

---

# 第 1 章 常用半导体元器件

---

半导体元器件是用半导体材料制成的电子元器件，随着电子技术的飞速发展，各种新型半导体元器件层出不穷。半导体元器件是组成各种电子电路的核心元件，学习电子技术必须首先了解半导体元器件的基本结构和工作原理，掌握它们的特性和参数。本章从讨论半导体的导电特性和 PN 结的单向导电性开始，分别介绍二极管、双极型晶体管、绝缘栅场效应晶体管和半导体光电器件等常用的半导体元器件。

## 1.1 半导体的导电特性

### 1.1.1 导体、绝缘体和半导体

自然界的物质，按导电能力的强弱可分为导体、绝缘体和半导体三类。物质的导电能力可以用电导率或电阻率来衡量，二者互为倒数。物质的导电能力越强，其电导率越大，电阻率越小。

导电能力很强的物质称为导体。金属一般都是导体，如银、铜、铝、铁等。原因是其原子最外层的电子受原子核的束缚作用很小，可以自由移动，成为自由电子。在外电场作用下，自由电子逆电场方向运动而形成电流。导体的主要特征是电阻率很小，一般在  $0.01 \sim 1 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  之间，例如铜的电阻率为  $0.0175 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。

绝缘体是导电能力极弱的物质。这种物质的核外电子被束缚得很紧，因而不能自由移动。如橡胶、塑料、陶瓷、石英等都是绝缘体。绝缘体的电阻率大于  $10^{14} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。

半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。其电阻率在  $10 \sim 10^{13} \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  之间。如硅、锗、硒、砷化镓等都属于半导体。例如，在 27℃ 时，纯硅的电阻率为  $21 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ ；纯锗的电阻率为  $47 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ 。此外，半导体还具有不同于其他物质的一些特性：

(1) 热敏特性 金属的电阻率随温度的变化很小，例如，温度每升高 1℃，铜的电阻率增加 0.4% 左右，即温度升高 100℃，电阻率增加不到一半。

而半导体的导电能力对温度变化反应灵敏，电阻率随温度升高而显著降低。例如，纯锗在温度从 20℃ 升高到 30℃ 时，其电阻率就要降低一半左右。利用这种特性可以制成各种半导体热敏元件，用来检测温度变化。

(2) 光敏特性 金属的电阻率不受光照的影响，但半导体的导电能力对光照敏感，光照可使半导体的电阻率显著减小。利用这种特性可以制成各种光敏元件。

(3) 掺杂特性 金属中含有少量杂质时，电阻率没有显著变化。但若在纯净的半导体中加入微量杂质，其电阻率会发生很大变化，导电能力可增加几十万乃至几百万倍。例如在纯硅中掺入百分之一的硼后，硅的电阻率会从  $21 \times 10^8 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  降到  $4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$  左右。利用这种特性可制成半导体二极管，三极管，场效应晶体管及晶闸管等各种不同用途的半导体器件。

为什么半导体会有这些不同于其他物质的特点呢？这要从其原子结构去分析。

#### 1.1.2 半导体的原子结构和共价键

在现代电子技术中，用得最多的半导体是锗和硅，它们的原子结构如图 1-1 所示。锗和硅的最外层电子都是 4 个，因此都是四价元素。最外层电子受原子核束缚力最小，称为价电子。物质的化学性质是由价电子数决定的，半导体的导电性质也与价电子有关。

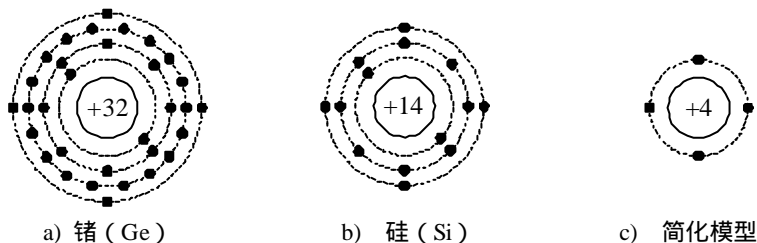


图 1-1 锗和硅的原子结构

根据原子之间排列形式的不同，可把物质分成晶体和非晶体两大类。所谓晶体就是这些物质的原子是按一定的规则整齐地排列着，组成某种形式的晶体点阵。现在所用的半导体材料都制成晶体。例如，将锗和硅材料提纯并形成单晶体后，锗和硅原子就是按四角形系统组成晶体点阵，即每个原子处于正四面体中心，而有四个其他原子位于四面体的顶点，如图 1-2 所示。由于原子之间靠得很近，原来分属于每个离子的价电子就要受到相邻原子的影响而使价电子为两个原子所共有，即形成了晶体中的共价键结构。图 1-3 是

硅晶体中共价键结构平面示意图。

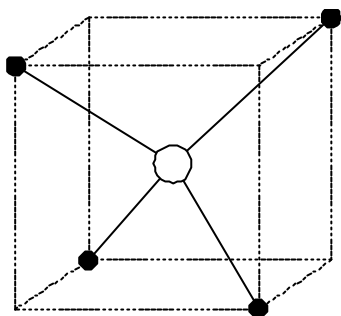


图 1-2 晶体中原子的排列方式

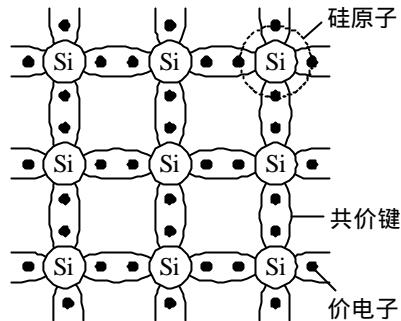


图 1-3 硅晶体中的共价键结构平面示意图

1.1.3 本征半导体的导电机理

本征半导体就是完全纯净的，具有完整晶体结构的半导体。它是相对于杂质半导体而言的。例如，纯锗和纯硅。

本征半导体共价键结构中的电子受到两个原子核的吸引力而被束缚。它们不象导体中的价电子那么自由，但也不像绝缘体中的电子被束缚得那么紧。在室温下，由于热激发，会使一些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子。这种现象叫做本征激发。当电子跑出其价键成为自由电子后，共价键中就留下一个空位，这个空位称作空穴。在本征半导体中，自由电子和空穴总是成对出现的，有一个自由电子就有一个空穴，如图 1-4 所示。挣脱共键价束缚的电子类似于导体中的自由电子，在电场的作用下将逆电场方向运动形成电流。那么空穴是否也能移动并参与导电呢？失去价电子的原子成为带正电的正离子，因此可以把空穴看成是带正电的粒子，它能够吸引邻近共键中的价电子来填补这个空穴。这时失去了价电子的邻近共价键中出现的空穴又可以吸引其邻近的价电子来递补，从而又出现一个空穴。如此进行下去，就相当于空穴在移动。空穴是带正电的，价电子填充空穴的移动相当于带正电荷的粒子(空穴)的移动，也会形成电流。

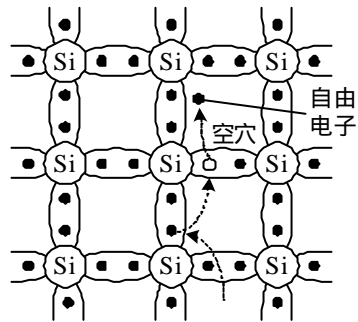


图 1-4 空穴和自由电子的形成

总之,在外加电场作用下,半导体中出现两部分电流:即自由电子作定向移动而形成的电子电流和仍被原子核束缚的价电子递补空穴而形成的空穴电流。因此,自由电子和空穴都称为载流子。两种载流子同时参与导电是半导体导电方式的最大特点,也是半导体和金属在导电原理上的本质区别所在。

自由电子会不会填补空穴呢?会的,自由电子填补空穴叫做复合。在一定的温度下,本征半导体中的电子空穴对的数目保持一定,也就是说,电子和空穴对不断产生,同时又不断复合,处于一种动态平衡状态。温度愈高,载流子数目愈多,导电能力也愈强。所以,温度是影响半导体导电能力的一个很重要的外部因素。

### 1.1.4 N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体虽有自由电子和空穴两种载流子,但由于数量极少,导电能力很弱。如果在其中掺入微量的杂质(某种元素),就会使掺杂后的半导体(称作杂质半导体)的导电能力显著增强。因所掺入的杂质不同,杂质半导体可分为 N 型和 P 型两大类。

(1) **N 型半导体** 若在四价的硅(或锗)晶体中掺入少量五价元素磷(P),晶体点阵中磷原子就会占据某些硅原子原来的位置,如图 1-5 所示。磷原子中的 5 个价电子只有 4 个能够和相邻的硅原子组成共价键结构,余下的一个电子因不受共价键的束缚,容易挣脱磷原子核的吸引而成为自由电子。于是自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称其为电子型半导体或 N 型半导体。N 型半导体中,由于自由电子数远大于空穴数,因此自由电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流子(简称少子)。由于磷原子是施放电子的,故称磷为施主杂质。

(2) **P 型半导体** 若在硅(或锗)的晶体中掺入三价元素硼(B),由于硼原子只有 3 个价电子,因而在组成共价键结构时,因缺少一个价电子而多出一个空穴,如图 1-6 所示。于是半导体中空穴数目大量增加,空穴导电成为这种半导体的主要导电方式,故称它为空穴型半导体或 P 型半导体。由于硼原子是接受电子的,故称为受主杂质。在 P 型半导体中,空穴为多子,自由电子为少子。

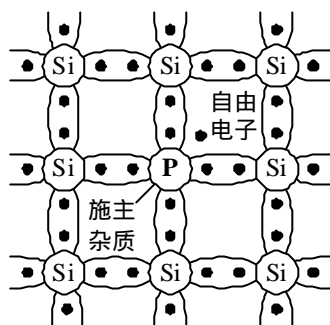


图 1-5 硅晶体中掺入磷元素

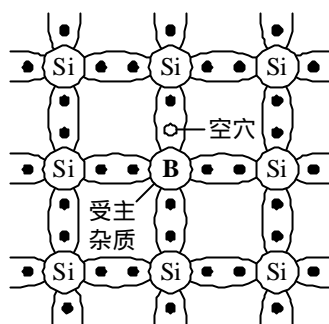


图 1-6 硅晶体中掺入硼元素

不论是 N 型半导体还是 P 型半导体，尽管都有一种载流子占多数，但是整个晶体仍是电中性的。

### 【练习与思考】

1.1.1 电子导电和空穴导电有什么区别？空穴电流是不是由自由电子递补空穴形成的？

1.1.2 N 型半导体中的自由电子多于空穴，P 型半导体中的空穴多于自由电子，是否 N 型半导体带负电，而 P 型半导体带正电？

## 1.2 PN 结及其单向导电性

虽然 P 型和 N 型半导体的导电能力比本征半导体增强了许多，但并不能直接用来制造半导体器件。通常采用一定的掺杂工艺，在一块晶片的两边掺入不同的杂质，分别形成 P 型半导体和 N 型半导体，在它们的交界面处就会形成 PN 结，它是构成各种半导体器件的基础。那么 PN 结是怎样形成的，有何特性呢？

### 1.2.1 PN 结的形成

掺杂工艺完成后，一块半导体晶片上形成 P 型和 N 型的两个异型区。P 区内空穴很多而电子很少，N 区内电子很多而空穴很少，多数载流子由于浓度的差异而产生扩散运动。空穴要从浓度高的 P 区向 N 区扩散，并与 N 区的电子复合；电子要从浓度高的 N 区向 P 区扩散，并与 P 区的空穴复合。扩散使得 P 区和 N 区分别因失去空穴和电子而在交界面两侧留下带负电和正电的离子，形成了一个空间电荷区，如图 1-7 所示。这个空间电荷区就是 PN 结。

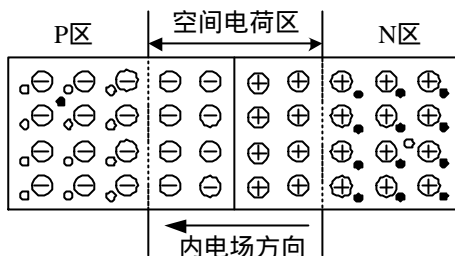


图 1-7 PN 结的形成

空间电荷区的正负离子虽然带有电荷，但它们不能移动，因而不能参与导电。在这个区域内，多数载流子已扩散到对方并被复合掉了，或者说消耗尽了，所以空间电荷区也称为耗尽层，它的电阻率很高。

正负离子在空间电荷区形成一个电场，称为内电场。由于内电场的方向与扩散运动的方向相反，即对多数载流子(P区的空穴和N区的自由电子)的扩散起阻挡作用，所以空间电荷区又称为阻挡层。

虽然内电场阻碍多数载流子的扩散运动，但对少数载流子(P区的电子和N区的空穴)越过空间电荷区进入对方区域起着推动作用。这种少数载流子在电场作用下有规则的运动称为漂移运动。漂移运动使交界面两侧P区和N区由于扩散运动而失去的空穴和电子得到一些补充，其作用与扩散运动相反。

由此可见，PN结的形成过程中存在着两种运动：一种是多数载流子因浓度差而产生的扩散运动，另一种是少数载流子在内电场作用下产生的漂移运动。这两种运动相互制约，最终，从P区扩散到N区的空穴数与从N区漂移到P区的空穴数相等，从N区扩散到P区的电子数与从P区漂移到N区的电子数相等，在一定条件下达到动态平衡，使PN结处于相对稳定状态。

### 1.2.2 PN 结的单向导电性

PN结在没有外加电压时，其中的扩散和漂移处于动态平衡，PN结内无电流通过。那么在PN结两端加上外部电压后，情况会怎样？

(1) **PN结外加正向电压** 将PN结P区接电源正极，N区接电源负极，称为PN结外加正向电压，又叫正向偏置，如图1-8所示。PN结正向偏置时，外电场与内电场方向相反，从而削弱了内电场，破坏

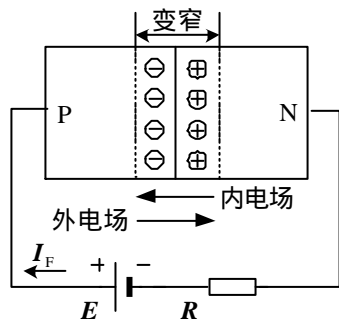


图 1-8 PN 结正向偏置

了 PN 结原有的动态平衡,使得空间电荷区的宽度减小,多数载流子的扩散运动显著增强,形成较大的扩散电流,而少数载流子的漂移运动减弱。所以在外加正向电压的 PN 结中,扩散电流占主导地位,PN 结呈现的电阻很低,在外电路中形成较大的流入 P 区的正向电流  $I_F$ 。

(2) PN 结加反向电压 将 PN 结 N 区接电源正极, P 区接电源负极,称为 PN 结外加反向电压,又叫反向偏置,如图 1-9 所示。PN 结反向偏置时,外电场与内电场方向相同,同样也破坏了 PN 结原有的动态平衡。外电场驱使空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使得空间电荷增加,空间电荷区变宽,内电场增强,使多数载流子的扩散运动难以进行,扩散电流趋近于零。同时,内电场的增强也加强了少数载流子的漂移运动,但由于少数载流子数量很少,因此反向电流  $I_R$  不大,PN 结呈现很高的反向电阻。又因为少数载流子是由于价电子获得能量挣脱共价键的束缚而产生的,环境温度愈高,少数载流子的数量愈多。所以,温度对反向电流的影响很大。由于一定温度下,少数载流子的数目是一定的,当电压超过某数值后,全部少数载流子都参与导电,此时反向电流几乎与外加电压的大小无关,故称为反向饱和电流。

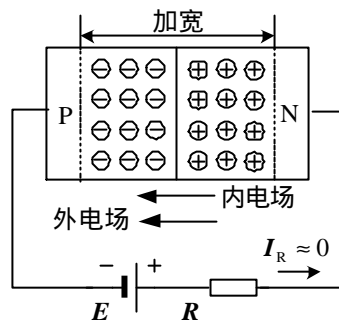


图 1-9 PN 结反向偏置

总之,外加正向电压时,PN 结电阻很低,正向电流很大,PN 结处于导通状态;外加反向电压时,结电阻很高,反向电流很小,PN 结处于截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

### 【练习与思考】

- 1.2.1 为什么说扩散运动是多数载流子的运动,漂移运动是少数载流子的运动?
- 1.2.2 空间电荷区既然是由带电的正、负离子形成的,为什么它的电阻率很高?

## 1.2 半导体二极管

### 1.3.1 二极管的基本结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上电极引出线和外壳构成的，P 区一侧引出的电极称为阳极，N 区一侧引出的电极称为阴极，电路符号如图 1-10a 所示。半导体二极管有很多类型。按材料的不同，常用的二极管可分为硅管和锗管两种；按 PN 结结构形式的不同，又可分为点接触型、面接触型和平面型等。

(1) 点接触型二极管 结构如图 1-10b 所示，由三价金属铝的触丝与锗结合构成 PN 结。其特点是 PN 结的结面积很小，因而结电容小，适用于高频（可达几百兆赫兹）电路。但不能通过较大的电流，也不能承受高的反向电压。主要用于高频检波和开关电路。

(2) 面接触型二极管 结构如图 1-10c 所示，PN 结是用扩散法或合金法做成的。其特点是 PN 结的结面积大，能通过较大的电流（可达几千安培），但结电容也大，适用于频率较低的整流电路。

(3) 平面型二极管 结构如图 1-10d 所示。它是采用先进的集成电路制造工艺制成的。其特点是结面积较大时，能通过较大的电流，适用于大功率整流电路；结面积较小时，结电容较小，工作频率较高，适用于开关电路。

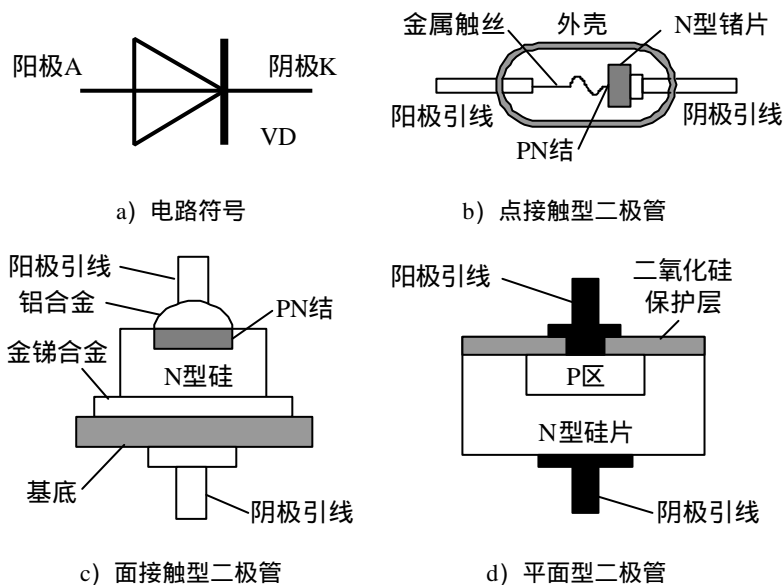


图 1-10 半导体二极管的电路符号及结构分类



### 1.3.2 二极管的伏安特性

描述电压与电流之间关系的特性称为伏安特性。二极管的伏安特性可用伏安特性曲线和伏安特性方程两种形式来表示。

#### 1. 二极管的伏安特性曲线

伏安特性曲线可以直观地反映出二极管的单向导电性。不同类型的二极管,其参数不尽相同,但其伏安特性曲线的形状大致相同,如图 1-11 所示。由曲线形状可知,二极管是非线性元件,其伏安特性分为正向特性、反向特性和反向击穿特性三部分。

(1) 正向特性 当外加正向电压较低时,由于外电场还不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力,因此,这时的正向电流近似为零,呈现较大的电阻。这一段 (OA 段) 曲线称为二极管的死区,对应的电压称为死区电压,其数值与材料及环境温度有关,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,内电场被大大削弱,二极管的电阻变得很小,正向电流迅速增加,这时的二极管才真正导通。由于这段特性很陡,在正常工作范围内,正向电压变化很小,硅二极管的正向导通压降约为 0.6~0.7V,锗二极管约为 0.2~0.3V,当电流较小时取下限值,当电流较大时取上限值。

(2) 反向特性 当二极管上加反向电压时,少数载流子的漂移运动形成很小的反向电流 (OB 段)。反向电流有两个特点:一是具有正温度特性,即随温度的升高而增大;二是在反向电压不超过某一范围时,反向电流的大小基本恒定,故称为反向饱和电流。一般硅管的反向饱和电流比锗管小,前者在几微安以下,而后者可达数百微安。

(3) 反向击穿特性 当外加反向电压过高时 (BC 段),反向电流突然增大,二极管失去单向导电性,这种现象叫作 PN 结的反向击穿(电击穿)。产生击穿时的反向电压称为反向击穿电压。发生击穿的原因是外加的电场过强,强制性地使原子的外层价电子拉出来,使载流子数目急剧上升。而处于强电场中的载流子又因获得强电场所供给的能量,而将其他价电子撞击出来,如此形成连锁反应,反向电流愈来愈大,最后使得二极管反向击穿。

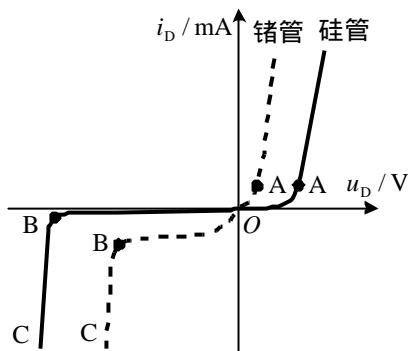


图 1-11 二极管的伏安特性曲线

一般来讲,二极管的电击穿是可以恢复的,只要外加电压减小即可恢复常态。但普通二极管发生电击穿后,反向电流很大,且反向电压很高,因而消耗在二极管 PN 结上的功率很大,致使 PN 结温度升高。而结温升高会使反向电流继续增大,形成恶性循环,最终造成 PN 结因过热而烧毁(称作热击穿)。二极管热击穿后便会失去单向导电性造成永久损坏。

在正常工作范围内,当电源电压远大于二极管正向导通压降时,实际工作中可将二极管近似看成理想二极管,其伏安特性曲线如图 1-12 所示。二极管正向导通时,忽略正向导通压降和电阻,二极管相当于短路;二极管反向截止时,忽略反向饱和电流,反向电阻无穷大,二极管相当于开路。

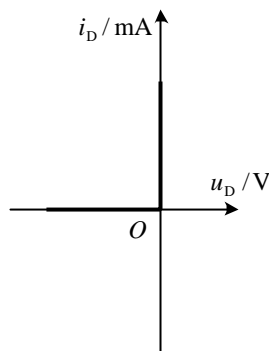


图 1-12 理想二极管的伏安特性

## 2. 二极管的伏安特性方程

二极管是一种非线性元件,其中的电流  $i_D$  和两端的电压  $u_D$  间的函数关系可近似用式 (1-1) 表示。

$$i_D = I_S (e^{u_D / V_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中,  $I_S$  为反向饱和电流;  $V_T$  为温度的电压当量, 常温 ( $T=300\text{K}$ ) 时,  $V_T=26\text{mV}$ ;  $u_D$  和  $V_T$  在式中采用同一单位。

式(1-1)称作半导体二极管的伏安特性方程。当二极管外加正向电压, 且  $u_D \gg V_T$  时, 式中的  $e^{u_D / V_T} \gg 1$ , 故 1 可略去, 即正向电压与电流近似为指数关系; 当二极管外加反向电压时,  $u_D$  为负, 若  $|u_D| \gg V_T$ , 指数项接近于零, 故  $i_D \approx I_S$ , 即二极管的反向电流基本上与电压无关。

### 1.3.3 二极管的主要参数

二极管的参数简要标明了二极管的性能和使用条件, 是正确选择和使用二极管的依据。主要参数包括:

(1) 最大整流电流  $I_F$  最大整流电流又称额定正向平均电流, 是指二极管长时间使用时, 允许流过的最大正向平均电流。它由 PN 结的面积和散热条件决定, 大功率二极管在使用时, 应加装规定尺寸的散热片。当实际电流超过该值时, 二极管将因 PN 结过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压  $U_R$  最高反向工作电压指保证二极管不被击穿所允许施加的最高反向电压, 一般规定为反向击穿电压的一半或三分之二。

(3) 最大反向电流  $I_{RM}$  最大反向电流指二极管加上最高反向工作电压时的反向电流值。反向电流越小,则二极管的单向导电性越好,并且受温度的影响也越小。

其他参数,如二极管的最高工作频率、最大整流电流下的正向压降、结电容等,可在需要时查阅产品手册,但要注意给出参数的测试条件和产品制造过程中难以避免的分散性。

### 1.3.4 稳压二极管

稳压二极管简称稳压管,又称齐纳二极管,是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半导体二极管。它在电路中与适当阻值的电阻配合能起稳定电压的作用。其电路符号如图 1-13a 所示。

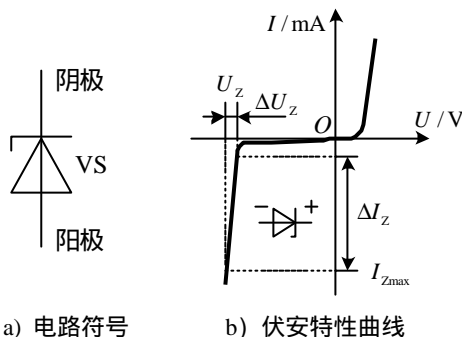


图 1-13 稳压二极管的电路符号和伏安特性曲线

稳压管的伏安特性曲线形状与普通二极管的类似,如图 1-13b 所示,只是稳压管的反向特性曲线比普通二极管更陡一些。反向击穿后,电流在很大范围内变化,管子两端的电压变化很小,因此可以稳压。与普通二极管不同,稳压管工作在反向击穿区,它的反向击穿是可逆的,当去掉反向电压后,击穿可以恢复。

稳压管的主要参数有如下几个:

(1) 稳定电压  $U_Z$  稳定电压是稳压管反向击穿后的在正常工作电压。一般手册中所给出的都是在一定工作电流及温度等条件下的数值。由于工艺方面的原因,即使同一型号的稳压管,其稳压值也有一定的离散性,例如 2CW14 稳压管的稳定电压为 6~7.5V。

(2) 稳定电流  $I_Z$  和最大稳定电流  $I_{Zmax}$  稳定电流是指工作电压等于稳定电压时的反向电流。最大稳定电流是指稳压管允许通过的最大反向电流。使用稳压管时,工作电流不能超  $I_{Zmax}$  值,否则稳压管将会发生热击穿而烧毁。

所以，应注意采取适当的限流措施。

(3) 最大耗散功率  $P_{ZM}$  最大耗散功率是指稳压管不发生热击穿的最大功率损耗。 $P_{ZM}=U_Z I_{Zmax}$ ，已知  $U_Z$  和  $P_{ZM}$  和就可以求出  $I_{Zmax}$ 。

(4) 动态电阻  $r_Z$  动态电阻是稳压管在反向击穿区稳定工作时，端电压的变化量与相应电流变化量的比值，即

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-2)$$

它是衡量稳压管稳压性能好坏的指标。 $r_Z$  愈小，则由  $\Delta I_Z$  引起的  $U_Z$  变化量  $\Delta U_Z$  愈小，稳压性能愈好。

(5) 电压温度系数  $a_U$  电压温度系数就是当温度变化 1 时， $U_Z$  变化的百分比数，用以表示稳压管的温度稳定性。一般来说，低于 6V 的稳压管，它的温度系数是负的；高于 6V 的稳压管，电压温度系数是正的；而 6V 左右的稳压管，稳压值受温度的影响就比较小。

如果温度变化范围比较大，又要求稳压值的温度稳定性好，可选择具有温度补偿的稳压管。如 2DW 系列的稳压管就是由两个同型号的稳压管反向串接起来的，如图 1-14 所示。工作时一个稳压管正向导通（作温度补偿管），具有负温度系数；另一个稳压管反向击穿（作稳压管），具有正温度系数。两者相互补偿，使得整体的温度稳定性大大增强，即 1、2 端的电压基本不受温度影响。也可利用 3 端单独使用两边的稳压管。

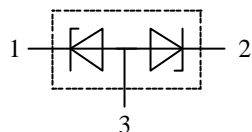


图 1-14 具有温度补偿的稳压二极管

### 1.3.5 二极管的应用

二极管的应用非常广泛范围很广，利用它的单向导电性和正向导通、反向截止、反向击穿（稳压管）等工作状态，可以组成各种应用电路。下面介绍几种简单的应用。

(1) 整流电路 利用二极管的单向导电性可以将交流电变为脉动的直流电，这种变换称为整流。图 1-15 是简单的整流电路。

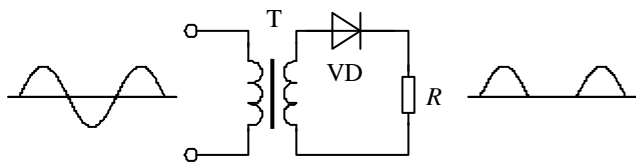


图 1-15 整流电路

(2) 钳位电路 二极管的钳位作用是指利用二极管正向导通压降相对稳定, 且数值较小 (有时可近似为零) 的特点, 来限制电路中某点的电位。例如图 1-16 中, 二极管的钳位作用使  $V_o$  被限制  $0 \sim 6V$  范围内。当开关  $S$  断开时, 由于二极管正向偏置, 若忽略其正向导通压降, 阳极电位  $V_o$  被钳制在  $6V$ ; 当开关  $S$  闭合时, 二极管截止,  $V_o$  为零伏。

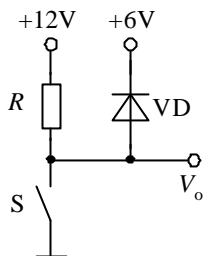


图 1-16 钳位电路

(3) 隔离电路 二极管的隔离作用是指利用二极管截止时, 通过的电流近似为零, 两极之间相当于断路的特点, 来隔断路或信号的联系。例如图 1-17 中, 当 A 点电位  $V_A=0$  时, 二极管  $VD_1$  导通, 起钳位作用使  $V_o=0$ , 这时若  $V_B = +6V$ , 则  $VD_2$  截止, B 点的电位对输出  $V_o$  没有影响,  $VD_2$  起到了将输出与输入 B 隔离的作用。

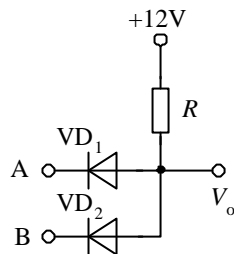
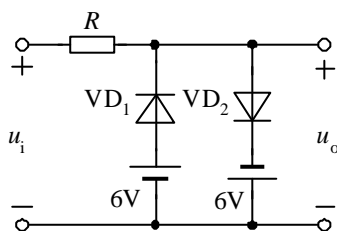
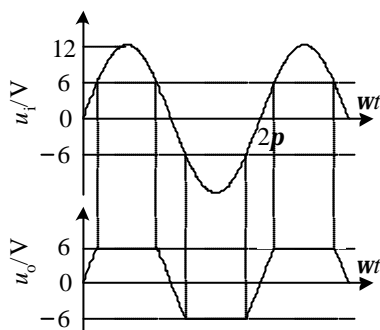


图 1-17 隔离电路

(4) 限幅电路 图 1-18a 为一二极管双向限幅电路, 用来限制输出电压的幅度。输入、输出波形如图 1-18b 所示。



a) 电路图



b) 波形图

图 1-18 二极管双向限幅电路

在  $u_i$  的正半周, 当  $u_i < 6V$  时,  $VD_1$ 、 $VD_2$  设均截止, 输出  $u_i = u_o$ ; 当  $u_i > 6V$  时,  $VD_1$  正偏导通,  $VD_2$  反偏截止, 输出  $u_o = 6V$ 。

在  $u_i$  的负半周, 当  $u_i > -6V$  时,  $VD_1$ 、 $VD_2$  设均截止, 输出  $u_i = u_o$ ; 当  $u_i < -6V$  时,  $VD_2$  导通,  $VD_1$  截止, 输出  $u_o = -6V$ 。

(5) 稳压电路 利用稳压管组成的简单稳压电路如图 1-19 所示。 $R$  为限流电阻, 用来限制流过稳压管的电流。当稳压管处于反向击穿状态时, 稳定电压  $U_Z$  基本不变, 故负载电阻  $R_L$  两端的电压  $u_o$  基本稳定, 在一定范围内不受  $u_i$  和  $R_L$  变化的影响。

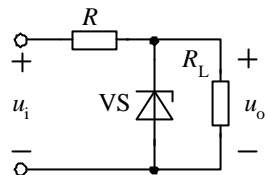


图 1-19 稳压管稳压电路

### 【练习与思考】

1.3.1 如何使用万用表的电阻档判断二极管的好坏极性？

1.3.2 把一节 1.5V 的电池直接接到（正向接法）二极管的两端，会不会发生什么问题？

1.3.3 为什么二极管的反向饱和电流与外加反向电压基本无关，而当温度升高时会明显增大？

1.3.4 为什么稳压管的动态电阻愈小，则稳压效果愈好？

1.3.5 在图 1-19 中,  $R_L=100\Omega$ , 电压  $u_i$  随时间在 9~12V 范围内波动, 要求电压  $u_o$  稳定为 6V。试确定稳压管 VS 和电阻  $R$  的参数。

## 1.3 双极型晶体管

半导体三极管分为双极型晶体管和场效应晶体管两大类。由于双极型晶体管的发明和应用较场效应晶体管早得多, 因而习惯上把双极型晶体管简称为三极管或晶体管。双极型晶体管 BJT (Bipolar Junction Transistor) 由两个背对背的 PN 结构成, 在工作过程中两种载流子 (电子和空穴) 都参与导电, 故有“双极型”之称, 以区别于一种载流子导电的场效应晶体管。

### 1.4.1 双极型晶体管的结构

双极型晶体管有 NPN 和 PNP 两种类型 图 1-20a 和 b 是其结构示意图和电路符号。双极型晶体管的实际结构差别很大, 以满足各种应用对工作特性和制造工艺的具体要求。

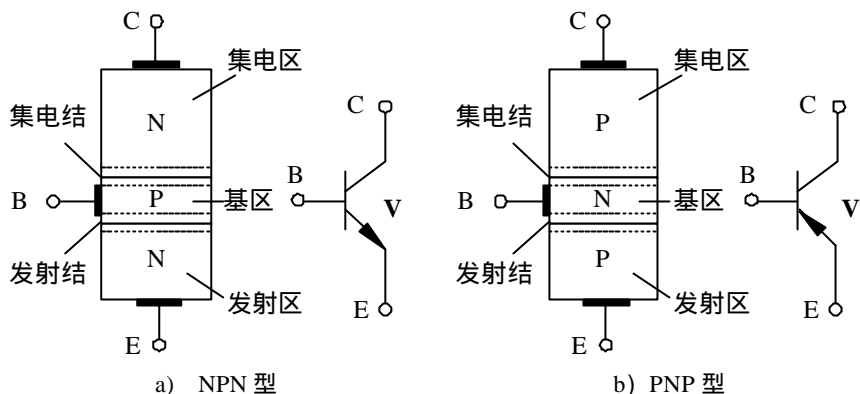


图 1-20 双极型晶体三极管的结构示意图和电路符号

NPN 型和 PNP 型 BJT 都含有三个掺杂区（发射区、基区、集电区）和两个 PN 结。发射区与基区间的 PN 结称为发射结，集电区与基区的 PN 结称为集电结。由发射区、基区、集电区各引出一个电极，对应称为发射极 E、基极 B、集电极 C。为了具有电流放大作用，BJT 按如下工艺制造：

- 1) 基区很薄且掺杂浓度很低。
- 2) 发射区掺杂浓度很高，与基区相差很大。
- 3) 发射区的掺杂浓度比集电区高，而集电区尺寸比发射区大。发射区与集电区虽是同型半导体，但两者并不对称，使用时 E，C 两极不能互换。

NPN 型和 PNP 型晶体管的工作原理类似，只是在使用时电源极性连接不同，下面以 NPN 型晶体管为例来分析讨论。

#### 1.4.2 双极型晶体管的电流放大作用

BJT 的电流放大作用有其内部条件和外部条件。内部条件是基区很薄且掺杂浓度远低于发射区，由制造工艺实现；外部条件是发射结正向偏置，集电结反向偏置，由外部电路提供。

在图 1-21 中，基极电阻  $R_B$  与基极电源  $U_B$  组成基极电路，使发射结正向偏置；集电极电阻  $R_C$  与集电极电源  $U_{CC}$  组成集电极电路，使集电结反向偏置。由于发射极是基极电路和集电极电路的公共端，故称这种电路为共发射极电路。

在发射结正向偏置电压的作用下，发射区的电子不断通过发射结扩散到基区，由于基区很薄且空穴浓度很低，发射区进入基区的电子只有一少部分与基区的空穴复合，而绝大部分继续扩散到集电结的边缘。当然，基区的空穴也会扩散到发射区，但因为基区的掺杂浓度很低，故形成的电流（图中未

画出)很小,可以忽略。

由于集电结处于反向偏置,其空间电荷区中的电场很强,因此,扩散到集电结的边缘的电子在电场作用下以漂移的方式越过集电结,被集电区收集。另外,电场的作用也会使集电区的空穴(少数载流子)向基区漂移,形成由集电区流向基区的反向饱和电流(图中未画出),其大小取决于少数载流子的浓度,因此很小。

内部载流子的运动对应形成了发射极电流  $I_E$ 、基极电流  $I_B$  和集电极电流  $I_C$ 。它们之间的关系为

$$I_E = I_C + I_B \quad (1-3)$$

由于 BJT 制成后其内部尺寸和掺杂浓度是确定的,所以发射区所发射的电子在基区复合的比例以及被集电区收集的比例也是基本确定的。由此形成  $I_E$ 、 $I_B$  和  $I_C$  之间的比例关系,且在数值上  $I_C$  接近于  $I_E$  而远大于  $I_B$ 。这样,当  $I_B$  但发生微小变化时,  $I_C$  会对应响应较大的变化。这就是 BJT 的电流放大作用,也就是通常所说的基极电流对集电极电流的控制作用。

### 1.4.3 双极型晶体管的特性曲线

BJT 的特性曲线能直观地描述各极电压与电流之间的关系,是 BJT 内部载流子运动的外部表现。由于 BJT 是三端元件,其特性描述不像二极管那样简单,而且与电路连接形式有关,最常用的是共发射极接法时的输入特性曲线和输出特性曲线。这些特性曲线可用特性图示仪直观地显示出来,也可以通过图 1-22 所示的电路进行测试。电路中使用的是 NPN 型硅管 3DG6。

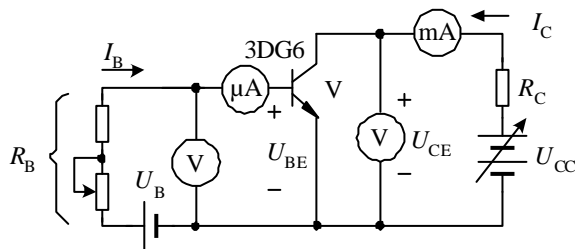


图 1-22 BJT 特性测试电路

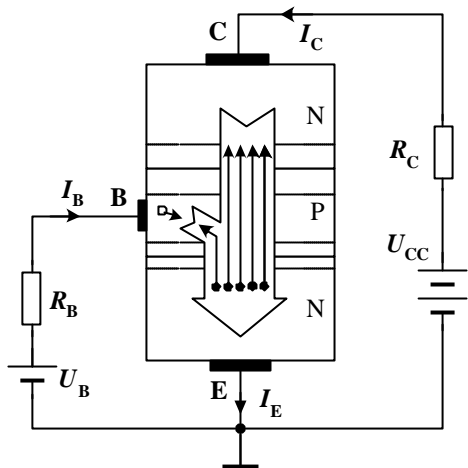


图 1-21 共发射极电路中载流子的运动



**(1) 输入特性曲线** 在共发射极电路中, 输入信号接入基极电路, 故基极与发射极组成的回路称为输入回路。输入特性曲线是指当集—射极电压  $U_{CE}$  为常数时, 输入回路中基极电流  $I_B$  与基—射极电压  $U_{BE}$  之间的关系曲线  $I_B = f(U_{BE})$ , 如图 1-23 所示。

严格地讲, 对于不同的  $U_{CE}$ , 输入特性不是一条而是一组曲线。但是对硅管而言, 当  $U_{CE} > 1V$  时, 集电结已反向偏置, 并且内电场已足够大, 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。如果此时再增大  $U_{CE}$ , 只要  $U_{BE}$  保持不变, 从发射区发射到基区的电子数就一定,  $I_B$  也就基本不变。就是说,  $U_{CE} > 1V$  后输入特性曲线基本上是重合的。所以, 通常只画出  $U_{CE} = 1V$  的一条输入特性曲线。

由图 1-23 可见, 和二极管的伏安特性一样, BJT 输入特性也有一段死区。只有在发射结外加电压大于死区电压时,  $I_B$  才会出现。硅管的死区电压约为  $0.5V$ , 锗管的死区电压不超过  $0.2V$ 。在政党工作情况下, NPN 型硅管的发射结压降为  $0.6 \sim 0.7V$ , PNP 型锗管的发射结压降为  $0.2 \sim 0.3V$ 。

**(2) 输出特性曲线** 在共发射极电路中, 输出信号从集电极取出, 因此把集电极、发射极和电源  $U_{CC}$  组成的回路称为输出回路。输出特性曲线是指当基极电流  $I_B$  为常数时, 输出回路中集电极电流  $I_C$  与集—射极电压  $U_{CE}$  之间的关系曲线  $I_C = f(U_{CE})$ 。对于不同的  $I_B$ , 可得出不同的曲线, 所以 BJT 的输出特性曲线是一组曲线。如图 1-24 所示。

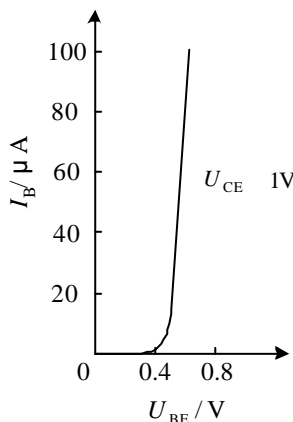


图 1-23 BJT 的输入特性曲线

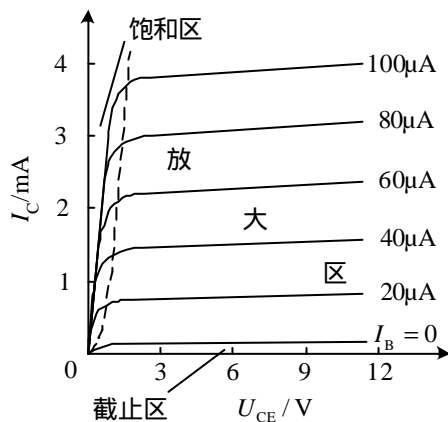


图 1-24 BJT 的输出特性曲线

当  $I_B$  一定时, 从发射区扩散到基区的电子数大致是一定的。在  $U_{CE}$  超过一定数值 (约  $1V$ ) 以后, 这些电子的绝大部分被拉入集电区而形成  $I_C$ , 以致

于当  $U_{CE}$  继续增高时,  $I_C$  不再有明显的增加, 形成恒流特性。

当  $I_B$  增大时, 相应的  $I_C$  也增大, 而且在一定范围内近似成正比例, 这就是 BJT 电流放大作用的表现。

通常把 BJT 的输出特性曲线分为三个工作区 (见图 1-24)。

(1) 放大区 输出特性曲线上接近于水平的部分是放大区。在放大区,  $I_C$  与  $I_B$  近似成正比, 故放大区也称为线性区。如前所述, BJT 工作在放大状态时, 发射结处于正向偏置, 集电结处于反向偏置。

(2) 截止区  $I_B = 0$  对应的输出特性曲线以下的区域称为截止区。 $I_B = 0$  时集电极电流用表示  $I_{CEO}$ , 其值很小, 若忽略不计, 则 BJT 集电极与发射极之间相等于开路, 即相等于一个断开的电子开关。对于 NPN 型硅管, 当  $U_{BE} < 0.5V$  时, 即已开始截止, 但是为了截止可靠, 常使  $U_{BE} = 0$ 。截止时集电结处于反向偏置。

(3) 饱和区 当  $U_{CE} < U_{BE}$  时, 集电极电位低于基极, 集电结与发射结均处于正向偏置, BJT 工作在饱和状态。在饱和区,  $I_B$  的变化对  $I_C$  的影响较小, 两者不成正比。饱和区集电极与发射极之间的电压  $U_{CES}$  称为 BJT 的饱和压降, 其值很小, 通常硅管约为  $0.3V$ , 锗管约为  $0.1V$ , 若忽略不计, 则 BJT 集电极与发射极之间相等于短路, 即相等于一个闭合的电子开关。

在放大电路中, BJT 主要工作于放大区; 而在开关电路或脉冲数字电路中, BJT 主要工作于饱和区和截止区。

#### 1.4.4 双极型晶体管的主要参数

BJT 的参数用来表征其性能和适用范围, 是选择元件、设计电路的依据。BJT 的参数很多, 主要的参数有下面几个。

(1) 电流放大系数 当 BJT 接成共发射极电路时, 静态(无输入信号)时集电极电流  $I_C$  与基极电流  $I_B$  的比值称为共发射极静态电流(直流)放大系数

$$\bar{b} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-4)$$

当 BJT 工作在动态(有输入信号)时, 基极电流变化量  $\Delta I_B$  与对应集电极电流变化量  $\Delta I_C$  的比值称为动态电流(交流)放大系数

$$b = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-5)$$

两者的含义虽然不同, 但在输出特性曲线近于等间距 ( $I_B$  等差变化) 水平且  $I_{CEO}$  很小的情况下, 两者较为接近, 因此实际应用中一般不作严格区分。常用的小功率 BJT 的  $b$  值约为  $20 \sim 150$ 。 $b$  值随温度升高而增大, 在输出特性曲

线反映为曲线上移且曲线的间距增大。

(2) 集—基极反向饱和电流  $I_{CBO}$  集—基极反向饱和电流是当发射极开路时的集电极电流。 $I_{CBO}$  是由少数载流子的漂移运动造成的, 受温度的影响大。在室温下, 小功率锗管的  $I_{CBO}$  约为几微安到几十微安, 小功率硅管在  $1\mu A$  以下, 且硅管温度稳定性优于锗管。

(3) 集—射极反向饱和电流  $I_{CEO}$  集—射极反向饱和电流是当基极开路时的集电极电流。因为它好像是从集电极直接穿透 BJT 而到达发射极的, 所以又称为穿透电流。 $I_{CEO}$  受温度的影响很大, 在数值约为  $I_{CBO}$  的  $b$  倍,  $I_{CBO}$  愈大、 $b$  愈高, BJT 的温度稳定性愈差。一般硅管的  $I_{CEO}$  比锗管的小 2~3 个数量级。

(4) 集电极最大允许电流  $I_{CM}$  集电极电流  $I_C$  超过一定值时, BJT 的  $\beta$  值要下降。当  $\beta$  值下降到正常值的三分之二时的集电极电流, 称为集电极最大允许电流  $I_{CM}$ 。因此, 在使用 BJT 时,  $I_C$  超过  $I_{CM}$  并不一定会使 BJT 损坏, 但以降低  $\beta$  值为代价。

(5) 集-射极反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$  基极开路时, 加在集电极和发射之间的最大允许电压称为集-射极反向击穿电压  $U_{(BR)CEO}$ 。当 BJT 的集-射极电压  $U_{CE} > U_{(BR)CEO}$  时, 集电结将被反向击穿,  $I_{CEO}$  会突然大幅度上升。手册中给出的  $U_{(BR)CEO}$  一般是常温(25 )时的值, 温度升高后, 其数值要降低, 使用时应特别注意。

(6) 集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$  BJT 工作时集电极的功率损耗  $P_C = I_C U_{CE}$ 。 $P_C$  的存在使集电结的结温升高, 若  $P_C > P_{CM}$  时将会导致 BJT 过热损坏。由此而限定的  $P_C$  称为集电极最大允许耗散功率  $P_{CM}$ 。 $P_{CM}$  主要受结温限制, 一般来说, 锗管允许结温约为 70~90 , 硅管约为 150 。

根据 BJT 的  $P_{CM}$  值, 可在 BJT 输出特性曲线上作出  $P_{CM}$  曲线, 它是一条双曲线。由  $I_{CM}$ 、 $U_{(BR)CEO}$ 、 $P_{CM}$  三个极限参数共同界定了 BJT 的安全工作区, 如图 1-25 所示。

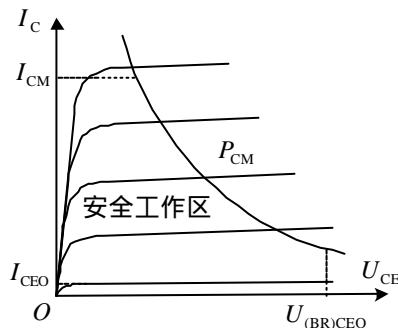


图 1-25 BJT 的安全工作区

#### 1.4.5 双极型晶体管简化的小信号模型

从 BJT 的特性曲线可以看到, 它的输入特性曲线和输出特性曲线都是非线性的, 因此, BJT 是一个非线性元件。但是, 如果 BJT 工作在特性曲线近似于直线的部分, 而且工作信号是变化范围很小的小信号, 那么在这小范围内, 局部的特性曲线就可以近似看成是一小段直线。如此进行线性化处理, 在这种工作条件下的 BJT 就可以用一个线性电路等效模型来描述, 使电路的分析和计算得以简化。这样的线性电路模型称为 BJT 的小信号模型, 其建立的过程如图 1-26 所示。其中, 图 1-26a 为共发射极电路的局部。

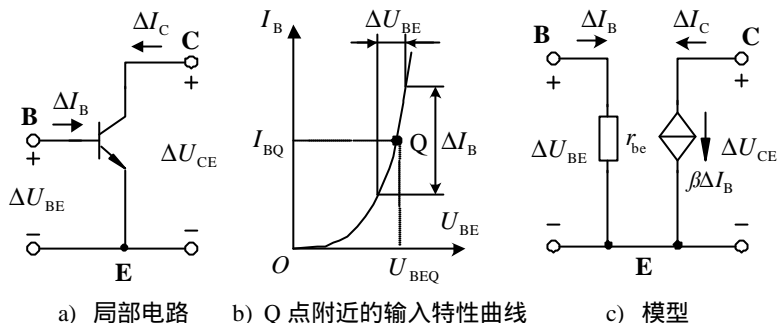


图 1-26 BJT 小信号模型的建立

在共发射极电路中, 设 BJT 工作在放大区的 Q 点处, 基极电路对应的电压和电流分别为  $U_{BEQ}$  和  $I_{BQ}$ 。当基—射极电压在  $U_{BEQ}$  的基础上出现一个小的变化量  $\Delta U_{BE}$  时, 基极电流也会产生一个对应的变化量  $\Delta I_B$ 。如图 1-26b 所示, 由于变化量  $\Delta U_{BE}$  和  $\Delta I_B$  比较小, Q 点附近的输入特性曲线可以近似看成是直线, 则  $\Delta U_{BE}$  和  $\Delta I_B$  之间的关系可以用动态电阻来反映, 即

$$r_{be} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad (1-6)$$

$r_{be}$  称为 BJT 的输入电阻, 一般为几百到几千欧。低频小功率 BJT 的  $r_{be}$  常用下面数值公式估算

$$r_{be} \approx r_b + (b+1) \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}} \quad (1-7)$$

式中,  $I_{EQ}$  为 Q 点对应的发射极电流, 单位为 mA;  $r_b$  为基区电阻, 当  $I_{EQ} < 5\text{mA}$  时, 约为  $200\Omega$ 。

由于工作在放大区, BJT 的  $I_C$  受  $I_B$  的控制, 变化量  $\Delta I_B$  也会使集电极电流产生变化量  $\Delta I_C$ 。若将输出特性近似为一组以  $I_B$  为参变量的平行于横轴的直线, 则  $\Delta I_C$  只受  $\Delta I_B$  的控制, 而与  $U_{CE}$  无关。因此集电极与发射极之间可以用一个  $\Delta I_C = b \Delta I_B$  的电流控制电流源 (CCCS) 来等效, 如图 1-26c 所示。

上述电路模型只适用于小信号的情况,且因忽略了  $U_{CE}$  对  $I_B$  和  $I_C$  的影响,故称为简化的的小信号模型。

### 【练习与思考】

1.4.1 BJT 的发射极和集电极是否可以调换使用,为什么?

1.4.2 BJT 具有电流放大作用的内部条件和外部条件各是什么?

1.4.3 如何用万用表的电阻档一只双极型晶体管的类型和区分三个电极?

1.4.4 根据图 1-27 所示各 BJT 三个电极的电位,判断它们分别处于何种工作状态?

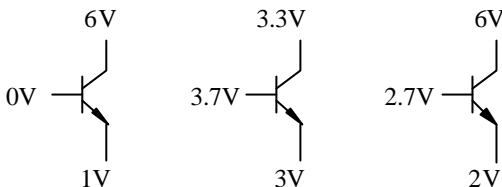


图 1-27 题 1.4.4 的图

1.4.5 在使用 BJT 时,只要集电极电流超过散功率散功率  $I_{CM}$  值;

耗散功率超过  $P_{CM}$  值;集-射极电压超过  $U_{(BR)CEO}$  值,BJT 就必然损坏。上述几种说法是否都是正确的?

## 1.4 绝缘栅型场效应晶体管

场效应晶体管 FET (Field Effect Transistor) 是利用外加电压产生的电场强度来控制其导电能力的一种半导体器件。按其结构可分为结型场效应晶体管和绝缘栅型场效应晶体管两大类。这里仅介绍应用更为广泛的绝缘栅型场效应晶体管 (Insulated Gate FET, IGFET)。

### 1.5.1 基本结构和工作原理

绝缘栅型场效应晶体管按其导电类型的不同,分为 N 沟道和 P 沟道两类,每一类又分为增强型和耗尽型两种。

N 沟道绝缘栅型场效应晶体管的结构如图 1-28 所示。它以一块掺杂浓度较低的 P 型硅片作为衬底,在其中扩散两个掺杂浓度很高的  $N^+$  型区,并引出两个电极,分别称为源极 S 和漏极 D。型硅片表面覆盖一层极薄底二氧化硅绝缘层,在两个  $N^+$  型区之间的绝缘层上制作一个金属电极称为栅极 G。因栅极与其他电极及硅片之间是绝缘的,故有绝缘栅型之称;或者按其金属—氧化物—半导体的材料构成,称其为 MOSFET (Metal Oxide Semiconductor FET)。

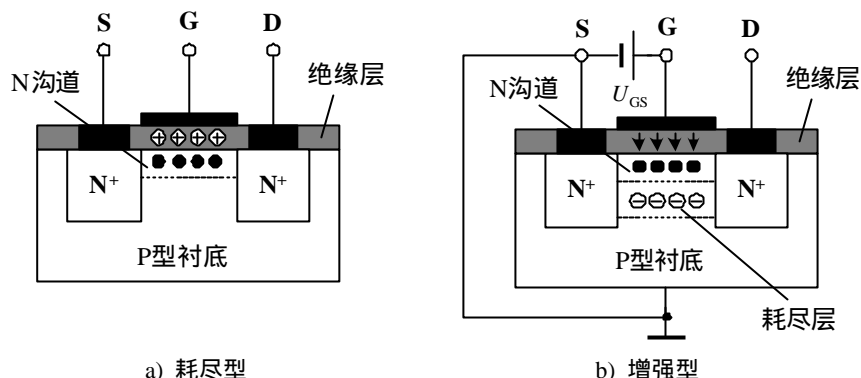


图 1-28 N 沟道绝缘栅型场效应晶体管的结构

如图 1-28a 所示,在制造 N 沟道 MOSFET 时,如果在二氧化硅绝缘层中掺入大量正离子,就会在两个  $N^+$  型区之间的型衬底表面形成足够强的电场,这个电场将会排斥 P 型衬底中的空穴,并把衬底中的电子吸引到表面,形成一个 N 型薄层,将两个  $N^+$  型区即漏极和源极沟通。这个 N 型薄层称为 N 型导电沟道,又因是 P 型衬底中的 N 型层而称为反型层。这种 MOSFET 在制造时导电沟道已经形成,称为耗尽型 MOSFET。

如图 1-28b 所示。如果导电沟道不是预先在制造时形成的,而是利用外加栅-源电压形成电场产生的,则此类称为增强型 MOSFET。

P 沟道 MOSFET 因在 N 型衬底中生成 P 型反型层而得名。其结构和工作原理与 N 沟道 MOSFET 相似。只是使用的栅-源和漏-源电压得极性与 N 沟道 MOSFET 的相反。各类型 MOSFET 的电路符号如图 1-29 所示。在增强型 MOSFET 的符号中,源极 S 和漏极 D 间的连线是断开的,表示  $U_{GS}=0$  时导电沟道尚未形成。

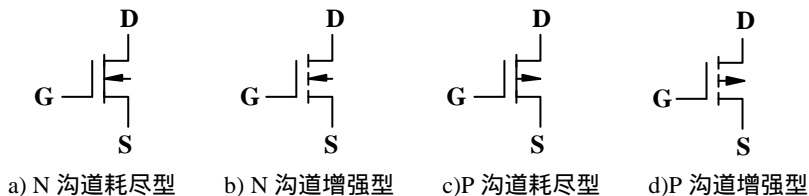


图 1-29 MOSFET 的电路符号

由于 MOSFET 工作时只有一种极性的载流子 (N 沟道是电子、P 沟道是空穴) 参与导电,故亦称为单极型晶体管。与双极型晶体管的共发射极接法类似, MOSFET 常采用共源极接法,如图 1-30 所示。

当栅-源电压  $U_{GS}$  为某一数值时, 增强型 MOSFET 的漏-源极之间形成 N 型导电沟道, 在正电源  $U_{DD}$  的作用下, 沟道中的电子从源极侧向漏极运动, 形成漏极电流  $I_D$ 。如果栅-源电压增加, 则垂直于衬底的表面电场强度加强, 从而使导电沟道加宽, 引起漏极电流  $I_D$  增大。因此, MOSFET 是利用电场效应改变导电沟道来控制漏极电流  $I_D$  的, 或者说, 是利用电压  $U_{GS}$  来控制漏极电流  $I_D$  的。

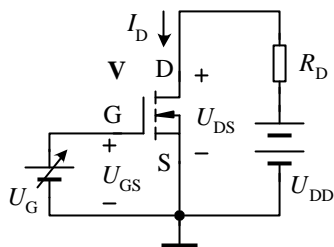


图 1-30 共源极电路

MOSFET 与 BJT 都是半导体三极管, MOSFET 的源极、漏极、栅极分别相当于 BJT 的发射极、集电极、基极。BJT 的集电极电流  $I_C$  受基极电流  $I_B$  控制, 是一种电流控制元件; 而的 MOSFET 漏极电流  $I_D$  受栅-源电压  $U_{GS}$  控制, 是一种电压控制元件。但与 BJT 相比 MOSFET 具有输入电阻大、耗电少、噪声底、热稳定性好、抗辐射能力强等优点, 常用于低噪声放大器的前级或环境条件变化较大的场合。另外, MOSFET 的制造工艺比较简单, 占用芯片面积小, 特别适用于制造大规模集成电路。

与 BJT 类似, MOSFET 不仅可以通过  $U_{GS}$  对  $I_D$  的控制用于信号放大, 而且也可以作为开关元件, 通过  $U_{GS}$  控制其导通或关断, 广泛应用于开关电路和脉冲数字电路中。当然, 因应用领域和特性要求不同, 其结构、工艺及称谓也有很大差异。

### 1.5.2 绝缘栅型场效应晶体管的特性曲线

由于 MOSFET 的栅极是绝缘的, 栅极电流  $I_G = 0$ , 因此不研究  $I_G$  和  $U_{GS}$  之间的关系。 $I_D$  和  $U_{DS}$ 、 $U_{GS}$  之间的关系可用输出特性和转移特性来表示。所谓输出特性是以  $U_{GS}$  为参变量的  $I_D$  和  $U_{DS}$  之间的关系  $I_D = f(U_{DS})$ ; 所谓转移特性是以  $U_{DS}$  为参变量的  $I_D$  和  $U_{GS}$  之间的关系  $I_D = f(U_{GS})$ 。图 1-31 所示为 N 沟道增强型 MOSFET 的转移特性曲线和输出特性曲线。

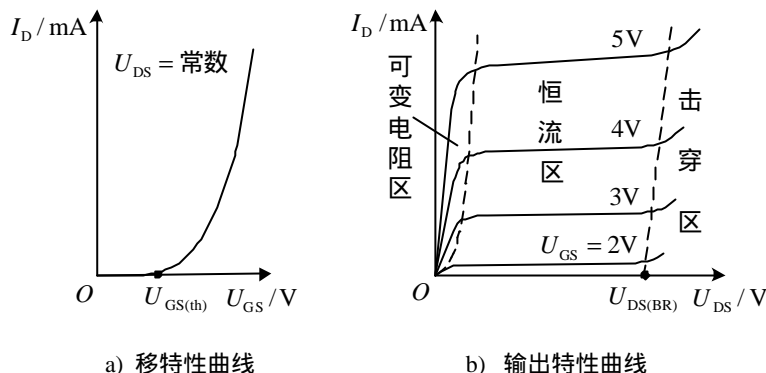


图 1-31 N 沟道增强型 MOSFET 的转移特性曲线和输出特性曲线

N 沟道增强型的 MOSFET 不具有原始导电沟道，漏、源两个  $N^+$  型区之间被 P 型衬底隔开，漏极和源极之间相当于两个背靠背的 PN 结。当  $0 < U_{GS} < U_{GS(th)}$  时，导电沟道尚未联通，不管漏—源电压  $U_{DS}$  的极性如何，总有一个 PN 结是反向偏置的，所以漏极电流  $I_D = 0$ 。只有当  $U_{GS} > U_{GS(th)}$  时，才会有漏极电流  $I_D$  出现。在一定的漏—源电压  $U_{DS}$  作用下，使 MOSFET 由不导通变为导通的临界栅—源电压称为开启电压  $U_{GS(th)}$ 。如图 1-31a 所示，转移特性反映着  $U_{GS}$  对  $I_D$  的控制特性。

MOSFET 的输出特性曲线亦称漏极特性曲线，如图 1-31b 所示。当  $U_{DS}$  较小时，在一定的  $U_{GS}$  作用下， $I_D$  几乎随  $U_{DS}$  的增大而线性增大， $I_D$  增长的斜率取决于  $U_{GS}$  的大小。在这个区域内，漏极和源极之间可看作一个受  $U_{GS}$  控制的可变电阻，故称为可变电阻区。当  $U_{DS}$  较大时， $I_D$  几乎不再随  $U_{DS}$  的增大而变化，但在一定的  $U_{DS}$  下， $I_D$  随  $U_{GS}$  的增加而增长，故这个区域称为线性放大区或恒流区，用于放大时就工作在这个区域。如果漏—源电压过大，当其超过最大漏—源极击穿电压  $U_{DS(BR)}$  时，将会使漏区与衬底间的 PN 结反向击穿，进入击穿区使 MOSFET 损坏。

P 沟道增强型 MOSFET 漏极电源、栅极电源的极性均与 N 沟道增强型 MOSFET 相反，故其转移特性曲线在第三象限。也就是说，P 沟道增强型 MOSFET 漏极和源极间应加负极性电源，栅极电位应比源极电位低  $|U_{GS(th)}|$  时 MOSFET 才能导通。

耗尽型 MOSFET 由于具有原始导电沟道，所以  $U_{GS} = 0$  时漏极电流已经存在，用  $I_{DSS}$  表示，称为饱和漏极电流。N 沟道耗尽型 MOSFET 的转移特性曲线和输出特性曲线如图 1-32 所示。



当  $U_{GS}$  减小 (即向负值方向增大) 到某一数值时, N 型沟道消失,  $I_D = 0$ , 耗尽型 MOSFET 处于夹断状态 (即截止), 此时的栅-源电压称为夹断电压  $U_{GS(off)}$ , 如图 1-32a 所示。可见, 耗尽型 MOSFET 不论栅-源电压  $U_{GS}$  是正是负或是零, 都能控制漏极电流  $I_D$ , 这个特点使其应用具有更大的灵活性。

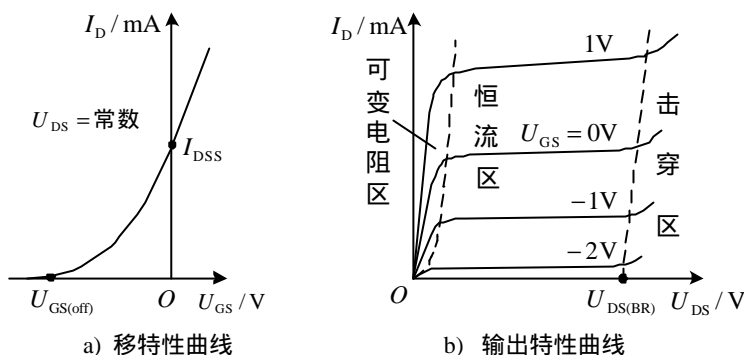


图 1-32 N 沟道耗尽型 MOSFET 的转移特性曲线和输出特性曲线图

实验表明, 在图 1-32b 所示输出特性曲线的恒流区内, N 沟道耗尽型 MOSFET 的  $I_D$  可近似表示为

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS(off)}} \right)^2 \quad (U_{GS} > U_{GS(off)}) \quad (1-8)$$

与增强型 MOSFET 一样, 耗尽型也有 N 沟道和 P 沟道之分。无论哪种类型的 MOSFET, 使用时必须注意所加电压的极性。

增强型和耗尽型绝缘栅场效应晶体管的主要区别就在于是否有原始导电沟道。所以, 如果要判别一个没有型号的 MOSFET 是增强型还是耗尽型, 只要检查它在零栅压下, 在漏、源极间加电压时是否能导通, 就可作出判别。

### 1.5.3 绝缘栅场效应晶体管的主要参数

增强型 MOSFET 的开启电压  $U_{GS(th)}$ 、耗尽型 MOSFET 的夹断电压  $U_{GS(off)}$  和饱和漏极电流  $I_{DSS}$  以及共同的最大漏-源极击穿电压  $U_{GS(BR)}$  等参数已经在上文中介绍, 此外, 主要参数有下面几个。

(1) 栅-源直流输入电阻  $R_{GS}$  栅-源直流输入电阻是在漏、源两极短路的情况下, 外加栅-源直流电压与栅极直流电流的比值。由于 MOSFET 是电压控制元件, 所以  $R_{GS}$  很大, 一般大于  $10^9 \Omega$ , 这是 MOSFET 的优点之一。但是正是由于  $R_{GS}$  很大, 应该注意可能出现栅极感应电压过高而造成绝缘层击穿的问题。为了避免这种损坏, 保存 MOSFET 时, 应将其各电极短接; 在电

路中栅、源极之间应有直流通路；焊接时，电烙铁应断电或具有良好的接地线。

(2) 栅-源击穿电压  $U_{GS(BR)}$  栅-源击穿电压是在增大 MOSFET  $U_{GS}$  的过程中，绝缘层击穿使  $I_G$  迅速增大时的  $U_{GS}$  值。

(3) 最大漏极电流  $I_{DM}$  和最大耗散功率  $P_{DM}$   $I_{DM}$  和  $P_{DM}$  都是 MOSFET 的极限参数。 $I_{DM}$  是 MOSFET 工作时允许流过的最大漏极电流。 $P_{DM}$  是 MOSFET 正常工作时，其漏极允许的耗散功率 ( $P_D = I_D U_{DS}$ ) 最大值，受 MOSFET 最高工作温度的限制。

(4) 低频跨导  $g_m$  低频跨导是在  $U_{DS}$  为某一固定值时，漏极电流的微小变化  $\Delta I_D$  和对应的输入电压变化量  $\Delta U_{GS}$  之比，即

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{常数}} \quad (1-9)$$

其单位常采用  $\mu S$  和  $mS$  ( $S$  即西[门子]，是电导的单位)。它的大小是转移特性曲线在工作点处的斜率，工作点的位置不同，值也不同。 $g_m$  表征栅-源电压对漏极电流控制作用的大小，是衡量 MOSFET 放大能力的参数。

#### 1.5.4 缘栅场型场效应晶体管简化的的小信号模型

和 BJT 一样，当 MOSFET 在低频小信号状态下工作时，可以用它线性的小信号模型电路来代替。

MOSFET 的输出特性曲线在线性放大区内比较平坦，可以近似看成是和横轴平行的直线，故  $I_D$  仅受  $U_{GS}$  控制，与  $U_{DS}$  无关。由式(1-9)可知， $\Delta I_D = g_m \Delta U_{GS}$ ，因此可用一个电压控制电流源 (VCCS) 来建立 MOSFET 简化的小信号模型，如图 1-33 所示。受控电流源  $g_m \Delta U_{GS}$  受电压  $\Delta U_{GS}$  的控制。由于 MOSFET 的栅-源输入电阻很大，故可认为栅、源极间是开路的。

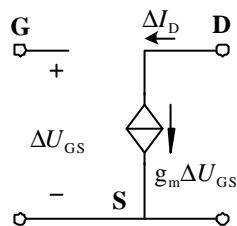


图 1-33 MOSFET 简化的小信号模型

#### 【练习与思考】

1.5.1 说明增强型绝缘栅场效应晶体管的工作原理，它和双极型晶体管的工作原理有何不同？各自的特点是什么？

1.5.2 N 沟道增强型和耗尽型 MOSFET 有何区别？说明  $U_{GS(th)}$  和  $U_{GS(off)}$  的物理意义。

1.5.3 N 沟道和 P 沟道 MOSFET 在正常工作时，其外接电源极性有何区别？

1.5.4 场效应晶体管在使用中应注意什么问题？

## 1.6 半导体光电器件

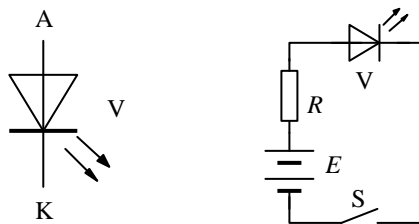
光和电是不同形式的能量，相互的转换是可逆的。半导体器件可以作为光、电能量转换的媒体。在光照作用下，照射光中的光子能够破坏半导体晶体的共价键，释放出电子；在电场作用下，电子与空穴复合发出的能量也能以一定波长的光的形式辐射。采用不同材料、工艺、结构制造的，用于光、电能量或信号转换的半导体电子器件统称为半导体光电器件。这类器件种类繁多，如发光二极管、激光二极管、光电池、光敏电阻、光敏二极管、光电三极管、光耦合器等。因其具有响应速度快、传输损耗小、抗干扰能力强等突出优点，适用于能量转换、信息传输与显示、信号传感与隔离，因而在现代电子技术中应用日趋广泛。本节仅介绍几种常用半导体光电器件。

### 1.6.1 发光二极管

半导体发光二极管是一种将电能直接转换成光能的固体器件，简称 LED (Light-emitting Diode)，其电路符号如图 1-34a 所示。

和普通二极管相似，LED 也是由一个 PN 结构成，PN 结封装在透明管壳内，且同样具有单向导电的特性。LED 之所以能发光，是由于它在结构、材料等方面与普通二极管有所不同。它的 PN 结面做得比较宽，半导体材料的掺杂浓度也比普通二极管高得多。在正向导通时，P 区的空穴注入到 N 区，N 区的电子注入到 P 区，相互注入的大量电子和空穴相遇而复合，复合所释放出的能量大部分以发光的形式输出。发光的波长由制造 LED 所使用的材料和杂质掺杂浓度而定，波长不同，发颜色光也不一样。砷化镓 LED 发红外光，磷化镓 LED 发绿光，磷砷化镓发红光或黄光。

发光二极管的工作电压一般在 2V 以下，工作电流为几毫安至十几毫安。用于发光指示的简单电路如图 1-34b 所示。其中  $R$  为限流电阻，在一定的范围内，电流愈大，发光愈强。



a) LED 的电路符号

b)简单的发光指示电路

图 1-34 LED 的电路符号及其简单的发光指示电路

由于 LED 具有抗振动和抗冲击能力、体积小、可靠性高、耗电省和寿命长等优点，广泛用于信号指示和传输。作为显示器件，LED 的外形有方形、矩形和圆形等。除单个使用外，也常作为七段式数码显示器或矩阵式显示器件使用，用于显示数字和字符。

七段式数码显示器简称数码管，其结构如图 1-35a 所示。COM 为公共端，两个 COM 引脚于数码管内部联接。数码管每个字段内置一个 LED，选择不同字段发光，可显示不同的字形。数码管中共有个 LED，其中七个用于字段，一个用于小数点，数码管制造时有共阴极和共阳极两种接法，分别如图 1-35b 和 c 所示。相对于公共端来说，前者，某一字段接高电位时发光；后者，接低电位时发光。

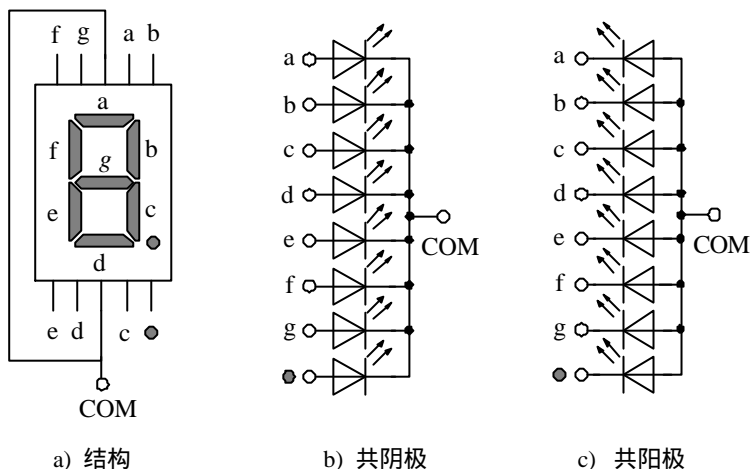


图 1-35 七段式数码显示器

### 1.6.2 光敏二极管

光敏二极管又称光电二极管。使用光敏二极管时，应反向接入电路，即将阳极接低电位，阴极接高电位。光敏二极管的管壳上有透明聚光窗，由于 PN 结的光敏特性，当有光线照射时，光敏二极管在一定的反向偏置电压范围内，其反向电流将随光射强度的增加而线性地增加。无光照时，光敏二极管的伏安特性与普通二极管一样。光敏二极管的符号和伏安特性曲线如图 1-36 所示。

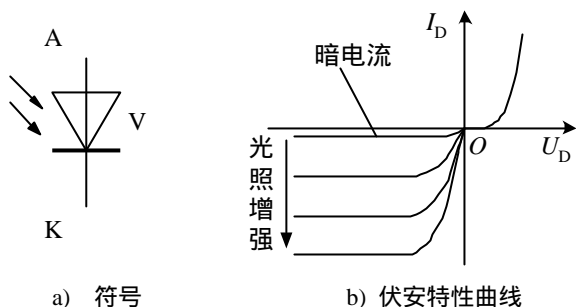


图 1-36 光敏二极管的符号和伏安特性曲线

光敏二极管的主要参数有：

- (1) **暗电流** 无光照时的反向饱和电流。一般小于  $1\mu\text{A}$ 。
- (2) **光电流** 指在额定照度下的反向电流，一般为几十毫安。
- (3) **灵敏度** 指在给定波长（如  $0.9\mu\text{m}$ ）的单位光功率时，光敏二极管产生的光电流。一般  $0.5\mu\text{A}/\mu\text{W}$ 。
- (4) **峰值波长** 使光敏二极管具有最大响应灵敏度（光电流最大）的光波长。一般光敏二极管峰值波长在可见光和红外线范围内。
- (5) **响应时间** 指加定量光照后，光电流达到稳定值的 63% 所需的时间，一般为  $10^{-7}\text{s}$ 。

需要注意的是，光敏二极管的暗电流随温度变化而变化，因此，对稳定性要求较高的电路，需要考虑进行温度补偿。

### 1.6.3 双极型光电三极管

双极型光电晶体管俗称光电三极管，其结构与普通 BJT 相似，而且也分 NPN 型和 PNP 型两类。光电三极管的管脚引线有三个的，也有两个的。三引线结构中，基极可以接偏置电路，用于预调工作点；两引线结构中，聚光窗口即为基极，只能由光照进行控制。它们的电路符号如图 1-37 所示。

光电三极管的光电转换是在基极—集电极耗尽层内进行的，与光电二极管相同。在光激发下产生的许多电子—空穴对（即光生载流子），其电子流向集电区被集电极所收集，空穴流向基区作为基极电流被放大  $\beta$  倍，其放大原理与普通 BJT 相同。根据工作原理，可以把光电三极管看成在一个普通 BJT 的基极和集电极之间接一个反向偏置的光敏二极管，如图 1-38 所示。

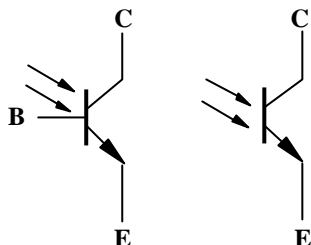


图 1-37 光电三极管的电路符号

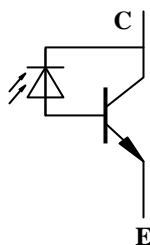


图 1-38 光电三极管工作原理示意图

在光敏面积相同的条件下，光电流的放大作用使得光电三极管比光敏二极管的灵敏度要高出约 $\beta$ 倍。因此，光电三极管的光敏面积可以做得很小，更适用于要求较高封装密度的场合。

光电三极管的特征参数和极限参数与光敏二极管和普通 BJT 相似。

#### 1.6.4 光耦合器

光耦合器简称光耦，是发光器件和光电器件的组合体，图 1-39 为其原理示意图。使用时将电信号送入光耦合器输入侧的发光器件，发光器件将电信号转换成光信号，由输出侧的受光器件（光电器件）接收并再转换成电信号。由于输入与输出之间没有直接电气联系，信号传输是通过光耦合的，所以也称其为光电隔离器。

光耦合器常见的封装形式有管形金属壳真空密封式、双列直插密封式和光导纤维连接式等三种。图 1-40 是双列直插式光耦的内部结构图。这种光耦合器的发光器件和受光器件封装在同一不透明的外壳内，由透明、绝缘的树脂隔开。

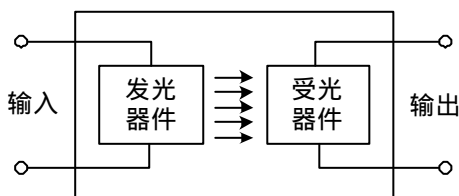


图 1-39 光耦合器的原理示意图

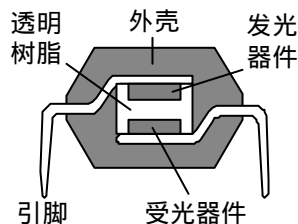


图 1-40 双列直插式光耦的内部结构图

发光器件常用发光二极管。受光器件则根据输出电路的不同要求，有光敏二极管型、光电三极管型、光电复合三极管型、光电晶闸管型和光电集成电路型等。图 1-41 为几种常用光耦合器的符号。

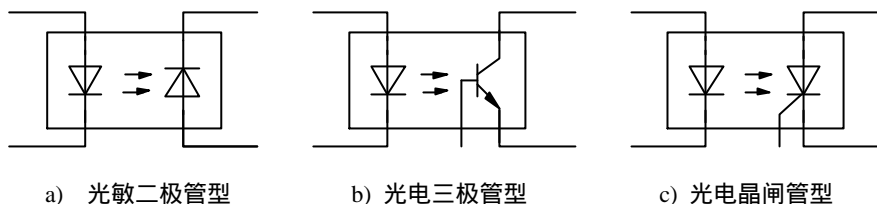


图 1-41 几种常用光耦合器的符号

光电耦合器具有如下特点：

- 1) 光耦合器的发光器件与受光器件互不接触，绝缘电阻很高，一般可达  $10^{10}$  以上，并能承受 2000V 以上的高压，因此经常用来隔离强电和弱电系统。
- 2) 光耦合器的发光二极管是电流驱动器件，输入电阻很小，而干扰源一般内阻较大，且能量很小，很难使发光二极管误动作，所以光耦合器有极强的抗干扰能力。
- 3) 光耦合器具有较高的信号传递速度，响应时间一般为数微秒，高速型光耦合器的响应时间可以小于 100ns。

光耦合器的用途很广，常用于信号隔离转换，脉冲系统的电平匹配，微机控制系统的输入、输出接口等。

### 【练习与思考】

- 1.6.1 发光二极管的工作电压和工作电流一般在什么范围？
- 1.6.2 为什么在用光敏二极管测光的电路中经常会有温度补偿电路环节？

## 本章习题

【习题 1-1】电路如图 1-42 所示，求电位  $V_o$ 。二极管的正向压降可忽略不计。

【习题 1-2】电路如图 1-43 所示，试判断 4 个二极管的工作状态并求电位  $V_o$ 。二极管的正向压降可忽略不计。

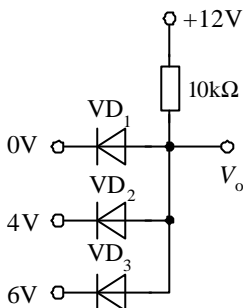


图 1-42 习题 1-1 的图

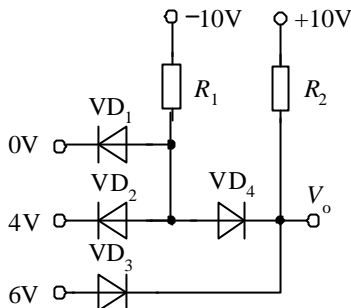


图 1-43 习题 1-2 的图

【习题 1-3】电路如图 1-18a 所示，设  $VD_1$ 、 $VD_2$  均为理想二极管，试画出  $-10V \leq u_i \leq 10V$  范围内的传输特性曲线  $u_o = f(u_i)$ 。

【习题 1-4】在图 1-44 所示的各电路中，已知  $E = 5V$ ， $u_i = 10 \sin \omega t V$ 。二极管的正向压降可忽略不计。试分别画出输出电压  $u_o$  的波形。

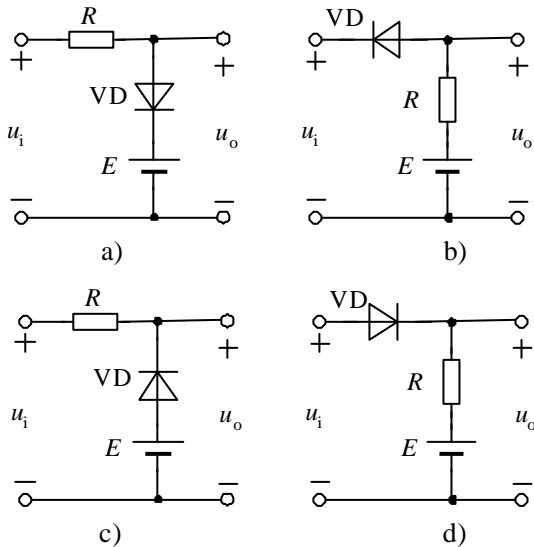


图 1-44 习题 1-4 的图



【习题 1-5】二极管电路如图 1-45 所示，求电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I$ 。

【习题 1-6】二极管电路如图 1-46 所示，求电流  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 、 $I$ 。

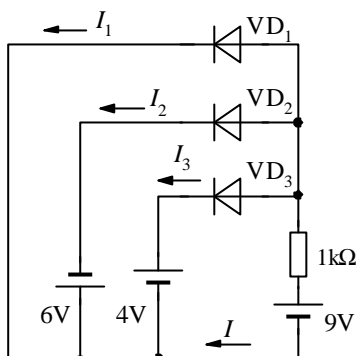


图 1-45 习题 1-5 的图

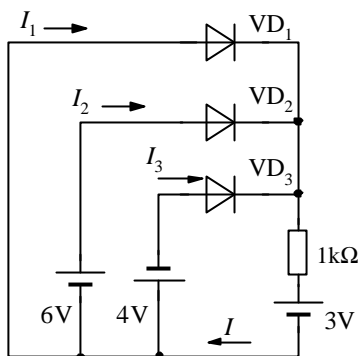


图 1-46 习题 1-6 的图

【习题 1-7】有两个稳压管  $VS_1$ 、 $VS_2$ ，其稳定电压分别是 5.5V 和 8.5V，正向压降都是 0.5V。如果要得到 0.5V、3V、6V、9V 和 14V 几种稳定电压，这两个稳压管（还有限流电阻）应该如何连接？画出各电路。

【习题 1-8】电路如图 1-47 所示， $VS_1$  的稳定电压为 5V， $VS_2$  的稳定电压为 7V，两稳压管的正向压降均为 0.5V，输入电压  $u_i = 10 \sin \omega t V$ ，试画出输出电压  $u_o$  的波形图。

【习题 1-9】电路如图 1-48 所示，稳压管  $VS_1$ 、 $VS_2$  的稳定电压均为 10V，试画出  $0 \leq u_i \leq 30V$  范围内的传输特性曲线  $u_o = f(u_i)$ 。

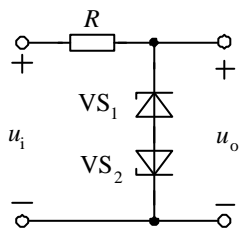


图 1-47 习题 1-8 的图

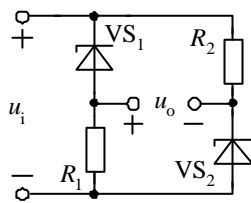


图 1-48 习题 1-9 的图

【习题 1-10】某一双极型晶体管的  $P_{CM}=100mW$ ， $I_{CM}=20mA$ ， $U_{(BR)CEO}=15V$ ，试问在下列几种情况下，哪种是正常工作？（1） $U_{CE}=3V$ ， $I_C=10mA$ ；（2） $U_{CE}=2V$ ， $I_C=40mA$ ；（3） $U_{CE}=6V$ ， $I_C=20mA$ 。

【习题 1-11】图 1-49 为某一绝缘栅型场效应晶体管的输出特性曲线，试由此图判断：（1）此属于哪一种类型；（2）其夹断电压  $U_{GS(off)}$  大约是多少；

(3) 饱和漏极电流  $I_{DSS}$  是多少。

【习题 1-12】在图 1-50 所示电路中，为使 BJT 工作在饱和状态， $R_{B1}$  的阻值最大应为多少？

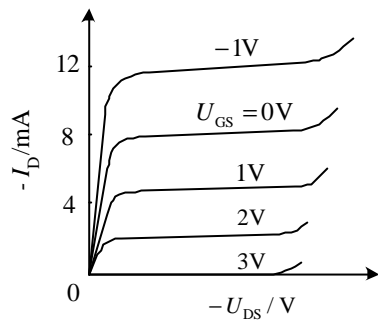


图 1-49 习题 1-11 的图

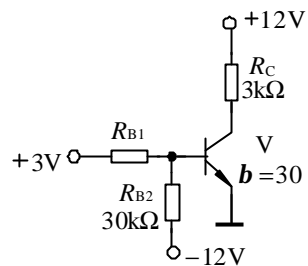


图 1-50 习题 1-12 的图