

## 半导体器件

半导体器件是电子技术的重要组成部分,因其具有体积小、重量轻、使用寿命长以及功耗小等优点而得到广泛应用。本章首先介绍半导体的基本知识,重点讨论常用半导体二极管、三极管及场效管的结构、原理、特性曲线及主要参数。

### 1.1 半导体的基础知识

#### 1.1.1 半导体的特性

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。用于制造半导体元器件的半导体有硅、锗、砷化镓及金属氧化物等,其中尤以硅最为常见。

半导体之所以用来制造半导体器件,是因为它的导电能力在外界因素的作用下会发生显著的变化,具有显著的特性。

(1) 热敏特性。温度的变化会使半导体的电导率发生显著的变化,利用半导体的电阻率对温度特别灵敏,可做成各种热敏元件。

(2) 光敏特性。光照可以改变半导体的电导率。在没有光照时,电阻可高达几十兆欧;在受到光照射时,电阻可降到几十千欧。利用这种特性可制成光电晶体管、光耦合器和光电池等。

(3) 掺杂特性。掺杂可以提高半导体的导电能力,因此可用来制作各种热敏、光敏器件,用于自动控制和自动测量中。若在纯净半导体中掺入微量杂质,其导电性能也可得到显著提高,因此,可以通过掺入不同种类和数量的杂质元素制成二极管、三极管等各种不同用途的半导体器件。

#### 1.1.2 本征半导体

纯净的不含任何杂质、晶体结构排列整齐的半导体称为本征半导体。原子是由带正电的原子核和带负电的核外电子组成的。若把纯净的半导体材料制成单晶体,则它们的原子将有序排列。图 1-1 分别为硅原子核结构和单晶硅的原子排列示意图。

在一定温度下,若受光和热的激发,晶体结构中的少数价电子将会挣脱原子核的束缚成为自由电子。在原来共价键的相应位置留下一个空位,这个空位称为空穴,如图 1-1(b)所示。空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。显然,自由电子与空穴是成对出



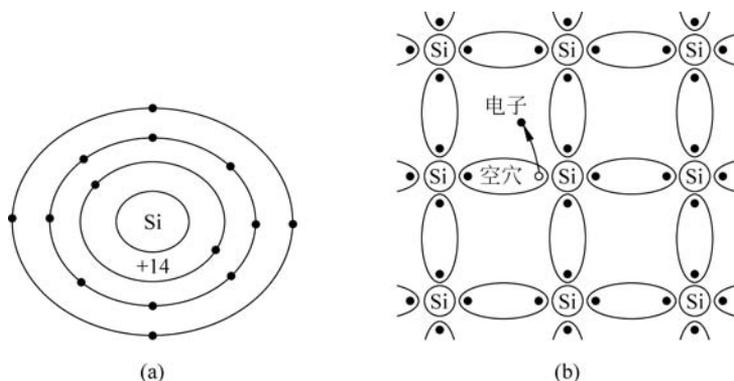


图 1-1 硅原子核结构和单晶硅的原子排列

现的,所以称其为电子-空穴对。在本征半导体中,自由电子与空穴的数量总是相等的。此时原子失去电子带正电,相当于空穴带正电。与此同时有空穴的原子会吸引相邻原子的价电子来填补空穴,于是形成了新的空穴,并继续吸引新的价电子转移到这个新的空穴上,如图 1-2 所示。如此继续不断,在晶体内则形成了自由电子的运动和空穴的反方向运动。因此,电子和空穴都成为运载电荷的粒子,叫作载流子。本征半导体在外电场作用下,两种载流子的运动方向相反,形成的电流方向相同。



动画:半导体的两种载流子

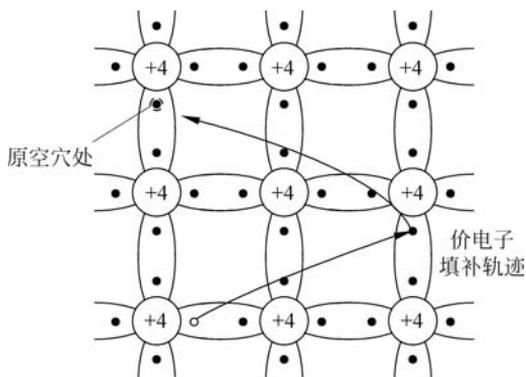


图 1-2 电子与空穴的填补运动

### 1.1.3 杂质半导体

在本征半导体内部,自由电子和空穴总是成对出现的,因此对外呈电中性。如果在本征半导体中掺入少量的其他元素,就会使半导体的导电能力发生显著的变化。根据掺入杂质的不同,可形成两种不同的杂质半导体,即 N 型半导体和 P 型半导体。

#### 1. N 型半导体

硅是四价元素,原子核最外层有四个电子。若在单晶硅中掺入五价磷,就可形成 N 型半导体,如图 1-3 所示。由于五价的磷原子同相邻的四个硅或锗原子组成共价键时,有一个多余的价电子不能构成共价键,这个价电子就变成了自由电子。在 N 型半导体中,

电子为多数载流子,空穴为少数载流子,导电以自由电子为主,故N型半导体又称电子型半导体。

## 2. P型半导体

同样,若在纯净半导体硅或锗中掺入少量的三价元素杂质(如硼),就可成为P型半导体。硼原子只有三个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在共价键中便产生了一个空穴,如图1-4所示。在P型半导体中,空穴数远大于自由电子数,空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子,导电以空穴为主,故P型半导体又称空穴型半导体。

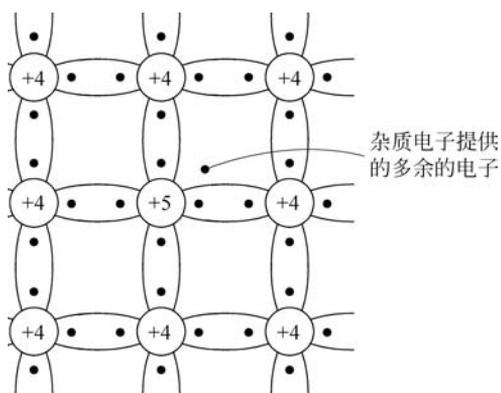


图 1-3 N型半导体

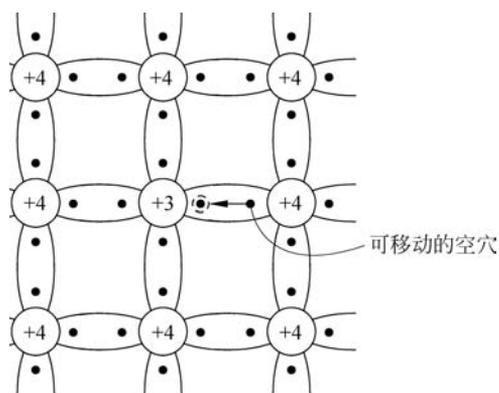


图 1-4 P型半导体

## 1.1.4 PN结及导电特性

### 1. PN结的形成

在一块本征半导体的晶片上,通过一定的掺杂工艺,可使一边形成P型半导体,而另一边形成N型半导体。在N型和P型半导体交界面的两侧,由于载流子浓度的差别,N区的电子向P区扩散,而P区空穴向N区扩散,如图1-5所示。

P区一侧因失去空穴而留下不能移动的负离子,N区一侧因失去电子而留下不能移动的正离子,这些离子被固定排列在半导体晶体的晶格中,不能自由运动,因此并不参与导电。这样,在界面两侧形成一个带异性电荷的离子层,称为空间电荷区,又称耗尽层或PN结;并产生内电场,其方向是从N区指向P区。PN结是构成各种半导体器件的基本单元。

### 2. PN结的单向导电特性

实验证明,PN结对外不导电。但若在PN结两端加不同极性的电压,则将破坏原平衡状态而呈现单向导电性。

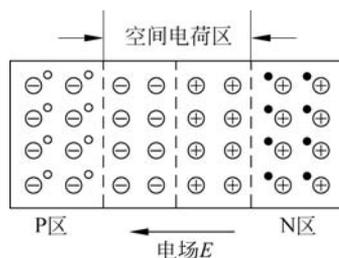


图 1-5 PN结的形成



动画: PN结形成原理

### (1) PN 结的正向偏置

在 PN 结两端外加电压,若 P 端接电源正极,N 端接电源负极,则称为正向偏置。由于外加电源产生的外电场其方向与 PN 结产生的内电场的方向相反,削弱了内电场,使 PN 结变薄,因此有利于两区多数载流子向对方扩散,形成正向电流。此时测得正向电流较大,PN 结呈现低电阻,称为 PN 结正向导通,如图 1-6 所示。

### (2) PN 结的反向偏置

如图 1-7 所示,PN 结的 P 端接电源负极,N 端接电源正极,称为反向偏置。由于外加电场的方向与内电场的方向一致,因而加强了内电场,使 PN 结加宽,阻碍了多数载流子的扩散运动。在外电场的作用下,只有少数载流子形成了很小的电流,称为反向电流。此时测得电流近似为零,PN 结呈现高电阻,称为 PN 结反向截止。



动画: PN 结单向导电性

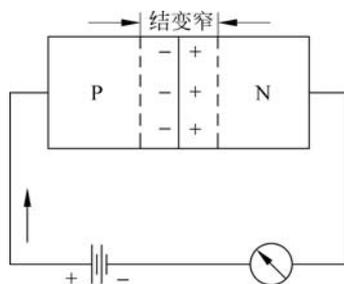


图 1-6 PN 结的正向偏置

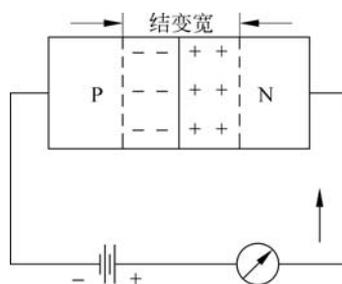


图 1-7 PN 结的反向偏置

应当指出,少数载流子是由于热激发产生的,因而 PN 结的反向电流受温度影响很大。综上所述,PN 结具有单向导电性,即加正向电压时导通,加反向电压时截止。

## 1.2 半导体二极管

### 1.2.1 二极管的结构、符号及类型

#### 1. 结构与符号

在形成 PN 结的 P 型半导体上和 N 型半导体上,分别引出两根金属引脚,并用管壳封装,就构成二极管。其中从 P 区引出的电极为正极(阳极),从 N 区引出的电极为负极(阴极)。二极管的结构、符号及外形如图 1-8 所示。

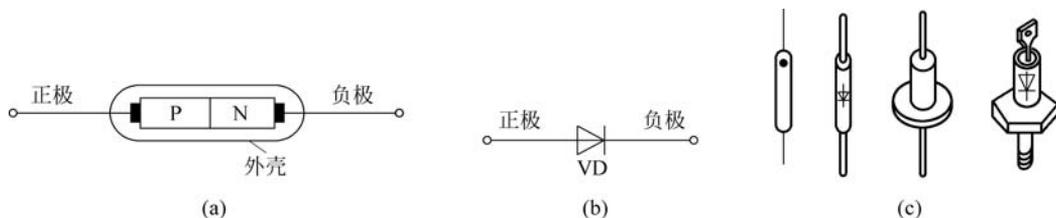


图 1-8 二极管的结构、符号及外形

多数二极管的管壳上都标有极性符号,对于玻璃外壳的硅二极管,有色点或色环的为

负极。由于二极管实质上就是一个PN结,必然具有单向导电性,因此也可以用万用表的电阻挡测量它的正、反向电阻以判断其正、负极性。

二极管的图形符号中,空心箭头的方向为其正向导通时电流的方向。

## 2. 类型

(1) 按材料分:有硅二极管、锗二极管和砷化镓二极管等。

(2) 按结构分:有面接触型和点接触型。面接触型二极管的结面积大,结电容也大,可通过较大的电流,但其工作频率较低,常用在低频整流电路中;点接触型二极管的结面积小,结电容也小,高频性能好,但允许通过的电流较小,一般应用于高频检波和小功率整流电路中,也用作数字电路的开关元件。

(3) 按用途分:有整流、稳压、开关、发光、光电及变容等二极管,肖特基二极管等。

(4) 按封装形式分:有玻璃、塑料及金属封装等二极管。

(5) 按功率分:有大功率、中功率和小功率二极管。

(6) 按二极管工作频率的不同分:有高频二极管和低频二极管。

### 1.2.2 二极管的伏安特性

常利用伏安特性曲线来描述二极管的单向导电性。所谓二极管的伏安特性,是指二极管两端电压和流过它的电流之间的关系,如图1-9所示。伏安特性是二极管应用的理论依据。下面对二极管的伏安特性曲线加以说明。

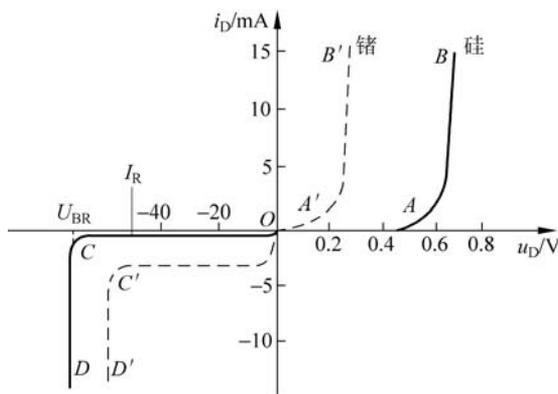


图1-9 二极管的伏安特性

#### 1. 正向特性

二极管的正向特性分为正向死区和正向导通区两部分。图中OA段为正向死区。由于正向电压较低,正向电流近似为零,二极管呈现高阻特性,尚未导通。当外加电压超过死区电压后,正向电流随外加电压的增大而迅速上升,二极管呈导通状态,如图中AB段。导通后,二极管管压降很小,且不随电流变化。硅管的死区电压约为0.5V,导通管压降约为0.7V。图中虚线为锗管的伏安特性曲线,锗管的死区电压约为0.1V,导通管压降约为0.3V。



动画:二极管的伏安特性



仿真:二极管直流电源正向



仿真:二极管交流电源正向



仿真:二极管直流电源反向



仿真:二极管交流电源反向

## 2. 反向特性

二极管的反向特性分为反向截止区和反向击穿区两部分。图中  $OC$  段为反向截止区,二极管两端加上反向电压时,在开始的很大范围内,二极管相当于一个非常大的电阻,反向电流  $I_R$  极小,且不随反向电压  $U_R$  变化,称为反向饱和电流,通常用  $I_R$  表示。小功率硅管的反向饱和电流一般小于  $0.1\mu\text{A}$ 。当反向电压增大到一定数值时,反向电流将急剧增大,称为反向击穿,此时,对应的电压称为反向击穿电压,用  $U_{BR}$  表示,如图  $CD$  段所示。反向击穿将造成 PN 结损坏,应用中应避免发生。

二极管的反向饱和电流与温度密切相关,温度升高时,少数载流子增加,所以反向电流将急剧增加。通常温度每升高  $10^\circ\text{C}$ ,反向饱和电流约增加一倍。当温度升高时,二极管反向击穿电压  $U_{BR}$  会有所下降。

由以上分析可知,二极管是一个非线性元件,电压和电流之间的关系不符合欧姆定律,电阻不是一个常数。除单向导电性外,二极管还具有开关特性。正向导通时,管压降很小,可视为短路,相当于一个闭合的开关。反向截止时,反向电流很小,可视为开路,相当于一个断开的开关。因此在开关电路中有广泛的应用。

### 1.2.3 二极管的主要参数

电子元器件的参数表征了器件的性能及使用条件,是合理选用和正确使用半导体器件的重要依据。二极管的参数可从手册上查到。二极管的主要参数可参阅本书附录 C。下面对二极管的常用参数做简要介绍。

#### 1. 最大整流电流

最大整流电流  $I_F$  是指二极管长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。二极管工作时不得超过此值,否则 PN 结将因过热而损坏。

#### 2. 最高反向工作电压

最高反向工作电压  $U_{RM}$  是指允许加在二极管两端的反向电压的最大值,其值通常取二极管反向击穿电压的一半左右。使用二极管时不得超过此值,否则二极管将被反向击穿。

#### 3. 反向电流

反向电流  $I_R$  是指在室温下,二极管未击穿时的反向电流值,该值越小,管子单向导电性能越好。

#### 4. 最高工作频率

二极管的最高工作频率  $f_M$  是指二极管正常工作时的上限频率值。它的大小与 PN 结的结电容有关。超过此值,二极管的单向导电性能变差。

二极管的参数很多,除上述参数外,还有结电容、正向电压等,在实际应用时,可查阅半导体器件手册。

### 1.2.4 特殊用途二极管

二极管的种类很多,利用 PN 结的单向导电性制成的二极管有整流二极管、检波二极

管、开关二极管等。此外,PN结还有一些其他特性,采用适当工艺方法可制成特种功能的二极管,如稳压二极管、变容二极管、发光二极管和光电二极管等。

### 1. 稳压管

稳压管是一种特殊的面接触型二极管,具有稳压作用,图1-10为它的伏安特性曲线和电路符号。

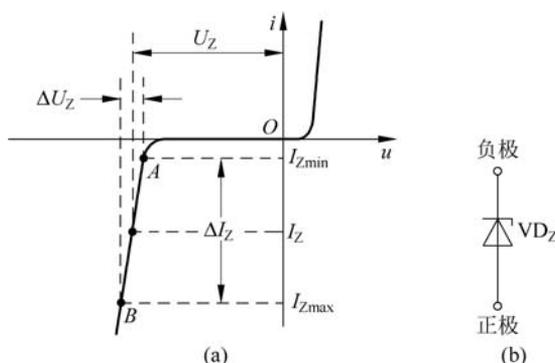


图1-10 稳压管的伏安特性曲线和电路符号

#### (1) 稳压管的稳压原理

从伏安特性看,稳压管的正向特性与普通二极管相同。不同的是,稳压管工作在反向偏置状态,即它的正极接电源的低电位,负极接电源的高电位。稳压管反向击穿时,其反向电流可在很大范围内变化,如图中 $\Delta I_Z$ ,但端电压却变化很小,如图中 $\Delta U_Z$ ,因此具有稳压作用。

#### (2) 稳压管的主要参数

① 稳压电压 $U_Z$ : 稳压管的反向击穿电压。不同类型的稳压管其稳压值不一样。由于制造工艺的原因,同一型号的稳压管的稳压值也不易固定在同一数值上,而是有一个范围。例如2CW52型稳压管, $U_Z$ 的允许值范围为3.2~4.5V。其中有的可能是3.5V,有的可能是4.2V。

② 最大稳定电流 $I_{ZM}$ : 允许通过的最大反向电流。

③ 最大耗散功率 $P_{ZM}$ : 稳压管所允许的最大功耗,其值为 $P_{ZM} = I_{ZM}U_Z$ 。若超过此值,管子将过热而损坏。

**【例1-1】**如图1-11所示,已知稳压二极管 $U_Z = 5.5\text{V}$ ,当 $U_1 = \pm 15\text{V}$ , $R = 1\text{k}\Omega$ 时,求 $U_O$ 。已知稳压二极管的正向导通压降 $U_F = 0.7\text{V}$ 。

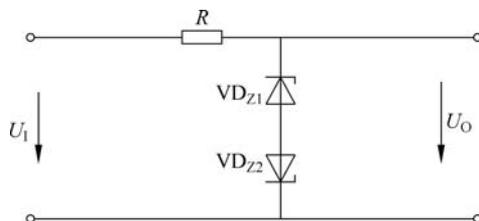


图1-11 例1-1图

解 当  $U_1=15\text{V}$ ,  $\text{VD}_{Z1}$  反向击穿稳压,  $U_Z=5.5\text{V}$ ,  $\text{VD}_{Z2}$  正向导通, 则  $U_O=6.2\text{V}$ ; 同理,  $U_1=-15\text{V}$ ,  $\text{VD}_{Z2}$  反向击穿稳压,  $\text{VD}_{Z1}$  正向导通,  $U_O=-6.2\text{V}$ 。

## 2. 发光二极管

发光二极管是一种能将电能转换成光能的特殊二极管, 它的图形符号及外形如图 1-12 所示。制作发光二极管的半导体中杂质浓度很高, 当对管子加正向电压时, 多数载流子的扩散运动加强, 大量的电子和空穴在空间电荷区复合时释放出的能量大部分转换为光能, 从而使发光二极管发光, 并可根据不同化合物材料发出不同颜色的光, 如磷砷化钾发出红色的光、磷化镓发出绿色的光等。发光二极管常用来作为显示器件, 除单个使用外, 也常做成七段数码管, 正向导通电压一般为  $1\sim 2\text{V}$ , 工作电流一般为几毫安至十几毫安之间。

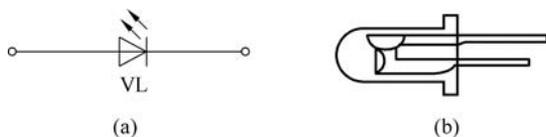


图 1-12 发光二极管的符号及外形

## 3. 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管, 光电二极管在管壳上有一个玻璃窗口以便接受光照, 如图 1-13(a)所示。光电二极管一般工作在反向电压下, 它的反向电流随着光照强度的增强而上升, 它的图形符号如图 1-13(b)所示。当有光照时, 激发大量电子空穴, 光电二极管处于导通状态; 当没有光照时, 只有很少的电子空穴, 光电二极管处于截止状态。光电二极管可应用于光的测量。

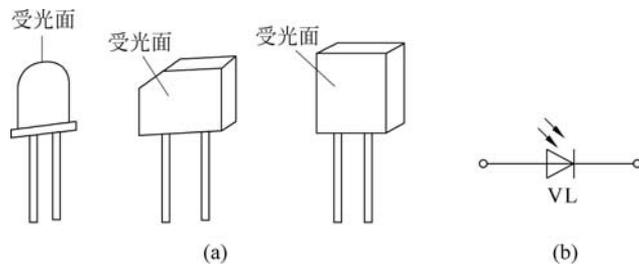


图 1-13 光电二极管的外形及符号

## 4. 变容二极管

变容二极管是利用 PN 结反偏时结电容大小随外加电压而变化的特性制成的。反偏电压增大时结电容减小, 反之结电容增大。它的图形符号如图 1-14 所示。变容二极管的电容量一般较小, 其最大值为几十到几百皮法。它主要在高频电路中用作自动调谐、调频等, 例如在电视机接收机的调谐电路中作可变电容。

### 5. 肖特基二极管

肖特基二极管是利用金属和 N 型或 P 型半导体接触形成具有单向导电性的二极管, 它的图形符号如图 1-15 所示。肖特基二极管具有开启电压小(0.2~0.5V)、工作速度快的特点。它在数字集成电路中与晶体三极管结合, 形成肖特基晶体管, 以提高开关速度, 还可用作高频检波和续流二极管等。

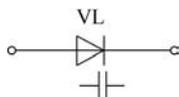


图 1-14 变容二极管的符号



图 1-15 肖特基二极管的符号

## 1.3 半导体三极管

半导体三极管又叫晶体管, 简称三极管, 主要用于放大电路和开关电路, 在电子电路中得到了广泛的应用。本节仅讨论三极管的结构、电路符号、工作原理、特性曲线及其主要参数等。

### 1.3.1 三极管的结构及符号

三极管是由三层半导体材料组成的。三极管有三个区域, 中间的一层为基区, 两侧分别为发射区和集电区。发射区和集电区的作用分别是发射和收集载流子, 从而形成半导体内部电流。三极管有两个 PN 结, 发射区和基区之间的 PN 结叫作发射结  $J_e$ , 集电区和基区之间的 PN 结叫作集电结  $J_c$ 。三极管有三个电极, 各自从基区、发射区和集电区引出, 分别称为基极 b、发射极 e 和集电极 c。

根据三个区域半导体材料类型的不同, 三极管可分为 NPN 型和 PNP 型两类。基区为 P 型材料的三极管为 PNP 型, 基区为 N 型材料的三极管为 NPN 型。两者的工作原理完全相同, 只是工作电压的极性不同, 因此三个电极电流的方向也相反。如图 1-16 所示给出了三极管的结构和符号。

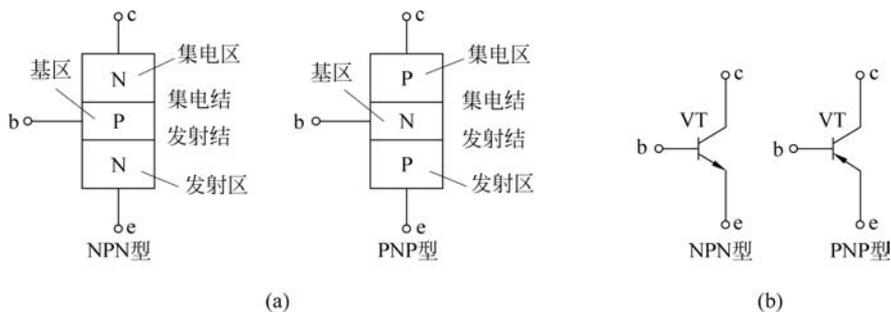


图 1-16 三极管的结构和符号

与二极管相似,电路符号中箭头的方向表示发射结正偏时发射极电流的方向,该电流总是从 P 指向 N。图 1-17 为常见三极管的外形。

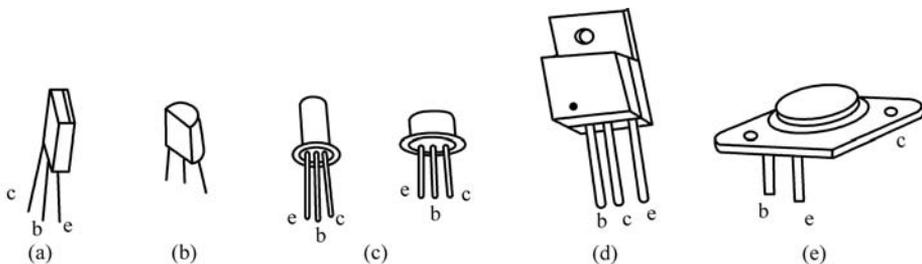


图 1-17 常见三极管的外形

(a) 3DG201; (b) 3A×31; (c) 3DG6; (d) CD715; (e) 3DD101A

三极管的种类很多。除上述的按结构分为 NPN 型和 PNP 型外,按工作频率可分为低频管和高频管,按功率大小可分为小功率管、中功率管和大功率管,按所用半导体材料分为硅管和锗管,按用途分为放大管和开关管等。三极管命名方法可参阅附录 D。

为使三极管具有电流放大作用,采用了以下制造工艺:基区很薄且掺杂浓度低,发射区掺杂浓度高,集电结面积比发射结的面积大,但掺杂浓度低。因此,在使用时三极管的发射极和集电极不能互换。

### 1.3.2 三极管的电流分配关系

三极管的电流放大作用是指基极电流对集电极电流的控制作用。

#### 1. 电流放大作用的条件

三极管的电流放大作用,首先取决于其内部结构特点,即发射区掺杂浓度高、集电结面积大,这样的结构有利于载流子的发射和接收。而基区薄且掺杂浓度低,以保证来自发射区的载流子能顺利地流向集电区。其次要有合适的偏置。三极管的发射结类似于二极管,应正向偏置,使发射结导通,以控制发射区载流子的发射。而集电结应反向偏置,以使集电极具有吸收由发射区注入基区的载流子的能力,从而形成集电极电流。对于 NPN 型三极管,必须保证集电极电位高于基极电位,基极电位又高于发射极电位,即  $V_C > V_B > V_E$ ;

而 PNP 型三极管则与之相反,即  $V_C < V_B < V_E$ 。

#### 2. 三极管各电极电流的形成

如图 1-18 所示为 NPN 型三极管内部载流子的运动规律,三极管接成共发射极接法。三极管各极电流的形成分析如下。

##### (1) 发射区发射电子形成 $I_E$

发射结正偏,由于发射区掺杂浓度高而产生大量自由电子,在外电场的作用下,被发射到基区。两个电源的负极同时向发射区补充



动画: 三极管各电极的电流形成

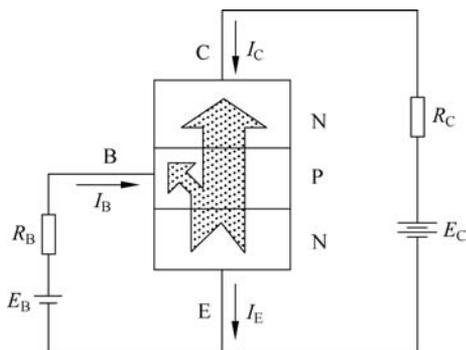


图 1-18 NPN 型三极管内部载流子的运动规律