DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.5.297 **中图分类号**：TM910.2 **文献标志码**：A

小型高压交流等离子体电源模块的设计与研究

王伟骞[1,2](中国电源学会学生会员)，李占贤[1,2]
(1.华北理工大学机械工程学院，唐山 063210；2.河北省工业机器人产业技术研究院，唐山 063210)

摘要：空气放电等离子体技术已成为等离子体医学的重要研究方向，通常等离子体放电电源以市电或大型稳压电源作为输入，体积较大，不能满足便携式、可穿戴式、可贴附式等离子体发生装置的应用条件，限制了等离子体技术在生物医学领域方面的实际应用。在此研究背景下，设计并研究了以压电陶瓷变压器为核心的等离子体电源，满足了电源小型、便携的要求。该电源尺寸为50 mm×15mm×8 mm，电源质量为12.1 g，电源驱动电路采用芯片驱动的半桥振荡电路，主电路包括step-up升压电路和Buck降压电路。对电源进行了空载和带载放电测试，结果表明，当给予电源3.7 V的供电输入时，空载放电电压可实现200 V到2.2 kV可调，输出频率为52 kHz(上下浮动1 kHz)，最大输出功率为7 W，功率质量比为580 W/kg，性能优于市面上常见的等离子体电源。经过实验测试，应用该电源可以使SDBD与FE-DBD等离子体发生器放电产生冷等离子体，其小型化与便携性对实现可穿戴、可贴附等离子体发生器的应用具有重要意义。

关键词：等离子体；压电陶瓷变压器；小型化；介质阻挡放电；芯片

Design and Research of Miniaturized High-voltage AC Plasma Power Supply Module

WANG Weiqian[1,2], *Student Member*, *CPSS*, LI Zhanxian[1,2]
(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;
2. Hebei Industrial Robot Industry Technology Research Institute, Tangshan 063210, China)

Abstract: The air discharge plasma technology has become an important research direction of plasma medicine. In general, the plasma discharge power supply takes the mains power or a large-scale regulated power supply as its input. This kind of power supply is too large in size to meet the application conditions of portable, wearable and attachable plasma generators, which limits the practical applications of the plasma technology in biomedical field. Under this research background, a plasma power supply with a piezoelectric ceramic transformer as its core was designed and studied to meet the requirements of miniaturization and portability for power supply. The size of this power supply was 50 mm×15 mm×8 mm, and its weight was 12.1 g. The power drive circuit adopted a chip-driven oscillating half-bridge circuit, and its main circuit included a step-up Boost circuit and a step-down Buck circuit. The results of no-load and on-load discharge tests show that when the power supply was supplied with 3.7 V power input, the no-load discharge voltage can be adjusted from 200 V to 2.2 kV, the output frequency was 52 kHz with fluctuation of 1 kHz, the maximum output power was 7 W, and the power weight ratio was 580 W/kg, which was better than the common plasma power supplies on the market. Through experimental tests, it is found that the application of this power supply can make SDBD and FE-DBD plasma generators discharge to produce cold plasma. Its miniaturization and portability are of significance to the application of wearable and attachable plasma generators.

Keywords: Plasma; piezoelectric ceramic transformer; miniaturization; dielectric barrier discharge; chip

收稿日期：2022-07-22；**修回日期**：2022-08-20，2022-09-02，2022-09-07，2022-09-09，2022-09-14；**录用日期**：2022-09-19；
网络首发日期：2022-12-10

介质阻挡放电 DBD(dielectric barrier discharge)

是空气放电冷等离子体产生的一种方式，冷等离子体中含有丰富的赋能粒子和大量的活性基团[1-2]，其中一氧化氮产物有助于人内皮细胞中血管内皮生长因子血管生成特性的改善[3]，羟基自由基能够破坏 DNA、蛋白质和脂类，从而导致细胞死亡[4]。冷等离子体通过可穿戴、可贴附型的等离子体发生器经介质阻挡放电后可用于野外受伤救护、战时伤口处理等方向[5-8]，冷等离子体在特定的能量密度下可以消灭坏死细胞[9]，加速伤口止血[10]，促进细胞再生[11]。由于发生器穿戴或贴附在人体表皮使用，故亟须设计一款超小型等离子体电源，以达到便携性需求。

随着大气气体放电(等离子体)在各种领域的应用迅速增加，对特定尺寸、安全性和成本限制的放电方法的需求也出现了类似的增长[12]。由长春理工大学李国伟[13]设计的脉冲中频高压驱动电源在 DBD 相对光谱强度为 660 时，放电功率为 2.99 W，相同光谱强度下，由南京苏曼电子有限公司生产的 CTP-2000K 电源[14]放电功率为 4.94 W，但以上电源均以市电作为电源输入，体积较大，便携性与运输性较差；由贾垭楠[15]设计的零电压开关 ZVS(zero voltage switch)单管自激电源体积为 90 mm×67 mm×37 mm，放电时功率密度为 0.36 W/cm^2，由辛纪威[16]设计的 ZVS 双管自激电源体积为 102 mm×57 mm×30 mm，放电时功率密度为 0.58 W/cm^2，但以上电源均以电磁绕线式变压器作为电路的升压元件，具有效率低、体积大、成本高、工作频率范围有限、高电磁干扰等缺点，放电时可能产生磁通线内部放电等现象，导致电源损耗大大增加。相比之下，压电陶瓷变压器使用特殊材料制造，结构小巧，效率高且没有电磁辐射，很好地弥补了电磁绕线式变压器的缺点[17-19]，并且具有优良的便携性能。

因此，本文以压电陶瓷变压器为核心升压元件进行了小型化、便携式空气放电等离子体电源的设计与研究，通过基于 MT3608 芯片的 step-up 升压电路、基于 XL1509-ADJ 芯片的 Buck 降压电路及基于 IR2153 芯片的半桥振荡电路，进行了电源主电路与驱动电路的拓扑设计，并将电源与发生器进行匹配放电，电源要求输出足够的高电压以击穿空气且放电电流足以维持冷等离子体持续激发，输出功率可以支撑较大面积冷等离子体的产生，且电源具有超小型、质量轻等特点。

1 等离子体电源模块主电路的设计

为了满足空气放电电源超小型化、输出电压高、质量轻、输出功率大等特性要求，本设计选用长条多层罗森型压电陶瓷变压器为核心元件，基于电源芯片对升压电路、降压电路、振荡驱动电路进行控制设计，使电源满足压电变压器谐振频率、输入输出电压等要求，可长时间稳定输出目标电压。为使所设计电源模块满足空气放电发生器的放电和工作特性，需对压电变压器阻抗特性、频率升压比特性、输出输入电压特性、负载升压比特性、谐振频率负载特性等进行研究分析来为电源模块的设计提供依据，使电源模块的设计符合压电变压器的各种特性，从而使电源模块的电压、频率、功率、稳定性等参数达到较好的状态，以使电源正常工作及匹配发生器的正常放电功能。

1.1 压电变压器特性研究及主电路结构示意图

图 1 分别展示了压电变压器的频率阻抗特性、频率升压比特性、输入输出电压特性、负载升压比特性和谐振频率负载特性[20]。如图 1(a)所示，压电变压器在正、反谐振点之间的阻抗表现为感性阻抗，在正、反谐振点之外的阻抗表现为容性阻抗。在电源工作时，应尽量让变压器工作在感性状态，同时变压器有很大的输出阻抗，满足高阻抗负载的工作条件。如图 1(b)所示，压电变压器的升压比随着频率由小到大的增加，升压比先逐渐增加，到达最大值后，随着频率的继续增大，变压器的升压比出现下降的趋势，当工作频率接近谐振频率时，升压比呈增大的趋势，当工作频率远离谐振频率时，变压器升压比迅速减小。所以为使电源最大程度地输出高电压，需将工作频率控制在压电变压器谐振频率附近。如图 1(c)所示，当输入电压过大时，输

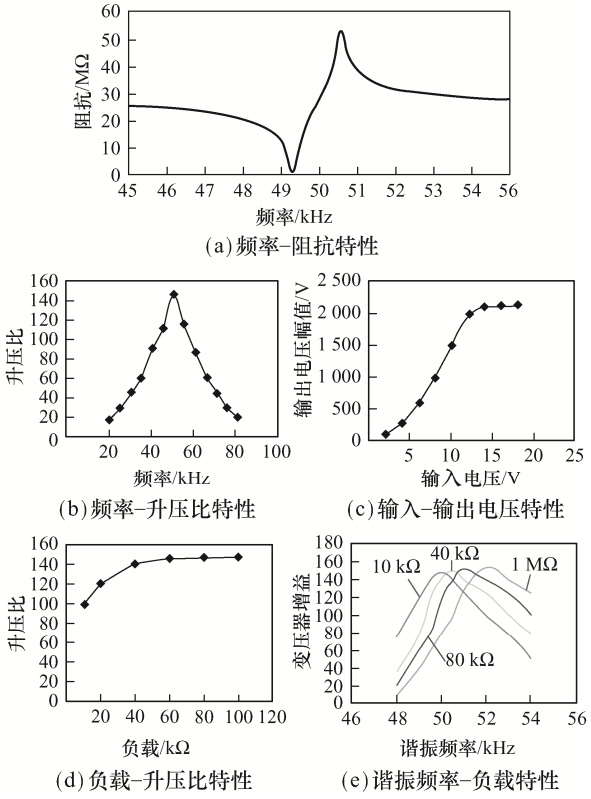


图 1　压电变压器的特性[20]

Fig. 1 Characteristics of piezoelectric transformer[20]

出电压上升趋势较缓，压电变压器在工作时会出现过热断裂造成损坏，故压电变压器的驱动输入电压不宜过大，以免出现过饱和损坏变压器的情况。本设计所选用的变压器驱动输入电压的推荐范围为 7~14 V。如图 1(d)所示，在电源模块工作时，连接较大的负载可使压电变压器获得 1 个较大的升压比。如图 1(e)所示，在压电变压器工作时，其谐振频率会随着负载阻抗的变化而发生改变，当所接负载为 10 kΩ 时，压电变压器的谐振频率在 50 kHz 左右，而当所接负载增加到 1 MΩ 时，压电变压器的谐振频率会增加到 52 kHz。

基于以上特性，设计了以 MPT3307B70 型号压电变压器为核心元件的电源模块，如图 2 所示为电源模块的主电路结构示意。

1.2 基于 MT3608 芯片的升压电路设计

本设计选用 MT3608 芯片进行升压电路的控制设计，MT3608 芯片适用于低功率的应用，允许使用电池为输入电压源，解决了市电输入或大型稳压电源输入造成的体积大、不便携等问题，且 MT3608 内部具备软启动电路，电源通电瞬间产生

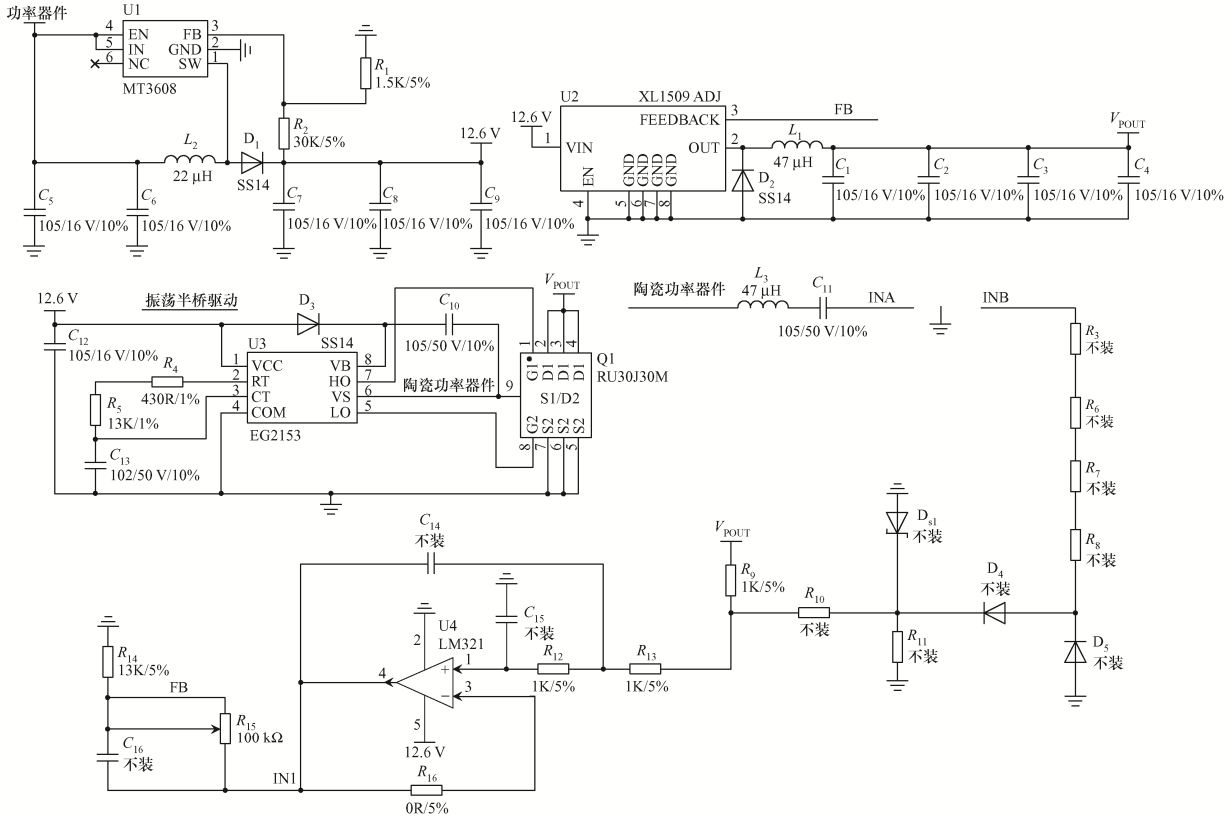


图 2　主电路结构示意

Fig. 2 Schematic of main circuit structure

浪涌电流很小，可以防止电路中的元器件被击穿，增加了电源的安全性。

如图 3 所示为升压电路拓扑结构，升压电路以 MT3608 为核心，实现对输入电压的升压，输出电压为 12.6 V，其中本设计的输入电压范围为 3~9 V。MT3608 芯片是集成控制器和开关管的电源芯片，元器件规格及作用见表 1。R_1 和 R_2 为反馈电阻，用于调节并确定输出电压，内部参考电压 V_{REF}= 0.6 V，输出电压由电阻分压器 R_1 和 R_2 分压至 FB 引脚，输出电压为

$$V_{OUT}=V_{REF}\left(1+\frac{R_1}{R_2}\right) \tag{1}$$

其中 R_1=1.5 kΩ，R_2=30 kΩ，计算得出输出电压为 12.6 V。

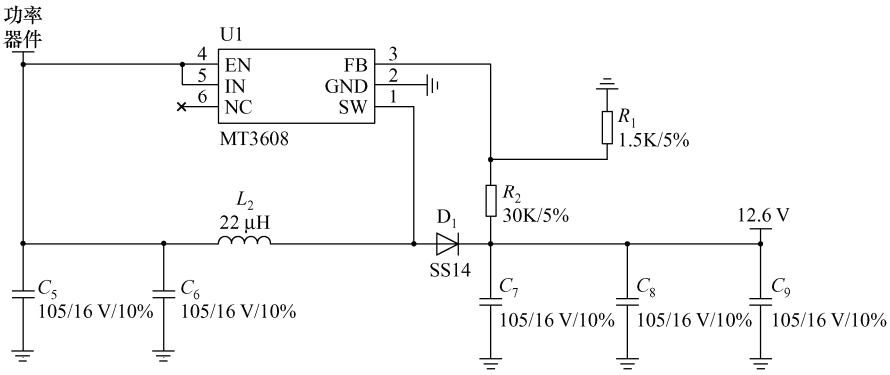


图 3 升压电路拓扑结构

Fig. 3 Topology of step-up circuit

表 1 升压电路元器件规格及作用

Tab. 1 Specifications and functions of components of step-up circuit

元器件	规格	作用
输入电容 C_5、C_6/μF	容值 1，可承受额定电压 16 V	稳定输入电压
升压电感 L_2/μH	22	滤除杂波
输出整流二极管 D_1/A	耐流值 1，反向耐压值 40 V	对输出信号进行整流
输出电容 C_7、C_8、C_9/μF	容值 1，可承受额定电压 16 V	稳定输出电压，减少纹波

1.3 基于 XL1509-ADJ 芯片的降压电路设计

本设计选用 XL1509-ADJ 芯片进行降压电路的控制设计，此芯片需要数量很少的外部元件，为满足电源模块小型化提供了技术支撑，并且通过调节外部分压器的阻值大小可以控制压电陶瓷变压器输入端的电压，使电源模块实现了输出电压可调的功能。

如图 4 所示为降压电路拓扑结构，该电路以 XL1509-ADJ 电源芯片为核心，元器件规格及作用见表 2。

基于以上元器件组成降压型 Buck 电源电路，主要目的是为半桥驱动电路提供直流电压 V_{POUT}，FB 信号为反馈信号，先经过 LM321 组成的电压跟随器，相当于放大倍数为 1 的运放电路，反馈由 V_{POUT} 到达 IN1，然后可通过调节 R_{15} 电位器的阻值调节输出电压，即调节 V_{POUT} 的值，调节电压的输出范围为 1.23~12.60 V。

1.4 基于 IR2153 芯片的振荡半桥驱动电路设计

本设计选用 IR2153 芯片进行振荡半桥驱动电路的控制设计，IR2153 芯片可以将输入的直流信号加以高频振荡转变为压电陶瓷变压器输入端所需的交流信号，且 IR2153 芯片具有很好的噪声抗扰性，大大增加了输出电压的稳定性。振荡半桥电路通过控制增强型场效应管的交替开断来控制电路的工作频率，使工作频率固定在压电陶瓷变压器的谐振频率附近，以使压电陶瓷变压器具有良好的升压比。本设计选用型号为 RU30J30M 的双 N 沟道 MOSFET，此 MOSFET 耐压值为 30 V、耐流值为 30 A，具有切换速度快、低门电荷的特点。

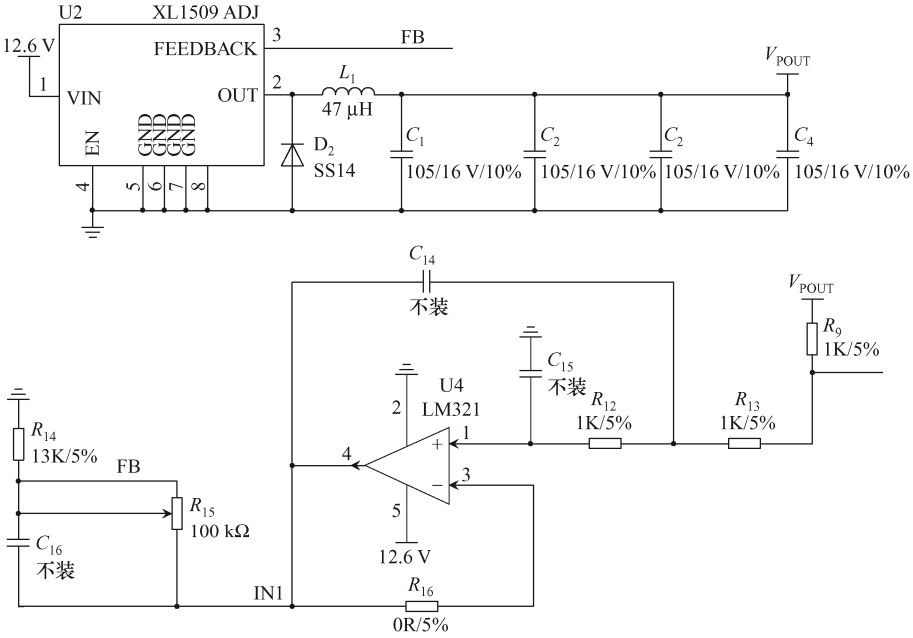


图 4　降压电路拓扑结构

Fig. 4 Topology of step-down circuit

表 2　降压电路元器件规格及作用

Tab. 2 Specifications and functions of components of step-down circuit

元器件	规格	作用
整流二极管 D_2/A	耐流值 1，反向耐压值 40 V	对输出信号进行整流
电感 L_1/μH	47	滤除杂波
输出电容 C_1、C_2、C_3、C_4/μF	容值 1，可承受额定电压 16 V	稳定输出电压
限流电阻 R_9、R_{12}、R_{13}/ kΩ	1	限制电流过大

如图 5 所示为振荡半桥驱动电路拓扑结构，半桥电路采用的是集成 2 个 MOSFET 管的 IR2153 芯片，MOSFET 管的 D1 引脚接直流电源电压 V_{POUT}，S2 接地。半桥的 2 个 MOSFET 管的开通关断通过芯片的 HO 和 LO 引脚进行控制，开关频率采用 RC 振荡产生，频率大小由 R_4、R_5、C_{13} 的数值决定。D_3 和 C_{10} 组成自举电路，该电路的目的是驱动上端的 MOSFET 管，即 G1。从图中可以看出，HO 输出接 G1，驱动上端的 MOSFET，LO 输出接 G2，驱动下端的 MOSFET，2 个 MOSFET 管接替连续开通关断，从而产生正弦交流信号。其中 R_4=430 Ω、R_5=13 kΩ、C_{13}=1 nF，芯片的高压侧驱动信号、低压侧驱动信号的频率由内部的振荡电路频率决定，该频率可以通过外接的 RT 引脚和 CT 引脚间电阻 R_1、CT 引脚和 COM 引脚间的电容 C_1 决定，其关系为

$$f = \frac{1}{1.38(R_1 + 75)C_1} \tag{2}$$

计算得出频率约为 52 kHz。

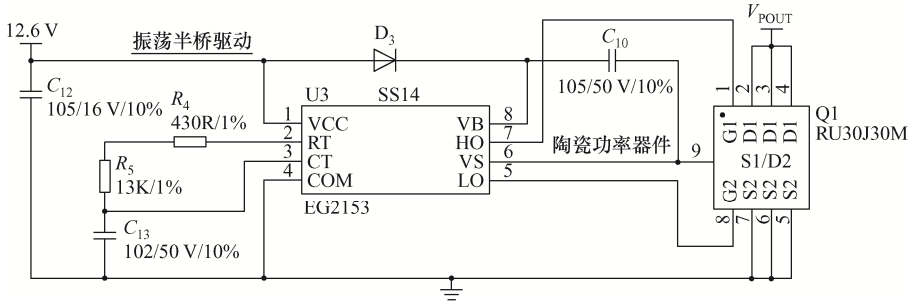
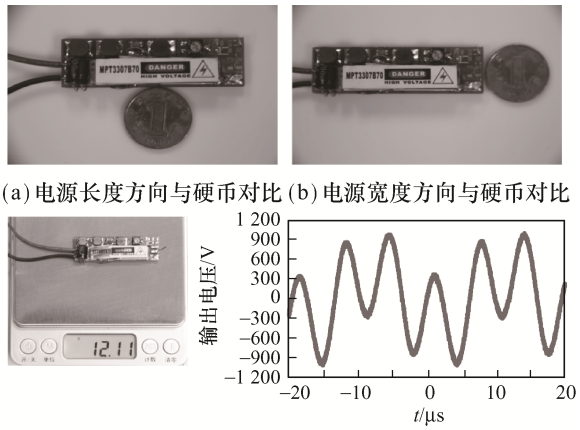


图 5　振荡半桥驱动电路拓扑结构

Fig. 5 Topology of oscillating half-bridge drive circuit

2 等离子体电源模块与发生器实验研究

图 6(a)和 6(b)为本文设计的电源与面值为 1 角的硬币在长宽方向上的对比图，电源体积为 50 mm×15 mm×8 mm。如图 6(c)所示，使用电子秤测量得到电源质量约为 12.1 g。电源最大输出功率为 7 W，功率质量比达到 580 W/kg。基于设计结果，在电池电量充足的情况下，进行电源空载放电电压的测量与稳定性观察，以及电源与基于 PTFE 材料的叠层超薄型沿面型介质阻挡放电 SDBD(surface dielec- tric barrier discharge)和基于 PET 材料的柔性悬浮电极介质阻挡放电 FE-DBD(floating electrode dielec- tric barrier discharge)等离子体发生器匹配放电激发等离子体时的电压电流、功率及光谱的测量。



(a) 电源长度方向与硬币对比 (b) 电源宽度方向与硬币对比

(c) 电源质量 (d) 电源空载放电波形

图 6 电源实物与参数测量

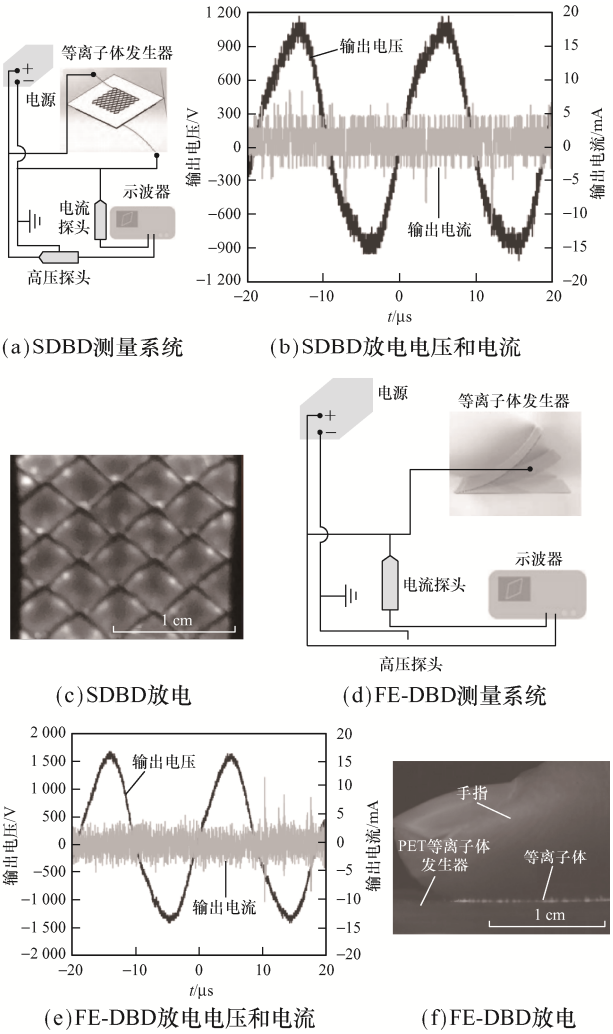
Fig. 6 Specimen of power supply, and measurement of parameters

使用数字示波器(Tektronix DPO4034)和高压探头(Tektronix P6015A)进行电源空载放电电压波形的测量。如图 6(d)所示，电源空载电压峰峰值为 2.14 kV，电压输出波形为高频正弦波。压电变压器在测量空载电压时，电源输出端直接与高压探头连接，由于高压探头接触阻尼的存在，压电变压器内部能量不能得以释放，因此输出电压波形峰值不一致，当压电变压器带载工作时，输出电压波形恢复为标准正弦波形。

2.1 发生器放电电压电流的研究

使用数字示波器(Tektronix DPO4034)、高压探头(Tektronix P6015A)、电流探头(Tektronix TCP0030A)进行基于 PTFE 材料的叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器和基于 PET 材料的柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电电压电流的测量[21]。

图 7(a)为 SDBD 发生器电压电流波形测量系统。图 7(b)为基于 PTFE 材料的叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器放电的电流电压波形，放电时电压波形为正弦波，输出电压峰峰值为 2.08 kV，输出频率为 51.55 kHz，输出电流峰峰值为 7.69 mA。图 7(c)为 SDBD 放电图像，可观察到明亮均匀的等离子体放电模态。图 7(d)为 FE-DBD 发生器电



(a)SDBD测量系统 (b)SDBD放电电压和电流

(c)SDBD放电 (d)FE-DBD测量系统

(e)FE-DBD放电电压和电流 (f)FE-DBD放电

图 7 SDBD 发生器与 FE-DBD 发生器放电及电压电流测量

Fig. 7 Discharge of SDBD and FE-DBD generators, and measurement of voltage and current

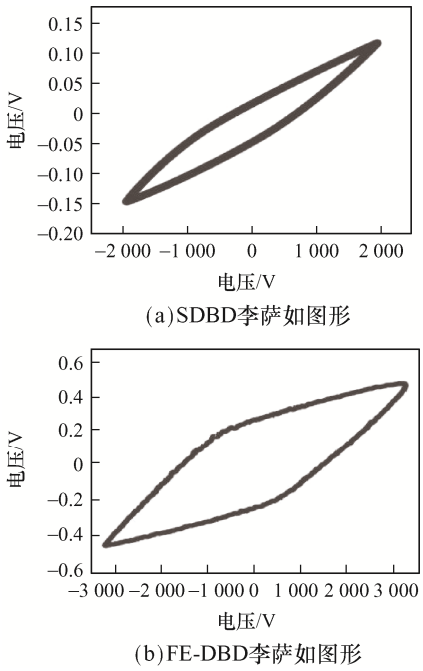
压电流波形测量系统。图 7(e)为基于 PET 材料的柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电的电流电压波形，放电时电压波形为正弦波，输出电压峰峰值为 3.35 kV，输出频率为 51.87 kHz，输出电流的峰峰值为 8.35 mA[21]。图 7(f)为 FE-DBD 放电图像，可观察到人体手指与等离子体发生器间隙内可持续产生明亮均匀的等离子体，且手指无灼热感与刺痛感。压电变压器对接地电极进行类电弧放电时，会超过其本身的功率限制，使输出电压超出电源峰值，并产生热应力[16]，故尽量保持在较短的时间内使用电源进行等离子体放电，并且在实际的放电过程中，因为探头存在接触阻尼，压电变压器自身的振动和放电会受到探头的干扰，所以不能精准地测量出放电电流波形[22]，在发火电压时刻不能观察到非常明显的电流脉冲。实验结果证明，本文设计的电源可以成功匹配 2 种不同发生器进行放电，从人体安全角度考虑，放电电流峰峰值小于 10 mA，低于人体安全电流数值[21]，满足了设计需求。

2.2 发生器放电功率的研究

使用数字示波器(Tektronix DPO4034)、高压探头(Tektronix P6015A)和低压探头通过李萨如图形(Lissajous figure)进行基于 PTFE 材料的叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器和基于 PET 材料的柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电功率的测量[21]。放电时，在发生器接地端串联电容 C_x，容值为 0.33 μF，使用高压探头测量发生器两端电压 U，使用低压探头测量电容两端电压 U_x，调至 X-Y 模式进行测量，得到的闭合曲线即为李萨如图形。基于 PTFE 材料的叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器和基于 PET 材料的柔性 FE-DBD 等离子体发生器的放电李萨如测量图形分别如图 8(a)和 8(b)所示，利用闭合曲线的面积计算出 2 种不同形式发生器的放电功率，其计算公式为

$$P=\frac{1}{T}\int_0^T UI\mathrm{d}t=\frac{C_x}{T}\int_0^T\frac{\mathrm{d}U_x}{\mathrm{d}t}\mathrm{d}t=fC_x\oint U\mathrm{d}U_x \quad (3)$$

式中：f 为电源输出频率；I 为发生器电流；T 为放电周期。



(a)SDBD李萨如图形

(b)FE-DBD李萨如图形

图 8　放电功率测量

Fig. 8 Measurement of discharge power

计算得出图 8(a)的放电功率为 1.8 W，放电面积为 1.5 cm×1.5 cm，功率密度为 0.8 W/cm^2；图 8(b)的放电功率为 4.5 W，放电面积为 2.0 cm×1.5 cm，功率密度为 1.5 W/cm^2。试验结果表明，本文设计的电源满足 2 种不同形式发生器的放电功率需求。

2.3 发生器放电发射光谱的研究

使用 AvaSpec-ULS3648-8-USB2 八通道光纤光谱仪器对基于 PTFE 材料的叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器和基于 PET 材料的柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电时活性粒子的种类和强度进行测量[21]。测量时将测量探头垂直固定在放电区域之上，间距控制在 3 mm，光谱仪测量的发射光谱如图 9(a)和 9(b)所示。

参考 NIST 原子光谱数据库 NIST atomic spectra database lines data 的数据，分析得出等离子体富含大量氮、氧基团，不同波长活性基团的强度各不相同，基团强度越强，所产生的粒子浓度越大，在不同情况下，可以通过调整电源参数、放电间隙大小等来调控不同活性基团的浓度，这些活性基团可用于材料表面改性、生物医学、环境保护等领域，

具有极大的潜力与应用前景[21]。

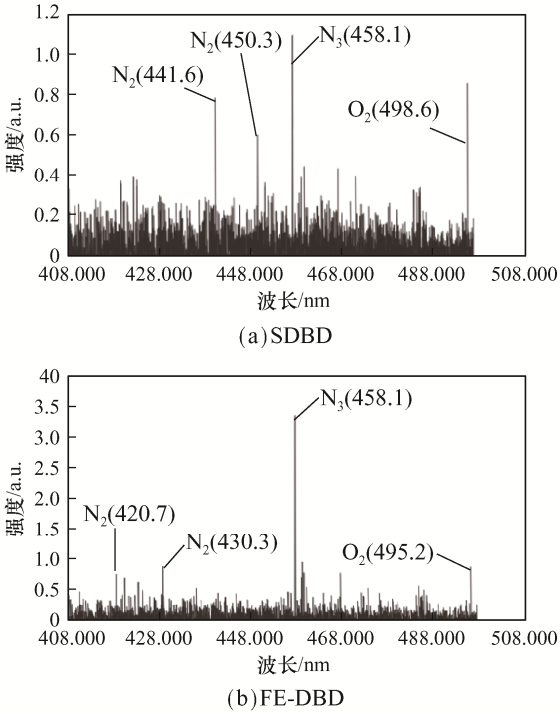


图 9 等离子体发生器发射光谱测量

Fig. 9 Emission spectrum measurement of plasma generator

3 结语

本文通过对 MPT3307B70 型号压电陶瓷变压器进行特性分析，设计了具有小型化、输出电压可调、质量轻、输出功率大的电源，并将该电源与SDBD等离子体发生器和柔性FE-DBD等离子体发生器进行匹配放电，放电测试结果表明，电源产生的高频电压能够成功激发 SDBD 和柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电并产生稳定、均匀的冷等离子体，且电源模块体积仅为 50 mm×15 mm×8 mm、质量仅有 12.1 g、功率质量比达到 580 W/kg，并实现了输出电压从 200 V 到 2.2 kV 可调，满足实际使用需求，具有一定的使用价值。针对激发叠层超薄型 SDBD 等离子体发生器放电产生冷等离子体，本文所设计的电源模块相比已有的 ZVS 单管自激电源和已有的 ZVS 双管自激电源，在介质阻挡放电面积为 1.5 cm×1.5 cm 时，输出功率为 1.8 W，功率密度为 0.8 W/cm^2，体积减小且功率密度增加。针对激发柔性 FE-DBD 等离子体发生器放电产生冷等离子体，本文设计的电源相比现有的 ZVS 双管自激电源功率密度由 0.79 W/cm^2 增加至 1.50 W/cm^2，功率质量比由 300 W/kg 增加至 580 W/kg。相比于以市电或大型稳压电源作为输入的等离子体电源，使用 3.7 V 的锂电池软包(容量为 3000 mA·h，最大输出电流 500 mA)作为该电源输入即可输出 2.2 kV 的高频电压，极大地缩小了电源体积，增强了电源的便携性。本文设计的电源体积小、质量轻，对实现可穿戴式、可贴附式等离子体发生装置在生物医学领域方面的应用具有重要意义。

参考文献：

[1] 李和平, 于达仁, 孙文廷, 等. 大气压放电等离子体研究进展综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3697-3727.
Li Heping, Yu Daren, Sun Wenting, et al. State-of-the-art of atmospheric discharge plasmas [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3697-3727. (in Chinese)

[2] 方文睿, 唐雄民, 江天鸿, 等. 一种适用于介质阻挡放电负载的简易型单极性正向脉冲式供电电源[J]. 电源学报, 2024, 22(2): 405-413.
Fang Wenrui, Tang Xiongmin, Jiang Tianhong, et al. Simple power supply with unipolar forward pulse for dielectric barrier discharge load [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(2): 405-413. (in Chinese)

[3] Morfill G E, Zimmermann J L. Plasma health care - old problems, new solutions [J]. Contributions to Plasma Physics, 2012, 52: 655-663.

[4] Kohanski M A, Dwyer D J, Hayete B, et al. A common mechanism of cellular death induced by bactericidal antibiotics [J]. Cell, 2007, 130(5): 797-810.

[5] Laroussi M, Kong M G, Morfill G, et al. Plasma Medicine: Applications of Low Temperature Gas Plasmas in Medicine and Biology [M]. Cambridge University Press, 2012: 28-74.

[6] Li Y F, Taylor D, Zimmermann J L, et al. In vivo skin treatment using two portable plasma devices: Comparison of a direct and an indirect cold atmospheric plasma treatment [J]. Clinical Plasma Medicine, 2013, 1(2): 35-39.

[7] Bernhardt T, Semmler M L, Schäfer M, et al. Plasma medicine: Applications of cold atmospheric pressure plasma in dermatology [J]. Oxidative Medicine and Cellular Longevity, 2019, 2019(1): 3873928.

[8] 刘定新, 张基珅, 王子丰, 等. 等离子体活化介质技术及其生物医学应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3855-3868.
Liu Dingxin, Zhang Jishen, Wang Zifeng, et al. Plasma-activated media technology and its biomedical applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3855-3868. (in Chinese)

[9] Bogle M A, Arndt K A, Dover J S. Evaluation of plasma skin regeneration technology in low-energy full-facial rejuvenation [J]. Archives of Dermatology, 2007, 143(2): 168-174.

[10] Teschke M. Piezoelectric low voltage atmospheric pressure plasma sources [J]. Contributions to Plasma Physics, 2009, 49(9): 614-623.

[11] Heinlin J, Morfill G, Landthaler M, et al. Plasma medicine: Possible applications in dermatology [J]. JDDG: Journal der Deutschen Dermatologischen Gesellschaft, 2010, 8(12): 968-976.

[12] Johnson M J, Go D B. Piezoelectric transformers for low-voltage generation of gas discharges and ionic winds in atmospheric air [J]. Journal of Applied Physics, 2015, 118(24): 243304.

[13] 李国伟. 介质阻挡放电电源及放电特性的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
Li Guowei. Research on dielectric barrier discharge power and its discharge characteristics [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)

[14] CTP-2000K 低温等离子体实验电源[EB/OL]. [2022-06-30]. http://www.coronalab.net/applyfield/show.php?id=165.

[15] 贾垭楠, 李占贤, 刘国莎. 基于移项全桥变换器的等离子体脉冲电源设计[J]. 机械工程与自动化, 2019(6): 182-184.
Jia Yanan, Li Zhanxian, Liu Guosha. Design of plasma pulse power supply based on shifted full bridge converter [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6): 182-184. (in Chinese)

[16] 辛纪威, 李占贤, 赵潞翔, 等. 基于 ZVS 双管自激电路的等离子体电源设计[J]. 电源学报, 2021, 19(6): 179-186.
Xin Jiwei, Li Zhanxian, Zhao Luxiang, et al. Design of plasma power supply based on ZVS dual-tube self-excited circuit [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(6): 179-186. (in Chinese)

[17] Korzec D, Hoppenthaler F, Burger D, et al. Atmospheric pressure plasma jet powered by piezoelectric direct discharge [J]. Plasma Processes and Polymers, 2020, 17(11): 2000053.

[18] 马先明, 张铁民. 压电陶瓷变压器在低压电源设计上的应用[C]//农业工程科技创新与建设现代农业——2005 年中国农业工程学会学术年会论文集第三分册. 广州, 2005: 505-508.
Ma Xianming, Zhang Tiemin. Application of piezoelectric ceramic transformer in low voltage power supply design [C]// Scientific and Technological Innovation in Agricultural Engineering and Modern Agriculture Construction: the Third Volume of the Proceedings of the 2005 Academic Annual meeting of the Chinese Association of Agricultural Engineering. Guangzhou, 2005: 505-508. (in Chinese)

[19] 林羽喆, 陈雨. 压电陶瓷变压器的研究进展[J]. 世界科技研究与发展, 2012, 34(4): 600-606, 610.
Lin Yuzhe, Chen Yu. Progress of piezoelectric ceramic transformer [J]. World Sci-Tech R$D, 2012, 34(4): 600-606, 610. (in Chinese)

[20] 陈世鑫. 基于压电变压器的小型高压电源研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
Chen Shixin. Research on small high voltage power

(下转第 315 页)



李锦

作者简介：

李锦(1982—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：大功率变流器拓扑，控制及其应用。E-mail：jin_li@shiep.edu.cn。

焦娜娜(1997—)，女，硕士研究生。研究方向：变流器电磁兼容。E-mail：jiaonana@mail.shiep.edu.cn。

黄敏超(1972—)，男，博士，高级工程师。研究方向：电磁兼容技术和电力电子技术。E-mail：huangmc@myemc.net.cn。

范雨顺(1996—)，男，硕士研究生。研究方向：中压大功率变流器。E-mail：fanyushun@mail.shiep.edu.cn。

党恩帅(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：高频软开关变流器拓扑。E-mail：des1149@163.com。

(责任编辑：陈国珍)

(上接第 305 页)

supply based on piezoelectric transformer [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020. (in Chinese)

[21] Kim H, Brockhaus A, Engemann J. Atmospheric pressure argon plasma jet using a cylindrical piezoelectric transformer [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(21): 211501.

[22] Timmermann E, Bansemer R, Gerling T, et al. Piezoelectric-driven plasma pen with multiple nozzles used as a medical device: Risk estimation and antimicrobial efficacy [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(2): 025201.



王伟骞

作者简介：

王伟骞(1998—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：智能装备。E-mail：373682444@qq.com。

李占贤(1965—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：机器人技术。E-mail：lizhanxian@ncst.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)