

基于半导体开关和脉冲变压器的高压脉冲电路的 过电压抑制

王永刚 江 敏 高 明 王 菲 黄逸凡

(中国科学院深圳先进技术研究院 生物医药与技术研究所 深圳 518055)

摘 要 脉冲变压器具有升压比高、可靠性好、体积小、价格低等优点, 被广泛用于高压脉冲电路。然而, 受到漏感影响, 会产生过电压, 不仅增大了损耗, 还可能导致开关过电压击穿。该文分析了过电压的产生机理, 比较了常规过电压抑制措施的效果及其缺陷, 提出一种新的过电压抑制电路, 给出了新电路的拓扑结构、工作原理和电路参数选择依据, 并通过建模仿真验证了新过电压抑制电路的效果。最后, 采用这种过电压抑制电路, 研制了一台紧凑重频高压脉冲发生器, 可以产生幅值 11 kV、频率 2 kHz、脉宽 2 μ s 的脉冲, 并用于驱动悬浮电极介质阻挡放电负载, 能够稳定产生低温等离子体。

关键词 低温等离子体; 高压脉冲电路; 脉冲变压器; 过电压抑制

中图分类号 TM 417 **文献标志码** A

Overvoltage Suppression of High Voltage Pulse Circuits Based on Semiconductor Switches and Pulse Transformers

WANG Yonggang JIANG Min GAO Ming WANG Fei HUANG Yifan

(*Institute of Biomedicine and Biotechnology, Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen 518055, China*)

Abstract Pulse transformer has the advantages of high step-up ratio, good reliability, small size and low price, and is widely used in high-voltage pulse circuits. However, when a semiconductor switch is used to drive a pulse transformer, an over-voltage may be generated due to the influence of the leakage inductance, which not only increases the loss but also may lead to overvoltage breakdown of the switch. In this paper, the mechanism of overvoltage generation was analyzed, the effects and disadvantages of conventional overvoltage suppression methods were compared, a new overvoltage suppression circuit was proposed, and the topology structure, working principle and circuit parameter selection basis were given. The effects of the new over-voltage suppression circuit were verified through modeling and simulation. Finally, the over-voltage suppression circuit was used to develop a compact heavy-duty high-voltage pulse generator which can

收稿日期: 2018-05-09 修回日期: 2018-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(41476080); 深圳市海外高层次人才孔雀团队项目(KQTD2016030111500545)

作者简介: 王永刚, 博士, 助理研究员, 研究方向为脉冲功率技术; 江敏, 硕士, 助理工程师, 研究方向为等离子体生物医学应用; 高明, 硕士, 工程师, 研究方向为等离子体材料应用; 王菲, 硕士, 研究实习员, 研究方向为等离子体仿真; 黄逸凡(通讯作者), 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为等离子体技术, E-mail: yf.huang@siat.ac.cn.

generate pulses with 11 kV amplitude, 2 kHz frequency, and 2 μ s pulse width, drive a load of floating electrode dielectric barrier discharge and generate stable low temperature plasma.

Keywords low temperature plasma; high voltage pulse circuit; pulse transformer; overvoltage suppression

1 引言

宇宙中, 99% 的物质以等离子体状态存在^[1,2]。其中, 等离子体由电子、离子和中性粒子组成。据热力学平衡程度, 可将等离子体分为 3 种类型。其中, 在恒星的内核、受控热核聚变堆中, 电子温度、离子温度及中性粒子温度完全一致, 被称为完全热平衡等离子体。在巨型闪电及用于切割、焊接的电弧等离子体中, 带电粒子和中性粒子接近热平衡, 称为局部热力学平衡等离子体。而在极光、荧光灯中, 电子温度远高于离子和中性粒子的温度, 称为非热力学平衡等离子体, 也称为低温等离子体。低温等离子体的高能电子足以使反应物分子激发、离解和电离, 而整个低温等离子体反应体系可以保持为常温。在上述 3 种等离子体类型中, 低温等离子体在工业中的应用最为广泛^[3], 如在材料表面改性^[4]、废水废气处理^[5]、流动控制^[6]和生物医学^[7]等领域均具有广阔的应用前景。

低温等离子体的产生方法很多, 但最重要和最普遍的是气体放电法, 如电晕放电、介质阻挡放电及大气压等离子体射流等^[8]。传统上, 采用直流或正弦高压驱动等离子体反应器, 产生低温等离子体。有研究^[9,10]表明, 采用脉冲驱动时, 产生的等离子体更均匀, 能量效率更高。因此, 研制适合低温等离子体应用的脉冲高压发生器是研究热点之一。

截至目前, 学者已提出多种可用于驱动低温等离子体反应器的高压脉冲电路拓扑^[11-20]。其中, 一种采用两个由半导体开关(绝缘栅双极

型晶体管(IGBT)或金属-氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)串联而成的高压开关, 组成推挽电路^[11]。这种拓扑对开关的同步性要求非常高, 还需要复杂的均压电路。另一种称为全固态 Marx 发生器, 使用半导体开关代替传统 Marx 发生器的气体开关, 用二极管或电感代替充电电阻, 因而在放电可控性、重复频率、寿命、效率等方面均有很大的提升^[12,13]。然而, 由于半导体开关的耐压限制, 为了输出高压脉冲, 这两种拓扑都需要大量的半导体开关, 不仅增加了造价和系统复杂性, 还降低了可靠性。

脉冲变压器被广泛用于产生高压脉冲^[13-18]。Bortis 等^[14]采用 1:170 的矩阵变压器, 将 1 kV 的原边电压升高至 170 kV, 脉宽为 5 μ s, 上升时间小于 500 ns, 频率 200 Hz。Zhang 等^[15]使用脉冲变压器, 将市电整流后的电压升高至 20 kV, 用于驱动等离子体射流反应器, 取得了很好的效果。脉冲变压器的输出电压经过磁开关或传输线变压器压缩后, 可以获得纳秒量级的窄脉冲^[18,19]。而灵活的变比使脉冲变压器原边电压在商业化半导体开关的工作电压范围内, 避免了开关的串联。

然而, 当用半导体开关驱动脉冲变压器时, 受漏感的影响, 会产生过电压, 不仅增大了损耗, 还可能导致开关过电压击穿。常规过电压抑制措施是在开关两端并联 RCD 吸收电路, 但存在严重的损耗。

本文提出一种新的过电压抑制电路, 不仅可以有效抑制开关两端的过电压, 还能将电感中的能量回收至储能电容中。本文首先在第 2 节分析

新过电压抑制电路的工作原理和参数设计, 然后在第 3 节给出实验测试结果和讨论, 最后进行总结和展望。

2 电路工作原理

2.1 高压脉冲电路的工作原理

高压脉冲电路主要由直流电源 U_{in} 、充电二极管 D_1 、充电电感 L_1 、储能电容 C_1 、放电开关 S_1 、升压变压器 T 和负载 Z_L 组成, 如图 1 所示。它主要有两种工作模式:

(1) 当开关 S_1 导通时, C_1 通过 S_1 对 L_{pri} 放电, 在 L_{pri} 两端施加一个电压脉冲, 于是在变压器副边绕组 L_{sec} 两端感应出一个高压脉冲, 输出到负载 Z_L 。同时, 二极管 D_1 导通, 直流电源

U_{in} 的电压全部加在充电电感 L_1 上, 通过 L_1 的电流线性上升。

(2) 当开关 S_1 断开时, 直流电源 U_{in} 通过 D_1 、 L_1 和变压器的原边绕组 L_{pri} 给 C_1 充电。由于电流逐渐减小, L_1 两端的电压反向, 因而 C_1 充满电时的电压高于 U_{in} 值。变压器磁芯也在此时得到复位。

2.2 产生过电压的原因

分析工作原理时, 假设各元件都是理想的, 然而实际情况要复杂得多。变压器不可避免地存在漏感 L_s 、绕线电阻 R_s 、分布电容 C_d 及磁化电感 L_{meg} , 如图 2 所示。

S_1 导通时, 电流 i_s 流过漏感 L_s 。而在 S_1 关断瞬间, i_s 急剧减小, 在 L_s 两端产生很高的反向电压 v_{L_s} ; 励磁电感 L_{meg} 和分布电容 C_d 并联, 其

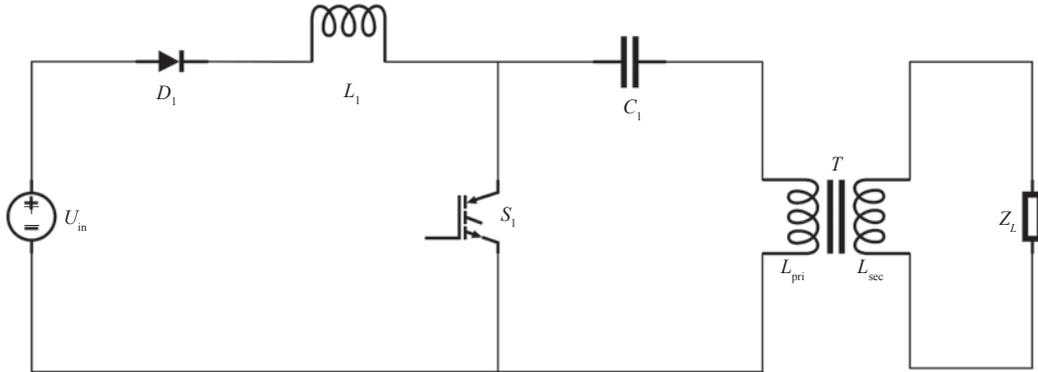


图 1 主电路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the main circuit

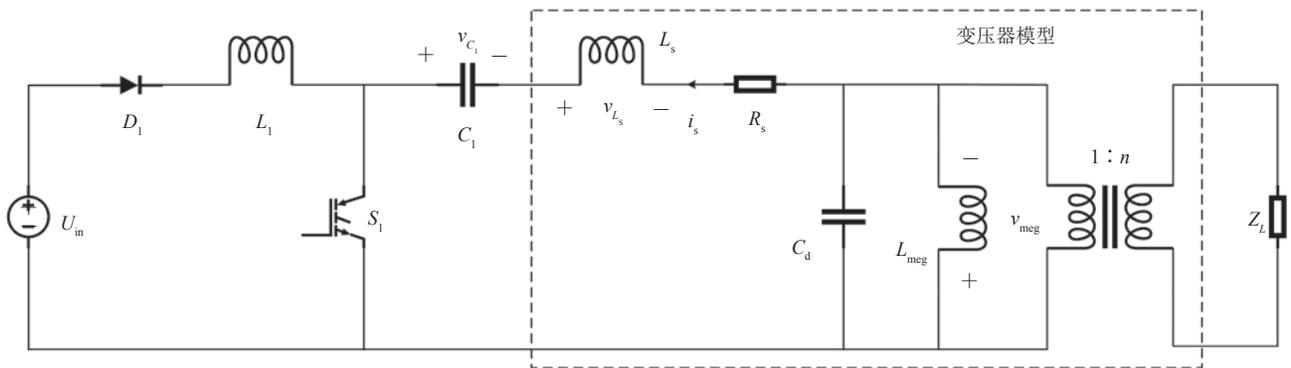


图 2 考虑变压器分布参数时的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit considering distributed parameters of the pulse transformer

两端电压 v_{meg} 不会突变; v_{L_s} 与 v_{meg} 及 C_1 两端的电压 v_{C_1} 叠加, 导致 S_1 两端的电压远高于额定电压, 使 S_1 击穿损坏。

因此, 为了使高压脉冲电路稳定工作, 必须使用过电压抑制电路。

2.3 常见的过电压抑制电路

通常, 在开关 S 两端并联 C 型、RC 型或 RCD 型吸收电路来抑制关断瞬间的过电压, 如图 3 所示^[20]。其中, 图 3(a) 为 C 型吸收电路。开关 S 断开时, 电流 i_s 将流过电容 C , 将电感储存的能量转移到 C 上。避免在 S 关断时, 由于电流突变在 S 两端产生很高的尖峰电压, 大大减小了关断过电压。但当 S 闭合时, 充满电的电容 C 将通过 S 放电, 增大了 S 开通时的电流应力。图 3(b) 为 RC 型吸收电路。电阻 R 的接入可以减小 S 闭合时 C 的放电电流。但在 S 断开时会导致其两端的电压升高, 降低了对 S 关断瞬间的防护效果。图 3(c) 为 RCD 型吸收电路。在 S 断开时, 电流 i_s 通过二极管 D 对电容 C 充电; 而在 S 闭合时, 电阻 R 又可以限制 C 的放电电流。因此, RCD 型吸收电路既有 C 型和 RC 型吸收电路的优点, 又避免了它们的缺点。

假设开关 S 断开前, 电感的电流为 I_0 , 回路中总电感为 L , 则储存在电感中的能量 E_L 为:

$$E_L = \frac{1}{2} LI_0^2 \quad (1)$$

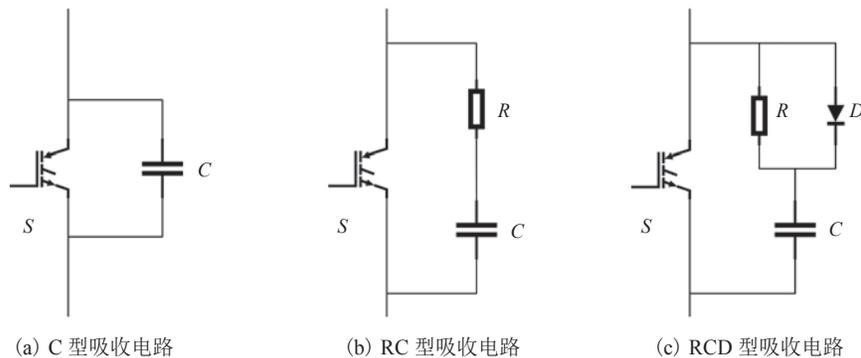


图 3 常规吸收电路

Fig. 3 Conventional absorbing circuit

假设 S 关断前储存在电感中的能量完全转化为电容 C 中的能量, 且电容的电压因此升高了 ΔU , 则有

$$\frac{1}{2} LI_0^2 = \frac{1}{2} C \Delta U^2 \quad (2)$$

进而可以求出吸收电容为:

$$C = \frac{LI_0^2}{\Delta U^2} \quad (3)$$

吸收电路是随着 S 的导通、关断而循环工作的, 因此对于 RC 型和 RCD 型吸收电路, 存储在吸收电容 C 中的能量必须通过电阻 R 消耗掉。只要满足放电时间常数 $\tau = RC$ 小于 S 导通时间 t_p 的 $1/4$, 就可以保证 C 中绝大部分能量的释放, 不会影响下一次吸收。所以, 吸收电阻需要满足的条件之一是:

$$R < \frac{t_p}{4C} \quad (4)$$

然而, 吸收电路会引起大电流振荡。为了抑制振荡, 应增大 R , 使电路处于过阻尼状态, 即 R 需满足:

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (5)$$

通过以上分析可知, 图 3 所示的吸收电路是一种有损电路。 S 断开后, 储存在电感中的能量先转移到吸收电容 C 中, 然后再通过开关 S (C 型吸收电路) 或电阻 R (RC 型和 RCD 型吸收电

路)消耗掉。

此外, 高压脉冲电路输出的脉冲宽度为微秒量级, 开关 S 导通的时间非常短, 因此电阻 R 的取值不一定能同时满足式 (4) 和 (5)。

2.4 新型过电压抑制电路

本文提出的过电压抑制电路 (如图 4) 由二极管 D_2 和开关 S_2 串联而成, 开关时序如图 5 所示。该电路主要有 4 种工作模式。

(1) 模式 1 $[t_0, t_1]$: 开关 S_1 导通, 充满电的储能电容 C_1 通过 S_1 对变压器原边放电, 在变压器副边绕组感应出高压脉冲。假设变压器的变比为 $1:n$, 则输出电压幅值为 nv_{C_1} 。由于漏感 L_s 和分布电容 C_d 的影响, 实际输出电压会有振荡。同时, U_{in} 直接加在充电电感 L_1 上, L_1 的电流线性增大。

(2) 模式 2 $[t_1, t_2]$: 开关 S_2 也导通。然而, 由于 S_1 仍处于开通状态, 因此 S_2 的集电极-发射极电压反偏, 没有电流流过 S_2 。故 S_2 属于零电流开通。在该模式中, C_1 仍通过 S_1 对变压器原边放电。同时, L_1 的电流继续线性增加。

(3) 模式 3 $[t_2, t_3]$: S_1 关断, S_2 保持开通。由于分布电容 C_d 两端的电压 v_{meg} 不能突变, 因此 C_d 继续对励磁电感 L_{meg} 放电, L_{meg} 的电流不断增

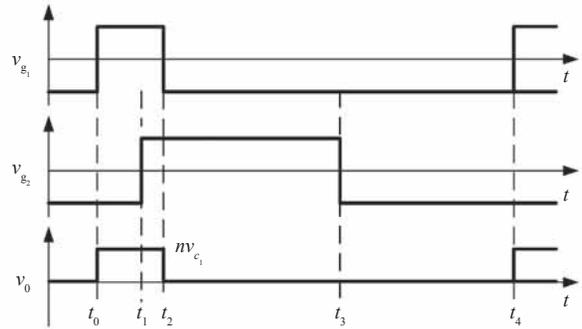


图 5 开关时序

Fig. 5 Timing sequence

大, 直到 v_{meg} 减小到零。随后, L_{meg} 反向对 C_d 充电, 使 v_{meg} 反向增大。同时, 由于漏感 L_s 中的电流 i_s 不能突变, 因此 i_s 通过 S_2 、 D_2 流回到直流电源 U_{in} 中。根据基尔霍夫电流定律, $i_{meg} = i_d + i_s$, 励磁电流 i_{meg} 除少部分与 C_d 进行能量交换外, 大部分都流回到 U_{in} 中, 因而储存在 L_{meg} 中的能量大部分得到回收。 S_2 的导通时间必须足够长, 使 i_s 减小到零。在该模式中, 充电电感 L_1 中的电流也通过 S_2 和 D_2 续流。

(4) 模式 4 $[t_3, t_4]$: S_2 关断。电源 U_{in} 通过 D_1 、 L_1 和变压器原边给储能电容 C_1 充电。在充电后期, 当 C_1 的电压高于电源电压 U_{in} 时, 充电电感 L_1 的电压反向, 继续给 C_1 充电, 使 C_1 的电压高于电源电压 U_{in} 。因而, 该电路在充电时具有升压作用。

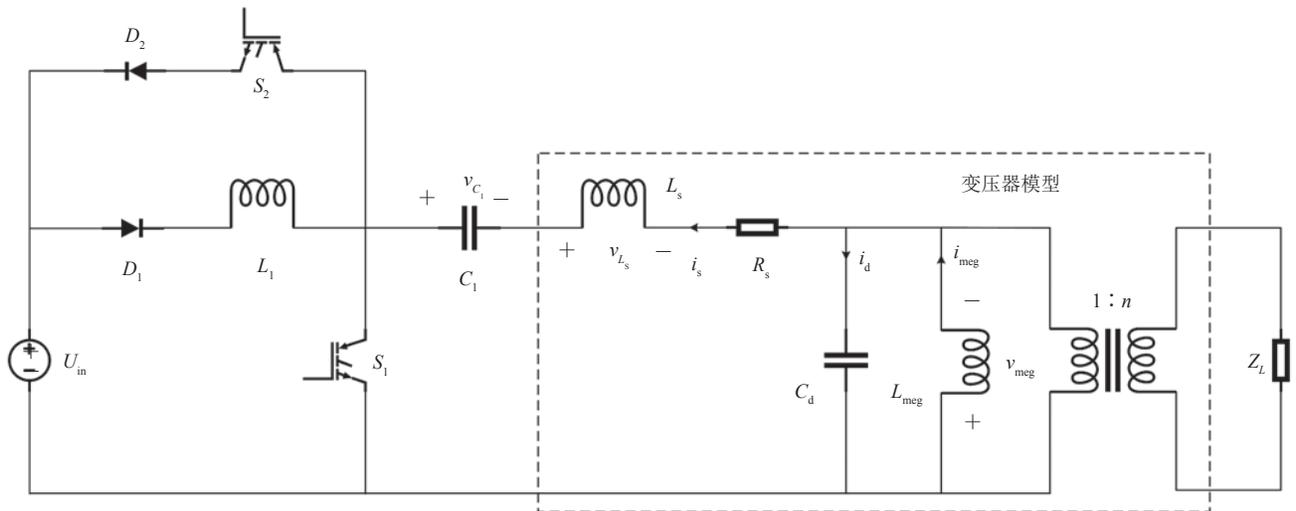


图 4 提出的过电压抑制电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of the proposed overvoltage suppression circuit

3 仿真与实验结果

3.1 RCD 型吸收电路仿真

本文首先将图 3 (c) 所示的 RCD 型吸收电路并联在图 2 中 S_1 开关的两端, 采用 Pspice 仿真, 各电路元件的参数如表 1 所示。其中, 变压器参数是通过测量实际变压器确定的; C 根据公式 (3), 并且结合实际波形计算而得。开关 S_1 的导通时间为 $2 \mu\text{s}$, 根据公式 (4), R 小于 11.36Ω ; 然而, 根据公式 (5), R 应当大于 90Ω , 因此同时满足公式 (4)、(5) 的 R 值不存在。增大导通时

表 1 电路仿真参数

Table 1 Parameters of simulated circuit

元件	参数	元件	参数
L_1	$535 \mu\text{H}$	C_1	$0.47 \mu\text{F}$
L_{meg}	$88.73 \mu\text{H}$	n	18
L_s	$0.93 \mu\text{H}$	R_s	0.5Ω
C_d	10.2 nF	Z_L	$1 \text{ M}\Omega$
R	100Ω	C	44 nF
U_{in}	311 V		

间 t_p , 可以使 R 同时满足公式 (4) 和 (5), 然而变压器的伏秒积也必须变大, 这增大了变压器的体积。电路振荡时, 会使过电压更严重, 为了

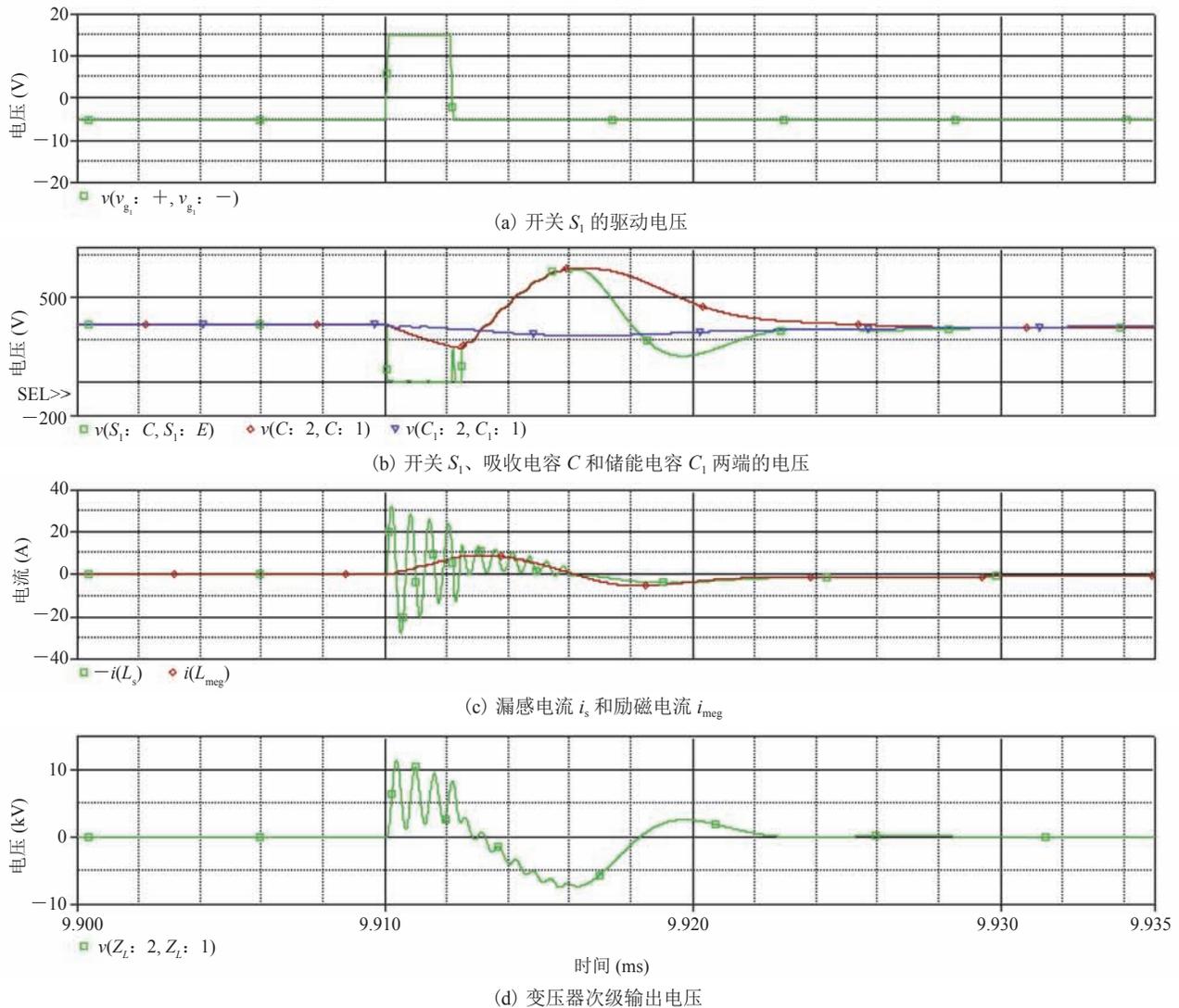


图 6 RCD 型吸收电路的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of the RCD absorbing circuit

防止出现振荡, 取 $R=100\ \Omega$ 。负载开路, 因此取 $Z_L=1\ \text{M}\Omega$, 模拟开路状态。

图 6 为仿真结果, 波形从上到下依次为开关 S_1 的驱动电压, 开关 S_1 、吸收电容 C 和储能电容 C_1 两端的电压, 漏感电流 i_s 和励磁电流 i_{meg} , 变压器次级输出电压。由图 6 可知, 变压器的输出电压可以到 $10\ \text{kV}$ 以上。然而在 S_1 导通期间, 吸收电容 C 的电压并未降到零。在 S_1 关断后, S_1 两端的电压上升到 $671.65\ \text{V}$, 是直流电源电压 $311\ \text{V}$ 的 2.16 倍。 S_1 关断时, 漏感 L_s 和励磁电感 L_{meg}

中的电流不为零, 存储在其中的能量给吸收电容 C 充电, 导致 C 和 S_1 两端的电压上升。

3.2 新型过电压抑制电路仿真

接下来, 对提出的过电压抑制电路进行仿真, 仿真电路与图 4 一致, 各电路参数见表 1。仿真结果如图 7 所示, 波形由上到下依次为开关 S_1 、 S_2 的驱动电压 v_{g1} 、 v_{g2} ; S_1 、 L_{meg} 和 C_1 两端的电压; 漏感 L_s 、励磁电感 L_{meg} 和流过开关 S_2 的电流; 变压器次级输出电压。

S_1 先导通 $2\ \mu\text{s}$, 在 S_1 导通 $1\ \mu\text{s}$ 后, S_2 导通。

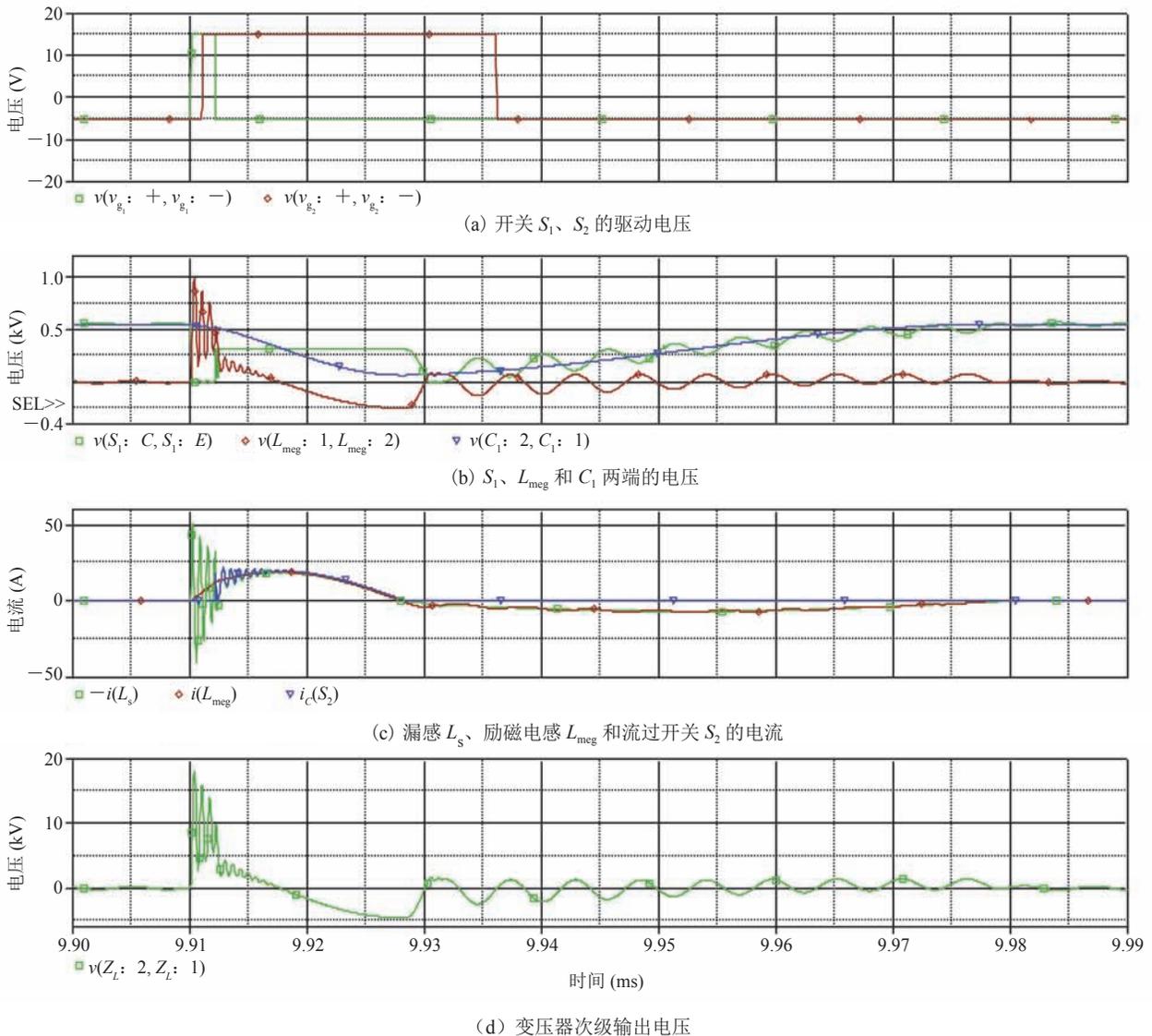


图 7 提出的过电压抑制电路仿真结果

Fig. 7 Simulation results of the proposed overvoltage suppression circuit

在 S_1 导通期间, 脉冲电压施加到变压器原边, 在变压器副边感应出高压。由于原边电压较高, 约 550 V, 副边电压也很高, 约 19 kV。在 S_1 导通期间, 励磁电感 L_{meg} 的电流上升。 S_1 关断后, L_{meg} 两端的电压仍然为正, 因此其电流继续增大。同时, 大部分励磁电流通过开关 S_2 、二极管 D_2 流回电源 U_{in} 。随后, L_{meg} 两端的电压反向, L_{meg} 的电流逐渐减小到零。由于原边电压反向, 变压器副边的输出电压也变为负。最后, 电源 U_{in} 通过二极管 D_1 、电感 L_1 和变压器原边给储能电容 C_1 充电, C_1 的电压逐渐上升。在充电过程中, 开关 S_1 两端的电压不断振荡, 输出电压也存在振荡, 通过计算振荡周期发现, 该振荡主要由分布电容 C_d 和励磁电感 L_{meg} 引起。但该振荡不会引起过电压, 也不会造成额外的开关损耗。

图 7(b) 中带“ ∇ ”的紫线表示储能电容 C_1 的电压变化。可以发现, 当漏感和励磁电感中的能量回收到电源 U_{in} 中时, 储能电容 C_1 的电压逐渐下降。当电流 i_s 降为零时, C_1 的电压仅剩 65 V 左右。而 C_1 在 S_1 导通放电期间, 减小的电压仅为 40 V。因此, 在能量回收过程中, C_1 的电压减小了 445 V 左右(充满电时, 电压为 550 V)。相当于每次放电时, 能量都在电源 U_{in} 和储能电容 C_1 之间流动一次, 可能造成额外线

路的损耗。此外, 与 RCD 电路相比, 采用该过电压抑制电路时, 所需的充电时间较长, 限制了输出脉冲的频率。

3.3 RCD 型吸收电路的实验结果

为了验证理论分析与仿真结果, 本文依据图 1 搭建了高压脉冲发生电路, 并采用图 3(c) 所示的 RCD 型吸收电路抑制过电压。其中, 直流电源 U_{in} 由 220 V 电网电源经过调压器、整流桥和滤波电容后提供。由图 6 可知, 开关 S_1 两端的峰值电压达 671.65 V; 由图 7 可知, S_1 的最大电流约 50 A。因此采用型号为 IKW40T120 的 IGBT, 其耐压为 1 200 V, 直流电流为 40 A, 最大脉冲电流达 105 A, 远大于 50 A。二极管 D_1 选用 DSEI30-12A; 其余元件参数见表 1。

变压器副边开路时, IGBT 两端的电压如图 8(a) 所示。由于充电电感 L_1 的升压作用, C_1 的电压高于 U_{in} (311 V), 达到 352 V。IGBT 断开后, 其两端的电压迅速升高至 766.25 V。由于所采用的 IGBT 耐压为 1 200 V, 因此不会出现过电压击穿。但吸收电容 C 中的能量完全损耗在电阻 R 中。

图 8(b) 为变压器的空载输出电压, 其峰值达到 11.40 kV, 满足设计要求。在脉冲顶部, 存在强烈的高频振荡, 这是由变压器的漏感 L_s 和分

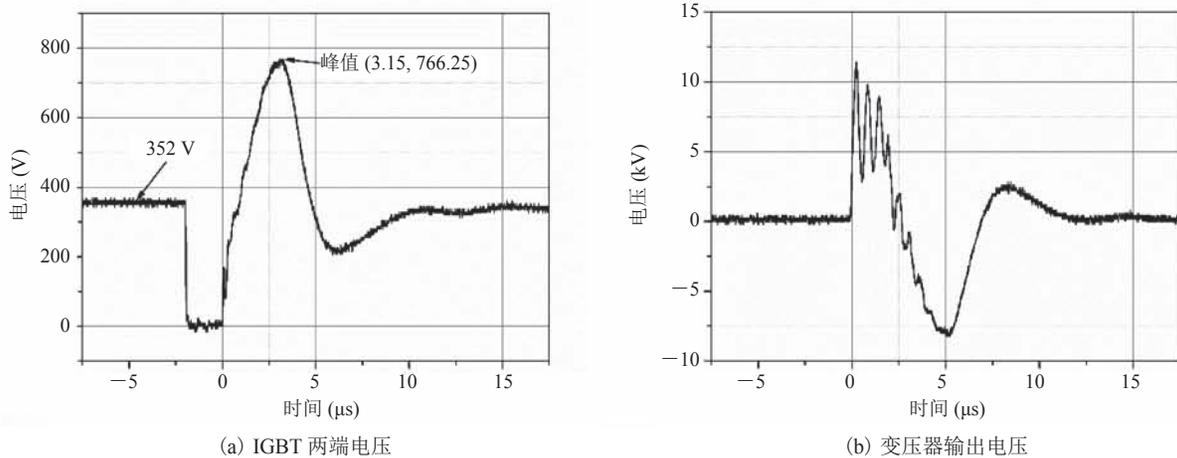


图 8 RCD 型吸收电路的实验结果

Fig. 8 Experiment result of RCD absorbing circuit

布电容 C_d 引起的。开关 S_1 导通期间，励磁电感 L_{meg} 中的电流逐渐上升； S_1 断开后， L_{meg} 中的电流不为零，储存着磁能。因而， L_{meg} 会与分布电容 C_d 、吸收电容 C 振荡，导致变压器输出电压。

3.4 新型过电压抑制电路的实验结果

采用图 4 所示的过电压抑制电路，开关断开后，不会出现过电压，如图 9(a) 所示。图 9(b) 为变压器空载输出电压。对比图 7 和图 9 可知，仿真波形与实际波形较为接近，表明仿真所用的

电路模型较为准确。仿真中，开关 S_1 两端的电压为 570 V，输出电压达 19 kV。实际测试时，考虑到变压器绝缘，开关 S_1 两端的电压仅升高至 352 V，输出电压为 11.5 kV。该电源的工作频率可以达 2 kHz。

另外，利用这种过电压抑制电路，产生脉冲高压并用于驱动悬浮介质阻挡放电负载，研制了一台等离子体治疗仪，如图 10(a) 所示。当白色的介质靠近接地电极、人或动物皮肤时，会放电产生等离子体，可用于杀灭伤口上的细菌，促进

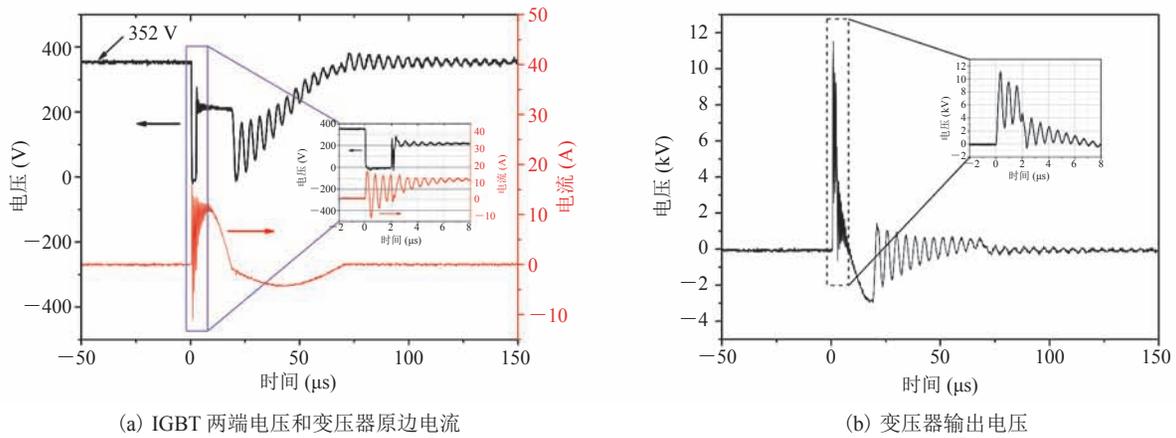


图 9 提出的过电压抑制电路实验结果

Fig. 9 Experimental results of the proposed overvoltage suppression circuit



(a) 等离子体治疗仪



(b) 小鼠伤口愈合实验图

图 10 等离子体治疗仪及小鼠伤口愈合实验图

Fig. 10 Plasma therapeutic apparatus and the experimental paragraph of treating skin wounds in rats

伤口愈合, 如图 10(b) 所示。

4 与国内外相似研究对比分析

基于悬浮电极介质阻挡放电, 德国科学家研制了一款名为 PlasmaDerm 的等离子体治疗仪^[21,22]。PlasmaDerm 已经被用于临床试验, 研究表明其在促进慢性伤口愈合方面具有良好的疗效。本文采用半导体开关驱动脉冲变压器, 产生高压脉冲, 驱动悬浮电极介质阻挡放电反应器, 产生等离子体, 并进行了初步的动物实验。在此过程中, 本文提出了一种新的过电压抑制电路, 使高压产生电路工作更加稳定可靠。然而, 与 PlasmaDerm 相比, 本文研制的等离子体治疗仪体积较大, 反应器及其最佳工作参数尚未进行优化, 这也是未来研究中亟需解决的问题。

5 结 论

当用半导体开关驱动脉冲变压器产生高压脉冲时, 由于电感的作用, 会产生过电压, 导致开关击穿。因为开关导通时间短, 传统 RCD 吸收电路不能有效抑制过电压, 还会将电感中的能量全部消耗在吸收电阻中。

本文提出一种新型的过电压抑制电路, 首先给出了该电路的工作原理, 然后对该电路进行仿真与实验, 并与 RCD 型吸收电路相比较。结果表明, 该电路不仅能有效抑制过电压, 还可以使电感电流回流到直流电源中, 使电感中的能量得到回收。然而, 该电路也会导致能量在储能电容和直流电源间反复流动, 可能造成额外的线路损耗。另外, 由于所需充电时间较长, 会限制输出脉冲的频率。

最后, 采用该电路, 本文研制了一台高压脉冲发生器, 可以产生幅值为 11 kV、频率为 2 kHz、脉宽为 2 μ s 的脉冲, 并用于驱动悬浮电极介质阻

挡放电负载, 能够稳定产生低温等离子体。

参 考 文 献

- [1] 郑春开. 等离子体物理 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2009.
- [2] 陈著, 林光海. 等离子体物理学导论 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [3] 赵青, 刘述章, 童洪辉. 等离子体技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [4] Fang Z, Liu Y, Liu K. Surface modifications polymethylmetacrylate films using atmospheric pressure air dielectric barrier discharge plasma [J]. Vacuum, 2012, 86(9): 1305-1321.
- [5] Jiang S, Wen YY, Liu KF. Investigation of pulsed dielectric barrier discharge system on water treatment by liquid droplets in air [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1866-1871.
- [6] 李和平, 于达人, 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.
- [7] Adamovich I, Baairud SD, Bogaerts A, et al. The 2017 plasma roadmap: low temperature plasma science and technology [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(32): 323001.
- [8] 邵涛, 严萍. 大气压气体放电及其等离子体应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [9] Yang DZ, Yang Y, Li SZ, et al. Homogeneous dielectric barrier discharge plasma excited by bipolar nanosecond pulse in nitrogen and air [J]. Plasma Source Science and Technology, 2012, 21(3): 35004-35012.
- [10] Xiong Q, Lu XP, Ostrikov K, et al. Pulsed-dc and sine-wave-excited cold atmospheric plasma plumes: a comparative analysis [J]. Physics of Plasma, 2010, 17(4): 503.
- [11] Barnes MJ, Wait GD. A 25-kV 75-kHz kicker for measurement of muon lifetime [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 1932-1944.

- [12] 刘克富. 固态 Marx 发生器研究进展 [J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1781-1787.
- [13] 丁明军, 李玺钦, 冯宗明, 等. 200 kV 全固态 Marx 结构方波脉冲电源设计 [J]. 强激光与粒子数, 2017, 29(2): 025009.
- [14] Bortis D, Biela J, Kolar WJ. Transient behavior of solid-state modulators with matrix transformers [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(10): 2785-2792.
- [15] Zhang C, Shao T, Wang R, et al. A repetitive microsecond pulse generator for atmospheric pressure plasma jets [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4): 1907-1915.
- [16] 黄伟民, 邵涛, 张东东, 等. 小型高压重复频率微秒脉冲电源及其放电应用 [J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 272-278.
- [17] Zhou Y, Zhou ZH, Yao CG, et al. Fast-rise-time trigger source based on solid-state switch and pulse transformer for triggered vacuum switch [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2105-2114.
- [18] Shao T, Zhang DD, Yu Y, et al. A compact repetitive unipolar nanosecond-pulse generator for dielectric barrier discharge application [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(7): 1651-1655.
- [19] 米彦, 万佳伦, 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.
- [20] 姜栋栋, 王焱, 卢峰. IGBT 过电压产生机理分析及 RC 缓冲电路的设计 [J]. 电力科学与工程, 2011, 27(4): 23-29.
- [21] Emmert S, Brehmer F, Hanble H, et al. Atmospheric pressure plasma in dermatology: ulcer treatment and much more [J]. Clinical Plasma Medicine, 2013, 1(1): 24-29.
- [22] Brehmer F, Haenssle HA, Daeschlein G, et al. Alleviation of chronic venous leg ulcers with a hand-held dielectric barrier discharge plasma generator (PlasmaDerm® VU-2010): results of a monocentric, two-armed, open, prospective, randomized and controlled trial (NCT01415622) [J]. Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology, 2015, 29(1): 148-155.