

电子电路的核心器件是半导体器件,半导体器件由半导体材料制成。本章在介绍半导体的基本知识基础上,讨论了 PN 结的形成与特性,讨论了半导体器件二极管的物理结构、工作原理、特性曲线、主要参数及应用;介绍了半导体三极管结构、载流子运动规律与电流分配关系以及三极管的输入输出特性等,最后介绍了光电半导体器件。

1.1 半导体基础知识

导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。

物质的导电性能取决于原子结构。导体一般为低价元素,原子中最外层轨道上的电子(价电子)数目较少,极易挣脱原子核的束缚成为自由电子。当受到外电场的作用时,这些自由电子产生定向运动形成电流,呈现较好的导电性能。绝缘体一般为高价元素,最外层电子数目接近 8 个,受原子核的束缚力很强,极不容易摆脱原子核的束缚成为自由电子,因而导电性能极差。半导体器件中使用最多的是锗半导体材料和硅半导体材料,它们都是四价元素,原子中最外层轨道上有 4 个电子,其简化原子结构模型如图 1.1.1 所示。最外层电子既不像导体那样极易挣脱原子核的束缚,成为自由电子,又不像绝缘体那样被原子核束缚很紧,因而导电性能介于两者之间。

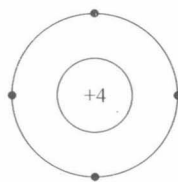


图 1.1.1 四价元素简化原子结构图

1.1.1 本征半导体

用半导体材料制作半导体器件时,半导体要高度提纯使之制成晶体,这种纯净的、具有晶体结构的半导体称为本征半导体。

在本征半导体的晶体结构中,原子按一定的规则整齐地排列,由于原子间的距离很近,价电子不仅受到所属原子核的吸引,还受到相邻原子核的吸引。这样,每一个原子的每一个价电子都与相邻原子的一个价电子组成一个电子对,为两相邻原子所共有,构成所谓共价键结构,如图 1.1.2 所示。

共价键结构使原子最外层因具有 8 个电子而处于较为稳定的状态。但共价键对电子的约束毕竟不像绝缘体中那样紧,当温度升高或受到光照射时,共价键中的少数价电子因获得能量而挣脱共价键束缚成为自由电子。这种现象称为激发,如图 1.1.3 所示。价电子在挣

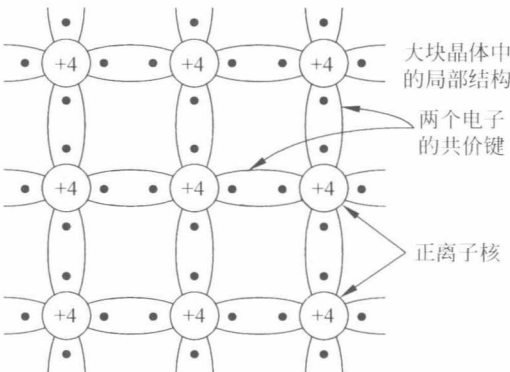


图 1.1.2 硅晶体共价键结构

脱共价键束缚成为自由电子之后,在共价键中留下一个空位子,称为空穴。每形成一个自由电子,就留下一个空穴。所以,在本征半导体中,自由电子和空穴总是相伴而生、成对出现、数目相等。原子是中性的,而自由电子带负电,因此,空穴显现出带正电。

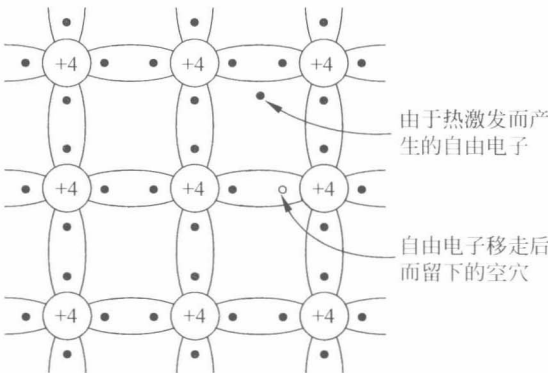


图 1.1.3 热激发产生自由电子—空穴对

在外电场力的作用下,一方面自由电子作定向运动形成电子电流;另一方面空穴出现后,会吸引相邻原子中的价电子来填补空穴,同时出现另一个空穴,如图 1.1.4 所示(图中用圆圈表示空穴)。如果图中在 x_1 处出现一个空穴, x_2 处的价电子便可以填补这个空穴,从而使空穴由 x_1 移到 x_2 。如果接着 x_3 处的价电子又填补到 x_2 处的空穴,这样空穴又由 x_2 移到了 x_3 。在这个过程中,价电子由 $x_3 \rightarrow x_2 \rightarrow x_1$,但仍处于束缚状态,而空穴由 $x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3$ 。就是说空穴的移动方向和价电子移动的方向是相反的,因而可用空穴移动产生的电流来代表价电子移动产生的电流,在这里可把空穴看成是一个带正电的粒子,它所带的电量与电子相等,符号相反。因此,在半导体中同时存在着自由电子和空穴两种载流子参加导电,这是半导体导电方式的最主要的特点,也是半导体和导体在导电原理上的明显区别。

在本征半导体中,一方面由于热激发,自由电子—空穴对不断产生;另一方面自由电子在运动过程中又会不断地与空穴重新结合而使自由电子—空穴对消失,这一相反的过程称为复合。在一定温度下,自由电子—空穴对的产生和复合达到动态平衡;即半导体载流子的浓度维持一定的水平。理论证明,本征半导体的载流子浓度随着温度的升高近似地按指数规律增加。因此,温度对半导体的导电性能影响很大。

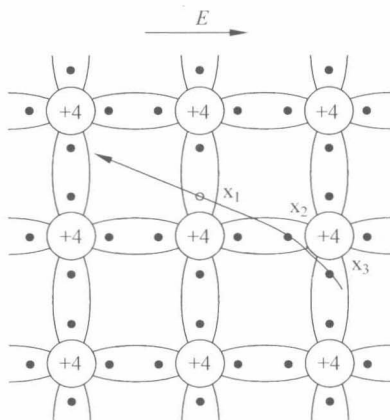


图 1.1.4 电子和空穴的移动

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中,由于热激发而产生的自由电子和空穴的数目是很少的,所以其导电性能很差。但是,如果在本征半导体中掺微量的杂质(某种元素)就可使半导体的自由电子或空穴的数目大量增加,因而导电性能大大增加。半导体因所掺的杂质不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

如果在硅(或锗)晶体中掺微量的五价元素磷(或砷、锑等),由于其数目很少,故整个晶体结构基本不变,只是某些位置上的硅原子被磷原子取代。磷原子的五个价电子中有 4 个与相邻的硅原子形成共价键结构,多出的一个价电子受原子核束缚很小,在室温下就可激发成为自由电子,磷原子也因此变成带正电荷的离子。磷原子由于可以提供自由电子而称为施主离子,如图 1.1.5 所示。掺入一个磷原子就会产生一个自由电子,故掺杂后半导体的导电能力将大大增加。这种杂质半导体中自由电子的浓度远远大于空穴的浓度,故自由电子称为多数载流子,简称多子;空穴是少数载流子,简称少子。这种半导体称为 N 型半导体。

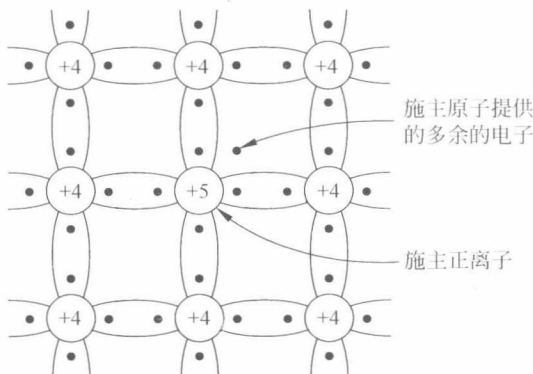


图 1.1.5 N 型半导体结构示意图

2. P 型半导体

如果在硅(或锗)中掺微量的三价元素硼(或铝、镓等),每一个硼原子与相邻硅原子组成三对共价键,同时形成一个空穴。在室温下这些空穴可以吸引邻近原子的价电子来填补,使硼原子变成带负电荷的离子,而硼原子因能吸引价电子被称为受主原子,如图 1.1.6 所示。这种杂质半导体中空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子,称为 P 型半导体。

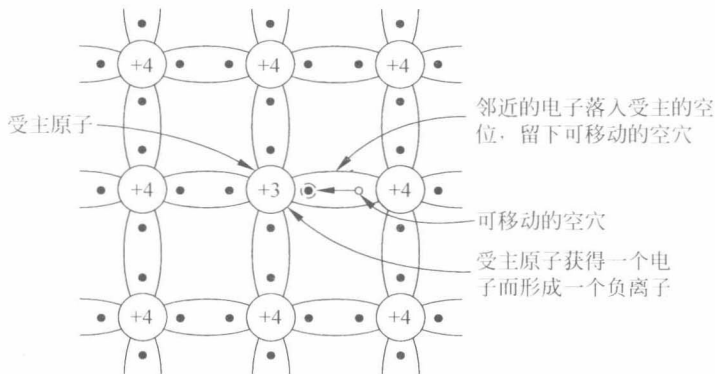


图 1.1.6 P 型半导体结构示意图

不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,由于原子核内、外的正、负电荷数目相同,就整体而言为电中性。多子的浓度取决于掺杂浓度,它对杂质半导体的导电性能产生直接的影响。少子的数目虽然很少,但它们对温度非常敏感。环境温度越高,少数载流子数量越多。少子浓度随温度变化的特点将影响半导体器件的稳定性。

综上所述,半导体具有以下特点:

- (1) 半导体中存在着两种载流子——自由电子和空穴。因此,半导体的导电原理明显区别于导体。
- (2) 在本征半导体中掺微量杂质可以控制半导体的导电能力和参加导电的主要载流子的类型。
- (3) 环境的改变对半导体导电性能和稳定性有很大的影响。

了解半导体的这些特性,对我们了解半导体器件的工作原理及正确认识和使用它们将很有帮助。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

如果在—块晶体的两边分别掺入不同的杂质使之分别形成 P 型半导体和 N 型半导体,如图 1.2.1(a)所示。由于交界面两侧载流子浓度差别很大,故多数载流子将向对方区域扩散,形成多数载流子的扩散运动。这样,在交界面的 P 型半导体和 N 型半导体的两侧分别形成一个带负电的离子层和一个带正电的离子层,从而在交界面上形成一个空间电荷区。由此产生的电场称为内电场,其方向由 N 区指向 P 区,如图 1.2.1(b)所示。内电场的存在阻挡多数载流子的扩散运动而有利于少数载流子向对方区域漂移,形成少数载流子的漂移

运动。刚开始时,扩散运动占优势,漂移运动很弱,随着扩散运动的进行,空间电荷区加宽、内电场加强,阻碍扩散运动的作用增强,同时漂移运动也随着内电场的增强而增强,最后,扩散运动和漂移运动达到动态平衡,形成稳定的空间电荷区,即PN结。PN结是构成基本半导体器件的基础。

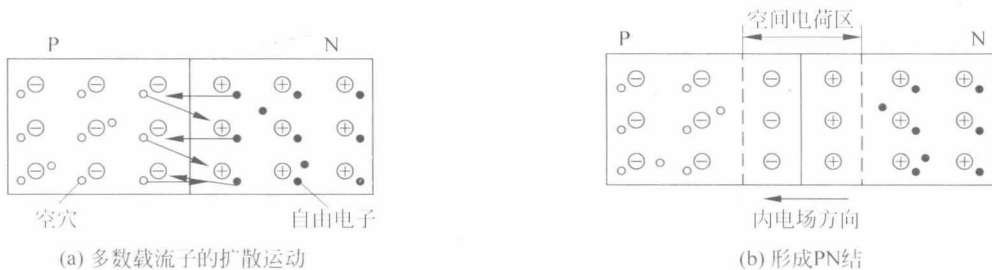


图 1.2.1 PN 结的形成

由于空间电荷区没有载流子存在,形成高阻区,故常称为耗尽层或阻挡层。一般情况下,空间电荷区的宽度仅几微米。

1.2.2 PN 结的单向导电性

1. PN 结外加正向电压

当电源的正极接 P 区、负极接 N 区时,称 PN 结处于正向偏置(外加正向电压),如图 1.2.2(a)所示。外加正向电压产生的电场称为外电场,其方向与内电场相反,内电场被削弱,空间电荷区变窄,有利于扩散运动而不利于漂移运动,因而扩散运动占优势。大量的多数载流子通过 PN 结形成较大的正向电流 I_F ,PN 结处于导通状态。导通时 PN 结呈现的电阻很小,此电阻称为正向电阻。

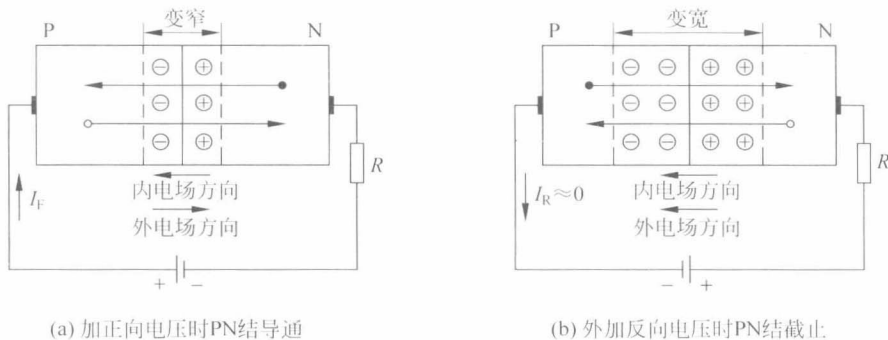


图 1.2.2 PN 结的单向导电性

2. PN 结外加反向电压

若电源的正极接 N 区、负极接 P 区,这时 PN 结处于反向偏置(外加反向电压),如图 1.1.2(b)所示。由于 PN 结承受反向电压时,外电场的方向与内电场一致,内电场被加强,空间电荷区变宽,有利于漂移运动而不利于扩散运动,由少数载流子漂移运动形成反向电流 I_R 。由于少数载流子浓度很低 $I_R \approx 0$,可认为 PN 结处基本不导电处于截止状态,PN 结呈现的电阻很大,称为反向电阻,高达几百千欧以上。在一定温度下,少子浓度不变,即使

增加反向电压的幅度, 电流 I_R 的大小也基本保持不变, 故 I_R 称为反向饱和电流, 用 I_S 表示。

综上所述, PN 结加正向电压, 处于导通状态; PN 结加反向电压, 处于截止状态, 即 PN 结具有单向导电性。

3. PN 结的击穿

当加在 PN 结的反向电压超过某一数值 (U_{BR}) 时, 反向电流会急剧增加, 这种现象称为反向击穿。PN 结的反向击穿通常可分为雪崩击穿和齐纳击穿两种情况。

不论是哪种情况的反向电击穿, 只要 PN 结不因电流过大产生过热而烧毁, 反向电击穿状态是可逆的。即当反向电压数值降到击穿电压以下时, PN 结可以恢复到反向截止的状态。稳压二极管正是利用 PN 结反向击穿特性来实现稳压作用。

1.2.3 PN 结的电容效应

加在 PN 结上的电压的变化可影响空间电荷区电荷的变化, 说明 PN 结具有电容效应。

1. 势垒电容 C_b

PN 结的空间电荷区实际上是由不能移动的正、负离子组成的, 它们具有一定的电量。当空间电荷区随外加电压的变化而加宽或变窄时, PN 结上的电量相应增加或减少。这种电荷量随外加电压变化而变化的现象就是一种电容效应, 称为势垒电容, 用 C_b 表示

$$C_b = \frac{dQ}{dU} = \epsilon \frac{S}{W}$$

式中, ϵ 为半导体材料的介电系数, S 为结面积, W 为阻挡层宽度。对于同一 PN 结, 因其 W 随电压变化, 不是常数, 所以势垒电容不是一个常数。

2. 扩散电容 C_d

扩散电容 C_d 是由于 PN 结外加正向电压, 多数载流子在扩散过程中引起电荷积累而产生的。当外加正向电压增加, 积累电荷量亦增加; 反之, 电荷量减少。

势垒电容 C_b 和扩散电容 C_d 都与 PN 结的面积成正比, 并且均为非线性电容。PN 结的结电容 C_j 为两者之和, 即

$$C_j = C_b + C_d$$

PN 结在加正向电压时, 结电容一般以扩散电容为主; 加反向电压时, 结电容基本上等于势垒电容。 C_j 的数值一般很小 (结面积小的 PN 结的 C_j 值仅 1PF 左右, 大的 C_j 值为几十至几百 PF), 故只有在工作频率很高的情况下才考虑 PN 结的结电容作用。

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管的分类

在 PN 结的两端接上电极引线并用管壳密封就构成半导体二极管。从 P 型半导体引出的电极称为阳极; 从 N 型半导体引出的电极称为阴极。其符号如图 1.3.1(d) 所示。二极管具有单向导电性, 其符号中箭头所示的方向就是正向电流的方向。

根据二极管根据半导体材料的不同可分为硅二极管和锗二极管; 根据内部结构的不同, 二极管可分为以下三种类型:

点接触型二极管: 如图 1.3.1(a) 所示, 由于 PN 结面积很小, 只能通过较小的电流 (几

十毫安以下),但它结电容小,适用于高频(几百兆赫兹)电路。故多用于高频信号检波、混频以及小电流整流电路中。

(1) 面接触型二极管:如图 1.3.1(b)所示,由于 PN 结面积大,所以允许通过较大的电流(几百毫安甚至几安),但由于结电容大,只能用于低频整流电路中。

(2) 平面型二极管:如图 1.3.1(c)所示,PN 结面积小的平面二极管常用在脉冲电路中作为开关管用,结面积较大的平面管常用于大功率整流电路之中。

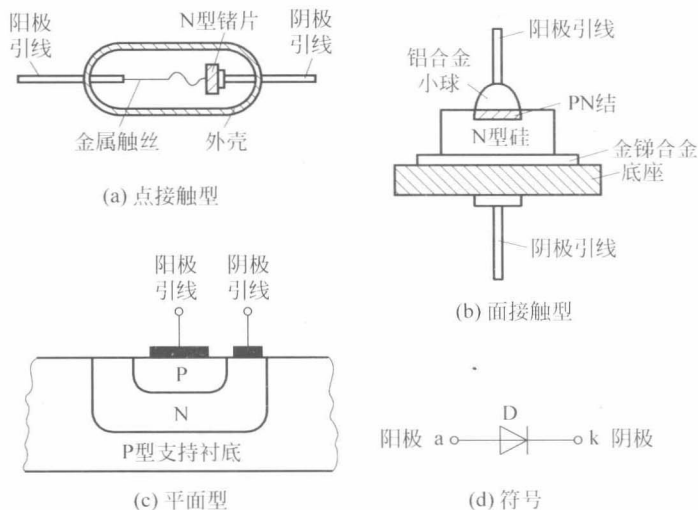


图 1.3.1 半导体二极管的符号和结构

1.3.2 半导体二极管的特性曲线与主要参数

1. 特性曲线

二极管特性曲线是指二极管阳极与阴极之间的电压 U 与流过二极管电流 I 的关系曲线,又称为伏安特性曲线。实测的二极管伏安特性曲线与 PN 结方程曲线有一定差别。图 1.3.2 和图 1.3.3 分别是硅二极管和锗二极管的实测伏安特性曲线,其特点如下:

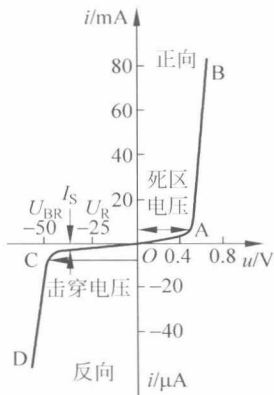


图 1.3.2 硅二极管伏安特性

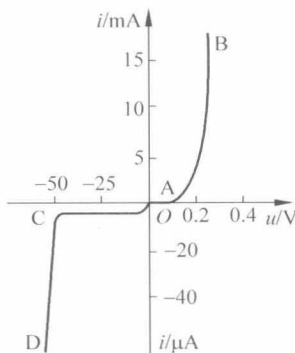


图 1.3.3 锗二极管伏安特性

1) 正向特性

当二极管外加的正向电压很低时,由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动的阻碍作用,因而正向电流仍约为零,这一区域称为死区。当正向电压增加到某一数值时,内电场被削弱,正向电流增长很快,二极管进入导通状态,该电压值称为死区电压,也叫做门槛电压,用 U_{on} 表示。硅二极管的导通电压约为 $0.5V$,锗二极管的导通电压约为 $0.1V$ 。二极管导通后,阳极与阴极间的电压硅管一般为 $0.6\sim 0.7V$,锗管为 $0.2\sim 0.3V$ 。通常认为当二极管正向电压小于 U_{on} 时,二极管截止,当二极管正向电压大于 U_{on} 时,二极管导通。

2) 反向特性

当二极管外加反向电压时,PN 结承受反向偏置,电流很小,且反向电压在较大范围内变化时反向电流值基本不变,称为反向饱和电流,此时,二极管处于截止状态。小功率硅管的反向饱和电流约在 $0.1\mu A$ 以下,锗管通常在几十微安。当反向电压增加到某一数值时(一般为几十伏、高的可达数千伏),二极管被击穿,此时,二极管处于击穿状态。普通二极管往往因击穿过热而烧毁。

由二极管的伏安特性可知,普通二极管一般工作在导通状态或截止状态。

PN 结的单向导电性可以用 PN 结伏安特性理论方程来描述,即

$$i = I_s(e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1.3.1)$$

式中, I_s 为反向饱和电流的大小; $U_T = kT/q$ 称为温度电压当量。其中 k 为玻耳兹曼常数; T 为热力学温度; q 为电子的电量,当温度为 $300K$ (室温)时, $U_T \approx 26mV$, i 和 u 是 PN 结的电流和电压,方向为正向电流和电压的方向。

当二极管的 PN 结两端加正向电压, u 比 U_T 大几倍时,式(1.3.1)中的 u/U_T 远大于 1,其中的 1 可以忽略。这样,PN 结的电流 i 与电压 u 成指数关系,即

$$i \approx I_s e^{\frac{u}{U_T}} \quad (1.3.2)$$

当二极管加反向电压时, u 为负值。若 $|u|$ 比 U_T 大几倍时,指数项趋近于零,因此 $i = -I_s$ 。可见反向饱和电流是个常数 I_s ,不随外加反向电压的大小而变动。

3) 温度特性

二极管的特性对温度十分敏感,温度升高时,正向特性曲线向左移,反向特性曲线向下移。一般规律是:在同一电流下,温度每升高 $1^\circ C$,正向压降减少 $2\sim 2.5mV$;温度每升高 $10^\circ C$,反向饱和电流约增加一倍。

2. 主要参数

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还用一些参数表示,其主要参数如下:

(1) 最大整流电流 I_F : 指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流。它主要取决于 PN 结的结面积大小,当流过二极管的正向平均电流超过此值时,会使 PN 结烧坏。

(2) 反向击穿电压 U_{BR} : 指管子反向击穿时的电压值。击穿时,反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏。

(3) 最高反向工作电压 U_R : 指保证二极管不被反向击穿所给出的最高反向工作电压。通常约为反向击穿电压的一半。使用时,加在二极管上的实际反向电压不能超过此值。

(4) 最大反向工作电流 I_R : 指在二极管上加最高反向工作电压时的反向电流。此值越小,单向导电性能越好。当温度升高时,反向电流增加,单向导电性能变坏,故二极管在高温条件使用时要特别注意。

(5) 最高工作频率 f_M : 指保证二极管具有良好单向导电性能的最高频率。它主要由

PN 结的结电容大小决定。结面积小的二极管最高工作频率较高。

值得注意的是,由于制造工艺的限制,各类半导体器件参数的分散性较大,手册上给出的参数往往是一个范围。而且,半导体器件对温度反映敏感,因此,具体使用时要注意温度改变时对相应参数产生的影响。

(6) 二极管的直流电阻 R_D : 二极管两端的直流电压与流过二极管的电流之比称为二极管的直流电阻 R_D ,如图 1.3.4 所示。即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D}$$

(1.3.3)

(7) 二极管的交流(动态)电阻 r_D : 当二极管端电压在某一确定值(工作点 Q)附近的微小变化与流过二极管电流产生的微小变化之比称为二极管的交流(动态)电阻 r_D ,如图 1.3.5 所示。即

$$r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$$

(1.3.4)

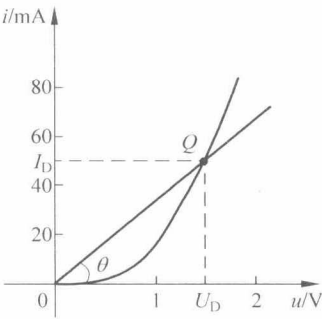


图 1.3.4 二极管直流电阻

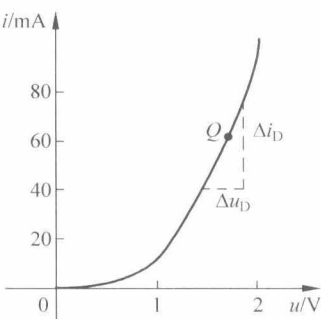


图 1.3.5 二极管交流电阻

二极管直流电阻 R_D 和交流电阻 r_D 的大小与二极管的工作点有关。对同一工作点而言,直流电阻 R_D 大于动态电阻 r_D ,对不同工作点而言,工作点越高, R_D 和 r_D 越低。

表 1.3.1 列出了几种二极管的主要参数。

表 1.3.1 半导体二极管的主要参数

参数 型号	最大整流 电流/mA	最高反向工作 电压(峰值)/V	反向击穿电压 (反向电流为 400μA)/V	正向电流(正向 电压为 1V)/mA	反向电流(反向 电压分别为 10, 100V)/μA	最高工作 频率/MHz	极间电 容/pF
2AP1	16	20	≥40	≥2.5	≤250	150	≤1
2AP7	12	100	≥150	≥5.0	≤250	150	≤1

注: 2AP1~7 检波二极管(点接触型锗管,在电子设备中作检波和小电流整流用)。

参数 型号	最大整流 电流/A	最高反向工作电压 (峰值)/V	最高反向工作电压下的 反向电流(125℃)/μA	正向压降(平均值) (25℃)/V	最高工作 频率/kHz
2CZ52	0.1	25,50,100,200,300, 400,500,600,700,800,	1000	≤0.8	3
2CZ54	0.5	900,1000,1200,1400, 1600,1800,2000,2200,	1000	≤0.8	3
2CZ57	5	2400,2600,2800,3000	1000	≤0.8	3

注: 2CZ52~57 系列整流二极管,用于电子设备的整流电路中。

1.3.3 半导体二极管应用电路举例

二极管的应用很广,其基本电路有限幅电路、开关电路等。由于二极管是一种非线性器件,分析电路时常采用模型分析法。

1. 二极管伏安特性的建模

理想二极管具有的特点是:加正向电压时二极管导通,其两极之间视为短路,相当于开关合上;加反向电压时二极管截止,其两极之间视为开路,相当于开关断开。理想二极管的模型如图 1.3.6 所示。图中虚线表示实际二极管的伏安特性。

恒压模型如图 1.3.7 所示,其基本思想是:当二极管导通时,其工作电压恒定,不随工作电流变化,典型导通电压值 U_D 为 0.7V(硅管,锗管 U_D 为 0.3V),当工作电压小于该值二极管截止,其两极之间视为开路。图中虚线表示实际二极管的伏安特性。

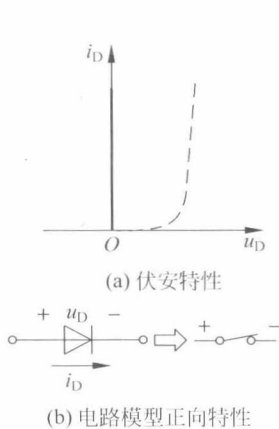


图 1.3.6 理想模型

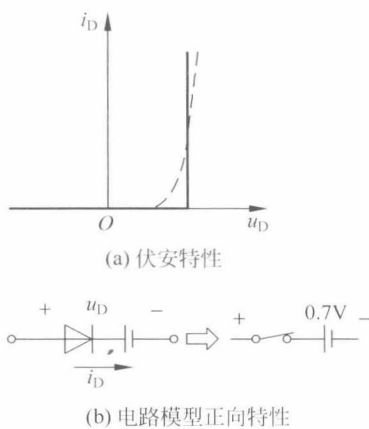


图 1.3.7 恒压模型

分析二极管电路的关键是判断二极管的导通或截止。导通时,用理想模型分析, $U_D = 0$,用恒压模型分析, $U_D = 0.7V$ 或 $U_D = 0.3V$,截止时,两种模型均视为开路。

2. 限幅电路

图 1.3.8(a)所示电路为一种限幅电路,其作用就是将输出电压的幅度限制在一定的范围内。在分析这类电路时,一般采用理想模型。求解时不妨先将二极管断开,分别求出它们两极的电位,当满足导通条件时,将二极管两极短接,否则二极管阳极和阴极间视为开路。当电路输入电压 u_i 为正弦信号时,如图 1.3.8 所示,电路工作原理如下:

断开二极管, $u_D = u_i - E$ 。当 $u_i > E$ 时,二极管正偏,如同开关闭合,所以 $u_o = E$; 当 $u_i < E$ 时,二极管反偏,如同开关断开,所以 $u_o = u_i$ 。输入电压 u_i 和输出电压 u_o 的波形如图 1.3.8 (b)所示。

由图可知,此电路输出电压值的正半周限制在 E 之内,超过此值的部分被削去,故称限幅电路。

例 1.3.1 电路如图 1.3.9(a),已知 $u_i = 5\sin\omega t$,设 D_1 和 D_2 为理想二极管,试画出 u_o 波形。

解 断开二极管, $u_{D1} = u_i - 1$, $u_{D2} = -2 - u_i$,当 $u_i > 1$, D_1 正向偏置, D_2 反向偏置,当 $u_i <$

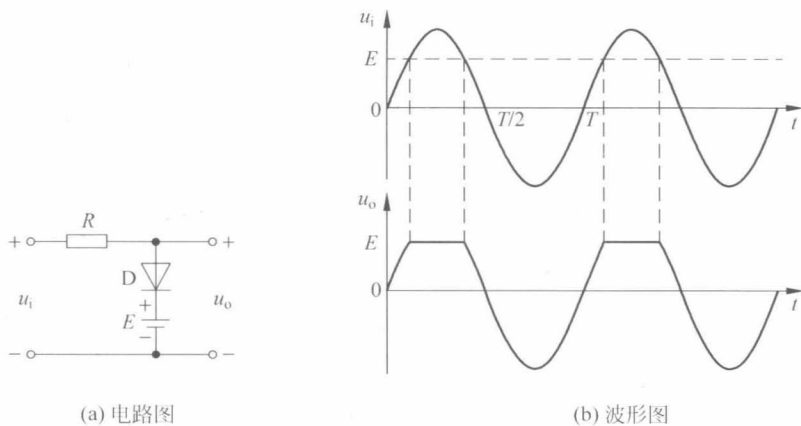


图 1.3.8 二极管限幅电路

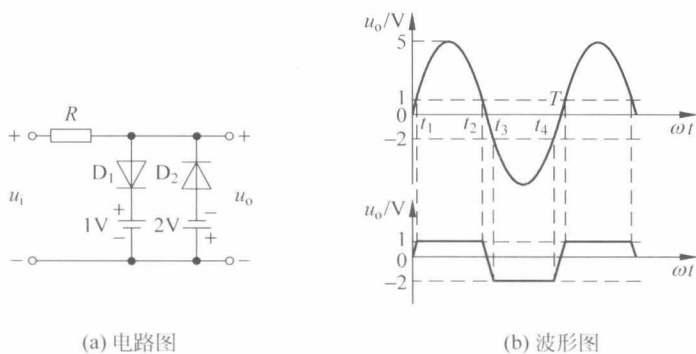


图 1.3.9 例 1.3.1 的电路

-2 , D_1 反向偏置, D_2 正向偏置, 当 $-2 < u_i < 1$, D_1 、 D_2 均为反向偏置。所以有

- (1) 在 $0 \sim t_1$ 期间, $0 < u_i < 1$, D_1 、 D_2 因反向偏置而均截止, 此时 $u_o = u_i$;
- (2) 在 $t_1 \sim t_2$ 期间, $u_i > 1$, D_1 因正向偏置而导通, 因此, $u_o = 1V$;
- (3) 在 $t_2 \sim t_3$ 期间, 因 $-2 < u_i < 1$, D_1 因反向偏置重新截止, $u_o = u_i$;
- (4) 在 $t_3 \sim t_4$ 期间, $u_i < -2$, D_2 因正向偏置而导通, $u_o = -2V$;
- (5) 在 $t_4 \sim T$ 期间, $-2 < u_i < 0$, D_2 因反向偏置重新截止, $u_o = u_i$ 。 T 为输入信号 u_i 的周期, $\omega = 2\pi/T$ 。

输出电压 u_o 的波形如图 1.3.9(b) 所示。由图可知, 此电路输出电压的值限制在 $-2 \sim 1V$ 之内, 超过部分被削去, 电路称为双向限幅电路。

3. 开关电路

在数字电路中, 常利用二极管单向导电性的开关作用, 组成各种开关电路, 实现相应的逻辑功能。分析这类电路的原则仍然是判断电路中的二极管是导通还是截止。现举例说明。

例 1.3.2 电路如图 1.3.10 所示, 当 U_A 和 U_B 为 $0V$ 或 $5V$ 时, 求 U_A 和 U_B 在不同的组合下, 输出电位 U_Y 的值, 设 D_A 、 D_B 均为理想二极管。

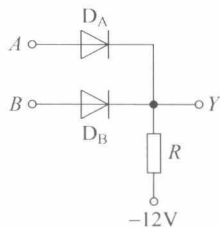


图 1.3.10 例 1.3.2 的电路

解 (1) $U_A=0V, U_B=5V$, 由电路可知, D_A 的正向偏置电压为 $12V$, D_B 的正向偏置电压为 $17V$, 此时出现两个二极管同时正向偏置。在这种情况下, 正向偏置电压大的二极管首先导通, 即 D_B 导通, 输出电位 U_Y 钳制在 $5V$, 而 D_A 因 D_B 导通处于反向偏置, 因而 D_A 截止。

(2) 以此类推, U_A 和 U_B 在不同的组合下, 输出电位 U_Y 的值列入表 1.3.2 中。

表 1.3.2 U_A 和 U_B 不同的组合下的二极管状态及输出电位 U_Y

输 入		二极管状态		输 出
U_A	U_B	D_A	D_B	U_Y
0V	0V	导通	导通	0
0V	5V	截止	导通	5V
5V	0V	导通	截止	5V
5V	5V	导通	导通	5V

由上表可知, 只要 $U_A、U_B$ 中有一个为 $5V$, 则输出为 $5V$, 若 $U_A、U_B$ 全为 $0V$, 则输出为 $0V$, 若将 $0V、5V$ 分别看成两种不同的逻辑状态, 这种逻辑关系称为逻辑。

1.4 稳压二极管

1.4.1 稳压二极管的特性

稳压二极管是一种用特殊工艺制造的面接触型半导体硅二极管, 简称稳压管。图 1.4.1(a) 是稳压管的符号, 图 1.4.1(b) 是稳压管的伏安特性曲线。

稳压管的正向伏安特性与普通的硅二极管完全相同, 其反向伏安特性与普通二极管相比差别是反向击穿电压较低, 只要采取适当措施限制通过管子的电流, 就能保证管子不因过热而烧毁, 当反向电压取消后, 仍能使管子恢复原有的结构, 故反向击穿是可逆的。稳压管可工作在导通、截止和反向击穿状态。

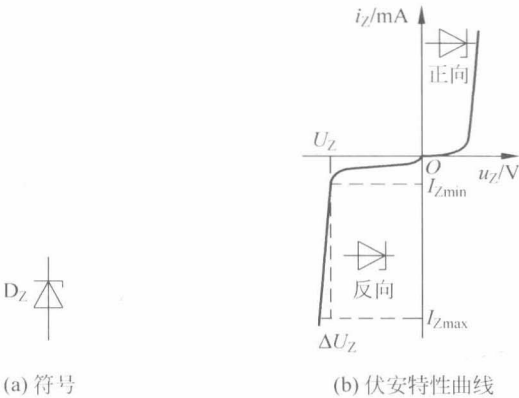


图 1.4.1 稳压管的符号和伏安特性曲线

1.4.2 稳压原理

稳压管的稳压原理是: 由于反向伏安特性曲线很陡, 这样, 在反向击穿电压下, 当流过

管子的电流在较大范围内变化时,管子两端的电压变化很小,因而具有稳压作用。当稳压管工作在稳压状态时,应使稳压管处于反向击穿区。

稳压管的主要参数如下:

1) 稳定电压 U_Z

稳定电压指稳压管的反向击穿电压。由于制造工艺的原因,同一型号管子的稳定电压分散性也大,如 2CW18 管的稳定电压在 10~12V 之间。但对每一个管子而言,对应于一定的工作电流,就有一个确定的稳定电压值。

2) 稳定电流 I_Z

稳定电流指工作电压等于稳定电压时的工作电流。它仅为一个参考数值,具体的稳定电流值由具体情况而定。对于每一个稳压管而言均规定有最大稳定电流 $I_{Z\max}$ 和最小稳定电流 $I_{Z\min}$,设计稳压电路时必须选择合适的限流电阻使得流过稳压管的电流在这两者之间,以保证稳压管能够正常工作。

3) 动态电阻 r_Z

动态电阻指稳压管的两端电压变化量与流过稳压管电流变化量的比值,即 $r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$ 。

由以上定义可知,稳压管的反向伏安特性曲线越陡,则动态电阻值越小,稳压特性越好。 r_Z 通常为几欧至几十欧。同一管子的 r_Z 随工作电流的增加而减小。

4) 额定功率 P_Z

由于稳压管的两端电压值为 U_Z ,而管子中要流过一定电流,因此要消耗一定的功率,管子因此发热。 P_Z 取决于稳压管允许的温升。

5) 温度系数 α

温度系数指当温度每升高 1℃ 时稳压管稳定电压的相对变化量。稳压管的稳定电压在低于 4V (齐纳击穿) 时具有负温度系数; 高于 7V (雪崩击穿) 时具有正温度系数; 而在 4~7V 之间则有两种可能且数值很小。

表 1.4.1 列出了几种稳压管的参数。

表 1.4.1 稳压管的典型参数

型 号	稳定电压 V_Z/V	稳定电流 I_Z/mA	最大稳定 电流 I_{ZM}/mA	耗散功率 P_M/W	动态电阻 r_Z/Ω	温度系数 $\alpha\%/^{\circ}C$
2CW11	3.2~4.5	10	55	0.25	<70	$-0.05 \sim +0.03$
2CW15	7~8.5	5		0.25	≤ 10	$+0.01 \sim +0.08$
2DW7A'	5.8~6.6	10	30	0.20	≤ 25	0.05

* 2DW7 为具有温度补偿的稳压管。

例 1.4.1 电路如图 1.4.2 所示,设稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 的稳定工作电压分别为 5V 和 10V,试求出电路的输出电压 U_O ,判断稳压二极管所处的工作状态。已知稳压二极管正向电压为 0.7V。

解 由图 1.4.2 电路得知,稳压二极管 D_{Z1} 与 D_{Z2} 顺向串联,当稳压二极管 D_{Z1} 和 D_{Z2} 串联两端与电路断开时;对 D_{Z1} 和 D_{Z2} 而言,断开两端的反向电压为 25V,大于 D_{Z1} 与 D_{Z2} 串联后的击穿电

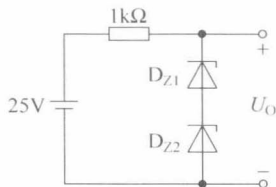


图 1.4.2 例 1.2.3 的图

压(即 $5+10=15\text{V}$),使 D_{Z1} 、 D_{Z2} 处于击穿状态,输出电压 U_o 稳定在 15V 。

1.5 半导体三极管

三极管是组成各种放大电路的核心器件。

1.5.1 三极管的结构及类型

三极管的种类很多,按照功率的大小分小功率管、大功率管等;按照半导体材料分,有硅管和锗管;按照频率分有高、低频管。但从总体上讲它们都是具有两个 PN 结、三个电极的半导体器件,因而得名为半导体三极管,常见的三极管外形如图 1.5.1 所示。

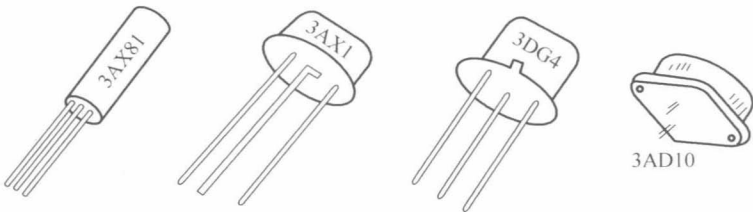


图 1.5.1 几种三极管的外形

根据 PN 结组合的方式,三极管可分为两种,即 NPN 型和 PNP 型。

图 1.5.2(a)是 NPN 型三极管的结构示意图,它是在硅(或锗)晶体上制成两个 N 区和一个 P 区,中间的 P 区很薄(几微米~几十微米)且掺杂很少,称为基区。两个 N 区中一个掺杂浓度高,称为发射区,另一个 N 区掺杂较少、面积较大,称为集电区。由这三个区引出的电极分别称为基极 B、发射极 E 和集电极 C。发射区与基区之间形成的 PN 结称为发射结、集电区与基区间的 PN 结称为集电结。NPN 型三极管的符号如图 1.5.2(b)所示。

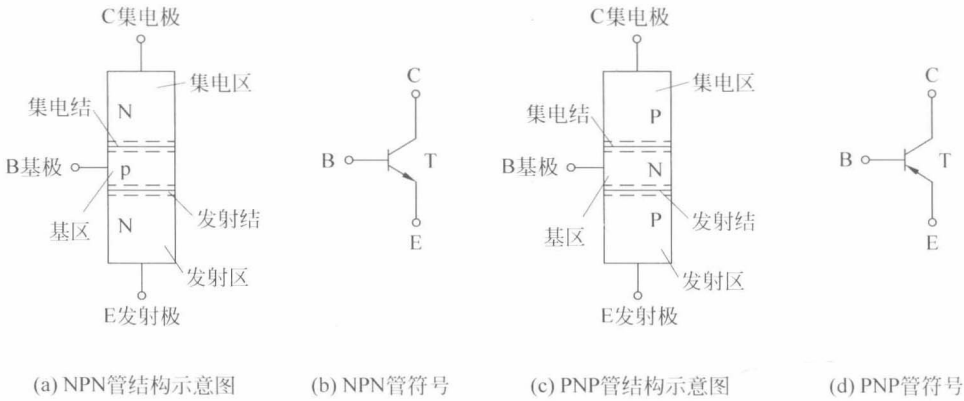


图 1.5.2 三极管

图 1.5.2(c)、图 1.5.2(d)是 PNP 型三极管的结构示意图及符号,PNP 型三极管和 NPN 型三极管的结构特点、工作原理基本相同。

1.5.2 三极管的三种连接方式

三极管作为放大元件使用时将构成两个回路,其中一个为输入回路,一个为输出回路,故三个电极中必有一个电极作为两个回路的公共端,从而形成三种不同的连接方式,即共发射极、共集电极和共基极,如图 1.5.3 所示。

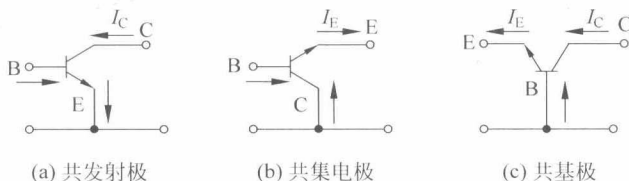


图 1.5.3 三极管的三种连接方式

1.5.3 三极管的放大作用

不论什么连接方式,要使三极管处于放大状态,必须由它的内部结构和外部条件来保证。三极管的内部结构具有以下三个特点:

- (1) 发射区掺杂多,多数载流子浓度远大于基区多数载流子的浓度。
- (2) 基区做得很薄,而且掺杂少。
- (3) 集电区面积大,保证尽可能收集到发射区发射到基区并扩散到集电结附近的多数载流子。

三极管的外部条件应满足其发射结处正向偏置、集电结反向偏置。

在满足上述条件下,以图 1.5.4 所示的 NPN 管共发射极放大电路为例,分析电路的放大过程。

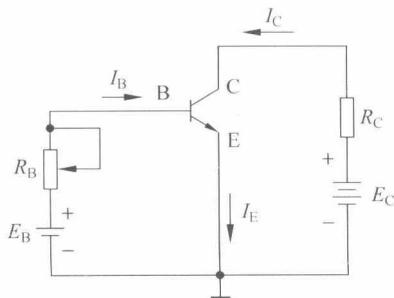


图 1.5.4 共发射极放大电路

1. 载流子运动情况

三极管的载流子运动情况可分为以下几步进行:

1) 发射区向基区发射自由电子

由于发射结处正向偏置,发射区的多数载流子自由电子不断地通过 PN 结到达基区,与此同时,基区的多数载流子空穴也会通过发射结到达发射区,两种载流子方向相反,形成电流的方向相同,称为发射极电流 I_E 。由于基区的空穴浓度远低于发射区自由电子浓度,可以认为发射极电流主要是由发射区的多数载流子自由电子形成的。

2) 自由电子在基区的扩散和复合运动

由发射区进入基区的自由电子从发射结附近继续向自由电子浓度少的集电结方向扩散,在扩散途中,自由电子不断地与基区的多数载流子空穴复合而消失。同时,接于基极的电源 E_B 的正极不断补充基区中被复合掉的空穴,从而形成了基极电流 I_B 。由于基区很薄且空穴浓度很低,所以从发射区到达基区的自由电子中只有少部分被复合掉,而绝大部分的自由电子均能扩散到集电结的边缘。

3) 集电区收集自由电子

由于集电结处于反向偏置,所以,基区中扩散到集电结边缘的自由电子在电场力的作用下很容易通过集电结到达集电区,形成较大的集电极电流 I_C 。同样地,集电区的少数载流子空穴也在反向电压的作用下漂移到基区形成 I_C 的一部分,称为反向饱和电流 I_{CBO} ,但由于数量很少,对放大没有贡献,且受温度影响很大,易使管子工作不稳定,所以在应用时,应选择 I_{CBO} 小的管子。

从三极管载流子的运动情况看,参与导电的载流子有两种极性,即,带正电的空穴和带负电的自由电子,因而三极管属双极型半导体器件。三极管载流子的运动情况与电流的形成如图 1.5.5 所示。

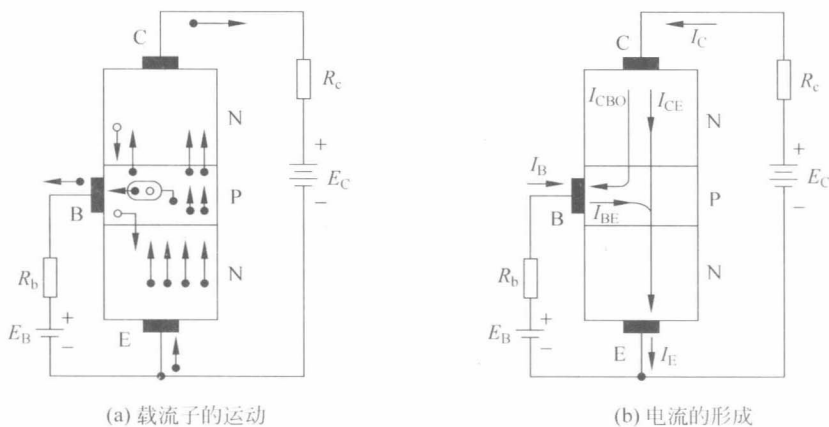


图 1.5.5 载流子的运动与电流的形成

2. 电流的分配与放大作用

由上述载流子的运动情况的分析可知,集电结收集的电子流是发射结发射的总电流的一部分,其数值小于但接近于发射极电流,常用一系数 $\bar{\alpha}$ 与发射极电流的乘积来表示,即

$$I_C = \bar{\alpha} I_E \quad (1.5.1)$$

$\bar{\alpha}$ 称为共基极连接时的电流放大系数,其数值小于但接近于 1。根据图 1.5.5 的电路,应用基尔霍夫(或克希荷夫)电流定律(简称 KCL),三极管各极的电流关系为

$$I_E = I_C + I_B \quad (1.5.2)$$

因此,基极电流可以表示为发射极电流的一部分,即

$$I_B = (1 - \bar{\alpha}) I_E \quad (1.5.3)$$

由此推出集电极电流与基极电流的关系,即

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\bar{\alpha} I_E}{(1 - \bar{\alpha}) I_E} = \frac{\bar{\alpha}}{(1 - \bar{\alpha})} = \bar{\beta} \quad (1.5.4)$$

β 称为共发射极连接时的电流放大系数。

对于已经制成的三极管而言, I_C 和 I_B 的比值基本上是一定的。因此, 在调节 B、E 之间电压 U_{BE} 使得基极电流 I_B 变化时, 集电极电流 I_C 也将随之变化, 它们的变化量分别用 Δi_B 和 Δi_C 表示。 Δi_C 与 Δi_B 的比值称为共发射极交流电流放大系数, 用 β 表示

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B}$$

当 I_B 微小的变化会引起 I_C 较大的变化, 这就是三极管的电流放大作用, 三极管的 β 通常为几十到几百, 由此可知, 三极管是一种电流控制元件, 所谓电流放大作用, 就是用基极电流的微小变化去控制集电极电流较大的变化。

1.5.4 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指各极电压与电流之间的关系曲线。它们能直接反映三极管的性能, 同时也是分析放大电路的重要依据。本节仅讨论共发射极的特性曲线。

1. 输入特性曲线

共射极输入特性曲线是指以输出电压 u_{CE} 为参考变量时, 输入电流 i_B 和输入电压 u_{BE} 的关系曲线。用函数表示为

$$i_B = f(u_{BE}) \mid u_{CE} = \text{常数}$$

图 1.5.6 是硅三极管的输入特性曲线。当 $u_{CE} = 0$ 时, 三极管的发射极和集电极间短路, i_B 实际上为两个并联 PN 结的正向电流之和。当 $u_{CE} \geq 1$ 时, 随 u_{CE} 的增加, 集电结上反向电压增加, 不仅可增加吸引基区载流子的能力, 而且反向电压增加可加宽集电结空间电荷区, 减小基区有效宽度, 使载流子在基区复合的机会减少, 故而在相同的 u_{BE} 作用下 i_B 减小, 输入特性曲线右移。在 $u_{CE} \geq 1V$ 以后, 只要 u_{BE} 不变, i_B 下降不明显, 故而可用一条曲线表示。

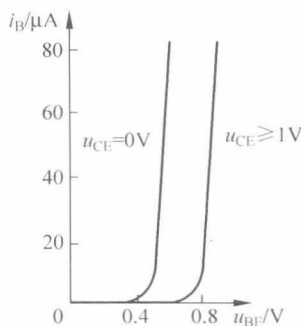


图 1.5.6 硅三极管的输入特性

与二极管伏安特性一样, 三极管的输入特性曲线也存在死区, 且其死区电压分别等于硅二极管和锗二极管的死区电压。正常工作时, 硅三极管的发射结电压为 $0.6 \sim 0.7V$, 锗三极管的发射结电压为 $0.2 \sim 0.3V$ 。

2. 输出特性曲线

共发射极输出特性曲线是指以输入电流 i_B 为参考变量时, 输出电流 i_C 和输出电压 u_{CE} 的关系曲线。用函数表示为

$$i_C = f(u_{CE}) \mid i_B = \text{常数}$$

图 1.5.7 为 3DG6 型三极管对应于不同基极电流的输出特性曲线, 可以看出, 曲线的起始部分(即 u_{CE} 较小时)很陡。当 u_{CE} 由零开始略有增加时, 由于集电结收集载流子的能力大大增强, i_C 增加很快, 但当 u_{CE} 增加到一定数值(约 $1V$)后, 集电结反向电场已足够强, 能将发射区扩散到基区的载流子绝大部分吸引到集电区, 致使当 u_{CE} 继续增加时, i_C 不再明显地增加, 曲线趋于平坦。

当 i_B 增大时, 相应的 i_C 也增加, 曲线上移, 形状相似。