

# 基于 Blumlein 和 TLT 的模块化全固态 纳秒脉冲发生器\*

米彦<sup>1</sup>, 卞昌浩<sup>1,2</sup>, 万佳仑<sup>1,3</sup>, 姚陈果<sup>1</sup>, 李成祥<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;

2. 国网江苏省电力公司技能培训中心 苏州 215000; 3. 四川电力设计咨询有限责任公司 成都 610041)

**摘要:**为了研究高频纳秒脉冲电场治疗肿瘤的生物医学效应,需要一种能产生高频纳秒脉冲的紧凑型脉冲电场发生器。结合 Blumlein 脉冲形成线和传输线变压器(TLT)提出了一种新的模块化设计的高频纳秒脉冲发生器结构,发生器可以使用更少的开关数输出电压、频率可调的高频纳秒方波脉冲。对单级和多级发生器在阻抗匹配时的脉冲形成过程进行了理论分析,并分析了多级发生器在阻抗不匹配时负载波形的变化;使用微带线设计 Blumlein 脉冲形成线,介绍了微带线的设计过程,同时介绍了传输线变压器的设计以及固态开关的控制策略;研制了一台小型发生器对提出的拓扑结构进行验证。最后,三级发生器在匹配负载(300 Ω)上,可以输出幅值 0~3 kV 可调,脉宽 100 ns,重复频率 0~10 kHz 可调的高频纳秒脉冲。

**关键词:** Blumlein; 传输线变压器; 微带线; 模块化; 全固态; 紧凑型脉冲发生器

**中图分类号:** TM836 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Modular solid-state nanosecond pulse generator based on Blumlein and transmission line transformer

Mi Yan<sup>1</sup>, Bian Changhao<sup>1,2</sup>, Wan Jialun<sup>1,3</sup>, Yao Chenguo<sup>1</sup>, Li Chengxiang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Skill Training Center, Suzhou 215000, China; 3. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** In order to study the biomedical effects in the treatment of tumors exposed to high pulse repetition frequency (PRF) nanosecond pulsed electric fields, a compact pulse generator which can provide high PRF ns pulses is needed. A new configuration of pulse generator combining Blumlein line and transmission line transformer (TLT) is proposed in this paper. The modular generator can provide high PRF ns rectangular pulses whose amplitude and PRF are adjustable with less switches. In this paper, the pulse forming processes of single-stage and multi-stage generator in matching impedance are theoretically analyzed. The changes of waveforms of multi-stage generator in mismatched loads are analyzed. Microstrip line is used to design the Blumlein in the generator. And the design processes of the Blumlein and TLT are introduced. The control strategy of solid state switches is also illustrated. A small prototype is developed to verify the proposed topology. Finally, the three-stage generator can produce pulses on matched load (300 Ω) with amplitude of 0~3 kV, pulse width of 100 ns, and PRF to 10 kHz.

**Keywords:** Blumlein; transmission line transformer (TLT); microstrip line; modular design; solid-state; compact design

## 0 引言

脉冲功率技术已经被广泛应用于医学、军事、材料、

环境等多个方面<sup>[1-4]</sup>,其中纳秒脉冲电场治疗肿瘤技术成为新的研究热点。研究发现在微秒脉冲电场作用下,肿瘤细胞的细胞膜上会产生可逆或不可逆电穿孔,可配合药物或者直接对肿瘤细胞进行杀伤<sup>[5-6]</sup>。当脉宽减小至

纳秒级别、场强增加至 MV/m 时,脉冲电场产生的细胞生物学效应<sup>[7-11]</sup>与微秒脉冲的穿孔效应截然不同,在纳秒脉冲电场作用下,会在细胞器结构上对细胞产生影响而不在细胞膜上产生大的穿孔,能够诱导肿瘤细胞的凋亡使得肿瘤组织缩小甚至消失,同时避免炎症、溃疡等副作用,对于肿瘤治疗有重要意义。为了研究高频纳秒脉冲<sup>[9]</sup>对肿瘤细胞的作用机理,需要进行微观单细胞实验<sup>[10-11]</sup>,进而需要一种能够产生高频纳秒脉冲的脉冲电场发生器。

在多种高压纳秒脉冲<sup>[12-16]</sup>的产生方法中,Blumlein 传输线<sup>[17-19]</sup>和传输线变压器(transmission line transformer, TLT)<sup>[20-22]</sup>获得了广泛的应用。Blumlein 传输线能够方便地形成纳秒量级脉宽的电脉冲,波形具有很高的保真度,可以作为初级脉冲的产生方式。同时相对于传统的变压器,TLT 具有频带宽的特点,可以对输入的纳秒脉冲进行不失真放大。牛津大学的 Graneau P. N. 等人<sup>[20]</sup>研制了一台十线同轴传输线 TLT,可以输出 196 kV 的高压脉冲,验证了 TLT 在变压纳秒脉冲方面的巨大优势;Yan K 等人<sup>[21]</sup>利用 TLT 技术研制了频率达到 900 Hz、功率 10 kW 的脉冲发生器,用于污水处理方面,传输效率高达 96%;国内 Qiu J 等人<sup>[22]</sup>研制了一台十级的 TLT 装置,可以输出电压 10 kV、频率 10 kHz 的高频脉冲。如前所述,TLT 在变压高频纳秒脉冲方面存在着巨大的优势,但是前面使用均为多级的 TLT 设计,输入输出阻抗对比很大,输入阻抗小,前级脉冲产生的压力大,限制了输出脉冲的重复频率。

传输线一般有两种实现方式,即同轴电缆和微带线<sup>[23]</sup>。若使用同轴电缆,当脉宽较宽时所需同轴电缆较长,使得发生器体积较大。使用微带线制作传输线可以解决上述问题,通过改变微带线的宽度、介质、高度可以方便地改变传输线的特征阻抗,达到与负载阻抗匹配的目的;同时可以使用多层 PCB 板及蛇形走线的方式增加传输线的长度,使得发生器结构紧凑,体积大大减小。

本文中所提出的拓扑结构使用 Blumlein 传输线结合 TLT 进行模块化设计。发生器结合了 Blumlein 传输线容易形成高频纳秒脉冲的特点和 TLT 高频特性好的特点,可以输出高频纳秒脉冲方波信号,相比于 Marx 等传统拓扑结构,输出相同幅值的脉冲,所使用开关数量也大大减少。使用微带线设计发生器中的 Blumlein 传输线,相对于使用同轴电缆设计传输线,大大减小了发生器尺寸。同时使用 MOS 管作为开关,实现电压、频率可调。本次设计中提出的拓扑结构产生的高频纳秒脉冲将有利于纳秒脉冲治疗肿瘤技术的研究。

本文首先对单级和多级发生器的原理进行理论分析;其次给出发生器中 Blumlein 传输线、TLT 以及固态开关的设计方法;最后搭建了小型发生器及测试平台,对理

论分析进行验证。

## 1 发生器原理

### 1.1 单级发生器原理

图 1 所示为一个单级电路原理,图 1 中包括了一个 Blumlein 传输线和一个二级 TLT。因为使用了传输线进行设计,所以必然存在阻抗匹配的问题。模块中 Blumlein 传输线中每条传输线的特征阻抗为  $Z_0$ ,电长度为  $\tau_1$ ,TLT 中每条传输线的阻抗为  $Z_1$ ,电长度为  $\tau_2$ ,负载阻抗为  $Z_L$ ,当  $Z_L = 2Z_1 = 8Z_0$  时,整个系统阻抗匹配。

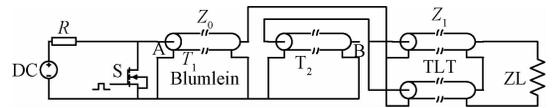


图 1 单级发生器原理

Fig. 1 Schematic diagram of the single-stage pulse generator

在阻抗匹配时,整个系统中脉冲形成过程如下:开关 S 闭合,高压直流电源通过充电电阻  $R$  对 Blumlein 传输线进行充电至电源电压  $U_0$ ;之后在  $t=0$  时开关 S 断开,A 端被强迫接地,产生一个幅值为  $-U_0$  的电压波向远离 A 点方向传播,在  $t=\tau_1$  时到 TLT 的输入端,入射波在此处产生折反射,一个幅值为  $-U_0/2$  的电压波反射回  $T_1$  传输线,同时一个幅值为  $-U_0/2$  的电压波入射至  $T_2$  传输线,此时会在变压器输入端产生一个幅值为  $U_0$  的电压;在经过几次折反射后会在 TLT 的输入端产生一个幅值为充电电压  $U_0$ 、脉宽为  $2\tau_1$  的脉冲。

由于 TLT 输入端并联,在前面产生的电压波会分别沿着两条传输线向负载方向传播。电压波在经过  $\tau_2$  时间后到达负载端,在负载端产生电压波的折反射,折反射系数分别为:

$$\alpha_1 = \frac{Z_L}{2Z_1 + Z_L} \beta_1 = \frac{2Z_1 + 2Z_L}{2Z_1 + Z_L} \quad (1)$$

式中: $\alpha_1$  为反射系数, $\beta_1$  为折射系数。因此当一个幅值为  $U_0$  的电压波在 TLT 端输入时,负载上的电压幅值为  $4Z_L U_0 / (2Z_1 + Z_L)$ ,因为阻抗匹配,所以负载上的电压为  $2U_0$ 。同时,当电压波到达负载端时,每条传输线中有一个幅值为  $(Z_L - 2Z_1) U_0 / (2Z_1 + Z_L)$  的电压波向着远离负载的方向传播,因为阻抗匹配所以这个电压波幅值为 0,即电路中不再有电压波的折反射。最终在负载上形成一个幅值为  $2U_0$ 、脉宽为  $2\tau_1$  的脉冲。单级发生器的理想输出波形如图 2 中实线所示。

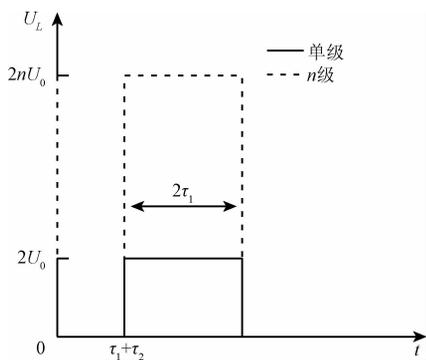


图2 发生器理想输出波形

Fig. 2 Voltage waveform on the load of the generator

1.2 多级发生器原理

多级模块化整体电路原理图如图3所示,原理图中包含n个如前所述的单元模块,此时当负载  $Z_L = 2nZ_1 = 8nZ_0$  时系统阻抗匹配。在整个系统中,各个模块使用同一个高压直流电源供电。在脉冲形成期间,每个单元模块中开关S同步作用,各单元模块中的 Blumlein 传输线同步产生初级脉冲;在每个单元模块中初级脉冲经过 TLT 向负载端传输。当各条传输线的脉冲传输至负载端时,在负载端产生折反射,折反射系数分别为:

$$\alpha_n = \frac{2(n-1)Z_1 + Z_L}{2nZ_1 + Z_L}; \quad \beta_n = \frac{2(2n-1)Z_1 + 2Z_L}{2nZ_1 + Z_L} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_n$  为反射系数,  $\beta_n$  为折射系数。因此当各条传输线上一个幅值为  $U_0$  的电压波同时传输到负载端时,负载上的电压幅值为  $4nZ_L U_0 / (2nZ_1 + Z_L)$ , 因为阻抗匹配,所以负载上的电压为  $2nU_0$ 。同时,当电压波到达负载端时,每条传输线中有一个幅值为  $(Z_L - 2nZ_1) U_0 / (2nZ_1 + Z_L)$  的电压波向着远离负载的方向传播。当阻抗匹配时,这个电压波幅值为0,即电路中不再有电压波的折反射。最终在负载上形成一个幅值为  $2nU_0$ 、脉宽为  $2\tau_1$  的脉冲。  
n级发生器的理想输出波形如图2中虚线所示。当负载阻抗不匹配时,在主脉冲形成时会有电压波反射进入 TLT,之后全部馈入 Blumlein 传输线,经过几次折反射后又重新输出至负载上面,造成负载上波形的振荡。控制开关在电压波振荡期间一直处于闭合状态。当负载阻抗  $Z_L > 2nZ_1$  时,负载电压  $U_L$  波形如图4所示;当负载阻抗  $Z_L < 2nZ_1$  时,负载电压  $U_L$  波形如图5所示。其中  $k = 2Z_L / (2nZ_1 + Z_L)$ , 当  $Z_L > 2nZ_1$  时,  $k > 1$ ; 当  $Z_L < 2nZ_1$  时,  $k < 1$ 。

压比,输入端阻抗与负载阻抗的阻抗比为  $1:4n^2$ 。所以这种拓扑结构与普通的 TLT 相比,在实现相同电压比的情况下,能够大大地减小输出阻抗,使该拓扑结构更适用于小阻抗负载,适用范围更广。

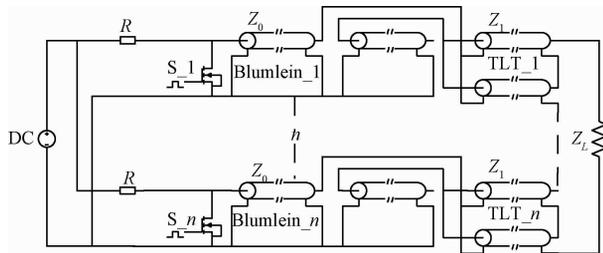


图3 n级发生器原理

Fig. 3 Schematic diagram of the n-stage pulse generator

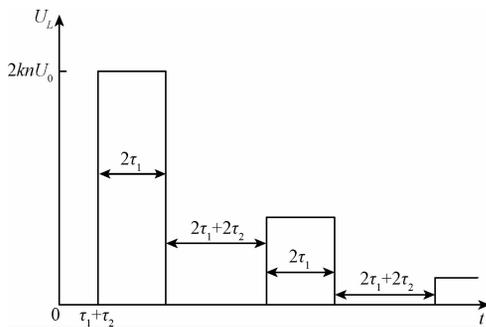


图4 n级阻抗  $Z_L > 2nZ_1$  时输出波形

Fig. 4 Voltage waveform of the load in n-stage when  $Z_L > 2nZ_1$

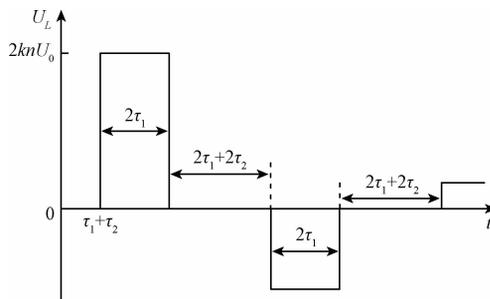


图5 n级阻抗  $Z_L < 2nZ_1$  时输出波形

Fig. 5 Voltage waveform of the load in n-stage when  $Z_L < 2nZ_1$

2 发生器设计

发生器中主要包含了 Blumlein 传输线、TLT 以及固态开关等,其中发生器中所包含的 Blumlein 传输线全部使用微带线的形式实现。

由发生器的原理分析可以看出,在阻抗匹配时 TLT 输入端的脉冲电压幅值与负载电压幅值之比为  $1:2n$ , 变压器输入端阻抗与负载阻抗之比为  $1:4n$ 。而普通的 TLT 若要在阻抗匹配的情况下实现  $1:2n$  的输入输出电

### 2.1 微带传输线设计

图 6 所示为一个微带线的基本结构, 其中主要包含导体带、介质基板和接地板 3 个部分。微带线具有两个重要的参数, 分别是特性阻抗  $Z$  和电长度  $\tau$ 。通过改变导体宽度、介质基片类型可以方便的改变微带线的特性阻抗。

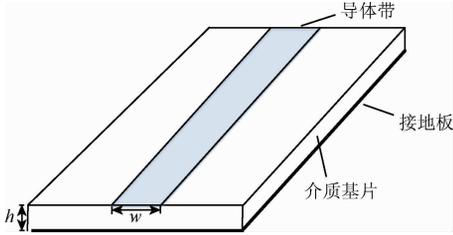


图 6 微带线结构示意图  
Fig. 6 Structure of microstrip line

在准静态横向电磁 (transverse electric and magnetic, TEM) 传输模式<sup>[23-24]</sup>下, 微带线特性阻抗  $Z$  的近似求解公式如式(3)所示 (在  $0.05 < w/h < 20$ , 范围内, 精度优于 1%)。

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{8e^A}{e^{2A} - 2}, & \frac{w}{h} \leq 2 \\ \frac{2}{\pi} \left[ B - 1 - \ln(2B - 1) + \frac{\epsilon_r - 1}{2\epsilon_r} (\ln(B - 1) + 0.39 - \frac{0.61}{\epsilon_r}) \right], & \frac{w}{h} > 2 \end{cases} \quad (3)$$

其中:

$$A = \frac{Z}{60} \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1}} \left( 0.23 + \frac{0.11}{\epsilon_r} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{377\pi}{2Z\sqrt{\epsilon_r}} \quad (7)$$

微带传输线相速度计算公式为:

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (8)$$

微带传输线导体带长度  $L$  计算公式:

$$L = \tau v_p = \frac{\tau c}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \quad (9)$$

式中:  $c$  为光速 ( $3 \times 10^8$  m/s),  $L$  为微带传输线导体带长度, 单位为 m。

在本次设计中, 选取 FR4 作为介质基板材料, 其相对介电常数为 4.4, 介质基板的厚度为 0.8 mm。发生器中 Blumlein 传输线中的每条传输线特性阻抗为 12.5  $\Omega$ 。设计发生器的输出脉宽为 100 ns, 所以 Blumlein 传输线中每条传输线的电长度为 50 ns。Blumlein 中每条传输线的参数如表 1 所示。整个的微带线设计使用 4 层印制电路板 (PCB) 实现, 上层与下层为走线层, 中间两层为接地层, 上下两层走线通过过孔进行连接。使用多层 PCB 设计微带线可以大大降低发生器的尺寸。整个 PCB 设计的俯视图如图 7 所示, 在设计中使用弯曲走线方式, 减小了走线所占的面积, 从而减小了整个发生器的体积。

$$Z = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left( \frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), & \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}} \left[ \frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left( \frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]}}, & \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $w$  为微带线导带的宽度,  $h$  为介质基板的高度,  $\epsilon_{\text{eff}}$  为等效介电常数。等效介电常数  $\epsilon_{\text{eff}}$  的计算公式为:

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{h}{w}}} \quad (4)$$

式中:  $\epsilon_r$  为介质基板相对介电常数。式(3)、(4)给出了在已知微带传输线的物理尺寸情况下, 求解微带线特性阻抗  $Z$  的方法。但在设计过程中, 一般需要先确定微带线的特性阻抗  $Z$ , 进而确定微带线的尺寸。在已知微带线阻抗  $Z$  的情况下, 微带线的物理尺寸的计算公式如式(5)。

$$\frac{w}{h} = \begin{cases} \frac{w}{h} \leq 2 \\ \frac{w}{h} > 2 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 TLT 设计

使用同轴电缆设计发生器中所用的 TLT。使用型号为 RG-142 的同轴电缆, 特征阻抗为 50  $\Omega$ , 直径 4.95 mm, 直流耐压 1.9 kV, 每段传输线长度为 1.5 m。发生器每一级模块中包含一个二级的 TLT。传输线之间采用超小 A 型接头 (sub-miniature-A, SMA) 接头进行连接。TLT 使用镍锌铁氧体磁芯, 初始磁导率为 850, 外径 5 cm, 内径 2.5 cm, 高度 2 cm。将同轴电缆绕制在铁氧体磁芯上面, 两端各留 8 cm 作连接用。

表 1 微带传输线参数表

Table 1 Parameters of microstrip transmission line				
$Z/\Omega$	$h/\text{mm}$	$W/\text{mm}$	$L/\text{m}$	$\tau/\text{ns}$
12.5	0.8	9.6	3.807	50

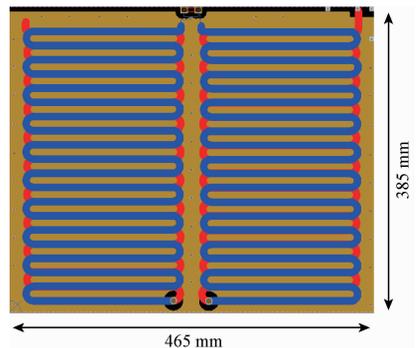


图 7 PCB 型微带传输线俯视图

Fig. 7 Top view of the microstrip line made from PCB

### 2.3 固态开关设计

为了实现发生器高频纳秒脉冲的要求,需要一种能够工作在高频下的固态功率开关<sup>[25-28]</sup>。本文选用 IXYS 公司的 DE475 开关,搭配能够提供大驱动电流的驱动芯片 IXRFD631。因为需要每个单元模块中的开关同步导通,所以使用 FPGA 来产生多路同步的触发信号。在整个控制回路中,用 FPGA 产生并行同步的控制信号,控制信号通过光纤传递至驱动芯片的输入端,进而驱动 MOS 管工作。控制信号使用光纤进行传递,可以隔离高压电路对低压控制电路的影响,使系统稳定工作。

## 3 发生器性能测试

为了验证前面所提出的发生器原理,依照前述的拓扑结构搭建了一个三级的脉冲发生器。依据测试要求搭建了测试平台,测试了在阻抗匹配和阻抗不匹配两种情况下的负载波形。

### 3.1 测试系统

发生器测试平台如图 8 所示。实验所用的电源为天津东文 DW-P102-40ACEO 型高压直流电源,可以提供 1 000 V、40 mA 的高压直流;示波器使用力科的 WAVEPRO7Zi-A 示波器,带宽 4 GHz;探头使用力科的 PPE5kV 高压探头,带宽 400 MHz,满足测试精度要求。

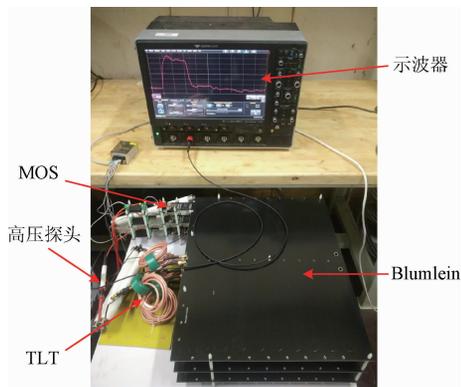


图 8 发生器测试平台

Fig. 8 The testing platform with a two-stage generator

### 3.2 负载波形测试

为了测试发生器的性能,分别在负载阻抗匹配和阻抗不匹配的情况下,对负载波形进行了测试。

#### 3.2.1 负载阻抗匹配测试

实验搭建的发生器为一个三级的原型机,根据前文所述的阻抗匹配的条件,阻抗匹配时,负载阻抗为 300  $\Omega$ ,使用无感电阻作为负载进行测试。

##### 1) 不同充电电压下的负载波形

本文中测试了发生器在不同充电电压下的输出波形。当充电电压分别为 100、200、400、600 V 时,负载波形

如图 9 所示。由图 9 可以看出随着充电电压的上升,输出脉冲幅值也升高。不同充电电压下,各脉冲的上升沿和下降沿均为 15 ns,半高宽均为 100 ns,符合设计要求。

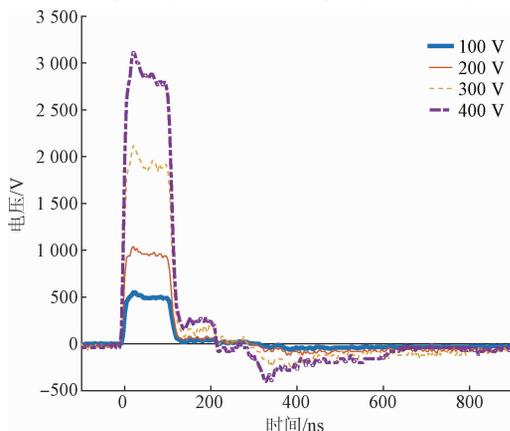


图 9 不同充电电压下负载波形

Fig. 9 The output waveforms on the load with different charging voltage

##### 2) 高频下负载波形

为了测试发生器在高频输出下的性能,测试了三级发生器在充电电压为 600 V,重复频率为 10 kHz 时的输出波形,如图 10 所示。在高频情况下,发生器能够稳定输出。但由于在 Blumlein 传输线放电完成后,需要对 Blumlein 进行充电后才能进行下一次放电,所以当输出脉冲重复频率较高,充电电阻较小时,充电过程中会在负载上形成一个负极性的电压波,因此在每个脉冲结束后,有一个向下的尖峰。

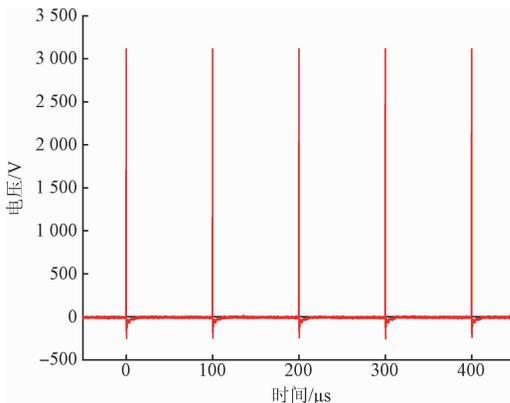


图 10 充电电压为 600 V 时负载波形

Fig. 10 The output waveforms of the different stages with 600 V charging voltage

##### 3) 不同级数下负载波形

为了测试发生器的在不同级数下的性能,验证发生器的拓扑结构,对发生器进行了一级、二级和三级单元模块情况下的输出测试。在充电电压为 600 V,并且阻抗匹配时,测试结果如图 11 所示。3 个波形主脉冲上升沿与下

降沿时间基本一致,且半高宽基本相同。但随着发生器级数的升高,杂散参数增加,脉冲顶部的波动也会变大。

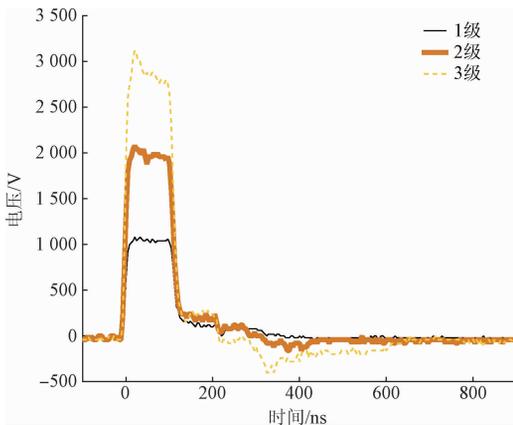


图 11 充电电压为 600 V 时不同级数下负载波形  
Fig. 11 The output waveforms of the different stages with 600 V charging voltage

### 3.2.2 负载阻抗不匹配测试

为了检验发生器在负载端阻抗不匹配时的性能,在 3 级单元模块情况下,测试了负载的输出波形。当充电电压为 600 V,负载分别为 100、200、300 (阻抗匹配)、400、500  $\Omega$  时,负载波形如图 12 所示。当负载阻抗大于匹配负载时,负载波形主脉冲幅值相对于阻抗匹配时升高,反之当负载阻抗小于匹配负载时,输出脉冲主脉冲幅值相对于阻抗匹配时下降。当阻抗不匹配时,在主脉冲结束后尾部存在波形的振荡,与图 4、5 所示的理论输出波形相对应,但主脉冲结束后的振荡波形与理论输出有差别。这是因为传输线存在损耗,电压波传输的时间越长,其损耗越严重。在阻抗不匹配的情况下,当电压波传输至负载时,会产生电压波的折反射,反射波走过更长的距离后再输出至负载,损耗更加严重,所以实际测试时,主脉冲结束后的振荡波形相比理想输出会有一些畸变。

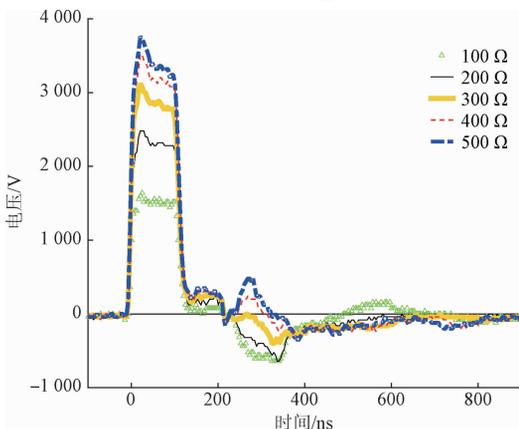


图 12 充电电压为 600 V 时不同负载下输出波形  
Fig. 12 The output waveforms of the different loads with 600 V charging voltage

## 4 结 论

本文提出了一种基于 Blumlein 传输线和 TLT 的模块化设计的新型拓扑结构来产生高频纳秒脉冲。拓扑结构结合了 Blumlein 传输线和 TLT 的优势,在保证电压变比的情况下,减小了输入输出阻抗的变比。设计中使用了微带线作为传输线,可以方便地与负载进行阻抗匹配,并且大大提高了系统的紧凑性。在开关方面使用了 MOS 管,方便系统产生高频纳秒脉冲,并实现系统的全固态设计。搭建了三级模块发生器,负载匹配时可以输出幅值 0~3 kV 可调,脉宽 100 ns,重复频率 0~10 kHz 可调的高频纳秒脉冲,验证了所提出的设计方案。搭建的发生器可以用来进行高频纳秒脉冲治疗肿瘤技术的微观机理研究。

## 参考文献

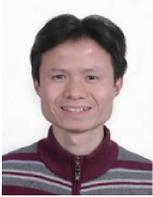
- [1] AKIYAMA H, SAKUGAWA T, NAMIHIRA T, et al. Industrial applications of pulsed power technology [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2007, 14(5):1051-1064.
- [2] MCNAB I R. Developments in pulsed power technology [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1):375-378.
- [3] SCHOENBACH K H, KATSUKI S, STARK R H, et al. Bioelectrics-new applications for pulsed power technology [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2002, 30(1):293-300.
- [4] 章程,邵涛,于洋,等.纳秒脉冲介质阻挡放电特性及其聚合物材料表面改性[J].电工技术学报,2010,25(5):31-37.  
ZHANG CH, SHAO T, YU Y, et al. Characteristics of unipolar nanosecond pulse DBD and its application on surface treatment of polymer films [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5):31-37.
- [5] BRETON M, MIR L M. Microsecond and nanosecond electric pulses in cancer treatments [J]. Bioelectromagnetics, 2012, 33(2):106-123.
- [6] BERTACCHINI C, MARGOTTI P M, BERGAMINI E, et al. Design of an irreversible electroporation system for clinical use [J]. Technology in Cancer Research & Treatment, 2007, 6(4):313-320.
- [7] LONG G, SHIRES P K, PLESCIA D, et al. Targeted tissue ablation with nanosecond pulses [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2011, 58(8):2161-2167.

- [ 8 ] NUCCITELLI R, LUI K, KREIS M, et al. Nanosecond pulsed electric field stimulation of reactive oxygen species in human pancreatic cancer cells is  $\text{Ca}^{2+}$ -dependent[J]. *Biochemical & Biophysical Research Communications*, 2013, 435(4):580-585.
- [ 9 ] YAN M, RUI S, LI C, et al. Multi-parametric study of temperature and thermal damage of tumor exposed to high-frequency nanosecond-pulsed electric fields based on finite element simulation [ J ]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2017, 55(7):1109-1122.
- [ 10 ] HAAS K, SIN W C, JAVAHERIAN A, et al. Single-cell electroporation for gene transfer in vivo [ J ]. *Neuron*, 2001, 29(3):583-591.
- [ 11 ] LU C, WANG J, STINE M J. Microfluidic cell electroporation using a mechanical valve [ J ]. *Analytical Chemistry*, 2007, 79(24):9584-9487.
- [ 12 ] 郝慈环, 吕金诺. 基于 FPGA 的质谱仪高压脉冲电源设计 [ J ]. *国外电子测量技术*, 2016, 35(7):101-105.  
HAO C H, LV J N. Design of high-voltage pulse power supply based on FPGA used in TOFMS [ J ]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(7):101-105.
- [ 13 ] 夏涛, 吴云峰, 王胜利, 等. 基于功率 MOSFET 的高压纳秒脉冲源研究 [ J ]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(12):1852-1861.  
XIA T, WU Y F, WANG SH L, et al. Research on high-voltage nanosecond pulse generator based on power MOSFET [ J ]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29(12):1852-1861.
- [ 14 ] 米彦, 储贻道, 蒋春, 等. 基于聚焦线圈和固态开关的脉冲磁场发生器 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(7):1639-1645.  
MI Y, CHU Y D, JIANG CH, et al. Pulsed magnetic field generator based on spatially focusing coil array and solid state switch [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7):1639-1645.
- [ 15 ] 熊慧, 李刚, 张旺明, 等. 无线无源的参数可控脉冲发生器 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(4):955-960.  
XIONG H, LI G, ZHANG W M, et al. Wireless passive pulse generator with controllable parameters [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(4):955-960.
- [ 16 ] 姚陈果, 赵东阳, 王剑飞, 等. 一种诱导肿瘤细胞凋亡的多参数可调高压纳秒脉冲发生器 [ J ]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(5):1108-1113.  
YAO CH G, ZHAO D Y, WANG J F, et al. Multi-parameter adjustable high-voltage nanosecond pulse generator for inducing apoptosis of tumor cells [ J ]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(5):1108-1113.
- [ 17 ] LINDBLOM A, APPELGREN P, LARSSON A, et al. Pulsed power transmission line transformer based on modern cable technology [ J ]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2003, 31(6):1337-1343.
- [ 18 ] REBERSEK M, KRANJC M, PAVLIHA D, et al. Blumlein configuration for high-repetition-rate pulse generation of variable duration and polarity using synchronized switch control [ J ]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, 56(11):2642-2648.
- [ 19 ] KOLB J F, KONO S K, SCHOENBACH K H. Nanosecond pulsed electric field generators for the study of subcellular effects [ J ]. *Bioelectromagnetics*, 2006, 27(3):172-187.
- [ 20 ] GRANEAU P N, ROSSI J O, BROWN M P, et al. A high-voltage transmission-line pulse transformer with very low droop [ J ]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, 67(7):2630-2635.
- [ 21 ] YAN K, VAN HEESCH E J M, PEMEN A J M, et al. A 10 kW high-voltage pulse generator for corona plasma generation [ J ]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(5):2443-2447.
- [ 22 ] QIU J, LIU K, WU Y. A pulsed power supply based on power semiconductor switches and transmission line transformer [ J ]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2007, 14(4):927-930.
- [ 23 ] LEE T H. *Planar microwave engineering* [ M ]. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [ 24 ] 廖承恩. *微波技术基础* [ M ]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001.  
LIAO CH EN. *Microwave technology foundation* [ M ]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2001.
- [ 25 ] GAO L, WANG D, QIU J, et al. All-solid-state pulse adder with bipolar high voltage fast narrow pulses output [ J ]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2011, 18(3):775-782.
- [ 26 ] REDONDO L M, SILVA J F. Repetitive high-voltage solid-state marx modulator design for various load conditions [ J ]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2009, 37(8):1632-1637.
- [ 27 ] MANKOWSKI J, KRISTIANSEN M. A review of short pulse generator technology [ J ]. *IEEE Transactions on*

Plasma Science, 2000, 28(1):102-108.

- [28] JIANG W, YATSUI K, TAKAYAMA K, et al. Compact solid-state switched pulsed power and its applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(7):1180-1196.

### 作者简介



米彦(通讯作者),2009 年于重庆大学获得博士学位,现为重庆大学高电压与绝缘技术系教授、博士生导师,主要研究方向为脉冲功率技术及其生物工程应用。

E-mail: miyan@cqu.edu.cn

**Mi Yan** (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 2009. Now he is

a professor and doctoral supervisor in Chongqing University. His main research interests include pulse power technology and its application in biomedical engineering.



卞昌浩,2015 年于中南大学获得学士学位,现为重庆大学高电压与绝缘技术系硕士研究生,主要研究方向为脉冲功率技术。

E-mail: bianch@cqu.edu.cn

**Bian Changhao** received his B. Sc. degree from Central South University in 2015. Now he is a graduate student in Chongqing University. His main research interest is pulse power technology.