

大功率晶体管毫微秒脉冲发生器

魏祥华

毫微秒脉冲技术发展很快,至今,国内高速沿脉冲上升时间已经达到几十微微秒的数量级。但是幅度几十伏,上升时间接近1毫微秒的脉冲,目前国内还没有正式产品。大功率开关管开关参数的测试,示波器衰减器瞬态响应的测试,红外元件寿命的测试,磁性材料的脉冲特性等等,都急需大功率快速脉冲。为此,我们试制了大幅度毫微秒脉冲源,达到的主要技术指标如下:

1. 在50欧负载电阻上,输出幅度大于40伏 μ ;
2. 上升时间不大于1.2毫微秒;
3. 上冲量不大于5%;
4. 输出幅度可变:20毫伏~40伏 μ ;
5. 输出脉冲宽度可变:最窄不大于0.5微秒;
6. 重复频率可调:100赫~500千赫。

下面对大幅度毫微秒开关放大电路进行简单介绍。

一、共发—共集组合电路

为了便于讲清楚这个电路如何选配PNP、NPN两种极性不同的开关管,我们首先谈谈单级共发、共集开关放大的工作状态及晶体管结电容、分布电容、负载电容(以下简称 c_0)对开关速度的影响。

(一)共发开关电路的工作状态及 c_0 对开关速度的影响

图1是带有电容 c_0 的NPN管共发电原理图及波形图。假设,在 t_1 的瞬间,输入电压 V_i 是一个负向阶跃脉冲,开关管由饱和状态转换到截止状态,输出电压 V_o 从 V_{ces} 按时间常数 $\tau_1(\tau_1 \approx c_0 R_e)$ 向 $+E_c$ 充电;假设,在 t_2 的瞬间,输入电压 V_i 是一个正向阶跃脉冲,开关管由截止状态迅速地转换到饱和状态,输出电压 V_o 从 $+E_c$ 按时间常数 $\tau_2(\tau_2 \approx c_0 R_{ce})$ 向 V_{ces} 放电。 R_{ce} 为晶体管饱和电阻,它可以按式 $R_{ce} \approx V_{ces}/I_{cs}$ 近似地计算,式中, V_{ces} 为开关管在饱和时集电极到发射极之间电压; I_{cs} 为开关管在饱和时的集电极电流。通常, R_{ce} 在大信号开关状态时设计到几欧,有的甚至设计到小于1欧;集电极负载电阻 R_c 通常是几十欧到几百欧。因此,在这种NPN的共发电路中,很明显地看出其两个问题:

1. 时间常数 $\tau_2 \ll \tau_1$ 。 τ_1 表示输出脉冲的正沿,

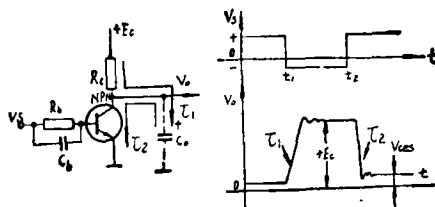


图 1

τ_2 表示输出脉冲的负沿,因此对NPN的共发开关电路,它输出脉冲的负沿要比正沿快得多,并且还要注意到负沿是在NPN管从截止状态转换到饱和状态所产生的,因此,为了要获得快沿脉冲,都应该将开关管设计在这个由截止转换到饱和状态上。

2. 时间常数 τ_1, τ_2 都正比于 c_0 , c_0 越大, τ_1, τ_2 亦越大。为了要缩短开关时间,因此要选择结电容小的开关管,并且要尽量减小分布电容。至于带有 c_0 的PNP共发电路,它是 $\tau_1 \ll \tau_2$,具体不详述了。

(二)共集开关电路的工作状态及 c_0 对开关速度的影响

图2是带有 c_0 的共集电原理图及波形图。假设,在 t_1 之前, c_0 上电位处于高电位,在 t_1 的瞬间,输入电压 V_i 是一负向阶跃脉冲,这对于PNP管的发射结增加了顺向偏压;因此, c_0 上的电荷通过跟随管迅速放电(τ_1)。可见, c_0 此时对开关速度影响很小,因此PNP管对负向阶跃跟随很好。假设在 t_2 的瞬间,输入电压 V_i 是一个正向阶跃脉冲,由于 c_0 的电位不能突变,使跟随管截止,在跟随管截止时,输出 V_o 只能按时间常数 $\tau_2(R_c c_0)$ 上升,由于 R_c 通常较大,所以 τ_2 亦很大,因此PNP管共集电路对正向阶跃脉冲跟随不好。至于带有 c_0 电容的NPN共集电路,它是 $\tau_2 \ll \tau_1$,具体不详述了。综上所述,晶体管的共发、共集电路,由于 c_0 的影响,使NPN的共发开关电路整形出来的脉冲,负

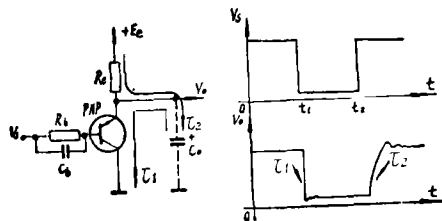


图 2

向沿要比正向沿快，而 *PNP* 的共发开关电路整形出来的脉冲，正向沿要比负向沿快。用 *NPN* 的共集电路，跟随脉冲的正沿要比负沿好；用 *PNP* 的共集电路，跟随脉冲的负沿要比正沿好。

在上面分析的基础上，我们就很容易看出，图 3 中常用的共发-共集组合电路在大信号开关工作状态下，是一个不合理的电路，因为它两个管子都是 *NPN* 型。 BG_1 是 *NPN* 型的共发电路，它整形出来的负向快沿大脉冲，经过 BG_2 (*NPN* 型) 的共集电路传输，结果其脉冲的负向沿大大地变坏了，因此我们要对常用的共发-共集电路所使用的晶体管重新选配。以适合大幅度快沿脉冲整形的需要。

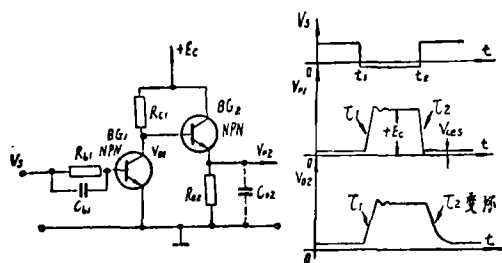


图 3

下面我们分别给出在大信号的开关状态下，适合于整形脉冲正沿的共发-共集电路(图 4)及适合于整形脉冲负沿的共发-共集电路(图 5)。

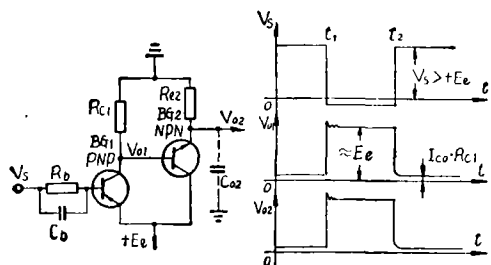


图 4

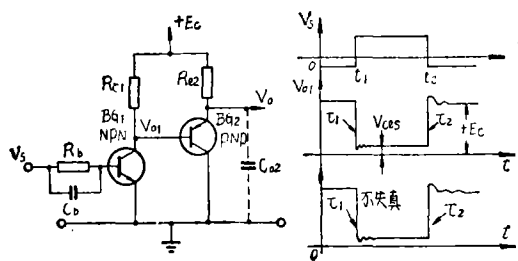


图 5

在图 4 中， BG_1 是 *PNP* 型共发 电路， BG_2 是 *NPN* 型共集电路，由 BG_1 整形出来的正向快沿大脉冲送到 BG_2 ，由于 BG_2 是 *NPN* 型共集电路，它能线性地传输正向脉冲，所以图 4 是整形脉冲正向沿合理的

共发-共集电路。

在图 5 中， BG_1 是 *NPN* 型共发 电路， BG_2 是 *PNP* 型共集电路，由 BG_1 整形出来的负向快沿大脉冲送到 BG_2 ，由于 BG_2 是 *PNP* 型共集电路，它能线性地传输负向脉冲，所以图 5 是整形脉冲负向沿合理的共发-共集电路。

二、共发-共发互补级联电路

上面讲的共发-共集组合电路图 4、图 5，是一级开关放大，一级跟随。这里介绍的共发-共发互补级联电路图 6、图 7，是二级共发连着的开关放大。图 6 是适合于整形正向阶跃特性的共发-共发互补电路；图 7 是适合于整形负向阶跃特性的共发-共发互补电路。在图 6 及图 7 电原理图中，每级开关管工作状态都是由截止状态转换到饱和状态，所以电路是合理的。

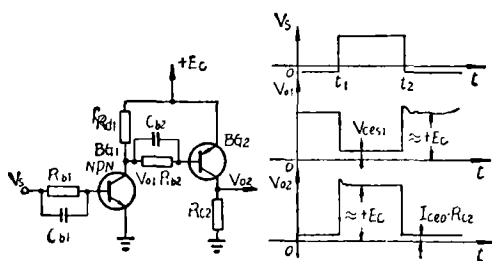


图 6

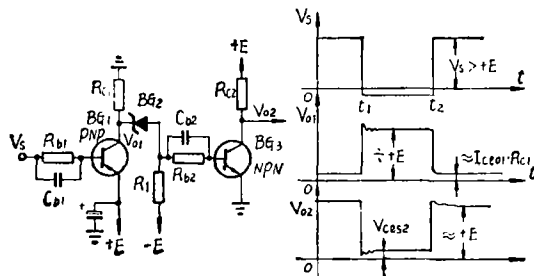


图 7

三、驱动级与输出级电路

这部分电路的主要任务是将快速的小信号脉冲转换成快速的大信号脉冲，随着对输出脉冲要求不同，具体设计方案亦就不同。例如，要求输出脉冲上升沿 ≤ 1.2 毫微秒；上冲量 $\leq 5\%$ ，脉冲宽度要宽，而且要可调，这样输出级与驱动级之间的耦合就不好用脉冲变压器。又例如说，要求输出脉冲幅度可调，在可调的范围内(20 毫伏~40

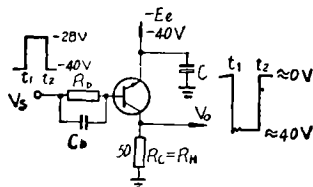


图 8

要求输出脉冲幅度可调，在可调的范围内(20 毫伏~40

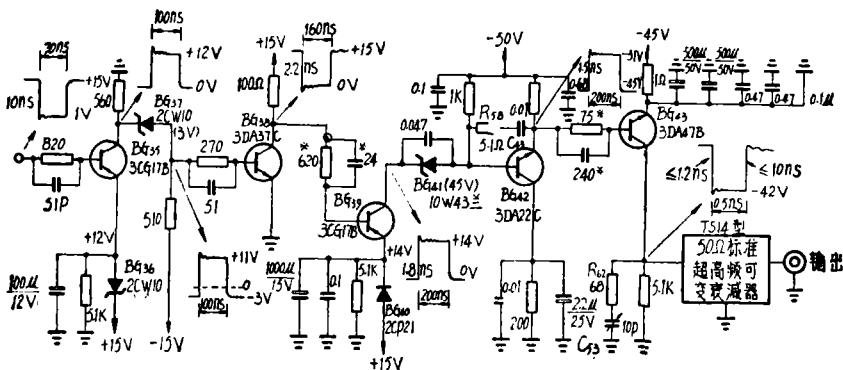


图9 具体试制电路

伏 $\cdot\mu s$)上冲量不得大于5%,那么就不可以用改变开关管电流或开关管集电极电压的方法来实现,因为采用这种方法造成脉冲上冲量变化是很大。因此,必须采用50欧超高频可变衰减器衰减。

经试验后,我们采用图8的共发饱和电路。假设图8电路中开关管集电极负载电阻 R_c 用50欧同轴衰减器代替。在 t_1 之前,开关管截止, $V_o = I_{ce0}R_H \approx 0$ 伏,可见电源消耗功率近似为0,衰减器上消耗功率也近似为0。在 $t_1 \sim t_2$ 时间里,开关管饱和, $V_o \approx -E_c$,开关管集电极静态电流 $I_{ce0} = (E_c - V_{ces})/R_H \approx 40/50 \approx 0.8$ 安,电源功率 $P = V^2/R = 32$ 瓦。如果减少开关管饱和时间,电源功率、衰减器功率均减小,在脉冲重复频率 f 为20千赫,脉宽为0.5微秒时,0.5瓦超高频可变衰减器就可以满足功率要求了。

四、具体电路介绍

图9是我们具体的试制电路,是直接耦合式脉冲开关电路。 BG_{35} 与 BG_{38} 是适合于整形负向阶跃的共发-共发互补开关电路,其作用原理在前面第二段已讲了。它将输入的10毫微秒负向阶跃脉冲,整形形成2.2毫微秒的负向阶跃脉冲; BG_{36} , BG_{37} 是齐纳稳压管,用来配置直流电平的。 BG_{39} 与 BG_{42} 是适合于整形正向阶跃的共发-共集电路,其作用原理前面第一段里已讲了。这里的 BG_{39} 工作于雪崩状态,在调试时要进行挑选使用。 BG_{40} 与 BG_{41} ,也是用来配置直流电平的,经过这两部分电路整形后,其输出上升沿已小于1.5毫微秒。 BG_{43} 是共发开关输出级,其作用原理第三段已述,它的集电极负载电阻主要用50欧的超高频可变衰减器取代,在衰减器衰减量为0分贝时,使用本仪器50欧的终端负载电阻。 BG_{42} 的基极与发射极之间并接上 R_{c8} , C_{43} 网络,是用来克服 BG_{42} 跟随器产生寄生振荡。在 BG_{43} 的集电极上接上 R_{c2} , C_{53} ,它是用来修补脉冲上冲量大小的。脉冲宽度与频率受输入信号的控制并连续可调。

要做好这种大幅度快沿脉冲,在实际的制作中要注意以下几点:第一,选择高频损耗小的双面铜箔板作印刷电路板。印制板的一面铜箔整个作大面积接地,另一面铜箔印上电路,走线力求短,宽度约2毫米。第二,选择晶体管,这是做好该脉冲发生器的关键。由于国产

大功率开关管目前的特性做得不够理想,我们选用高频大功率管。但是,在高频大功率管里,由于把集电极的电阻率选得过高,以至经常可以看到图10的输出特性,图

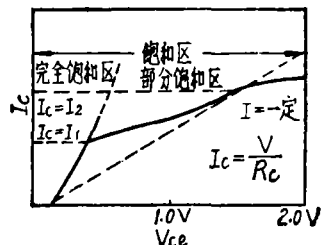


图10

10称为奇特扭折的 $V_{ce(sat)}$ 的反常波形。这时的饱和区可以分成完全饱和区和部分饱和区,如果电路中设计的 I_b 进入部分饱和区,那么不仅使电源利用率下降,开关功耗增加外,还使开关速度变慢。对各级晶体管要求列于下表。第三,由于后两级开关电流很大,

代号	名称	饱和压降要求 (BV_{ces}) (伏)	反压要求 (BV_{ces}) (伏)	f_T (GC)
BG35	3CG17B	$I_c = 30$ 毫安时 ≤ 0.6	≥ 15	≥ 1
BG38	3DA37C	$I_c = 100$ 毫安时 ≤ 0.3	≥ 15	≥ 0.8
BG39	3CG17B	$I_c = 30$ 毫安时 ≤ 0.3	≥ 25	≥ 1
BG42	3DA22C	$I_c = 100$ 毫安时 ≤ 0.5	≥ 50	≥ 0.5
BG43	3DA47B	$I_c = 1$ 安时 ≤ 1	≥ 45	≥ 1

晶体管的引线要尽可能的短,尤其是发射极引线。第四, BG_{43} 发射极的去耦电容,除了用两只大电解电容器接地之外,还要并接若干只无感电容器,如果这些电容器考虑不周,脉冲的上升时间要损失,上冲量增大,甚至要产生较严重的阻尼,具体位置及只数可以在调试中决定。第五,采用的TS-14标准衰减器作输出幅度调节器。第六,脉冲出来后,在调试脉冲的上升时间、上冲量、阻尼、顶部平直等参数时,要选用频带足够宽(300兆赫以上)的示波器,取样示波器作为调试仪器,并且要用优质的水银开关毫微秒脉冲,将示波器预先考核好才能用,否则,测试示波器的瞬态特性不好要误认脉冲波形不好,从而引起许多麻烦。