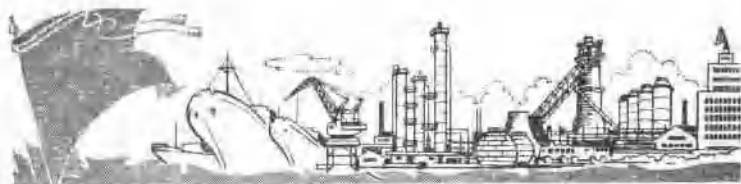


毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

★

晶体管的雪崩特性及其应用



工业技术资料

第55号

上海人民出版社

出版说明

在伟大领袖毛主席的无产阶级革命路线的光辉指引下，工农业生产出现了新的跃进高潮，形势一派大好！

电子工业战线的广大革命工人、革命干部和革命技术人员，遵循伟大领袖毛主席关于“中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平”的教导，深入开展革命大批判，彻底肃清叛徒、内奸、工贼刘少奇所推行的“洋奴哲学”、“爬行主义”反革命修正主义的流毒，一场大破电子工业“神秘论”、“特殊论”，坚决走我国自己发展电子工业道路的群众运动正在轰轰烈烈地展开。广大革命工人坚持“自力更生”、“艰苦奋斗”，克服一切困难，为巩固无产阶级专政，建设社会主义，为打击帝、修、反，支援世界革命，作出了巨大的贡献。

随着半导体工业中各种新材料、新器件的大量涌现，也相继出现了各种形式的新颖电子线路。遵循伟大领袖毛主席关于“无产阶级认识世界的目的，只是为了改造世界，此外再无别的目的”的教导，为了适应电子工业发展的需要，我们组织编写了电子技术方面的有关技术资料，以供广大革命工人、革命干部和革命技术人员参考。

顺此，我们也请广大工农兵读者对我们编辑出版工作中存在的问题提出宝贵的意见，并希望大家踊跃投稿或提供线索。

晶体管的雪崩特性及其应用

上海元件五厂

一、雪崩晶体管的基本特性

(一) 晶体管的雪崩现象

当晶体管集电极电压足够高的时候(即高到 BV_{CER})，集电结空间电荷层内的电场比正常工作情况要大许多倍，进入集电结的载流子被加速从而获得足够大的能量与晶格碰撞，使束缚的价电子脱离共价键而成为自由电子，相应产生新的空穴。新生的电子、空穴又分别被强电场加速而重复上述过程。于是通过 $P-N$ 结的电流迅速增长，出现所谓雪崩现象。

(二) 穿通电压与雪崩击穿电压

1. 穿通电压： $P-N$ 结的宽度是受外加反向偏压影响的，由于集电极电压的加高，集电结空间电荷层就会相应地加宽。当反向偏压足够高时，空间电荷层扩展到整个基区，晶体管突然导通，大量载流子从发射极直接到达集电极，此时晶体管不再具有放大作用(即管子已烧毁)。这个集电结反向偏压称为穿通电压。

2. 雪崩击穿电压： $P-N$ 结发生雪崩现象的集电结反向偏压称为雪崩击穿电压。

通常扩散型、外延型平面晶体管的穿通电压都比雪崩击穿电压高。

(三) 伏安特性

图 1、图 2 是用 JT-1 晶体管特性图示仪在发射极接地，基极分别注入正、负阶梯电流时得到的集电极电压与集电极电流关系曲线。

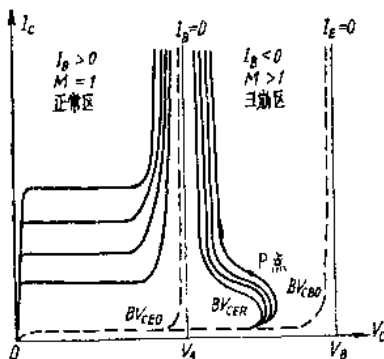


图1 3DK2 N-P-N 硅雪崩管伏安特性

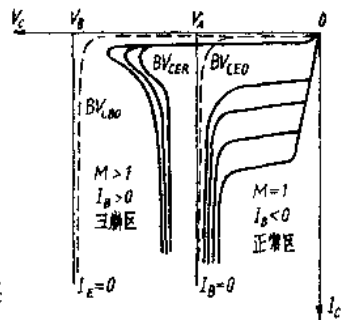


图2 3AK20 P-N-P 锗雪崩管伏安特性

图中： V_A ——基极开路时晶体管雪崩击穿电压；

V_B ——发射极开路时晶体管雪崩击穿电压；

BV_{CEO} ——基极开路时集电极与发射极之间的击穿电压；

BV_{CBO} ——发射极开路时集电极与基极之间的击穿电压；

BV_{CER} ——基极与发射极之间接入电阻 R_{BE} 时集电极与发射极间的击穿电压。

晶体管雪崩击穿电压 V_A 、 V_B 是由组成晶体管的材料、结构决定的，击穿电压 BV_{CEO} 、 BV_{CBO} 、 BV_{CER} 则不仅与组成晶体管的材料、结构有关，而且还与集电极电流 I_C 有关。

由于硅管的 BV_{CBO} 和 BV_{CEO} 较高，因而在扫 V_C - I_C 特性曲线时，集电极电流不宜过大，否则集电结功率耗散很容易超过晶体管的额定功率而烧毁管子。

1. 倍增因子 M 是雪崩区内电流放大系数 α 与正常工作区内电流放大系数 α_0 之比：

$$M = \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

它表示若有一个载流子进入集电结空间电荷层, 则就有 M 个载流子流出空间电荷层。

2. 经验公式:

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_C}{V_B}\right)^n}$$

式中: V_C ——集电极外加电压;

n ——与晶体管材料、结构有关的一个常数。

(1) 在正常工作区内 (即 $V_C < BV_{CBO}$), 由于 $V_C \ll BV_{CBO}$, $M \approx 1$, 则 $\alpha \approx \alpha_0$, 故此区内没有雪崩现象。

(2) 当 $V_C = V_A$ 时, $I_B = 0$, 此时没有注入基极电流 I_B , 所以 $I_C = I_E$, 也就是说经过基区的载流子数目等于通过集电结的载流子数目, 载流子没有被复合, 即 $\alpha = 1$ 。因而倍增因子 $M = \frac{1}{\alpha_0}$ 。由于 $\alpha_0 < 1$, 所以 $M > 1$ 。这表示刚刚开始出现雪崩现象。

(3) 当 $V_C = V_B$ 时, $I_E = 0$, M 趋向无穷大, α 趋向无穷大, 此时亦有雪崩现象。

可见 $V_A < V_C < V_B$ 区域为雪崩区。

(4) 雪崩击穿电压 V_A 和 V_B 之间的关系:

假设 $V_C = V_A$

则
$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^n}$$

因为 $V_C = V_A$ 时 $M = \frac{1}{\alpha_0}$

所以
$$\frac{1}{\alpha_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^n}$$

即
$$\left(\frac{V_A}{V_B}\right)^n = 1 - \alpha_0$$

因而
$$V_A = V_B \sqrt[n]{1 - \alpha_0}$$

(四) 晶体管雪崩运用时的特点

1. 电流放大系数增大了 M 倍。

2. 有效截止频率大大提高。这是由于雪崩运用时的基区宽度远远小于正常工作时的基区宽度的缘故。这使少数载流子渡越基区所需的时间迅速减小, 于是有效截止频率就大为提高。一般雪崩电流的上升时间可在 1ns 之内。

3. 负阻效应: 在雪崩区内的弯曲部分取 P 点为例说明, 当 V_C 减小时, I_C 却增加。这现象即为负阻效应。出现负阻效应是由于雪崩电流流过基极扩展电阻 $r_{bb'}$ 和基极、发射极之间外接电阻 R_{BF} , 产生发射结正向偏压的缘故。这个发射结正向偏压会导致雪崩电流的增加, 集电极电压的下降, 而雪崩电流的增加又继续导致发射结正向偏压的增加。于是, 就形成了负阻效应。

我们就是利用晶体管雪崩运用时的以上这些特点来获得大电流毫微秒或微微秒脉冲的。

(五) 雪崩管的噪声

集电结在高压下运用, 由于结的不均匀性, 各部分的击穿电压也不相同, 通导程度的不同就表现为集电结的雪崩噪声, 一般约 $10 \sim 20\text{mV}$ 。集电结雪崩电压的变化引起基区宽度的相应改变, 这就是发射结的雪崩噪声, 一般约 $1 \sim 10\text{mV}$ 。实际上, 晶体管雪崩噪声是与集电结反向偏压成正比的。即反偏压越高, 雪崩噪声就越大。

二、雪崩晶体管的挑选

(一) 雪崩晶体管的主要参数对雪崩脉冲的影响

1. 击穿电压 BV_{CBO} : BV_{CBO} 高, 则 BV_{CER} 亦高。就可获得幅度大的雪崩脉冲。

2. 反向电流 I_{CEO} : I_{CEO} 大, 则雪崩脉冲受温度的影响大, 并且雪崩噪声亦大。

3. 正常工作区电流放大系数 β_0 : β_0 大, 少数载流子注入效率就高, 雪崩脉冲的幅度就大。

4. 饱和压降 BV_{CES} : BV_{CES} 大, 则晶体管关闭时间长, 这样雪崩脉冲的前沿上升时间就慢。

5. 集电结电容 C_C : C_C 小, 可使脉冲发生器容易起振。

6. 特征频率 f_T : f_T 高(即截止频率高), 晶体管雪崩工作区内的电流增长快, 因而雪崩脉冲的上升时间就快。

7. 存贮时间 t_s : t_s 小, 则少数载流子在基区的存贮时间小, 因而雪崩脉冲的上升时间就快。

(二) 如何挑选雪崩管

由于晶体管的参数比较多, 而且又相互制约。因此, 一般是根据实际需要来挑选的。通常是用取样示波器来挑选雪崩脉冲上升时间较快、幅度较大的管子。如图 3、图 4 所示。

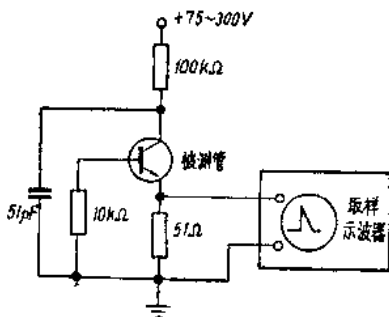


图 3 用电容负载脉冲发生器来挑选雪崩管

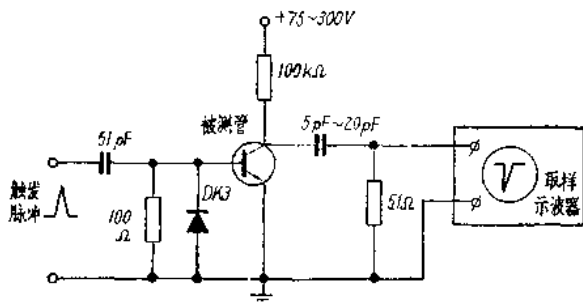


图4 用雪崩触发器来挑选雪崩管

三、雪崩晶体管的应用

(一) 电容负载脉冲发生器

1. 原理：当晶体管处于截止状态时， V_{CC} 通过 R_C 对电容 C_a 充电。当电容 C_a 被充电到电压 BV_{CEM} 时，晶体管就被雪崩导通，此时电容 C_a 通过晶体管放电，直到电流下降到致使晶体管截止为止。

2. 实验曲线(见图6、图7)：

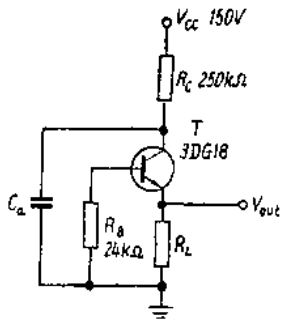


图5 电容负载脉冲发生器

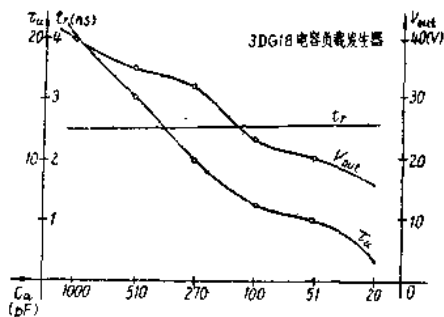


图6 当 $R_L=51\Omega$ 时， C_a 与 τ_{a} 、 t_r 、 V_{out} 关系曲线

从曲线中可以看出当 R_2 固定时, 减小 C_a , 则输出脉冲的幅度 V_{out} 和脉宽 τ_u 也相应减小, 而脉冲上升时间 t_r 却不变, 即 t_r 与电容 C_a 的大小无关。同样可以看出当 C_a 固定时, 减小 R_L , 则 V_{out} 与 τ_u 、 t_r 均减小。上述曲线可供我们如何选择 C_a 与 R_L 时作参考。

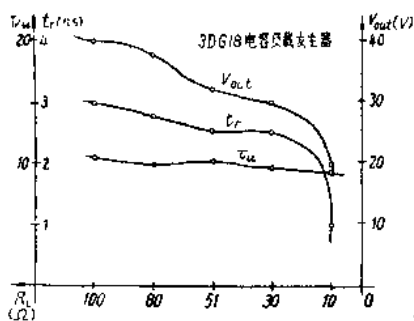


图7 当 $C_a=270\text{pF}$ 时 R_L 与 τ_u 、 t_r 、 V_{out} 关系曲线

3. 起振条件:

$$C_a \geq \frac{C_c}{M-1}$$

上式表示雪崩晶体管的 C_c 如果很大, 则脉冲发生器中电容 C_a 不能过小, 否则就影响起振。然而电容 C_a 也不能用得过大, 过大会使脉宽太大。因此要选 C_c 较小的晶体管

4. 重复周期: 由于重复周期 T 远远大于脉宽 τ_u , 因此我们可以将电源 V_{CC} 对电容 C_a 充电充到 BV_{CES} 的时间作为重复周期, 充电时晶体管可以看作是开路的。则:

$$V(t) = V_{CC} \left(1 - e^{-\frac{t}{R_C C_a}}\right)$$

当 $t=T$ 时 $V(T) = BV_{CES}$, 因此:

$$T = R_C C_a \ln \left(\frac{V_{CC}}{V_{CC} - BV_{CES}} \right)$$

这表示当晶体管选定后, 重复周期 T 可以分别由 R_C 、 C_a 或 V_{CC} 来调节。

(二) 雪崩触发器

1. 原理: 开关二极管 DK3 是箝位二极管, 它的作用是使晶

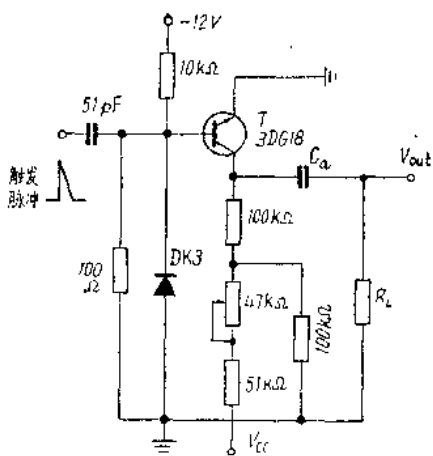


图8 雪崩触发器

晶体管T的基极电压略负于发射极电压，用以保证晶体管T截止，以免自激。

当触发脉冲未输入时，电容 C_a 被 V_{CC} 充电到 BV_{CER} ，一旦触发讯号到达时，晶体管T就产生雪崩导通，集电极电流立刻急剧上升，然后电容 C_a 通过晶体管T与负载 R_L 放电，于是

集电极电压下降，倍增因子 M 就迅速减小，直到雪崩过程结束，此时晶体管T截止，电容 C_a 又被电源 V_{CC} 充电到 BV_{CER} ，触发器等待第二个触发脉冲的到达。

2. 实验曲线(见图9、图10)：

从曲线中可以看出雪崩脉冲的上升时间与电容 C_a 没有关系，但却随着 R_L 的减小而减小。雪崩脉冲的宽度与幅度均随着 C_a 或 R_L 的减小而减小。

3. 现象分析：

(1) 对雪崩管的要求是有大的脉冲幅度，否则当电容 C_a 较大时，

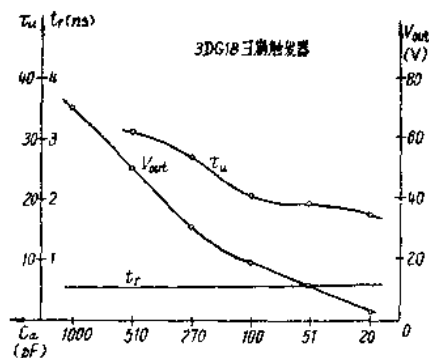


图9 当 $R_L \approx 51\Omega$ 时 C_a 与 τ_u 、 t_r 、 V_{out} 关系曲线

雪崩脉冲的上升沿会出现台阶现象(如图 11 所示)这样就大大影响了脉冲的上升时间。

(2) 电容 C_a 大, 雪崩脉冲的宽度就大, 但后沿却很长。这是由于雪崩脉冲的后沿是按 $e^{-\frac{t}{(R_T+R_A)C_a}}$ 指数放电的缘故。因此, 要产生窄脉冲, 电容 C_a 就不宜过大。指数关系式中 R_A 是雪崩管的等效电阻, R_T 是负载电阻及用来调节脉冲幅度的电阻之总和。

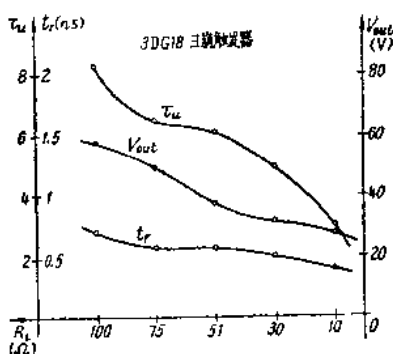


图 10 当 $C_a=100\text{pF}$ 时 R_L 与 τ_a 、 t_r 、 V_{out} 关系曲线



图 11 雪崩管脉冲幅度对上升时间的影响

(三) 延时线控制脉冲发生器

1. 原理: 当触发脉冲未输入时, 晶体管 T 截止, 传输线的电容被电源 V_{CC} 充电到 BV_{CER} 。若触发正脉冲到达时, 则晶体管 T 就被雪崩导通, 集电极电压下降到 LV_{CER} , 于是开路传输线就有 $(BV_{CER}-LV_{CER})$ 的电压降, 通过负载电阻 R_L 与雪崩管的内阻 R_A 以 $(BV_{CER}-LV_{CER})/2Z_0$ 大小的电流放电, 因而传输线始端压降为 $(BV_{CER}-LV_{CER})/2$ 。 LV_{CER} 表示基极与发射极之间接入电阻 R_B 时, 集电极对发射极的电压值, Z_0 为传输线的特性阻抗。传输线始端的阶跃电压沿线向终端传输。到达终端,

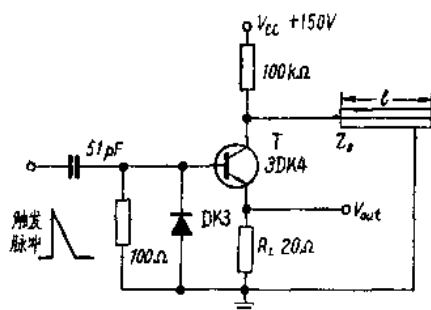


图 12 延时线控制脉冲发生器

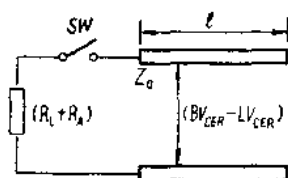


图 13 等效电路

激起反射。电压反射波与入射波反相并且幅度相等，反射波在传输线始端电压波形

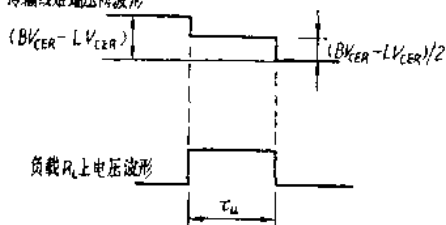


图 14 R_L 及开路线始端电压波形图

一个脉冲触发(如图 14 所示)。

放电电流 $(BV_{CER} - LV_{CER}) \cdot 2Z_0$ 在负载 R_L 上产生的电压就是 V_{out} 。其脉宽 $\tau_u = 2l \times t_d$ 。 t_d 为传输线的延迟时间。

应该指出:要使输出电压平整,必须使 $Z_0 = R_L + R_A$ 。我们从实验中发现 3DK4 雪崩管的 R_A 在 30Ω 左右。

2. 实测波形(见图 15):

2.5 m 对称平衡延时线

$Z_0 = 250\Omega$, $t_d = 64 \text{ ns/m}$

1 m 50Ω 电缆线

$t_d = 5 \text{ ns/m}$

3. 计算式:

脉宽:

$$\tau_u = 2l \times t_d$$

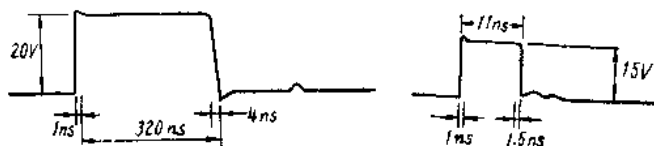


图 15 输出电压波形

脉幅: $V_{out} = (BV_{CER} - LV_{CER}) R_L / 2Z_0$

对于 2.5m 延时线, $\tau_u = 2 \times 2.5m \times 64ns/m = 320ns$ 。实测亦是 320ns。若是 1m 50Ω 电缆线, $\tau_u = 2 \times 1m \times 5ns/m = 10ns$ 。实测是 11ns。

(四) 双脉冲输出单稳电路

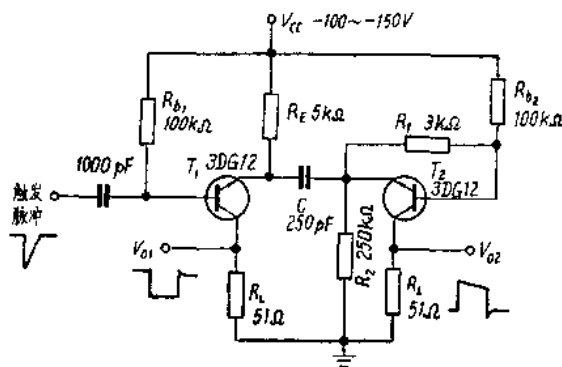


图 16 双脉冲输出的单稳电路

1. 原理: 触发脉冲未输入时, 晶体管 T_1 导通。 T_1 管的基极与发射极电压比地负 LV_{CER} , $V_{EB_1} = -0.2 \sim -0.3V$ 。流过 T_1 管的静态电流在 6mA 左右。晶体管 T_2 的发射结被反偏, 此时 T_2 管截止, $V_{EB_2} = 0.75 \sim 0.8V$, T_2 管基极对地负 BV_{CER} 。

当触发脉冲输入时, T_1 管发射极电压下降, 通过电容 C 耦合到 T_2 , 由于 T_2 发射结被 $0.75 \sim 0.8V$ 电压反偏, 因此只要触

发脉冲大于此值即可使发射极电流注入 T_2 管内。由于 T_2 管的 V_{CE} 接近于 BV_{CER} ，所以倍增因子 M 很大。于是电压的下降使 T_2 管产生了雪崩。此时 T_2 管发射极电压 V_E 减小到 LV_{CER} 。这样 T_1 管发射极电压对地为 $(BV_{CER} - LV_{CER})$ 而被反偏。在 T_1 管发射极电压到达 BV_{CER} 时， T_1 管产生雪崩。电流又转入 T_1 管内。于是周期结束，等待下一个触发脉冲的到达。各点波形见图 17。

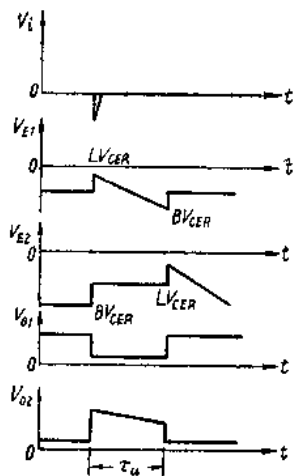


图 17 各点波形图

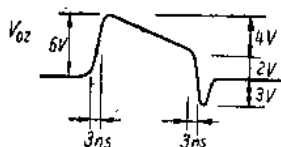
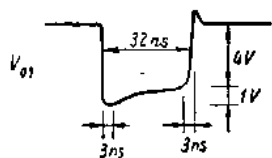


图 18 实测波形

2. 实测波形(见图 18);

3. 计算式:

输出电压: $V_{out} = R_L I$

脉宽: $\tau_u = \frac{C}{V_{out}} (BV_{CER} - LV_{CER})$

式中 I 为雪崩电流。脉宽 τ_u 的改变可通过调节电容 C 的大小及雪崩电流 I 的大小来实现。而输出电压 V_{out} 却仅与雪崩

电流 I 有关, 而与电容 C 无关。

4. 数据及计算:

C (pF)	51	150	250
τ_u (ns)	17	28	32
V_{out} (V)	5	5	5

现采用 3DG12 晶体管, 其 $BV_{CER} = 70V$, $LV_{CER} = 55V$ 。

$$\begin{aligned}\tau_u &= \frac{C(BV_{CER} - LV_{CER})}{V_{out}} \\ &= \frac{250 \times 10^{-12} \times (70 - 55)}{5} \approx 37.5 \text{ ns}\end{aligned}$$

实测 32 ns。

此电路 R_b 、 R_{b_1} 及 R_2 须大些。以取得半恒流。并且 R_{b_1} 与 R_2 要选得适当。使 V_{c1} 接近于 BV_{CER} 。同时, V_{CC} 应该足够高, 这样能保证 T_1 管、 T_2 管产生雪崩。特别要注意的是 T_1 管不能过荷, 即 $IIV_{CER} < P_D$, P_D 为 T_1 管的功率耗散。

(五) 组合脉冲发生器

电容负载脉冲发生器与雪崩触发器的输出脉冲宽度可通过电容的大小来调节, 上升时间小, 则能产生大电流脉冲, 但是脉冲波形却不易获得矩形, 只能是尖脉冲。延时线控制的脉冲发生器虽然容易产生矩形脉冲, 而且上升时间也较短, 但脉宽却不能连续可调。具有双脉冲输出的单稳电路虽然能产生上升时间短, 脉宽易调的矩形脉冲, 但脉冲的幅度却不够大而且不易调节。

组合脉冲发生器是由雪崩管和作用在饱和工作状态下的开关晶体管组成的。前者为了获得陡峭的上升前沿, 后者能使脉冲平顶。这种发生器可获得宽度、幅度易调的矩形脉冲。

方块图及线路图(见图 19、图 20):

式中: R_A ——电路产生雪崩时晶体管的内阻;

R_T ——负载 R_L 与调节脉冲幅度的电阻 R 之和;

C_a ——雪崩级集电极输出到负载的电容;

$L V_{CER}$ ——基极与发射极间接入 R 时 V_{CE} 的值。

当电路工作在晶体管雪崩工作区内, 电流是按指数增长的。

$$I_C = \frac{\alpha_0 \Delta V}{(1 - \alpha_0) r_b + r_e} [1 - e^{-\omega_a (1 - \alpha_0 + \frac{r_e}{r_b}) t}]$$

式中: α_0 ——低频时的电流传输系数;

r_e, r_b ——小信号时的晶体管等效电路参数;

ω_a —— α 角截止频率;

ΔV ——输入电压。

因此, 它的正常工作条件为:

$$\frac{\alpha_0 \Delta V}{r_e + (1 - \alpha_0) r_b} = \frac{BV_{CER} - LV_{CER}}{R_A + R_T}$$

它表示雪崩脉冲的幅度与开关幅度相等, 于是就减小了输出电压波形的上冲(如图 21 所示)。

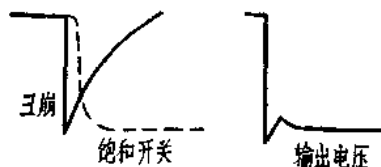


图 21 雪崩、开关幅度相等时输出电压波形的上冲最小

$$\omega_a \left(1 - \alpha_0 + \frac{r_e}{r_b} \right) = \frac{1}{(R_A + R_T) C_a}$$

它表示当雪崩电流的指数律与晶体管作用区内的电流指数律一致时, 才能达到整形的目的。若 C_a 太大或太小均不能得到理想的矩形脉冲, 如图 22 所示。