。

1 电路拓扑设计

1.1 电源组成

双极性纳秒脉冲电源采用全固态的大功率绝缘栅双极晶体管(IGBT)和磁压缩技术,总体积较小。图 1 为电源拓扑的整体框图。电源在整体上可以分为 4 部分,分别是直流变换、光电隔离、功率开关、升压及磁压缩。其中,直流输入部分输入直流电压,提供放电功率;交流功率输入部分为散热风扇和控制信号进行供电;门驱动器根据外界输入的控制信号控制变换器中的 IGBT,将直流电压截断成双极性脉冲电压;最后,截断出的电压脉冲经脉冲变压器升压成高压脉冲,再经过磁压缩装置将高压脉冲压缩成高压纳秒脉冲。磁压缩技术利用了磁开关的延迟导通,使得脉冲由上升沿较慢的宽脉冲变成上升沿较陡的窄脉冲。

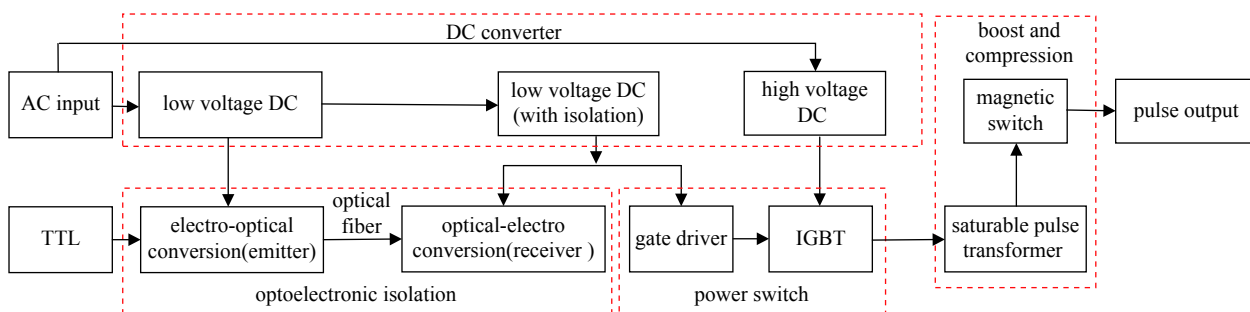


Fig. 1 Overall block diagram of bipolar nanosecond pulse power supply

图 1 双极性纳秒脉冲电源整体框图

如图 1 所示,直流部分可以分为 3 部分,分别是低压直流、隔离低压直流、高压直流。低压直流部分将输入的交流 220 V 转换成 5 V 直流电平,用于给发射光控制信号的发射器供电。隔离低压直流同样可以输出 5 V 电压,不同于普通低压,此处存在高低压隔离,用于为接收光信号的接收器供电。隔离直流低压内部还可以输出 15 V 电压,用于驱动 IGBT。门驱动器用于产生控制 IGBT 的脉冲信号,控制 IGBT 的通断。其主要器件是控制器和驱动器两种,控制器用于接受光电隔离部分输出的光控制信号,然后将此光信号转换成功率较小的电信号。此时的电

信号功率较小,难以连续稳定地驱动 IGBT。因此,还需类似功率放大装置的门驱动器,该门驱动器能产生可以稳定驱动 IGBT 的脉冲。

1.2 脉冲产生

用于脉冲产生的电路原理图如图 2 所示,图中左侧即为采用模块化直流高压源的高压直流输入,图中中间部分是脉冲变换器,它使用 IGBT 组成直流斩波电路,将输入的直流电压截断成两种极性相反且幅值和直流输入电压一致的电压脉冲。升压和磁压缩部分用于将截断出的脉冲通过变压器升压,同时对脉冲进行磁压缩,使其上升沿变陡。为提升变换器性能,选取通断频率较快的全固态开关^[19-20]。4 个 IGBT 中有 2 个同时开通,另外 2 个同时关断。流过后续电路的电流方向会随着 IGBT 通断的变化而反向。当 IGBT₁ 和 IGBT₄ 开通,IGBT₂ 和 IGBT₃ 关断时,流过升压及磁压缩部分的电流和电压方向为正;当 IGBT₂ 和 IGBT₃ 导通,IGBT₁ 和 IGBT₄ 关断时,流入下一部分的电流和电压则反向为负。这样,就能通过控制 4 个 IGBT 的通断,实现电压极性的反转,满足某些对双极性放电的应用需求^[21]。

1.3 升压及磁压缩

图 2 右侧为升压及磁压缩部分,用于将变换器输出的电压脉冲进行升压、压缩上升沿,其主要部件是脉冲变压器、磁开关和 2 个高压电容。

首先将变换器部分输出的电压脉冲经过脉冲变压器进行升压,当变压器饱和后,利用 C_2 和 C_3 构成的独特的拓扑结构进行近似 2 倍的升压,利用变压器饱和之后的较小电感与电容 C_3 组成谐振电路,使得电压上升时间转化为谐振周期的 1/4,脉冲的上升沿缩短到几十 ns 尺度。磁开关用于控制泄放电路的导通时刻以缩短输出脉冲宽度。磁开关 MS_1 和电阻 R_1 组成泄放电路。 MS_1 控制泄放电路的通断。当负载电压处于上升阶段时, MS_1 未饱和,处于关断状态,阻止了能量通过泄放电路耗散。当电压脉冲达到峰值,处于下降沿状态时, MS_1 饱和导通,使能量可以通过泄放电路释放,电压迅速下降,下降沿变陡,减小脉冲宽度,提高重频性能。这样通过磁场储能达成了电压倍增并压缩脉冲上升沿的效果。

由于一个周期内流过脉冲变压器和磁压缩装置的电流会变换方向,故磁心存在一个反向退磁过程。因此,双极性电源的脉冲重复频率相比于单极性电源可以获得大大提升。

2 工作原理

双极性电源工作时,在一个脉冲周期内输出 2 个不同电压极性的脉冲,且不同极性脉冲的输出顺序可以改变。

脉冲的输出可分为电路的充电和放电过程。当输出正极性脉冲时,通过控制信号控制 IGBT₁ 和 IGBT₄ 同时导通,IGBT₂ 和 IGBT₃ 关断。直流输入部分输入的电流依次流过 IGBT₁、变压器一次侧、IGBT₄,通过脉冲变压器升压并将能量耦合到变压器二次侧。充电过程的电流通路如图 3(a) 所示。在变压器二次侧,由于上个脉冲的放电,磁开关 MS_1 处于饱和状态,且泄放电阻阻值较小,故 C_2 上端等效为接地,相当于 C_2 并联 C_3 ,二次侧相当于同时为电容 C_2 和 C_3 充电,两电容的电压同时上升。由于设置的 C_2 和 C_3 容值相同,故两电容的电压上升幅值几乎相同,均上升到变压器的输出电压幅值。电源输出正极性脉冲时,在充电时,变压器二次侧输出负极性脉冲,电容 C_3 电压在 LC 谐振时反转。

图 3(b) 为正极性脉冲放电时的能量流路径。放电时,直流电源为电容 C_1 充电,以保持下次充电时的电压维持稳定。电路放电时,变压器饱和时二次侧只有一个较小的饱和电感,电容 C_3 和二次侧饱和电感构成谐振,使电容电压极性发生反转,即 C_2 和 C_3 的电压同向,相当于两电容串联。输出到负载的电压近似为脉冲变压器 T_1 二次侧输出电压的 2 倍。通过设置磁开关 MS_1 的导通时间,使得 MS_1 在负载电压达到最大值之后导通。磁开关导通之后,输出脉冲的能量可通过电阻 R_1 泄放,使得负载电压迅速下降,脉宽变窄,缩短脉冲间隔,提高重频能力。输出负极性脉冲时的充电能量流路径如图 3(c) 所示。

电源变换器部分通过控制 4 个 IGBT 开通和关断的时序,使流过变压器一次侧电流反向,进而耦合到变压器二次侧电势的方向,以及两电容上电压的极性发生改变,使得输出到负载上的电压发生极性变换。磁开关 MS_1 和变压器 T_1 不同时饱和和导通,依次实现电压的升压、倍增和压缩。

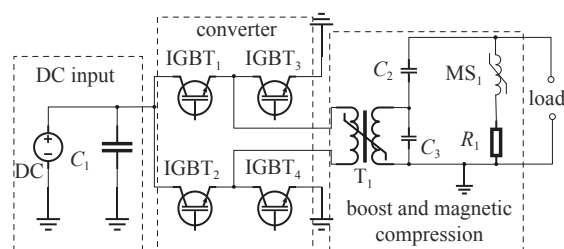


Fig. 2 Schematic diagram of pulse production circuit

图 2 脉冲产生电路原理图

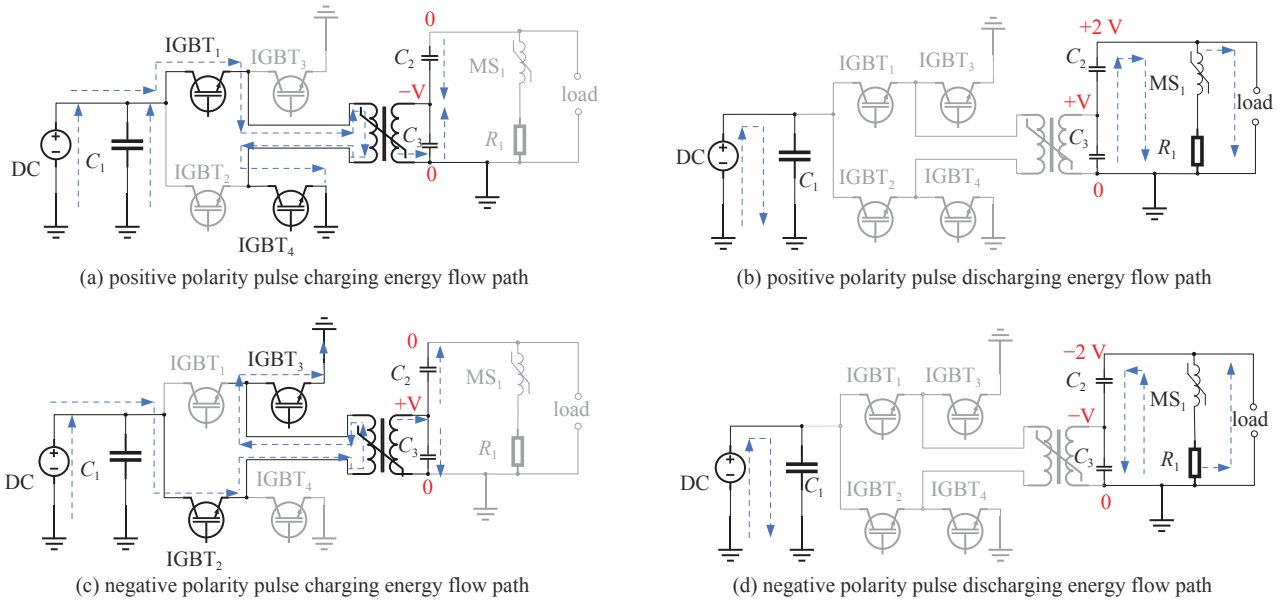


Fig. 3 Energy flow path of pulse charging and discharging

图 3 脉冲充放电能量流路径

电容 C_3 上端电势变化代表了正负脉冲的充放电过程, 图 4 为电容 C_3 上端电势变化的典型波形图。依时间轴从左到右依次经历了输出负脉冲和输出正脉冲时的充、放电 4 个阶段。当输出负脉冲时, 充电阶段的电容 C_3 电压上升到正高压, 变压器在 $2 \mu\text{s}$ 附近饱和, 电容 C_3 电压极性反转, $2 \mu\text{s}$ 以后为负脉冲放电过程。正脉冲输出时的充放电过程电压极性正好相反。

由图 4 可知, 电容 C_3 的电压在 $2 \mu\text{s}$ 以前从地电位上升到正高压的上升沿较慢, 对应 T_1 进行磁压缩之前的电压波形; 而在 $2 \mu\text{s}$ 附近过零再上升到负高压的负脉冲对应磁压缩之后的电压波形。可以明显看出, 电压波形在压缩前后发生了明显的变化, 脉宽变窄、上升沿变陡。

3 双极性脉冲电源研制

3.1 器件选型与电源组装

器件选型和优化主要包括对变压器优化和 IGBT 选型。脉冲变压器是电源内部用于为脉冲升压的装置, 其对于高压脉冲的输出十分重要。脉冲变压器磁心的磁导率应较高, 饱和磁通密度应较大。相对于一般的脉冲变压器, 由于本电源输出双极性脉冲, 磁心可自动复位, 矩形比应接近 1。在磁心内孔和外侧涂覆一层硅胶, 用于提高其绝缘性能。

变压器充电电路的伏秒积应满足^[10, 22]

$$\int_0^t V_2(t) dt = \Delta B N_2 A \quad (1)$$

式中: $V_2(t)$ 是脉冲变压器次级绕组电压; N_2 为脉冲变压器次级绕组匝数; ΔB 是变压器磁心磁感应强度最大增量; A 是磁心截面积。

使用的磁心为环形磁心, 结合安培环路定理, 若通过二次侧绕组的电流为 i_2 , 则磁心截面的平均磁场强度为

$$\bar{H} = \frac{N_2 i_2}{2\pi(d_1 - d_2)} \ln\left(\frac{d_1}{d_2}\right) \quad (2)$$

式中: i_2 为二次侧绕组电流; d_1 是磁心外径; d_2 是磁心内径。

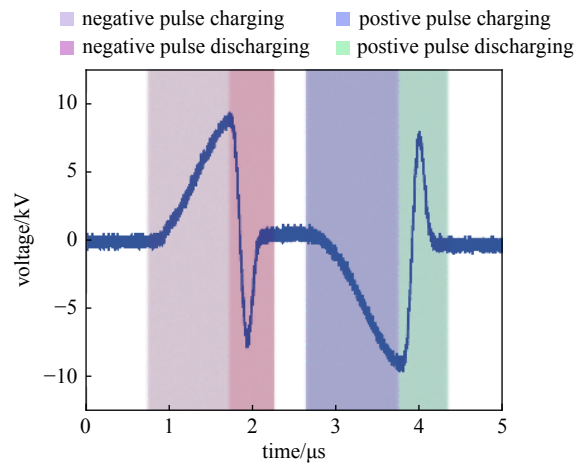


Fig. 4 Voltage waveform of capacitor C_3

图 4 电容 C_3 电压波形

由上式可知,脉冲变压器二次侧绕组匝数及磁心形状会影响磁心内部磁场强度,进而影响二次侧绕组输出电压。故可通过改变二次侧绕组匝数和磁心截面积调节变压器输出电压和升压时间。脉冲变压器饱和时刻即电容 C_3 电压极性变换时刻,使脉冲变压器在二次侧电压最大时饱和。

根据双极性电源对脉冲变压器性能的要求,分别选取了铁基纳米晶和钴基非晶材料。使用钴基非晶作为较高重复频率电源的磁心,使用铁基纳米晶作为较高电压电源的磁心。表1为脉冲变压器和IGBT的选型以及部分关键参数。磁心尺寸参数分别是内径、外径、高。 N_1 代表一次侧匝数, N_2 代表二次侧匝数。初、次级绕组电感和漏感均分别在0.1, 1, 10 kHz下测得。

表1 器件型号与关键参数

Table 1 Tow device models and their key parameters

parameter	value	
	10 kV pulse generator	25 kV pulse generator
magnetic core size/mm	25/40/15	35/60/20
saturation magnetic induction/T	0.54	1.2
square ratio	0.94	0.85
$N_1 : N_2$	2 : 25	2 : 42
inductance of primary winding/ μ H	63/56.9/50.55	67/42.2/35.13
inductance of secondary winding/mH	24.8/9.131/5.421	69.94/28.98/16.94
leakage inductance of primary winding/ μ H	1/0.5/0.49	25/1.3/1.023
leakage inductance of secondary winding/mH	0.851/0.163/0.516	1.65/0.447/0.314
IGBT	IRG60B120KD	2MBI450VH-120-50

Note: inductance values of each parameter are tested under 0.1, 1, 10 kHz.

针对电源频率较高和电压幅值较高两种特点,选取了两种IGBT。分别是芯片式和模块式,两种IGBT的耐压均可达到1200 V。芯片式IGBT用于10 kV电源,其型号为GPS60B-120KD,负载能力相对较弱,连续运行最大电流为105 A,尺寸较小,开关频率较高。模块式IGBT用于25 kV电源,其型号是2MBI450VH-120-50,通流能力较强,连续运行时负载电流最大可达450 A。

图5为两电源实物图,内部均可依次划分为I~IV区域:直流变换、光电变换、变换器和升压及磁压缩部分。系统布局紧凑,同时考虑了电磁兼容、器件散热的要求。

3.2 输出性能测试

对两电源各个环节的电压波形进行了观测。分别测试了电容 C_3 、输出端的电压波形。观察电容 C_3 电压即观察电路拓扑倍压效果,主要观察电容 C_3 上电压是否发生极性变换,以及是否在电压最大值附近发生变化。2台双极性电源在不同输入电压时一个周期内输出的电压波形如图6所示。

在不同输入直流电压时,测试了10 kV电源接表面介质阻挡放电(SBBD)负载的输出电压、电流和功率,结果如图6(a)、图6(b)、图6(c)所示。输入电压越高时,输出电压、电流和功率越高。由于两脉冲间隔较短,记忆效应较强,第二个脉冲击穿电压较小。故正极性脉冲的电流峰值更大,且注入功率较高。图6(a)中正、负脉冲电压幅值最大均为10 kV,两脉冲的间隔时间为2 μ s,图中右上角放大的正极性脉冲图像显示,电压上升沿约为50 ns,脉宽约为104 ns。

25 kV电源测试结果如图6(d)、图6(e)、图6(f)所示。图6(d)是25 kV电源接线板负载时输出的电压波形。其正、负极性脉冲电压幅值最大均为25 kV,脉冲上升沿约为90 ns,半高宽约为254 ns。由于线板间距较大,放电

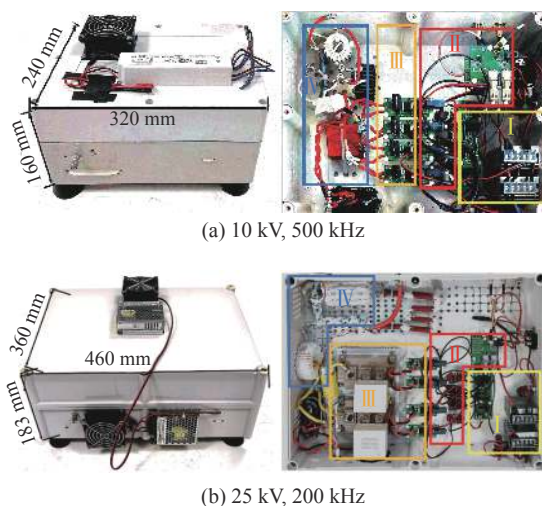


Fig. 5 Pictures of bipolar pulse power supply

图5 双极性脉冲电源实物图

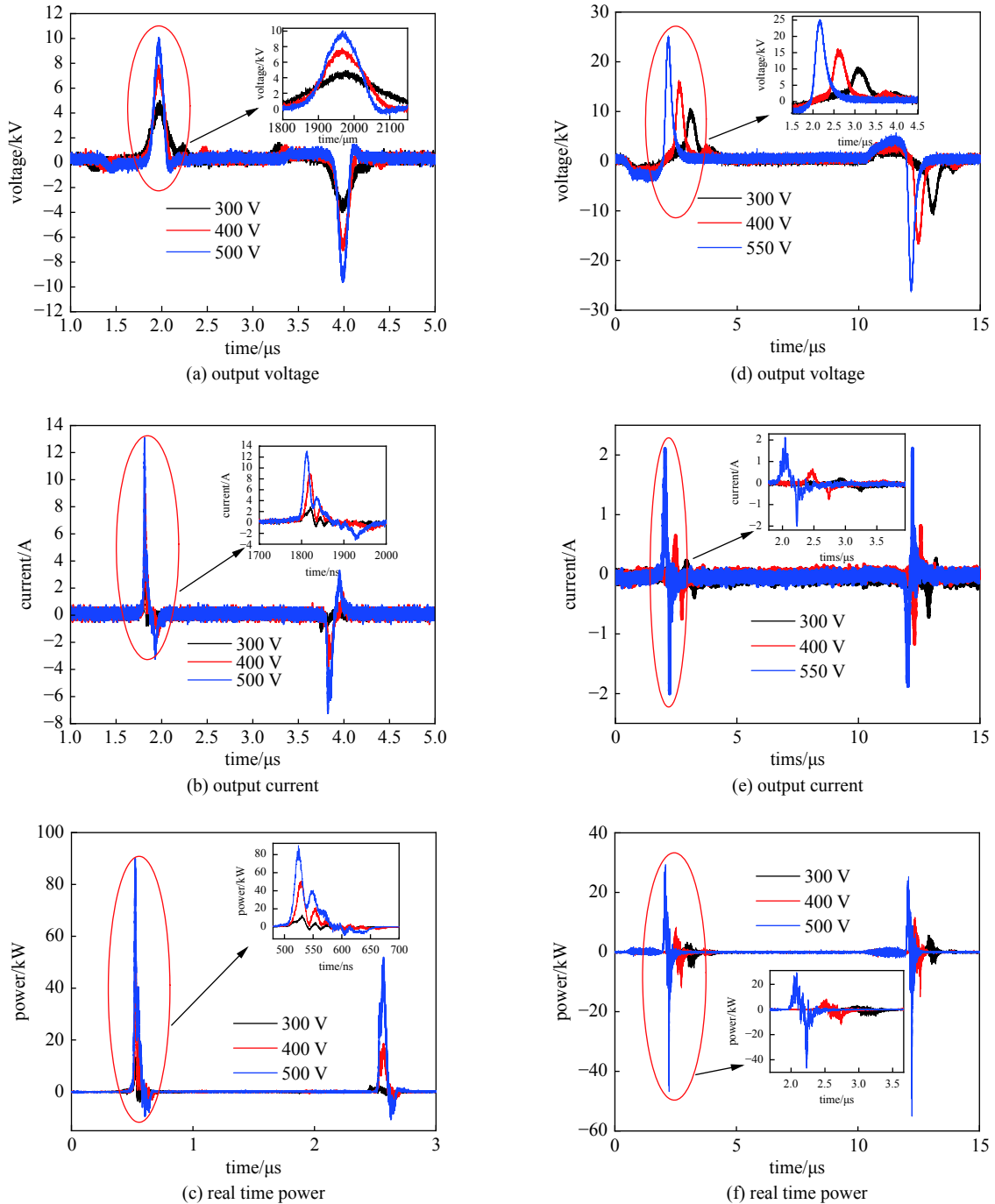


Fig. 6 Output results of two power supplies with different input voltages

图 6 两电源不同输入电压时的输出结果

较弱, 电流较小。由电压波形可知, 电压越高, 导通时间越短。

对 2 台电源分别带 SDBD 负载和线板电极时的重频性能进行了测试, 发现连续运行时 10 kV 电源的重频性能相对较好, 在脉冲重复频率达 1 kHz 时可稳定运行。25 kV 电源重频性能相对较弱, 脉冲重复频率为 600 Hz 时可稳定工作。2 台电源连续运行时的输出波形如图 7 所示。10 kV 电源使用的芯片式 IGBT, 产热较少, 且单脉冲能量较低, 泄放电阻上发热较小; 25 kV 电源使用模块式 IGBT, 发热相对严重, 且单脉冲能量较高, 泄放电阻发热相对严重。

为进一步了解电源的综合性能, 测试了电源在爆发模式下分别带 SDBD 负载和线板电极时的性能, 图 8 为测试结果。发现在爆发模式下 10 kV 电源的脉冲重复频率可达 500 kHz(脉冲间隔最小 2 μ s), 25 kV 电源的脉冲重复频率可达 200 kHz(脉冲间隔最小 5 μ s), 爆发模式下每个脉冲串包含的脉冲个数大于 10 个。

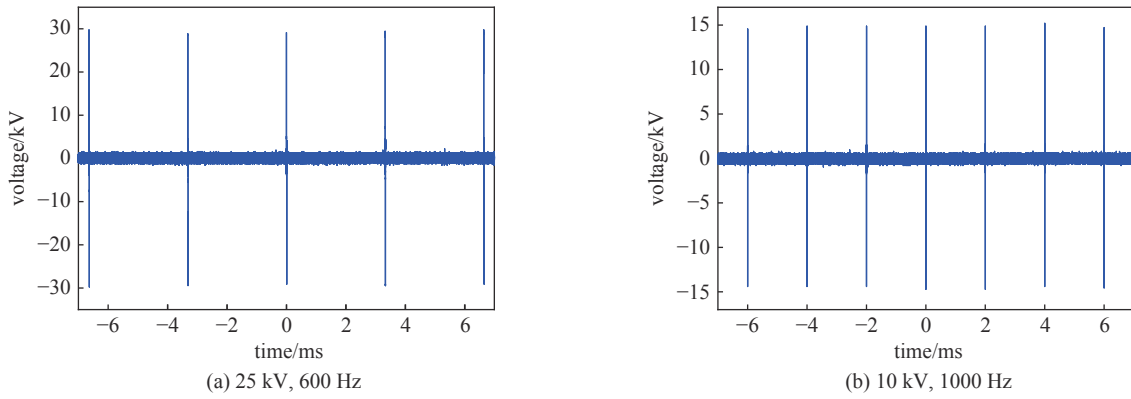


Fig. 7 High frequency working waveforms

图 7 高频工作波形

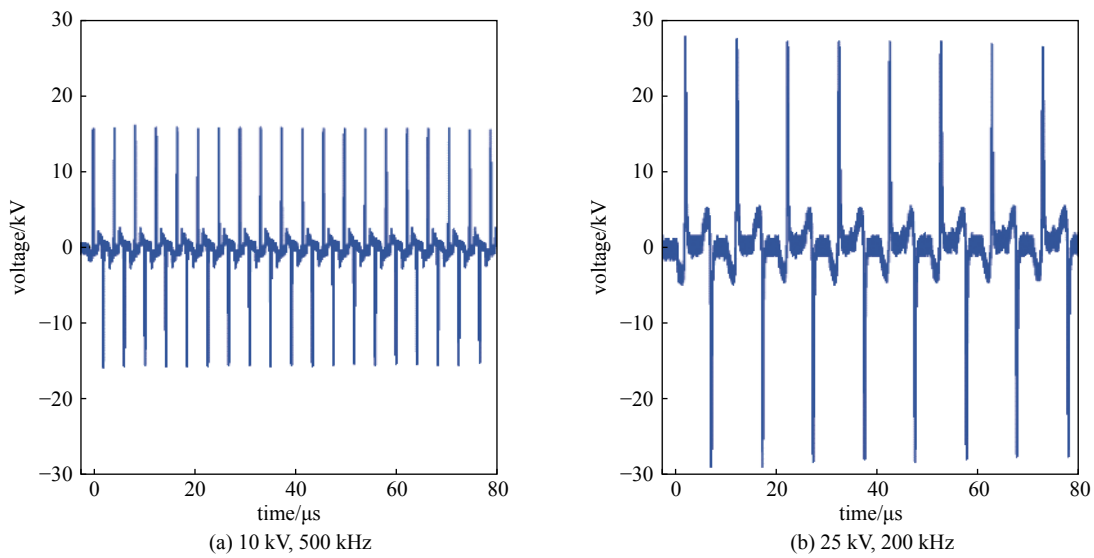


Fig. 8 Burst mode waveforms

图 8 爆发模式波形

3.3 工作稳定性测试

为检测电源的持续工作能力,使用热摄仪从出风口观测了电源稳定工作时的温升情况。最终温度结果如图 9 所示,图 9(a)、图 9(b)为 10 kV 电源温升,图 9(c)、图 9(d)为 25 kV 电源温升。发现 10 kV 电源在连续运行 1 kHz 的情况下,可以持续稳定运行。在电源运行初期,发现其温升较快,观测频率为 0.5 次/min,观测 5 次之后,发现其温升变慢,出风口处最高温度达到了 50.5 °C。然后观测频率为 0.2 次/min,发现稳定工作 30 min 时,最高温度只达到了 44.9 °C,且多次拍摄结果相差不大,均约为 45 °C。说明电源刚开始时温升存在一个较大值,散热平衡后,最高

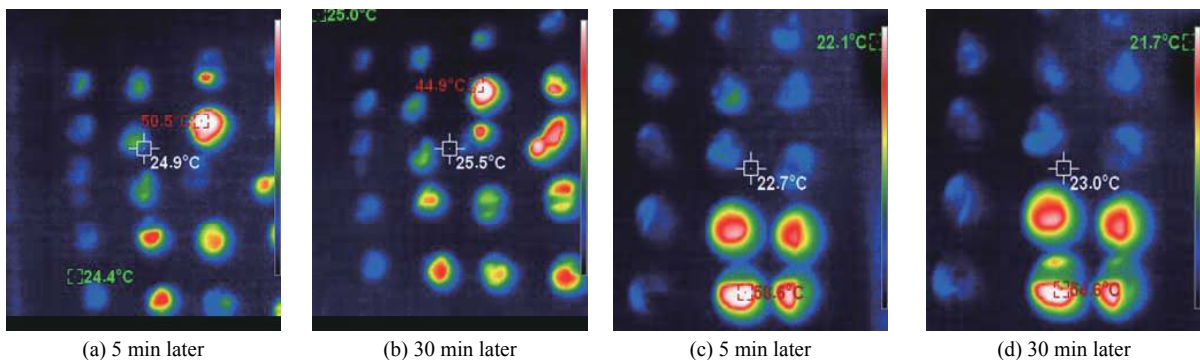


Fig. 9 Temperature rise of two power supplies

图 9 两电源温升情况

温度达到 45 °C 左右的稳定点。25 kV 电源连续工作在 600 Hz 下的温升情况与之类似。5 min 时电源温度最高点达到了 58.6 °C, 0.5 h 之后, 多次测量最高温度均约为 55 °C, 说明电源已经达到热平衡, 可长期稳定运行。

IGBT 在开通和关断时的损耗会导致温升, 有必要对其进行温度监测。使用光纤测温仪对分别运行在 1 kHz 和 600 Hz 时两电源的 IGBT 温度进行监测, 监测结果如图 10 所示。发现在运行初始 6 min 内温升较快, 6 min 后 IGBT 温度趋于稳定。10 kV 电源由于采用芯片式 IGBT, 体积较小, 温升相对较高, 最终稳定在约 30 °C; 25 kV 电源的 IGBT 体积较大, 散热较快, 温升较低, 最终稳定在约 28 °C。

3.4 电源参数比较

目前双极性纳秒脉冲电源研究报道相对较少, 表 2 给出了本研究研制的两种参数的双极性纳秒脉冲电源(表中最后一行)和已有单极性脉冲电源的参数对比。

表 2 与已有电源参数对比

Table 2 Parameter comparison with previous work

technical route	peak-to-peak voltage/kV	pulse repetition frequency/kHz	rise time/ns	pulse width/ns	reference
Marx generator based on solid-state switches	10	0.1	328	3100	[9]
cascaded superposition	20	10	200	5000	[10]
drift step recovery diode	2.2	1000	1	~3	[12]
linear transformer driver	5	3300	30	~100	[13]
magnetic compression	20	500	50	104	this work
	50	200	90	254	

文献 [13] 中电源爆发模式下脉冲重复频率可达 3.3 MHz, 但高频工作时电压幅值只有 5 kV。文献 [12] 中研制电源的脉冲重复频率可达 1 MHz, 电压上升时间很短, 但其电压幅值同样较小。文献 [9] 和 [10] 中电源的电压幅值相对较高, 而其脉冲重复频率却较低。与表中所列的单极性脉冲源相比, 本文研制的两种参数的纳秒脉冲电源的电压幅值最高, 脉冲重复频率相对较高, 电压上升时间和半高宽适中, 综合性能更好。

4 双极性脉冲电源应用

4.1 双极性纳秒脉冲放电实验

为进一步验证双极性电源的实用性, 进行了放电产生大气压等离子体的测试。首先, 使用一个 SDBD 装置作为 10 kV 双极性电源负载, 电源工作在爆发模式下, 每次输出 50 个脉冲, 脉冲重复频率为 500 kHz, 输出电压幅值为 10 kV。每个放电周期内, 先输出正脉冲, 再输出负脉冲。放电时现象十分强烈, 产生了较大面积的等离子体。图 11 为 SDBD 电极及放电图片, 图 12 为接 SDBD 负载时的电压电流波形。

采用钨丝阵列放电负载测试了 25 kV 电源的重频工作能力。如图 13 所示, 负载高压电极由 6 根直径 20 μm 、长 210 mm 的钨丝阵列组成, 铝板作为地电极。高压电极和地电极间距 60 mm, 钨丝间距 32 mm。600 Hz 连续模式下, 产生了较大面积且较弥散的放电等离子体。

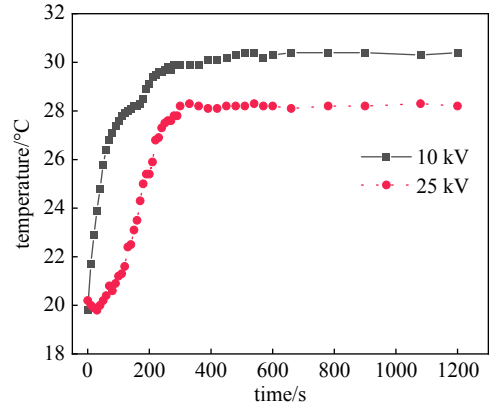


Fig. 10 Operating temperature of two power supply IGBTs

图 10 两电源 IGBT 运行温度

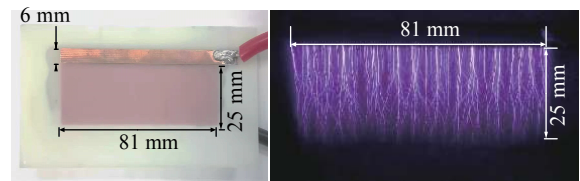


Fig. 11 10 kV power supply produces discharge plasma

图 11 10 kV 电源产生放电等离子体

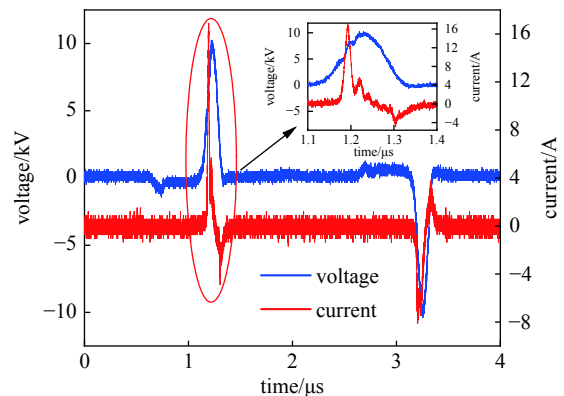


Fig. 12 Output voltage and current waveform of 10 kV power supply with load

图 12 10 kV 电源带 SDBD 负载时输出电压电流波形

4.2 双极性放电等离子体特性分析

单极性脉冲驱动介质阻挡放电时存在电荷累积效应,即先前脉冲放电留下的残余电荷会累积在电介质上。累积的电荷会削弱下一个同极性脉冲产生的电场强度,即不利于放电的发生。而对于双极性脉冲放电,相邻2个电脉冲的极性相反,先前放电的残余电荷会增强下一个脉冲放电时的电场,有利于放电能量注入,促进等离子体的产生。

使用SDBD进行放电时,正面6 mm宽的铜箔为高场强电极,背面25 mm宽的铜箔为地电极。放电时产生的等离子体几乎覆盖了整个地电极。表3为和其他研究工作中产生的SDBD尺寸对比。

表3 放电参数对比(SDBD)

Table 3 Comparison of discharge parameters (Surface Dielectric Barrier Discharge, SDBD)

power source	peak-to-peak voltage/kV	discharge area	references
2 kHz AC	11.9	30.4 mm×10 mm	[23]
35~55 kHz AC	12~21	50 mm×15 mm	[24]
positive pulse	20	70 mm×19 mm	[25]
bipolar pulse	20	81 mm×25 mm	this work

在相同电压幅值的情况下,相比于高频交流源^[23-24](见表4),正极性脉冲驱动^[25]的三电极SDBD放电面积更大,而双极性脉冲电源则将SDBD面积进一步扩大,具有更加显著的应用优势。

表4 放电参数对比

Table 4 Comparison of discharge parameters

power source	electrode geometry	voltage/kV	distance/mm	references
DC power	wire-to-plate	30	20	[26]
DC power	wire-to-plate	22	50	[27]
DC power	wire-to-plate	18	20	[28]
positive pulse	tube-to-plate	31	30	[29]
positive pulse	pin-to-pin	17.5	10	[30]
negative pulse	pin/tube-to-plate	100	40	[31]
bipolar pulse	wire-to-plate	25	60	this work

线板间距是线板放电的重要参数,线板间距越大,等离子体的区域就越大。文献中大多数采用直流电源驱动线板放电^[26-28]产生等离子体,最大线板间距分别是20 mm和50 mm。也有文献使用纳秒脉冲电源驱动针针、针板或管板电极产生弥散放电^[29-31]。本研究中线板间距为60 mm,大于参考文献中直流源和脉冲源驱动放电的线板间距。证明本文研制的电源在等离子体产生领域有着十分明显的优势。

综上所述,相比于其他电源,本研究研制的双极性脉冲电源在驱动SDBD和线板放电方面有一定优势,易产生大尺寸的等离子体,在材料表面改性、物表消毒、电除尘等方面有着较为广阔的应用前景。

5 结论

基于固态开关和磁压缩技术,通过参数优化和器件选型,设计研制了2台不同参数的双极性纳秒脉冲电源。电源的基本原理是通过控制固态开关通断顺序改变输出电压极性,采用可饱和脉冲变压器和磁开关拓扑,实现升压、倍压,并陡化脉冲上升沿和压缩脉冲宽度。2台电源在电压幅值和脉冲重复频率方面各有优势,可分别适用于不同场合:一台电源电压10 kV,爆发模式下脉冲重复频率可达500 kHz;另一台电源电压幅值较高为25 kV,爆发模式下脉冲重复频率最高200 kHz。与文献公布的单极性脉冲源相比,本研究的双极性电源在输出电压幅值、脉冲重复频率等综合性能方面具有较好优势。通过对电源运行时的发热情况进行观测,发现2台电源均可长期稳定运行。实验应用验证了2台双极性电源均能用于产生较大规模的等离子体。由于IGBT容量、开通速度以及导通电阻的性能限制,脉冲电源的高电压输出和高重复频率运行难以兼得,这也是未来工作的主要方向。

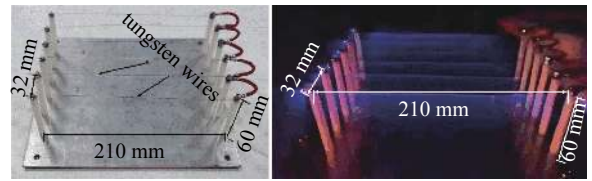


Fig. 13 25 kV power supply produces discharge plasma

图13 25 kV电源产生放电等离子体

参考文献:

- [1] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705. (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705)
- [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] 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)
- [4] Yu Weixin, Kong Fei, Dong Pan, et al. Depositing chromium oxide film on alumina ceramics enhances the surface flashover performance in vacuum via PECVD[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126509.
- [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] Zhang Cheng, Huang Bangdou, Luo Zhenbing, et al. Atmospheric-pressure pulsed plasma actuators for flow control: shock wave and vortex characteristics[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(6): 064001.
- [7] 于维鑫, 朱文超, 程晓, 等. 纳秒脉冲等离子体合成射流激励器的流场特性分析[J]. 气体物理, 2021, 6(2): 38-45. (Yu Weixin, Zhu Wenchao, Cheng Xiao, et al. Analysis of flow field of nanosecond pulsed plasma synthetic jet[J]. Physics of Gases, 2021, 6(2): 38-45)
- [8] 康少芬, 张帅, 陈晓晓, 等. 纳秒脉冲介质阻挡放电等离子体氮还原合成氨的研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 368-375. (Kang Shaofen, Zhang Shuai, Chen Xiaoxiao, et al. Study on reduction of nitrogen to ammonia by nanosecond pulse dielectric barrier discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 368-375)
- [9] 饶俊峰, 李恩成, 王永刚, 等. 自触发驱动的全固态Marx发生器[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33: 025001. (Rao Junfeng, Li Encheng, Wang Yonggang, et al. Self-triggering all-solid-state Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2021, 33: 025001)
- [10] 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)
- [11] 赖雨辰, 谢彦召, 王海洋, 等. 基于DSRD的高重频固态脉冲源的研制[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 105002. (Lai Yuchen, Xie Yanzhao, Wang Haiyang, et al. Development of the high repetitive frequency solid-state pulse generator based on DSRD[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 105002)
- [12] Merensky L M, Kardo-Sysoev A F, Shmilovitz D, et al. Efficiency study of a 2.2 kV, 1 ns, 1 MHz pulsed power generator based on a drift-step-recovery diode[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(11): 3138-3142.
- [13] Jiang Weihua, Sugiyama H, Tokuchi A. Pulsed power generation by solid-state LTD[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2014, 42(11): 3603-3608.
- [14] Huiskamp T. Nanosecond pulsed streamer discharges Part I: Generation, source-plasma interaction and energy-efficiency optimization[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 023002.
- [15] Zhao Zheng, Li Jiangtao. Repeatedly pulsed gas discharges: memory effect and discharge mode transition[J]. *High Voltage*, 2020, 5(5): 569-582.
- [16] Huang Bangdou, Zhang Cheng, Adamovich I, et al. Surface ionization wave propagation in the nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge: the influence of dielectric material and pulse repetition rate[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 044001.
- [17] 李波, 李博婷, 叶超, 等. 双极性脉冲磁控溅射电源设计[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 045004. (Li Bo, Li Boting, Ye Chao, et al. Design of bipolar pulsed magnetron sputtering power supply[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 045004)
- [18] Li Zhang, Yang Dezheng, Wang Wenchun, et al. Atmospheric air diffuse array-needles dielectric barrier discharge excited by positive, negative, and bipolar nanosecond pulses in large electrode gap[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 113301.
- [19] 石小燕, 任先文, 刘平, 等. 基于MOSFET的高重复频率高压脉冲源设计[J]. 强激光与粒子束, 2019, 31: 040022. (Shi Xiaoyan, Ren Xianwen, Liu Ping, et al. Design of high repetition rate and high voltage pulse generator based on metal oxide semiconductor field-effect transistor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019, 31: 040022)
- [20] Yin Tianxiang, Xu Chen, Lin Lei, et al. A SiC MOSFET and Si IGBT hybrid modular multilevel converter with specialized modulation scheme[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 12623-12628.
- [21] Orlacchio R, Carr L, Palego C, et al. High-voltage 10 ns delayed paired or bipolar pulses for in vitro bioelectric experiments[J]. *Bioelectrochemistry*, 2021, 137: 107648.
- [22] Wang Gang, Su Jiancang, Ding Zhenjie, et al. A semiconductor opening switch based generator with pulse repetitive frequency of 4 MHz[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 125102.
- [23] Pescini E, De Giorgi M G, Suma A, et al. Separation control by a microfabricated SDBD plasma actuator for small engine turbine applications: influence of the excitation waveform[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2018, 76: 442-454.
- [24] 魏德宸, 张国鑫, 陈永彬. 气隙构型对高频交流SDBD防除冰激励器的温升影响[J]. 航空学报, 2021, 42: 124195. (Wei Dechen, Zhang Guoxin, Chen Yongbin. Effects of air-gap on the temperature rise characteristics of AC-SDBD actuator anti-icing and deicing actuator under high frequency[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42: 124195)
- [25] Peng Bangfa, Shang Kefeng, Liu Zhengyan, et al. Evolution of three-electrode pulsed surface dielectric barrier discharge: primary streamer, transitional streamer and secondary reverse streamer[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2020, 29: 035018.

- [26] Yao Xiaomei, Peng Bangfa, Jiang Nan, et al. Investigation of toluene removal by DC discharge with MgO/NiO/Ni cathode under different operating parameters[J]. [Journal of Physics D: Applied Physics](#), 2020, 53: 085201.
- [27] Ait Said H, Nouri H, Zebboudj Y. Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostatic precipitator[J]. [Journal of Electrostatics](#), 2015, 73: 19-25.
- [28] Li Ziyi, Liu Yingshu, Xing Yi, et al. Novel wire-on-plate electrostatic precipitator (WOP-EP) for controlling fine particle and nanoparticle pollution[J]. [Environmental Science & Technology](#), 2015, 49(14): 8683-8690.
- [29] Zhang Cheng, Qiu Jintao, Kong Fei, et al. Plasma surface treatment of Cu by nanosecond-pulse diffuse discharges in atmospheric air[J]. [Plasma Science and Technology](#), 2018, 20: 014011.
- [30] Zhang Cheng, Shao Tao, Yan Ping, et al. Nanosecond-pulse gliding discharges between point-to-point electrodes in open air[J]. [Plasma Sources Science and Technology](#), 2014, 23: 035004.
- [31] Shao Tao, Tarasenko V F, Yang Wenjin, et al. Spots on electrodes and images of a gap during pulsed discharges in an inhomogeneous electric field at elevated pressures of air, nitrogen and argon[J]. [Plasma Sources Science and Technology](#), 2014, 23: 054018.