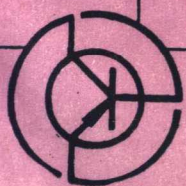
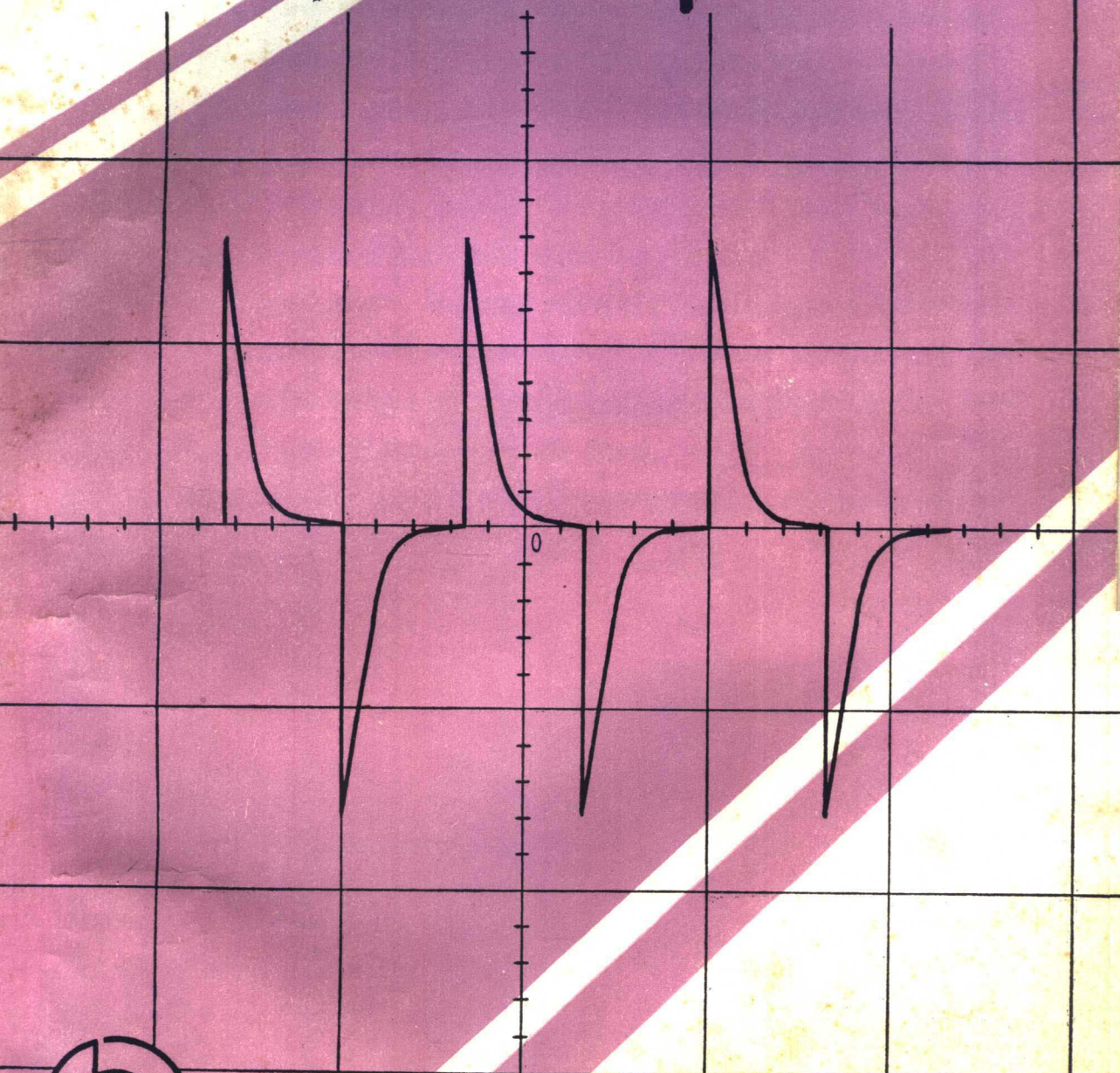


# 晶体管脉冲电路



国营南京有线电厂

# 引 言

在毛主席的无产阶级革命路线指引下，我国的社会主义革命和社会主义建设事业正在以巨人般的步伐向前迈进。随着工业学大庆的群众运动的深入开展，一个多快好省的发展电子工业的新高潮正在形成。在这样的形势下，战斗在电子工业战线上的广大革命职工，在毛主席关于“中国应当对于人类有较大的贡献”的伟大号召鼓舞下，大破洋奴哲学，爬行主义，努力为革命而学习科学技术。为了满足职工对电子技术基本知识的迫切需要，我们选编了这本材料，作为初学电子技术的同志的入门向导。

由于技术的应用范围很广，本书是我们日常生活中常碰到的电路以及实践的经验编写而成，本书仅对晶体管脉冲电路的原理和应用作了简要的介绍。为了叙述的方便，我们分别在第一章和第二章对晶体二极管和晶体三极管的工作原理作了简略的介绍。同时，在第十四章介绍了晶体管直流稳压电源，供初学者参考。

由于我们的水平有限，编写过程中一定会有许多缺点和错误，希望读者给予批评指正。

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第一章：晶体二极管 .....            | 1  |
| 第一节 半导体 .....              | 1  |
| 第二节 P-n 结 .....            | 1  |
| 第三节 晶体二极管的静态特性 .....       | 3  |
| 第四节 晶体二极管的过度特性 .....       | 8  |
| 第二章：晶体三极管 .....            | 11 |
| 第一节 晶体三极管的概述 .....         | 11 |
| 第二节 晶体三极管的测量 .....         | 14 |
| 第三节 国产晶体管的命名方法 .....       | 15 |
| 第四节 晶体三极管的应用 .....         | 16 |
| 第五节 晶体三极管内电荷的过渡时间 .....    | 24 |
| 第三章：脉冲电路概述 .....           | 26 |
| 第一节 什么叫脉冲 .....            | 26 |
| 第二节 脉冲技术的应用 .....          | 28 |
| 第四章：RC 电路 .....            | 30 |
| 第一节 RC 积分电路 .....          | 31 |
| 第二节 RC 微分电路 .....          | 33 |
| 第三节 RC 分压电路 .....          | 36 |
| 第五章：限幅电路 .....             | 38 |
| 第一节 限幅电路的一般特性 .....        | 38 |
| 第二节 限幅电路的用途 .....          | 39 |
| 第三节 限幅电路的种类 .....          | 40 |
| 第六章：晶体三极管的开关特性及倒相器 .....   | 49 |
| 第一节 晶体三极管作开关运用时的等效电路 ..... | 49 |
| 第二节 倒相器的工作原理 .....         | 51 |
| 第三节 晶体管的过渡特性和加速电容的作用 ..... | 54 |
| 第四节 接有箝位二极管的倒相器 .....      | 55 |
| 第五节 信号经微分后的倒相器 .....       | 57 |
| 第七章：射极跟随器 .....            | 61 |
| 第一节 静态工作分析 .....           | 61 |
| 第二节 动态分析 .....             | 63 |
| 第八章：门电路 .....              | 67 |
| 第一节 或门 .....               | 67 |
| 第二节 与门 .....               | 74 |

|      |                          |     |
|------|--------------------------|-----|
| 第三节  | 禁门                       | 78  |
| 第四节  | 由射极跟随器构成的门电路             | 80  |
| 第五节  | 三极管门电路组合应用举例——模二和电路(半加器) | 80  |
| 第六节  | 正负逻辑关系                   | 84  |
| 第七节  | 级联线路                     | 85  |
| 第八节  | 电位脉冲门                    | 87  |
| 第九节  | 线路实例                     | 89  |
| 第九章  | 双稳态触发器                   | 92  |
| 第一节  | 工作原理                     | 92  |
| 第二节  | 元件参数的选择                  | 97  |
| 第三节  | 双稳态电路的改进                 | 98  |
| 第四节  | 调试和排除故障                  | 102 |
| 第五节  | 双稳态的应用                   | 103 |
| 第十章  | 单稳态触发器                   | 114 |
| 第一节  | 工作原理                     | 114 |
| 第二节  | 脉冲宽度                     | 117 |
| 第三节  | 单稳态的改进电路                 | 118 |
| 第四节  | 单稳态触发器的应用                | 121 |
| 第五节  | 单稳态触发电路的参数选择             | 122 |
| 第十一章 | 发射极耦合触发器                 | 124 |
| 第一节  | 工作原理                     | 124 |
| 第二节  | 具体应用                     | 126 |
| 第三节  | 发射极耦合双向限幅器               | 128 |
| 第四节  | 发射极耦合单稳态                 | 129 |
| 第十二章 | 多谐振荡器                    | 130 |
| 第一节  | 多谐振荡器的工作原理               | 130 |
| 第二节  | “硬自激”的产生和消除              | 131 |
| 第十三章 | 间歇振荡器                    | 133 |
| 第一节  | 脉冲变压器对脉冲信号的影响            | 133 |
| 第二节  | C-R 间隙振荡器                | 136 |
| 第三节  | L-R 间歇振荡器                | 137 |
| 第四节  | 元件参数的选择                  | 140 |
| 第五节  | 调试和电路介绍                  | 140 |
| 第十四章 | 晶体管直流稳压电源                | 142 |
| 第一节  | 整流和滤波                    | 142 |
| 第二节  | 晶体管稳压器                   | 149 |
| 第三节  | 过载保护电路                   | 159 |
| 第四节  | 应用电路举例                   | 161 |

# 第一章 晶体二极管

## 第一节 半导体

按照物质的导电率——导电能力的大小分为三大类：导体、半导体、绝缘体。导体的导电能力最强，例如金、银、铜、铁、锡等金属材料；绝缘体的导电能力最差，例如木头、玻璃、胶木、橡皮等；半导体的导电能力介于导体与绝缘体之间，例如硒、硅、锗、氧化铜等。现在大量用于制造半导体元件的材料是硅和锗，事物是在不断发展的，将来必定有种类更多、性能更好的半导体材料被认识。

在纯半导体中掺入不同的杂质后，具有不同的导电性。根据这一性能，我们在纯半导体（硅或锗）中掺入不同的杂质，而得到 P 型半导体和 N 型半导体。

P 型半导体：半导体材料中掺入杂质后，导电率主要由其中过剩的正电荷决定，这种半导体就称作为空穴半导体，亦称 P 型半导体。

N 型半导体：半导体材料中掺入杂质后，导电率主要由其中过剩的负电荷决定，这种半导体就称作电子半导体，亦称 N 型半导体。

## 第二节 p-n 结

### 1. p-n 结的形成

我们把上一节所讲两种不同导电性质的 P 型半导体和 N 型半导体结合在一块，在接触的交界处，N 型半导体中的电子向 P 型半导体一边跑，因此 N 型半导体因失去电子而带正电；同时 P 型半导体中的空穴向 N 型半导体一边跑，因此 P 型半导体因失去空穴而带负电。互相跑的结果，在接触的交界处就形成了电场，这个电场越来越强，从而阻止了上述电子和空穴的相互跑的现象，最后这一电场趋于相对稳定，这就形成了电子——空穴的阻挡层，也就是我们所讲的 p-n 结。p-n 结构成电位壁垒（如图 1-1 所示），它具有单向导电性，晶体二极管就是在一个 p-n 结外面封上玻璃壳或其他外壳而制成的。

在这里要补充说明的是，前面讲到，所谓 N 型半导体是指该材料导电情况主要是由空穴决定的，但是不等于这种材料中不存在电子导电的可能性。为了区别起见，我们称主要导电的为载流子，非主要的另一导电者为非载流子。因此：

在 P 型半导体中，载流子是空穴，非载流子是电子。

在 N 型半导体中，载流子是电子，非载流子是空穴。

p-n 结构成的电位壁垒对载流子起制动作用，即阻止 P 区空穴向 N 区扩散，阻止 N 区电子向 P 区扩散。但是，空间电荷构成的电场，对非载流子（N 区的空穴，P 区的电子）则是加速作用，即促进它们互相“串门”。

### 2. p-n 结的伏安特性（即电压与电流之间的关系）

流过 p-n 结的电流有两部分：一种是主载流子的扩散作用而引起的扩散电流；一种是非主载流子在电场作用下引起的漂移电流。

一个 p-n 结在未加外电压时，电位壁垒如图 1-1(c) 所示，电位壁垒高度为  $V_D$ 。当加上正向外电压时，(即 p 区接高电位，n 区接低电位)，壁垒高度降低到  $V_D - U$  (这里  $U$  是外电压值在 p-n 结的分压)，p 区中主载流子(空穴)能量较大者能克服壁垒的制动作用，爬过这道墙达到 n 区边界，因而使 n 区边界的空穴浓度增加，与 n 区内部非主载流子空穴浓度相比，有一个很大的差距。积聚在边界的浓度大的空穴就要向 n 区内部浓度低的地方扩散，这一空穴越过电位壁垒向 n 区内部扩散形成的电流称作扩散电流，其示意图如图 1-2(a) 所示。

同理 n 区的主载流子中(电子)能量较大的一部分也会爬过电位壁垒，积聚在 p 区边界，增大浓度，与 p 区内部非主载流子相比构成一浓度差。因这一浓度差的存在，爬过电位壁垒的 n 区来的主载流子(电子)则向 p 区内部扩散，形成扩散电流。

两者方向相反，但是电荷极性相反，故产生电流的方向是一致的。它的方向是从 p 区流向 n 区的。

这种主载流子越过电位壁垒后扩散形成的电流称作扩散电流分量  $i_D$ 。

除了扩散电流外，还有一个方向与扩散电流相反的漂移电流(图 1-2.c)。它是 p 区，n 区中非主载流子，由于热激发，进行移动，只要它们达到 p-n 结边界，在电场作用下，穿过过渡层进入另一区域而形成的电流。如 p 区中的电子，热运动到 p-n 结边界，受电场加速作用，穿过过渡层进入了 n 区。也就形成了漂移电流的一个部分，另一部分由 n 区的空穴形成。两者方向是一致的。因此，漂移电流  $i_E$  与扩散电流  $i_D$  方向相反，它是由 n 区流向 p 区的。

在上述分析的基础上，我们从电位壁垒变化的角度谈谈二极管的伏安特性。(图 1-3 所示)。

在无外加电压时，即外加电压  $U = 0$  时，p-n 结内部是处于动态平衡的，也就是说，仍然有电荷经过 p-n 结移动。事实上，无论在二极管 p 区或 n 区范围内，总是有一部分主载流子具有足够的热激发能量，这些特别的“活跃分子”，能够克服电位壁垒的制动作用，爬过这道墙，形成了扩散电流。另外，当然存在漂移电流，两者方向相反，大小相等。通过二极管电流为这两部分电流的代数和：

$$I = i_D - i_E = 0$$

如果外电压极性是正的， $U > 0$ 。即 p 区外接电位高于 n 区外接电位，那么，电位壁垒降低(图 1-3.b)。此时能够

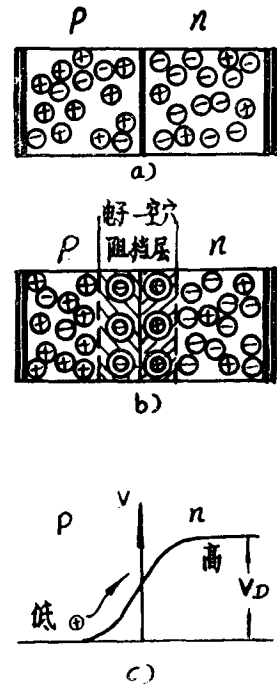


图 1-1 p-n 结

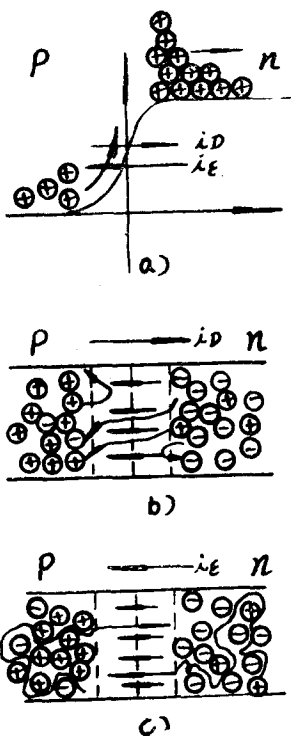


图 1-2 扩散流与漂移流

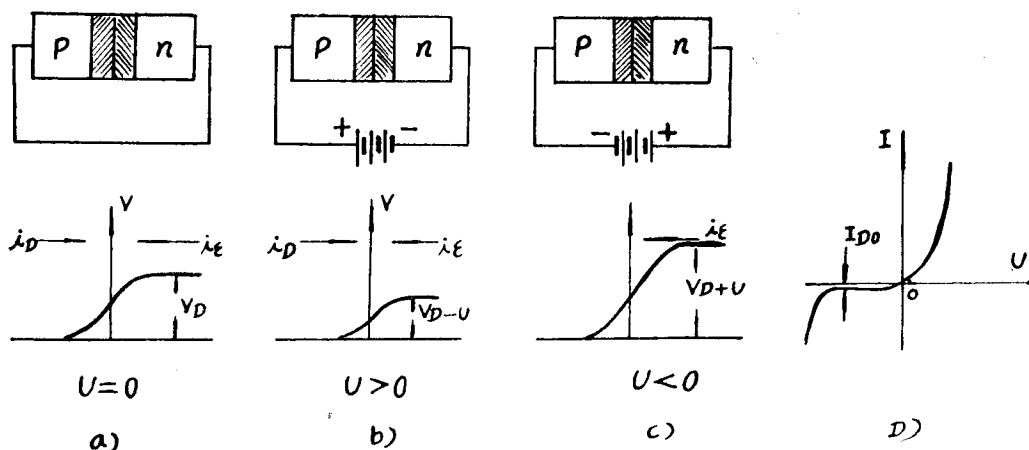


图 1-3 p—n 结伏安特性

越过电位壁垒的主载流子增多，而且随着外加电压增加而增加。也就使得  $U = 0$  时的两种电流的平衡状态破坏，扩散电流  $i_E$  超过漂移电流  $i_E$ 。因为，漂移电流  $i_E$  几乎不随外加电压变化，只与温度有关；而扩散电流  $i_D$  随着外加电压增加而增加。这样一来，在二极管中就流过一与扩散电流方向一致的电流（正向电流），而且是随着外加电压的增加而增加的。其关系如图 1-3(D) 所示。

如果外加电压极性是相反的， $U < 0$ ，即 p 区外接电位低于 n 区外接电位，那么电位壁垒变得比  $U = 0$  时高，见图 1-3(c)。随着负外压的增加，电位壁垒增高越多。这样一来能够越过电位壁垒的主载流子越来越少，扩散电流  $i_D$  因此而减小，漂移电流不变，因此，二极管中流过一与漂移电流方向一致的电流（反向电流）见图 1-3(D) 所示。最后，在  $U = 0.2—0.3$  伏时，扩散电流完全消失。这时，二极管电流  $I_{D0}$ （所谓热电流）的产生仅仅与那些因杂乱无章的热运动出现在界面的受电场加速作用而通过界面的非主载流子有关。

这一电流相当小，并与外加电压的关系不大。在外加反向电压足够大时，发生过渡层击穿，电流（反向）骤增。这就是通常所讲的反向击穿。

### 第三节 晶体二极管静态特性

#### 1. 二极管的参数

感性认识的材料积累多了，就会产生一个飞跃，变成理性认识。实践的积累，使我们对二极管的正反向特性有了进一步的认识。

##### (1) 最大整流电流

二极管在正向连接时，其电流增加不是无止境的。在电流增加到某一数值时，如电压再加大，二极管就会损坏。我们把二极管正向运用时所允许流过的最大电流叫做最大整流电流，用符号  $I_m$ （或  $I_F$ ）表示。在最大整流电流时，加在二极管两端的电压叫做二极管的正向压降。如 2CZ11A 最大整流电流为 1A，在最大整流电流时二极管的正向压降是 1V。

## (2) 最高允许反向电压

二极管在反向运用时,电压高到一定的数值,二极管就会被击穿。二极管反向允许的最高电压叫做最高允许反向电压用符号  $U_r$  表示。通常用反向电流增加到某一定值时的电压表示。如 2CP11 最高允许反向电压为 50V。(同时给出最高允许反向电压下的反向电流  $\leq 50\text{ma}$ )

## 2. 二极管的开关特性

前面从 p-n 结的概念谈到二极管的单向导电特性。在脉冲技术中,广泛地应用二极管作为开关元件。图 1-4 是二极管伏安特性,可以看出,当在二极管两端加正向电压时,则流过较大的电流,为了确定二极管正向状态的等效电路,可将图中曲线折线化,用虚线表示,折线与横坐标轴相交于  $E_d$  点,折线的斜率为  $1/R_D$ 。由于折线不通过原点,相当于引入一小电池,其值很小。 $R_D$  是二极管的正向内阻,阻值很低。按此画出的二极管正向状态的等效电路如图 1-5(b) 所示。

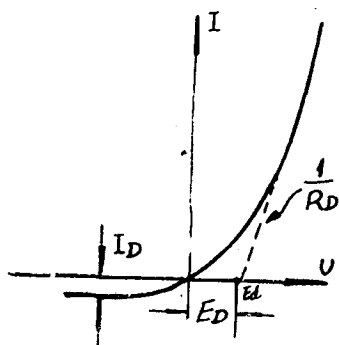


图 1-4 静志特性

如果二极管两端加反向电压,这时二极管只流过反向电流  $I_D$ ,二极管两端就相当于—恒流源  $I_D$ ,画成等效电路如图 1-5(c) 所示。

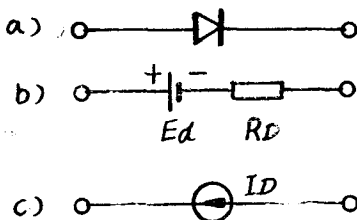


图 1-5 等效电路

将图 1-5(b) 与 1-5(c) 的结果画在一起就构成图 1-6(a) 所示的二极管开关等效电路。图中,开关位置由外加电压决定。外加为正向电压时,

开关 K 向上接;外加为负向电压时,开关 K 向下接。

一般情况下,由于  $E_D$  值与外加正向电压相比小得多,因此常常忽略不计。这时,图 1-6(a) 等效电路简化为图 1-6 b 所示等效电路。

有时为了分析问题简便,可以把  $R_D$  和  $I_D$  的影响都不考虑,二极管就简化成一个开关 K。二极管正向导通时,开关 K 闭合;当外加反向电压时,开关 K 断开。如图 1-6(c) 所示。

图 1-7(a) 是一个最简单的开关电路。电路中利用二极管作开关元件,输入信号  $u_1$  是正负极性的矩形脉冲,输出信号  $u_2$  从电阻 R 两端取出。将二极管用图 1-6(c) 的等效电路代替。

现在来说明一下电路的工作过程。当  $u_1$  处于正半周时,开关 K 闭合,这时的输出电压差不多与输入电压相等。当输入信号处于负半周时,开关断开,没有电流流通,因此输出电压等于零。这就得到了图 1-7(c) 所示的波形,可见这种开关电路的作用是将正负极性

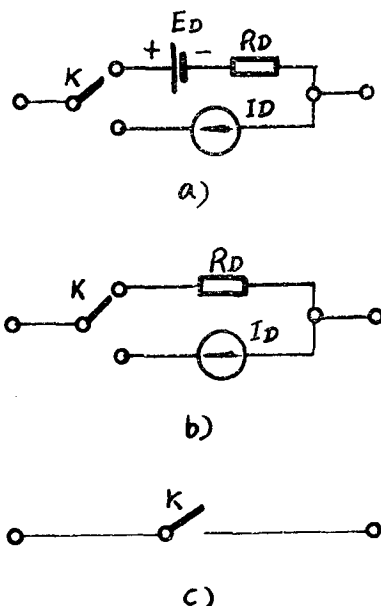


图 1-6 开关等效电路

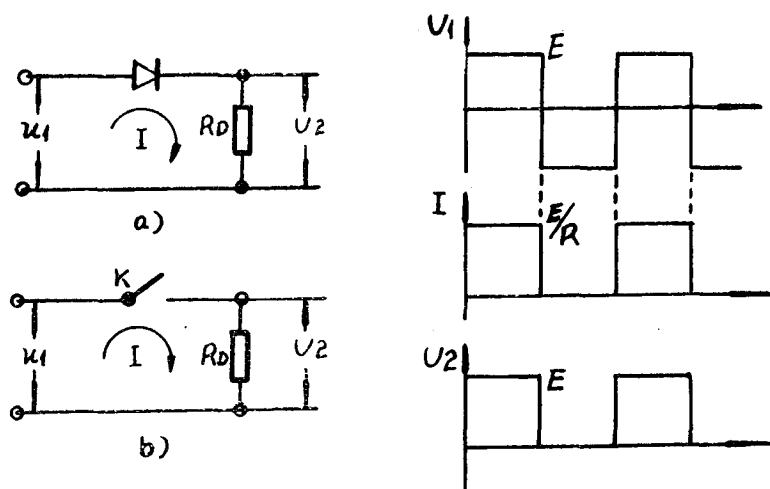


图 1-7 简单的二极管开关电路

双向的矩形脉冲切去其负半周，得到只有正极性的脉冲波形。这种电路通常叫做限幅电路。下面将详细讨论各种限幅电路的工作原理。

在上面的讨论中，我们没有考虑二极管 p-n 结从反向状态转为正向状态或从正向状态转为反向状态时，电流变化的过渡过程，也就是认为当外加电压产生跳变时，二极管的开关工作状态立刻随之变化。二极管本身不引入任何时间上的延迟。下面我们将讨论二极管的过渡特性。

### 3. 二极管的判别法

我们在工作中常常要判断二极管的好坏，和它的正负极。下面就介绍使用万用表测量二极管的原理。

#### (1) 判断二极管好坏：

根据二极管的单向导电特性，当在二极管两端加正电压  $U_0$  时，它就产生很大的正向电流  $I_0$ ， $R_D = U_0 / I_0$  就是二极管的正向电阻。这个电阻很小，一般只有几百欧姆。当在二极管两端加反向电压  $U_r$  时，它就产生了很小的反向电流  $I_r$ ， $R_r = U_r / I_r$  就是二极管的反向电阻。这个电阻很大，一般可达到几百千欧姆。我们用万用表的欧姆挡来测量二极管的正反向电阻就可以判别管子的好坏。若正向电阻很小，反向电阻很大，就说明管子是好的；若正向电阻，反向电阻都很小或等于零，或正反向电阻都很大或  $\infty$  这两种情况都说明二极管已经损坏。前者称作“短路”，后者称作“开路”。

#### (2) 判断二极管的正负电极：

a 直观：有的二极管在管壳上直接注明正负，有的观看内部构造，可以判断正负。如图 1-8 所示。

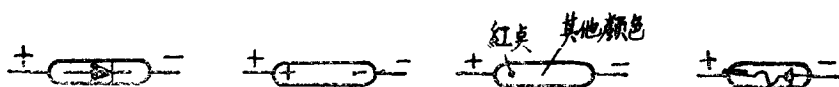


图 1-8 二极管直观识别

b 测量法：我们知道，万用表的电阻测量挡，实际上是一个表头④和一个电池 E 与一

个内阻  $R_i$  串联组成的,如图 1-9 a 所示,万用表的负表笔是与万用表内部的电池的正极相接,而正表笔则与电池负极相接。当我们把负表笔接二极管的 A 电极,正表笔接 B 电极,如图 1-9 a。若此时测出二极管的电阻是很小的,说明二极管与电池 E 正向连接,因而 A 电极是管子的正电极, B 电极是管子的负电极。若测二极管电阻很大,就说明 A 电极是管子的负极, B 电极是管子的正极,因为这时二极管和万用表电池正是反向连接。如图 1-9 b。

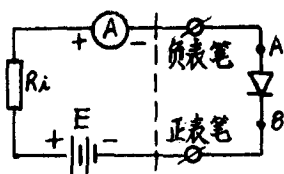


图 1-9 a

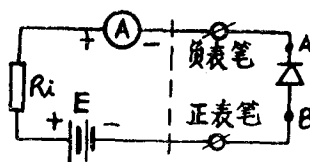


图 1-9 b

测量时注意:不要用万用表的  $\times 1$  档和  $\times 1000$  档测量,  $\times 1$  档电流太大,  $\times 1000$  档电压太高,容易把管子烧坏。

#### 4. 二极管的种类和用途

晶体二极管按其材料分有锗二极管和硅二极管。按结构形式分有点接触型和面结型。按用途和特性分有整流二极管、开关二极管、稳压二极管等。按结的制法有合金和扩散两种。

##### (1) 锗二极管与硅二极管的区别:

一般讲硅二极管的反向击穿电压高,正向压降大(约  $0.5V$  以上),反向电流小(室温下约为十分之一微安数量级)而且温度变化系数小。

而对于锗管来讲,正向压降小(约为  $0.3V$  左右),但反向电流较硅管大,温度变化系数也比硅管大。在锗二极管中,温度大约每升高  $4.5^\circ C$ ,反向电流增加一倍,而硅管需要约  $7.7^\circ C$  反向电流才增加一倍。

对于锗二极管来说,通常在小电流区域和大电流区域都可说是正向导电的,其电流随

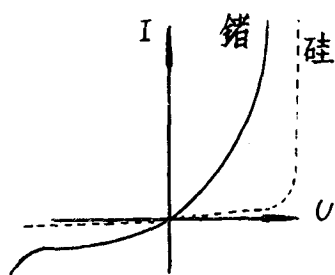


图 1-10 锗、硅二极管伏安特性

正向电压渐增。对于硅二极管来讲,当处于小正向电压(如  $0.4V$  以下)时,二极管正向电流极小,只有当电压超过  $0.4V \sim 0.7V$  以后电流才急剧增加。因此硅二极管处于低正向电压时,正向电阻很大,在一定情况下可以认为二极管是截止的。图 1-10 是锗、硅二极管的伏安特性比较示意图,由图可以看出锗二极管特性比较“软”,而硅二极管特性比较“硬”。

在具体选用二极管时,应该根据锗二极管、硅二极管的上述差异,视实际设计需要而适当处置。例如,根据锗、硅二种二极管反向电流上的差异,高温工作条件下宜选用硅二极管,根据锗、硅二种二极管正向压降上的差异,需要正向压降小的情况下(如整流电路)宜选用锗二极管。有时需要有一定的门限值时,则要利用硅二极管正向压降大的特点,将硅二极管作为一个小电池用。在速度要求很高的线路中,则应采用特别的具有良好开关特性的硅扩散二极管。

面结式二极管是为了整流用的大电流二极管，它不具有一般开关线路中所要求的快速开关特性。

点接触二极管在键式二极管还未普及前是应用较多的二极管，它的开关时间较短。点接触二极管的缺点是正向静态电阻大，反向电流大，另外它的特性曲线很不一致。

现在的趋势是大量采用键式二极管。它结合了面结式二极管的静态参数和点接触二极管动态参数两者的优点。键式二极管与点接触二极管相比具有较小的正向电阻，较小的反向电流，特性也较均匀。

下面是一个各种类型二极管主要参数比较，供参考。

| 量级<br>参 数<br>类 型 | 最大反向电流<br>(10V 25℃)<br>( $\mu$ A) | 10mA时<br>最大正向电压<br>(V) | 1V时<br>最大正向电流<br>(mA) | 10mA电流<br>时最大反向恢<br>复时间( $\mu$ s) | 5V以下<br>最大电容值<br>( $\mu$ f) | 击 穿 电 压<br>最 小 值<br>(V) |
|------------------|-----------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 点接触(锗)           | 10                                | 2.0                    | 5                     | 0.05                              | 2                           | 80                      |
| 金 键(锗)           | 10                                | 0.6                    | 20                    | 0.05                              | 2                           | 50                      |
| 合 金(锗)           | 10                                | 0.3                    | 100                   | 5                                 | 20                          | 80                      |
| 扩 散(锗)           | 5                                 | 0.5                    | 10                    | 0.02                              | 4                           | 40                      |
| 合 金(硅)           | 0.02                              | 0.8                    | 30                    | 0.05                              | 10                          | 70                      |
| 扩 散(硅)           | 0.005                             | 1.0                    | 10                    | 0.005                             | 4                           | 50                      |
| 扩 散(硅)           | 0.02                              | 0.6                    | 250                   | 0.05                              | 25                          | 120                     |

我们选用二极管，要从静态和动态参数两个方面去考虑，主要参数有最高允许反向电压、最大整流电流、最高允许反向电压下的电流、最大整流电流下的正向压降。

二极管的命名法与三极管命名法一起说明。

(2) 齐纳二极管：

在讲二极管伏安特性时谈到，反向电压大到一定数值后，会引起二极管击穿，反向电流骤增。

反向击穿对于多数应用中是极其有害的（比如作为整流、检波、单向导电元件和逻辑线路中的开关元件）。因为在反向击穿时，二极管的电阻很小，通过二极管反向电流很大，这就破坏了二极管的单向导电作用。同时由于通过 p-n 结的反向电流过大，也会把 p-n 结烧坏。

不过，如果我们把二极管体积作得足够大，使它出现反向击穿时，能够耗散由于通过较大电流而产生的热量，就不会把 p-n 结烧坏。这样我们就可以得到能够在反向击穿电压下工作的齐纳二极管。

齐纳二极管的典型特性曲线如图 1-11 所示。由图可见，其正向特性与一般二极管没有什么区别，而反向特性就不同。当反向电压小于击穿电压  $V_{BC}$  时，反向电流很小（这和一般二极管相同）。但是，当反向电压等于击穿电压  $V_{BC}$  时，反向电流急剧增加

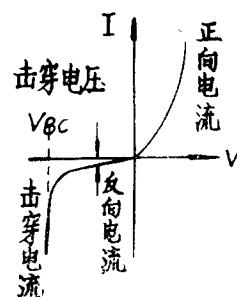


图 1-11 齐纳二极管伏安特性

而出现所谓击穿状态。这一点与一般二极管不同，因为普通二极管是不允许工作到反向电压达到击穿电压的。

处于击穿状态的齐纳二极管，虽然反向电流大大增加，但反向电压却基本上没有变化。这个电压值可以在制造的时候，用控制半导体的电阻率， $p-n$  结的杂质浓度分布率等方法加以控制，从而得到所需的数值，一般可以从几伏到几百伏。击穿时所允许的电  
流变化范围可以从几毫安到几安培。

齐纳二极管在反向击穿的状态下有着良好的稳压性能，因此它主要被用作稳压器。此外二极管还广泛地用作标准电池，供晶体管、电子管线路固定偏压，过负荷保护以及用作开关元件等。

齐纳二极管图记一般为下列(图 1-12)。

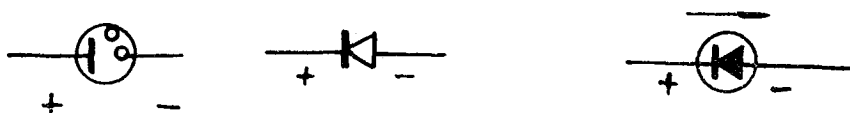


图 1-12 齐纳二极管图记

### (3) 用途:

由于晶体二极管具有体积小、重量轻、便宜、寿命长等许多特点，所以被广泛的应用。在电子设备中，用于门电路，开关电路，整流、检波、稳压、混频、调制等等电路中。随着社会主义工业的发展，现代科学技术的发展，二极管的应用将更加广泛。

## 第四节 晶体二极管的过渡特性

前面谈到，不考虑二极管过渡特性时，认为当外加电压产生跳变时，二极管的开关工作状态立刻随之变化，二极管本身不引入任何时间延迟。当脉冲重复频率较高，对输出脉冲跳变沿要求严格而且外电路的分布电容极小的情况下，上述假定已不合理，这时，必须分析晶体二极管过渡过程。

还是以前面谈到的简单的二极管开关电路为例(图 1-13)在本章第三节中谈过它的工作原理。现在，我们考虑晶体二极管的过渡特性对电路工作的影响。

图 1-13 (b) 分别画出了这时的电流  $I$  和电压  $U_2$  的波形。我们从波形看到，当矩形波  $U_1$  从负半周转入正半周时，二极管由截止进入导通，电流  $I$  并不从反向电流  $I_D$  改变到稳定值  $I_1$ ，而是先出现上冲，然后再减小到  $I_1$ ；当矩形波从正半周转至负半周时，电流  $I$  也

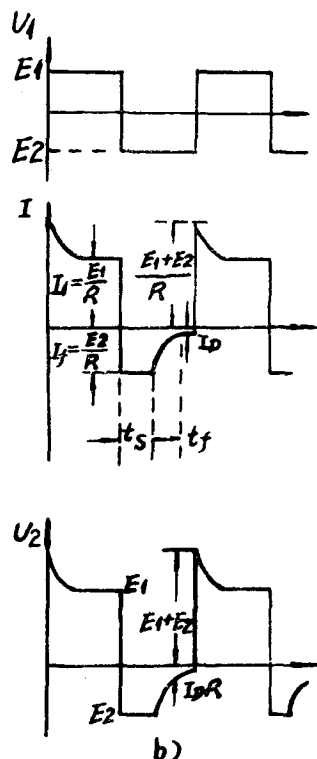


图 1-13 过渡特性

不是马上从  $I_1$  变到稳定值  $I_D$ , 而是先呈现很大反向电流  $I_r$ , 在一段时间内 ( $t_s$ )  $I_r$  的数值保持不变, 经过  $t_s$  时间之后, 反向电流就逐渐减小, 再经过  $t_r$  反向电流才逐渐减小到它的稳定值  $I_D$ , 我们称  $t_s$  为储存时间,  $t_r$  为下降时间。

这几段时间的产生是由于晶体管非平衡载流子的建立, 储存和散失等过程所引起的。下面我们从载流子分布的变化过程来说明出现上述几段时间的原因。

在有关 p-n 结知识的一节中, 我们谈到, 在外加正向电压时, 电位壁垒降低, 主载流子能爬过电位壁垒的增加, 它们穿过过渡层在另一区边缘聚集, 造成与内部的浓度差。该浓度差使得这些主载流子扩散而引起扩散电流。图 1-14(a) 就是 n 区中空穴分布曲线。

其中:

$p_n^0$  是指 n 区内部空穴分布浓度。

$p_0$  是 n 区边缘空穴分布密度, 与外加正向电压大小有关。

当外加反向电压时, 只要外压大于零点几伏。n 区边缘的空穴浓度即为零, 内部保持  $p_n^0$ , 分布曲线如图 1-14(b) 所示。

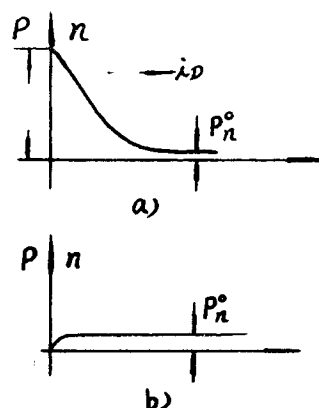


图 1-14 n 区主载流子分布

在图 1-13(a) 的电路中, 当输入波形从负半周突变到正半周时, 晶体管 n 区中空穴分布应由图 1-14(b) 变到图 1-14(a)。当矩形波从正半周转为负半周时, 空穴分布应由图 1-14(a) 变到图 1-14(b)。我们知道, 非主载流子分布的建立和消失都不是一下子就能完成的, 而是要经过一段时间的, 这段时间就形成了晶体二极管的过渡过程。

我们先来说明电流  $I$  波产生上冲的原因。

这时, 输入矩形波从负半周转为正半周。由于 n 区边缘处空穴, 浓度很低 (图 1-14 b), 因此, 二极管两端电压保持为负值, 也就是  $-E_2$ 。那么电阻两端的电压  $u_2$  应为  $E_1 + E_2$ , 所以电流

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R}$$

它大于稳定以后的  $I_1$ , 因而出现了上冲。随着  $p_0$  的增长, 二极管两端电压 (反向电压) 就要减小并逐渐转为正向电压, 电流  $I$  也随之下降。当  $p_0$  远远大于  $p_n^0$  之后, (图 1-14 a), 电流  $I$  也就下降到它的稳定值  $I_1$ 。可以看出, 上冲的出现是由于 n 区非主载流子 (空穴) 的建立需要一定的时间。

当输入电压由正半周转为负半周时将出现储存时间  $t_s$ 。这时由于外加电压已经反向, 空穴将不再流入到 n 区中, 但在 n 区中已有的空穴不会马上消失, 一部分空穴要流向 p-n 结, 而且被电场拉到 p 区, 形成反向电流。

下面我们来推求反向电流的大小。起始时,  $p_0$  的数值还很大, 这时 p-n 结的压降  $u$  仍为正值, 而且不需多大  $u$  值, 就能有很高的  $p_0$ , 也就是说, p-n 结两端只有很小的正向电压, 结的电阻很小。如果  $u \ll E_2$ , 那么认为这时的反向基流基本上由外电路决定, 即

$$I_r = \frac{E_2 - u}{R} \approx \frac{E_2}{R}$$

除了一部分空穴跑回 p 区以外,同时另一部分空穴与电子复合,这就使 n 区空穴浓度降低。但是  $p_0$  的数值还比  $p_n^0$  大,那么  $u$  仍为正值,并且它的数值变化很小,所以反向电流仍维持在

$$I_r \cong E_2/R$$

几乎不变。这就形成了储存时间  $t_s$ 。

经过  $t_s$  时间以后,  $p_0$  将减小到低于  $p_n^0$ , 这时结电压  $u$  变为负值,并逐渐增大,反向电流随之减小,直到  $p_0$  的数值接近于零。这时,外加电压  $E_2$  几乎全部降落在 p-n 结的两端,反向电流达到它的饱和值  $I_D$ 。这段工作过程相应于下降时间  $t_f$ 。

实际上,由于电路中还存在分布电容,因此图 1-13(b) 所示的波形是很难出现的,一般情况下,上冲时间很短,而 R 两端的电容  $C_0$  往往又不能忽略,所以不但不会看到上冲,反而出现上升时间  $t_r$ 。但是储存时间  $t_s$  和下降时间  $t_f$  就比较些,即使在  $C_0$  存在的情况下,也有可能表现出来,这些情况如图 1-15 所示。

有时将  $t_s$  和  $t_f$  之和称为反向恢复时间。反向恢复时间严重影响了二极管的开关特性。例如在限幅电路中,它使矩形波得不到确切的限幅。特别在快速工作的开关电路中问题更为突出。反向恢复时间是衡量晶体二极管能否成为良好的开关元件的重要指标,在选择晶体二极管的型号时,必须充分考虑。

反向恢复时间除了与二极管本身特性有关外,尚与外电路的工作条件有关。当正向工作电流较大时,晶体管 n 区储存空穴数量就比较大,因此反向恢复时间也较长。反之则较短。当外加反向电压脉冲幅度较大,或外电路电阻较小时,则反向电流的数值较大,在 n 区储存的空穴得以更快消失,因此,反向恢复时间较短。反之则较大。在选择外电路的工作条件时,应考虑到这些情况。

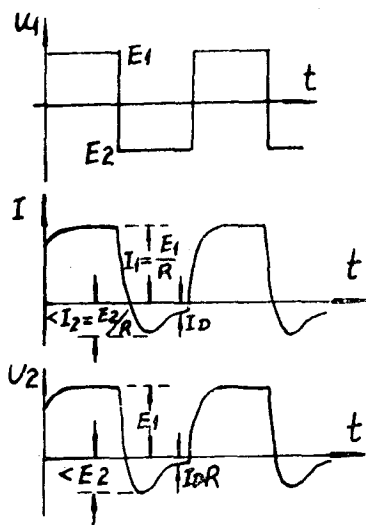
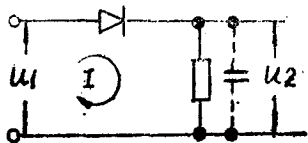


图 1-15 反向恢复时间与外电路关系

## 第二章 晶体三极管

### 第一节 晶体三极管的概述

(一) 晶体三极管的构造:

晶体三极管的构造分为 pnp 型和 npn 型两种。(如图 2-1)

由图 2-1 可以看出 pnp 型和 npn 型两种三极管所不同的地方是发射极箭头方向相反, 电流流向相反。

晶体三极管有三个引出线, 它们表示三个不同的电极。

其中 e —— 表示发射极, 它是发射电流的。

b —— 表示基极, 它是控制电流的。

c —— 表示集电极, 它是吸收电流的。

(二) 三极管的电流控制作用:

三极管中的基极是控制发射极电流流向集电极的数量的; 发射极 e 给出电流之后, 并不是都能被集电极接收的, 而集电极只能吸收到发射极电流  $I_e$  的绝大部分形成集电极电流  $I_c$ , 而少量的发射极电流被基极吸收形成基极电流  $I_b$ 。

例如: 发射极电流  $I_e = 10\text{ma}$ , 集电极吸收的电流  $I_c = 9.9\text{ma}$  基极得到的电流  $I_b = I_e - I_c = 0.1\text{ma}$  (或  $100\mu\text{a}$ )。因此  $I_c$  比  $I_b$  大 99 倍。(即  $\frac{9.9}{0.1} = 99$ )。

对于一个三极管, 在一定的工作范围内, 它的  $I_e$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  三者之间的分配关系是固定的, 例如,  $I_e = 20\text{ma}$ ,  $I_b = 0.2\text{ma}$ ,  $I_c$  就应该为  $19.8\text{ma}$ , 因此  $I_c$  还是比  $I_b$  大 99 倍。

利用三极管的这固定的比例关系, 就可以构成  $I_b$  对  $I_e$  的控制作用。因为  $I_c$  是随  $I_b$  的变化而变化的, 不过是  $I_b$  的少量变化可以引起  $I_c$  的大量变化。上例中若  $I_b$  变化  $1\text{ma}$ , 则  $I_c$  就变化  $99\text{ma}$ 。利用三极管的这个特性, 可以将三极管作为放大元件用。

(三) 三极管在电路中的三种接法: 似图 2-2。

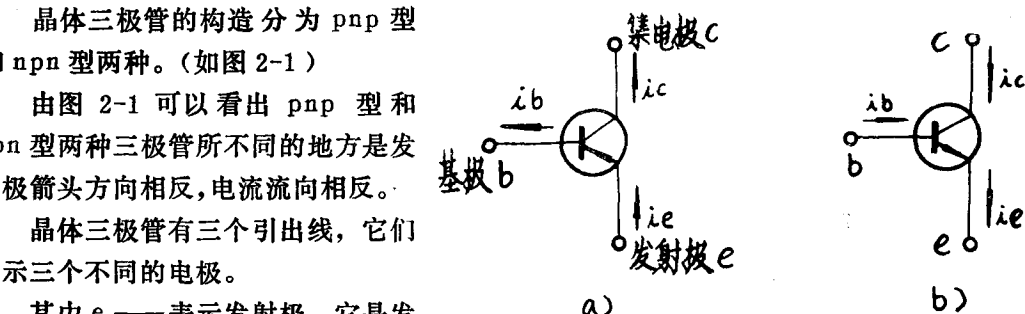


图 2-1

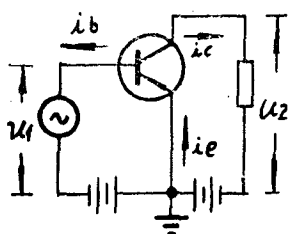


图 2-2 共发射极

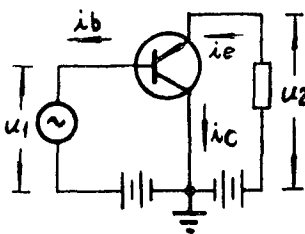


图 2-2 共集电极

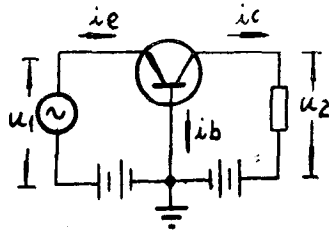


图 2-2 共基极

由于公共点不同,可以分为共发射极,共集电极和共基极三种电路。如图 2-2 所示。图中  $u_1$  表示输入讯号,  $u_2$  表示输出讯号。通常用得最多的是共发射极电路。因此在以下的讨论中只分析共发射极电路。

#### (四)晶体三极管的主要参数。

在共发射极电路中,为了使发射极能发射电流  $I_e$ , 因此, c—e 之间应接负电源  $E_c$ ,

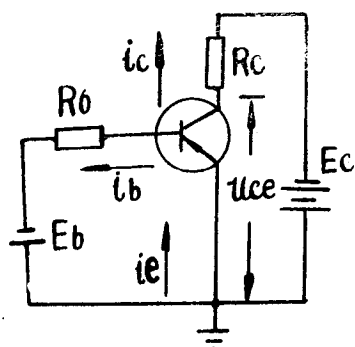


图 2-3

b—e 之间也是接负电源  $E_b$ , 只有这样的接法才能有电流  $I_e$ ,  $I_b$  和  $I_c$ 。如果电源接反,则  $I_e = 0$ ,  $I_b$  及  $I_c$  也基本上等于 0。下面就以图 2-3 的共发射极接法来说明晶体三极管的几个主要参数。

##### (1) 放大倍数 $\beta$ 和特性曲线:

前面已经说过,对于一个三极管,在一定的工作范围内,  $I_c$  和  $I_b$  之间保持着一个固定的比例关系,它们两者的比值就叫做电流放大倍数,用  $\beta$  来表示:即  $\beta = \frac{I_c}{I_b}$ 。

例如对前面讲过的例子中,  $I_c = 9.9\text{ma}$ ,  $I_b = 0.1\text{ma}$ ,  $\beta = 99$ ,  $\beta$  越高,三极管的放大作用越好。

有些手册中用  $h_{FE}$  表示放大倍数,意义仍与  $\beta$  相同,仅是符号不同。

为了全面地介绍晶体三极管中  $I_b$  与  $I_c$  以及  $u_{ce}$  之间的相应关系而应画出其特性曲线族,利用图 2-3 的电路,改变,  $R_c$  及  $R_b$ , 得到不同的  $I_b$ ,  $I_c$  及  $u_{ce}$ 。可以得到如图 2-4 所示的特性曲线族。

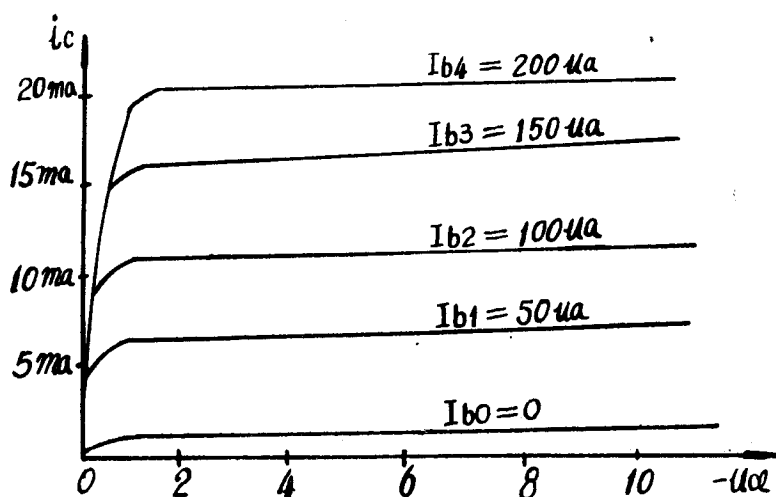


图 2-4

##### (2) 反向漏电流 $I_{cb0}$ 及 $I_{ce0}$ 。

由图 2-5(a) 可以看出,发射极开路后,并在 b—c 之间接上反向电压之后,表头上看到  $i_c \neq 0$ , 而仍然有一个微量的电流流过电流表,其方向是由基极流向集电极,这个电流叫做集电极反向电流,用符号  $I_{cb0}$  表示,通常简写为  $I_{c0}$ 。

由图 2-5(b) 可以看出,基极开路后,并在 e—c 之间接上正向电压,按理讲  $I_c = 0$  (因

为  $I_c = \beta I_b$ , 现在基极开路, 所以是  $I_b = 0$ ,  $I_c$  也应为 0)。实际上在表头上面还有电流流过。这说明基极开路后, 发射极仍有电流发射, 这个就是发射极与集电极间的漏电流, 用符号  $I_{ce0}$  表示, 其方向是由发射极流向集电极。并且  $I_{ce0} \gg I_{c0}$ , 两者之间的关系是  $I_{ce0} = \beta I_{c0}$ 。

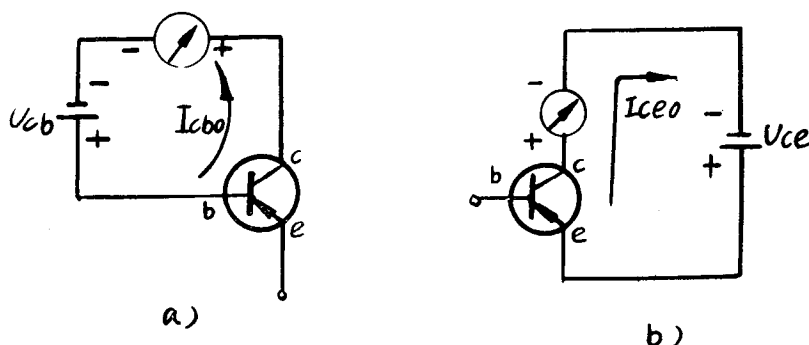


图 2-5

### (3) 截止频率 $f_\alpha$ 及 $f_\beta$ 。

在一定的频率范围内, 晶体三极管的放大系数  $\alpha$  或  $\beta$  值是不随频率的变化而变化的。但频率高到一定程度之后, 放大系数就要下降。把  $\beta$  下降到 1 时的频率, 称为晶体管的特征频率, 用符号  $f_T$  表示, 如 3AK<sub>20A</sub> 的  $f_T \geq 100\text{MC}$ , 3DK<sub>1</sub> 的  $f_T \geq 200\text{MC}$ 。

当  $\alpha$  或  $\beta$  值下降到直流时的 0.707 倍时的频率称为截止频率  $f_\alpha$  或  $f_\beta$ 。

其中  $\alpha$  为共基极电路接法时晶体管的电流放大系数。  $\beta$  为共发射极电路接法时晶体管的电流放大系数。  $\alpha$  值是不大于 1 的, 即  $\alpha = \frac{I_c}{I_e} \leq 1$ 。  $\alpha$  与  $\beta$  之间的关系为  $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ 。

$f_\alpha$  为共基极电路接法时晶体管的截止频率。  $f_\beta$  为共发射极电路接法时的截止频率。两者之间的关系为  $f_\beta \approx \frac{f_\alpha}{\beta}$ 。

由此可以看出,  $\beta \gg \alpha$ ,  $f_\beta \ll f_\alpha$ , 也就是说, 共发射极电路的电流放大系数比共基极电路的电流放大系数大得多, 而共发射极电路的截止频率比共基极电路的截止频率低得多。

### (4) 输入特性。

在共发射极电路中, 它的输入特性是指  $i_b$  与  $u_{be}$  间的关系, 它相当于一个二极管的正向特性如图 2-6 所示。

当工作点确定之后,  $u_{be0}$  与  $I_{b0}$  之比可等效为一个直流电阻  $\gamma_{be0}$ 。  $\gamma_{be0}$  叫做直流等效电阻。

在交流状态工作时, 取在工作点附近的  $u_{be}$  的变化量  $\Delta u_{be}$  与  $i_b$  的变化量  $\Delta i_b$  之比来求得交流等效电阻  $\gamma_{be}$

$$\gamma_{be} = \frac{\Delta u_{be}}{\Delta i_b} \quad \gamma_{be0} = \frac{\Delta u_{be0}}{\Delta I_{b0}}$$

通常把  $\gamma_{be}$  称为动态输入电阻,  $\gamma_{be0}$  称为静态输入

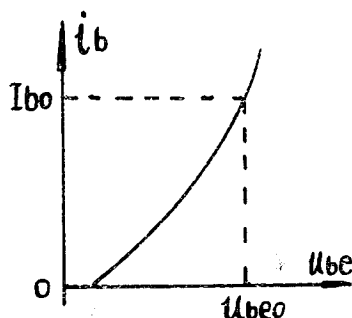


图 2-6