

低抖动纳秒高压脉冲源研究

毛久兵¹, 王欣², 唐丹², 李城鑫³, 吕华溢¹, 秦岚¹

(1. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900;

3. 电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘要: 根据某高能物理实验要求, 利用真空平面三极管驱动高压触发管, 研制出脉冲幅度达 10 kV、前沿小于 3.5 ns、抖动低于 1 ns、负载电阻 R_L 为 50 Ω 时峰值电流可达 200 A 的高压负脉冲源。本文介绍了该脉冲源的系统组成及工作原理, 并给出了系统输出波形。

关键词: 触发管; 平面三极管; 高压脉冲; 纳秒前沿; 低抖动

中图分类号: TN78

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)05-0888-05

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. 05. 0888

Study on High Voltage Pulse Generator With Low Jitter and Nanosecond Risetime

MAO Jiu-bing¹, WANG Xin², TANG Dan², LI Cheng-xin³, LV Hua-yi¹, QIN Lan¹

(1. Key Lab of Optoelectronic Technology and Systems,

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. College of Communication and Information Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: According to the requirements of the high energy physics experiment, the vacuum planar triode was applied to drive the spark gap for the high voltage pulse generator, which is capable of driving 10 kV into 50 Ω (R_L) with 200 A peak current, less than 3.5 ns risetime and lower than 1 ns jitter. The structure and the working principle of the pulse generator, and the output waveforms were introduced in the paper.

Key words: spark gap; planar triode; high voltage pulse; nanosecond risetime; low jitter

高压纳秒脉冲源在激光技术、加速器技术、核物理、X 射线探伤、快速照相技术及量子辐射物理等领域应用广泛, 尤其在高能物理实验中

的高压点火装置需具有低触发晃动的纳秒级高压触发源^[1-2]。一般固体器件快脉冲源均采用雪崩晶体管、MOSFETs 和 SCR 等设计^[2-6],

具有开关速度快、晃动小等特点,但其单管的耐压值和电流驱动能力均不能满足实际应用要求,虽采用多级级联方式可提高其输出功率,但输出功率提高有限且增加了电路的复杂性,也降低了电路的可靠性^[1,7]。因此,当系统要求具有大电流驱动能力时,固体器件仍不能完全代替电真空器件。

本文根据某高能物理实验需求,以具有较强驱动能力的高压触发管作为主开关器件,平面三极管作为触发管低抖动脉冲驱动源,研制幅度可达 10 kV、前沿小于 3.5 ns、抖动低于 1 ns、峰值电流可达 200 A 的高压纳秒负脉冲源(负载为 50 Ω)。

1 高压纳秒脉冲源系统

图 1 为基于触发管与平面三极管的高压快脉冲源系统结构示意图。该系统主要包括触发脉冲产生电路、平面三极管 V1、高压触发管 T1、脉冲成形电路及外围电路。

高压电源经限流电阻 R2 对触发管阳极储能电容 C3 充电。触发脉冲产生电路通过 C1 与平面三极管栅极相连,触发平面三极管迅速导通,输出较高电压幅度、低抖动、纳秒前沿负脉冲信号,用于驱动高压触发管栅极,使其阳极与阴极瞬间导通,从而储能电容 C3 通过负载 $R_L = 50 \Omega$ 放电产生高压快前沿大电流负脉冲信号。其中,低、中压电源组除为高压电源组和触发脉冲产生电路提供电压外,还为平面三极管栅极提供偏置电压。灯丝电源为平面三极管灯丝加热提供能量。

1.1 高压触发管

高压触发管是冷阴极气体放电器件,一般为三电极开关,由阳极、阴极和栅极组成,采用陶瓷-金属外壳封装形式。高压触发管内部一般充有高压气体, $p \times d$ (p 为充气压强, d 为主间隙)值在帕邢曲线右支,触发、碰撞电离是其放电击穿的主要机理^[8]。触发管具有工作电压高、输出电流大、开关速度快、体积小和寿命长等优点,广泛应用于精良小型化高压快脉冲源。但其缺点是触发频率低,抖动大。

主间隙电压、触发脉冲幅度与极性是影响触发管开关速度的主要因素^[9]。主间隙电压 V_0 是指阳、阴极两端电压,其值越高越接近触发管自击穿电压 V_B ,且导通时间越短。主间隙电压由触发管工作系数 m 决定^[10]:

$$m = V_0/V_B = 0.7 \sim 0.8 \quad (1)$$

本工作选用的触发管自击穿电压为 15 kV,所以主间隙电压 V_0 为 10.5~12 kV。与触发管相对应的储能电容 C3 充电电压必须选择在合适范围,否则将导致触发管损坏或产生自激而不稳定。

触发管一般有 4 种工作模式,阳极相对于阴极为正、负极性;触发极相对于阴极为正、负极性。为获得纳秒脉冲,必须使触发管导通时间最短。只有当阳极和触发极相对于阴极分别为正极性和负极性时,触发管内部长程先击穿、短程后击穿,击穿时间一般在纳秒量级^[9-10],且触发管的击穿导通一般通过电压实现,对触发信号能量要求不高。

触发管开关击穿分散性(即抖动)与两个因

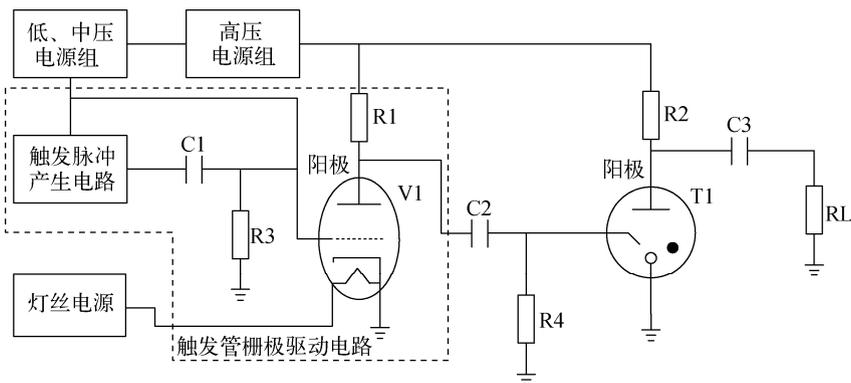


图 1 高压快脉冲源系统结构示意图

Fig. 1 Architecture diagram of high voltage fast pulse generator

素有关:1) 电流状态下开关内部气压和抛光度;2) 栅极触发信号的稳定度^[10]。

为使触发管具有较好的触发特性,其驱动负脉冲信号应具有幅度高、前沿快、低抖动的特点。

1.2 触发管栅极驱动电路

高压触发管栅极驱动电路主要包括触发脉冲产生电路和真空平面三极管(图1)。为满足上述要求,在系统设计时采用真空平面三极管作为触发管栅极驱动电路的开关器件。平面三极管为热阴极气体放电器件,包含阳极、阴极、栅极和阴极灯丝,其阳极电压最高可达15 kV,但其电流驱动能力有限,阴极电流密度约为5 A/cm²。LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)用此真空平面三极管完成1套低抖动普克尔盒驱动源,指标为:幅度9 kV,上升沿3 ns,脉宽10 ns,抖动小于100 ps,负载为75 Ω^[11]。

平面三极管具有的低抖动高压脉冲信号输出能力与其栅极触发脉冲的特性相关。触发脉冲产生电路是平面三极管栅极驱动源。为使平面三极管获得较快和稳定的输出脉冲,要求其栅极触发信号为纳秒脉冲信号,幅度一般在500 V以上^[11]。获得正脉冲信号的方法很多,较为简便的是通过脉冲变压器或形成线,虽其可满足幅度要求,但信号前沿较慢或伴随着振荡。

雪崩三极管是一种较理想的高速(纳秒级)、大电流(安培)器件,其稳定性高、触发晃动小、固有延时短,且价格便宜、使用方便^[1]。为获得较高幅度的脉冲输出信号,可将雪崩三极管串联或并联使用。雪崩晶体管传统串联或并联电路均基本用作负脉冲信号的产生^[2-5],文献[7]所述雪崩晶体管电路,虽可产生正脉冲信号,但其采用双电源供电,且电路复杂,降低了系统的可靠性。

图2为本文设计的单电源正脉冲产生电路。该电路由4只雪崩三极管串联而成,采用负高压供电,通过限流电阻R9连接到雪崩管串(Q4发射极)。Q1通过基极电阻R5和变压器连接到发射极,其余三极管的基极均通过1个小电阻与发射极相连,电阻的主要作用是防止输出信号振荡。触发信号经脉冲变压器触

发Q1,Q1受到触发而雪崩后,其管压将迅速下降,使得Q2的集射电压迅速增大,满足雪崩条件而产生雪崩,直到所有三极管均发生雪崩为止,在输出端将产生正脉冲信号。电路中雪崩三极管为FMMT-415(STO 32),其 $V_{CBO} = 260$ V, $V_{CEO} = 100$ V。通过Orcad Pspice对电路仿真,C5通过50 Ω电阻接地。如图3所示,Q1管基极输入脉冲信号幅度为100 V,上升沿与下降沿均为2 ns。在理想状态下,其输出正脉冲上升沿小于4 ns,幅度大于800 V。

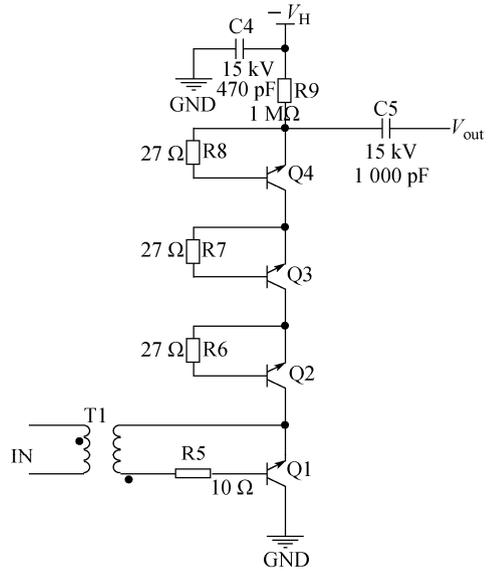


图2 雪崩管串联触发脉冲发生电路

Fig. 2 Trigger pulse circuit of avalanche transistors in series

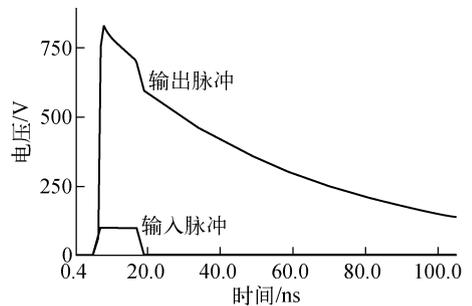


图3 触发脉冲电路 Orcad Pspice 仿真输出波形

Fig. 3 Output waveform of trigger pulse circuit for Orcad Pspice simulation

在实验过程中,雪崩三极管的雪崩击穿电压不同,有时差别较大。且对单管进行雪崩测

试实验,其在首次雪崩触发后,雪崩击穿电压一般将下降十几伏,这将影响触发电路的稳定性。为解决此问题,对雪崩三极管进行一段时间的雪崩实验,从而选取雪崩击穿电压较稳定、一致性较好、导通时间较快的三极管。

2 实验结果与分析

实验测试设备包括:美国 Tektronix 示波器,型号为 TDS7254;TCA-1MEG 高阻适配器,带宽为 200 MHz;Tektronix 高压探头,型号为 P6015A,带宽为 75 MHz,衰减倍数为 1 000。以下输出波形均在带负载情况下测试所得。雪崩三极管串联电路产生的高压脉冲冲如图 4 所示,幅度约为 0.8 kV,前沿为 2.5 ns。雪崩三极管串联电路用于触发平面三极管栅极,产生次高压负脉冲信号(图 5),幅度约为 7.5 kV、前沿为 3.9 ns、抖动小于 1 ns。通过此负高压快前沿脉冲信号驱动触发管栅极,使触发管快速导通,阳极储能电容迅速通过负载(50 Ω)放电,形成高性能负高压大电流脉冲信号(图 6),幅度为 10 kV、前沿为 3.3 ns、抖动小于 1 ns、峰值电流为 200 A、半高宽为 30 ns。

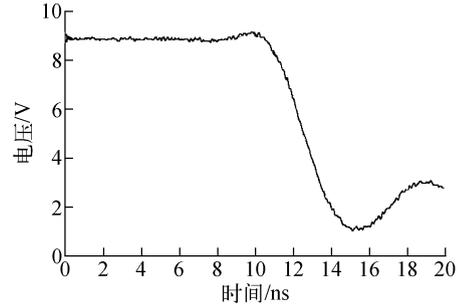


图 5 平面三极管输出负高压脉冲波形
Fig. 5 High voltage negative pulse waveform of planar triode output

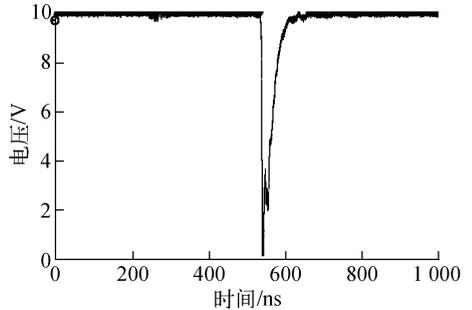


图 6 高压快脉冲源输出波形
Fig. 6 Output waveform of high voltage fast risetime pulse generator

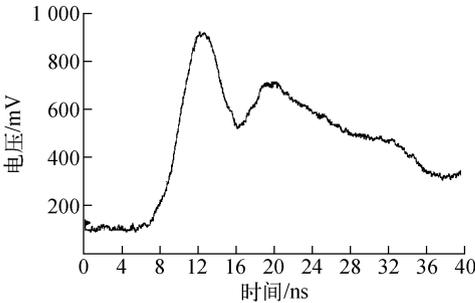


图 4 雪崩管串联脉冲电路输出波形
Fig. 4 Output waveform of pulse circuit with avalanche transistors in series

真空平面三极管的灯丝、偏置电压均直接影响其导通速度和管内电流,为使平面三极管输出脉冲具有低抖动特性,可提高阴极灯丝电压和偏置电压。增加触发脉冲信号幅度及加快触发前沿,均可减小三极管阳极开关延迟和输出抖动。通过实验验证,灯丝电压为 6.3 V、偏置电压为 -175 V,可使平面三极管工作于最佳状态。

本系统输出脉冲幅度取决于触发管阳极外加高压,但输出脉冲的时间特性(包括前沿快慢与抖动大小)主要与触发管的导通状态有较大关系。由上述对触发管开关机理的研究和分析可知:1) 栅极触发信号抖动是引起输出脉冲抖动的因素之一,在本实验中,采用真空平面三极管作为开关,研制出抖动小于 1 ns 的栅极驱动电路,极大地减小了栅极触发引起的抖动;2) 触发管从触发至导通有一段延迟,这也是产生抖动和影响脉冲前沿的因素,通过提高栅极触发信号的脉冲幅度,可加快触发管电离导通,同时加快栅极触发脉冲的前沿,可减小导通延迟时间和抖动;3) 触发管阳极高压电源的纹波系数亦会造成输出脉冲的抖动,本实验所用电源均为稳定性高、纹波系数小的直流电源模块。

本系统可简单分为高压与低压电路部分。高压电路部分包括真空平面三极管和触发管脉冲产生电路,低压电路部分是触发脉冲产生电路。在高压电路中,开关元件在触发与关断过

程中,均伴随高能量通过栅极反射,造成低压电路的损坏。通过实验与分析,在开关元件的栅极均引入了能量泄放通道(如图1中的接地功率电阻R3、R4),作为触发脉冲产生电路的保护措施。

3 结论

本文以高压触发管为主开关元件,引入真空平面三极管作为触发管栅极触发源,研制出高压纳秒负脉冲源,其幅度可达10 kV、前沿小于3.5 ns、抖动低于1 ns、峰值电流可达200 A,可满足某高能物理实验要求。通过实验与分析,高压触发管栅极触发脉冲信号幅度与极性对其输出脉冲前沿有较大影响;栅极触发脉冲应具有较快前沿和低晃动特性以减小输出脉冲的抖动。

参考文献:

[1] 王欣. 场效应管高压宽脉宽双快沿脉冲源技术研究[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2005.

[2] RAHMAN A T, NORIAH B, YAACOB M D. Nanoseconds switching for high voltage circuit using avalanche transistor[J]. Applied Physics Research, 2009, 1(2): 25-29.

[3] JANKEE U, NAVATHE C P. A fast high-voltage pulse generator with variable amplitude and duration[J]. Meas Sci Technol, 2006, 17(7): N25-N28.

[4] MOLINA L L, MAR A, ZUTAVERN F J, et al. Sub-nanosecond avalanche transistor drivers

for low impedance pulsed power applications[C] // Proceeding of 13th IEEE Pulse Power Plasma Science. Piscataway: IEEE, 2001: 178-181.

[5] FULKERSON E S, NORMAN D C, BOOTH R. Driving pockels cell using avalanche transistor pulsers[C] // Proceeding of 11th IEEE International Pulse Power Conference. New York: IEEE, 1997: 1 341-1 346.

[6] ALTON C, SUNDARARAJAN R. Simple MOSFET-based high-voltage nanosecond pulse circuit[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2004, 32(5): 1 919-1 924.

[7] LIU Jinyuan, SHAN Bing, CHANG Zenghu. High voltage fast ramp pulse generation using avalanche transistor[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(8): 3 066-3 077.

[8] 廖复疆. 真空电子技术:信息装备的心脏[M]. 北京:国防工业出版社,1999.

[9] 陈玮玮,陈勇. 小型高压冷阴极触发管性能分析[J]. 高电压技术,2003,29(12):30-31,51. CHEN Weiwei, CHEN Yong. Analysis of characteristic of miniature high voltage cold cathode trigger[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(12): 30-31, 51(in Chinese).

[10] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

[11] OICLES J A, DOWNS D C, KUIZENGA D J. Fast, versatile pockels cell driver[C] // Proceeding of 3rd IEEE International Pulse Power Conference. New York: IEEE, 1981: 95-98.