

高等学校试用教材

核电子学基础

下册

周志成编著

原子能出版社

73.76
351

高等学校试用教材

核电子学基础

(下 册)

周志成 编著



原子能出版社

1980·北京

1108920

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、低压稳压电源。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。

本书可供使用、维修和研制核电子仪器的有关工人和技术人员参考。

高等学校试用教材

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）

89920部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ ·印张 $11^{1/2}$ ·字数300千字

1980年10月第一版·1980年10月第一次印刷

印数001—5600·统一书号：15175·234

定价：1.80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	5
思考题	13
§2 双稳态电路	14
一、工作原理	14
二、双稳态电路的工作条件	18
三、电路的触发方式及灵敏度	23
四、电路的翻转过程	31
五、二进制计数器	37
思考题	42
§3 单稳态电路	43
一、工作原理	44
二、电路的工作条件	48
三、电路计算	51
四、电路设计	56
思考题	61
§4 无稳态电路	62
思考题	65
§5 脉冲幅度甄别电路	65
一、射极耦合触发器	66
二、交流耦合射耦触发器	81
三、集成电压比较器	82
思考题	87
§6 隧道二极管电路	88

一、隧道二极管特性	89
二、隧道二极管应用举例	94
思考题	101
第七章 数字集成电路	102
§1 基本逻辑门电路	103
一、与门	104
二、或门	106
三、非门	107
四、与非门	109
五、或非门	109
六、禁止门	110
七、异或门	111
思考题	112
§2 逻辑代数及其应用	113
一、逻辑代数	113
二、逻辑电路的设计方法	115
三、用与非门组成各种逻辑电路	118
四、正逻辑与负逻辑	121
思考题	124
§3 逻辑门电路的基本特性	125
一、输入-输出特性 (电压传输特性)	127
二、噪声容限——抗干扰性	129
三、负载能力	131
四、平均传输延迟时间	134
思考题	135
§4 各种数字逻辑门集成电路简介	136
一、低速二极管晶体管逻辑电路 (DTL电路)	136
二、中速晶体管晶体管逻辑电路 (TTL电路)	143
三、高速 TTL 电路	152
四、与或非门	154
五、电流型逻辑电路 (CML电路)	155

六、场效应管逻辑电路	157
七、集成注入逻辑电路 (I^2L 电路)	173
八、接口电路——逻辑电平转换电路	179
思考题	185
§5 基本触发器电路	187
一、RS 触发器	188
二、JK 触发器	200
三、维持-阻塞触发器	207
四、 D 触发器——延迟触发器	212
五、 T 触发器——反复触发器	222
思考题	223
第八章 数字集成电路的应用	227
§1 计数系统	227
一、二进制计数器	227
二、十进制计数器	234
三、环形计数器	247
四、寄存器	255
思考题	259
§2 译码与显示	261
一、译码的一般方法及化简	261
二、译码电路	266
三、显示器件及其译码电路	267
〔附录〕卡诺图化简法	299
思考题	306
§3 脉冲电路	307
一、用于脉冲电路中的与非门的特性	308
二、无稳态电路	318
三、单稳态电路	346
四、脉冲幅度甄别电路	353
思考题	357

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 结处空穴的密度大。在一定的距离内,

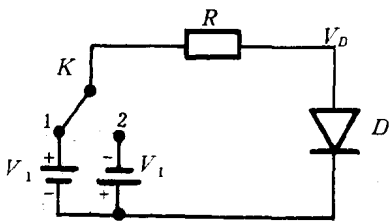


图6-1

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_p 内就有一定数量的空穴存储着, 超过 L_p , 密度就下降为零。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)。

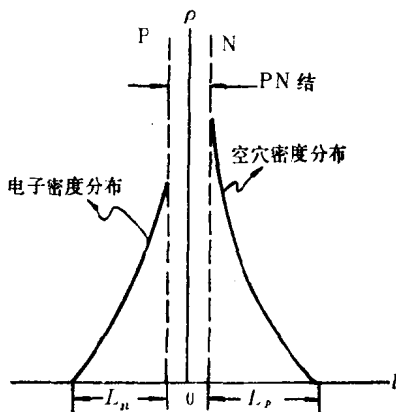


图6-2

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

$$I'_b = -V_1 / (R + R'_f),$$

因为 $R'_f \ll R$, 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, 只剩下 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, $\tau_c =$

$\tau_s + \tau_f$ 称为二极管的反向恢复时间。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

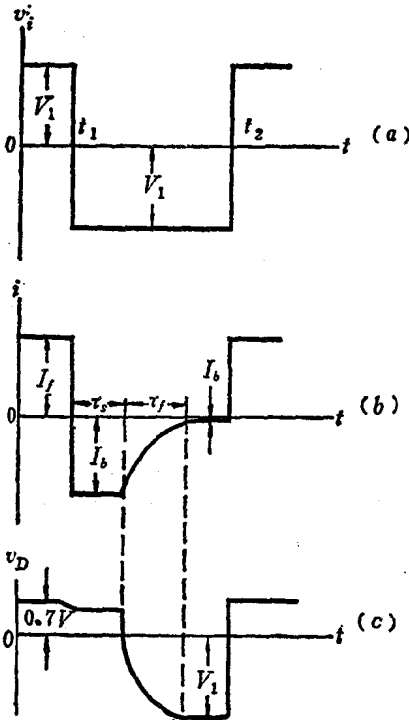


图6-3

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。正向电流大则存贮的空穴多，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，使管子中存贮的载流子减少，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，

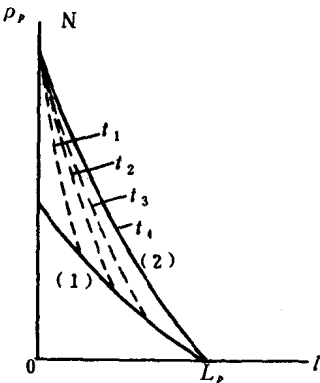


图6-4

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。

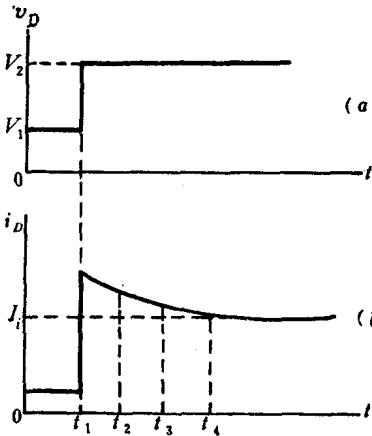


图6-5

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

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

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 $R_f C_D$ 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，工作在B点。当管子进入

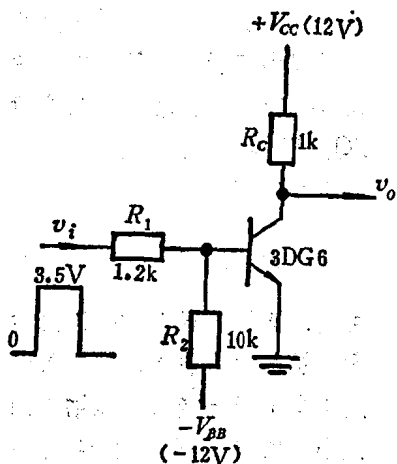


图6-6

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

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

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

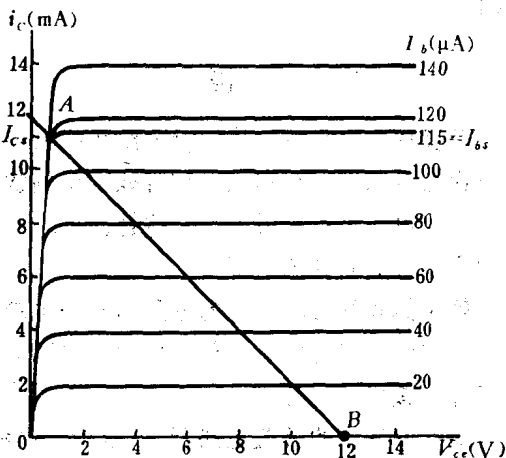


图6-7

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 $I_{cs} = 11.5\text{mA}$ 和 $V_{ces} \approx 0.3\text{V}$ ，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。

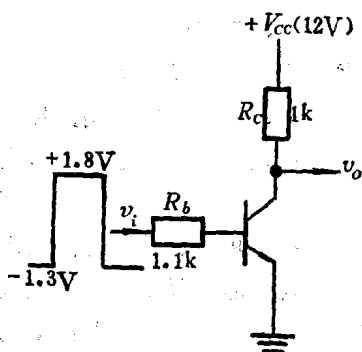


图 6-8

晶体管饱和时， $V_{ces} \approx 0.7\text{V}$ （对硅管而言），因此注入的基极电流 $I_b = (1.8\text{V} - 0.7\text{V}) / 1.1\text{k}\Omega = 1\text{mA}$ ，而 $I_{bs} = 115\mu\text{A}$ ，所以 $S = 1\text{mA} / 115\mu\text{A} = 8.7$ 。

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 $+1.8\text{V}$ 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 ($V_{be} = -1.3\text{V}$)。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_0 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。

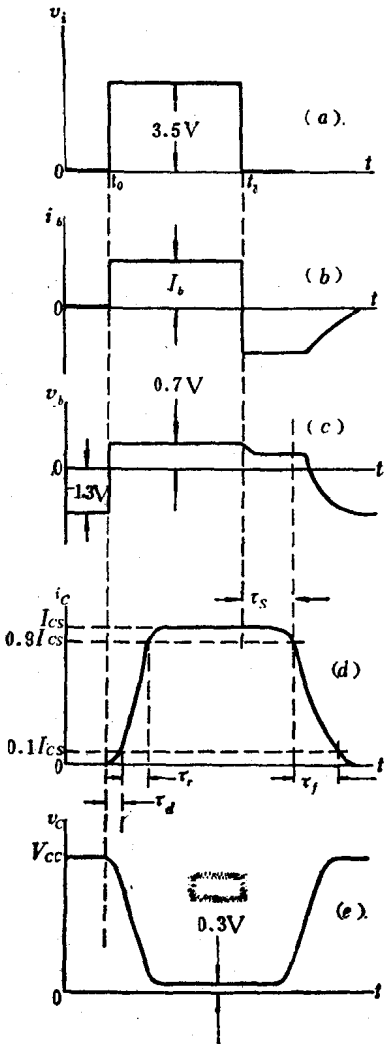


图6-9

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_0 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。

(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

$V_{cb} = V_{ce} - V_{be} = 12V - (-1.3V) = 13.3V$ 。当 v_i' 突然跳到 $+1.8V$ 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 $+0.7V$ 。集电结电压亦从 $13.3V$ 降到相应的 $V_{cb} = 0.3 - 0.7 = -0.4V$ 。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

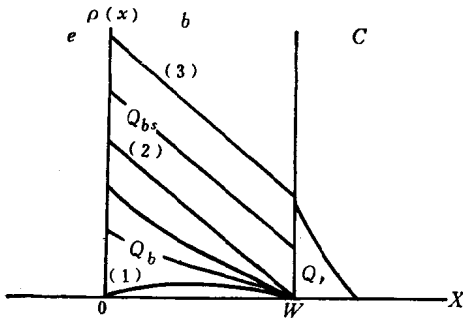


图6-10

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 。

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, $I_{cs} \approx V_{cc}/R_c$ 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_p ,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_p ,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,这段时间称为存贮时间,即图中由分布(3)退到分布(2)所需的时间(其中包括了 Q_p 消失的时间)。也可以说存贮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_p 愈多,它们的消散过程也就愈慢,存贮时间 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。

减小存贮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_{bs} 消失后,基区中存贮的电子 Q_b 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

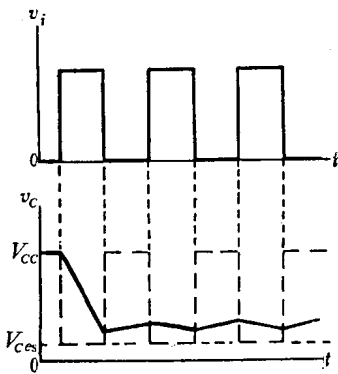


图 6-11

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