

采用半导体器件的高压纳秒脉冲电路

李锦林 周 旋 鲍秉乾

(中国科学院半导体研究所)

1985 年 1 月 7 日收到

本文介绍用于产生 δ -函数、矩形和指数衰减形大幅度纳秒脉冲的各种实用电路。实验结果表明, 仅用半导体器件也能产生高压纳秒脉冲。文中还指出了这些高压快速脉冲在诸如激光、高速摄影、大功率元器件瞬态响应测量等一些十分重要技术领域的应用。

一、引 言

过去, 人们倾向于认为低电压、小电流是半导体器件和电路的特点, 因此很少进行用半导体器件产生高压(大功率)快速脉冲的研究。然而, 这种情况自七十年代以来有了明显的变化。一方面, 由于半导体器件的进展, 其电压或功率处理能力大为提高, 从而可在更高的电压或功率水平上, 提供可用的高速脉冲。另一方面, 一些新兴技术的发展, 对高压快速脉冲源的需求与日俱增。比如, 在激光、高速摄影、大功率元器件或材料瞬态响应测量、甚至生物、化学和物理等基础研究领域, 也都提出了对高压纳秒脉冲的需求。仅就脉冲幅度和上升时间而言, 各种形式的脉冲闸流管(如冷阴极触发管、氢闸流管等)可以基本满足研制上述脉冲源的需要。但是, 采用这类开关元件的高压脉冲发生器的共同缺点是: 体积庞大, 装置复杂, 功耗大, 需要高于输出脉冲幅度的高压直流供电电源, 触发延迟和触发动作较大且稳定性差, 使用寿命短。这些缺点严重限制了它们的应用。尤其在对设备体积和重量有严格要求的场合, 这种采用真空开关元件的高压脉冲源更难满足要求。正如许多其他电子设备朝小型、轻量化方向发展一样, 高压快速脉冲源的小型固体化, 也提上了日程。

近年来, 用皮秒半导体光导开关产生千伏级纳秒脉冲获得了成功^[1], 但由于这种方法须采用功率皮秒激光源, 尚难推广应用。将雪崩管直接串联运用, 也是获得千伏级纳秒脉冲的可行方法^[2], 但这种运用要求高于输出脉冲幅度的直流供电电压源, 而且对所用晶体管特性均一性的要求十分苛刻, 故适用范围也比较窄。

在用半导体器件产生高压快速脉冲的研究中, 作者遵循以下技术途径。一方面, 我们把高速半导体器件应用于熟知的经典高压脉冲形成电路(如 Marx 电路、Blumlein 电路)中; 另一方面, 又综合运用各种高速半导体器件特点, 提出了若干新的组合电路。实验结果表明, 仅用半导体器件也能产生用于各种目的的高压快速脉冲, 从而为小型化固体高压快速脉冲源的实现, 带来了新的希望。

二、快速上升指数衰减形脉冲的产生——用雪崩管作开关的 Marx 发生器

半个世纪以前,就提出了 Marx 发生器的基本原理^[3]。由于雪崩管是兼具快速响应和很大脉冲功率能力的一种开关器件,很早就被用作放电开关,以取代 Marx 发生器中的火花隙^[4]。作者系统研究了这种采用雪崩管作开关的 Marx 发生器的性能^[5],并给出一个改进的雪崩管触发单元,如图 1 所示。其中 T_0 、 T_A 和 T_B 都是雪崩管, T_0 作为缓冲级,它对输入触发脉冲整形,并提供用于下级电路的高速大电流触发脉冲。 T_A 和 T_B 是基本的正、负脉冲形成级,将许多个这样的相同电路按 Marx 电路形式级联,便构成了用雪崩管作开关的 Marx 高压脉冲发生器,由此获得正、负极性的两路高压脉冲输出。视所要求的输出脉冲幅度选择适用的晶体管型号并确定发生器总的级数。

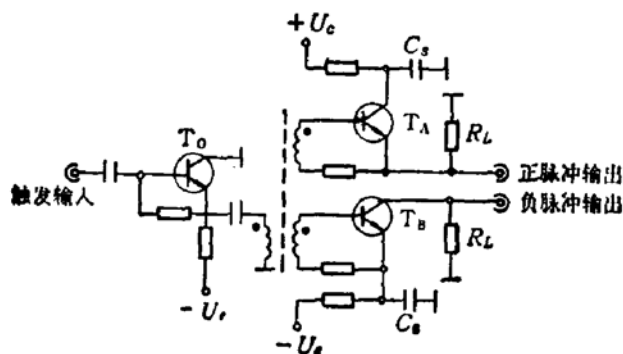


图 1 构成 Marx 发生器的雪崩管触发单元

作为例子,图 2 (见图版 I) 照片给出一个 Marx 发生器 ($23 \times 2N5551$) 的输出脉冲波形,脉冲幅度(在 $5k\Omega$ 负载上)为 $5.6kV$,脉冲前沿 (10—90%) 约 $3ns$,脉冲后沿呈指数衰减形,通过适当增加级数和选用更高击穿电压的雪崩管,输出脉冲幅度达到 $10kV$ 是完全可能的。

与雪崩管直接串联电路相比,这种雪崩管 Marx 级联电路具有明显优点,如所需直流供电电压较低(略大于一个管的 BV_{CBO} 即可),对管子均匀性要求不象在串联电路中那样严格,电路运用可靠性也较高,因而更为实用。

三、高压窄脉冲的形成

上述雪崩管 Marx 发生器的输出脉冲波形和一个充电电容的放电波形相似,其上升边取决于所用管子的雪崩特性,因而是很快速的(在纳秒范围),而下降边呈缓慢指数式衰减,衰减时间常数取决于放电回路的等效电容和电阻的数值。通过减小储能电容 C 和负载电阻 R_L 的值,可以减小脉冲宽度,但输出脉冲幅度也随之减小许多,而且负载电阻值的减小还受到雪崩管最大允许脉冲电流的限制。

为了形成尽可能窄 (δ -函数) 的大幅度输出脉冲,我们研究了以下几种方法:

(1) 借助高压开关二极管对雪崩管 Marx 发生器的输出脉冲整形

在实验中采用一个 11 级 2N5551 型雪崩管构成的 Marx 负高压脉冲发生器, 其输出负载电阻为 $R_L(500\Omega)$, 在 R_L 两端并接整形用的高反压开关二极管 D, 如图 3 所示。未加整形二极管 D 时, 发生器的输出脉冲波形如图 4(a) 所示 (见图版 I), 由于负载电阻值较高 (500Ω), 脉冲下降边呈缓慢指数式衰减。并接二极管 D 后, 当 R_L 两端电压上升到大于二极管 D 的反向击穿电压 V_B 时, 二极管 D 迅速发生雪崩击穿, 于是在短瞬间将输出负载短路, 因而输出脉冲下降边极其迅速地回到参考电平, 由此获得极窄的高压脉冲输出。有时可与二极管 D 串联一个阻值很小的电阻 R_D , 一方面用作限流, 同时还可抑制输出脉冲下降边的振荡。图 4(b)、(c) (见图版 I) 分别给出两个不同击穿电压二极管整形所获得的高压窄脉冲。由此可见, 利用高反压开关二极管的雪崩击穿特性对脉冲后沿整形, 即使在负载电阻值较高的情况下 ($R_L = 500\Omega$), 也能获得底宽很窄的脉冲输出。对用于脉冲整形的二极管的主要性能要求是: 高的反向击穿电压、高的脉冲电流承受能力和快速的雪崩击穿特性, 结电容和串联电感应尽可能小。

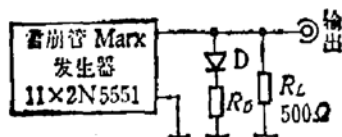


图 3 利用高压二极管的雪崩击穿特性对脉冲整形

(2) 两个雪崩管 Marx 发生器输出波形的迭加

在实验中利用了两个均为 11 级 2N5551 型雪崩管构成的正、负极性 Marx 发生器。在这两个发生器之间引入适当的可调延时 t_D , 并让它们的输出脉冲通过功率分配器迭加, 由此可获得宽度可调的高压窄脉冲输出, 如图 5 所示。图 6 照片给出相关的波形 (见图版 II)。用这种方法获得了幅度高达 1.5kV、半宽度小于 5ns 的高压窄脉冲, 而且只要改变相对延时 t_D , 输出脉冲极性可以从正到负变化。

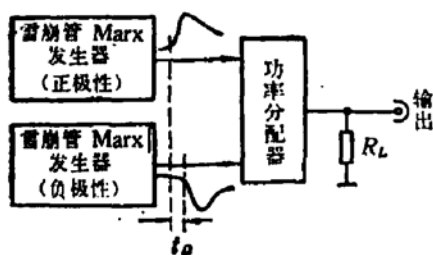


图 5 两个雪崩管 Marx 发生器输出脉冲的迭加

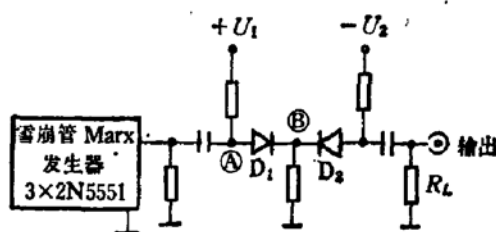


图 8 用阶跃二极管改善 Marx 发生器输出脉冲后沿

(3) 用阶跃二极管改善雪崩管 Marx 发生器输出脉冲的后沿

在实验中采用了三级 2N5551 型雪崩管 Marx 发生器, 它在低阻 50Ω 负载上能提供上升时间约 4ns、幅度逾 200V 的大幅度脉冲, 其底宽约 15ns。在这里, 为了获得更快的

后沿, 采用了典型的阶跃二极管串联电路^[6], 如图 8 所示, 有关波形示于图 7 (见图版 II)。在图 8 中, D_1 系阶跃二极管, 静态时处于正向导通状态, 因而图中 ①、② 两点可近似看作短路。在二极管的贮存时间内, Marx 发生器的输出脉冲将出现于 ② 点。当贮存期结束时, 二极管 D_1 迅速转入截止状态。调节二极管 D_1 的正向导通电流, 可以调节 ② 点所得到的输出脉冲的宽度及幅度。图 7(b)、(c) (见图版 II) 给出与两个不同的正向导通电流对应的输出脉冲波形。由此可见, 用阶跃二极管对雪崩管 Marx 发生器的输出脉冲整形, 可以获得大幅度窄脉冲。图 8 中, D_2 是加有适当反偏压的高速开关二极管, 用来削去脉冲底部的振荡。 D_1 是阶跃二极管。由于这里涉及的是大幅度脉冲整形问题, 不但要求所用阶跃二极管具有相应的高的反向击穿电压 (大于 200V), 还要求它在较大反向抽出电流 (3—4A) 时仍具有适当的贮存时间 (这是对脉冲后沿整形所需要的), 实际上这是对所用阶跃管提出了较高要求。

四、大幅度矩形脉冲的产生——用雪崩管作开关的 Blumlein 电路

利用雪崩管作开关的普通充电传输线发生器, 可以很方便地产生宽度可控的矩形脉

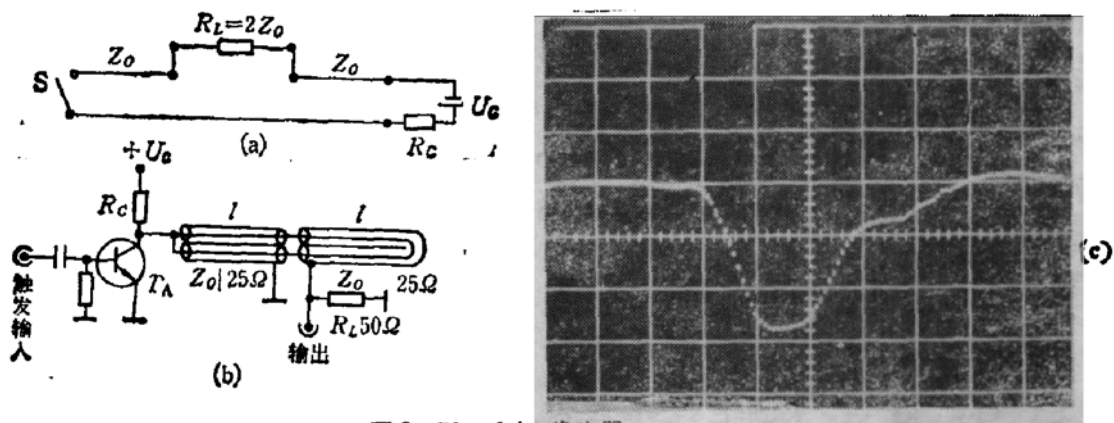


图 9 Blumlein 发生器

(a) 原理图

(b) 用雪崩管作开关的 Blumlein 电路

(c) 输出波形 ($R_L = 50\Omega$) (垂直: 100V/格; 水平: 5ns/格)

冲^[4]。然而, 这种电路即使在理想情况下, 也只能获得等于充电电压一半的输出脉冲幅度。Blumlein 电路是普通充电传输线型发生器的变型^[7], 在理想条件下, 它能产生等于充电电压的输出脉冲幅度。Blumlein 脉冲发生器由两条特性阻抗各为 z_0 的传输线和接在它们之间的特性阻抗为 $2z_0$ 的输出传输线所组成, 如图 9(a)所示。直流电压 U_c 使两条传输线充电, 并借助开关 S 使其中一条传输线的一端闭合, 故传输线通过负载 ($R_L = 2z_0$) 放电, 在匹配负载 $R_L = 2z_0$ 上得到的输出脉冲幅度, 在理想情况下等于充电电压 U_c , 脉宽等于总长为 $2l$ 的两条传输线的渡越时间。用雪崩管作开关的实际 Blumlein 电路示于图 9(b)。因为在高速脉冲电路中, 经常采用 $R_L = 50\Omega$ 的标准负载。在 Blumlein 电路中, 为了保证 $R_L = 2z_0$ 的匹配条件, 必须采用 $z_0 = 25\Omega$ 的传输线, 实际上这是用两条特性阻抗各为 50Ω 的同轴电缆并接实现的。采用 2N5551 型雪崩管, 上述电路能在 50Ω 负载上提供约 300V 的输出脉冲幅度, 脉冲前沿小于 5ns, 如图 9(c) 所示。

五、高压纳秒脉冲的应用

本文研究的各种固体脉冲源具有电路简单、供电电压低、输出脉冲前沿快、输出脉冲幅度高以及触发延迟和抖动较小等一系列优点,有着广阔的应用前景,它们已被应用于许多技术领域,如高速摄影、激光技术、电-光开关、大功率闸流管的驱动、高压(或大功率)半导体器件瞬态测量等。

参 考 文 献

- [1] P. LeFur, D. H. Auston, *Appl. Phys. Lett.*, 28, 21 (1976).
- [2] T. H. O'Dell, *Electron Lett.*, 5, 94 (1969).
- [3] E. Marx, *Electrotech. Z.*, 45, 625 (1925).
- [4] J. Millman, H. Taub, *Pulse, Digital and Switching Waveforms*. New York: McGraw Hill, 1965, 198—203, 508—513, 800—808.
- [5] 周旋,李锦林,鲍秉乾, *仪器仪表学报*, 5, 360 (1984).
- [6] J. L. Moll *et al.*, *PIRE*, 50, 43 (1962).
- [7] A. D. Blumlein, *Patent USA No. 589127*, 1941.

High Voltage Nanosecond Pulse Circuits with Semiconductor Devices

Li Jinlin, Zhou Xuan and Bao Bingqian

(*Institute of Semiconductor, Academia Sinica*)

Abstract

A number of semiconductor circuits used for the generation of high voltage nanosecond δ -function, rectangular and exponential decay waveform are introduced. The experimental results indicate that the semiconductor devices are as good as vacuum devices in providing high voltage nanosecond pulses.