

三极管开关型 Marx 脉冲成形电路的改进

李 孜, 李 攀, 饶俊峰

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 介绍了三极管进入雪崩状态的3种方式,分析了采用三极管的脉冲电路的工作机理,研究了三极管做开关的 Marx 电路中限流电阻在电路中的作用,以及对电路造成的损耗问题及其对输出脉冲电压的影响,采用降低电阻的隔离电压和二极管代替部分电阻的方法提高脉冲电源的输出峰值.通过实验对比了不同方案的十级脉冲发生器的输出,结果表明,改进后的发生器输出脉冲电压幅值更高,二极管代替限流电阻方案的输出脉冲前沿更快,输入功率减小,输出功率增大,发生器的工作效率提高.

关键词: 三极管; Marx 电路; 雪崩; 纳秒脉冲

中图分类号: TM 836 **文献标志码:** A

Improvement on Marx Type Pulse Circuits Using Bipolar Junction Transistors as Switches

LI Zi, LI Pan, RAO Junfeng

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The bipolar junction transistor (BJT) is widely used in pulse generators for the advantages of high switching speed and high repetitive frequency. The ways for BJT performing in avalanche mode were introduced, and the working mechanism of a pulse circuit using BJT was analyzed. In the Marx circuit based on BJTs, the functions of current-limiting resistors, the circuit loss due to resistors and their influence on the magnitude of output pulse were analyzed theoretically and experimentally. The improvements using diodes to replace current-limiting resistors and using traditional Marx structure were proposed. The output pulses of four negative Marx pulse generators with 10-stage in different schemes were compared. It is shown that, the improved circuits have higher pulse magnitude, and the last circuit is the best method whose fall time is shortest and magnitude is highest. Furthermore, the output power increases but the input power decreases. The efficiency of the whole generator is improved.

Keywords: bipolar junction transistor; Marx circuit; avalanche; nanosecond pulse

收稿日期: 2016-04-29

基金项目: 上海市自然科学基金资助项目(13ZR1428100, 15YF1408300); 沪江基金资助项目(B14002/D14002)

第一作者: 李 孜(1972-), 女, 副教授. 研究方向: 脉冲功率技术. E-mail: lz7209@126.com

脉冲功率发生器被广泛应用在工业领域,如臭氧发生器、静电除尘及污染治理等,在这些应用中,为了效率的最大化,要求脉冲发生器的输出脉冲具有工作频率高、上升时间短等特点.因此,全固态开关,如IGBT,MOSEFT由于寿命长、工作频率高、稳定性好及尺寸小等优点被广泛应用在脉冲功率发生器中.但是,过大的开通电流会使这些半导体开关速度变慢,从而使输出脉冲上升时间增大到毫秒级,限制了发生器在一些领域的应用^[1].BJT(三极管)的雪崩击穿使其具有更快的导通速度,并且工作频率更高,体积更小,被应用在纳秒脉冲发生器中.BJT做开关的脉冲功率发生器由于其输出脉冲幅值高、前沿快、脉宽窄、工作频率高及抖动小等优点被广泛应用在探地雷达系统^[2]、激光脉冲驱动^[3]、细胞医疗^[4]及材料处理等领域^[5].单个BJT只能产生百伏级别的脉冲,为了得到几千伏甚至几十千伏的高压脉冲,必须要采用级联^[6]、Marx结构^[7]或者两者混合的结构^[8].本文采用Marx结构,分析了电路中限流电阻对输出脉冲的影响,提出了3种改进方案.最后设计了不同方案的十级脉冲发生器,并对比分析了4种发生器的实验结果.

1 BJT的雪崩击穿

具有雪崩击穿特性的BJT,在未发生雪崩击穿时,阻抗很高,相当于开路;发生雪崩击穿后,集电极和发射极的电位差降低,导通阻抗很小;雪崩过程的时间小于5 ns,恢复绝缘时间小于2 μ s,故可作为脉冲电路的开关.图1为单个BJT做开关的脉冲电路原理图,BJT处于截止状态时,直流电源 V_{CC} 通过限流电阻 R_C 和负载电阻 R_L 对储能电容 C' 充电;BJT雪崩击穿导通后,储能电容 C' 通过

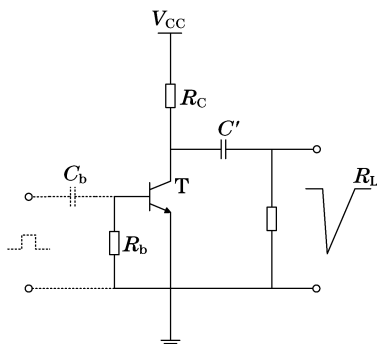


图1 单管脉冲电路原理图

Fig.1 Diagram of the pulse circuit with a BJT

BJT对负载电阻 R_L 放电,在 R_L 两端产生前沿很快的负脉冲.

BJT的雪崩导通方式有:触发导通、过压击穿导通和C-E极间电压上升率 dV/dt 引起导通^[9]. V 为电压, t 为时间.在脉冲电路中,BJT主要通过过压击穿和触发导通进入雪崩状态.图1中去掉虚线部分的电路,若持续增加直流电源电压 V_{CC} ,当 V_{CC} 高于集电极-基极击穿电压 V_{CBO} 几十伏时,BJT会进入雪崩状态,但这种方式下电路的工作频率是不可控制的,电路的工作频率与BJT的性能、充电时间常数以及 V_{CC} 的大小有关.

BJT的雪崩触发导通需在B-E极间电阻 R_b (取30~50 Ω)上加一个前沿很快的窄脉冲,通常采用微分电路来得到,故方波触发信号的脉宽要远远大于微分电路的时间常数.图2所示为NPN型BJT的雪崩工作特性曲线,图中有两段明显的负阻特性曲线,即雪崩区和二次击穿区.其中,雪崩区的范围是由BJT的集电极-发射极击穿电压 V_{CEO} 与 V_{CBO} 决定的;在雪崩区内,由于 R_b 和 V_{CC} ($V_{CEO} < V_{CC} < V_{CBO}$)的存在,BJT内部载流子发生移动,使基极电流 $I_B < 0$.而饱和区B-E极间没有 R_b , V_{CC} 远远小于 V_{CEO} , $I_B > 0$,这是BJT雪崩区和饱和区的开关特性的主要区别.图1电路中未加入触发信号时,对应的基极电流 $I_B = I_{B1}$,BJT处于截止状态,此时的静态负载线 PP_1 与雪崩特性曲线 a 交于处于正阻区内的 P 点;加入正触发信号后,基极电流 I_B 增大变为 I_{B2} ,静态负载线 PP_1 与雪崩特性曲线 b 交于处于负阻区内不稳定的 Q 点,使BJT迅速进入雪崩导通状态.如果集电极电流 i_c 持续增加,BJT会发生二次击穿,进入另一个负阻区即二次击穿区,集电极-发射极电压 u_{CE} 维持在更低的值,使负载两端得到幅值更高的脉冲.

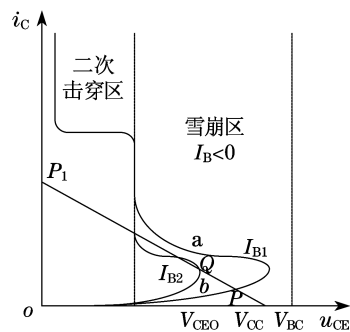


图2 雪崩工作特性曲线

Fig.2 Avalanche characteristics of BJT

2 采用 BJT 的 Marx 电路

2.1 工作原理

单管雪崩脉冲电路的输出脉冲峰值取决于 V_{CB0} , 本文采用的 BJT C1815 的 V_{CB0} 约为 175 V. 为了提高脉冲发生器的输出脉冲幅值, 本研究采用了图 3 所示的 Marx 电路. 为了防止 BJT 的过压击穿导通, 直流电源的电压 V_{CC} 略小于 V_{CB0} .

未加入触发信号时, BJT 的 $T_1 \sim T_5$ 处于截止状态, 储能电容 $C_1 \sim C_5$ 电压为 V_{CC} ; 加入触发信号后, T_1 发生雪崩击穿, C_1 左侧电位被拉低到零电位, 由于电容两端的电压不能突变, C_1 右侧的电位变为 $-V_{CC}$, C_2 左侧电位不变, T_2 两端的电压变为 $2V_{CC}$ (远远高于 V_{CB0}), T_2 发生雪崩击穿; 以此类推, $T_3 \sim T_5$ 依次进入雪崩击穿状态, 在 C_5 的右端产生瞬时高压, 各级电容通过 BJT 串联对负载电阻 R_L 放电, 在 R_L 两端产生前沿很快、幅值很高的负脉冲.

2.2 限流电阻对电路的影响

在 BJT 做开关的 Marx 电路中, 存在着很多限流电阻, 在充电过程中消耗直流电源的能量, 在放电

过程中消耗电源的能量和电容中储存的能量. 重复工作时, 发生器的效率很低, 整个系统发热严重. 除此之外, 限流电阻与储能电容决定了电路的充电时间常数, 影响脉冲发生器的工作频率.

图 3 虚线箭头所示为各储能电容充电回路. 充电过程中, 限流电阻为储能电容充电提供了回路, 并且限制了充电电流的大小. 这种阻容充电方式决定了整个发生器的效率不会超过 50%, 并且储能电容的充电速度取决于各条回路的最大时间常数, 为了提高电路的最大工作频率, 限流电阻不能过大.

图 4 为 Marx 电路放电阶段等效电路图. 放电过程中, 限流电阻主要作用是隔离直流电源的高压端 (V_{CC}) 和低压端 (0) 的电位. 放电开始, BJT 的开通导致了储能电容两侧 (或者 BJT 集电极和发射极) 电位的改变, 其中, 各级 BJT 集电极的对地电位小于 V_{CC} , 发射极的对地电位小于 0, 限流电阻两端在放电过程中会产生瞬时的高压, 产生了如图 4 虚线所示的漏电流. 漏电流增加直流电源的损耗, 消耗储存在电容中的能量, 导致整个发生器输出效率降低. 其中, $R_{C1} \sim R_{C5}$ 消耗直流电源中的能量; $R'_{C1} \sim R'_{C4}$ 消耗储能电容中的能量. 限流电阻上的消耗使脉冲发生器的输出脉冲幅值降低.

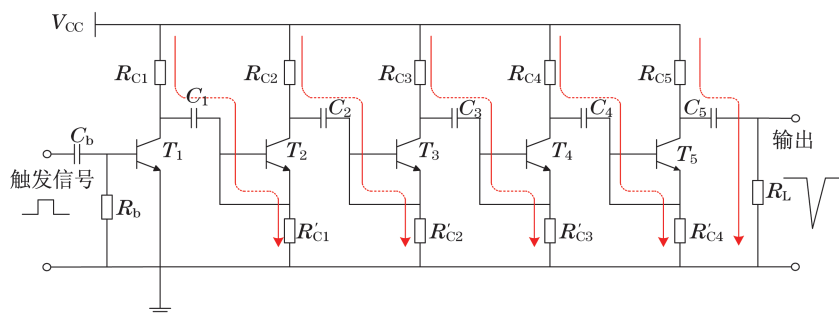


图 3 采用 BJT 的 5 级 Marx 电路 (方案 a)

Fig. 3 5-stage Marx circuit using BJTs

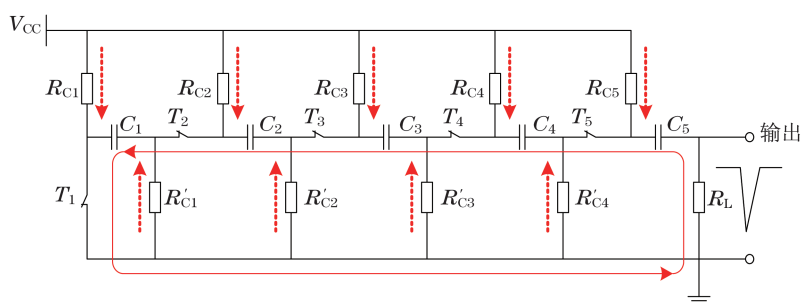


图 4 放电阶段等效电路图

Fig. 4 Equivalent discharging circuit

为了验证限流电阻对脉冲发生器的影响, 设计了 5 级 Marx 电路, 其中, $C_1 \sim C_5 = 1 \text{ nF}$, $R_L =$

50Ω , $V_{CC} = 170 \text{ V}$. 图 5 (见下页) 为 5 级 Marx 电路 T_5 在工作过程中集电极的对地电位 u_c 和发射极的

对地电位 u_e . 未加触发信号时, BJT 没有发生雪崩击穿, u_c 和 u_e 分别处于 V_{CC} 和 0; T_5 发生雪崩击穿, u_c 和 u_e 迅速变化, $u_c < V_{CC}$, $u_e < 0$, 导致在 R_{C5} 和 R'_{C4} 产生多余的损耗, 消耗在 R_{C5} 和 R'_{C4} 上的功率为

$$\begin{cases} P_{R_{C5}} = f \int_0^t \frac{(V_{CC} - u_c)^2}{R_{C5}} dt \\ P_{R'_{C4}} = f \int_0^t \frac{(0 - u_e)^2}{R'_{C4}} dt \end{cases} \quad (1)$$

从式(1)看出, 在特定级数的 Marx 电路中, 由于 V_{CC} 是一定的, u_c 和 u_e 主要取决于电路的结构, 为了减少电阻上的损耗, 应该提高电阻的阻值.

为了验证限流电阻大小对输出脉冲幅值的影响, 改变 5 级 Marx 电路中限流电阻的阻值, 使 $R_C = R'_C = 5, 10, 15, 30, 50 \text{ k}\Omega$. 为了避免充电时间对输出的影响, 实验中电路只对负载放电一次来消除工作频率对输出幅值的影响(避免相同频率放电时, 由于充电速度的不同导致电容两端的电压未达到 V_{CC}). 图 6 为不同限流电阻的阻值下输出脉冲峰值电压 V_{out} , 从图 6 中可以看出, 限流电阻阻值越大, 峰值电压也越高, 储能电容上的能量利用也越充足.

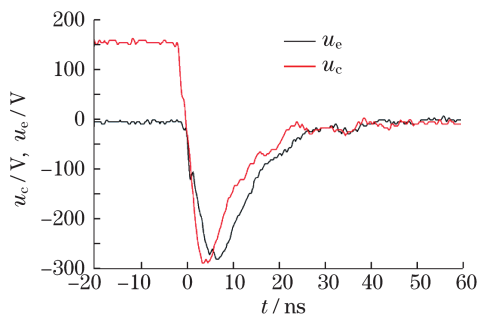


图 5 第 5 级 BJT 的集电极电位 u_c 和发射极电位 u_e .

Fig.5 Collector u_c and emitter u_e potentials of 5th BJT

综上所述, 为了提高整个发生器的效率和脉冲幅值, 必须尽可能地减少限流电阻上的损耗. 一种方

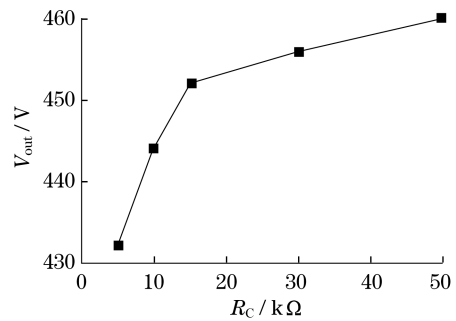


图 6 不同限流电阻下的输出脉冲幅值

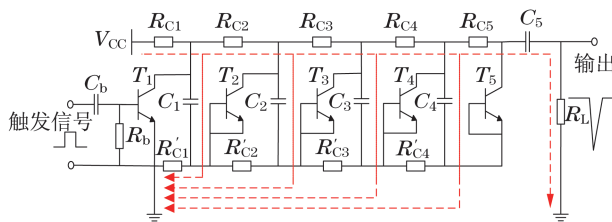
Fig.6 Magnitude of output pulse with different resistance

法是增加 R_C 阻值, 降低流经 R_C 的电流的大小, 抑制储能电容向 R'_C 放电, 减小甚至消除流经 R'_C 的漏电流; 另外一种就是减小限流电阻两端的隔离电压.

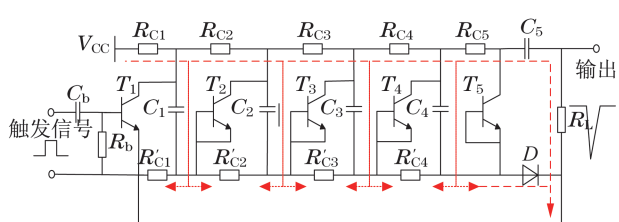
3 改进方案

在 Marx 电路中, 限流电阻的作用主要有: 为充电提供回路, 限制充电电流的大小; 放电时, 隔离直流电源的高压端和低压端. 经分析可知, 增大各级限流电阻的阻值或减小限流电阻的隔离电压可提高脉冲发生器的脉冲幅值和效率.

BJT 做开关的 Marx 电路与传统的气体做开关的 Marx 电路都采用第一级触发, 后面各级过压击穿的工作模式. Inokuchi 就采用了如图 7(a)所示的传统 Marx 结构电路来产生不同脉宽的脉冲^[10]. 充电回路如图中虚线所示, 第 i 级电容的充电时间常数为 $i(R_C + R'_C)C$, 最后一级的充电时间常数为 $(5R_C + R_L)C$. 当通过增加电路级数来提升电路的输出脉冲幅值时, 电路的工作频率也会相应地减小. 但是, 放电过程中每级的限流电阻相当于并联在每级电容两端(忽略 BJT 的导通压降), 即每级限流电阻的隔离电压等于电容两端的电压(小于 V_{CC}), 减少了电路中限流电阻在放电过程中的损耗.



(a) 未改进的传统 Marx 电路(方案 b)



(b) 改进的传统 Marx 电路(方案 c)

图 7 传统 Marx 电路

Fig.7 Traditional Marx circuit

基于图 7(a)所示 Marx 结构,采用二极管来改善图 7(a)电路的工作频率,电路图如图 7(b)所示.二极管在充电时可以为电路提供充电回路,减小电路的充电时间;放电时,隔离最后一级 BJT 的发射极电位与地电位.电路的充电回路如虚线所示,由于二极管提供的充电通路,每级充电时间相比于改进前减少了,电路的工作频率几乎提高了两倍.除此之外,每级限流电阻两端的隔离电压仍然小于 V_{CC} .

BJT 做开关的脉冲发生器中,工作频率是一个重要的指标,图 3 所示的电路与传统结构相比可以提高电路的工作频率.经分析可知,图 3 所示的电路中,流经 $R'_{C1} \sim R'_{C4}$ 的漏电流在充电过程与放电过程中具有相反的方向,故可以采用二极管代替 $R'_{C1} \sim R'_{C4}$.在各级储能电容串联放电的过程中,由于二极管的单向导电性,理论上可以阻止漏电流的产生,提高电容储存能量利用率;改进的电路减少了 $R'_{C1} \sim R'_{C4}$ 的阻值,增加 $R_{C1} \sim R_{C5}$ 的阻值,可以减少放电过程中漏电流的大小和直流电源的损耗;或者不增加 $R_{C1} \sim R_{C5}$ 的阻值来提高电路的工作频率.理论上,采用图 8 所示的改进电路,在相同工作频率下,可以减少限流电阻上的功率损耗,提高储能电容中能量的利用率,提高脉冲发生器的脉冲幅值和效率.

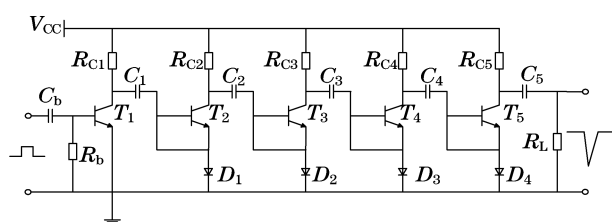


图 8 采用二极管改进的 Marx 结构(方案 d)

Fig.8 Improved Marx circuit using diode

4 实验验证

为了验证改进方案的有效性,设计了图 3(方案 a)、图 7(a)(方案 b)、图 7(b)(方案 c)、图 8(方案 d)所示电路的 10 级脉冲发生器.发生器采用 NPN 型 BJT C1815,其 $V_{CB0} = 175$ V;电路中的储能电容采用 1 nF 的高压瓷片电容;限流电阻和二极管 (1N4006)均采用贴片封装以减小回路中的杂散电感;负载电阻为 100 Ω .方案 b 和方案 c 的限流电阻都为 3.3 k Ω ;方案 a 中的 $R_C = R'_C = 5$ k Ω ;直流电源电压 $V_{CC} = 170$ V.实验的测量仪器有:高压探头 (PMK PHV 641-L)、示波器 (Tektronix DPO5104, 1 GHz, 10 GS/s)、电流环 (Pearson 4100).

4.1 实验结果

图 9 为方案 a~d 单次输出脉冲波形, u 为电压,表 1 为方案 a~d 的输出脉冲参数.其中,方案 d 中的 $R_C = 10$ k Ω .方案 b 和方案 c 减小了限流电阻的隔离电压,减小了直流电源和储能电容的能量消耗;方案 d 中的二极管可以抑制电容对限流电阻放电.因此,方案 b~d 的输出脉冲峰值电压均高于方案 a、方案 b 和方案 c 的峰值电压提升了 60~100 V,方案 d 提升了 180 V.但由于方案 b 的放电过程中回路过于复杂,输出脉冲的下降时间最长,方案 c 可以改善方案 b 的下降时间,减少了 0.7 ns,方案 a 和方案 c 具有相同的下降时间,方案 d 的下降时间最短,低于 3 ns.脉冲的上升时间取决于电路中电容和负载电阻的大小,方案 a~d 的输出脉冲具有相同的脉宽;但方案 d 具有更低的拖尾电压,约为 200 V,方案 a~c 的拖尾电压为 300 V 左右.由于不同方案的峰值电压和拖尾电压的不同,输出脉冲的半高宽也不同,其中,方案 d 的半高宽最窄,其他 3 种方案差别不大.

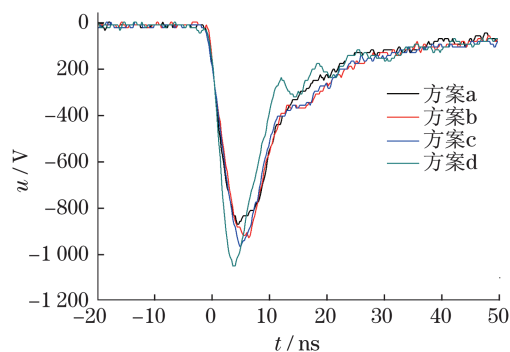


图 9 不同方案的输出脉冲波形

Fig.9 Output pulse waveforms in different methods

表 1 不同方案的输出脉冲性能指标

Tab.1 Performances of output pulse in different schemes

方案	下降时间/ns	峰值电压/V	半波宽/ns
a	3.420	870	11.030
b	3.948	930	9.525
c	3.300	966	11.730
d	2.874	1 050	7.320

方案 b 和方案 c 增加了输出脉冲的峰值电压,但工作频率很低.但方案 c 中的二极管为电路提供了额外的充电回路,除了最后一级电容,第 i 级电容的充电时间常数为 $(iR_C + iR'_C // (10 - i)R'_C)C$ (小于方案 b 的 $i(R_C + R'_C)C$),方案 c 具有更快的充电速度,可以工作在更高的频率.图 10(a) (见下页)

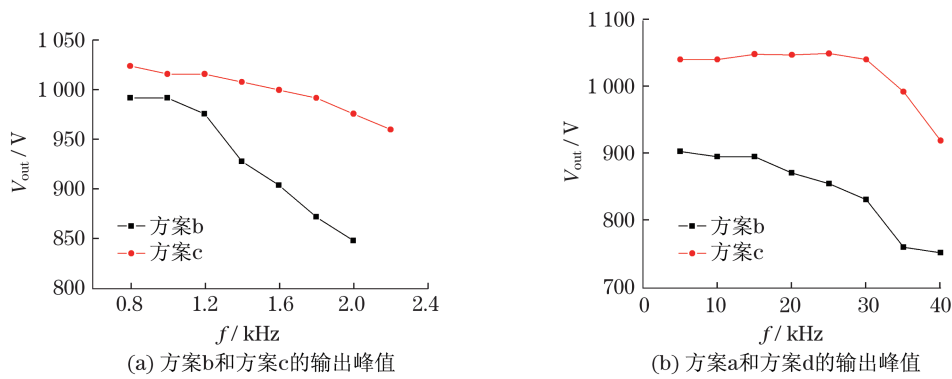


图 10 不同频率下的输出脉冲峰值电压

Fig.10 Peak voltage value of output pulses at different pulse repetitive frequency

为方案 b 和方案 c 在不同工作频率 f 下的输出脉冲峰值电压,可以看出,方案 c 可以工作在 2 kHz,仍具有 1 000 V 左右的峰值电压,并且输出脉冲峰值随频率的增高下降很慢,而方案 b 工作到 1.2 kHz 时,输出脉冲幅值开始明显下降.

相比于方案 b 和方案 c,方案 a 和方案 d 可以工作在更高的频率下,并且脉冲峰值不会有明显的降低.当不增加方案 d 中 R_C 的阻值 ($R_C = 5\text{ k}\Omega$),由于减半的充电时间,方案 d 可以工作在更高的频率.图 10 所示为方案 a 和方案 d 在不同工作频率下的输出脉冲峰值电压,可以看出,当工作频率小于 30 kHz 时,方案 d 的输出脉冲峰值可以维持在 1 040 V 左右;但方案 a 的输出脉冲峰值当电路工作在 15 kHz 以上时开始降低,工作频率更高时下降更明显.实验发现,方案 a 的工作频率超过 40 kHz 时,不能稳定输出脉冲,而方案 d 依然可以稳定工作,只是脉冲峰值下降严重.

4.2 效率分析

由于方案 b 和方案 c 的工作频率过低,本文只讨论了方案 a 和方案 d 的工作效率.实验中,方案 d 中的 $R_C = 10\text{ k}\Omega$,2 个电路均工作在 25 kHz.由于限流电阻的存在,脉冲发生器的效率和电容储存能量利用率并不是很高.方案 d 能够提高电容储存能量的利用率,还可以减少直流电源的功率损耗.图 11 为方案 a 和方案 d 的直流电源放电阶段的输入电流波形, I 为电流.由于方案 d 中 R_C 的增大,电流波形的峰值明显减小,并且电流脉冲的宽度也减小了.经实验测量与计算,改进前后电路的输入、输出功率及效率如表 2 所示.相比于方案 a,方案 d 的输入功率减小了 0.5 W,而输出功率提高了 0.25 W,电容的能量利用率提高了 7%,脉冲发生器的整体效率提高了 5%.

在表 2 中, P_{in} 为电路的输入功率, E_C 为电路中储能电容单位时间内储存的能量, P_{out} 为电路的输出功率, η_C 为储能电容能量利用率, η 为发生器的效率.其中, P_{in} 和 P_{out} 是根据函数绘图软件 origin 中的积分工具计算得来的.

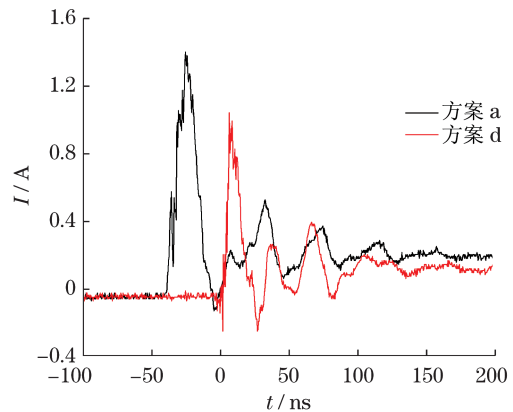


图 11 放电阶段的输入电流

Fig.11 Input current waveforms in discharging period

表 2 电路的功率效率对比

Tab.1 Power and efficiency comparison of circuits

方案	P_{in}/W	E_C/J	P_{out}/W	$\eta_C/\%$	$\eta/\%$
d	8.778 7	3.612 5	1.892 1	52.38	21.55
a	9.247 2	3.612 5	1.641 7	45.44	17.75

5 结 论

BJT 的开关速度快、工作频率高,在纳秒级及亚纳秒级脉冲功率技术中有巨大的优势.本文研究了用 BJT 做开关的脉冲电路,介绍了 BJT 进入雪崩状态的方式;采用了 Marx 结构对输出电压脉冲幅值进行提高,分析了 Marx 电路中限流电阻在工作过程中的作用及对电路的影响;采用两种方法对发生

器进行改进:一是采用传统 Marx 结构降低限流电阻两端的隔离电压;二是用二极管取代 R'_C ,抑制电容向 R'_C 放电.实验结果表明:3种改进方案可以提高输出电压脉冲幅值;但方案 d 效果最好,其峰值提升 180 V,下降时间减少了 0.5 ns,拖尾电压减小 100 V,波形改善明显;并且降低了直流电源的损耗,电容能量利用率提高了 7%,整个发生器的效率提高了 5%左右.

参考文献:

- [1] RAO J F, LIU K F, QIU J. All solid-state nanosecond pulsed generators based on Marx and magnetic switches[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1123 - 1128.
- [2] 袁雪林, 徐哲锋, 张洪德, 等. UWB 冲激雷达全固态高重频脉冲源设计[J]. 微波学报, 2008, 24(5): 35 - 39.
- [3] 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.
- [4] KRISHNASWAMY P, KUTHI A, VERNIER P T, et al. Compact subnanosecond pulse generator using avalanche transistors for cell electroperturbation studies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 873 - 877.
- [5] 梁小龙, 李凌. 脉冲激光烧蚀氩晶体颗粒的分子动力学模拟[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(3): 245 - 250.
- [6] 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(1): 015001.
- [7] 袁雪林, 丁臻捷, 俞建国, 等. 基于雪崩管 Marx 电路的高稳定度脉冲技术[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(4): 757 - 760.
- [8] DING W D, WANG Y N, FAN C A, et al. A subnanosecond jitter trigger generator utilizing trigatron switch and avalanche transistor circuit[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(4): 1054 - 1062.
- [9] 郭宝平, 牛憨笨. 雪崩晶体管的导通方式讨论[J]. 高速摄影与光子学, 1990, 19(4): 386 - 390.
- [10] INOKUCHI M, AKIYAMA M, SAKUGAWA T, et al. Development of miniature Marx generator using BJT [C]//Proceedings of IEEE Pulsed Power Conference. Washington, DC: IEEE, 2009: 57 - 60.

(编辑:石 瑛)