



·脉冲功率技术·

基于谐振电路与脉冲变压器的高压脉冲源设计*

饶俊峰, 汤鹏, 王永刚, 姜松, 李孜

(上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 提出一种基于谐振电路与脉冲变压器结合的高压脉冲实现方案, 该方案利用电容与电感的谐振效应, 结合脉冲变压器的升压作用, 在仅使用一个半导体开关的条件下, 实现高压脉冲的输出, 其结构简单, 成本低, 并且可实现零电压关断。并对于电路的运行模式进行了理论分析, 搭建了原理样机进行实验。容性负载条件下, 实现频率 1~15 kHz、幅值 0~10 kV 可调的高压脉冲输出, 对比分析了续流支路以及续流电阻对于输出高压脉冲波形的影响。利用该脉冲电源进行 DBD 放电实验, 成功驱动介质阻挡放电反应器, 验证了该方案的可行性。

关键词: 谐振电路; 脉冲电源; 脉冲变压器; 介质阻挡放电

中图分类号: TM832

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.210333

Design of high voltage pulse generator based on resonant circuit and pulse transformer

Rao Junfeng, Tang Peng, Wang Yonggang, Jiang Song, Li Zi

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

Abstract: Low temperature plasma excited by dielectric barrier discharges (DBDs) is widely used in medical health, air purification and other fields, and DBDs are commonly driven by high voltage pulse generators. In this paper, a high voltage pulse generator based on the combination of resonant circuit and pulsed transformer is proposed. The circuit uses the resonant effect of capacitor and inductor, combined with boost effect of pulsed transformer, and only one semiconductor switch to output high voltage pulses. The structure is simple, the cost is low, and zero voltage switching (ZVS) can be realized. In this paper, the operation mode of the circuit is analyzed theoretically, and the prototype is built for experiment. Under the condition of capacitive load, high voltage pulses with adjustable frequency of 1–15 kHz and amplitude of 0–10 kV are generated, and the influence of freewheeling branch and freewheeling resistance on the output high-voltage pulse waveform is analyzed. The DBD discharge experiment was carried out by using the pulse generator, and the DBD reactor was successfully driven, which further verified the feasibility of the circuit.

Key words: resonant circuit, pulse generator, pulsed transformer, dielectric barrier discharge

臭氧是一种有刺激性气味的淡蓝色气体, 具有很强的氧化性, 广泛应用于医疗卫生、空气净化、杀菌消毒、饮用水处理等领域^[1-5]。介质阻挡放电(DBD)法是常用的臭氧制备方法, 该方法利用高压电源激励介质阻挡放电装置, 在 DBD 气隙中形成微放电通道, 产生大量活性粒子, 这些活性粒子与氧气发生化学反应生成臭氧^[6-7]。常用介质阻挡放电激励源为正弦交流或者脉冲高压电源, 相对于正弦交流电源而言, 脉冲电源在时间尺度上将能量进行压缩, 具有更快的上升沿和下降沿, 且脉宽、频率等参数都可以连续调节, 其激发的等离子体具有电子密度更高、氧原子产率也更高等优势^[8]。

基于固态开关的 Marx 电路是经典的脉冲发生电路, 其原理是利用多级电容并联充电, 由控制信号控制 MOSFET 或者 IGBT 的开通与关断, 将多个电容串联起来放电, 实现电容电压的叠加从而输出高压脉冲^[9]。然而, Marx 电路

* 收稿日期: 2021-07-30; 修订日期: 2021-11-02

基金项目: 国家重点研发计划数字诊疗专项(2019YFC0119100); 上海市青年科技英才扬帆计划项目(20YF1431100); 上海理工大学-上海交通大学医学院医工交叉重点支持项目(2021005)

联系方式: 饶俊峰, raojunfeng1985@163.com。

通信作者: 王永刚, fduwangy@163.com。

也面临着以下难题:①难以保证驱动信号的同步性,充放电过程不同步,容易导致高压脉冲波形畸变^[10-11];②驱动电路与主电路之间高压隔离困难,技术复杂^[12-14];③高压条件下,电磁干扰(EMI)问题严重,信号和驱动易受干扰,引起开关管误动作,保护电路设计复杂^[15-17];④随着级数的增加,开关管的数量增加,电源成本随之增加。

Marx 结构的脉冲电源相对复杂、隔离驱动技术要求高,而基于谐振电路与脉冲变压器结合的脉冲实现方案,具有电路结构简单、使用电子器件少、电源稳定性高等优势。冯卫强等人利用全桥电路结构设计出一款双极性脉冲电源,并将产生的低温等离子体应用于烟气治理领域^[18]。然而全桥结构需使用四个开关管,相对来说成本高,同时增加了控制时序的复杂度,且全桥结构具有直通风险。You Changqi 等人设计了一台基于半桥结构的高压脉冲电源,该方案利用两个开关管,实现在 500 V 直流输入下,输出幅值 12 kV、频率 15 kHz 单极性高压脉冲^[19],相对于全桥结构,半桥结构使用两个开关管降低了成本,但是直通风险仍然存在。本课题组曾经基于谐振原理,使用一个开关管就实现了频率 10~20 kHz、幅值为 5~10 kV 可调的脉冲电压^[20],该方案将开关器件的使用数目减少到 1 个,结构更为简单,保证电源可靠性的同时进一步降低了硬件成本,但是由于脉冲变压器中残余能量无法及时泄放,导致在不同频率下,负载电压波形畸变严重。

本文在文献 [20] 的基础上,对原有方案进行改进,增添了续流支路,有效解决了变压器中残余能量导致的输出脉冲波形畸变问题。首先,本文分析了该电路拓扑结构的工作原理,搭建了实验样机,容性负载下实现频率 1~15 kHz、幅值 0~10 kV 可调的高压脉冲输出,并且分析了续流支路以及续流电阻对于输出高压脉冲波形的影响,验证了电路的零电压关断过程。最后将该脉冲电源驱动介质阻挡放电反应器,并对改进前后的电路的放电效果进行了比较。

1 电路原理分析

本部分内容主要介绍所设计电路的工作原理。图 1 为改进后的基于谐振电路与脉冲变压器的脉冲电源原理图,它主要由直流电压源 V_{dc} , 功率开关 Q 及其反并联二极管 D , 谐振电容 C_r , 谐振电感 L_r , 以及二极管 D_p 和电阻 R_p 组成的续流支路, 升压脉冲变压器, 输出端负载等效电容 C_{out} 及其并联电阻 R_{out} 构成, $L_{leakage}$ 为变压器漏感, L_m 为变压器励磁电感, 变压器变比为 1:n。

该电路的工作过程可分为三个阶段。下面将结合图 2 所示的该脉冲电源工作过程中的相关理论波形展开讨论, 图中: $t_0 \sim t_1$ 表示电路工作过程的第一阶段, $t_1 \sim t_2$ 表示电路工作过程的第二阶段, $t_2 \sim t_3$ 表示电路工作过程的第三阶段; V_{ge} 表示功率开关 Q 的控制信号, I_r 表示流过谐振电感的电流, V_{cr} 表示谐振电容两端的电压, I_p 表示流入变压器的原边电流, V_o 表示输出脉冲电压。

1.1 第一阶段 ($t_0 \sim t_1$)

第一阶段电路工作状态如图 3 所示。 t_0 时刻开关 Q 闭合, 阶段 1 开始。直流电压源 V_{dc} , 谐振电感 L_r , 谐振电容 C_r , 功率开关 Q 构成谐振回路。由于谐振效应, 电流 I_r 从零开始按正弦规律变化, 谐振电容 C_r 被充电, 其两端电压 V_{cr} 开始上升, 参考极性图中已标注。谐振电容电压的极性是上正下负, 二极管 D_p 承受反向电压处于截止状态, 没有电流流入 R_p 与 D_p 构成的续流支路。流入变压器的原边电流 I_p 等于谐振电流 I_r 与谐振电容电流之差, 其作用是将变压器原边电压 V_{cr} 升高并传递到副边。变压器励磁电感 L_m 与原边负载等效电容 $n^2 C_{out}$ 为并联关系, I_p 流经变压器漏感 $L_{leakage}$ 后, 一部分流入 L_m 的励磁支路, 一部分流入 $n^2 C_{out}$ 负载支路, 因此 I_p 主要由这两个支路的电流叠加。 t_1 时刻谐振电流 I_r 第一次

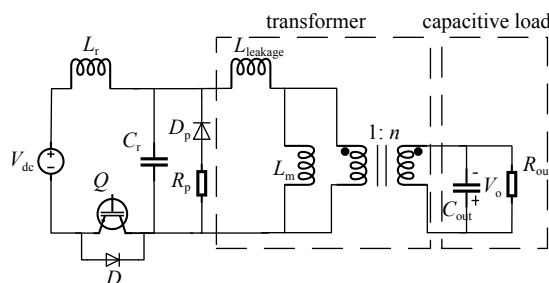


Fig. 1 Schematic diagram of high-voltage pulse source

图 1 高压脉冲电源原理图

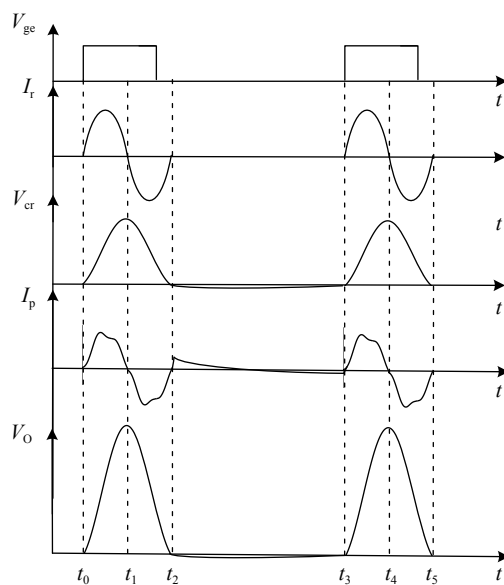


Fig. 2 Theoretical waveforms of V_{ge} , I_r , V_{cr} , I_p , V_o

图 2 V_{ge} , I_r , V_{cr} , I_p , V_o 理论波形图

过零, 谐振电容电压上升到最大值, 第一阶段结束, 输出脉冲的上升段形成。

1.2 第二阶段 ($t_1 \sim t_2$)

第二阶段电路工作状态如图4所示, t_1 时刻第二阶段开始, 谐振电流 I_r 反向过零, 通过功率开关 Q 的反并联二极管 D 续流, 其仍然按正弦规律变化, 谐振电容电压 V_{cr} 开始下降, 同时变压器原边电流 I_p 反向。 t_2 时刻, 反向的谐振电流 I_r 第二次过零时, 第二阶段结束, 输出高压脉冲的下降部分形成。在第二阶段($t_1 \sim t_2$)的任何时刻内, 给开关 Q 关断信号, 可实现零电压关断(ZVS), 另外开关 Q 的关断信号不能超过 t_2 时刻, 否则将引起输出脉冲的波形振荡。类似于第一阶段, 由于谐振电容 C_r 电压极性不变, 二极管 D_p 仍然被反向截止, 没有电流流入 R_p 与 D_p 构成的续流支路。

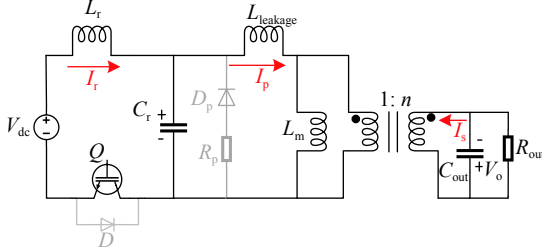


Fig. 3 Schematic diagram of the first stage

图3 第一阶段原理图

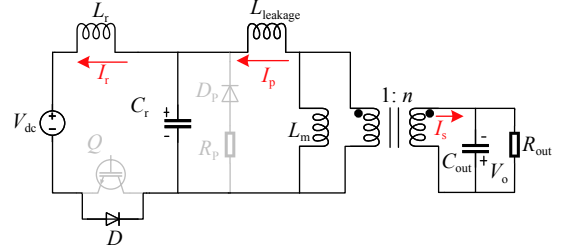


Fig. 4 Schematic diagram of the second stage

图4 第二阶段原理图

综合前两个阶段, 高压脉冲形成, 谐振频率

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_r C_r}} \quad (1)$$

第一阶段和第二阶段的持续时间决定了输出高压脉冲底部宽度, 记为 t_p 。其中, 脉宽 t_p 定义为

$$t_p = \frac{1}{f_r} = 2\pi \sqrt{L_r C_r} \quad (2)$$

1.3 第三阶段 ($t_2 \sim t_3$)

t_2 时刻, 输出高压脉冲已经形成, 第三阶段随即开始。该阶段主要作用是将变压器中残余能量通过续流电阻 R_p 进行泄放, 抑制副边电压 V_o 在该阶段的振荡。如图5所示, I_p 正向时, 电流主要流经电阻 R_p 与二极管 D_p 构成的续流支路, 电阻电压记为 U_R , 参考方向如图所示, 忽略二极管 D_p 压降, 谐振电容电压 V_{cr} 等于负 U_R , 因此该阶段输出电压 V_o 方向为负。

该阶段, 若无二极管 D_p 与电阻 R_p 构成的续流支路, 谐振电容 C_r 与变压器原边漏感 $L_{leakage}$ 和励磁电感 L_m 的谐振效应会使输出波形产生振荡, 通常, 变压器原边漏感 $L_{leakage}$ 远远小于励磁电感 L_m , 根据公式(1)可知, 由变压器漏感 $L_{leakage}$ 引起的谐振频率 f_l 远远大于由变压器励磁电感 L_m 引起的谐振频率 f_m , 在无续流支路条件下, 输出 V_o 的振荡波形由这两个频率共同决定, 添加续流支路并选择合适的电阻 R_p 对于该阶段 V_o 波形稳定有重要作用。当选取较大阻值的 R_p , 能够有效限制变压器原边电流 I_p , 但能量泄放速度慢, 变压器原边漏感 $L_{leakage}$ 和励磁电感 L_m 与谐振电容 C_r 发生能量交换, 因此 V_o 波形在该阶段持续振荡。当 R_p 选取较小时, 有利于变压器能量快速泄放, 加快续流过程, 能够有效抑制振荡。但另一方面较小的 R_p 会使变压器原边电流 I_p 较大, 这对于续流支路的二极管耐力提出考验。因此, 添加该二极管 D_p 与电阻 R_p 的续流支路, 并且选取合适的电阻 R_p 是极其重要的。

2 实验验证

为了验证理论分析的正确性, 搭建了原理样机进行实验。实验中采用的功率开关 Q 型号为 IGW60T120, 并联二极管 D 型号为 RHRG30120, 续流二极管 D_p 型号为 DSEP30-12A。铁氧体材料具有高电阻率、低损耗的特点, 在高频磁性元件中应用广泛, 因此脉冲变压器磁芯材料采用铁氧体、型号为 UY30。原边线圈采用线径 $0.1 \text{ mm} \times 80$ 的多股利兹线, 匝数为 12 匝, 绕线方式为单层密绕; 变压器副边线圈采用线径 0.4 mm 漆包线, 匝数为 800 匝, 绕线方

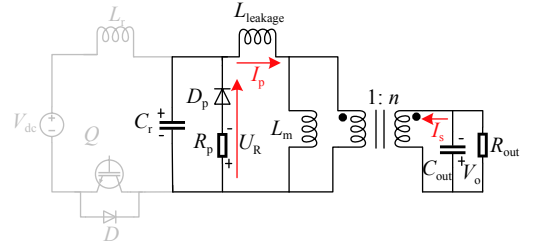


Fig. 5 Schematic diagram of the third stage

图5 第三阶段原理图

式为分层分段式绕法,该绕法的作用是减小高频漏感和降低分布电容。同时,原副边线圈绕在同一磁芯柱上,目的是提高耦合系数、减小漏感^[21]。谐振电感磁芯为中心柱为圆柱形 E 型 ETD 铁氧体,型号为 ETD59/62/21。实验相关参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

V_{dc}/V	$L_r/\mu H$	C_r/nF	$L_{leakage}/\mu H$	L_m/mH	R_p/Ω	transformer turn ratio	C_{out}/pF
70	36	110	12	2.8	8	12:800	10

图 6 展示了 V_{ge} , I_r , V_{cr} , I_p , V_o 的实验波形。由图可知,输出高压脉冲 V_o 重复频率为 10 kHz、幅值约为 10 kV、脉宽 t_p 约为 14 μs , 根据公式 (2), 计算出理论脉宽 t_p 为 12.5 μs 。谐振电流 I_r 按正弦规律变化, 最大值约为 6 A。谐振电流 I_r 前半周期形成输出脉冲的上升部分(第一阶段), 电流 I_r 后半周期形成输出脉冲的下降部分(第二阶段)。谐振电容电压 V_{cr} 呈现脉冲状, 与输出高压 V_o 波形相似, 最大值约为 130 V, 由于谐振效应相较于直流源输入电压提升明显。变压器原边电流 I_p 在续流开始阶段有振荡现象, 随着续流的进行, 振荡逐渐减弱最终趋于平滑。

图 7 为重复频率 15 kHz 条件下实验结果, 由图可知, 输出脉冲幅值约为 10 kV、脉宽约为 13 μs , 各脉冲波形一致、波形稳定。另外注意到, 当完整的正向脉冲形成后, 紧接着形成一个反向的脉冲状电压, 脉宽约为 10 μs 、幅值约为 4 kV, 该反向电压有利于激发 DBD 的二次放电, 提高放电效率^[22]。

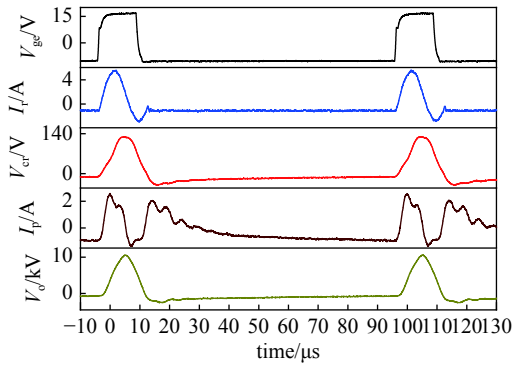


Fig. 6 Experimental waveforms of V_{ge} , V_{ce} , U_R , I_r , V_o

图 6 V_{ge} , V_{ce} , U_R , I_r , V_o 实验波形图

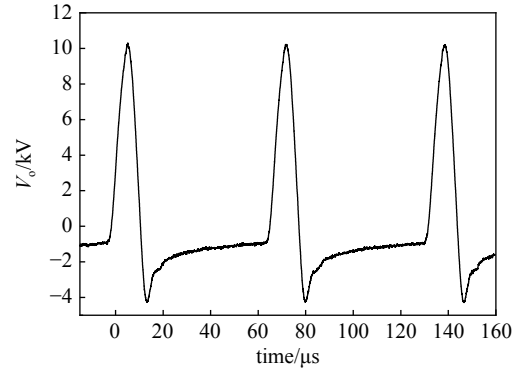


Fig. 7 Experimental result with repetition rate of 15 kHz

图 7 重复频率 15 kHz 实验结果

图 8 展示了频率从 1~15 kHz 调节范围内, 有无续流支路的输出高压脉冲波形对比, 调节方式是由 FPGA 控制板提供频率可调的控制信号, 经驱动电路驱动开关管 Q , 从而达到频率调节的目的。从图 8(a) 中可以看出, 当无二极管续流支路时, 输出脉冲 V_o 幅值受到频率影响较大, 不同频率下幅值不同, 波形畸变严重, 特别在 10 kHz 频率下, 输出高压脉冲幅值相对其他频率更低。另外, 输出高压脉冲波形在开关管关断阶段存在持续振荡现象, 表现为

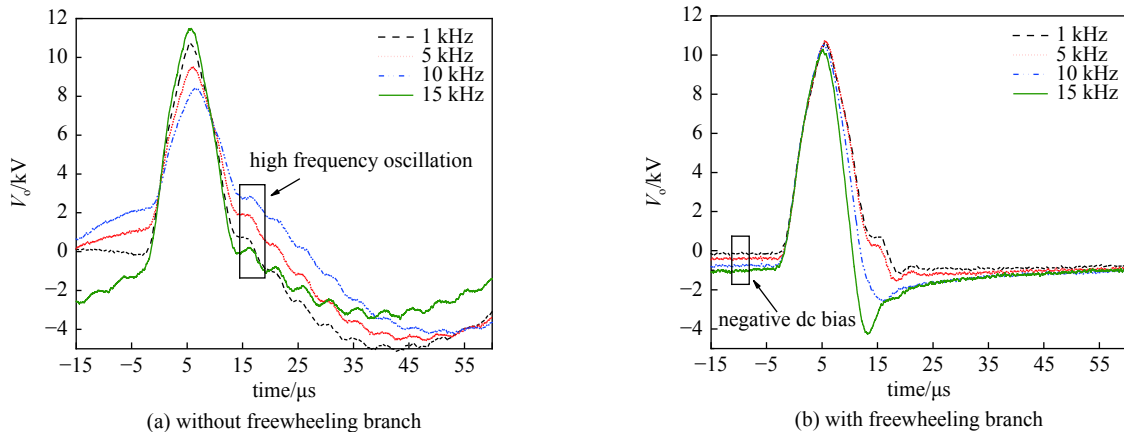


Fig. 8 Influence of freewheeling branch on output high voltage pulse waveform at different frequencies

图 8 不同频率下续流支路对输出高压脉冲波形影响

高频振荡(如图中标注)与低频振荡的叠加。该高频振荡主要是由于变压器漏感 $L_{leakage}$ 与谐振电容 C_r 的谐振引起,持续的低频振荡主要是由于变压器励磁电感 L_m 与谐振电容 C_r 谐振引起。从图 8(b)中可以看出,当加入续流二极管支路时,不同频率下输出高压脉冲幅值和波形基本保持不变,随着频率的上升,脉冲的下降沿逐渐加快,输出脉冲宽度 t_p 减小,另外,脉冲反向电压幅值也随着频率的上升而增大。在开关管关断阶段(即续流阶段),输出 V_o 波形不发生振荡,相较于图 8(a),输出波形明显改善。在图 8(b)的续流阶段,有一个负极性的直流偏置电压,随着频率的上升,负直流偏置电压增大,当频率为 1 kHz 时,偏置电压基本为零,当频率为 15 kHz 时,偏置电压约为 -1 kV。这是由于随着频率的上升,脉冲之间的时间间隔变短,续流过程尚未结束,下一周期的高压脉冲已经到来,因此负直流偏置电压会随着频率的上升而增大。

图 9 为不同续流电阻 R_p 下的变压器原边电流 I_p 与输出电压 V_o 波形,正如第三阶段分析,由图 9(a)可知,随着 R_p 的增大,变压器原边电流 I_p 减小,因此 R_p 的存在能够有效限制变压器原边电流。由图 9(b)可知,当 R_p 较小时,负向的过冲越明显,随着 R_p 的增大,该过冲减弱,但由变压器励磁电感 L_m 引起输出脉冲振荡现象越来越明显。因此,电阻 R_p 的取值非常重要,过大或者过小的续流电阻均不利于输出 V_o 波形的稳定。此外,负向电流的存在有利于磁芯的自复位,因此不需要添加复位电路。

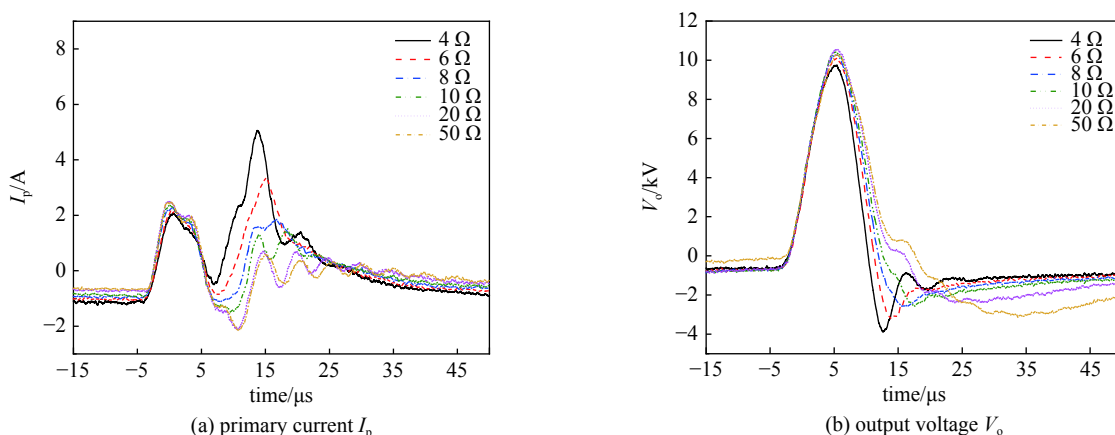


Fig. 9 Primary current I_p and output voltage waveform under different freewheeling resistance R_p

图 9 不同续流电阻 R_p 下的原边电流 I_p 和输出电压 V_o 波形

图 10 展示了开关管 Q 的驱动电压 V_{ge} 、集电极与发射极电压 V_{ce} 、谐振电流 I_r 波形。由结果可知,当谐振电流 I_r 负向时(即第二阶段过程中),谐振电流 I_r 通过 Q 的反并联二极管 D 续流,忽略二极管压降,开关管 Q 两端电压 V_{ce} 为零,该过程中给开关管 Q 关断信号,可实现零电压关断(ZVS),有效降低开关损耗。

3 DBD 放电实验

用该脉冲电源进行 DBD 放电实验,实验装置图如图 11 所示。

DBD 反应器正负电极为圆形平板结构,直径 56 mm。介质材料为有机玻璃,介质厚度 1 mm,空气间隙 1.2 mm,

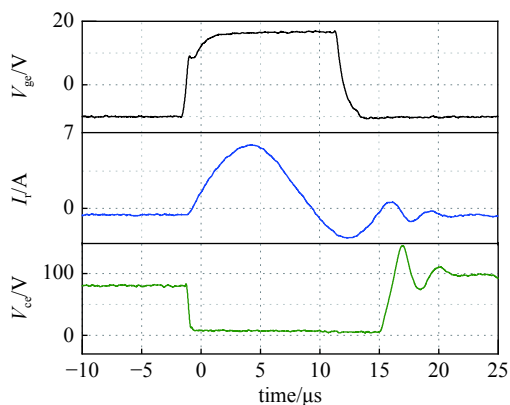


Fig. 10 Verifying ZVS

图 10 验证零电压关断

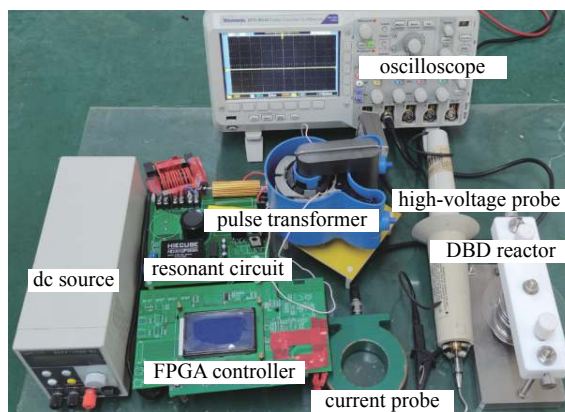


Fig. 11 Experimental device diagram

图 11 实验装置图

反应器等效电容值为 40 pF。图 12 是在开关频率 10 kHz、幅值 10 kV 高压脉冲激励下, DBD 反应器的放电现象图, 从图中可以观察到明显的放电现象。

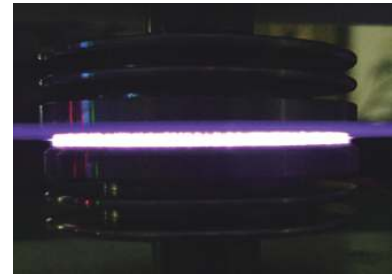


Fig. 12 Dielectric barrier discharge (DBD)

图 12 介质阻挡放电(DBD)

图 13 为相同条件下, 有无续流支路时 DBD 放电的电压电流波形。由图 13(a)可知, 在一个脉冲周期内, 形成两次由大量放电细丝组成的放电电流, 第一次放电主要集中在输出脉冲的上升沿部分, 第二次放电主要集中在脉冲下降沿阶段。放电细丝的形成是由于局部气隙被击穿从而形成大量随机分布的微放电通道, 这些微放电通道的寿命通常是几十 ns。第二次放电的形成主要是由于第一次放电结束后阻挡介质上存在残余电荷, 当脉冲电压下降到足够低时, 依靠阻挡介质上的残余电荷产生的电压, 使气隙反向击穿, 从而形成反向的二次放电电流。对比图 13(a)与(b)可知, 同样 10 kV 高压脉冲激励下, 当存在续流支路时, 脉冲电压波形更加稳定, DBD 放电电流幅值明显高于无续流支路时的放电电流, 特别是在脉冲下降阶段, 存在续流支路时输出高压脉冲具有更快的下降沿, 二次放电的丝状电流更加密集。由 DBD 放电实验结果可知, 续流支路的存在, 不仅改善了输出高压脉冲的波形, 也有利于提高低温等离子体浓度和放电效率。需要指出的是, 续流电阻所消耗的功率会随着频率的上升而增大, 因此该电阻的功率容量也会限制最高工作频率。

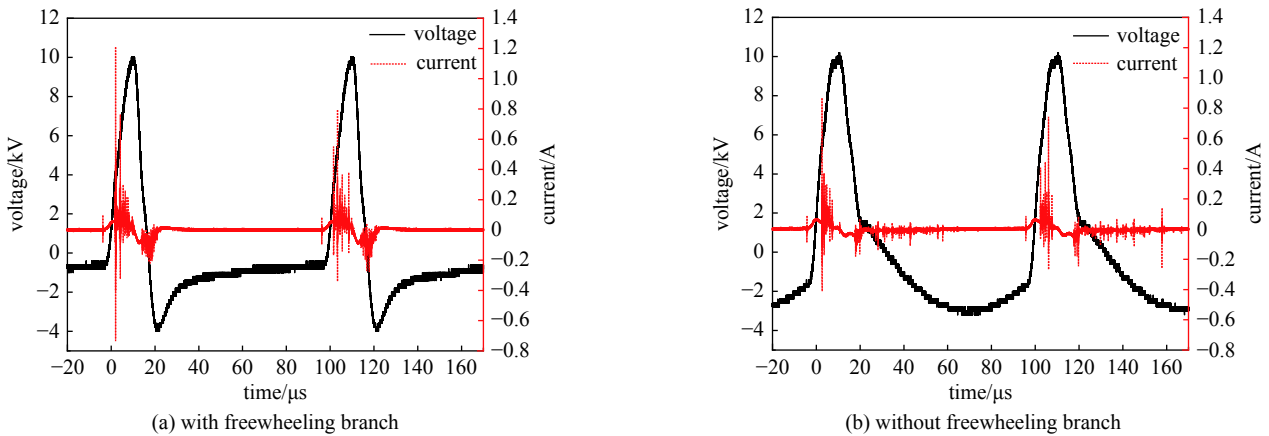


Fig. 13 Voltage and current waveforms of DBD

图 13 DBD 放电电压电流波形

4 结 论

本文提出一种基于谐振电路与脉冲变压器相结合的脉冲实现方案, 对电路的运行模式进行了理论分析, 并搭建了原理样机进行实验。容性负载下, 实现频率 1~15 kHz、幅值 0~10 kV 可调的高压脉冲输出, 并且分析了续流支路对于输出高压脉冲波形的影响, 利用该脉冲发生器驱动介质阻挡放电(DBD)反应器, 取得了明显的放电现象, 输出波形不仅没有明显畸变, 而且幅值也不再随着频率的变化而变化, 说明其工作状态更加稳定。该高压脉冲发生器具有以下优势: 仅使用一个开关管, 电路结构简单, 输出电压稳定, 脉冲前后沿陡峭, 可实现零电压关断, 开关损耗小, 成本低。

参考文献:

- [1] Guven A, Gundogdu G, Vurucu S, et al. Medical ozone therapy reduces oxidative stress and intestinal damage in an experimental model of necrotizing enterocolitis in neonatal rats[J]. *Journal of Pediatric Surgery*, 2009, 44(9): 1730-1735.
- [2] Tepper G, Kessick R, Pestov D. An electrospray-based, ozone-free air purification technology[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 113305.
- [3] Bicknell D, Jain R. Ozone disinfection of drinking water - technology transfer and policy issues[J]. *Environmental Engineering and Policy*, 2001, 3(1): 55-66.
- [4] Johnson C J, Singer P C. Impact of a magnetic ion exchange resin on ozone demand and bromate formation during drinking water treatment[J]. *Water Research*, 2004, 38(17): 3738-3750.
- [5] 李昊, 周律, 李涛, 等. 臭氧氧化法深度处理印染废水生化处理出水[J]. *化工环保*, 2012(1): 30-34. (Li Hao, Zhou Lü, Li Tao, et al. Advanced treatment of bio-treated dyeing wastewater by ozone oxidation process[J]. *Environment Protection of Chemical Industry*, 2012(1): 30-34)
- [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] 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)
- [8] 史曜炜, 周若瑜, 崔行磊, 等. 不同电源激励下共面介质阻挡放电特性实验[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5371-5380. (Shi Yaowei, Zhou Ruoyu, Cui Xinglei, et al. Experimental investigation on characteristics of coplanar dielectric barrier discharge driven by different power supplies[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5371-5380)
- [9] 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)
- [10] Rao Junfeng, Lei Yang, Jiang Song, et al. All solid-state rectangular sub-microsecond pulse generator for water treatment application[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(10): 3359-3363.
- [11] Zhou Ziwei, Zi Li, Rao Junfeng, et al. A high-performance drive circuit for all solid-state Marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(11): 2779-2784.
- [12] Redondo L M, Silva J. Repetitive high-voltage solid-state Marx modulator design for various load conditions[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(8): 1632-1637.
- [13] Rai S, Tandon P, Jangid S, et al. A trigger system with high voltage isolation for multiple switching devices[J]. *International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology (IJE CET)*, 2013, 4(7): 155-162.
- [14] Canacsinh H, Redondo L M, Silva J F. Isolated autonomous capacitive power supplies to trigger floating semiconductors in a Marx generator[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2007.
- [15] Zhao Min, Zhou Xing, Wang Qingguo, et al. Design of miniature dual exponential pulse source using EMC experiment[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 926/930: 407-410.
- [16] 饶俊峰, 曾彤, 李孜, 等. 固态Marx发生器的过流保护研究[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 125001. (Rao Junfeng, Zeng Tong, Li Zi, et al. Study on over-current protection of solid-state Marx generators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 125001)
- [17] Li Zi, Liu Haotian, Rao Junfeng, et al. Gate driving circuit for the all solid-state rectangular Marx generator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(8): 4058-4063.
- [18] 冯卫强. 脉冲臭氧发生器的研制及其在烟气治理中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2017. (Feng Weiqiang. Development of pulse ozone generator and its application in flue gas treatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017)
- [19] You Changqi, Wang Mengqi, Ye J. An isolated high-voltage high-frequency pulsed power converter for non-thermal plasma ozone generation[C]//IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2017.
- [20] 饶俊峰, 吴改生, 王永刚, 等. 采用单开关谐振电路的脉冲电源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 085001. (Rao Junfeng, Wu Gaisheng, Wang Yonggang, et al. Design of pulsed power supply using single switch resonant circuit[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 085001)
- [21] 刘星亮, 邱祁, 王若宇, 等. 基于有限元仿真的高频高压变压器分段绕组漏感设计方法[J]. *高电压技术*, 2020, 46(2): 610-617. (Liu Xingliang, Qiu Qi, Wang Ruoyu, et al. Design method for leakage inductance of high-frequency high-voltage transformer with winding segmented based on finite element simulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(2): 610-617)
- [22] Somekawa T, Shirafuji T, Sakai O, et al. Effects of self-erasing discharges on the uniformity of the dielectric barrier discharge[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2005, 38(12): 1910-1917.