

第 1 章 半导体器件



- 了解半导体的特性和导电方式，理解 PN 结的单向导电特性。
- 了解半导体二极管、三极管的结构。
- 理解二极管的工作原理、伏安特性和主要参数。
- 理解双极型三极管的放大作用、输入和输出特性及其主要参数。
- 了解 MOS 场效应管的伏安特性、主要参数及其与双极型三极管的性能比较。

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件，是构成各种电子电路最基本的核心元件。电子技术就是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

半导体器件具有体积小、重量轻、功耗低、使用寿命长等优点，在现代工业、农业、科学技术、国防等各个领域得到了广泛的应用。

半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、伏安特性和主要参数是学习电子技术和分析电子电路必不可少的基础，而 PN 结又是构成各种半导体器件的共同基础。

本章首先介绍半导体的导电特性、PN 结及其单向导电性。在此基础上，介绍半导体二极管、双极型三极管和绝缘栅型场效应管的基本结构、工作原理、伏安特性和主要参数，为以后的学习打下基础。

1.1 PN 结

自然界中存在着各种物质，按导电能力的强弱可以分为导体、半导体和绝缘体。半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间，主要有硅、锗、硒、砷化镓和氧化物、硫化物等。

半导体之所以被重视，是因为很多半导体的导电能力在不同的条件下有着显著的差异。例如，有些半导体如钴、锰、硒等的氧化物对温度的反应特别灵敏，环境温度升高时，它们的导电能力会明显增强。利用这种热敏特性可制成各种热

敏元件。又如，有些半导体如镉、铝的硫化物和硒化物等受到光照射时，它们的导电能力会变得很强；当无光照射时，又变得像绝缘体那样不导电。利用这种光敏特性可制成各种光敏元件。

更为重要的是，如果在纯净的半导体中掺入微量的杂质元素，其导电能力会猛增到几千、几万甚至上百万倍。利用半导体的这种掺杂特性可制成种类繁多的具有不同用途的半导体器件，如半导体二极管、半导体三极管、场效应管等。

1.1.1 半导体的导电特征

1. 本征半导体

目前用来制造半导体器件的材料主要是硅（Si）、锗（Ge）等。硅和锗半导体材料经高纯度提炼后，其原子排列已变成非常整齐的状态，称为单晶体，也称为本征半导体。

硅和锗的原子结构示意图如图 1.1 所示。它们的最外层电子轨道上都有 4 个电子，最外层的电子称为价电子，即硅和锗都是四价元素。最外层具有 8 个电子的原子才是稳定状态，所以，在本征半导体中，每个原子与相邻的 4 个原子结合，每一原子的 4 个价电子分别为相邻的 4 个原子所共有，组成所谓的共价键结构，如图 1.2 所示。

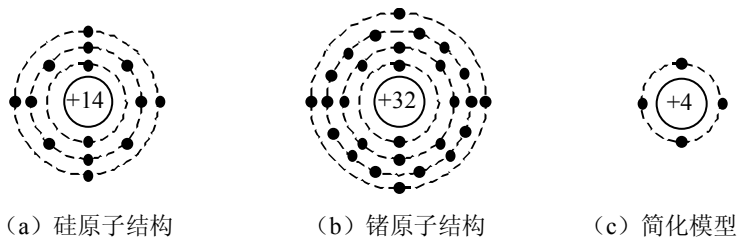


图 1.1 硅和锗的原子结构示意图

共价键中的电子不像绝缘体中的价电子被束缚得那样紧。一些电子获得一定能量（温度升高或受光照射）后，可能挣脱束缚（电子受到激发）而成为自由电子，使半导体材料具有了一定的导电能力。同时在这些自由电子原来的位置上留下空位，称为空穴。电子和空穴成对出现，称为电子空穴对。空穴因失掉一个电子而带正电。由于正负电的相互吸引，空穴附近的电子会填补这个空位，于是又会产生新的空穴，又会有相邻的电子来替补，如此进行下去就形成了空穴运动，如图 1.3 所示。

自由电子和空穴都是载运电荷的粒子，称为载流子。由此可见，半导体材料在外加电压作用下出现的电流是由自由电子和空穴两种载流子的运动形成的。这

是半导体导电与金属导体导电机理上的本质区别。

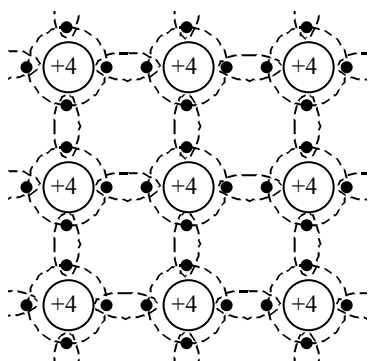


图 1.2 硅或锗晶体中的共价键结构

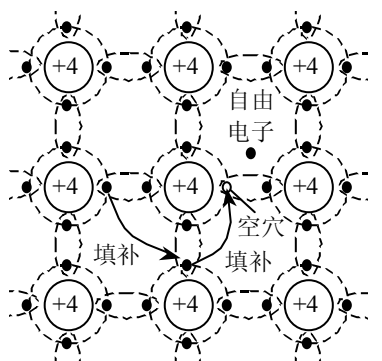


图 1.3 热运动产生的电子空穴对

在室温条件下，本征半导体中的载流子数目是一定的，且数目很少，所以导电性能较差。温度升高时，载流子浓度将按指数规律增加。因此，温度对本征半导体的导电性能有很大的影响。

2. 杂质半导体

若在本征半导体中掺入少量的杂质元素，就能显著地改善半导体的导电性能。根据所掺杂质的不同，掺杂后的半导体可分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

在纯净半导体硅或锗中掺入磷、砷等五价元素，则每一个五价元素的原子在组成共价键时产生一个电子，使得在掺杂后的半导体中的电子浓度大大增加，其数量远远多于空穴的数量。这种掺杂后的半导体主要靠自由电子导电，称为电子半导体或 N 型半导体，其中自由电子为多数载流子，激发形成的空穴为少数载流子。

在纯净半导体硅或锗中掺入硼、铝等三价元素，则每一个三价元素的原子在组成共价键时产生一个空穴，使得掺杂后的半导体中的空穴浓度大大增加，其数量远远多于自由电子的数量。这类掺杂后的半导体其导电作用主要靠空穴运动，称为空穴半导体或 P 型半导体，其中空穴为多数载流子，激发形成的自由电子为少数载流子。

如图 1.4 所示为 N 型半导体和 P 型半导体中载流子和杂质离子的示意图，图中 $\oplus$ 表示杂质原子因提供了一个价电子而形成的正离子， $\ominus$ 表示杂质原子因提供了一个空穴而形成的负离子。这些正、负离子不能移动，不能参与导电。

综上所述，由于掺入杂质的不同，产生 N 型半导体和 P 型半导体两种不同类型的半导体，它们统称为杂质半导体。应该指出，尽管杂质半导体中载流子的浓

度远大于本征半导体中载流子的浓度，但是整块杂质半导体仍呈电中性。



图 1.4 N 型半导体和 P 型半导体结构示意图

1.1.2 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

如果通过一定的工艺措施，使同一块硅片上的两边分别形成 N 型半导体和 P 型半导体，那么它们的交界面处就形成了 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基础。

在 N 型半导体和 P 型半导体的交界处，由于 N 区的电子浓度远大于 P 区的电子浓度，因此电子将从 N 区向 P 区扩散。同理，P 区的空穴将向 N 区扩散，如图 1.5 (a) 所示。扩散的结果使得交界处 N 区一侧因失去电子而留下带正电的正离子，P 区一侧因失去空穴而留下带负电的负离子。这些带电离子在交界面两侧形成带异号电荷的空间电荷区，这就是 PN 结。空间电荷所形成的电场称为内电场，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区，如图 1.5 (b) 所示。

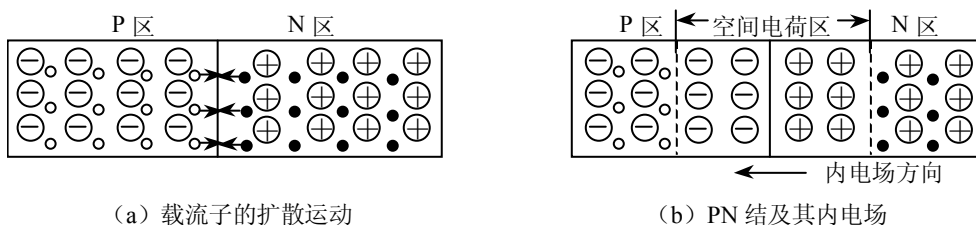


图 1.5 PN 结的形成

内电场对多数载流子的扩散运动有阻碍作用（所以空间电荷区又称为阻挡层），但却有助于交界面两侧少数载流子的运动。少数载流子在电场作用下的定向运动称为漂移运动。当扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，PN 结的厚度一定，处于相对稳定的状态。此外，由于空间电荷区中的载流子基本耗尽，故也称为耗尽区。

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加上正向电压（称为正向偏置），即 P 区接电源正极，N 区

接电源负极,如图 1.6 (a) 所示。此时,外加电压产生的外电场方向与内电场方向相反,外电场削弱了内电场,结果使空间电荷区变薄,于是扩散运动超过漂移运动,PN 结两侧的多数载流子能顺利地通过 PN 结,形成较大的电流,这意味着 PN 结呈现低阻状态。PN 结的这种工作状态称为导通状态。

如果在 PN 结两端加上反向电压(称为反向偏置),即 P 区接电源负极, N 区接电源正极,如图 1.6 (b) 所示。此时,外加电压产生的外电场方向与内电场方向一致,内电场的作用增强,空间电荷区变厚,使多数载流子的扩散运动难以进行,但内电场的增强有利于少数载流子的漂移运动。由于常温下少数载流子数量很少,所以一般情况下能形成的反向电流很小,即反向偏置时 PN 结呈高阻状态。PN 结的这种工作状态称为截止状态。

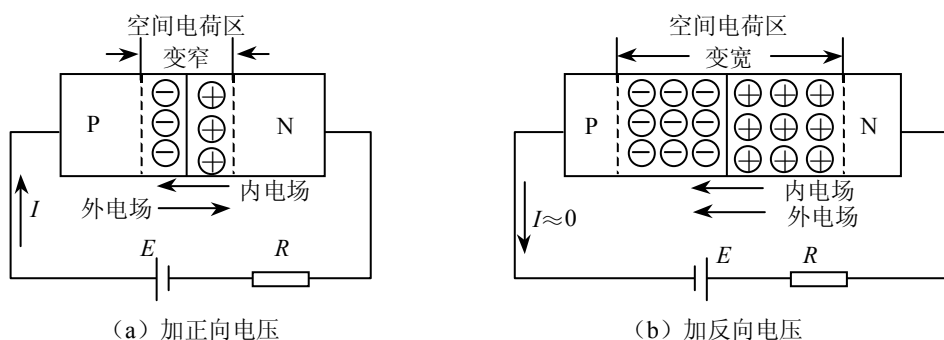


图 1.6 PN 结的单向导电性

综上所述,PN 结具有单向导电性,即 PN 结加正向电压时,正向电阻很小,PN 结导通,可以形成较大的正向电流;PN 结加反向电压时,反向电阻很大,PN 结截止,反向电流基本为零。二极管、三极管和场效应管等半导体器件的工作特性都是以 PN 结的这种单向导电性为基础的。

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构

如果在一个 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装起来,便构成一只半导体二极管,简称二极管。如图 1.7 所示为几种二极管的外形、结构示意图和图形符号。由 P 区引出的电极称为阳极或正极,由 N 区引出的电极称为阴极或负极,箭头表示二极管正向导通时的电流方向。

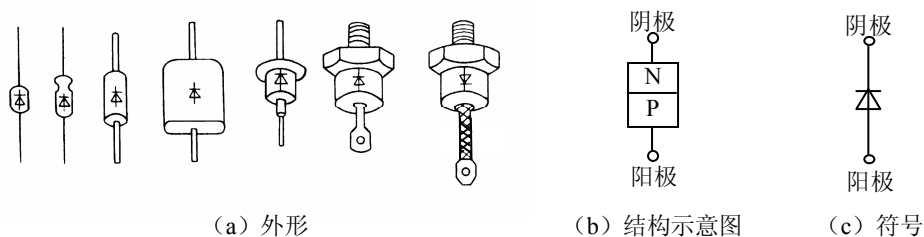


图 1.7 二极管的外形、结构示意图和符号

按结构分，二极管有点接触型和面接触型两类，如图 1.8 所示。点接触型二极管 PN 结的结面积较小，因而结电容很小，且不能通过较大电流，但其高频性能好，故一般适用于高频和小功率电路的工作，也可在数字电路中用作开关元件。面接触型二极管的结面积较大，允许通过较大电流，但结电容较大，工作频率较低，适用于整流电路。

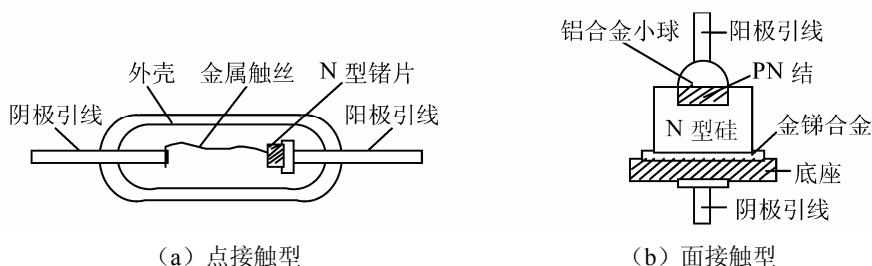


图 1.8 二极管的结构类型

根据所用材料的不同，二极管有硅二极管和锗二极管两种。硅二极管因其温度特性较好，使用较为广泛。

1.2.2 二极管的伏安特性

二极管的导电特性常用伏安特性曲线来表示，表示通过二极管的电流与其两极电压之间的关系，如图 1.9 所示，图中实线所示为硅二极管的伏安特性，虚线所示为锗二极管的伏安特性。

1. 正向特性

二极管伏安特性曲线图的第一象限称为正向特性，它表示外加正向电压时二极管的工作情况。当正向电压较小时，外电场不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力，故正向电流极小，几乎为零，这一区域称为死区，对应的

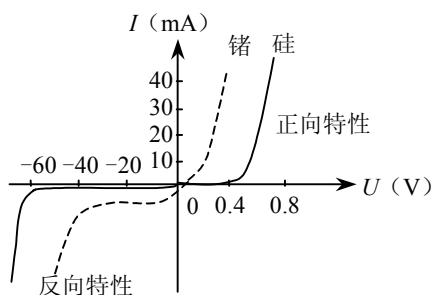


图 1.9 二极管的伏安特性曲线

电压称为死区电压。硅管的死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.2V。当正向电压超过死区电压后，内电场将大大削弱，电流迅速增大，二极管导通，这一区域称为正向导通区。导通后的二极管端电压变化很小，基本上是一个常量。硅管的正向压降约为 0.7V，锗管约为 0.3V。

2. 反向特性

二极管伏安特性曲线图的第三象限称为反向特性，它表示外加反向电压时二极管的工作情况。二极管所承受的反向电压在一定范围内时，反向电流很小，且基本上不随反向电压变化，这一区域称为反向截止区。这是因为少数载流子的数量很少，且在一定的温度下数量一定，因此，反向电流又常称为反向饱和电流。当外加反向电压增大到一定值时，反向电流将突然增大，二极管失去单向导电性，这种现象称为反向击穿，这一区域称为反向击穿区。反向击穿时的电压称为反向击穿电压，用 U_{BR} 表示。各类二极管的反向击穿电压从几十伏到几百伏不等。反向击穿时，若不限制反向电流，则二极管的 PN 结会因功耗大而过热，导致 PN 结烧毁。

1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是反映其性能的质量指标，也是选用二极管的主要依据。二极管的主要参数有如下几个：

(1) 最大整流电流 I_{OM} 。 I_{OM} 是指二极管长期使用时允许通过的最大正向平均电流。 I_{OM} 的大小主要取决于 PN 结的结面积，并且受结温的限制。二极管使用时的工作电流应小于 I_{OM} ，否则将由于 PN 结过热而使管子损坏。

(2) 反向工作峰值电压 U_{DRM} 。 U_{DRM} 是指二极管使用时允许加的最大反向电压。器件产品手册中，通常取反向击穿电压 U_{BR} 的 1/2 作为 U_{DRM} 。

(3) 反向峰值电流 I_{RM} 。 I_{RM} 是指二极管加上反向峰值电压时的反向电流值。 I_{RM} 越小，二极管的单向导电性越好。 I_{RM} 受温度的影响大。硅管的 I_{RM} 较小，一般在几个微安以下；锗管的 I_{RM} 较大，为硅管的几十倍到几百倍。

(4) 最高工作频率 f_M 。 f_M 是指二极管所能承受的外施电压的最高频率。外施电压的频率超过 f_M ，二极管将失去单向导电性。这是因为 PN 结两侧的空间电荷与电容器极板充电时所储存的电荷类似，因此 PN 结具有电容效应，相当于一个电容，称为结电容。二极管的 PN 结面积越大，结电容越大。由于高频电流可以直接通过结电容，从而破坏了二极管的单向导电性，故不同型号的二极管都有最高工作频率 f_M 的限制。结电容大， f_M 低；结电容小， f_M 高。

温度对二极管特性有较大的影响，随着温度的升高，使正向特性曲线向左移，反向特性曲线向下移。如图 1.10 所示为二极管在不同温度下的伏安特性曲

线。正向特性曲线左移，表明在相同的正向电流下，二极管正向压降随温度升高而减小。实验表明，温度每升高 1°C ，正向压降约减小 2 mV 。反向特性曲线下移，表明温度升高时，反向电流剧增。实验表明，温度每升高 10°C ，反向电流约增大一倍。

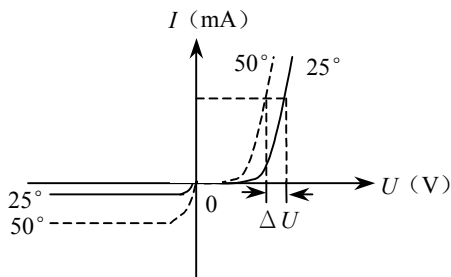


图 1.10 温度对二极管特性的影响

二极管的应用范围很广，主要都是利用它的单向导电性。它可用于整流、检波、元件保护，也可在脉冲与数字电路中作为开关元件等。

在进行电路分析时，一般可将二极管视为理想元件，即认为其正向电阻为零，正向导通时为短路特性，正向压降忽略不计；反向电阻为无穷大，反向截止时为开路特性，反向漏电流忽略不计。

例 1.1 在如图 1.11 所示的电路中，已知输入端 A 的电位 $U_A = 3\text{ V}$ ， B 的电位 $U_B = 0\text{ V}$ ，电阻 R 接 -12 V 电源，求输出端 F 的电位 U_F 。

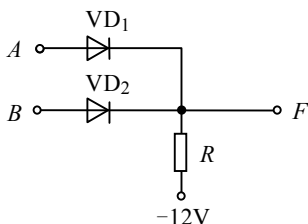


图 1.11 例 1.1 的电路

解 因为 $U_A > U_B$ ，所以二极管 VD_1 优先导通，设二极管为理想元件，则输出端 F 的电位为 $U_F = U_A = 3\text{ V}$ 。当 VD_1 导通后， VD_2 上加的是反向电压， VD_2 因而截止。

在这里，二极管 VD_1 起钳位作用，把 F 端的电位钳制在 3 V ； VD_2 起隔离作用，把输入端 B 和输出端 F 隔离开来。

例 1.2 在如图 1.12 (a) 所示的电路中，已知输入电压 $u_i = 10 \sin \omega t\text{ V}$ ，电源

电动势 $E = 5\text{ V}$ ，二极管为理想元件，试画出输出电压 u_o 的波形。

解 根据二极管的单向导电特性可知，当 $u_i \leq 5\text{ V}$ 时，二极管 VD 截止，相当于开路，因电阻 R 中无电流流过，故输出电压与输入电压相等，即 $u_o = u_i$ ；当 $u_i > 5\text{ V}$ 时，二极管 VD 导通，相当于短路，故输出电压等于电源电动势，即 $u_o = E = 5\text{ V}$ 。所以，在输出电压 u_o 的波形中， 5 V 以上的波形均被削去，输出电压被限制在 5 V 以内，波形如图 1.12 (b) 所示。在这里，二极管起限幅作用。

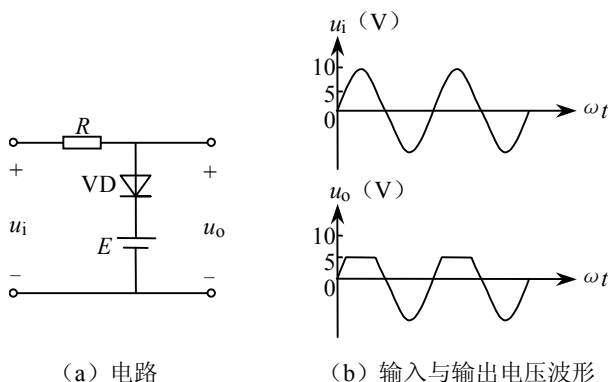


图 1.12 例 1.2 的图

1.3 特殊二极管

除了上述普通二极管外，还有一些特殊二极管，如稳压二极管、发光二极管和光电二极管等，对它们仅作简单的介绍。

1.3.1 稳压管

1. 稳压管的稳压作用

稳压管是一种特殊的硅二极管，由于它在电路中与适当数值的电阻配合后能起稳定电压的作用，故称为稳压管。稳压管的伏安特性曲线与普通二极管的类似，如图 1.13 (a) 所示，其差异是稳压管的反向特性曲线比较陡。如图 1.13 (b) 所示为稳压管的符号。稳压管正常工作于反向击穿区，且在外加反向电压撤除后，稳压管又恢复正常，即它的反向击穿是可逆的。从反向特性曲线上可以看出，当稳压管工作于反向击穿区时，电流虽然在很大范围内变化，但稳压管两端的电压变化很小，即它能起稳压的作用。

如果稳压管的反向电流超过允许值，则它将会因过热而损坏。所以，与稳压

管配合的电阻要适当，才能起稳压作用。

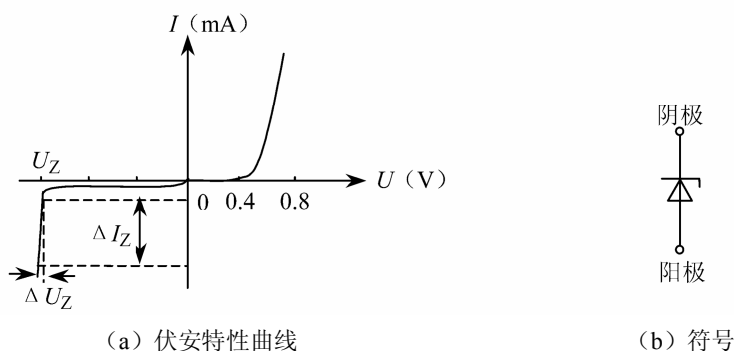


图 1.13 稳压管的伏安特性曲线与符号

2. 稳压管的主要参数

稳压管的主要参数有：

(1) 稳定电压 U_Z 。 U_Z 指稳压管的稳压值。由于制造工艺方面和其他的原因，稳压值也有一定的分散性。同一型号的稳压管稳压值可能略有不同。手册给出的都是在一定条件（工作电流、温度）下的数值。例如，2CW18 稳压管的稳压值为 10V~12V。

(2) 稳定电流 I_Z 。 I_Z 指稳压管工作电压等于稳定电压 U_Z 时的工作电流。稳压管的稳定电流只是一个作为依据的参考数值，设计选用时要根据具体情况（例如工作电流的变化范围）来考虑。但对每一种型号的稳压管都规定有一个最大稳定电流 I_{ZM} 。

(3) 电压温度系数 α_{UZ} 。 α_{UZ} 是说明稳压值受温度影响的系数，表示稳压管的温度稳定性。例如，2CW18 稳压管的电压温度系数是 0.095%/°C，表示温度每升高 1°C，它的稳压值增加 0.095%。假如在 20°C 时的稳压值是 11V，那么在 40°C 时的稳压值将是：

$$11 + \frac{0.095}{100} (40 - 20) \times 11 \approx 11.2 \text{ (V)}$$

一般来说，高于 6V 的稳压管具有正的电压温度系数；低于 5V 的稳压管，电压温度系数是负的。而 6V 左右的稳压管，电压温度系数很小。因此，选用 5V~6V 的稳压管，可以得到较好的温度稳定性。

(4) 动态电阻 r_Z 。 r_Z 指稳压管两端电压的变化量与相应电流变化量的比值，即：

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

稳压管的反向伏安特性曲线越陡, 则动态电阻越小, 稳压性能越好。

(5) 最大允许耗散功率 P_{ZM} 。 P_{ZM} 指管子不致发生热击穿的最大功率损耗, 即:

$$P_{ZM} = U_Z I_{ZM}$$

稳压管在电路中的主要作用是稳压和限幅, 也可和其他电路配合构成欠压或过压保护、报警环节等。

例 1.3 在如图 1.14 所示的电路中, 已知限流电阻 $R = 1.6 \text{ k}\Omega$, 稳压管 VD_Z 的参数为: $U_Z = 12 \text{ V}$, $I_Z = 5 \text{ mA}$, $I_{ZM} = 18 \text{ mA}$, 求通过稳压管的电流 I_Z , 限流电阻 R 的阻值是否合适?

解 通过稳压管的电流:

$$I_Z = \frac{20 - 12}{1.6} = 5 \text{ (mA)}$$

由于 $I_Z < I_{ZM}$, 所以限流电阻 R 的阻值合适。

例 1.4 在如图 1.15 所示的电路中, 已知稳压管 VD_Z 的参数为: $U_Z = 12 \text{ V}$, $I_Z = 5 \text{ mA}$, $I_{ZM} = 18 \text{ mA}$, 负载电阻 $R_L = 2 \text{ k}\Omega$, 要求当输入电压 U_i 由正常值发生 $\pm 20\%$ 的波动时, 输出电压 U_o 基本不变。试确定电阻 R 和输入电压 U_i 的正常值。

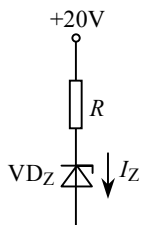


图 1.14 例 1.3 的图

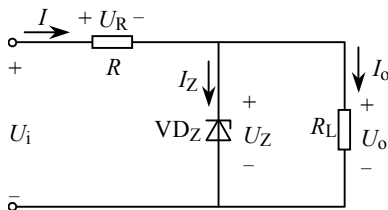


图 1.15 例 1.4 的图

解 负载电阻 R_L 两端的电压 U_o 就是稳压管两端的电压 U_Z 。当 U_i 发生波动时, 必然使限流电阻 R 上的压降和 U_o 发生变动, 从而使通过稳压管的电流变动。但只要通过稳压管的电流在 $I_Z \sim I_{ZM}$ 范围内变动, 即可认为 U_Z 即 U_o 基本上不变。

当输入电压达到上限时, 流过稳压管的电流为最大值 I_{ZM} , 因此有:

$$I = I_{ZM} + I_o = I_{ZM} + \frac{U_Z}{R_L} = 18 + \frac{12}{2} = 24 \text{ (mA)}$$

$$U_i + 0.2U_i = U_R + U_Z = IR + U_Z = 24R + 12$$

$$1.2U_i = 24R + 12 \quad (1)$$

当输入电压降为下限时, 流过稳压管的电流应为 I_Z , 于是有:

$$\begin{aligned}
 I &= I_Z + I_o = I_Z + \frac{U_Z}{R_L} = 5 + \frac{12}{2} = 11 \text{ (mA)} \\
 U_i - 0.2U_i &= U_R + U_Z = IR + U_Z = 11R + 12 \\
 0.8U_i &= 11R + 12 \quad (2)
 \end{aligned}$$

联立 (1)、(2) 两式解得：

$$\begin{aligned}
 U_i &= 26 \text{ V} \\
 R &= 0.8 \text{ k}\Omega
 \end{aligned}$$

1.3.2 光电二极管

光电二极管也是一种特殊二极管。它的特点是：在电路中它一般处于反向工作状态，当没有光照射时，其反向电阻很大，PN 结流过的反向电流很小；当光线照射在 PN 结上时，就在 PN 结及其附近产生电子空穴对，电子和空穴在 PN 结的内电场作用下作定向运动，形成光电流。如果光的照度改变，光生电子空穴对的浓度也相应改变，光电流强度也随之改变。可见光电二极管能将光信号转变为电信号输出。

光电二极管可用来作为光控元件。当制成大面积的光电二极管时，能将光能直接转换为电能，可作为一种能源，因而称为光电池。

光电二极管的管壳上备有一个玻璃窗口，以便接受光照，其灵敏度的典型值为 $0.1\mu\text{A/lx}$ 数量级。光电二极管的伏安特性曲线及符号如图 1.16 所示。

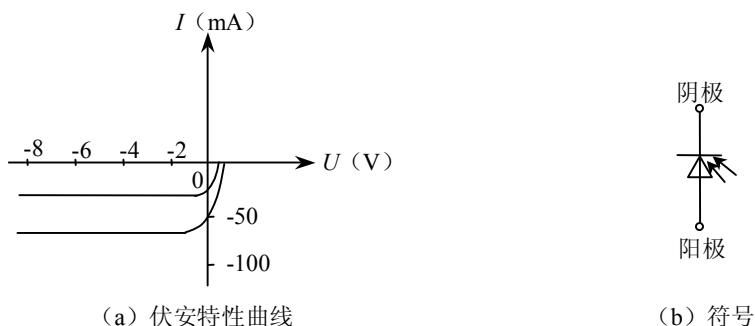


图 1.16 光电二极管的伏安特性曲线及符号

1.3.3 发光二极管

发光二极管简称为 LED，其工作原理与光电二极管相反。由于它采用砷化镓、磷化镓等半导体材料制成，所以在通过正向电流时，由于电子与空穴的直接复合而发出光来。如图 1.17 所示为发光二极管的图形符号及其正向导通发光时的工作电路。

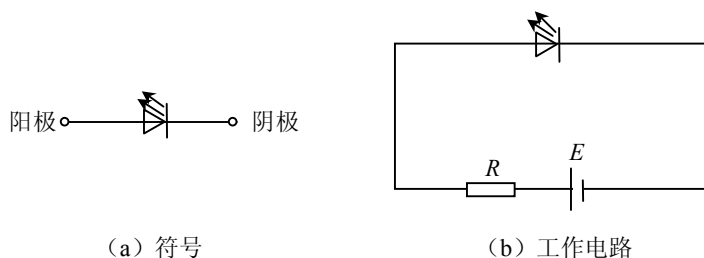


图 1.17 发光二极管的符号及其工作电路

当发光二极管正向偏置时，其发光亮度随注入的电流的增大而提高。为限制其工作电流，通常都要串接限流电阻 R 。由于发光二极管的工作电压低 ($1.5\text{V}\sim 3\text{V}$)、工作电流小 ($5\text{mA}\sim 10\text{mA}$)，所以用发光二极管作为显示器件具有体积小、显示快和寿命长等优点。

1.4 双极型三极管

双极型三极管又称为半导体三极管或晶体三极管，常简称为晶体管或三极管，是一种重要的半导体器件，是放大电路和开关电路的基本元件之一。

1.4.1 三极管的结构及类型

晶体管有 3 个管脚，如图 1.18 所示是常见晶体管的封装外形。晶体管的种类很多，按工作频率分有高频管和低频管；按耗散功率分有大、中、小功率管；按半导体材料分有硅管和锗管等。耗散功率不同的晶体管，体积及封装形式也不同。近年来生产的小、中功率管多采用硅酮塑料封装；大功率管采用金属封装，通常制成扁平形状，并有螺钉安装孔。有的大功率管制成螺栓形状，这样能使其外壳和散热器连成一体，便于散热。

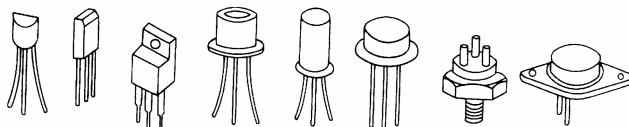


图 1.18 常见三极管的外形

晶体管的结构是由两个 PN 结构成的。目前最常见的有平面型和合金型两类，如图 1.19 所示。硅管主要是平面型，锗管都是合金型。

不论平面型还是合金型的晶体管，都分成 NPN 或 PNP 三层，因此又把晶体

管分为 NPN 型和 PNP 型两种类型。当前国内生产的硅晶体管多为 NPN 型（3D 系列），锗晶体管多为 PNP 型（3A 系列）。如图 1.20 所示为两种晶体管的结构示意图和电路符号。两种晶体管符号的区别是发射极的箭头方向不同，该箭头方向表示发射结加正向电压时的电流方向。

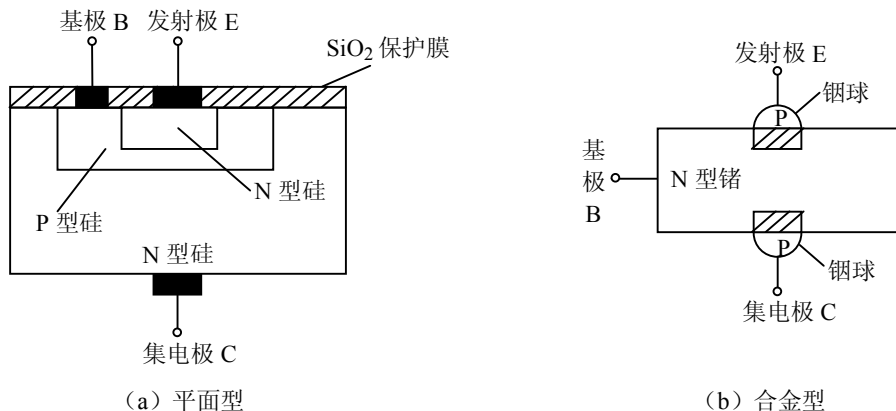


图 1.19 三极管的结构

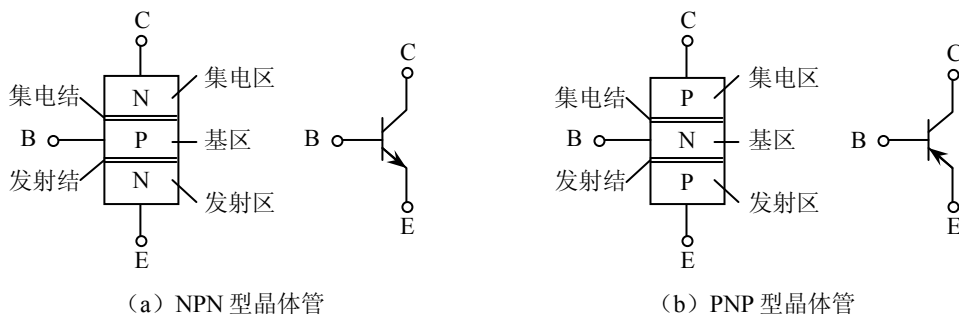


图 1.20 晶体管的结构示意图和电路符号

不论何种类型的晶体管，其内部均有发射区、基区和集电区 3 个区。从这 3 个区引出的 3 个电极分别称为发射极 E、基极 B 和集电极 C。基区和发射区之间的 PN 结称为发射结，基区与集电区之间的 PN 结称为集电结。

为保证晶体管具有电流放大作用，制造时通过工艺措施使它具有如下特点：

- (1) 发射区的掺杂浓度大，以保证有足够的载流子可供发射。
- (2) 集电区的面积大，以便收集从发射区发射来的载流子。
- (3) 基区做得很薄（一般只有 1 微米至几十微米），且掺杂浓度低，以减小基极电流，即增强基极电流的控制作用。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理相似, 不同之处仅在于使用时工作电源极性相反而已。由于应用中采用 NPN 型晶体管较多, 所以下面以 NPN 型晶体管为例进行分析讨论, 所得结论对于 PNP 型管同样适用。

1.4.2 晶体管的电流分配和电流放大作用

晶体管结构上的特点决定了它的电流放大作用的内部条件, 为了实现电流放大作用, 还必须具备一定的外部条件, 这就是要使它的发射结正向偏置, 集电结反向偏置。如图 1.21 所示为 NPN 型晶体管的电源接法: U_{BB} 是基极电源, 其极性应使发射结处于正向偏置; U_{CC} 是集电极电源, 其极性应使集电结处于反向偏置。因此, 晶体管 3 个电极的电位关系是 $U_C > U_B > U_E$ 。如果是 PNP 型晶体管, 则应改变电源的极性, 使 $U_C < U_B < U_E$ 。

下面通过分析 NPN 型晶体管内部载流子的运动规律来揭示晶体管为什么具有电流放大作用。图 1.21 中给出了晶体管内部载流子的运动情况。如图 1.22 所示是晶体管各电极电流的分配情况。

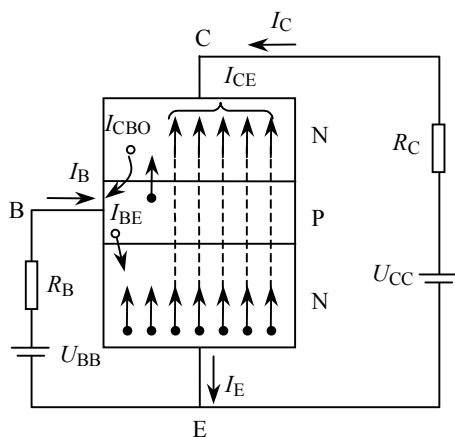


图 1.21 晶体管中载流子的运动情况

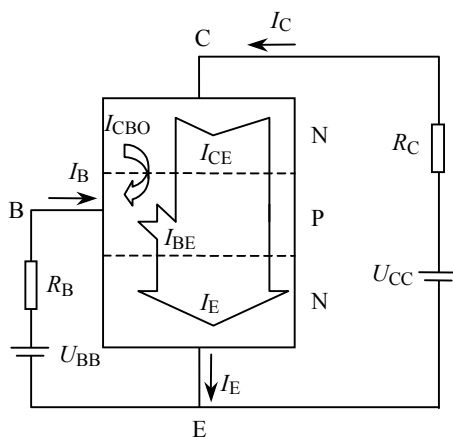


图 1.22 晶体管各极电流的分配关系

1. 晶体管中载流子的运动情况

(1) 发射区向基区扩散电子。由于发射结处于正向偏置, 多数载流子的扩散运动加强, 发射区的自由电子 (多数载流子) 不断扩散到基区, 并不断从电源补充进电子, 形成发射极电流 I_E 。

(2) 电子在基区扩散和复合。从发射区扩散到基区的自由电子起初都聚集在发射结附近, 靠近集电结的自由电子很少, 形成了浓度上的差别, 因而自由电子向集电结方向继续扩散。由于基区做得很薄, 所以自由电子只有很少的一部分与

基区中的空穴复合，所形成的电流记为 I_{BE} 。因基区的空穴是电源 U_{BB} 提供的，故 I_{BE} 是基极电流 I_B 的主要成分。

(3) 集电区收集电子。由于集电结反向偏置，它有利于该 PN 结两边半导体中少数载流子的运动（漂移），而对多数载流子的扩散运动起阻挡作用，即阻挡集电区的自由电子向基区扩散，但可以将从发射区扩散到基区并到达集电区边缘的自由电子拉入集电区，从而形成电流 I_{CE} ，它是集电极电流 I_C 中的主要成分。此外，还有集电区的少数载流子（空穴）和基区的少数载流子（电子）漂移运动所形成的反向电流，称为集电极—基极间的反向饱和电流，用 I_{CBO} 表示。 I_{CBO} 的数值很小，它构成集电极电流 I_C 和基极电流 I_B 的一小部分。

由以上分析可知，晶体管的工作依赖于两种载流子：电子和空穴，因此又称之为双极型晶体管（常缩写为 BJT）。

2. 晶体管各极电流的分配关系

由图 1.22 可得晶体管各电极的电流分别为：

$$\begin{aligned} \text{集电极} \quad I_C &= I_{CE} + I_{CBO} \\ \text{基极} \quad I_B &= I_{BE} - I_{CBO} \\ \text{发射极} \quad I_E &= I_{CE} + I_{BE} \end{aligned}$$

由以上 3 式可得 3 个电极的电流关系为：

$$I_E = I_C + I_B$$

如上所述，从发射区扩散到基区的电子中只有很小一部分在基区复合形成电流 I_{BE} ，绝大部分到达集电区形成电流 I_{CE} 。也就是说，构成发射极电流 I_E 的两部分中， I_{BE} 部分是很小的，而 I_{CE} 部分所占的百分比大，这个比值用 $\bar{\beta}$ 表示，即：

$$\bar{\beta} = \frac{I_{CE}}{I_{BE}} = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_B + I_{CBO}} \approx \frac{I_C}{I_B}$$

$\bar{\beta}$ 表征晶体管的电流放大能力，称为电流放大系数。

通常， $\bar{\beta} = 20 \sim 200$ 。控制基极回路的小电流 I_B 即能实现对集电极回路的大电流 I_C 的控制，这就是晶体管的电流放大作用。

1.4.3 晶体管的特性曲线

晶体管的特性曲线是用来表示该晶体管各电极电压和电流之间相互关系的，它反映了晶体管的性能，是设计、分析放大电路的重要依据。最常用的是共发射极接法的输入特性曲线和输出特性曲线。这些特性曲线可以用晶体管特性图示仪直接测出，也可以通过如图 1.23 所示的实验电路测绘出来。

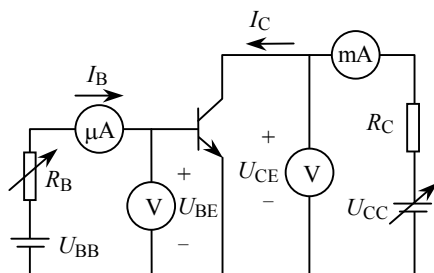


图 1.23 测量晶体管特性的实验电路

1. 输入特性曲线

输入特性曲线是指当 U_{CE} 为常数时，晶体管输入回路中基极电流 I_B 与基极、射极电压 U_{BE} 之间的关系曲线，即：

$$I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE}=\text{常数}}$$

如图 1.24 所示为一簇实测的输入特性曲线。由图可见，晶体管的输入特性曲线与二极管的正向特性曲线相似。和二极管一样，晶体管输入特性也有死区。硅管死区电压约为 $0.5V$ ，锗管约为 $0.2V$ 。晶体管导通时，NPN 型硅管发射结电压 $U_{BE} = 0.6V \sim 0.7V$ ，PNP 型锗管的 $U_{BE} = -0.2V \sim -0.3V$ 。

此外，从图上还可以看到， $U_{CE} \geq 1V$ 时的各条输入特性曲线很接近。这是因为对于硅管来说，当 $U_{CE} \geq 1V$ 时，集电结已反向偏置，并且内电场已足够强，而基区又很薄，可以把从发射区扩散到基区的电子中的绝大部分拉入集电区。此时，只要 U_{BE} 保持不变，即使 U_{CE} 增加， I_B 也不会有明显的减小。这就是说， $U_{CE} > 1V$ 以后的输入特性曲线基本上是重合的。所以，通常只画出 $U_{CE} \geq 1V$ 的一条输入特性曲线即可。

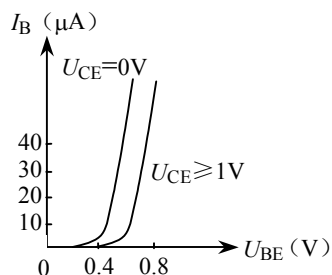


图 1.24 晶体管的输入特性曲线

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是指当基极电流 I_B 恒定时，晶体管输出回路中集电极电流 I_C 与集电极、射极电压 U_{CE} 之间的关系曲线，即：

$$I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B=\text{常数}}$$

在不同的基极电流 I_B 值下，输出特性曲线是一簇曲线，如图 1.25 所示。

由图 1.25 可见，当基极电流 I_B 一定时，随着 U_{CE} 从零增加，集电极电流 I_C 先直线上升，然后趋于平直。这是因为从发射区扩散到基区的电子数量大致是一

定的。在 $U_{CE} \geq 1V$ 以后，这些电子的绝大部分已经被拉入集电区而形成 I_C ，以致当 U_{CE} 继续增加时， I_C 也不再有明显增加，具有恒流特性，且满足 $I_C = \bar{\beta} I_B$ 。当 I_B 增大时，相应的 I_C 也增大，曲线上移，体现了晶体管的电流放大作用。

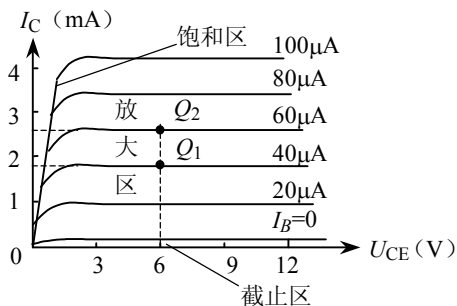


图 1.25 晶体管的输出特性曲线

通常把晶体管的输出特性曲线分为放大区、截止区和饱和区 3 个工作区，如图 1.25 所示。

(1) 放大区。输出特性曲线近于水平的部分是放大区。在放大区， $I_C = \bar{\beta} I_B$ 。因为在放大区 I_C 和 I_B 成正比例，所以放大区也称为线性区。当 I_B 固定时， I_C 也基本不变，具有恒流的特性；当 I_B 变化时， I_C 也有相应的变化，表明 I_C 是受 I_B 控制的受控源。如前所述，晶体管工作于放大状态时，发射结处于正向偏置，集电结处于反向偏置，即对 NPN 型管而言，应使 $U_{BE} > 0V$ ， $U_{BC} < 0V$ 。

(2) 截止区。在图 1.25 中， $I_B = 0$ 这条曲线及以下的区域称为截止区。 $I_B = 0$ 时， $I_C = I_E = I_{CEO}$ 。对于 NPN 型管而言，当 $U_{BE} < 0.5V$ 时，即已开始截止，但是为了截止可靠，常使 $U_{BE} < 0V$ ，截止时集电结也处于反向偏置。

(3) 饱和区。在图 1.25 中，靠近纵坐标特性曲线的上升和弯曲部分所对应的区域称为饱和区。在饱和区， $U_{CE} < U_{BE}$ ，集电结处于正向偏置，此时的 U_{CE} 值常称为晶体管的饱和压降，用 U_{CES} 表示。小功率硅管的 U_{CES} 通常小于 $0.5V$ 。由于在饱和区 I_C 不随 I_B 的增大而成比例地增大，因而晶体管失去了线性放大作用，故称为饱和。饱和时，发射结也处于正向偏置。

1.4.4 晶体管的主要参数

晶体管的特性也可以用一些数据来说明，这些数据就是晶体管的参数。晶体管的参数是设计电路、选用晶体管的依据。其主要参数有：

(1) 电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 β 。电流放大系数分为静态电流（直流）放大系数 $\bar{\beta}$ 和动态电流（交流）放大系数 β 两种。 $\bar{\beta}$ 的意义如前所述。 β 是指晶体管工作在动

态（有输入信号）时，基极电流的变化量 ΔI_B 引起集电极电流的变化量 ΔI_C ， ΔI_C 与 ΔI_B 的比值为：

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

例 1.5 由图 1.25 给出的晶体管输出特性曲线：（1）计算 Q_1 点处的 $\bar{\beta}$ ；（2）由 Q_1 和 Q_2 两点计算 β 。

解 （1）在 Q_1 点处， $U_{CE} = 6\text{V}$ ， $I_B = 40\mu\text{A} = 0.04\text{mA}$ ， $I_C = 1.7\text{mA}$ ，故：

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{1.7}{0.04} = 42.5$$

（2）在 Q_2 点处， $U_{CE} = 6\text{V}$ ， $I_B = 60\mu\text{A} = 0.06\text{mA}$ ， $I_C = 2.6\text{mA}$ ，故由 Q_1 和 Q_2 两点得：

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{2.6 - 1.7}{0.06 - 0.04} = \frac{0.9}{0.02} = 45$$

由上述可见， $\bar{\beta}$ 与 β 的定义不同，在手册中一般用 h_{FE} 代表 $\bar{\beta}$ ，用 h_{fe} 代表 β 。在常用的工作范围内， $\bar{\beta}$ 与 β 的数值较为接近，因此在估算时可令 $\bar{\beta} \approx \beta$ ，并统一用 β 表示。

由于制造工艺的分散性，即使同一型号的晶体管， β 值也有很大的差别。常用晶体管的 β 在 20~200 之间。 β 太小，放大作用小； β 太大，温度稳定性差。一般在放大电路中，以 $\beta = 100$ 左右为好。

（2）集—基极反向截止电流 I_{CBO} 。 I_{CBO} 是指当发射极开路时，由于集电结处于反向偏置，集电区和基区中的少数载流子的漂移运动所形成的反向电流（如图 1.26（a）所示） I_{CBO} 受温度影响大，此值越小，温度稳定性越好。在室温下，小功率锗管的 I_{CBO} 约为几微安到几十微安；小功率硅管则在 $1\mu\text{A}$ 以下。

（3）集—射极反向截止电流 I_{CEO} 。 I_{CEO} 是指基极开路时，从集电极穿越集电区、基区和发射区到达发射极的电流，通常称为穿透电流，如图 1.26（b）所示。

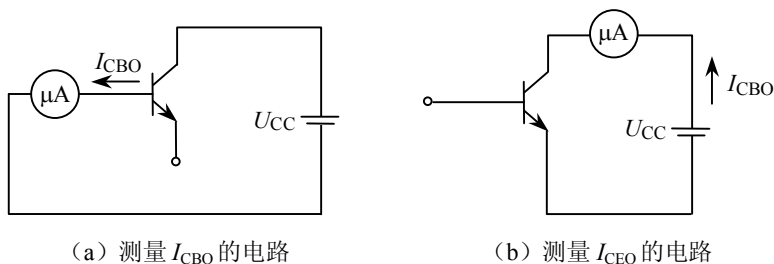


图 1.26 测量 I_{CBO} 及 I_{CEO} 的电路

基极开路时，从集电区漂移到基区的空穴（即 I_{CBO} ）全部与从发射区扩散到基区的电子复合。由晶体管的放大作用可知，从发射区扩散到达集电区的电子数应为在基区与空穴复合的电子数的 $\bar{\beta}$ 倍，故：

$$I_{CEO} = \bar{\beta}I_{CBO} + I_{CBO} = (1 + \beta)I_{CBO}$$

由于 I_{CBO} 受温度影响很大，当温度上升时， I_{CBO} 增加很快，故 I_{CEO} 增加也快。因此， I_{CBO} 越大、 $\bar{\beta}$ 越大的管子，则 I_{CEO} 越大，稳定性越差。

(4) 集电极最大允许电流 I_{CM} 。在 I_C 的一个很大范围内， β 值基本不变，但是当 I_C 超过一定数值之后， β 值将明显下降。 β 值下降到正常数值的 $2/3$ 时的集电极电流称为集电极最大允许电流 I_{CM} 。因此，在使用晶体管时， I_C 超过 I_{CM} 并不一定会使晶体管损坏，但以降低 β 值为代价。

(5) 集—射极反向击穿电压 $U_{(BR)CEO}$ 。 $U_{(BR)CEO}$ 是指基极开路时，集电极与发射极之间的最大允许电压。当晶体管的集—射极电压 U_{CE} 大于 $U_{(BR)CEO}$ 时， I_{CEO} 突然大幅度上升，说明晶体管已击穿。手册中给出的 $U_{(BR)CEO}$ 一般为温度 25°C 时的值。在高温下，晶体管的 $U_{(BR)CEO}$ 值将降低，使用时应特别注意。

(6) 集电极最大允许耗散功率 P_{CM} 。晶体管工作时，由于集电结承受较高的反向电压并通过较大的电流，将因消耗功率而发热，使结温升高。 P_{CM} 是指在允许结温（硅管约为 150°C ，锗管为 70°C ）下，集电极允许消耗的最大功率，称为集电极最大允许耗散功率。

如果一个管子的 P_{CM} 值已确定，则由：

$$P_{CM} = I_C U_{CE}$$

可以在晶体管输出特性曲线上作出 P_{CM} 曲线，它是一条双曲线。

I_{CM} 、 $U_{(BR)CEO}$ 和 P_{CM} 称为晶体管的极限参数，由它们共同确定晶体管的安全工作区，如图 1.27 所示。

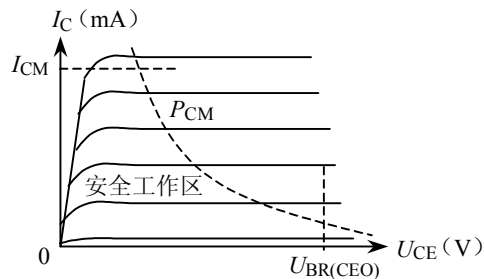


图 1.27 晶体管的安全工作区

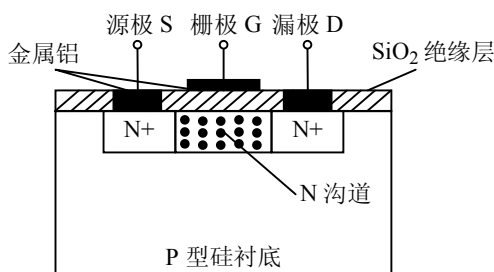
1.5 场效应晶体管

场效应晶体管是一种电压控制型半导体器件，它具有输入电阻高（可达 $10^9\Omega\sim 10^{14}\Omega$ ，而晶体管的输入电阻仅有 $10^2\Omega\sim 10^4\Omega$ ）、噪声低、热稳定性好、抗辐射能力强、耗电省等优点，目前已广泛地应用于各种电子电路中。

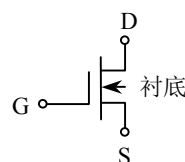
场效应管按其结构的不同分为结型和绝缘栅型两种。其中绝缘栅型由于制造工艺简单，便于实现集成电路，因此发展很快。本书仅介绍绝缘栅型场效应管。

1.5.1 绝缘栅型场效应管的结构

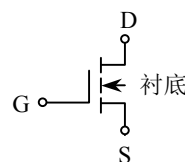
根据导电沟道的不同，绝缘栅型场效应管可分为N型沟道和P型沟道两类。如图1.28(a)所示为N沟道绝缘栅型场效应管的结构示意图，它是用一块杂质浓度较低的P型薄硅片作衬底，在上面扩散两个杂质浓度很高的N+区，分别用金属铝各引出一个电极，称为源极S和漏极D。在半导体表面覆盖一层二氧化硅（ SiO_2 ）绝缘层，在漏极和源极之间的绝缘层上也引出一个电极，称为栅极G。



(a) N 沟道绝缘栅型场效应管的结构



(b) N 沟道耗尽型场效应管的符号



(c) N 沟道增强型场效应管的符号

图 1.28 N 沟道绝缘栅型场效应管的结构和电路符号

因为栅极和其他电极及硅片之间是绝缘的，所以称为绝缘栅场效应管。又由于它是由金属、氧化物和半导体所构成，所以又称为金属—氧化物—半导体场效应管（简称为 MOSFET），简称 MOS 管。正因为栅极是绝缘的，所以 MOS 管的栅极电流几乎为零，输入电阻 R_{GS} 很高，可达 $10^{14}\Omega$ 。

如果在制造 MOS 管时，在 SiO_2 绝缘层中掺入大量的正离子以产生足够强的内电场，使得 P 型衬底的硅表层的多数载流子空穴被排斥开，从而感应出很多的负电荷，使漏极与源极之间形成 N 型导电沟道，如图 1.28 (a) 所示。这样，即使栅极和源极之间不加电压 ($U_{\text{GS}} = 0$)，漏极和源极之间已经存在原始导电沟道，这种场效应管称为耗尽型场效应管。N 沟道耗尽型场效应管的电路符号如图 1.28 (b) 所示。

如果在 SiO_2 绝缘层中没有掺入正离子，或掺入的正离子数量较少而不足以形成原始导电沟道，只有在栅极和源极之间加一个正电压 ($U_{\text{GS}} > 0$) 时才能形成导电沟道，这种场效应管称为增强型场效应管。N 沟道增强型场效应管的电路符号如图 1.28 (c) 所示。

如果在制作场效应管时采用 N 型硅片作衬底，漏极和源极为 P+型，则导电沟道为 P 型，如图 1.29 (a) 所示。P 沟道耗尽型场效应管和 P 沟道增强型场效应管的电路符号分别如图 1.29 (b) 和图 1.29 (c) 所示。

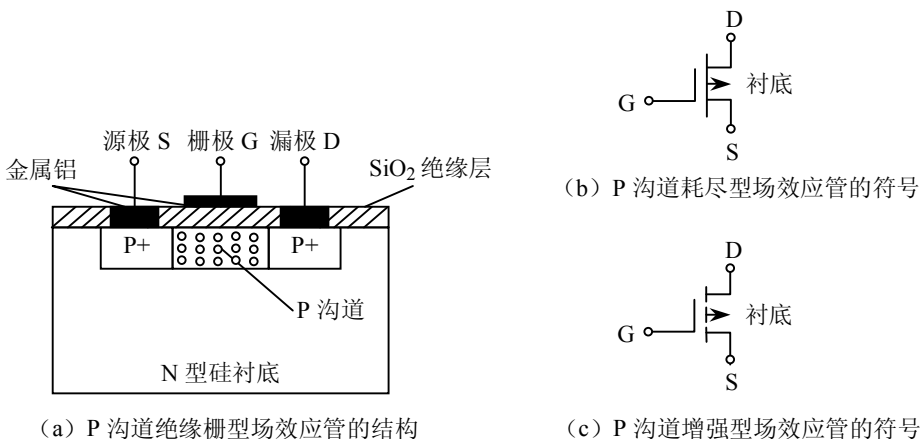


图 1.29 P 沟道绝缘栅型场效应管的结构和电路符号

N 沟道场效应管与 P 沟道场效应管的工作原理是一样的，只是两者电源极性 & 电流方向相反而已。这和 NPN 型与 PNP 型晶体管的电源极性及电流方向相反的道理是相同的。

无论是 N 沟道场效应管还是 P 沟道场效应管，都只有一种载流子导电，均为单极型电压控制器件。

1.5.2 绝缘栅型场效应管的工作原理和特性曲线

下面以 N 沟道场效应管为例说明场效应管的工作原理。

在 U_{DS} 为常数的条件下, 漏极电流 I_D 与栅极和源极间的电压 U_{GS} 之间的关系曲线称为场效应管的转移特性。在 U_{GS} 为常数的条件下, 漏极电流 I_D 与漏极和源极间的电压 U_{DS} 之间的关系曲线称为场效应管的漏极(输出)特性。

1. 耗尽型场效应管

如图 1.30 (a) 所示是 N 沟道耗尽型场效应管的转移特性曲线。耗尽型场效应管存在原始导电沟道, 在 $U_{GS} = 0$ 时漏极和源极之间可以导电。这时在外加漏、源电压 U_{DS} 的作用下, 流过场效应管的漏极电流称为漏极饱和电流, 用 I_{DSS} 表示。当 $U_{GS} > 0$ 时, 沟道内感应出的负电荷增多, 使导电沟道加宽, 沟道电阻减小, I_D 增大; 当 $U_{GS} < 0$ 时, 会在沟道内产生出正电荷与原始负电荷复合, 使沟道变窄, 沟道电阻增大, I_D 减小; 当 U_{GS} 达到一定负值时, 导电沟道内的载流子全部复合耗尽, 沟道被夹断, $I_D = 0$, 这时的 U_{GS} 称为夹断电压, 用 $U_{GS(off)}$ 表示。

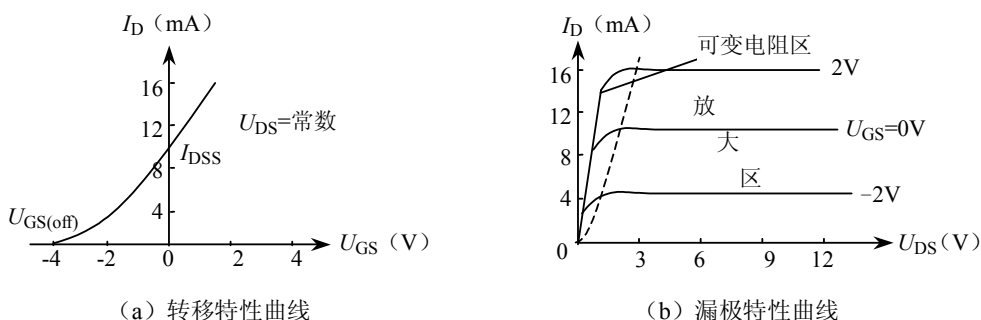


图 1.30 N 沟道耗尽型场效应管的特性曲线

如图 1.30 (b) 所示为 N 沟道耗尽型场效应管的漏极特性曲线。按场效应管的工作情况可以将漏极特性曲线分为两个区域。在虚线左边的区域内, 漏、源电压 U_{DS} 相对较小, 漏极电流 I_D 随 U_{DS} 的增加而增加, 输出电阻 $r_o = \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta I_D}$ 较小, 且可以通过改变栅、源电压 U_{GS} 的大小来改变输出电阻 r_o 的阻值, 所以这一区域称为可变电阻区。在虚线右边的区域内, 当栅、源电压 U_{GS} 为常数时, 漏极电流 I_D 几乎不随漏、源电压 U_{DS} 的变化而变化, 特性曲线趋于与横轴平行, 输出电阻 r_o 很大, 在栅、源电压 U_{GS} 增大时, 漏极电流 I_D 随 U_{GS} 线性增大, 所以这一区域称为放大区。

2. 增强型场效应管

如图 1.31 (a) 所示是 N 沟道增强型场效应管的转移特性。增强型场效应管不存在原始导电沟道, 在 $U_{GS} = 0$ 时场效应管不能导通, $I_D = 0$ 。如果在栅极和源极之间加一正向电压 U_{GS} , 在 U_{GS} 的作用下, 会产生垂直于衬底表面的电场。P

型衬底与 SiO_2 绝缘层的界面将感应出负电荷层, 随着 U_{GS} 的增加, 负电荷的数量也增多, 当积累的负电荷足够多时, 使两个 N+ 区沟通形成导电沟道, 漏、源极之间便有 I_{D} 出现。在一定的漏、源电压 U_{DS} 下, 使管子由不导通转为导通的临界栅、源电压称为开启电压, 用 $U_{\text{GS(th)}}$ 表示。当 $U_{\text{GS}} < U_{\text{GS(th)}}$ 时, $I_{\text{D}} = 0$; 当 $U_{\text{GS}} > U_{\text{GS(th)}}$ 时, 随 U_{GS} 的增加 I_{D} 也随之增大。

如图 1.31 (b) 所示为 N 沟道增强型场效应管的漏极特性曲线, 它与耗尽型场效应管的漏极特性曲线相似。

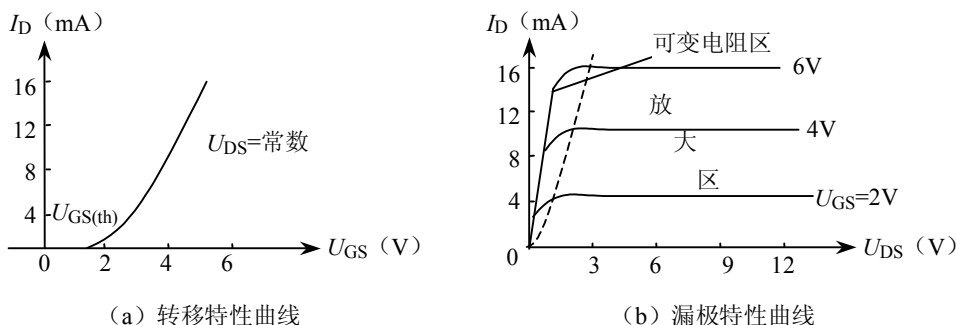


图 1.31 N 沟道增强型场效应管的特性曲线

综上所述, 场效应管的漏极电流 I_{D} 受栅、源电压 U_{GS} 的控制, 即 I_{D} 随 U_{GS} 的变化而变化, 所以场效应管是一种电压控制器件。

1.5.3 场效应管的主要参数

场效应管的主要参数除前面提到的输入电阻 R_{GS} 、漏极饱和电流 I_{DSS} 、输出电阻 r_{o} 、夹断电压 $U_{\text{GS(off)}}$ 和开启电压 $U_{\text{GS(th)}}$ 外, 还有以下重要参数:

(1) 跨导 g_{m} 。在 U_{DS} 为定值时, 漏极电流 I_{D} 的变化量 ΔI_{D} 与引起这个变化的栅、源电压 U_{GS} 的变化量 ΔU_{GS} 的比值称为跨导, 即:

$$g_{\text{m}} = \left. \frac{\Delta I_{\text{D}}}{\Delta U_{\text{GS}}} \right|_{U_{\text{DS}}=\text{常数}}$$

跨导 g_{m} 表示场效应管栅、源电压 U_{GS} 对漏极 I_{D} 控制作用的大小, 是反映场效应管放大作用的重要参数, 单位是 $\mu\text{A/V}$ 或 mA/V 。

(2) 通态电阻。在确定的栅、源电压 U_{GS} 下, 场效应管进入饱和导通时, 漏极和源极之间的电阻称为通态电阻。通态电阻的大小决定了管子的开通损耗。

(3) 最大漏、源击穿电压 $U_{\text{DS(BR)}}$ 。指漏极与源极之间的反向击穿电压。

(4) 漏极最大耗散功率 P_{DM} 。漏极耗散功率 $P_{\text{D}} = U_{\text{DS}} I_{\text{D}}$ 的最大允许值, 是

从发热角度对管子提出的限制条件。

由于绝缘栅场效应管的输入电阻很高,栅极上积累的电荷很难泄漏,所以容易产生较高的静电电压将绝缘层击穿。为了避免这种损坏,在保存场效应管时应将它的3个电极短接起来。在电路中,栅、源极间应有固定电阻或稳压管并联,以保证有一定的直流通路。在焊接时,应使电烙铁外壳良好接地。



(1) PN结是构成一切半导体器件的基础。PN结具有单向导电性,加正向电压时导通,其电阻很小;加反向电压时截止,其反向电阻很大。

(2) 二极管和稳压管、光电二极管、发光二极管都是由一个PN结构成,它们的正向特性很相似。二极管的应用很广,正常工作时不允许反向击穿,一旦击穿就会造成永久性的损坏。稳压管正常工作时必须处于反向击穿状态,且反向击穿时动态电阻很小,即电流在允许范围内变化时,稳定电压 U_Z 基本不变。光电二极管正常工作时必须加反向电压,有光照射时反向电流增大,可作为光控元件。发光二极管正常工作时必须加正向电压,有电流通过时会发出光来,可作为显示器件。

(3) 晶体管具有两个PN结,有NPN和PNP两种管型。晶体管的主要功能是可以较小的基极电流控制较大的集电极电流,控制能力用电流放大系数 β 表示。晶体管有3种工作状态。工作在放大状态时发射结正偏、集电结反偏,集电极电流随基极电流成比例变化。工作在截止状态时发射结和集电结均反偏,集电极与发射极之间基本上无电流通过。工作在饱和状态时发射结和集电结均正偏,集电极与发射极之间有较大的电流通过,两极之间的电压降很小。后两种情况集电极电流均不受基极电流控制。

(4) 场效应管是一种单极型半导体器件。场效应管的基本功能是用栅、源极间电压控制漏极电流,具有输入电阻高、噪声低、热稳定性好、耗电省等优点。场效应管的源极、漏极和栅极分别相当于双极型晶体管的发射极、集电极和基极。



1.1 在如图1.32所示的各个电路中,已知直流电压 $U_i = 3\text{ V}$,电阻 $R = 1\text{ k}\Omega$,二极管的正向压降为 0.7 V ,求 U_o 。

1.2 在如图1.33所示的各个电路中,已知输入电压 $u_i = 10\sin\omega t\text{ V}$,二极管的正向压降可以忽略不计,试分别画出各电路的输入电压 u_i 和输出电压 u_o 的波形。

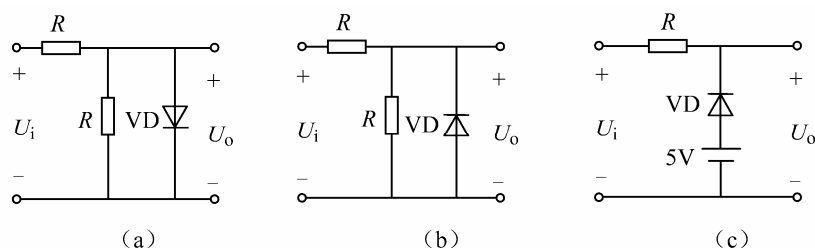


图 1.32 习题 1.1 的图

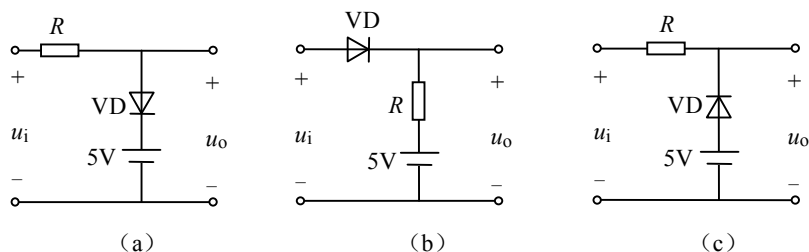


图 1.33 习题 1.2 的图

1.3 在如图 1.34 所示的电路中, 试求下列几种情况下输出端 F 的电位 U_F 及各元件 (R 、 VD_A 、 VD_B) 中的电流, 图中的二极管为理想元件。

- (1) $U_A = U_B = 0 \text{ V}$ 。
- (2) $U_A = 3 \text{ V}$, $U_B = 0 \text{ V}$ 。
- (3) $U_A = U_B = 3 \text{ V}$ 。

1.4 在如图 1.35 所示的电路中, 试求下列几种情况下输出端 F 的电位 U_F 及各元件 (R 、 VD_A 、 VD_B) 中的电流, 图中的二极管为理想元件。

- (1) $U_A = U_B = 0 \text{ V}$ 。
- (2) $U_A = 3 \text{ V}$, $U_B = 0$ 。
- (3) $U_A = U_B = 3 \text{ V}$ 。

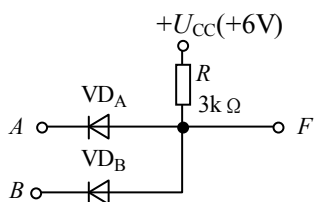


图 1.34 习题 1.3 的图

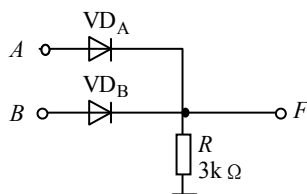


图 1.35 习题 1.4 的图

1.5 在如图 1.36 所示的电路中, 已知 $E = 10 \text{ V}$, $e = 30 \sin \omega t \text{ V}$ 。试用波形图表示二极管

上的电压 u_D 。

1.6 在如图 1.37 所示的电路中, 已知 $E = 20\text{ V}$, $R_1 = 900\ \Omega$, $R_2 = 1100\ \Omega$ 。稳压管 VD_Z 的稳定电压 $U_Z = 10\text{ V}$, 最大稳定电流 $I_{ZM} = 8\text{ mA}$ 。试求稳压管中通过的电流 I_Z , 并判断 I_Z 是否超过 I_{ZM} , 如果超过, 怎么办?

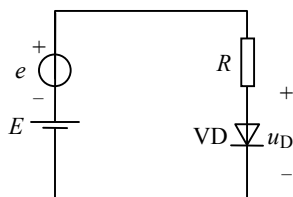


图 1.36 习题 1.5 的图

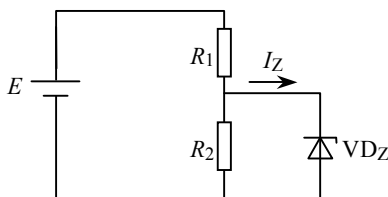


图 1.37 习题 1.6 的图

1.7 有两个稳压管 VD_{Z1} 和 VD_{Z2} , 其稳定电压分别为 5.5 V 和 8.5 V , 正向压降都是 0.5 V , 如果要得到 0.5 V 、 3 V 、 6 V 、 9 V 和 14 V 几种稳定电压, 这两个稳压管 (还有限流电阻) 应该如何连接, 画出各个电路。

1.8 在一放大电路中, 测得某晶体管 3 个电极的对地电位分别为 -6 V 、 -3 V 、 -3.2 V , 试判断该晶体管是 NPN 型还是 PNP 型, 锗管还是硅管, 并确定 3 个电极。

1.9 晶体管工作在放大区时, 要求发射结上加正向电压, 集电结上加反向电压。试就 NPN 型和 PNP 型两种情况讨论:

(1) U_C 和 U_B 的电位哪个高? U_{CB} 是正还是负?

(2) U_B 和 U_E 的电位哪个高? U_{BE} 是正还是负?

(3) U_C 和 U_E 的电位哪个高? U_{CE} 是正还是负?

1.10 一个晶体管的基极电流 $I_B = 80\ \mu\text{ A}$, 集电极电流 $I_C = 1.5\text{ mA}$, 能否从这两个数据来确定它的电流放大系数? 为什么?

1.11 若晶体管的发射结和集电结都加正向电压, 则集电极电流 I_C 将比发射结加正向电压、集电结加反向电压时更大, 这对晶体管的放大作用是否更为有利? 为什么?

1.12 有两个晶体管, 一个管子的 $\beta = 150$ 、 $I_{CEO} = 200\ \mu\text{ A}$, 另一个管子的 $\beta = 50$ 、 $I_{CEO} = 10\ \mu\text{ A}$, 其他参数都一样, 哪个管子的性能更好一些? 为什么?

1.13 有一晶体管的 $P_{CM} = 100\text{ mW}$, $I_{CM} = 20\text{ mA}$, $U_{(BR)CEO} = 30\text{ V}$, 试问在下列几种情况下, 哪种为正常工作状态?

(1) $U_{CE} = 3\text{ V}$, $I_C = 10\text{ mA}$ 。

(2) $U_{CE} = 2\text{ V}$, $I_C = 40\text{ mA}$ 。

(3) $U_{CE} = 8\text{ V}$, $I_C = 18\text{ mA}$ 。

1.14 某场效应管漏极特性曲线如图 1.38 所示, 试判断:

(1) 该管属哪种类型? 画出其符号。

- (2) 该管的夹断电压 $U_{GS(off)}$ 大约是多少？
- (3) 该管的漏极饱和电流 I_{DSS} 大约是多少？

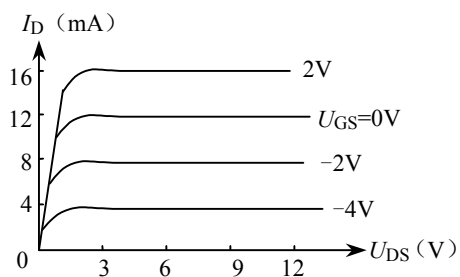


图 1.38 习题 1.14 的图

1.15 试由图 1.38 所示的场效应管漏极特性曲线画出 $U_{DS} = 6V$ 时的转移特性曲线，并求出管子的跨导 g_m 。

