

高等学校教材

核电子学基础

下册

周志成 编著

原子能出版社

高等学校教材

核电子学基础

(下册)

周志成 编著

原子能出版社

内 容 简 介

本书为高等院校核物理专业核电子学课程的基础教材。分上、下册出版。上册内容包括：电路基础、晶体管基础知识、脉冲讯号放大、集成运算放大器、稳压电源。下册内容包括：脉冲电路、数字集成电路和数字集成电路的应用。

本书也可供使用、维修和研制核电子仪器的工人和技术人员参考。

高等学校教材

核电子学基础 (下册)

周志成 编著

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张12.25·字数305千字

1986年3月北京第一版·1986年3月北京第一次印刷

印数1—2600·统一书号：15175·741

定价：2.00元

目 录

第六章 脉冲电路	1
§ 1 晶体管的开关特性	1
一、二极管	1
二、三极管	3
思考题与练习题	8
§ 2 双稳态电路	9
一、工作原理	9
二、电路的触发方式	11
三、二进制计数器	15
思考题与练习题	17
§ 3 单稳态电路	18
一、工作原理	19
二、触发条件及宽度计算	21
思考题与练习题	23
§ 4 无稳态电路	23
思考题与练习题	25
§ 5 脉冲幅度甄别电路	25
一、射极耦合触发器	26
二、集成电压比较器	35
思考题与练习题	39
§ 6 隧道二极管电路	40
一、隧道二极管特性	40
二、隧道二极管应用举例	43
思考题与练习题	46
第七章 数字集成电路	48
§ 1 基本逻辑门电路	48
一、与门	49
二、或门	50
三、非门	51
四、与非门	52
五、或非门	52
六、禁止门	53
七、异或门	53
思考题与练习题	54
§ 2 逻辑代数及其应用	54
一、逻辑代数	54

二、逻辑电路的设计方法	56
三、用与非门组成各种逻辑电路	57
四、正逻辑与负逻辑	60
思考题与练习题	61
§ 3 逻辑门电路的基本特性	62
一、输入-输出特性(电压传输特性)	63
二、噪声容限——抗干扰性	64
三、负载能力	66
四、平均传输延迟时间	67
思考题与练习题	68
§ 4 各种数字逻辑门集成电路简介	68
一、低速二极管晶体管逻辑电路(DTL电路)	68
二、中速晶体管晶体管逻辑电路(TTL电路)	72
三、高速TTL电路	78
四、与或非门	79
五、电流型逻辑电路(CML电路)	79
六、场效应管逻辑电路	81
七、接口电路——逻辑电平转换电路	89
思考题与练习题	92
§ 5 基本触发器电路	93
一、RS 触发器	94
二、JK 触发器	101
三、维持-阻塞触发器	105
四、D触发器——延迟触发器	108
五、T触发器——反复触发器	114
思考题与练习题	115
第八章 数字集成电路的应用	118
§ 1 计数系统	118
一、二进制计数器	118
二、十进制计数器	122
三、寄存器	130
思考题与练习题	137
§ 2 译码与显示	138
一、译码的一般方法及化简	139
二、显示器件及其译码电路	142
三、卡诺图化简法	155
思考题与练习题	158
§ 3 脉冲电路	160
一、用于脉冲电路中的与非门的特性	160

二、无稳态电路.....	166
三、单稳态电路.....	175
四、脉冲幅度甄别电路.....	180
思考题与练习题.....	182
§4 数字系统举例——自动定标器.....	184
附录 半导体集成电路型号命名方法.....	188

第六章 脉冲电路

在前面几章中，我们讨论过晶体管放大器，输入都是小讯号，晶体管的工作范围处于放大区。在这一章中我们将讨论脉冲讯号的变换或产生，输入、输出的讯号都是大幅度跳变的脉冲，晶体管工作在饱和区或截止区。在饱和区晶体管处于短路状态，在截止区则处于开路状态，相当于一个开关一样。工作在开关状态的晶体管所表现出来的特性与工作在放大区时不同，有它的特殊矛盾，晶体管的小讯号等效电路已经不适用了。因此，我们首先要掌握晶体管在开关状态运用时的特性，然后在此基础上来分析各种脉冲电路。

§ 1 晶体管的开关特性

一、二极管

我们知道二极管具有单向导电的特性。正向偏置时，二极管导通，正向电阻 R_f 非常小，反向偏置时，二极管截止，反向电阻 R_r 非常大。但是当我们要想使二极管由导通状态很快地截止时，二极管却不能立刻截止，这就存在着二极管开关速度的问题。

(一) 反向恢复时间

考虑图6-1的电路，当开关K扳到“1”时，正电压 V_1 通过电阻 R 加到二极管 D ，使其导通，流过正向电流为 I_f ，

$$I_f = \frac{V_1}{R + R_f} \quad (6.1)$$

其中 R 为外电路电阻， R_f 为二极管正向电阻。此时 P 区中的空穴扩散到 N 区，显然靠近 PN 结

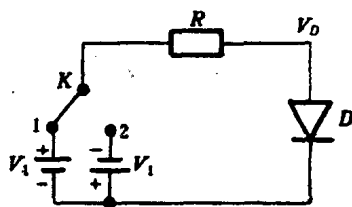


图6-1

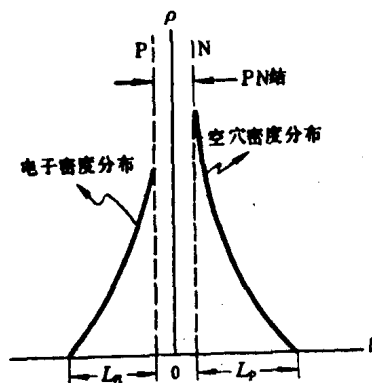


图6-2

处空穴的密度大。在一定的距离内，空穴一边扩散，一边与电子复合而消失，这个距离称为扩散长度，用 L_p 表示，它是一个平均值，其意义为载流子未被复合前所能扩散的平均距离

(也就是说一些载流子扩散很短距离就被复合了, 而另一些可能扩散很长距离才被复合。因此对每一个载流子平均起来有一个平均的扩散长度, 超过此距离的载流子平均起来都被复合了)。于是在 N 区内空穴就有一定的分布如图6-2所示, 右边为空穴密度 ρ 在 N 区内的分布, 在扩散长度 L , 内就有一定数量的空穴存储着, 离PN结愈远, 其密度愈小。正向电流愈大, 密度分布也愈陡即斜率愈大, 因而被存储的空穴也愈多(同理, 如果载流子的密度分布愈陡即斜率愈大, 则流出的电流也愈大; 斜率不变, 电流也不变; 实际上扩散电流与载流子的密度分布的斜率成正比)。电子由 N 区扩散到 P 区中的情况也是这样, 电子密度分布画在图6-2的左边, 图中 L_n 为电子的扩散长度。

当开关 K 突然由“1”扳到“2”, 电压由 $+V_1$ 转为 $-V_1$ 时, 被存储的载流子(如 N 区中的空穴)不可能立即跟着电压的反向而消失, 而是需要一定的时间逐渐地消失, 在这些载流子未消失以前, PN 结仍为正向偏置, 二极管仍然表现为低阻抗元件。所以反向电流并不立即趋于反向饱和电流, 而先是一个较大值 $I'_b = -V_1 / (R + R')$, 因为 $R' \ll R$, 故 $I'_b \approx -V_1 / R$ 。经过一段时间 τ_s 后, 大部分存储的空穴被拉回 P 区, 仅剩下 N 区中的少数载流子形成漂移电流。这时电流趋向于稳定时的反向饱和电流 $I_b = -V_1 / (R + R_b)$ 。其中 R_b 为反向电阻, 数值很大, 所以反向饱和电流 I_b 很小, $I_b \approx -V_1 / R_b \approx 0$ 。流过二极管 D 的电流随时间的变化如图6-3(b)所示, 其中 τ_s 称为存储时间, τ_f 称为下降时间, $\tau_r = \tau_s + \tau_f$ 称为二极管

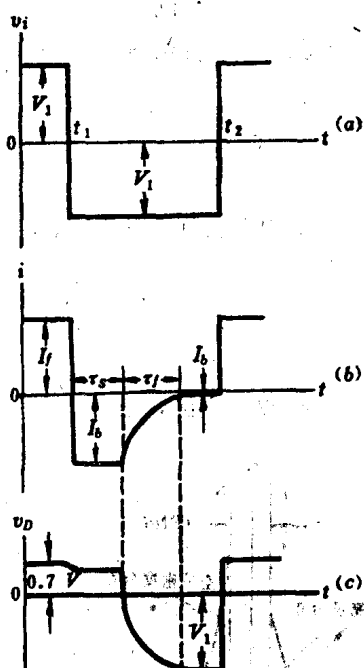


图6-3

的反向恢复时间。电压波形如图(c)所示, 正向压降近似为 $0.7V$ (硅管)。当外加电压突然反向时, 由于存储电荷的效应, 二极管仍然表现为低阻元件, 正向压降还要保持一段时间, 但其数值稍有降低, 然后再趋向反向压降。这时可以把二极管 PN 结看成一个“电容”, 图6-1就成一个积分电路。尽管外加电压已反向, “电容”上存储的电荷需要一段时间才能放掉。

二极管反向恢复时间的快慢直接影响二极管开关性能。因此能否缩短二极管的反向恢复时间就成为晶体二极管能否成为良好的高速开关元件的首要问题。显然, 反向恢复时间与正向电流和外电阻 R 的大小有关。正向电流大则存储的空穴多, 而外电阻大则反向拉回空穴的量小, 因此都会增加反向恢复时间, 所以小的正向电流或外电阻都可以减小反向恢复时间。

当然, 从电路上来考虑减小反向恢复时间总是有一定的限度的, 关键在于管子本身。因此从工艺上改进, 使管子中存储的载流子减少, 制成了开关二极管, 从而大大地提高了开关速度。

二极管由截止到导通, PN 结由宽变窄, 也需要一定的时间, 称为正向恢复时间。在这段时间内, PN 结先是呈现较大的正向电阻, 然后进入小的正向电阻, 二极管充分导通, 不过这段时间很短, 比反向恢复时间小很多, 可以不考虑。例如对某一种二极管, 正向恢复时间约为 $80ns$, 而反向恢复时间为 $300ns$ 。

(二) 扩散电容

在第二章中我们曾经讨论过二极管有一个结电容，它主要在反向偏置时起作用，而在正向工作时它被小的正向电阻旁路了，影响很小。

但是当二极管正向工作时，如输入电压有一突变，正向电流突然增大，少数载流子（如N区中空穴）的密度就要重新分布，如图6-4中由（1）变到（2）。重新分布需要一定的时间，其分布过程大体如图中 t_1 、 t_2 、 t_3 所示。在 t_1 时的密度斜率大，然后逐渐变小稳定于（2），等到密度分布稳定后，流过二极管的电流 I_D 也就稳定了。根据上面所述，密度分布的斜率大，流出的电流也大，因而流过二极管的电流如图6-5(b)所示，图中的时间对应于图6-4中的时间。这表明了二极管正向导通时，与正向电阻并联了一个较大的电容，这个电容是由于少数载流子的密度重新分布引起的，也即由少数载流子的扩散引起的，所以称为扩散电容。实际上分布（2）减去分布（1）即为二极管在外加电压变化 dV 时所引起的电荷增量 dQ ，根据电容的定义即得扩散电容 C_D 为

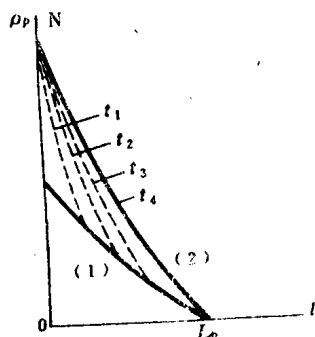


图6-4

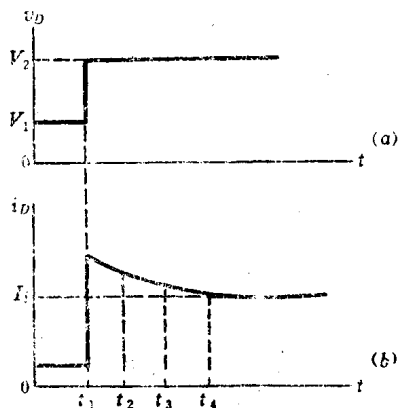


图6-5

$$C_D = \frac{dQ}{dV} \quad (6.2)$$

可见，流过二极管的电流愈大，扩散电容愈大。但二极管的正向电阻却随着电流增大而减小，所以二极管本身固有的时间常数 $R_1 C_D$ 几乎不随电流而变。显然，如输入讯号的变化比这时间常数要快，那么扩散电容的影响不能忽略，反之扩散电容的影响可以忽略。

总之，二极管的开关速度主要受到反向恢复时间及扩散电容、结电容的限制。

二、三极管

在晶体三极管脉冲电路中，晶体管工作在截止或饱和状态。晶体管在截止状态时，发射结和集电结皆处于反偏状态，发射结反偏越深则晶体管也截止得越厉害。晶体管截止时三个电极可以看成断开，相当于开关断开的情形。

当晶体管处于饱和状态时，它的发射结和集电结都处于正向偏置状态。两个结电压仅为零点几伏，因此可以看成三个电极都接通，相当于开关接通的情形。

我们结合图6-6所示的开关电路进行分析。电源电压 $V_{cc} = 12V$ ， $-V_{BB} = -12V$ ， $R_c = 1k\Omega$ ， $\beta = 100$ 。负载线画在图6-7上。静态时，输入讯号为零伏， $V_{be} = -V_{BB} R_1 / (R_1 + R_2)$

$= -1.3V$ ，因此，管子处于截止状态，工作点在B点。当管子进入饱和时，其工作点由B点跳至A点，相应的集电极电流由图可知约为11.5mA，此电流称为集电极饱和电流，用 I_{cs} 表示，相应的管压降为0.3V左右，称饱和压降 V_{ces} 。从图6-6可以求出，在晶体管饱和时

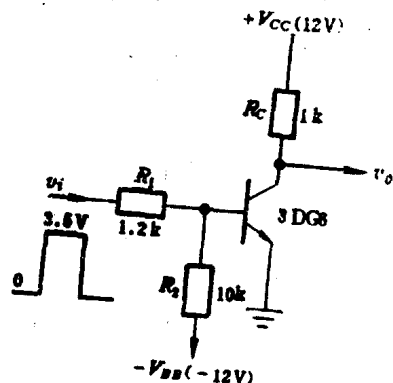


图6-6

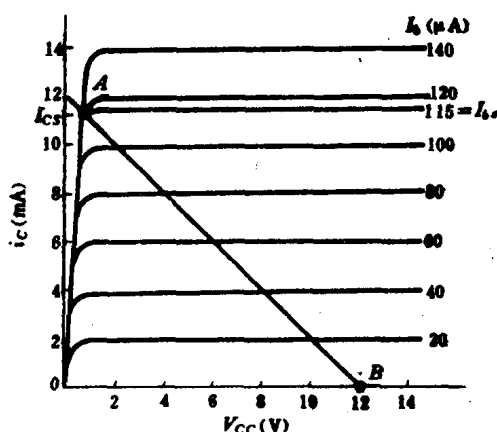


图6-7

(图中 V_{ce} 应为 V_{ce})

$$I_{cs} = \frac{V_{cc} - V_{ces}}{R_c} \approx \frac{V_{cc}}{R_c} \quad (6.3)$$

使晶体管刚进入饱和时所需的基极电流称为临界（饱和）基极电流 I_{bs} ，可由下式求出

$$I_{bs} = \frac{I_{cs}}{\beta} \quad (6.4)$$

由图6-7可见，对于图6-6电路， $I_{bs} = 115\mu A$ 。如果注入的基极电流 $I_b > I_{bs}$ ，则管子仍然处于饱和状态，工作点仍在A点，集电极电流及电压仍为 $I_{cs} = 11.5mA$ 和 $V_{ces} \approx 0.3V$ ，保持不变。也就是说晶体管进入饱和后，集电极饱和电流不再随基极电流的增大而增大，其值由(6.3)式决定。这样，超过临界（饱和）基极电流的电子就堆积或存贮在基区中了，注入的基极电流愈大于临界（饱和）基极电流，晶体管饱和愈深。饱和深度用S表示，定义如下：

$$S = \frac{I_b}{I_{bs}} \geq 1 \quad (6.5)$$

当 $I_b = I_{bs}$ 时即为临界饱和，饱和深度为1，如 $I_b = 2I_{bs}$ ，则饱和深度为2。

用等效电源定理可以将图6-6电路等效成图6-8所示的电路。晶体管饱和时， $V_{ces} \approx 0.7V$ （对硅管而言），因此注入的基极电流 $I_b = (1.8V - 0.7V) / 1.1k\Omega = 1mA$ ，而 $I_{bs} = 115\mu A$ ，所以 $S = 1mA / 115\mu A = 8.7$ 。

当晶体管工作在上述开关状态时（即输入电压为 $-1.3V$ 时，管子截止，集电极电压为12V，而当输入跳至 $+1.8V$ 时，晶体管饱和，集电极电压为0.3V），它的各极波形如图6-9所示。

三极管起初处于深截止状态（ $V_{be} = -1.3V$ ）。在 t_0 时刻输入端加入图6-9(a)所示的矩形脉冲。这时三极管基极电流的变化波形同二极管一样，如图(b)所示。在 t_0 时刻输入脉冲结束，三极管基极出现较大的反向电流，经过一段时间后才趋向于反向饱和电流。基极电压波形也同二极管一样，如图(c)所示，基极正向电压要保持一段时间，然后再趋向于反

向电压。三极管集电极电流波形是我们这里要分析的重点。见图(d)。三极管起初处于深截止状态，在基极刚加入正脉冲时，管子并不立即导通，而是经过一段延迟时间 τ_d ，又经过

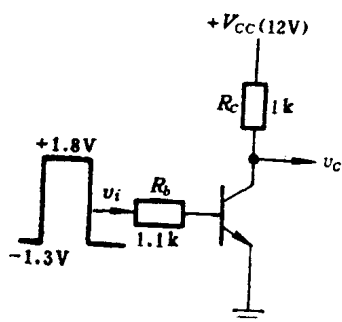


图6-8

一段上升时间 τ_r ，才达到饱和导通状态 $i_c = I_{cs} \approx 12\text{mA}$ 。 $\tau_{on} = \tau_d + \tau_r$ 称为三极管的开通时间。在 t_s 时刻输入脉冲电压突然下降，管子也不是立即截止，而是经过一段存贮时间 τ_s ，又经过一段下降时间 τ_f 才进入截止状态， $i_c = 0$ 。 $\tau_{off} = \tau_s + \tau_f$ 称为关闭时间。集电极电压波形见图(e)，也分别有上述几种时间存在。可见这几种时间的出现是晶体管工作于开关状态所特有的，下面简单地作一些讨论。

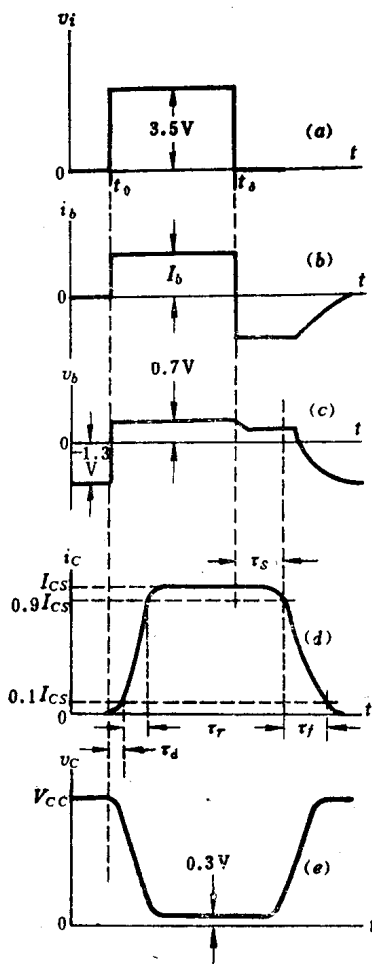


图6-9

(一) 延迟时间 τ_d

输入脉冲加入前，发射结与集电结都处于反向偏置，即处于深截止状态。这时发射结电压 $V_{be} \approx -1.3\text{V}$ ，集电结电压 $V_{ce} = V_{cc} - V_{be} = 12\text{V} - (-1.3\text{V}) = 13.3\text{V}$ 。当 v_i 突然跳到 $+1.8\text{V}$ 时（见图6-8），发射结将由反向偏置转化为正向偏置， V_{be} 要从 -1.3V 变为 $+0.7\text{V}$ 。集电结电压亦从 13.3V 降到相应的 $V_{ce} = 0.3 - 0.7 = -0.4\text{V}$ 。结电压的变化，使结电容有一个充（放）电的过程，这就是产生延迟时间的原因（应该指出在发射结电压由反偏到正偏的过程，结的厚度减小结电容增大，会使延迟时间进一步变大）。所以延迟时间 τ_d 就是晶体管从起始截止状态到开始导通所需的时间。截止越浅则 τ_d 越短。它的定义为从加入输入讯号的开始到集电极电流上升到 $0.1I_{cs}$ 时所需的时间。

τ_d 和管子的发射结的结电容有关，结面积小，结电容小， τ_d 就短；其次和电路条件有关，反向偏压愈负， τ_d 愈大，输入电流驱动能力大， τ_d 就小。

(二) 上升时间 τ_r

经过 τ_d 时间后,发射区开始向基区注入电子,在基区宽度 W 的范围内,电子向集电区扩散,从而在基区中形成一定的密度分布,见图6-10中的分布(2),相应于这个密度分布就有一定的集电极饱和电流 I_{cs} 。但是这个分布的形成有一个过程,即随着电子由发射区发射到基区,靠近发射区的电子密度逐渐增大,分布曲线的斜率也就逐渐增大,于是集电极电流也就逐渐增大,一直到分布形成,集电极电流达到 I_{cs} 值,这个过程所需要的时间就是上升时间 τ_r 。它的定义为集电极电流由 $0.1I_{cs}$ 上升到 $0.9I_{cs}$ 所需的时间。显然在基区内存贮了少数载流子(电子)。存贮的电荷为 Q_b 。

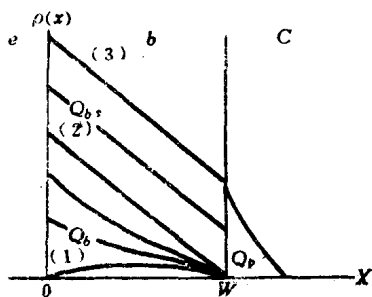


图6-10

综上所述,上升时间就是晶体管从开始导通到进入临界饱和所需的时间。 τ_r 和管子的基区长度 W 有关。 W 愈小 τ_r 就愈小。 τ_r 与外电路的条件也有关,输入讯号大,驱动电流大,加速了载流子的扩散速度, τ_r 就减小。

(三) 存储时间 τ_s

上升时间结束后,集电极电流达到稳定值 I_{cs} ,晶体管进入临界饱和, $I_{cs} \approx V_{cs}/R_c$ 不再变化,对应于此时的基极饱和电流为 I_{bs} 。如外加基极电流 $I_b > I_{bs}$,发射区不断发射电子到基区,但集电结已正偏不能收集这些电子,因此这些电子只能存贮在基区中,形成超额的存贮电荷,在图6-10中用 Q_{bs} 表示。由于 I_{cs} 不变,因此这些电子形成的分布平行于分布(2),显然饱和深度愈深则存贮的超额电荷 Q_{bs} 也就愈多。

此外由于集电结正偏,在集电区也存贮了一定量的空穴 Q_c ,它也有一定的密度分布如图6-10中所示。

输入讯号下降使晶体管截止,但由于基区及集电区存贮了电荷 Q_{bs} 及 Q_c ,晶体管不能立刻截止,需要将这些电荷消散,即要使晶体管退出饱和,才能趋于截止,这就需要一定的时间,这段时间称为存储时间,即图中由分布(3)退到分布(2)所需的时间(其中包括了 Q_c 消失的时间)。也可以说存储时间就是晶体管退出饱和所需的时间。晶体管饱和愈深, Q_{bs} 、 Q_c 愈多,它们的消散过程也就愈慢,存储时间 τ_s 就愈大。它的定义为由输入讯号结束到集电极电流下降到 $0.9I_{cs}$ 所需的时间。

减小存储时间可以用加大发射结的反向电压,即加大反向基流的办法,使存贮电荷迅速消散。

(四) 下降时间 τ_f

当电荷 Q_{b1} 消失后,基区中存贮的电子 Q_{b2} 也开始逐渐消散,密度分布由(2)回到(1),晶体管截止,这一过程所需的时间即为下降时间 τ_f ,其定义为集电极电流由 $0.9I_{cs}$ 下降到 $0.1I_{cs}$ 所需的时间。上面减小存贮时间的办法也可以用来减小下降时间。

从上面的讨论可以知道,晶体三极管当作开关用时,特别是使晶体管在饱和和截止两个状态之间转换时,是有一定的开关时间的。开通时间 τ_{on} 是对结电容充电以及基区建立电荷所需的时间,而关闭时间 τ_{off} 则是清除基区内存贮的电荷所需的时间。所以一个管子的开关特性主要是由管子的构造决定的。高频管尽管频率特性很好,基区很薄,结电容也很小,但它主要是工作在放大区。当它一进入饱和工作状态,基区存贮效应的矛盾就突出了,因此普通高频管用于开关状态时就受到限制,通常用在重复频率低于1MHz的脉冲线路中。例如,高频管3DG6A,其特征频率 $f_T = 100\text{MHz}$,但是开通时间 $\tau_{on} \approx 100\text{ns} = 0.1\mu\text{s}$,关闭时间 $\tau_{off} \approx 120\text{ns} = 0.12\mu\text{s}$,这样开关时间高达 $0.22\mu\text{s}$,这时如果输入一串 $0.1\mu\text{s}$ 宽、周期为 $0.2\mu\text{s}$ 的脉冲讯号,用3DG6A高频管做成的开关电路就起不了开关作用,开不通,关不断,如图6-11所示。因此要使管子的开关性能好,就必须从管子内部构造着手,尽量减少少数载流子在基区内的存贮效应,制造出了一种专用作开关元件的开关管,它的构造特点是:结的面积小,以尽量减小结电容;基区薄,并且掺入一些元素金以形成复合中心,加快复合速度以减少存贮效应,这样开通时间和关闭时间都大大缩短。如常用的开关管3DK2B,它的开通时间 $\tau_{on} \approx 20\text{ns}$,关闭时间 $\tau_{off} \approx 40\text{ns}$ 。当管子选好后,电路设计的任务,就是充分利用管子本身的性能,使电路的开关特性更好些。

前面已经讨论过,增大晶体管基极的正向驱动电流,可以缩短开通时间,但饱和程度加深了,关闭时间反而会加大;同样单纯增加基极反向驱动电流,可以缩短关闭时间,但截止深度加深了,开通时间就增加了。这样总的开关时间没有多大改善。如加入图6-12所示的讯号,晶体管的开关时间就可以大大得到改善。 I_{b1} 为正向驱动电流,可以缩短开通时间; I_{b2} 亦为正向驱动电流,比 I_{b1} 稍大些,而比 I_{b1} 小得多,使晶体管达到饱和,但不进入深饱和; I_{b2} 为反向驱动电流,可缩短关闭时间; Δt_1 、 Δt_2 只要略大于上升和下降时间即可。

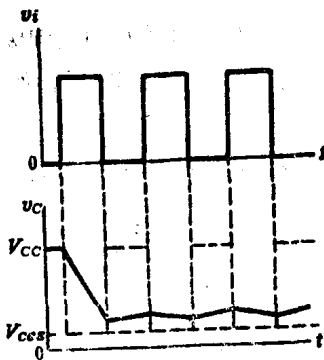


图6-11

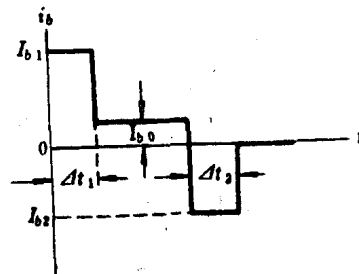


图6-12

为此我们在图6-6电路中 R_1 两端并联一个小电容 C ,如图6-13所示。这就形成了脉冲分压器中的过补偿情况,于是便可获得类似于图6-12的电流波形,如图6-14所示。电容 C 的引入加速了晶体管的开关时间,所以称为加速电容。这种方法在晶体管开关电路中是常用的。

由上所述,要使加速电容起到作用,在脉冲作用期间 δ 内,电容 C 必须充满电荷。由图6-13可知,输入电路的时间常数为 $\tau = (R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}) C$,其中 r_{be} 为晶体管的输入电阻。在饱和和导通的情况下 $r_{be} \ll R_2$ 。只要满足 $\tau \ll \delta$ 就可以把电容 C 充满,通常取 $\delta = 5\tau$ 就可以了。由于 $(R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}) C < R_1 C$,决定 C 值的公式就简化为

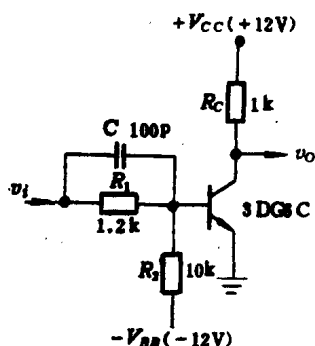


图6-13

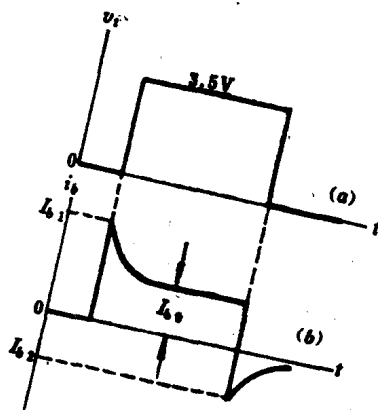


图6-14

$$C = \frac{\delta}{5R_1} \quad (6.6)$$

电容 C 的数值要选择恰当。 C 太大,充放电过程慢,会影响稳态;也不能选得太小,因晶体管基极对地还有输入电容。实际上基极脉冲讯号可看成加速电容与输入电容对输入讯号分压,这样加速电容太小就会影响加速作用。因此 C 的决定除了由(6.6)式估算外,还须在实验中进行调整。另外,加速电容实际上成为前一级电路的负载电容,也要考虑到对前一级电路的影响。一般加速电容选择为几十微微法。

思考题与练习题

- 6-1-1 造成二极管具有一定的开关速度的主要因素是什么?
试简单分析之。
- 6-1-2 提高二极管开关速度有哪些方法?
- 6-1-3 试画出图6-15的输出波形,令脉冲宽度 $\delta > \tau_r$, τ_r 为二极管 D 的反向恢复时间。
- 6-1-4 如何理解扩散电容,它与结电容有什么区别?它们在什么情况下起作用?
- 6-1-5 试分析晶体三极管的开关性能。
- 6-1-6 在图6-6的电路中,当输入讯号的幅度增大时,集电极输出讯号的波形有什么变化,并说明之。
- 6-1-7 试分析加速电容的作用。

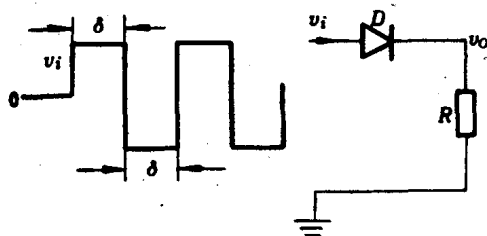


图6-15

§ 2 双稳态电路

双稳态电路是脉冲电路单元中的基本单元之一，又称触发器。在这节中我们要讨论的双稳态电路，是集电极基极耦合双稳态电路。

一、工作原理

电路如图6-16所示。这是一个外加偏压饱和式双稳态电路。其特点是左右两半完全对称，即晶体管 T_1 与 T_2 的参数一致， $R_{c1} = R_{c2}$ ， $R_1 = R_2$ ， $R_{b1} = R_{b2}$ 。电路动作的特点是具有两个稳定状态。只要电路中元件参量设计合适，满足一定条件，则一管饱和，另一管截止。这种状态一经建立就一直保持，如有外加讯号来触发它，管 T_1 和管 T_2 的状态就会互相转换，然后保持新的稳态不变。

如果把图6-16的电路画成如图6-17所示，然后在管 T_1 的基极输入一个正讯号，在它的集电极给出一个放大的负讯号，通过电阻 R_1 与 R_{b2} 耦合到管 T_2 基极，在其集电极输出一个放大的正讯号，通过电阻 R_2 及 R_{b1} 又反馈回到管 T_1 的基极，加强了管 T_1 的输入，因此它是一个正反馈放大器。它的增益 A_f 为

$$A_f = \frac{A_0}{1 - bA_0} \quad (6.7)$$

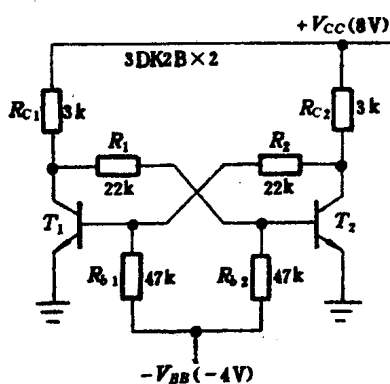


图6-16

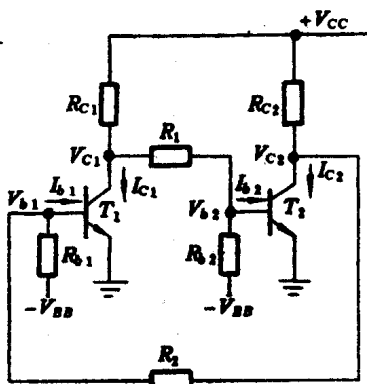
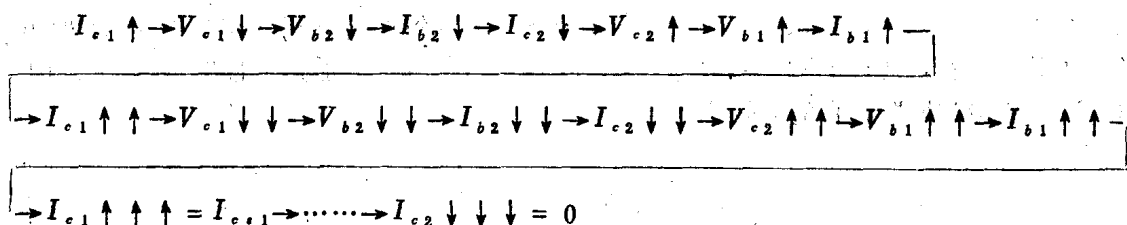


图6-17

其中 b 为反馈系数， A_0 为无反馈时的增益即开环增益，而 bA_0 则为回路增益。由上式可以看出，当 $bA_0 < 1$ 时，为一正反馈放大器，其增益 $A_f > A_0$ ，而当 $bA_0 = 1$ 时，增益 A_f 变成无穷大，表明只要有很微小的讯号输入，就会有极大的讯号输出；当 $bA_0 > 1$ 时，正反馈作用更强，放大器增益 A_f 自动变号，所以当 $bA_0 \geq 1$ 时，电路已经与放大器的工作情况完全不同。根据这种分析，就不难理解双稳态电路的基本工作原理。

双稳态电路虽然是对称的，但当电路一通电，两管所流过的电流不一定相同。这是因为外界各种干扰因素、环境条件（如温度）对两管所起的作用不会完全相同，以及电路两边总

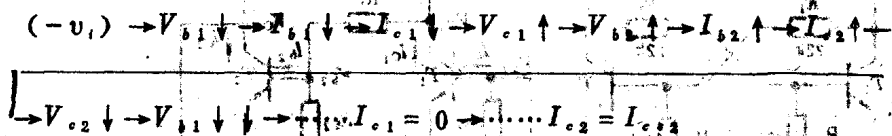
会存在着一些差异。于是通电后，假设流过管 T_1 的电流 I_{c1} 比流过管 T_2 的电流 I_{c2} 要大一些，这样管 T_1 的集电极电压 V_{c1} 下降得要多一些，此下降的电压经过电阻 R_1 与 R_{b2} 分压加到管 T_2 的基极，使管 T_2 的基极电流减少，因而 I_{c2} 减少， V_{c2} 就上升，此上升的电压经电阻 R_2 与 R_{b1} 耦合到管 T_1 的基极，使其基极电流增加，因而 I_{c1} 就更增大，形成一个正反馈过程。如果电路满足 $bA_0 \geq 1$ 的条件（因为 $A_0 = v_o/v_i$ ， v_o 为输出讯号， v_i 为有效输入讯号， b 在上述电路中则为电阻 R_2 与 R_{b1} 的分压比，所以 $bA_0 = bv_o/v_i \geq 1$ ，表明 $bv_o \geq v_i$ ，而 bv_o 即为反馈回来的讯号，所以 $bA_0 \geq 1$ 的意义就在于每次反馈回来的讯号要大于有效输入讯号）。这样当反馈一建立，电路中电压及电流的变化可以通过反馈回路自动进行，最初的输入讯号仅起“触发”作用（在上述电路中，两边电路的差异而引起一管电流大一些可以等效地看成有一个有效输入讯号在起着触发作用）。当电路满足 $bA_0 > 1$ 的条件时，每次由于反馈而引起的管 T_1 基极电流的增量 $\Delta I'_{b1}$ 都比前一次的 ΔI_{b1} 要大，也就是说原始变化所引来的新变化大于原始变化本身。这样 I_{c1} 就一直猛增而 I_{c2} 急剧下降，最终使管 T_1 达到饱和，而管 T_2 截止，成为一个稳定状态。这样一个过程我们称之为雪崩过程。所以 $bA_0 \geq 1$ 又称为雪崩条件。上述过程可以写成



整个雪崩过程所需的时间是极短的，小于零点几微秒。

当电路进入稳定状态以后，如果没有外加触发讯号输入，电路就一直保持在这个稳定状态，管 T_1 饱和，管 T_2 截止。

现在我们在管 T_1 基极加一足够大的负向触发讯号 $-v_i$ ，使 T_1 退出饱和区进入放大区，那么 T_1 集电极电流减少，集电极电压上升，于是发生下面的雪崩过程：



结果使 T_1 由原来的饱和变为截止， T_2 由截止变为饱和，电路由一个稳定状态翻转到另一个稳定状态，直到下一个新的外加触发脉冲作用之前，电路就一直处在这个新的稳定状态。

由此可见，双稳态电路具有两个最基本的特点：其一，电路具有两个稳定状态；其二，只有当外加触发讯号输入后，电路才有可能由一个稳定状态翻转到另一个稳定状态。

当晶体管截止时，集电极电流很小，集电极发射极之间可以近似看成开路；饱和时，集电极与发射极之间的电压降很小，可以近似地看成短路。这样，双稳态电路的动作就可用图6-18(a)表示，开关轮流开和闭，相当于外加触发讯号，使电路状态不断地转换。图6-18(b)画出了 T_2 管集电极电压随触发讯号发生变化的情况。正是这种电路的集电极电位具有在高低电位之间变化的特点，在核电子仪器中被用作控制电路或计数电路等。同时由图6-18也可以看出，输入两个触发讯号，集电极才输出一个讯号，因此它有“除二”作用，所以有时也称双稳态电路为“除二”电路。

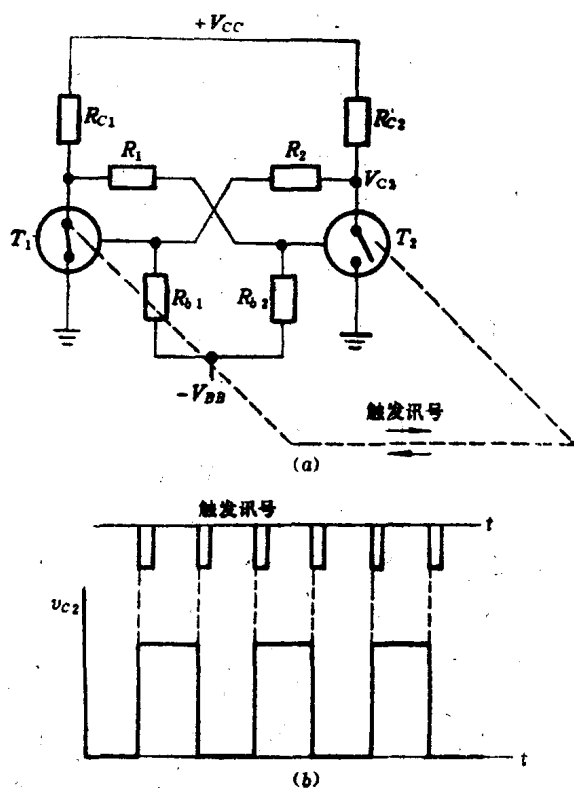


图6-18

二、电路的触发方式

由双稳态电路的工作原理可知，在外界触发讯号的作用下，电路能由一个稳态转换到另一个稳态。下面我们讨论双稳态电路的触发方式。

(一) 基极触发

如前所述，把负脉冲引到双稳态电路饱和管的基极，可使电路产生转换，但这种转换最多只能出现一次，见图6-19。

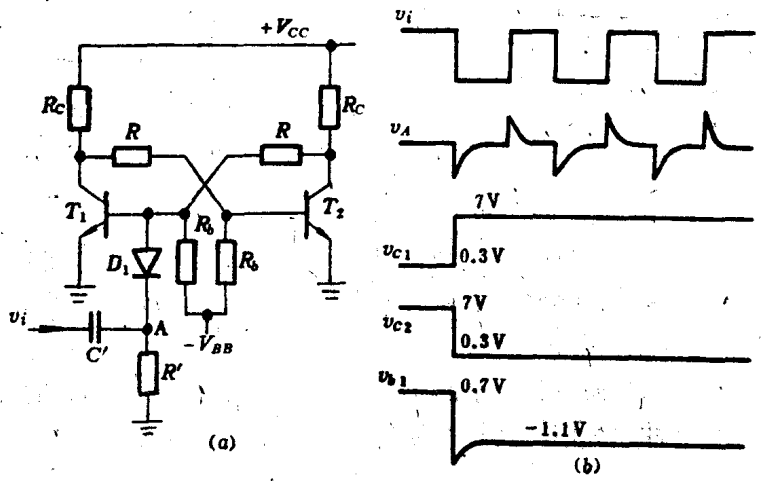


图6-19