



·脉冲功率技术·

高触发信号和功率合成的高峰值功率皮秒脉冲源

张雅茹, 陈 袞, 李 杨, 杨宏春, 魏召唤

(电子科技大学 物理学院, 成都 611731)

摘 要: 对于目标的攻击、干扰和探测, 超宽带时域脉冲源的幅值直接影响其攻击、干扰和探测的强度和效果。基于雪崩晶体管的 Marx 电路被广泛应用在产生此类信号源上, 传统的 Marx 电路可以一定程度上提高输出电压的幅值, 但由于雪崩晶体管功率容量较低等原因, 雪崩晶体管的 Marx 电路输出电压幅度会随级数增加而达到饱和。针对此类问题, 为了产生更高幅值的脉冲信号, 综合采用提高触发信号和使用宽带功率合成器的手段。最终利用 26 级 Marx 电路作为触发信号, 4 路 40 级 Marx 电路进行功率合成的方法, 实现了输出电压幅值为 8.7 kV、上升沿约为 180 ps 的技术指标, 并通过机理分析了高触发信号对雪崩晶体管 Marx 电路的影响, 通过实验得到了印证。

关键词: 高电压触发信号; 高功率脉冲源; 皮秒脉冲源; 雪崩三极管; Marx 电路

中图分类号: TN782

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.210449

High-power picosecond pulse source based on high trigger signal and power synthesis

Zhang Yaru, Chen Xi, Li Yang, Yang Hongchun, Wei Zhaohuan

(School of Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: For the attack, interference and detection of the target, the amplitude of the UWB time-domain pulse source directly affects the intensity and effect. The Marx circuit based on avalanche transistors is widely used to generate such signal sources. The traditional Marx circuit can increase the amplitude of the output voltage to a certain extent. However, due to the low power capacity of the avalanche transistor, the output voltage of the Marx circuit of the avalanche transistor is low. The amplitude will reach saturation with the increase of the number of stages. To generate a higher amplitude pulse signal, this study comprehensively adopts the means of increasing the trigger signal and using a broadband power combiner. Finally it uses a 26-level Marx circuit as the trigger signal, by the method of 4-channel 40-level Marx circuit for power synthesis, the output voltage amplitude is 8.7 kV, the rising edge is about 180 ps, and the impact of high trigger signal on the avalanche transistor Marx circuit is analyzed through mechanism. The experiment was confirmed.

Key words: highvoltage trigger signal, high-power pulse source, picosecond pulse, avalanche transistor, Marx circuit

基于雪崩晶体管的固态高峰值功率脉冲源具有稳定性好、脉冲幅度高等优点广泛应用于生物医学^[1-3]、超宽带雷达^[4]、激光脉冲开关^[5]、高速摄影^[6]、探地雷达^[7]、低温等离子体^[8]、静电沉淀^[9]、污水处理^[10]、检测和识别挥发性和半挥发性有机化合物^[11]等领域。

能够产生高峰值功率脉冲的固态电路形式主要包括雪崩晶体管串联电路、 $1 \times N$ 级 Marx 电路(MBC)以及 $M \times N$ 级(其中 M 代表每一级所含雪崩晶体管的个数, N 代表 Marx 电路的级数)Marx 电路(MBCs)3 种。徐乐等人^[12]采用雪崩晶体管串联电路实现最大输出幅值为 6 kV、上升沿约为 4 ns 的脉冲信号。但由于电路需要很高的偏置

* 收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-02-18
基金项目: 国家自然科学基金项目(61871071)
联系方式: 张雅茹, 202022120408@std.uestc.edu.cn。
通信作者: 李 杨, yli@uestc.edu.cn;
杨宏春, yhc690227@uestc.edu.cn。

电压,单管的损坏可能造成整个电路的失效,故目前采用这样电路形式的较为少见。西安交通大学 ShenSaikang 等人^[13-15]采用 $M \times N$ 级 Marx 电路,同时增加辅助触发拓扑(ATT),经过不断的优化, 4×10 级 MBCs 在负载为 75Ω 下,电压幅度可以达到 $5 \sim 10$ kV,上升时间可以达到 $4 \sim 10$ ns,重复频率可以达到 7 kHz。邓子臣^[16]等人采用 $M \times N$ 级 Marx 电路,加以线性变压器驱动(LTD)拓扑以及 ATT 拓扑为辅助,在负载为 50Ω 下,得到电压幅度为 10.9 kV,上升沿为 3.3 ns 的脉冲信号。此类拓扑电路虽然可以产生较高的电压,但是前几级的失效率较高,上升时间较长,体积较大。相比于雪崩晶体管串联电路和 $M \times N$ 级 Marx 电路, $1 \times N$ 级 Marx 电路具有可靠性好,上升沿较快,体积较小等优势,认为是一种具有潜力的高峰值脉冲产生技术。张萌^[17]等人采用 1×9 级 Marx 电路,在负载为 50Ω 下,产生了电压幅值为 280 V、上升沿为 150 ps 的脉冲信号。但是由于雪崩晶体管单管的功率容量低,使得系统输出电压受到一定限制;采用 Marx 电路时,输出电压会随级数的增加达到饱和,很难产生更高的幅值。如果需要进一步提高输出信号幅度,则可以采用功率合成的方式。李江涛等人^[18]采用了混合脉冲拓扑的功率合成法,结合了 DPA 和 TLT 两种方法,产生了幅度为 14 kV、上升时间为 3.87 ns,脉宽为 11.3 ns 的脉冲,杨庆熙等人^[19]采用多节距蛇形结构的功率合成方法,通过 4 路合成电压幅值为 5 kV、脉宽约为 13 ns 的脉冲,但这些合成方法均有合成效率较低、波形稳定度较差、时基抖动较大等问题。

本文首先通过在集电极和发射极之间给予高电压触发信号的方法,将单路脉冲源输出幅度提高到约 4.65 kV,上升沿保持在约 180 ps,并在此基础上进一步采用 Wilkinson 合路器进行功率合成,将系统整体的输出电压提升到 8.7 kV,前沿基本保持不变。

1 理论分析

1.1 高电压触发信号对输出幅度的影响

由于雪崩晶体管单管功率容量低,单路脉冲源的输出电压会随级数的增加而趋于饱和,输出效率随之下降。根据雪崩晶体管的输出特性可得,当雪崩晶体管发生雪崩效应时,高能电子撞击晶格产生新的电子-空穴对,该电子具有很高的动能,因此在撞击出新的载流子后,其仍然有足够的能量继续撞击产生新的载流子,同时被撞击出的电子在强电场的作用下加速,也会撞击晶格产生载流子,最终 PN 节中的载流子呈几何级数上升,在极短的时间内(ps 级)晶体管由截止状态转为雪崩导通状态,在这一过程中,决定输出电压的主要是雪崩倍增因子^[20],表达式为

$$M = \frac{J}{J_0} = \frac{1}{1 - \int_0^a \alpha(\zeta, x) dx} \quad (1)$$

式中: M 为雪崩倍增因子; J 为输出端流出电流; J_0 为输入端流入电流; $\alpha(\zeta, x)$ 为电离率,表达式为

$$\alpha = A_i e^{\left[-\left(\frac{b_i}{E(x)} \right)^m \right]} \quad (2)$$

式中: A_i , b_i , m 是常数, $A_i = 7.03 \times 10^5 \text{ cm}^{-1}$, $b_i = 1.23 \text{ MV/cm}$ ^[21]; $E(x)$ 是电场强度。由式(1)和(2)可知,提高触发电压会使 M 增加,而 M 的增加会使得雪崩晶体管输出特性曲线左移,更加容易进入雪崩状态。因此触发电压的增加,会影响到 PN 结中载流子的数量以及雪崩倍增因子 M 的大小^[22-23]。

1.2 高电压触发信号对脉冲源时基抖动的影响

在脉冲信号的各个参数中,脉冲时基抖动不仅是评估输出信号质量的重要指标,也是影响功率合成的重要因素^[24]。通过研究发现,高电压触发信号可以减少脉冲抖动。脉冲抖动主要由两方面的因素造成,一方面是雪崩晶体管自身 PN 结中载流子无规则的热运动,另一方面是外加电压的纹波和环境噪声。这些因素会影响晶体管从截止状态到雪崩状态的转换时间,从而引入时基抖动。提高触发电压可以使得雪崩晶体管快速进入雪崩状态,减少晶体管从截止状态到雪崩状态的转换时间,从而减少脉冲抖动。如图 1 所示,由于同一个型号的雪崩晶体管的雪崩电压是在标称值附近的一个小的范围内,假设最低雪崩电压值为 V_l ,最高雪崩电压值为 V_h 。图中两条曲线分别表示低电压触发和高电压触发下,雪崩晶体管在 V_l 至 V_h 雪崩电压范围之间需要的雪崩

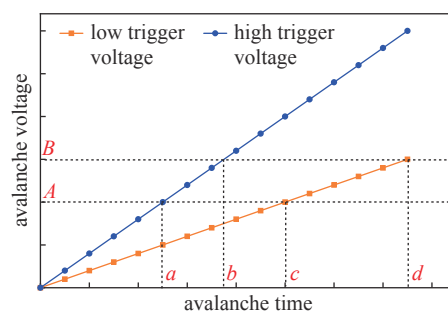


Fig. 1 High trigger voltage and low trigger voltage avalanche time comparison

图 1 高电压触发和低电压触发雪崩时间对比图

时间。低电压触发下雪崩时间为 c, d 之间的距离, 高电压触发下雪崩时间为 a, b 之间的距离, 显然高电压触发时转换时间更短, 可以让雪崩晶体管更快地进入雪崩状态, 进而减少脉冲抖动。

2 实验

2.1 实验电路

如前所述, 高电压触发是指给脉冲源第一级电路的雪崩三极管一个上升沿较快、幅度较高的导通电压, 因此只要能达到指标要求, 触发电路的实现方式并不重要。本文采用另一个单独的 Marx 电路产生高幅度的脉冲信号作为触发信号。

2.1.1 触发电路

传统的脉冲源电路第一级的触发电压由数字电路产生, 常用的电压为 3.3, 5 或 12 V。为了实现高电压触发, 利用 26 级 Marx 电路产生一个幅度为 3.1 kV、上升沿为 194 ps、半峰值脉宽为 1.98 ns、触发抖动为 410 ps 的信号。电路原理图和脉冲波形如图 2、图 3 所示。

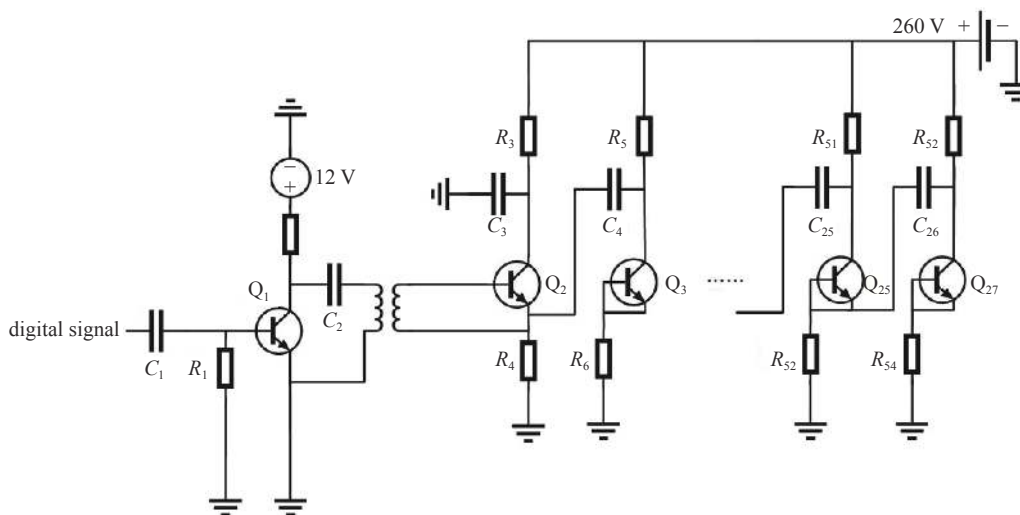


Fig. 2 Trigger circuit

图 2 触发电路

当输入信号为低电平时, 晶体管 Q_1 处于截止状态, 电容 C_2 充电至电源电压 12 V; 当输入信号由低电平到高电平跃变时, 电阻 R_1 和电容 C_1 构成微分电路对其进行整形, 产生一个窄脉冲使 Q_1 进入饱和导通状态; C_2 开始通过 Q_1 、变压器一次侧构成的回路放电, 并在变压器二次侧感应出一个脉冲信号, 触发 Q_2 导通。 Q_2 导通使 C_3, C_4 由原来的并联变为串联状态, Q_3 集电极上的电压为 2 倍的 U_{cc} , 从而进入雪崩状态。以此类推, 当电路中所有的晶体管都导通时, 电容向负载放电, 脉冲输出。输出电压理论上可以得到 nU_C (n 是 Marx 电路的级数, U_C 是电容上的充电电压) 的输出电压。

2.1.2 脉冲源电路

脉冲源电路是一个 40 级的 Marx 电路, 如图 4 所示。脉冲电路的结构和触发电路从三极管 Q_3 开始的电路结构一致, 工作原理相同。

2.2 器件参数

本实验所使用的核心器件有雪崩晶体管、储能电容、限流电阻和功分器。以下将对每个器件的参数和选取进行阐述。

2.2.1 FMMT415

由于产生的是峰值较高的脉冲源, 因此根据不同雪崩三极管的参数综合选取 FMMT415。具体参数如表 1 所示。

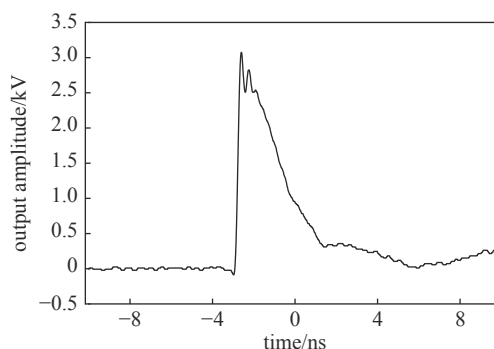


Fig. 3 Trigger signal

图 3 触发信号

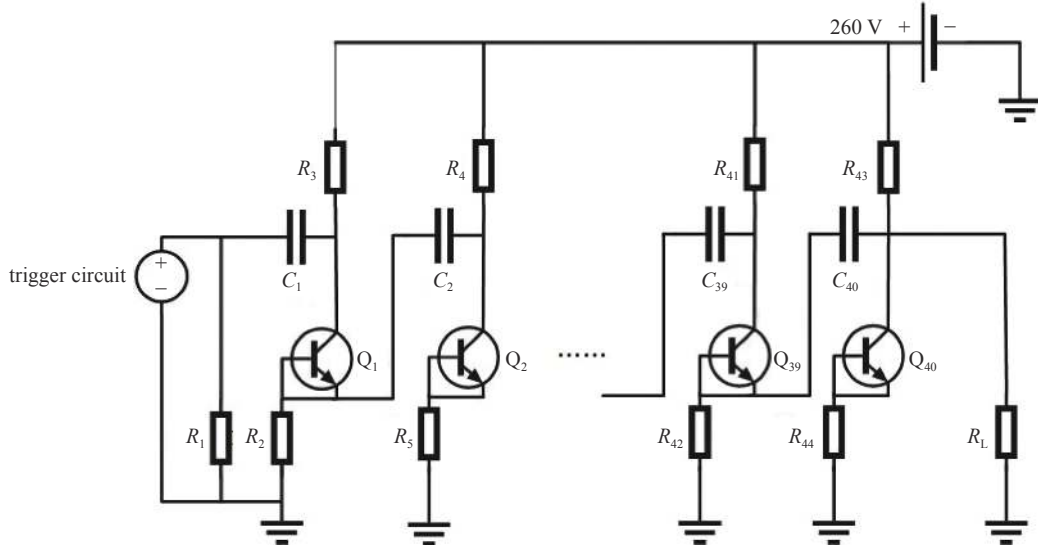


Fig. 4 Pulse circuit
图 4 脉冲电路

表 1 雪崩三极管技术指标

Table 1 Avalanche transistor specifications

collector-base voltage U_{CBO}/V	collector-emitter voltage U_{CES}/V	collector-emitter voltage U_{CEO}/V	emitter-base voltage U_{EBO}/V	continuous collector current I_C/V	peak collector current I_{CM}/V
260	260	100	6	500	60

2.2.2 电容

在整个脉冲电路中, 储能电容的上限由信号源的重复频率决定, 下限由时域信号的能量决定。对于 n 级 Marx 电路, 电容的下限为^[25]

$$C_i = \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2 \ln(2)}} \frac{T_e \kappa_\epsilon U_e^2}{R_1 (n U_0)^2} \quad (3)$$

式中: T_e 是半峰值脉宽; U_e 是目标峰值; U_0 是偏置电压; R_1 是负载电阻; n 是 Marx 电路的级数。

对于 26 级的触发电路, 取 $T_e = 2 \text{ ns}$, $U_e = 3 \text{ kV}$, $U_0 = 260 \text{ V}$, $R_1 = 50 \Omega$, $n = 26$, 且各级储能电容容值相同, 则 $C_i \geq 307 \text{ pF}$ 。对于 40 级的脉冲电路, 取 $T_e = 800 \text{ ps}$, $U_e = 5 \text{ kV}$, $U_0 = 260 \text{ V}$, $R_1 = 50 \Omega$, $n = 40$, 且各级储能电容容值相同, 则 $C_i \geq 220 \text{ pF}$ 。

由充电电路时间常数和重复频率确定电容的上限为^[25]

$$C_i \leq \frac{I_0}{n \kappa_\tau f_e U_0} \quad (4)$$

式中: I_0 是充电电路所需最大电流; U_0 是偏置电压; f_e 是重复频率; n 是 Marx 电路的级数; κ_τ 是重复频率的冗余系数。

对于 26 级的触发电路, 取 $f_e = 50 \text{ kHz}$, $U_0 = 260 \text{ V}$, $I_0 = 1 \text{ A}$, $n = 26$, $\kappa_\tau = 6$, 且各级储能电容容值相同, 则 $C_i \leq 493 \text{ pF}$ 。对于 40 级的脉冲电路, 取 $f_e = 50 \text{ kHz}$, $U_0 = 260 \text{ V}$, $I_0 = 1 \text{ A}$, $n = 40$, $\kappa_\tau = 6$, 且各级储能电容容值相同, 则 $C_i \leq 320 \text{ pF}$ 。

因此对于 26 级的触发电路来说, 电容的取值范围为 $307 \text{ pF} \leq C_i \leq 493 \text{ pF}$, 综合实验经验, 最终电容取值为 476 pF 。同理, 对于 40 级的脉冲电路, 电容的取值范围为 $220 \text{ pF} \leq C_i \leq 320 \text{ pF}$, 电容取值为 235 pF 。

2.2.3 电阻

电阻的下限是根据电源模块的额定电流决定的^[25], 即

$$R_i \geq \frac{n U_0}{2 I_0} \quad (5)$$

其中 26 级触发电路的下限为 $3.4 \text{ k}\Omega$, 40 级 Marx 电路的下限为 $5.2 \text{ k}\Omega$ 。

电阻的上限的选取时, 要求重复周期大于 5τ (τ 是电容的充电常数)。因此综合考虑触发电路和脉冲电路的电阻均取 $10 \text{ k}\Omega$ 。

2.2.4 功分器

采用的功率分配器为多节宽带 Wilkinson 功分器, 分别有 2 路功率分配器和 4 路功率分配器, 同时根据功率分配器的特性将输入输出对换后即可当作合路器进行使用。因此对应的 2 路和 4 路所使用的功率分配器和合路器均采用相同的型号和技术指标, 如表 2 所示。

表 2 功率分配器技术指标

Table 2 Technical indexes of power distributor

item	frequency/ MHz	insertion loss/ dB	input VSWR	output VSWR	isolation/ dB	impedance/ Ω	power rating/W	
							splitter	combiner
2-way	500~8000	≤ 1.5	1.15:1	1.11:1	27	50	30	2
4-way	380~2700	≤ 0.6	1.7:1	-	19	50	30	2

2.3 实验器材

实验器材主要包括数字脉冲发生器、线性稳压电源 (UTP3303)、可调直流电源 (JP15001D)、衰减器 (LH-AT500-60dB-8G-N) 和示波器 (Rohde & Schwarz RTO1024, 带宽 2 GHz, 采样率 10 GS/s)。

2.4 实验内容

2.4.1 功率合成产生高峰值功率脉冲

前面分析到, 单板的电压随级数的增加会趋于一定的饱和, 提高触发电压会增加输出电压的幅度, 具体分析结果如图 5 所示。由图 5(a) 表明, 随级数的增加, 幅度增加逐渐缓慢, 效率开始变低。由图 5(b) 表明, 提高触发电压确实会提高输出电压, 这样的结果和团队之前的研究结果相吻合^[26]。

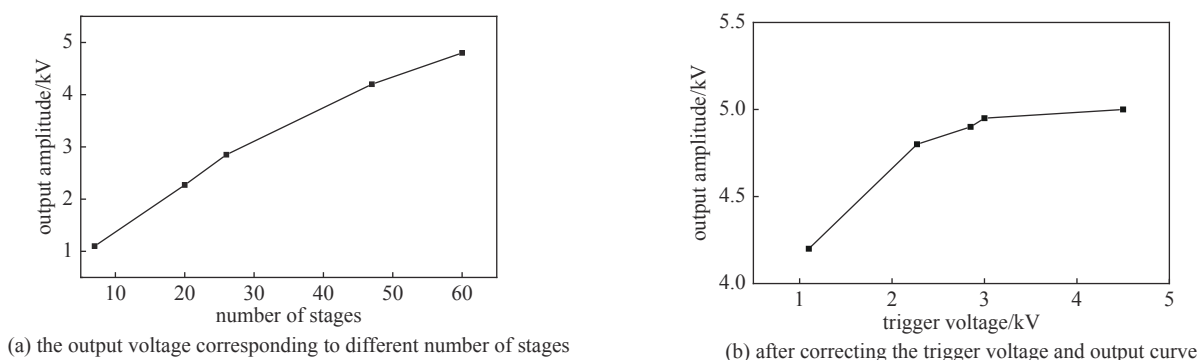


Fig. 5 Effect of single-board stage and trigger voltage on output voltage, respectively

图 5 单板级数和触发电压分别对输出电压的影响

实验结果显示高电压触发可以一定程度的增加单板输出电压幅度, 但是随总体级数的增加, 雪崩管的导通内阻变得不能忽略。从图 5(b) 中可以明显地发现, 随触发电压的提升, 初期输出电压幅值上升较明显, 但是在后期阶段电压提升程度逐渐减缓, 此时即达到或接近输出饱和状态。

2.4.2 功率合成产生高峰值脉冲

高电压触发在一定程度上可以增加输出电压, 但是受到输出饱和的限制, 单板电压无法有效提升。为了得到更高的输出电压, 可以通过采用功率合成的方法进一步提高输出电压。如上所述, 脉冲合成的要点是脉冲本身的抖动较小, 以及各路脉冲的延迟较小。下面将分别对脉冲抖动和脉冲延迟进行验证。

2.4.2.1 脉冲抖动测试

分别采用低电压触发和高电压触发两种触发方式对同一块脉冲板进行触发, 然后分别采用示波器对不同触发方式的脉冲的抖动进行测试, 下文所述的抖动均采用均方抖动。测试示意图如图 6 所示。

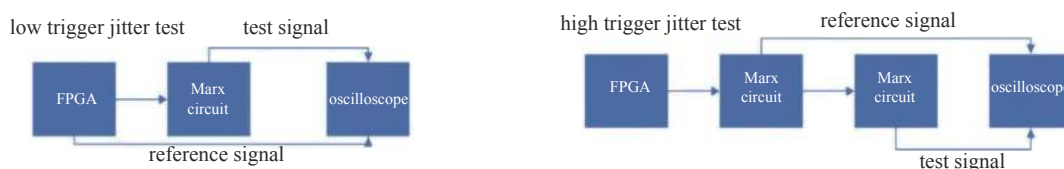


Fig. 6 Trigger jitter test

图 6 触发电抖动测试

在测试低电压触发动抖时,将 FPGA 方波信号作为参考信号,Marx 电路的输出作为测试信号,利用示波器测试输出脉冲的脉冲抖动,低电压触发动抖下,脉冲的均方抖动为 410.07 ps。

在测试高电压触发动抖时,将第 1 路 Marx 电路的信号耦合后输出作为参考信号,通过第 1 路 Marx 电路高电压触发下的第 2 路 Marx 电路的输出作为测试信号,利用示波器测试输出脉冲的脉冲抖动,在高电压触发动抖下脉冲的均方抖动为 8.55 ps。

通过实验可以发现在高电压触发信号可以显著降低 Marx 脉冲信号源的时基抖动,这对于后续脉冲合成起到了至关重要的作用。

2.4.2.2 脉冲延迟测试

为了实现各路延迟的一致性,首先选择 4 块性能相同的 40 级脉冲电路,分别用相同的触发板进行触发。通过将任意两路信号接入示波器的两个通道内,进行延迟调整,达到各路之间的延迟小于 20 ps。调整延迟前后的脉冲波形如图 7 所示。

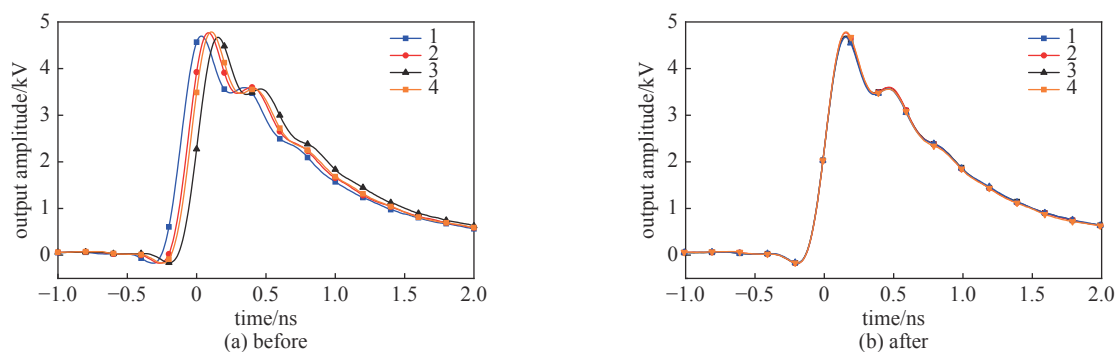


Fig. 7 Waveforms before and after the delay adjustment

图 7 调整延迟前后波形关系

从图 7(a)中可以看到,在未进行延迟调整之前,各路之间存在一定的延迟。如果未进行调整,在进行功率合成后,会使得波形的幅度较低,合成效率较差。未进行延迟调整前和调整延迟后 4 路合成如图 8 所示。

通过延迟调整后,各路脉冲之间的延迟非常小,已经满足了脉冲合成的前提条件。

2.4.2.3 功率合成

脉冲合成可以进一步提高输出电压,传统的脉冲合成方法包括感应式电压加法器、空间辐射功率组合、微带线、直接脉冲加法(DPA)、传输线变压器(TLT)、混合脉冲拓扑法以及多节距蛇形条结构等方法。为了提高功率合成的效率和稳定性,采用 Wilkinson 合路器对 Marx 信号源进行功率合成。合成方法是采用 26 级的 Marx 脉冲源作为触发板产生一个高电压触发脉冲信号,经过功分器分别分为 2 路和 4 路,每一路分别触发一块 40 级 Marx 信号源板,通过同轴线调节信号的延迟,最终通过合路器进行功率合成。通过功率合成,我们成功的在 2 路合成和 4 路合成后得到了 6.33, 8.76 kV 的高压。

(1) 2 路合成

为了实现功率合成,先采用 2 路的合路器进行合成,将触发板通过功率分配器分为 2 路,分别触发 2 块 40 级 Marx 脉冲源,最后通过合路器将信号输出,根据合路器的特性,当合路器两路等分时,2 路合路后的功率理论上应该是单路的 2 倍,电压是单路的 $\sqrt{2}$ 倍。当其中一路的终端接入 50 Ω 的匹配负载,另一端接入 50 Ω 的示波器时,示波器测试的单路的输出结果为 4.5 kV。因此理论上 2 路合成应该输出 6.4 kV。实际上经过合成后,得到了脉冲幅度为 6.34 kV,半峰值脉宽为 780 ps,上升沿为 172 ps 的高压脉冲(图 9)。经过计算合成效率为 99.6%。

(2) 4 路合成

同时,为了得到更高的脉冲,我们验证了利用 4 路功率分配器进行合成,同 2 路合成原理一样,先通过 4 路功

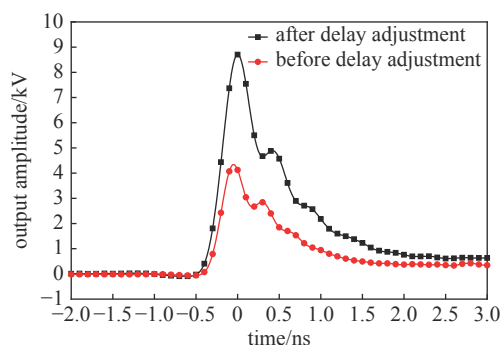


Fig. 8 Comparison of output amplitude before and after delay adjustment

图 8 延迟前后对比图

率分配器将触发信号平均分为4路,分别触发4块脉冲电路,最后通过4路的合成器进行合成。4路合路后的功率理论上应该是单路的4倍,电压是单路的2倍。其中当其中3路的终端接入 $50\ \Omega$ 的匹配负载,另一端接入 $50\ \Omega$ 的示波器时,示波器测试的单路输出结果为4.36 kV。因此理论上4路的合成应该输出8.72 kV。实际上经过合成后,得到了脉冲幅度为8.67 kV,半峰值脉宽为740 ps,上升沿为180 ps的高压脉冲(见图9)。经过计算合成效率为99.4%。

因此可以看到,通过2路和4路可以高效地产生更高峰值的脉冲电压,输出波形如图9所示。

2.5 讨论

首先验证了单板在级数增加的情况下会出现输出电压饱和的缺陷,验证了提高触发电压可以一定程度的增加输出电压的幅值。同时分别利用2路和4路的合路器对电路进行合成,从最终得到的电压可以看出,当合路数量越大,合成效率会越低。其中2路合成的合成效率为99.6%,4路合成的合成效率为99.4%,合成效率均较高。在实验中还对8路合成进行验证,但是由于8路功分器合成端口处会出现打火现象,这会造成大量的能量损失,从而使合成效率急剧减少。后续工作将围绕触发电路的优化和合路器结构设计进行展开。

3 结论

提出了采用高电压的方式对 $1\times N$ 级 Marx 电路进行触发以获得高输出电压。相比于低电压触发方式,高电压触发不仅可以产生更高的峰值电压,同时可以减小脉冲的触发抖动,可以将脉冲的触发抖动减小到10 ps以内,为脉冲的合成提供了良好的条件。同时,通过合路器,对2路和4路脉冲源进行合成,分别得到了6.34, 8.67 kV的高峰值,且脉冲的上升沿均约为180 ps,整个电路体积较小,性能稳定,适合应用于医疗、军事等领域。

参考文献:

- [1] Krishnaswamy P, Kuthi A, Vernier P T, et al. Compact subnanosecond pulse generator using avalanche transistors for cell electroperturbation studies[J]. *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(4): 873-877.
- [2] Petrella R A, Schoenbach K H, Xiao Shu. A dielectric rod antenna for picosecond pulse stimulation of neurological tissue[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(4): 708-714.
- [3] Xiao Shu, Guo Siqi, Nesin V, et al. Subnanosecond electric pulses cause membrane permeabilization and cell death[J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, 58(5): 1239-1245.
- [4] Wang Qing, Tian Xiaojian, Liu Yang, et al. Design of an ultra-wideband pulse generator based on avalanche transistor[C]//2008 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2008: 1-4.
- [5] Jethwa J, Marinero E E, Müller A. Nanosecond risetime avalanche transistor circuit for triggering a nitrogen laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1981, 52(7): 989-991.
- [6] Lundy A, Parker JR, Lunsford J S, et al. Avalanche transistor pulser for fast-gated operation of microchannel plate image-intensifiers[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1978, 25(1): 591-597.
- [7] 袁雪林, 梁步阁, 吕波, 等. 探地雷达高功率高稳定度脉冲源设计[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(10): 1689-1692. (Yuan Xuelin, Liang Buge, Lv Bo, et al. High-power and high-stability pulser for ground penetrating radar[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1689-1692)
- [8] Ramezani M, Akmal A A S, Niayesh K. Solid-state high-voltage pulse generator for low temperature plasma ion mobility spectrometry[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(3): 1629-1636.
- [9] Takasaki M, Kurita H, Kubota T, et al. Electrostatic precipitation of diesel PM at reduced gas temperature[C]//2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Addison, 2015: 1-4.
- [10] Li Zi, Sakai S, Yamada C, et al. The effects of pulsed streamerlike discharge on cyanobacteria cells[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(5): 1719-1724.
- [11] Akiyama H, Sakugawa T, Namihira T, et al. Industrial applications of pulsed power technology[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2007, 14(5): 1051-1064.
- [12] 徐乐, 江伟华. 基于雪崩三极管的快前沿脉冲功率源研究[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 015001. (Xu Le, Jiang Weihua. Study of fast rising pulsed power generator based on avalanche transistors[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 015001)
- [13] Shen Saikang, Yan Jiaqi, Wang Yanan, et al. Further investigations on a modified avalanche transistor-based Marx bank circuit[J]. *IEEE Transactions on*

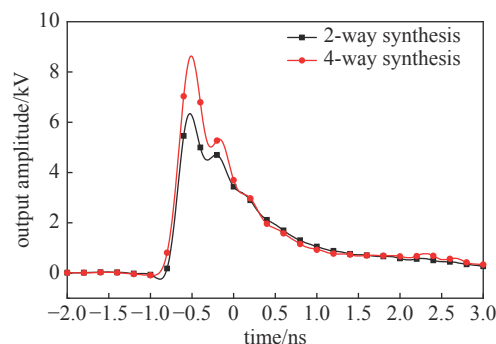


Fig. 9 Power synthesis

图9 功率合成

- [Instrumentation and Measurement](#), 2020, 69(10): 8506-8513.
- [14] Yan Jiaqi, Shen Saikang, Ding Weidong. High-power nanosecond pulse generators with improved reliability by adopting auxiliary triggering topology[J]. [IEEE Transactions on Power Electronics](#), 2020, 35(2): 1353-1364.
- [15] Shen Saikang, Yan Jiaqi, SunGuoxiang, et al. Improved auxiliary triggering topology for high-power nanosecond pulse generators based on avalanche transistors[J]. [IEEE Transactions on Power Electronics](#), 2021, 36(12): 13634-13644.
- [16] Deng Zichen, Yuan Qi, Shen Saikang, et al. High voltage nanosecond pulse generator based on avalanche transistor Marx bank circuit and linear transformer driver[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2021, 92: 034715.
- [17] 张萌. 基于Marx电路的亚纳秒级脉冲源研制[D]. 成都: 电子科技大学, 2020: 1-10. (Zhang Meng. Development of sub-nanosecond pulse source based on Marx circuit[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020: 1-10)
- [18] Li Jiangtao, Zhao Zheng, Sun Yi, et al. A hybrid pulse combining topology utilizing the combination of modularized avalanche transistor Marx circuits, direct pulse adding, and transmission line transformer[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2017, 88: 033507.
- [19] Yang Qingxi, Kang Qiaokun, Chen Xiaoyu, et al. A higher amplitude all solid state pulse source based on the power synthesis circuit[C]//Proceedings of SPIE 11763 Seventh Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications. 2021: 117635L.
- [20] 杨宏春. 基于光导开关的高功率微波系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008: 1-10. (Yang Hongchun. Research on high power microwave system based on photoconductive switch[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008: 1-10)
- [21] 浙江大学半导体器件教研室. 晶体管原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980. (Department of Semiconductor Devices, Zhejiang University. Transistor Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1980)
- [22] Mallik K. Nonuniform doping of the collector in avalanche transistors to improve the performance of Marx bank circuits[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2000, 71(4): 1853-1861.
- [23] Mallik K. The theory of operation of transistorized Marx bank circuits[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 1999, 70(4): 2155-2160.
- [24] QiuYangxin, XieYanzhao, Gao Mingxiang, et al. High power and high pulse repetition frequency transistorized pulser by time base stability improvement and power synthesis technique[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2020, 91: 084703.
- [25] 党龙飞. 钻孔测井雷达关键技术 with 原理样机研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2019: 1-10. (Dang Longfei. Research on key technologies and principles prototype of borehole logging[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2019: 1-10)
- [26] He Renjie, Li Yang, Liu Zhennan, et al. Development of a high peak voltage picoseconds avalanche transistor based Marx bank circuit[J]. [IEEE Access](#), 2021, 9: 64844-64851.