

第 3 章 半导体二极管、三极管和场效应管

半导体器件是电子线路的核心部件。本章首先介绍半导体和 PN 结的特性,然后逐一介绍半导体二极管、三极管和场效应管的结构、工作原理、特性和参数。重点应掌握它们的外部特性,以便能合理选择和正确使用这些器件。

3.1 PN 结与半导体二极管、稳压二极管

3.1.1 半导体

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。半导体具有受外界影响的一些特殊性质,如导电能力随光照、辐射和温度升高而迅速增强;导电能力因掺入微量杂质而显著增强等。

1. 本征半导体

纯净的半导体称为本征半导体。常用的半导体材料是四价元素硅(Si)和锗(Ge),两者外层都有 4 个价电子。为了突出价电子的作用和便于讨论,常把原子核和内层电子看作一个整体,称为惯性核。于是 4 价元素的简化原子模型如图 3-1 所示;核内的“+4”表示与 4 个价电子对应的 4 个单位的正电荷,整个原子呈中性。

提纯后的硅原子密度约为 5×10^{22} 个/ cm^3 ,原子之间的距离已小到使价电子不但受自身核的吸引,还受到相邻原子核的吸引,形成共价键结构,如图 3-2 所示。图中每个原子和相邻的 4 个原子互相补足 8 个价电子以形成稳定结构,缺少一个电子的键称为不稳定结构。

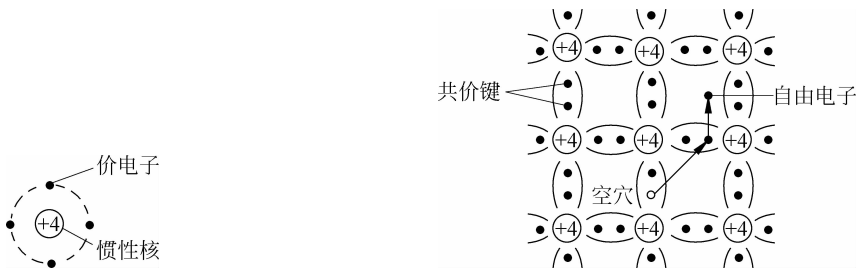


图 3-1 4 价元素的简化原子结构模型

图 3-2 4 价元素的共价键结构示意图

物质内部运载电荷的粒子称为载流子,物质的导电能力取决于载流子的数量和运动速度。本征半导体在热力学温度零度($0^\circ\text{K} \approx -273^\circ\text{C}$)以及无光照或无电磁场等外界影响时,价电子摆脱不了共价键的束缚,不能成为自由电子,也就没有载流子,它相当于绝缘体。在

室温(一般指 25°C)条件下,由于赋予电子的热能转化为动能,少数能量较大的价电子能够挣脱共价键的束缚而成为自由电子,同时在原来共价键处留下一个空位,这个空位叫做空穴,这种现象称为“本征激发”。自由电子和空穴都是载流子,在电场作用下以彼此相反的方向作定向运动形成电流。

价电子受到激发产生电子-空穴对,自由电子在运动中又会遇到空穴,并与空穴结合而成为对消失,这一过程称为“复合”。电子-空穴对的产生与复合同时进行。当温度升高时,本征激发增强,载流子浓度按指数规律迅速增大。硅材料,大约温度每升高 10°C ,载流子浓度增加一倍;锗材料,大约温度每升高 12°C ,载流子浓度增加一倍。温度是影响半导体性能的一个重要因素。

2. 杂质半导体

本征半导体的载流子浓度低、导电能力差。为了改善导电性能,在本征半导体中掺入微量的杂质元素可以提高载流子浓度。掺杂后的半导体称为杂质半导体,分 N 型和 P 型两种。

① N 型半导体。在本征半导体中掺入 5 价元素磷(或砷、锑)时,磷原子会在晶格中的某些位置取代硅(锗)原子,如图 3-3 所示。由于杂质原子最外层有 5 个电子,它用 4 个电子与相邻原子组成共价键后,还多余一个价电子。室温下,多余的价电子成为自由电子。

掺入 5 价元素后的半导体中仍然存在本征激发产生的电子-空穴对,但数量很少,因此电子是多数载流子,简称多子;空穴是少数载流子,简称少子。这种以电子为多数载流子的杂质半导体称为 N 型半导体(N 是 negative 的首字母,表示电子带负电)。

② P 型半导体。在本征半导体中掺入 3 价元素硼(或铝、镓等),硼原子会在晶格中的某些位置取代硅(锗)原子,如图 3-4 所示。硼原子只有三个价电子,当它和相邻的原子组成共价键时,因缺少一个价电子而留下一个空穴。同样,加上本征激发产生的电子-空穴对,空穴是多数载流子,电子是少数载流子。这种以空穴为多数载流子的杂质半导体称为 P 型半导体(P 是 positive 的首字母,表示空穴带正电)。

只用 N 型半导体或只用 P 型半导体接入电路类似于一个电阻。但是,如果把这两种不同类型的半导体通过特殊工艺放在一起,奇迹就出现了。

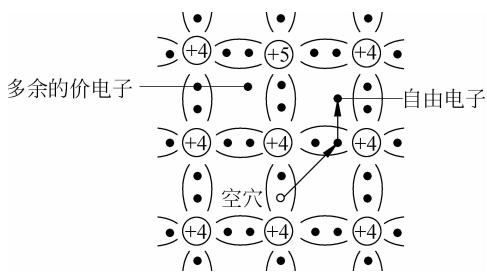


图 3-3 N 型半导体

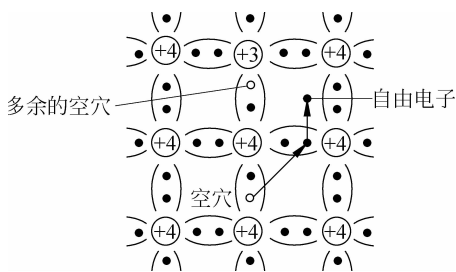


图 3-4 P 型半导体

3.1.2 PN 结及其单向导电特性

在如图 3-5 所示的一块本征半导体上,一边做成 P 型半导体,另一边做成 N 型半导体,在两者的交界面附近会出现具有特殊物理性能的 PN 结。

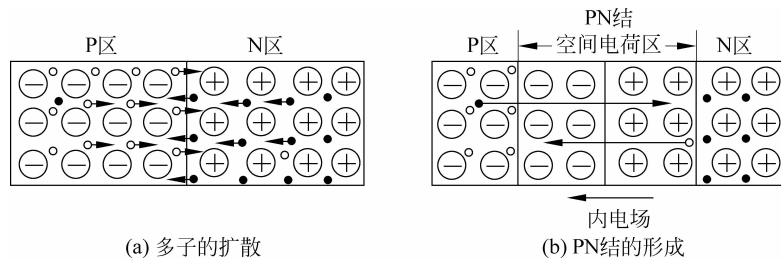


图 3-5 PN 结示意图

1. PN 结的形成

P 区和 N 区的多子都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散, P 区的空穴向 N 区扩散, 使 P 区失去空穴而留下不能移动的负离子; N 区的电子也要向 P 区扩散, 使 N 区失去电子而留下不能移动的正离子。这些正、负离子所占的空间称做空间电荷区, 正、负离子之间形成一个内电场, 方向是从 N 区指向 P 区。内电场阻止两边多子的进一步扩散, 而有利于两边的少子的漂移; 少子的漂移使空间电荷区变窄、内电场减弱、使多子的扩散容易进行。当扩散的多子数量与漂移的少子数量相等时, 达到动态平衡状态, 这种动态平衡状态下的空间电荷区就是 PN 结。

PN 结在 P 区和 N 区的宽度与掺杂浓度有关。因为在 PN 结分界面两边正负离子的电荷量相等, 当 P 区和 N 区掺杂浓度相同时, PN 结在分界面两边的宽度相等, 称做“对称结”, 否则称“非对称结”。若 P 区掺杂浓度高于 N 区时就用 P^+N 表示, 此时 P^+N 结在 P 区的宽度将小于 N 区的宽度, 实际上绝大多数的 PN 结为非对称结。

2. PN 结的单向导电性

在 PN 结两端外加不同极性的电压, 将破坏原来的平衡状态, 呈现单向导电特性。P 区接电源的正极、N 区接电源的负极, 叫做加“正向电压”或“正向偏置”, 如图 3-6(a) 所示。由于外加电场方向与内电场方向相反, 将推动 P 区和 N 区的多子通过 PN 结、少子背离 PN 结。通过 PN 结的多子与结内的正负离子中和一部分, 使空间电荷区减少、PN 结变窄、内电场减弱, 扩散电流大大超过漂移电流, 它在外电路形成一个流入 P 区的正向电流 I_F 。

电源的正极接 N 区, 负极接 P 区, 叫做加“反向电压”或“反向偏置”, 如图 3-6(b) 所示。反偏时, 由于外加电场与内电场的方向相同, 两边的多子不仅无力穿过 PN 结、而且还被外电场吸引到电极, 使空间电荷区变宽、内电场增强。反偏时通过 PN 结的漂移电流超过了扩散电流, 表现为从外电路流进 N 区的反向电流 I_R 。当温度不变时, 反向电流在一定范围内是不随外加电场变化的常量, 所以常把反向电流称为反向饱和电流。由于 I_R 近似为零, 可以认为 PN 结反偏时截止。

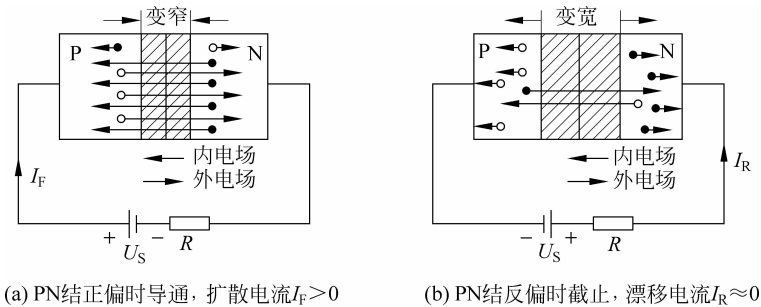


图 3-6 PN 结的单向导电性

3.1.3 半导体二极管

将 PN 结两极分别加上引线并用管壳封装就构成了一个二极管,按其结构的不同,可分为以下几类,如图 3-7 所示。

- ① 点接触型。它是用一根细金属丝压在晶片上,在接触点形成 PN 结。由于接触面小,因而不能通过较大的电流,但结电容小,适用于高频检波及小电流高速开关电路中。
- ② 面接触型。它是用合金法做成较大接触面积,允许通过较大电流,但结电容大,只适用于低频及整流电路中。
- ③ 平面型。它用二氧化硅作保护层,使 PN 结不受污染,从而大大地减小了 PN 结两端的漏电流。平面型的质量较好,批量生产中产品性能比较一致。其中结面积大的作大功率整流管,结面积小的作高频管或高速开关管。

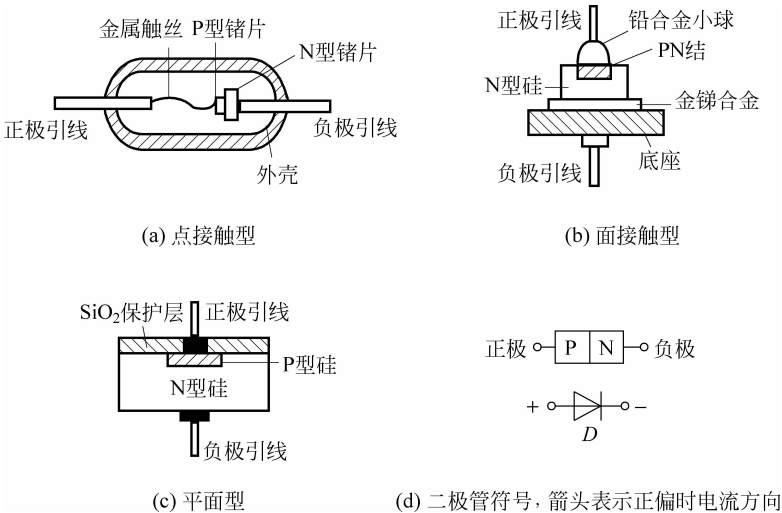


图 3-7 二极管结构及电路符号

1. 二极管的伏安特性

二极管伏安特性实际上是 PN 结伏安特性,考虑到引线电阻以及表面漏电流等因素的影响,实测的二极管伏安特性与 PN 结特性有一定偏差。图 3-8 所示是实际二极管的伏安特性曲线,该曲线的数学方程式为

$$i_D = I_R (e^{u_D/U_T} - 1) \quad (3-1)$$

式中 $U_T = kT/q$ 为温度的电压当量, 其中 k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度, q 为电子的电量。在室温 (300°K) 时, $U_T = 26\text{mV}$ 。

在图 3-8 中, OA 段称为正向特性, 当 u_D 大于 U_{on} 之后, $e^{u_D/U_T} \gg 1$, $i_D = I_R e^{u_D/U_T}$ 明显上升, 称 U_{on} 是开启电压, 硅管的 $U_{on} \approx 0.6\text{V}$, 锗管的 $U_{on} \approx 0.2\text{V}$ 。OB 段称为反向特性的截止状态, 在 $|-u_D| \gg U_T$ 时, $e^{u_D/U_T} \rightarrow 0$, 于是 $I_D \approx I_R$, 即反向电流是一个不随外加电压变化的常数; 图中 BE 段是反向击穿状态, 当反向电压增大到一定数值时, 反向电流突然急剧增大, 此时的电压称为击穿电压 U_B 。二极管短时击穿, 还有可能恢复性能, 但如果击穿时间长、电流大而导致热击穿将造成二极管永久性破坏, 这时二极管表现为开路或短路。

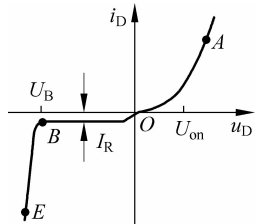


图 3-8 二极管的伏安特性

2. 二极管的主要参数

元件参数是对元件性能的定量描述, 也是选择元件的依据, 下面给出二极管的主要参数。

1) 最大正向电流 I_{FM}

I_{FM} 是二极管长期工作允许通过的最大正向平均电流。其大小取决于 PN 结的面积、材料和散热条件。工作时不要超过 I_{FM} 值, 以免 PN 结因过热而烧毁。

2) 最大反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 是允许加在二极管上的最大反向电压, 约为击穿电压的一半。

3) 反向电流 I_R

I_R 是管子还未击穿时的反向电流。 I_R 越小, 管子的单向导电性能越好。常温下, 锗管的反向饱和电流约为几十微安, 硅管的反向饱和电流小于 $1\mu\text{A}$ 。

4) 最高工作频率 f_M

PN 结内的正负离子随着外加电压的变化而变化, 说明 PN 结具有电容特性。 f_M 值主要取决于 PN 结的结电容, 结电容越大, 二极管允许的最高工作频率越低。

3. 理想二极管的伏安特性

在电路计算中, 如果二极管的开启电压 U_{on} 和正向管压降远小于和它串联的其他元件上的电压、反向电流远小于和它并联的其他支路的电流, 则二极管可以用理想二极管来等效。理想二极管的伏安特性如图 3-9 所示, 正偏时, 二极管管压降为零, 相当于短路; 反偏时, 反向电流为零, 二极管相当于开路。

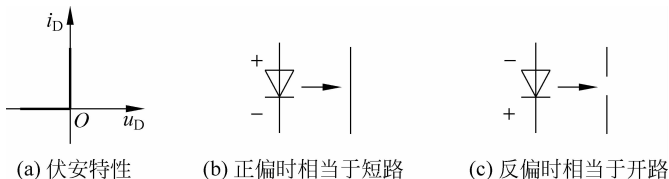


图 3-9 理想二极管的伏安特性及等效电路

4. 二极管应用举例

普通二极管可用作整流、检波、限幅、钳位以及数字电路中的开关电路等。

1) 单相半波整流电路

图 3-10(a)所示为纯电阻负载的单相半波整流电路。图中 T_r 为电源变压器,它的作用是将交流电网电压 u_1 变成整流电路所要求大小的交流电压 u_2 ; D 为整流二极管, R_L 代表负载电阻。设变压器副边电压 $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$, 当 u_2 为正半周时, 二极管导通, 电流经过二极管流向负载; 当 u_2 为负半周时, 二极管截止, 整流波形如图 3-10(b)所示。由于这种电路只有半个周期二极管导通有电流流过负载, 故称为单相半波整流电路。

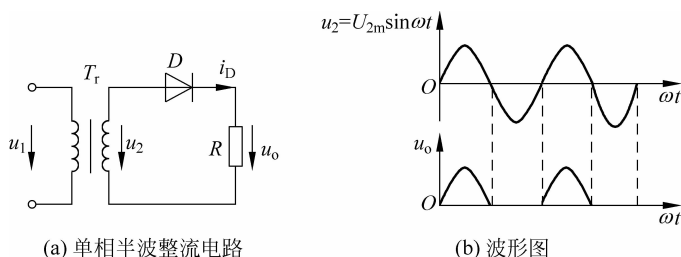


图 3-10 单相半波整流

2) 限幅电路

所谓限幅是指输出电压的幅度受到规定电压的限制, 这个规定的电压称做限幅电压或参考电压。图 3-11(a)所示是一个二极管限幅电路, U_R 为限幅电压。在实际应用中, 通常把二极管看作理想的, 对于图 3-11 中(a)的电路, 当 $u_i > U_R$ 时, 二极管正偏导通并看作短路, 输出电压 $u_o = U_R$; 当 $u_i \leq U_R$ 时, 二极管反偏截止作开路处理, 即 $u_o = u_i$ 。输出电压 u_o 的波形如图 3-11(b)所示。显然 U_R 的大小和极性改变时, 输出电压波形也要改变。

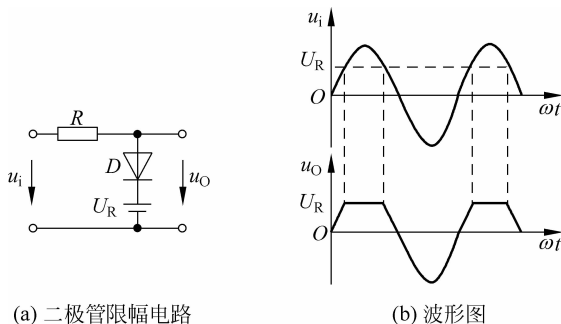


图 3-11 限幅

3.1.4 稳压二极管

稳压二极管简称稳压管, 稳压管工作在反向击穿状态, 当其反向电流值在一定范围内时, 管子的反向击穿是可以恢复的。图 3-12(a)所示是稳压管的符号和伏安特性曲线, 利用

反向击穿时电流变化量 ΔI_Z 很大,而管子两端电压的变化量 ΔU_Z 却很小的特点,在电路中达到稳压目的。稳压管的主要参数如下所述。

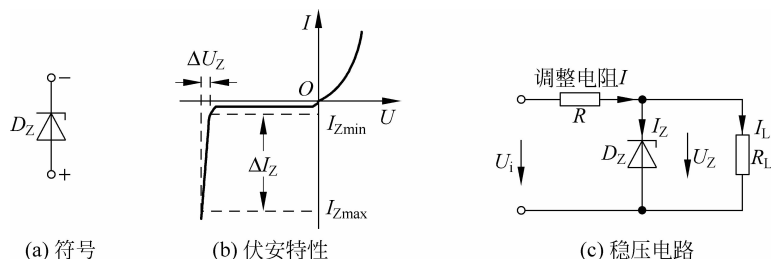


图 3-12 稳压二极管

1. 稳定电压 U_Z

U_Z 是稳压管反向击穿时两端的实际电压。这一参数随工作电流和温度的不同略有改变且分散性大。例如,2CW14 的 U_Z 为 $6 \sim 7.5\text{V}$,是指该型号的管子稳压分别有 6V 、 7V 、 7.5V 等多种电压。

2. 稳定电流 I_Z

I_Z 是稳压管正常工作时电流的参考值,该值应选在 $I_{Z\min} \sim I_{Z\max}$ 之间。电流低于 $I_{Z\min}$,不起稳压作用;高于 $I_{Z\max}$,管子将被烧毁。

3. 动态电阻 r_Z

$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$, r_Z 越小,稳压效果越好。同一稳压管, r_Z 随工作电流的增加而减小。一般手册上给出的 r_Z 值是在规定的稳定电流下得到的。

图 3-12(c)所示为稳压管稳压电路,稳压电路的输入电压 U_i 通常是滤波后的直流脉动电压,稳压电路的输出电压是稳压管的稳定电压 U_Z 。稳压过程是:

$$R_L \text{ 不变}, U_i \uparrow \longrightarrow U_Z \uparrow \longrightarrow I_Z \uparrow \uparrow \longrightarrow I \uparrow = I_Z + I_L \longrightarrow U_Z \downarrow = U_i - IR$$

$$U_i \text{ 不变}, R_L \downarrow \longrightarrow U_Z \downarrow \longrightarrow I_Z \downarrow \downarrow \longrightarrow I \downarrow = I_Z + I_L \longrightarrow U_Z \uparrow = U_i - IR$$

$$R_L \text{ 不变}, U_i \downarrow \text{ 引起输出电压 } U_Z \downarrow, \text{ 通过类似的过程保持 } U_Z \text{ 稳定。}$$

由此可见,图 3-12 中的稳压管在击穿后将电压的微小变化转换成电流的明显变化,起着电流调节作用;调整电阻 R 把电流的变化又转换成电压的变化,起着电压调节作用,两者相互配合共同使输出电压 U_Z 稳定不变。另外, R 还起到限制电流不致过大而损坏稳压管。 R 的选择应保证稳压管电流始终在稳压区,即 $I_{Z\min} \leq I_Z \leq I_{Z\max}$ 。选择稳压管的参考是:

$$U_Z = U_O, \quad U_i = (2 \sim 3)U_O, \quad I_{Z\max} = (1.5 \sim 3)I_{O\max}$$

除了上述普通二极管和稳压二极管外,在数字钟、计算机和数字化仪表的数字显示中经常用到发光二极管或用发光二极管组成的数码管。发光二极管是在半导体中掺入了 III~V 族化合物,使二极管导通时在电子与空穴复合的晶格上辐射出一粒光子。例如,砷化镓

(GaAs)半导体复合时发出红外光谱,磷化镓(GaP)半导体的辐射在光谱的绿区内,磷砷化镓(GaAsP)注入锌杂质则发出红外到黄光之间的各种颜色。由于普通二极管发射光的波长不在可见光谱内,故不能做成发光二极管。

3.2 半导体三极管——晶体管

半导体三极管又称为双极型晶体管,简称晶体管。晶体管的突出特点是在一定的电压条件下具有电流放大作用。

3.2.1 晶体管的基本结构及符号

图 3-13 所示是晶体管结构示意图、符号及外形图。晶体管有三个区(发射区、基区和集电区);从三个区分别引出三个电极(发射极 E、基极 B 和集电极 C)。三个区按照 NPN 或 PNP 排列形成两个 PN 结,基区与发射区间的 PN 结称为发射结(J_E),基区与集电区间的 PN 结称为集电结(J_C)。晶体管符号中的箭头表示发射结正偏时电流的方向。箭头指向管外的为 NPN 管,箭头指向管内的为 PNP 管。

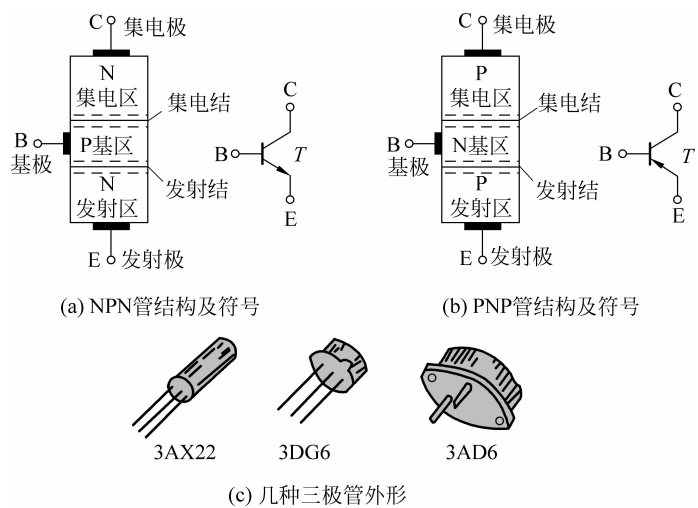


图 3-13 三极管

晶体管的电流放大作用源于内因是根本、外因是条件。晶体管的内部结构具有以下特点:

- (1) 发射区重掺杂,有大量载流子蓄势待发。
- (2) 基区很薄且轻掺杂,有利于发射区的载流子穿过基区到达集电区且复合少。
- (3) 集电区轻掺杂,但面积大,以保证尽可能多地收集载流子。

NPN 管和 PNP 管在工作原理上没有什么区别,只是工作时外加电压极性和各极电流方向彼此相反。因此,这里只分析 NPN 管的工作原理、特性曲线和参数。

3.2.2 晶体管的电流放大过程

发射结正偏、集电结反偏是晶体管电流放大的外部条件。将 NPN 型晶体管连接成如图 3-14 所示的共射极放大电路,它以发射极接地、基极作为输入回路、集电极作为输出回路。基极电源 U_{BB} 通过电阻 R_B 提供给发射结正向电压,发射极电源 U_{CC} 通过电阻 R_C 加到集电极,由于 $U_{CC} > U_{BB}$,可以保证发射结正偏、集电结反偏。

1. 发射

发射结正偏有利于多子的扩散。在发射区的多子——电子扩散到基区的同时,基区的多子——空穴也向发射区扩散。由于发射区是重掺杂,所以发射区扩散到基区的电子数量远大于基区向发射区扩散的空穴数量。在发射区向基区注入电子的同时,电源 U_{BB} 和 U_{CC} 不断地向发射区补充电子,因而形成了发射极电流 I_E 。

2. 复合和扩散

发射到基区的电子仅有少量与基区的空穴复合外,大部分扩散到集电结边缘。基区复合的空穴由基极电源 U_{BB} 补充,形成了基极电流 I_B 的主要部分 I_{BE} 。

3. 收集

集电结反偏有利于少子漂移。发射区扩散到基区的电子在集电结反偏条件下,越过集电结到达集电极,形成流入集电极电流 I_C 的主要部分 I_{CE} 。另外,集电区的少子也要漂移到基区,形成反向电流 I_{CBO} , I_{CBO} 与发射区无关,只在集电极和基极回路一边流通,但它受温度影响很大,使管子工作不稳定,所以在选择和使用管子时, I_{CBO} 越小越好。

只要外加电压在一定范围内变化,由掺杂浓度决定的 I_C 和 I_B 的比值将维持不变,改变 I_B 就可以几十或上百倍地改变 I_C 的大小,从而实现电流放大作用。

NPN 型晶体管的载流子运动规律和内部电流分配如图 3-14 和图 3-15 所示,各级电流之间满足基尔霍夫电流定律。

$$I_B + I_C - I_E = 0 \quad (3-2)$$

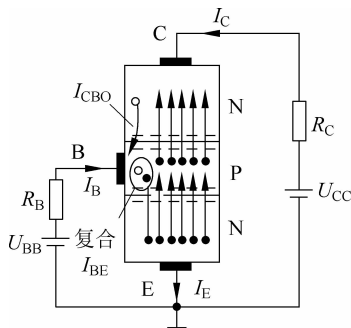


图 3-14 NPN 型晶体管载流子运动规律

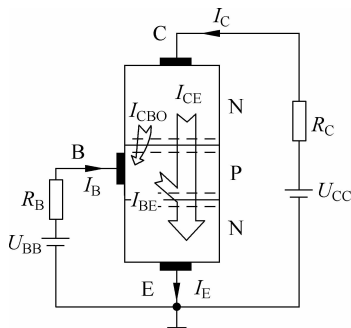


图 3-15 电流分配关系

$$\left. \begin{aligned} I_B &= I_{BE} - I_{CBO} \\ I_C &= I_{CE} + I_{CBO} \\ I_E &= I_{BE} + I_{CE} \end{aligned} \right\} \quad (3-3)$$

3.2.3 晶体管的伏安特性

晶体管的伏安特性可以通过图 3-16 所示的电路测量。

1. 输入特性

以 U_{CE} 为某一常数, 输入回路的电流 I_B 与电压 U_{BE} 之间的关系曲线称为输入特性, 如图 3-17 所示, 图中给出了两条曲线:

(1) 当 $U_{CE}=0$ 、 $U_{BE}>U_{on}$ 时, 发射结正偏产生基极电流 I_B 、集电结零偏使集电极不能收集电子。

(2) 当 $U_{CE}\geq 1V$ 、 $U_{BE}>U_{on}$ 时, 发射结正偏产生基极电流 I_B 、集电结反偏使集电极收集电子。在相同的 U_{BE} 下, 因集电极收集电子而使 I_B 减小了, 输入特性右移了。继续加大 U_{CE} , 输入特性曲线基本重合。这是因为 $U_{CE}\geq 1V$ 以后, 只要 U_{BE} 一定, 从发射区注入到基区的电子数量就一定, 而集电结所加的 1V 反向电压足以把这些电子中的绝大部分收集到集电区, 以至于 U_{CE} 再加大, I_B 也不再明显减小。所以, 通常在器件手册中只画出 $U_{CE}=1V$ 的一条输入特性曲线。

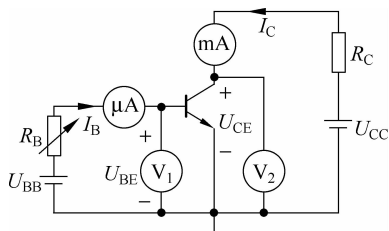


图 3-16 晶体管共射极伏安特性测试电路

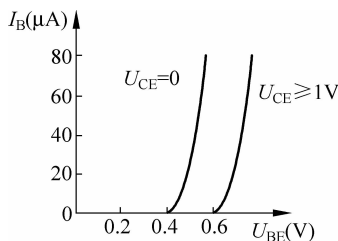


图 3-17 晶体管的输入特性

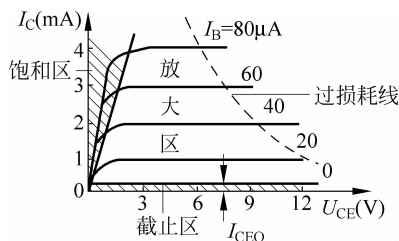


图 3-18 晶体管的输出特性

2. 输出特性

以 I_B 为某一常数, 输出回路中的电流 I_C 与电压 U_{CE} 之间的关系曲线称为输出特性。固定一个 I_B 得到一条输出特性曲线, 改变 I_B 得到一族输出特性曲线, 如图 3-18 所示。在输出特性上可划分为三个区域(截止区、放大区和饱和区)。

1) 截止区

发射结处于反偏时晶体管截止, 一般把 $I_B=0$ 那条曲线以下的区域称为截止区。严格地讲, 此时晶体管并未完全截止, 仍有一个 CE 间的穿透电流 I_{CEO} , 一般硅管 $I_{CEO}<1\mu A$, 锗管 I_{CEO} 约几十至几百毫安。工作在截止区的晶体管 CE 极间起到电路开关的“断开”作用。