

# 第 1 章 半导体器件基础

半导体器件是组成电子电路的核心元件，半导体二极管、三极管和场效应管是最基本的半导体器件。本章在简介半导体基础知识的基础上，着重介绍半导体二极管、三极管、场效应管的外部特性和半导体二极管的基本应用电路及分析方法。除了特别必要之处外，普遍淡化了器件内部物理机理的讲解。

## 1.1 半导体基础知识

半导体 (Semiconductor) 是制作半导体器件的主要材料，其导电能力介于导体和绝缘体之间。目前最常用的半导体材料是硅 (Si) 和锗 (Ge)，它们均为四价元素。

半导体具有热敏特性、光敏特性和掺杂特性三个重要特性，其导电能力会随着温度、光照的变化或掺入杂质浓度的多少而发生显著改变。

### 1.1.1 本征半导体

纯净的具有单晶体结构的半导体称为本征半导体，它不含任何杂质，且原子在内部按一定规律整齐地排列成晶体结构。以硅为例，将纯净的硅材料经过一定的工艺过程制成硅单晶后，即为本征半导体。硅原子在空间排列成整齐的点阵，称为晶格，位于晶格上的硅原子是不能移动的。每个硅原子的最外层都有四个价电子，与周围相邻的四个硅原子中的价电子共形成四个共用电子对，从而构成四个共价键。共价键具有很强的结合力，最终形成的晶体是一个四面体结构，如图 1-1(a)所示，其他诸如锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 等很多种半导体材料都具有与之相同的四面体结构。图 1-1(b)为五个硅原子形成的共价键的二维结构示意图。

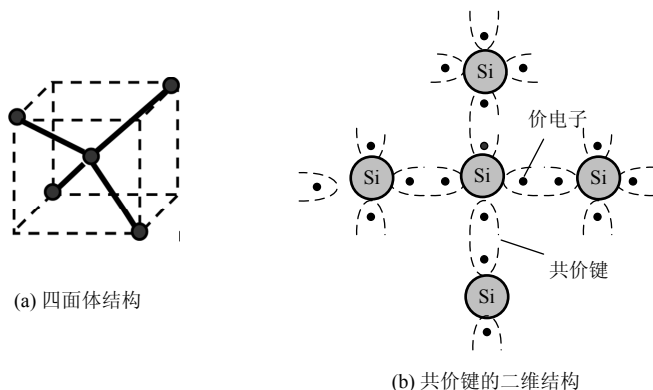


图 1-1 单晶硅中的硅原子

常温下，仅有极少数的价电子由于热运动 (热激发) 获得足够的能量而挣脱共价键的束缚变为自由电子，与此同时在失去电子的共价键中留下一个空位置，称为空穴。原子因失掉

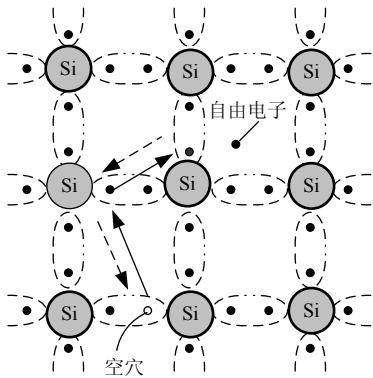


图 1-2 本征半导体中的两种载流子

一个价电子而带正电，也可以说空穴带正电。当一个具有一定热能的自由电子靠近某个空穴时，便会填补到该空穴中，如图 1-2 所示（实线箭头代表价电子的填补轨迹，虚线箭头代表空穴的运动轨迹），看起来就像是一个正电荷在半导体中随机移动一样。这样，若在本征半导体两端外加一电场，就有两种类型的电荷粒子能够产生电流，即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。

在电子学中，运载电荷的粒子称为载流子。因此，半导体中存在自由电子和空穴两种载流子，这是半导体导电的特殊性质。上述由热激发产生自由电子-空穴对的过程称为本征激发，本征激发中自由电子和空穴成对产生，两者数目相等。而当自由电子和空穴在运动中相遇时，自由电子又会填补空穴，两者同时消失，这种现象称为复合。当温度一定时，本征半导体中的激发和复合达到动态平衡，于是载流子的浓度保持恒定，且自由电子的浓度与空穴的浓度相等。如果温度升高，则热激发加剧，使得载流子浓度升高，导电能力增强；如果温度降低，则热激发减弱，使得载流子浓度下降，导电能力变差。

### 1.1.2 杂质半导体

常温下，本征半导体中的自由电子和空穴的浓度非常低，导电能力很弱。若利用掺杂工艺在本征半导体中掺入少量杂质元素，就可以使一种载流子的浓度远大于另一种，此时的半导体称为杂质半导体，其导电性能远好于本征半导体，如图 1-3 所示。

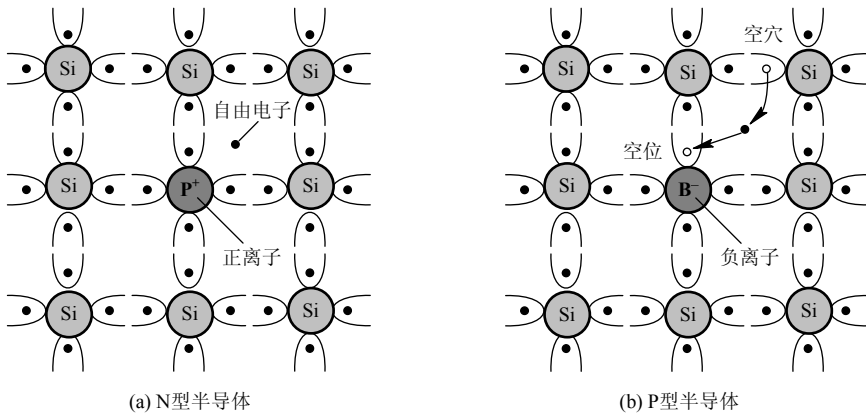


图 1-3 杂质半导体中的多子和少子

图 1-3(a)中，在硅单晶中掺入少量五价杂质元素磷后，磷原子将取代晶格中硅原子的位置。由于磷原子的最外层有五个价电子，除了与周围四个硅原子形成共价键外，多余的那个价电子很容易因热激发而成为自由电子，磷原子则成为不能移动的正离子，于是自由电子浓度高于空穴，从而形成 N 型半导体。反之，若在硅单晶中掺入三价杂质元素（例如硼），则空穴浓度将远高于自由电子，从而形成 P 型半导体，如图 1-3(b)所示。通常浓度高的载流子称为多数载流子，简称多子；浓度低的载流子称为少数载流子，简称少子。因此 N 型半导体中的多

子是自由电子，少子是空穴；而 P 型半导体中的多子是空穴，少子是自由电子。应当指出，无论 P 型半导体还是 N 型半导体，其对外总是呈电中性的。

杂质半导体主要靠多子导电，多子浓度约等于所掺入的杂质原子的浓度，掺杂浓度越高，意味着多子浓度越高，导电能力越强。而少子是热激发产生的，所以尽管少子浓度很低，却对温度非常敏感，这将影响半导体器件的性能。

### 1.1.3 PN 结

将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上，在它们的交界面将形成 PN 结。PN 结是半导体器件的核心，是各种电子电路的功能得以实现的基础。

如图 1-4(a)所示，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面，P 型半导体中的多子空穴和 N 型半导体中的多子自由电子都会因浓度差而向对方区域扩散，并在交界面附近因相遇而复合，于是在交界面两侧就出现了由不能移动的正、负杂质离子构成的空间电荷区，也就是 PN 结。空间电荷区会产生一个由 N 区指向 P 区的内电场，随着多子扩散运动的进行，空间电荷区逐渐变宽，内电场逐渐增强，这将削弱多子的扩散运动，同时增强少子在内电场作用下的定向移动即漂移运动。当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，空间电荷区的宽度便稳定下来，PN 结上的结电流为零。

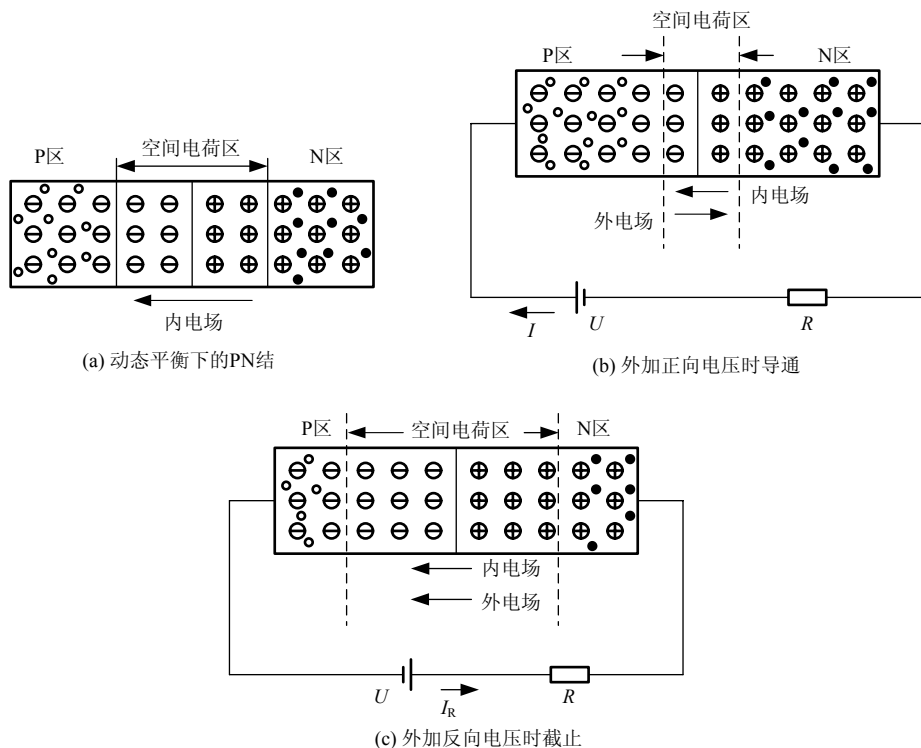


图 1-4 PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端外加电压，则上述平衡状态被打破，且当外加电压极性不同时，PN 结呈现出截然不同的导电特性，即单向导电性。单向导电性是 PN 结最重要的特性，正是因为这一特性，才使 PN 结成为半导体器件最基本的组成部分。

### 1. 外加正向电压时导通

如图 1-4(b)所示, 当 P 区接高电位、N 区接低电位时, 称 PN 结外加正向电压或 PN 结正向偏置。由于外电场方向与内电场方向相反, 使得内电场被大大削弱, 空间电荷区变得极窄, 于是多子的扩散运动占优, 从宏观上看, 就是回路中形成较大的正向电流, PN 结导通。注意, 由于 PN 结导通时的结压降只有零点几伏, 因此必须在回路中串联限流电阻  $R$ , 以限制回路电流, 防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

### 2. 外加反向电压时截止

如图 1-4(c)所示, 当 P 区接低电位、N 区接高电位时, 称 PN 结外加反向电压或 PN 结反向偏置。此时外电场方向与内电场方向相同, 使得内电场增强, 空间电荷区变宽, 因而少子的漂移运动占优, 但由于少子的数目极少, 形成的反向电流非常小且数值几乎恒定, 故又称反向饱和电流。近似分析时, 反向饱和电流的数值可忽略不计, 因此认为 PN 结截止。

## 1.2 半导体二极管

将 PN 结封装起来并加上电极引线, 就可构成半导体二极管, 简称二极管 (Diode)。二极管的结构和电路符号如图 1-5 所示, P 区引出的电极称为阳极 (或正极), N 区引出的电极称为阴极 (或负极)。本节主要介绍普通二极管的外部特性及其应用电路的分析方法, 最后简单介绍稳压二极管、发光二极管和光电二极管等特殊二极管。

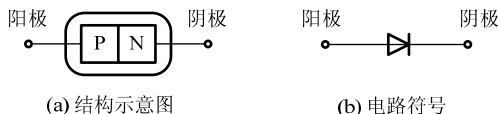


图 1-5 二极管的结构示意图和电路符号

### 1.2.1 二极管的伏安特性与主要参数

根据半导体理论分析, 二极管的端电压  $u$  和端电流  $i$  之间的函数关系 (伏安特性) 可近似描述为

$$i = I_S \left( e^{\frac{u}{U_T}} - 1 \right) \quad (1-1)$$

式中,  $I_S$  为二极管的反向饱和电流, 常温下  $I_S$  数值很小, 硅二极管的  $I_S$  小于  $0.1\mu\text{A}$ , 锗二极管的  $I_S$  小于几十  $\mu\text{A}$ ;  $U_T$  为温度的电压当量, 常温下  $U_T \approx 26\text{mV}$ 。由式 (1-1) 可知, 当二极管为正向偏置且  $u \gg U_T$  [在电子电路中, 若同一量纲的两个物理量  $A_1$ 、 $A_2$  满足  $A_1 > (5 \sim 10) A_2$ , 则认为  $A_1 \gg A_2$ ]

时,  $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$ , 即  $i$  随  $u$  按指数规律变化; 当二极管为反向偏置且  $|u| \gg U_T$  时,  $i \approx -I_S$ , 即  $i$  的大小与  $u$  几乎无关。

二极管的伏安特性曲线如图 1-6 所示。

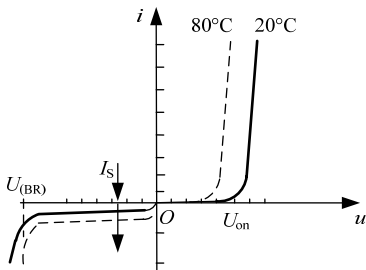


图 1-6 二极管的伏安特性

由图 1-6 可见, 与 PN 结一样, 二极管具有单向导电性, 且  $i \sim u$  关系是非线性的。在正向特性部分, 只有当  $u > U_{on}$  后,  $i$  才开始急剧增大, 二极管真正导通, 故将  $U_{on}$  称为导通电压; 近似分析时通常认为导通后的管压降基本保持在  $U_{on}$ , 硅二极管约 0.7V, 锗二极管约 0.3V。在反向特性部分, 当反向电压未达到  $U_{(BR)}$  时,  $i \approx I_S \approx 0$ , 二极管截止; 一旦反向电压达到或超过  $U_{(BR)}$ , 反向电流将急剧增大, 二极管反向击穿, 故称  $U_{(BR)}$  为反向击穿电压。

除  $U_{on}$ 、 $I_S$  和  $U_{(BR)}$  外, 二极管的其他参数还包括最大整流电流  $I_F$  和最大反向工作电压  $U_R$ 。 $I_F$  是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流, 实际工作时二极管的正向平均电流不应超过此值, 否则将导致管子因过热而损坏;  $U_R$  是指二极管正常工作时允许外加的最大反向电压, 一般规定为击穿电压  $U_{(BR)}$  的一半, 超过此值则二极管有可能反向击穿甚至损坏。

## 1.2.2 温度对二极管伏安特性的影响

作为半导体器件, 二极管对温度非常敏感。当温度升高时, 正向特性曲线将左移, 反向特性曲线将下移 (如图 1-6 中虚线所示)。在室温附近, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 正向压降  $U_{on}$  约减小  $2 \sim 2.5\text{mV}$ ; 温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 反向饱和电流  $I_S$  约增大 1 倍。

## 1.2.3 二极管的基本应用与电路分析方法

二极管的应用大多数基于其单向导电性即直流特性, 所以这里首先讨论限幅电路和逻辑门电路, 并由此得到二极管电路的一般分析方法, 最后讨论二极管的交流特性应用。

### 1. 基于单向导电性的二极管电路应用实例

二极管限幅电路如图 1-7(a) 所示。假设二极管的导通电压为 0.7V, 输入电压  $u_1$  为正弦波, 且  $u_1 = 5\sin\omega t$  (V)。当  $u_1 > 2.7\text{V}$  时,  $D_1$  导通,  $D_2$  截止, 输出电压  $u_o = 2.7\text{V}$ ; 当  $u_1 < -0.7\text{V}$  时, 情况正好相反,  $D_2$  导通,  $D_1$  截止, 输出电压  $u_o = -0.7\text{V}$ ; 而当  $-0.7\text{V} < u_1 < 2.7\text{V}$  时,  $D_1$ 、 $D_2$  均截止, 因此输出电压  $u_o = u_1$ 。输入、输出波形如图 1-7(b) 所示, 利用 Multisim 软件进行仿真, 可以方便地观察到这些波形。由图 1-7(b) 可见, 输出电压的幅值始终被限制在  $-0.7 \sim +2.7\text{V}$  之间, 故称限幅电路。形象地看, 限幅相当于把  $u_1$  超出  $+2.7\text{V}$  或  $-0.7\text{V}$  的部分削去, 所以限幅电路又称削波电路。图 1-7(b) 所示为双向限幅, 此外还有上限幅或下限幅等单向限幅。

二极管限幅电路常用作输入、输出保护电路。

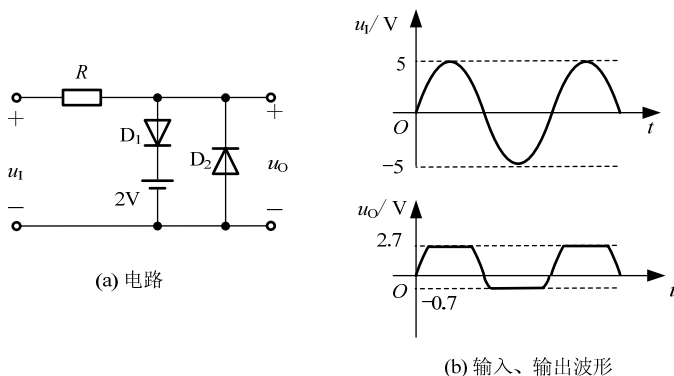


图 1-7 二极管限幅电路

二极管逻辑门电路如图 1-8(a)所示,这类电路常用于数字电路。假设  $D_1$ 、 $D_2$  为理想二极管,即导通时的正向压降为零,截止时的反向电流为零;输入电压  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  只有两种可能,不是 0V 就是 5V。当  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  均为 0V 时,  $D_1$ 、 $D_2$  同时导通,输出电压  $u_o = 0V$ ; 当  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  中有一个为 5V、另一个为 0V 时,输入端和 0V 相连的二极管优先导通,将  $u_o$  钳制在 0V,从而使得输入端与 5V 相连的二极管因反向偏置而截止;当  $u_{i1}$ 、 $u_{i2}$  均为 5V 时,  $D_1$ 、 $D_2$  同时导通,  $u_o = 5V$ 。将上述分析结果列于表 1-1 可见,若规定 0V 为低电平(电位也称电平),5V 为高电平,则只有当全部输入为高电平时,输出才是高电平;而只要至少有一个输入为低电平,输出就是低电平。这种逻辑关系在数字电路中称为“与逻辑”,图 1-8(a)所示电路称为与门电路。图 1-8(b)给出了与门电路一种可能的输入、输出波形关系,利用 Multisim 软件可以进行仿真验证。

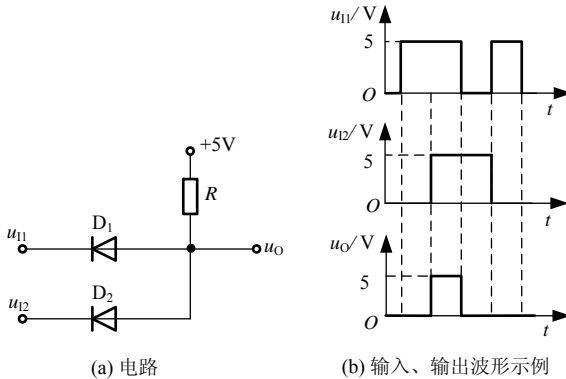


图 1-8 二极管与门电路

表 1-1 输入、输出对应关系及二极管的工作状态

$u_{i1}$	$u_{i2}$	$u_o$	$D_1$ 状态	$D_2$ 状态
0V	0V	0V	导通	导通
0V	5V	0V	导通	截止
5V	0V	0V	截止	导通
5V	5V	5V	截止	截止

## 2. 二极管电路的一般分析方法

在上述两例中,均假设二极管导通时的正向压降为  $U_{on}$  (理想情况下为零),截止时的反向电流为零,从而使得计算过程大为简化。可见,对这类二极管电路进行分析时,首先应正确判断二极管的工作状态,然后再综合得到电路功能。

二极管工作状态的一般判断方法是:断开二极管,求解其端口电压;若该电压使二极管正偏,则导通;若反偏,则截止。当电路中有两只或两只以上二极管时,可分别应用该方法判断每只二极管的工作状态。需要注意的是,当多只二极管的阳极相连(共阳极接法)时,阴极电位最低的管子将优先导通,图 1-8(a)就是这种情况;同理,当多只二极管的阴极相连(共阴极接法)时,阳极电位最高的管子将优先导通。

**例 1-1** 二极管电路如图 1-9 所示,设  $D_1$ 、 $D_2$  的导通电压均为 0.7V,试求当  $u_i$  分别为 0V、4V 和 8V 时  $u_o$  的值。

解 当  $u_1$  为 0V 时, 断开  $D_1$ 、 $D_2$ , 两管的阴极电位均为 -6V, 阳极电位分别为 0V 和 6V, 故  $D_2$  优先导通, 使得 A 点电位为

$$u_A = 6 - \frac{6 - (-6) - 0.7}{R_1 + R_2} \times R_2 - 0.7 = 6 - \frac{12 - 0.7}{5 + 5} \times 5 - 0.7 = -0.35V$$

由于  $D_1$  的导通电压为 0.7V, 故  $D_1$  截止, 输出电压为

$$u_o = u_A + 0.7 = -0.35 + 0.7 = 0.35V$$

当  $u_1$  为 4V 时, 断开  $D_1$ 、 $D_2$ , 同理可知  $D_2$  仍将优先导通,  $u_A = -0.35V$ 。但因为此时  $u_1 = 4V$ , 使得  $D_1$  正向导通, 所以  $u_A$  的实际数值为 3.3V, 输出电压为

$$u_o = 4 - 0.7 + 0.7 = 4V$$

当  $u_1$  为 8V 时, 断开  $D_1$ 、 $D_2$ , 则  $D_1$  优先导通, 并将 A 点电位钳制在 7.3V, 于是  $D_2$  反向截止, 输出电压  $u_o = 6V$ 。

### 3. 二极管的交流特性应用

到目前为止, 只考虑了二极管 (PN 结) 的直流特性, 也可称之为大信号分析。当带有 PN 结的半导体器件应用于线性放大电路时, PN 结交流特性的重要性就凸显出来。在这种情况下, 交流小信号 (与直流信号相比非常小) 将叠加在直流电流和直流电压之上, 故称之为小信号分析。

以图 1-10(a) 所示电路为例, 假设输入的正弦交流信号源  $u_1$  的幅值与直流电源  $E$  相比非常小。由于该电路为交直流混合电路, 因此对它的分析相应地分为直流分析和交流分析。为了便于区分, 此处特别说明本书所采用的符号规则: 若某变量为直流量, 则该变量及其下标均用大写字母表示; 若为交流量, 则该变量及其下标均用小写字母表示, 若需要表示该交流量的有效值, 则变量本身为大写字母, 下标为小写字母; 若某变量为直流量和交流量的叠加即瞬时量, 则该变量本身为小写字母, 下标为大写字母。以输出电压为例,  $U_o$  表示输出直流电压,  $u_o$  表示输出交流电压,  $U_o$  表示输出交流电压  $u_o$  的有效值,  $u_o$  表示输出瞬时电压即直流电压和交流电压的叠加值。

下面首先对图 1-10(a) 进行直流分析, 仅考虑直流电源  $E$  的作用 (令  $u_1 = 0$ ), 此时二极管上的端电压和端电流均为直流量, 分别表示为  $U_D$  和  $I_D$ , 合称二极管的静态工作点  $Q$  (Quiescent), 两者的比值定义为直流电阻  $R_D$ , 即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-2)$$

再进行交流分析, 直流电源  $E$  和交流信号源  $u_1$  共同作用。此时, 二极管的端电压和端电流将在静态值  $U_D$ 、 $I_D$  的基础上随输入信号  $u_1$  做相应变化, 二极管的工作范围就由  $Q$  点扩展到了  $Q' \sim Q''$  之间的一小段曲线, 如图 1-10(b) 所示。图中由  $u_1$  引起的二极管端电压的变化部分即二极管上的交流电压为  $u_d$ , 交流电流为  $i_d$ 。显然, 二极管上总的端电压和端电流应为相应直流量和交流量的叠加, 即  $u_D = U_D + u_d$ ,  $i_D = I_D + i_d$ 。由图可见, 只要  $u_1$  足够小,  $Q' \sim Q''$  之间的一小段曲线就可以用  $Q$  点处的切线来近似, 换言之  $u_d$  与  $i_d$  之间为线性关系, 两者的比值定义为交流电阻  $r_d$ 。可以证明, 交流电阻为

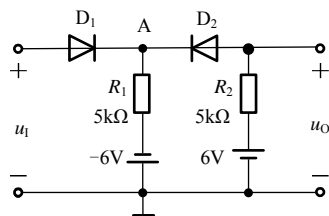


图 1-9 例 1-1 图

$$r_d = \frac{u_d}{i_d} \approx \frac{U_T}{I_D} \quad (1-3)$$

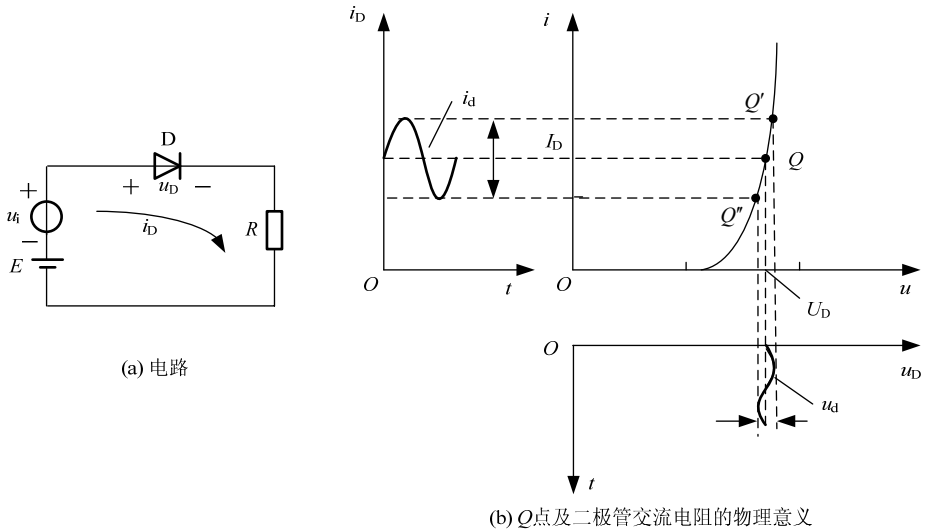


图 1-10 二极管的交流特性

**例 1-2** 二极管电路如图 1-10(a)所示。设  $E=10\text{V}$ ， $u_i=0.1\sin\omega t$  (V)， $R=5\text{k}\Omega$ ，二极管的导通电压为  $0.7\text{V}$ ，试求二极管的直流电流和交流小信号电流。

**解** 令  $u_i=0$ ，得到直流电流所流经的路径（称为直流通路）如图 1-11(a)所示，故二极管上流过的直流电流为

$$I_D = \frac{E - 0.7}{R} = \frac{10 - 0.7}{5} = 1.86\text{mA}$$

再令  $E=0$ ，得到交流电流所流经的路径（称为交流通路）如图 1-11(b)所示，图中的交流电阻  $r_d$  可据式 (1-3) 求出，即

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D} = \frac{26\text{mV}}{1.86\text{mA}} \approx 14\Omega$$

故二极管上的交流电流为

$$i_d = \frac{u_i}{R + r_d} = \frac{0.1\sin\omega t}{5 + 0.014} \approx 0.0199\sin\omega t \text{ (mA)} = 19.9\sin\omega t \text{ (}\mu\text{A)}$$

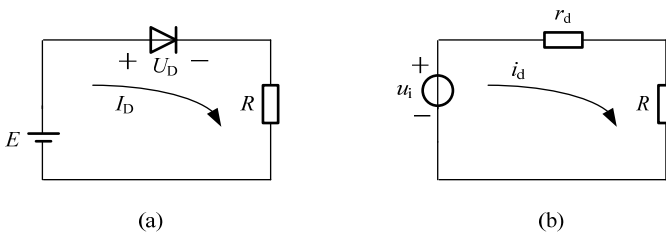


图 1-11 例 1-2 解图



例 1-2 表明, 二极管 (PN 结) 的交流电阻常用于求解二极管电路中叠加在  $Q$  点之上的交流响应。此外, PN 结的交流电阻也常用于构建三极管的小信号模型, 见第 2 章 2.2 节。

### 1.2.4 特殊二极管

根据用途和特点的不同, 二极管共分二十多个种类。这里仅介绍比较常见的稳压二极管、发光二极管和光电二极管等三种特殊二极管。

#### 1. 稳压二极管

稳压二极管又称齐纳二极管, 是利用 PN 结反向击穿后所表现出来的稳压特性制作而成, 其电路符号与伏安特性如图 1-12 所示。当稳压管两端所加的反向电压值超过击穿电压  $U_Z$  时, 稳压管被击穿, 反向电流急剧增大, 但反向电压却基本保持恒定, 因此稳压管工作在反向击穿区时可以起到稳压作用, 稳定电压值就是稳压管的反向击穿电压值  $U_Z$ 。需要注意的是, 为保证稳压管能够正常工作, 必须配以阻值合适的限流电阻, 以便将稳压管的反向击穿电流控制在  $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$  之间。否则, 低于  $I_{Zmin}$  时管子的稳压效果变差, 高于  $I_{Zmax}$  时管子将因过热而损坏。稳压二极管的具体应用参见第 4 章 4.3 节。

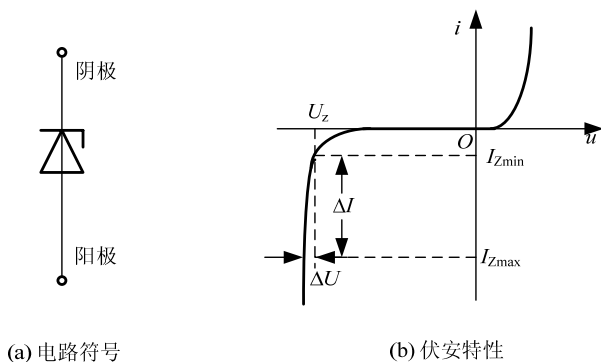


图 1-12 稳压二极管

#### 2. 发光二极管

发光二极管 (LED) 是目前最为流行的显示器件, 常用作指示灯、照明灯、七段数码管、大屏幕矩阵式显示器等, 电路符号如图 1-13(a)所示。发光二极管由砷化镓 (GaAs) 等化合物半导体材料制造而成, 与普通二极管一样具有单向导电性, 但导通电压比普通二极管大 (一般在 1.5V 以上), 当有足够的正向电流 (10~30mA) 通过时便会发光, 这是自由电子与空穴复合而放出能量的结果。发光二极管有多种外形、尺寸和颜色可供选择, 尽管其正向压降及工作电流不尽相同, 但绝大多数情况下都应串接一个限流电阻, 如图 1-13(b)所示。只有限流电阻取值合适, 发光二极管才能正常发光且不损坏。

#### 3. 光电二极管

光电二极管可接收可见光或不可见光, 电路符号和伏安特性如图 1-14 所示。由图 1-14(b)可见, 光电二极管正常工作时应外加反向电压。无光照时, 只有很小的反向饱和电流, 称为暗电流; 有光照时, 光电二极管将因热激发而产生大量的自由电子-空穴对, 并通过外电路形

成较大的反向电流，称为光电流。照度越大，光电流越大，当光电流大于几十微安后，即与照度呈良好的线性关系。光电二极管的上述特性被广泛应用于遥控、报警以及光电传感器中。

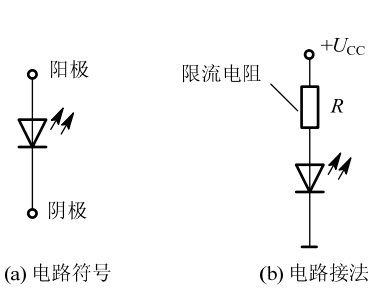


图 1-13 发光二极管

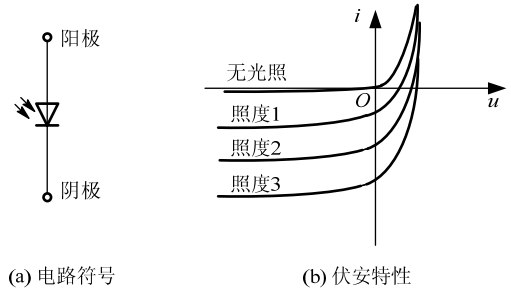


图 1-14 光电二极管

## 1.3 半导体三极管

双极结型晶体管 (Bipolar Junction Transistor, BJT) 因其有自由电子和空穴两种极性的载流子参与导电而得名，又称晶体三极管、晶体管等，以下简称三极管。它的种类很多，按照所用的半导体材料分，有硅管和锗管；按照结构分，有 PNP 管和 NPN 管；按照工作频率分，有低频管和高频管；按照功率分，有小功率管、中功率管和大功率管。

### 1.3.1 三极管的结构与符号

三极管的结构示意图和电路符号参见图 1-15。从内部组成看，三极管可分 NPN 型和 PNP 型两类，前者是两个 N 区之间有一层 P 区，后者是两个 P 区之间有一层 N 区。无论哪一类，均含有两个 PN 结，其中基区与发射区之间的 PN 结称为发射结，基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。从外部引脚看，三极管是一种三端器件，它有三个电极，分别从发射区、基区和集电区引出，称为发射极 e (Emitter)、基极 b (Base) 和集电极 c (Collector)。

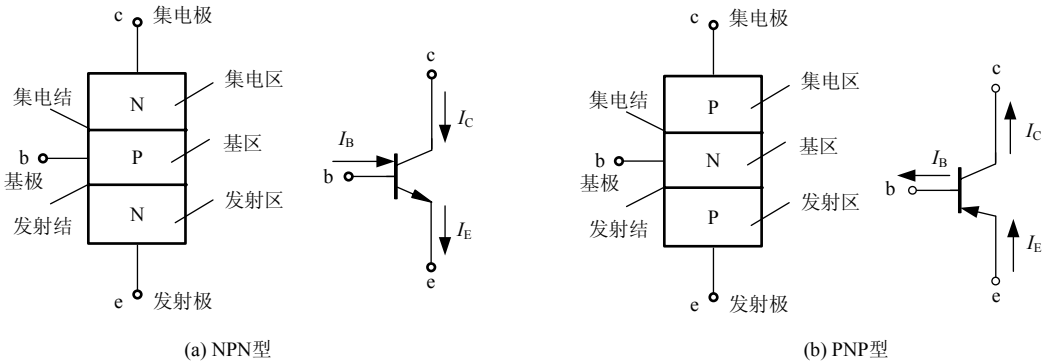


图 1-15 三极管的结构示意图和电路符号

NPN 型和 PNP 型电路符号的区别在于其箭头指向不同。若将三极管视为一个广义节点，NPN 型的箭头指向表示其发射极电流  $I_E$  是“流出”管子的，而基极电流  $I_B$ 、集电极电流  $I_C$  是“流入”管子的；PNP 型则与之相反。无论哪一种三极管，根据基尔霍夫电流方程，均有

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-4)$$

### 1.3.2 三极管的 PN 结偏置

单个 PN 结可以正向偏置也可以反向偏置，而三极管具有两个 PN 结，所以具有四种可能的偏置组合，如表 1-2 所示。通过对三极管的两个 PN 结外加不同的偏置，就可令其工作在不同的状态，从而呈现出完全不同的外部特性。这里重点讨论放大、饱和、截止三种最常见的状态，第 2 章 2.6 节将对倒置状态有所涉及。

表 1-2 三极管不同的工作状态及其外部偏置

工作状态	外部偏置
放大	发射结正偏、集电结反偏
饱和	发射结正偏、集电结正偏
截止	发射结反偏、集电结反偏
倒置	发射结反偏、集电结正偏

### 1.3.3 三极管的放大原理

首先分析放大状态。需要说明的是，三极管的内部并不是电气对称的，其实际结构要比图 1-15 复杂得多，可概括为发射区掺杂浓度很高、基区很薄、集电结面积很大，但图 1-15 的结构示意对于介绍三极管的基本特性还是很有帮助的，所以图 1-16 中以 NPN 型三极管为例，仍使用了这种简化的框图。

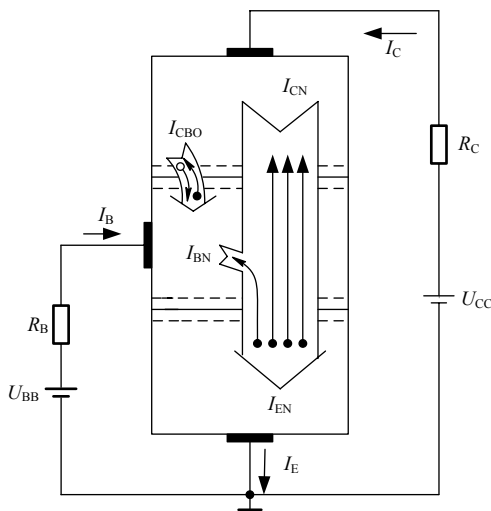


图 1-16 放大状态下三极管内部载流子的传输过程

图 1-16 中，基极-发射极回路称为输入回路，集电极-发射极回路称为输出回路。由于发射极是输入、输出回路的公共电极，所以称该电路为共射连接，又称共射组态； $U_{BB}$  为基极电源， $U_{CC}$  为集电极电源， $U_{CC}$  的数值大于  $U_{BB}$ 。

由图 1-16 可见， $U_{BB}$  使得发射结正向偏置且大于导通电压后，发射区的多子自由电子大量扩散到基区，形成发射区扩散电流  $I_{EN}$ ， $I_{EN}$  约等于外部发射极电流  $I_E$ ；自由电子在穿越基区的过程中会与基区的多子空穴复合掉一小部分，损失的空穴由  $U_{BB}$  源源不断地补充，从而形成基区复合电流  $I_{BN}$ ，该电流约等于外部基极电流  $I_B$ ；由于  $U_{CC}$  的数值大于  $U_{BB}$ ，集电结反

偏,可将上述穿过基区到达集电结边界的自由电子充分地加以收集,形成集电区漂移电流  $I_{CN}$ , 该电流约等于外部的集电极电流  $I_C$ 。

从以上分析可见,三极管发射区的高掺杂有利于电子发射,基区很薄有利于电子穿越,集电结面积大则有利于电子收集。在放大状态下,对于一只给定的三极管,基区每复合掉一个自由电子,就有  $\beta$  个自由电子被集电区收集,因此

$$\beta = \frac{I_{CN}}{I_{BN}} \approx \frac{I_C}{I_B} \quad (1-5)$$

式(1-5)中的  $\beta$  称为共射电流放大系数,它是三极管的一个重要参数,对于一只给定的三极管,通常将  $\beta$  值视为恒定。小功率管的  $\beta$  较大,有的可达三四百倍;大功率管的  $\beta$  较小,有的甚至只有三四十倍。式(1-5)的另一种表述是

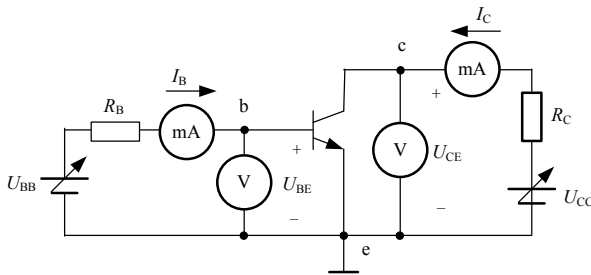
$$I_C \approx \beta I_B \quad (1-6)$$

也就是说,  $U_{BB}$  只需向输入回路提供较小的电流  $I_B$ , 便可使  $U_{CC}$  向输出回路提供较大的电流  $I_C$ , 从而实现近似线性的电流放大。这正是三极管的放大原理。

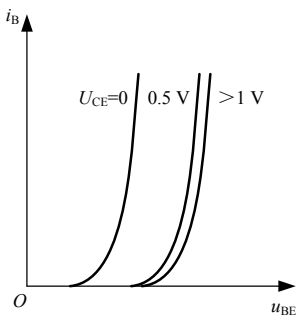
### 1.3.4 三极管的伏安特性与主要参数

除放大状态外,三极管有时还工作在饱和或者截止状态。以上三种状态都可以通过三极管的伏安特性来反映,伏安特性是研究三极管外部特性的重要依据。

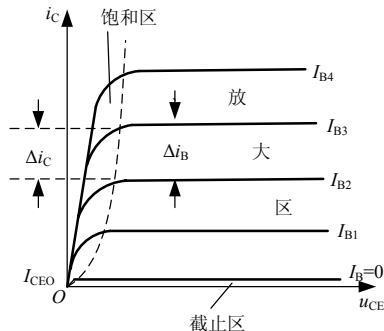
小功率 NPN 型三极管的伏安特性测试电路如图 1-17(a)所示,该图与图 1-16 所示的电路连接完全相同,只是用 NPN 管的电路符号取代了其内部结构框图,并增加了四只测试仪表,分别用于测试三极管的输入电压  $U_{BE}$ 、输入电流  $I_B$ 、输出电压(管压降)  $U_{CE}$  以及输出电流  $I_C$ 。



(a) 共射测试电路



(b) 输入特性



(c) 输出特性

图 1-17 小功率 NPN 型三极管的共射测试电路和伏安特性

## 1. 输入特性

三极管的输入特性是指在管压降  $U_{CE}$  一定的情况下, 基极电流  $i_B$  与发射结电压  $u_{BE}$  之间的函数关系, 即

$$i_B = f(u_{BE}) \Big|_{U_{CE} = \text{常数}} \quad (1-7)$$

如图 1-17(b)所示, 对应于不同的  $U_{CE}$ , 将得到一族曲线。当  $U_{CE} = 0$  时, 由于发射结和集电结实际上为并联连接, 因此曲线形状与二极管的正向特性类似, 只要发射结正向压降  $U_{BE}$  大于导通电压  $U_{on}$ , 基极电流  $I_B$  就近似按指数规律明显增大, 三极管导通。随着管压降  $U_{CE}$  的增大, 曲线右移, 当  $U_{CE} > 1V$  后, 所有曲线几乎重合, 通常用  $U_{CE} = 1V$  的曲线来代替  $U_{CE} > 1V$  后的所有曲线。测试表明, 硅三极管一旦导通后, 即使  $I_B$  在一个相当宽广的范围内变化,  $U_{BE}$  也只在  $0.7V$  左右做微小变化, 因此可认为硅三极管导通后, 其发射结正向压降约为  $0.7V$ 。导通的锗三极管的发射结正向压降则在  $0.3V$  左右。

## 2. 输出特性

三极管的输出特性是指在基极电流  $I_B$  一定的情况下, 集电极电流  $i_C$  与管压降  $u_{CE}$  之间的函数关系, 即

$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B = \text{常数}} \quad (1-8)$$

如图 1-17(c)所示, 当  $I_B$  取不同数值时, 将得到一族曲线。这一族曲线可以划分为三个不同的区域, 即截止区、放大区和饱和区, 分别对应三极管的截止状态、放大状态和饱和状态。图中虚线是饱和区与放大区的分界线, 称为临界饱和或临界放大, 此时  $u_{BC} = 0$ 。

### (1) 截止区

图 1-17(c)中  $I_B = 0$  以下的区域称为截止区。在这个区域, 基极电流为零, 其他各个极电流也近似为零。需要指出, 当  $I_B = 0$  时, 集电极其实有一个很小的电流  $I_{CEO}$ , 如图 1-17(c)中所标注。  $I_{CEO}$  称为穿透电流, 意为当基极开路 ( $I_B = 0$ ) 时, 在  $U_{CC}$  作用下三极管的集电极、发射极之间所形成的电流。可以证明

$$I_{CEO} = (1 + \beta)I_{CBO} \quad (1-9)$$

式中,  $I_{CBO}$  称为集电极-基极反向饱和电流, 由基区和集电区原有少子的漂移运动形成, 如图 1-16 所示。同一型号的管子的  $I_{CEO}$  越小, 性能越稳定。小功率硅三极管的  $I_{CEO}$  小于  $1$  微安, 小功率锗三极管的  $I_{CEO}$  小于几十微安, 近似分析时  $I_{CEO}$  一般可忽略不计。

### (2) 放大区

图 1-17(c)中虚线以右的区域称为放大区。放大区的显著特点是, 各条输出特性曲线近似平行于横轴, 表明此时的集电极电流只受基极电流控制, 而几乎与管压降无关。由前述分析可知, 当发射结为正向偏置且大于导通电压  $U_{on}$  而集电结为反向偏置时, 三极管处于放大状态, 集电结的反向偏置电场足以将穿过基区到达集电结边界的自由电子加以收集并形成集电极电流, 因此即使管压降再增加, 也不会有更多的自由电子被收集。从宏观上看, 只要基极电流不变, 集电极电流就基本恒定, 曲线平坦,  $I_C$  的大小基本取决于  $I_B$ , 即  $I_C \approx \beta I_B$ 。

放大区还有一个特点, 当基极电流等差变化时, 各条曲线之间的间距几乎相等。若忽略穿透电流  $I_{CEO}$ , 则有

$$\beta \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \Big|_{U_{ce}=\text{常数}} \quad (1-10)$$

也就是说，三极管不但可以放大直流电流，也可以放大变化的电流（交流），这两种情况下的电流放大系数通常不再加以区分，而统一用  $\beta$  表示。

放大状态下三极管的电流分配关系可表述为

$$I_E \approx I_B + I_C \approx (1 + \beta)I_B \quad (1-11)$$

若考虑  $I_{CEO}$  的影响，则有

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \quad (1-12)$$

故

$$I_E = (1 + \beta)I_B + I_{CEO} \quad (1-13)$$

### (3) 饱和区

图 1-17(c)中虚线以左的区域称为饱和区。此时各条特性曲线陡直上升，且几乎重叠在一起，表明基极电流对集电极电流失去控制作用，集电极电流不仅与基极电流有关，还随着管压降的增大而迅速增大。这是因为，当三极管处于饱和状态时，其集电结为正向偏置，对电子的收集作用减弱，导致多余电子在基区和集电区的边界堆积，基极复合电流增加，发射有余而收集不足， $I_C$  不再随  $I_B$  线性增长，即  $I_C \approx \beta I_B$  的规律不再成立，而是变为  $I_C < \beta I_B$ 。不过一旦管压降稍有增加，集电结收集电子的能力就明显增强，所以集电极电流受管压降的影响较大，曲线很陡。

综上所述，三极管的工作区域主要分为放大区、饱和区和截止区。与之相应的，三极管的基本应用有两个，一是放大，二是开关。放大应用中的三极管工作于放大区，开关应用中的三极管则工作于饱和区和截止区，并经常在饱和区和截止区之间（通过放大区）进行快速转换。具体应用电路将在后续相关章节中陆续讨论。

### (4) 直流负载线与三极管的工作区域

为更加直观地理解三极管的工作区域，可在三极管的输出特性曲线上画出直流负载线。

对于图 1-17(a)所示的共射电路，在输出回路中列出基尔霍夫电压方程，有

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \quad (1-14)$$

式 (1-14) 称为输出回路的直流负载线方程，它描述的是三极管的直流管压降  $U_{CE}$  和集电极直流电流  $I_C$  在外部电路中所应遵循的约束关系。只要在图 1-18 所示的输出特性坐标系中，横轴上取截距  $U_{CC}$ ，纵轴上取截距  $U_{CC} / R_C$ ，两点相连即可得到电路的直流负载线。

由于图 1-17(a)所示的共射电路中三极管的基极电流为

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \quad (1-15)$$

假设  $I_B = I_{B2}$ ，则此时三极管的内在特性为  $I_B = I_{B2}$  的那条输出曲线，直流负载线与  $I_B = I_{B2}$  那条输出特性曲线的交点才是三极管此时所处的真正位置，该交点称为静态工作点  $Q(U_{CEQ}, I_{CQ})$ 。图中  $Q$  点落在放大区，表明三极管工作于放大状态。

由图 1-18 可见，直流负载线可分为三个部分，每一部分都对应三极管的一个工作区域：A 点以下为截止区，B 点以上为饱和区，A、B 之间为放大区，B 点是饱和区与放大区的临界

点。若图中  $Q$  点沿着直流负载线上移, 即三极管从放大区进入饱和区的过程中,  $I_C$  将逐渐增大而  $U_{CE}$  逐渐减小, 集电结逐渐由反向偏置转为正向偏置; 在  $B$  点处则恰好零偏, 即  $U_C = U_B$ , 也即  $U_{CE} = U_{BE} \approx U_{on}$ 。  $B$  点处的管压降  $U_{CE}$  称为临界饱和管压降, 记作  $U_{CES}$ ; 相应的集电极电流、基极电流分别称为临界饱和集电极电流、临界饱和基极电流, 分别记作  $I_{CS}$  和  $I_{BS}$ 。所以 NPN 型三极管工作区域的一般判断方法为:

①首先比较  $U_{BE}$  与  $U_{on}$  的大小: 若  $U_{BE} > U_{on}$ , 说明  $I_B > 0$ ,  $I_C > 0$ , 工作点位于  $A$  点以上, 管子导通; 若  $U_{BE} < U_{on}$ , 说明  $I_B = 0$ ,  $I_C \approx 0$ , 工作点位于  $A$  点以下, 管子截止。

②管子导通后, 继续比较  $U_{CE}$  与  $U_{CES}$  ( $U_{BE}$ ) 的大小: 若  $U_{CE} > U_{CES}$  ( $U_{BE}$ ), 说明工作点位于  $A$ 、 $B$  之间, 即管子工作在放大区; 若  $U_{CE} < U_{CES}$  ( $U_{BE}$ ), 说明工作点位于  $B$  点以上, 即管子工作在饱和区, 此时的饱和管压降记作  $U_{CE(sat)}$ , 饱和集电极电流记作  $I_{C(sat)}$ 。

当然也可以比较  $I_B$  和  $I_{BS}$  或者  $I_C$  和  $I_{CS}$  的大小: 若  $I_B < I_{BS}$  ( $I_C < I_{CS}$ ), 说明工作点位于  $A$ 、 $B$  之间, 即放大区; 若  $I_B > I_{BS}$  ( $I_C > I_{CS}$ ), 说明工作点位于  $B$  点以上, 即饱和区。

关于 PNP 型三极管工作区域的判断方法, 读者可据此自行推导, 此处从略。

### 3. 主要参数

三极管的参数用来表征三极管的各种性能和适用范围, 了解这些参数的意义, 对合理使用管子进行电路设计是十分必要的。其中穿透电流  $I_{CEO}$ 、极间饱和电压  $U_{CE(sat)}$ 、共射电流放大系数  $\beta$  等已做过介绍, 这里不再赘述。与  $\beta$  相对应的还有一项参数  $\alpha$ , 称为共基电流放大系数, 且

$$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E} \approx \frac{\Delta i_C}{\Delta i_E} \quad (1-16)$$

显然,  $\alpha$  略小于 1。当忽略穿透电流时, 可以证明

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \quad (1-17)$$

此外还有各项极限参数, 是指三极管在使用过程中不允许超过的工作界限, 当超过此界限时, 管子性能下降, 甚至损坏。主要包括:

(1) 最大集电极耗散功率  $P_{CM}$

$P_{CM}$  取决于三极管的温升。当管温超过某一数值后, 管子特性明显变坏, 甚至烧毁。对于确定型号的三极管,  $P_{CM}$  是一个确定值, 即  $P_{CM} = i_C u_{CE} = \text{常数}$ 。

(2) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$

$i_C$  在相当大的范围内  $\beta$  值基本不变, 但当  $i_C$  的数值大到一定程度时  $\beta$  将减小。使  $\beta$  下降三分之一的  $i_C$  即为  $I_{CM}$ 。当  $i_C$  大于  $I_{CM}$  时, 三极管不一定损坏, 但  $\beta$  明显下降。

(3) 极间反向击穿电压

三极管的某一电极开路时, 另外两个电极间所允许施加的最高反向电压称为极间反向击

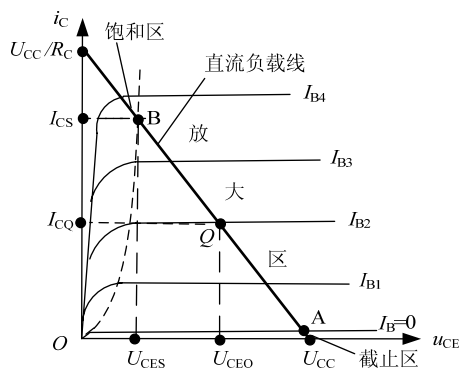


图 1-18 直流负载线与三极管的工作区域

穿电压, 超过此值时管子会发生击穿现象。主要有发射极开路时集电极-基极间的反向击穿电压  $U_{(BR)CBO}$ 、基极开路时集电极-发射极间的反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$ 、集电极开路时发射极-基极间的反向击穿电压  $U_{(BR)EBO}$  等。

### 1.3.5 温度对三极管伏安特性的影响

三极管的参数几乎都与温度有关, 了解温度对三极管伏安特性的影响非常必要。

#### 1. 温度对输入特性的影响

与二极管伏安特性相类似, 温度升高时三极管的正向特性左移, 反之右移, 即  $u_{BE}$  具有负温度系数。若  $u_{BE}$  不变, 则当温度升高时  $i_B$  增大, 温度降低时  $i_B$  减小。

#### 2. 温度对输出特性的影响

当温度升高时,  $\beta$  和  $I_{CEO}$  均增大, 导致输出特性上移, 且间距增大, 即集电极电流  $i_C$  增大; 反之, 当温度降低时,  $\beta$  和  $I_{CEO}$  均减小, 输出特性下移, 且间距减小, 即  $i_C$  减小。

**例 1-3** 测得某电路中若干三极管的各个电极电位如图 1-19 所示, 试判断各三极管分别处于何种工作状态(饱和、放大、截止或已损坏)。

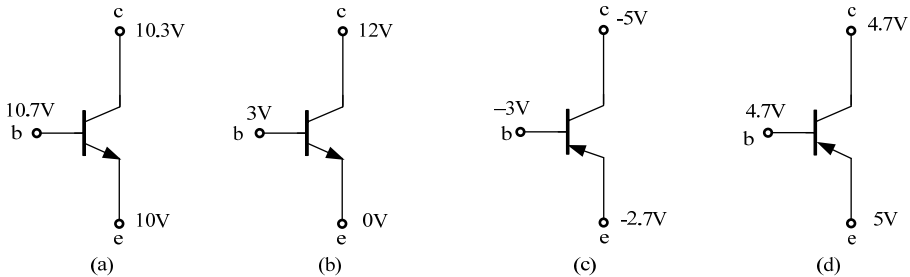


图 1-19 例 1-3 图

**解** 图 1-19(a)为 NPN 管,  $U_{BE} = 0.7V$  (硅管) 且  $U_B > U_C$ , 说明发射结导通, 同时集电结正偏, 故三极管工作在饱和区。利用  $U_{BE} = 0.7V$ 、 $U_{CE} = 0.3V < U_{BE}$ , 也可得到同样结论。

图 1-19(b)中  $U_{BE} = 3V$ , 远大于发射结导通电压, 说明发射结已断路, 三极管损坏。

图 1-19(c)为 PNP 管,  $U_{EB} = 0.3V$  (锗管) 且  $U_C < U_B$ , 说明发射结导通, 集电结反偏, 故三极管工作在放大区。利用  $U_{EB} = 0.3V$ 、 $U_{EC} = 2.3V > U_{EB}$ , 也可得到同样结论。

图 1-19(d)中  $U_{EB} = 0.3V$  (锗管) 且  $U_C = U_B$ , 说明发射结导通, 但集电结零偏, 因此三极管处于临界饱和(临界放大)状态。

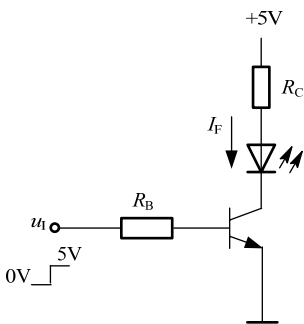


图 1-20 例 1-4 图

**例 1-4** 电路如图 1-20 所示。已知  $R_B = 20k\Omega$ , 三极管的  $U_{BE} = 0.7V$ ,  $\beta = 100$ , 饱和时的管压降  $U_{CE(sat)} = 0.2V$ ; 发光二极管正常工作时的导通电压  $U_F = 1.5V$ , 为产生特定的输出光强所需要的工作电流  $I_F = 12mA$ 。试确定集电极电阻  $R_C$  的阻值。

**解** 根据电路, 当  $u_1 = 0V$  时, 三极管截止, 发光二极管不发光。因此,  $R_C$  的阻值应由  $u_1 = 5V$  时的工作情况决定。



当  $u_1 = 5\text{V}$  时, 三极管导通, 发光二极管工作。此时, 基极电流为

$$I_B = \frac{u_1 - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{20} = 0.215\text{mA}$$

集电极电流  $I_C$  为发光二极管上的工作电流, 即  $I_C = I_F = 12\text{mA}$ , 因此集电极电流与基极电流之比为

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{12}{0.215} \approx 55.8$$

已知  $\beta = 100$ , 所以  $I_C / I_B < \beta$ , 即  $I_C < \beta I_B$ , 说明  $u_1 = 5\text{V}$  时三极管工作在饱和区。

设三极管工作在饱和区时的饱和集电极电流为  $I_{C(\text{sat})}$ , 根据题意, 应有

$$I_{C(\text{sat})} = \frac{5 - U_F - U_{CE(\text{sat})}}{R_C} = \frac{5 - 1.5 - 0.2}{R_C} = \frac{3.3}{R_C} = 12\text{mA}$$

因此

$$R_C = \frac{3.3}{12} = 0.275\text{k}\Omega = 275\Omega$$

## 1.4 场效应管

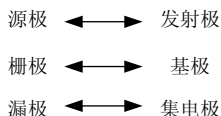
场效应管 (Field Effect Transistor, FET) 是电子电路中另一种重要的三端器件, 它的三个电极分别称为栅极 g (Gate)、源极 s (Source) 和漏极 d (Drain)。其中, 栅极为控制极, 源极和漏极之间为导电沟道。与三极管中两种载流子均参与导电不同, 场效应管仅有一种载流子 (多子) 参与导电, 因而具有热稳定性好、噪声低、制造工艺简单、易于集成等优点, 应用十分广泛。

### 1.4.1 场效应管的种类与符号

场效应管种类繁多。按基本结构分, 有金属氧化物半导体场效应管 (Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET) 和结型场效应管 (Junction Field Effect Transistor, JFET); 按导电沟道分, 有 N 沟道场效应管和 P 沟道场效应管; 按导电沟道是否事先存在, 又分增强型场效应管和耗尽型场效应管。归纳起来, 场效应管共有六种类型, 其电路符号和伏安特性曲线如表 1-3 所示。电路符号中的虚线表示事先不存在导电沟道, 即增强型; 实线表示事先就存在导电沟道, 即耗尽型; 箭头指向沟道的, 为 N 沟道型; 箭头背向沟道的, 为 P 沟道型。

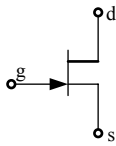
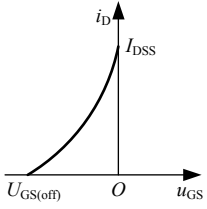
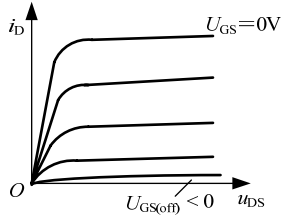
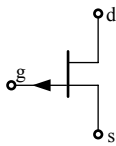
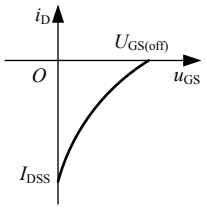
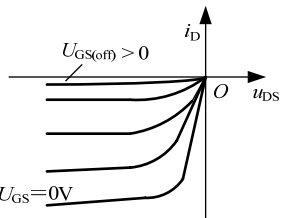
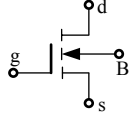
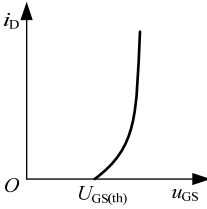
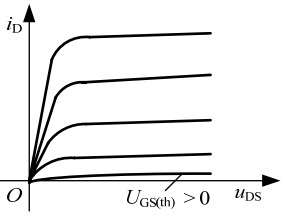
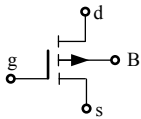
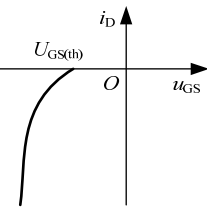
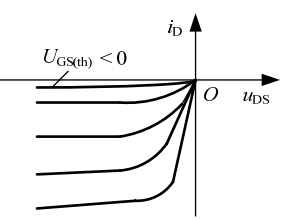
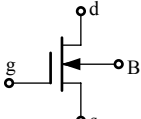
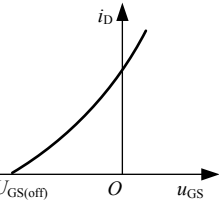
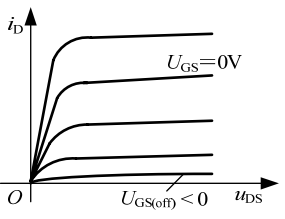
关于场效应管, 还有几点需要说明:

① 从外部引脚上看, 场效应管和三极管的三个电极之间存在着以下对应关系:



但需注意, MOSFET 有四个引脚, 除源极 s、栅极 g 和漏极 d 之外, 还有一个衬底引脚 B (Base), 它通常与源极 s 相连。

表 1-3 场效应管的电路符号和伏安特性曲线

分类		电路符号	转移特性曲线	输出特性曲线	
结型场效应管	N 沟道				
	P 沟道				
绝缘栅型场效应管	增强型	N 沟道			
		P 沟道			
	耗尽型	N 沟道			
		P 沟道	