

# 上篇 模拟部分

## 第

# 1

## 章

# 半导体器件

半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先介绍半导体基础知识，包括半导体材料的特性、半导体中载流子的运动、PN 结的单向导电性等，然后介绍半导体二极管、三极管和场效应管的结构、工作原理、特性曲线及主要参数。

## 1.1 半导体基础知识

自然界的物质，按照导电能力的强弱，可分为导体、半导体和绝缘体 3 类。物质的导电性能取决于原子结构。低价元素一般导电性能好，如银、铜、铝等金属材料，都是良好的导体，它们的特点是，最外层电子容易摆脱原子核的束缚，成为自由电子，可以在外电场的作用下产生定向移动，即产生电流。而高价元素，如惰性气体，或高分子物质，如橡胶，它们的最外层电子很难挣脱原子核的束缚成为自由电子，所以导电性极差，我们称之为绝缘体。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，它的电阻率在  $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  范围内。

目前，制作半导体器件的主要材料是硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 等。其中硅用得最广泛，它是当前制作集成器件的主要材料，而砷化镓主要用来制作高频高速器件。

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，它是构成电子电路的基本元件，半导体器件是由经过特殊加工且性能可控的半导体材料制成的。

### 1.1.1 本征半导体

将纯净的半导体经过一定工艺过程制成的单晶体，称为本征半导体。

常用的半导体材料有硅 (Si) 和锗 (Ge)，它们都是四价元素，它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱原子核的束缚成为自由电子，也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧，内部几乎没有自由电子，所以半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

本征半导体中的四价元素是靠共价键结合成分子的，图 1-1 所示为本征半导体硅和锗晶体的共价键结构平面示意图。

半导体之所以被人们重视，主要的原因是它的导电能力在不同的条件下有显著的差异。例如，当有些半导体受到热或光的激发时，导电能力将明显增长。如果在纯净的半导体中掺

## 2 | 模拟电路与数字电路（第2版）

入微量“杂质”，半导体的导电能力将猛增到几千、几万乃至上百万倍。人们就是利用半导体的热敏、光敏特性制作成半导体热敏元件和光敏元件，利用半导体的掺杂特性制造了种类繁多，且具有不同用途的半导体器件，如二极管、三极管、场效应管等。

### 1.1.2 本征激发和两种载流子

晶体的共价键具有很强的结合力，在常温下，本征半导体内部仅有极少数的价电子可以在热运动的激发下，挣脱原子核的束缚而成为晶格中的自由电子，与此同时，在共价键中将留下一个带正电的空位子，称为空穴，如图 1-2 所示。

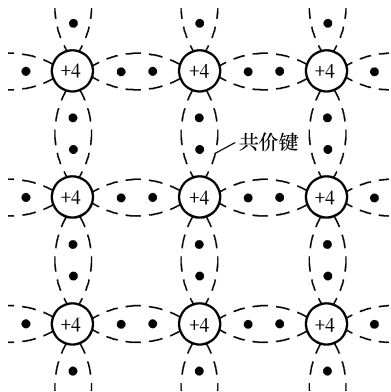


图 1-1 共价键结构平面示意图

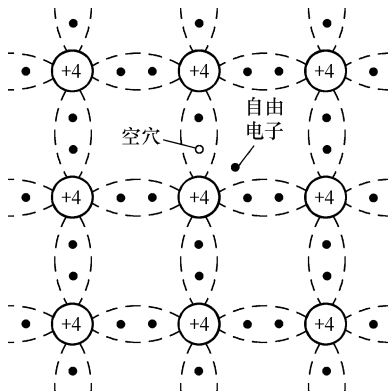


图 1-2 本征激发示意图

热运动激发所产生的电子和空穴总是成对出现的，称为电子—空穴对。本征半导体因热运动而产生电子—空穴对的现象称为本征激发。

本征激发所产生的电子—空穴对，在外电场的作用下，都会作定向移动而形成电流。自由电子的移动与导体中自由电子移动的方式相同，它将形成一个与自由电子移动方向相反的电流。

空穴的移动，可以看成是自由电子定向依次填充空穴而形成的，这种填充作用相当于教室的第一排有一个空位，后排的同学依次往前挪来填充空位，以人为参照系，人填充空位的作用等效于人不动，空位往后走。因空穴带正电，空穴的这种定向移动会形成与空穴运动方向相同的空穴电流。

半导体内部同时存在着自由电子和空穴移动所形成的电流是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电机理上本质的差别。

在电子技术中把参与导电的物质称为载流子。因为本征半导体内部参与导电的物质有自由电子和空穴，所以本征半导体中有两种载流子，一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴。

本征半导体导电能力的大小与本征激发的激烈程度有关，温度越高，由本征激发所产生的电子—空穴对越多，本征半导体内部载流子的数目也越多，本征半导体的导电能力就越强，这就是半导体导电能力受温度影响的直接原因。

本征半导体本征激发的现象还与原子的结构有关，硅的最外层电子离原子核较远，所以硅最外层电子受原子核的束缚力较弱的强，本征激发现象比较弱，热稳定性比锗好。

### 1.1.3 杂质半导体

半导体的导电能力除了与温度有关外，还与半导体内部所含的杂质有关。在本征半导体

中掺入微量的杂质，可以使杂质半导体的导电能力得到改善，并受所掺杂质的类型和浓度控制，使半导体获得重要的用途。由于掺入半导体中的杂质不同，杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两大类。

### 1. N型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，掺入微量的五价元素，如磷（P）。掺入的杂质并不改变本征半导体硅（或锗）的晶体结构，只是半导体晶格点阵中的某些硅（或锗）原子被磷原子所取代。五价元素的四个价电子与硅（或锗）原子组成共价键后，将多余一个价电子。如图1-3所示，这一多余的电子不受共价键的束缚，只需获得较小的能量，就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子。于是，半导体中自由电子的数量增加。

五价元素的原子团因失去电子而成为正离子，但它不产生空穴，不能像空穴那样能被电子填充而移动参与导电，所以它不是载流子。

杂质半导体中，除了杂质元素施放出的自由电子外，半导体本身还存在本征激发所产生的电子—空穴对。由于增加了杂质元素所施放出的自由电子数，导致这类杂质半导体中的自由电子数大于空穴数。自由电子导电成为此类杂质半导体的主要导电方式，故称它为电子型半导体，简称N型半导体。

在N型半导体中，电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。由于杂质原子可以提供电子，故称为施主原子。N型半导体主要靠自由电子导电，在本征半导体中掺入的杂质越多，所产生的自由电子数也越多，杂质半导体的导电能力就越强。

### 2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价杂质元素，如硼（B）。杂质原子取代晶体中某些晶格上的硅（或锗）原子，三价元素的3个价电子与周围4个原子组成共价键时，缺少1个电子而产生了空位，如图1-4所示。此空位不是空穴，所以不是载流子，但是邻近的硅（或锗）原子的价电子很容易来填补这个空位，于是在该价电子的原位上就产生了1个空穴，而三价元素却因多得了1个电子而成了负离子。

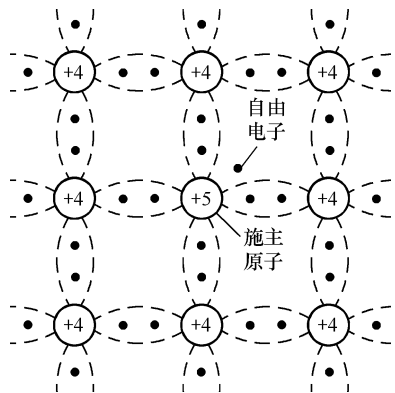


图 1-3 N型半导体的晶体结构

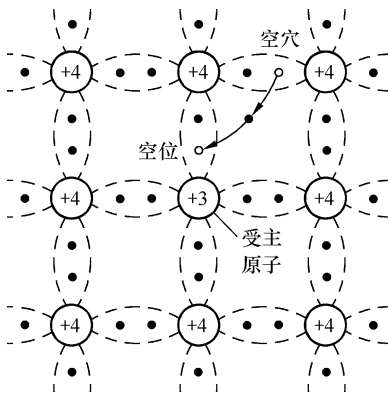


图 1-4 P型半导体的晶体结构

在室温下，价电子几乎能填满杂质元素上的全部空位，而使其成为负离子，与此同时，半导体中产生了与杂质元素原子数相同的空穴，除此之外，半导体中还有因本征激发所产生

## 4 | 模拟电路与数字电路（第2版）

的电子—空穴对。所以，在这类半导体中，空穴的数目远大于自由电子的数目，导电是以空穴载流子为主，故称空穴型半导体，简称P型半导体。

P型半导体中的多子是空穴，少子为自由电子，主要靠空穴导电。与N型半导体相同，掺入的杂质越多，空穴的浓度越高，导电能力就越强。因杂质原子中的空位吸收电子，故称之为受主原子。

## 1.1.4 PN结

杂质半导体增强了半导体的导电能力，利用特殊的掺杂工艺，可以在一块晶片的两边分别生成N型半导体和P型半导体，在两者的交界处将形成PN结。PN结具有单一型的半导体所没有的特性，利用该特性可以制造出各种类型的半导体器件。下面介绍PN结的特性。

## 1. PN结的形成

单个的P型半导体或N型半导体内部虽然有空穴或自由电子，但整体是电中性的，不带电。人们利用特殊的掺杂工艺，在一块晶片的两边分别生成如图1-5(a)所示的N型半导体和P型半导体。

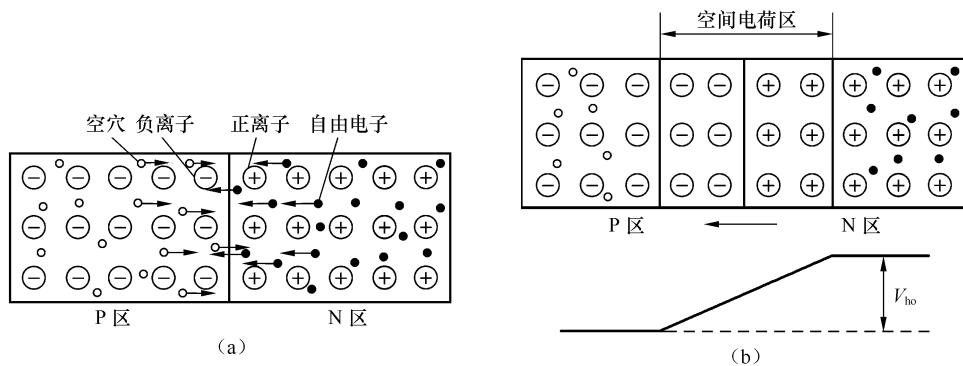


图 1-5 PN 结的形成

因为P区的多子是空穴，N区的多子是电子，在两块半导体交界处，同类载流子的浓度差别极大，这种差别将产生P区浓度高的空穴向N区扩散，与此同时，N区浓度高的电子也会向P区扩散。

扩散运动的结果，使P型半导体的原子在交界处得到电子成为带负电的离子，N型半导体的原子在交界处失去电子成为带正电的离子，形成如图1-5(b)所示的空间电荷区。

空间电荷区随着电荷的积累，将建立起一个内电场 $E$ ，该电场对半导体内多数载流子的扩散运动起阻碍的作用，但对少数载流子的运动却起到促进的作用，少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。在无外电场和其他因素的激励下，当参与扩散的多数载流子和参与漂移的少数载流子在数目上相等时，空间电荷区电荷的积累效应将停止，空间电荷区内电荷的数目将达到一个动态的平衡，并形成如图1-5(b)所示的PN结。此时，空间电荷区具有一定的宽度，内电场也具有一定的强度，PN结内部的电流为零。

由于空间电荷区在形成的过程中，移走的是载流子，留下的是不能移动的正、负离子，这种作用与电容器存储电荷的作用相等效，因此，PN结也具有电容的效应，该电容称为PN

结的结电容，PN 结的结电容有势垒电容和扩散电容两种。

## 2. PN 结的单向导电性

处于平衡状态下的 PN 结没有实用的价值，PN 结的实用价值只有在 PN 结上外加电压时才能显示出来。

### (1) 外加正向电压

在 PN 结上外加正向电压时的电路如图 1-6 所示，处在这种连接方式下的 PN 结，称为正向偏置（简称正偏）。由图 1-6 可见，当 PN 结处在正向偏置时，P 型半导体接高电位，N 型半导体接低电位。

处在正向偏置的 PN 结，外电场和内电场的方向相反。在外电场的作用下，P 区的空穴和 N 区的电子都要向空间电荷区移动，进入空间电荷区的电子和空穴分别和原有的一部分正、负离子中和，破坏了空间电荷区的平衡状态，使空间电荷区的电荷量减少，空间电荷区变窄，内电场相应的被削弱，这种情况有利于 P 区空穴和 N 区的电子向相邻的区域扩散，并形成扩散电流，即 PN 结的正向电流。

在一定范围内，正向电流随着外电场的增强而增大，此时的 PN 结呈现出低电阻值，PN 结处于导通状态。PN 结正向导通时的压降很小，理想情况下，可认为 PN 结正向导通时的电阻为 0，所以导通时的压降也为 0。

PN 结的正向电流包含空穴电流和电子电流两部分，外电源不断向半导体提供电荷，使电路中的电流得以维持。正向电流的大小主要由外加电压  $V$  和电阻  $R$  的大小来决定。

### (2) 外加反向电压

在 PN 结上外加反向电压时的电路如图 1-7 所示，处在这种连接方式下的 PN 结称为反向偏置（简称反偏）。由图 1-7 可见，当 PN 结处在反向偏置时，P 型半导体接低电位，N 型半导体接高电位。

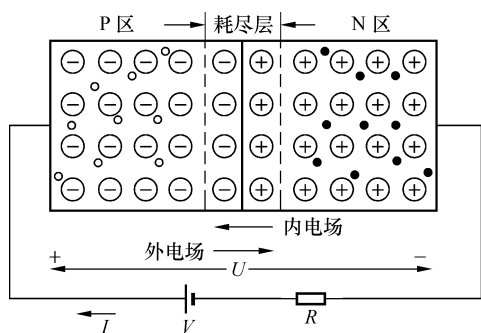


图 1-6 PN 结外加正向电压时导通

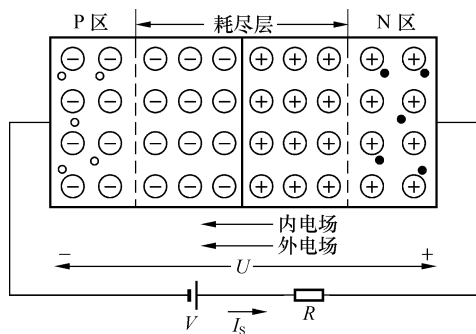


图 1-7 PN 结外加反向电压时截止

由图 1-7 可见，处在反向偏置的 PN 结，外电场和内电场的方向相同。当 PN 结处在反向偏置时，PN 结内部扩散和漂移运动的平衡被破坏了。P 区的空穴和 N 区的电子由于外电场的作用都将背离空间电荷区，结果使空间电荷量增加，空间电荷区加宽，内电场加强，内电场的加强进一步阻碍了多数载流子扩散运动的进行，对少数载流子的漂移运动却有利，少数载流子的漂移运动所形成的电流称为 PN 结的反向电流。

由于少数载流子的数目有限，在一定范围内，反向电流极微小，该电流又被称为反向饱

## 6 | 模拟电路与数字电路 (第2版)

和电流,用符号 $I_S$ 来表示。反向偏置时的PN结呈高电阻态,理想的情况下,反向电阻为 $\infty$ ,此时PN结的反向电流为0,PN结不导电,即PN结处在截止的状态。

由于少数载流子与半导体的本征激发有关,本征激发与温度有关,所以PN结的反向饱和电流会随着温度的上升而增大。

由以上的分析可见,PN结的导电能力与加在PN结上电压的极性有关。当外加电压使PN结处在正向偏置时,PN结会导电;当外加电压使PN结处在反向偏置时,PN结不导电。PN结的这种导电特性称为PN结的单向导电性。

## 3. PN结的电流方程

根据半导体材料的理论可得,加在PN结上的端电压 $v$ 与流过PN结的电流 $i$ 之间的关系为

$$i = I_S(e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (1-1)$$

式(1-1)是描述PN结的电流随输入电压而变化的电流方程,式中的 $I_S$ 为反向饱和电流, $q$ 为电子电量, $k$ 为玻耳兹曼常数, $T$ 为热力学温度。

令 $V_T = \frac{kT}{q}$ , $V_T$ 称为温度电压当量,在 $T=300\text{K}$ 的常温下,温度电压当量 $V_T \approx 26\text{mV}$ 。将温度电压当量的表达式代入式(1-1)中可得

$$i = I_S(e^{\frac{v}{V_T}} - 1) \quad (1-2)$$

由式(1-2)可见,PN结电流和电压的约束关系不像电阻元件那样是线性的关系,而是非线性的关系,具有这种特性的元件称为非线性元件。非线性元件电流和电压的约束关系不能用欧姆定律来描述,必须用伏—安特性曲线来描述。

## 4. PN结的伏—安特性曲线

由PN结的电流方程式(1-2)可得,当PN结外加正向电压 $v \geq V_T$ 时,式(1-2)中的指数项远大于1,1可忽略,故 $i \approx I_S e^{\frac{v}{V_T}}$ ,即电流随电压按指数规律变化。

当PN结外加反向电压 $|v| \geq V_T$ 时,式(1-2)中的指数项约等于0, $i \approx -I_S$ ,式中的负号也说明了反向偏置时电流的方向与正向偏置时电流的方向相反。根据式(1-2)所作的曲线称为PN结的伏—安特性曲线,如图1-8所示。

图1-8中 $v > 0$ 的部分称为正向特性, $v < 0$ 的部分称为反向特性。由图1-8可见,当反向电压超过 $V_{BR}$ 后,PN结的反向电流急剧增加,这种现象称为PN结反向击穿。

PN结的反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种,当掺杂溶度比较高时,击穿通常为齐纳击穿;当掺杂溶度比较低时,击穿通常为雪崩击穿。无论哪种击穿,若对电流不加限制,都可能造成PN结的永久性损坏。

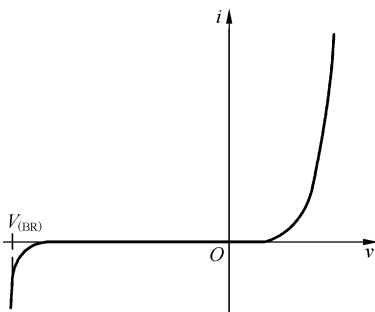


图 1-8 PN 结的伏安特性曲线

## 1.2 二极管

### 1.2.1 二极管的几种常见结构

将 PN 结用外壳封装起来，并加上电极引线后就构成二极管。由 P 区引出的电极称为二极管的阳极（或正极），由 N 区引出的电极称为二极管的阴极（或负极），常用二极管的外形如图 1-9 所示。常见的二极管的结构图和图形符号如图 1-10 所示。二极管的文字符号用 VD 来表示。

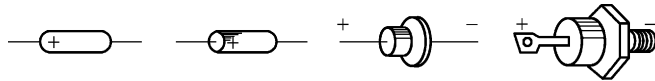


图 1-9 二极管外形图

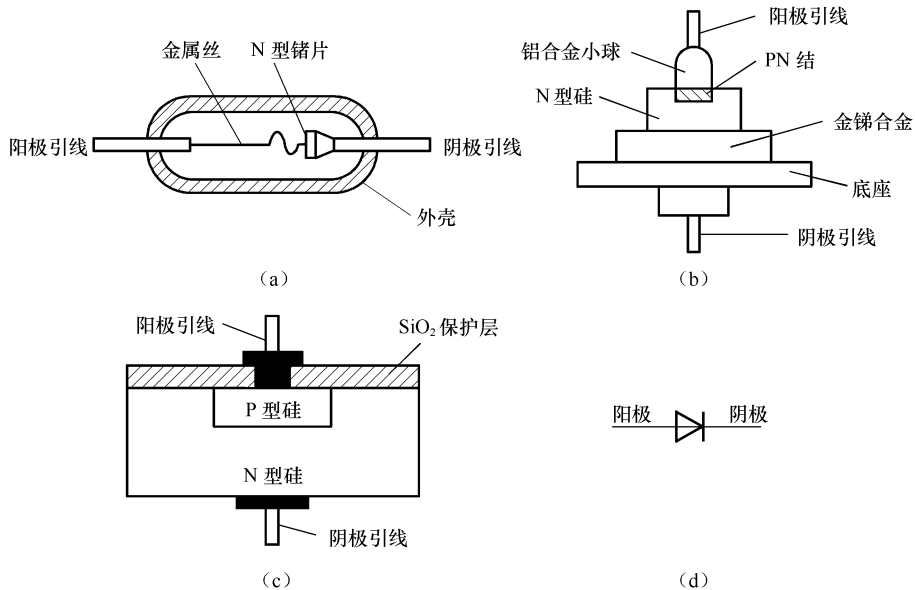


图 1-10 二极管的结构和符号

### 1.2.2 二极管的伏—安特性

用实验的方法，在二极管的阳极和阴极两端加上不同极性和不同数值的电压，同时测量流过二极管的电流值，就可得到二极管的伏安特性曲线。该曲线是非线性的，如图 1-11 所示。

#### 1. 正向特性

当正向电压很低时，正向电流几乎为零，这是因为外加电压的电场还不能克服 PN 结内部的内电场，内电场阻挡了多数载流子扩散运动的缘故，此时二极管呈现高电阻值，基本上还是处在截止的状态。

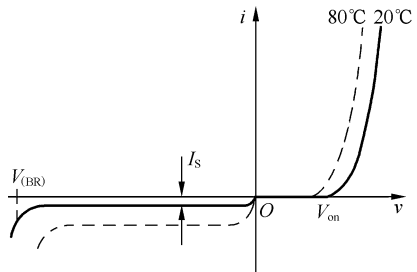


图 1-11 二极管伏安特性曲线

## 8 | 模拟电路与数字电路（第2版）

当正向电压超过如图 1-11 所示的二极管开启电压  $V_{on}$  时，二极管才呈现低电阻值，处于正向导通的状态。开启电压与二极管的材料和工作温度有关，通常硅管的开启电压为 0.5V，锗管为 0.3V，二极管导通后，二极管两端的导通压降很低，硅管为 0.5~0.7V，锗管为 0.2~0.3V。

### 2. 反向特性

在分析 PN 结加上反向电压时，已知少数载流子的漂移运动形成反向电流。因少数载流子数量少，且在一定温度下数量基本维持不变。因此，反向电压在一定范围内增大时，反向电流极微小且基本保持不变，等于反向饱和电流  $I_S$ 。

当反向电压增大到  $V_{BR}$  时，外电场能把原子核外层的电子强制拉出来，使半导体内载流子的数目急剧增加，反向电流突然增大，二极管呈现反向击穿的现象。

二极管的特性曲线对温度很敏感。实验表明，当温度升高时，二极管的正向特性曲线将向纵轴移动，开启电压及导通压降都有所减小，反向饱和电流将增大，反向击穿电压也将减小。

### 1.2.3 二极管的主要参数

二极管的参数是二极管电性能的指标，是正确选用二极管的依据，其主要参数如下。

#### 1. 最大整流电流 $I_F$

最大整流电流  $I_F$  是指二极管长期工作时允许流过的正向平均电流的最大值。这是二极管的重要参数，使用中不允许超过此值。对于大功率二极管，由于电流较大，为了降低 PN 结的温度，提高管子的带负载能力，通常将管子安装在规定的散热器上使用。

#### 2. 反向工作峰值电压 $V_R$

反向工作峰值电压  $V_R$  是二极管工作时允许外加反向电压的最大值。通常  $V_R$  为二极管反向击穿电压  $V_{BR}$  的一半。

#### 3. 反向峰值电流 $I_R$

反向峰值电流  $I_R$  是二极管未击穿时的反向电流。 $I_R$  愈小，二极管的单向导电性愈好。

#### 4. 最高工作频率 $f_M$

最高工作频率  $f_M$  是二极管工作时的上限频率，超过此值，由于二极管结电容的作用，二极管将不能很好的实现单向导电性。

以上这些参数是使用二极管、选择二极管的依据。使用时应根据实际需要，通过产品手册查找参数，并选择满足条件的产品。

### 1.2.4 二极管极性的简易判别法

使用二极管时，首先应注意它的极性，不能接错了，否则电路不能正常工作，甚至引起管子及电路中其他元件的损坏。一般二极管的管壳上标有极性的记号，在没有记号时，可用万用表来判别管子的阳极和阴极，并能检验其单向导电性能的好坏。



判别的方法是：利用万用表的  $R \times 10$  挡，或  $R \times 100$  挡测量二极管的正、反向电阻。测量时，将万用表的红表笔插在“+”插孔上，相当于红表笔与万用表内电池的负极相连，黑表笔插在“-”插孔上，相当于黑表笔与万用表内电池的正极相连。当万用表的黑表笔接至二极管阳极，红表笔接至阴极时，二极管处在正向偏置，会导电，电阻很小；当万用表的黑表笔接至二极管阴极，红表笔接至阳极时，二极管处在反向偏置，不导电，电阻很大。根据上述测量的结果就可以判别二极管的好坏和管脚的极性。

### 1.2.5 二极管的等效电路

二极管的伏—安特性是非线性的，这给二极管应用电路的分析带来一定的困难。为了方便分析计算，常在一定条件下，用线性元件所构成的电路来近似模拟二极管的特性，并用它来取代电路中的二极管。能够模拟二极管特性的电路称为二极管等效模型。二极管的等效模型主要有伏—安特性折线化和微变等效电路模型两类。

二极管的伏—安特性是曲线，分析计算不方便，在一定的条件下，可以用折线替代曲线，实现二极管伏—安特性曲线的折线化，根据折线化的伏—安特性曲线所模拟的电路称为伏—安特性曲线折线化等效电路，如图 1-12 所示。

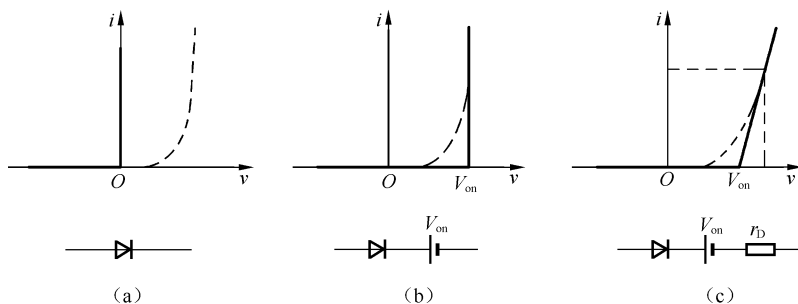


图 1-12 伏安特性曲线折线化等效电路

图 1-12 (a) 所示的折线化伏—安特性表明二极管导通时的正向压降为零，截止时反向电流为零，称为理想二极管。

图 1-12 (b) 所示的折线化伏—安特性表明二极管导通时的正向压降为一个常量  $V_{on}$ ，对于硅管  $V_{on}=0.7V$ ，锗管  $V_{on}=0.3V$ ，截止时反向电流为零。因而，等效电路是理想二极管串联电压源  $V_{on}$ 。

图 1-12 (c) 所示的折线化伏—安特性表明当二极管的正向电压  $V$  大于  $V_{on}$  后，流过二极管的电流与电压成正比，比例系数为  $1/r_D$ ，二极管截止时反向电流为零。因而，等效电路是理想二极管串联电压源  $V_{on}$  和电阻  $r_D$ ，且  $r_D = \Delta V / \Delta I$ 。该模型也称为二极管微变等效电路模型。

## \*1.3 二极管的基本应用电路

二极管在电子电路中主要起整流、限幅和开关的作用。

### 1.3.1 二极管整流电路

利用二极管的单向导电性可以将交流信号变换成单向脉动的信号，这种过程称为整流。

10 | 模拟电路与数字电路（第2版）

最简单的二极管整流电路如图 1-13 (a) 所示。

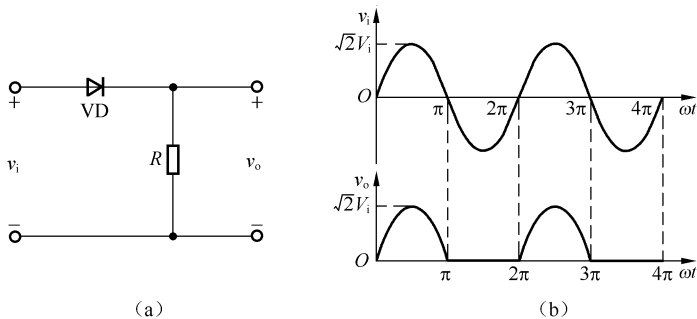


图 1-13 二极管整流电路及波形图

该电路的工作原理是：当  $v_i > 0$  时，二极管 VD 导通，有电流流过电阻  $R$ ，输出电压  $v_o = iR$ ；当  $v_i < 0$  时，二极管 VD 截止，没有电流流过电阻  $R$ ，输出电压  $v_o = 0$ 。输入、输出电压的波形如图 1-13 (b) 所示。

由波形图可见，二极管的单向导电性将输入波形的一半砍掉了，输出只剩下输入波形的一半，所以，该电路称为半波整流电路。

若输入信号是高频调幅信号，即调幅广播电台发送的信号，输出信号将高频调幅信号的负半周砍掉，用 RC 滤波器滤掉高频载波信号后，即可将调制信号的包络提取出来，实现从高频调制信号中将音频信号检出来的目的。在无线电技术中，该电路称为二极管检波电路。

半波整流电路和二极管检波电路的结构完全相同，它们之间的差别主要在工作频率上。半波整流是对 50Hz 的工频交流电进行整流，频率低，电流大，应选择低频、大功率的二极管作整流管。而检波电路是工作在高频小功率的场所，所以，应选择高频小功率管作检波管。

半波整流电路结构虽然简单，但输出电压低，输出信号的脉动系数较大，整流的效率较低，改进的方法是将半波整流改成全波整流，用桥式整流电路即可实现全波整流。

### 1.3.2 桥式整流电路

图 1-14 所示为桥式整流电路。该电路的工作原理是：当输入信号  $V_i$  处在正半周时，二极管  $VD_1$  和  $VD_3$  通， $VD_2$  和  $VD_4$  断，电流从端子 A 出发，经  $VD_1$ 、 $R$ 、 $VD_3$  回到端子 B，并产生  $v_o = iR$  的输出电压；当输入信号  $v_i$  处在负半周时，二极管  $VD_2$  和  $VD_4$  通， $VD_1$  和  $VD_3$  断，电流从端子 B 出发，经  $VD_2$ 、 $R$ 、 $VD_4$  回到端子 A，同样产生  $v_o = iR$  的输出电压。

由输入和输出信号的波形可见，桥式整流电路是利用二极管的单向导电性来改变负半周输入信号对电阻  $R$  的供电，实现电阻  $R$  上电流的流向固定，达到将负半周输入信号翻转  $180^\circ$  的目的，使整流的效率提高了，输出信号的脉动系数减小了。利用高等数学求平均值的方法，可计算输出电压的脉动系数，计算的过程如下：

设输入信号  $v_i = \sqrt{2}V_i \sin \omega t$ ，根据高等数学求平均值的方法，可得桥式整流电路输出电压的平均值为

$$V_{O(AV)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}V_i \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i \approx 0.9V_i \quad (1-3)$$

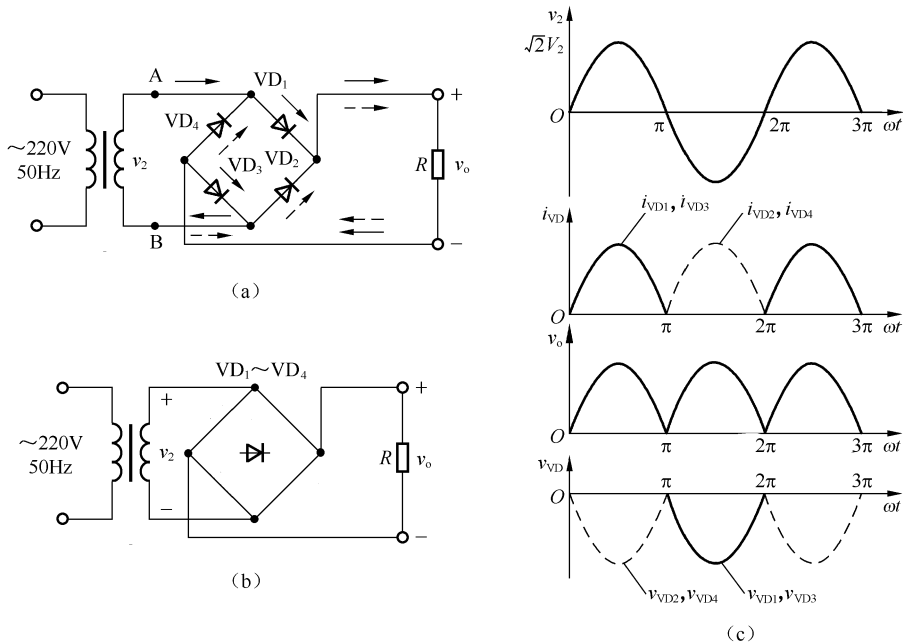


图 1-14 桥式整流电路与波形

利用输出电压平均值的公式可得输出电流平均值的公式为

$$I_{O(AV)} = \frac{V_{O(AV)}}{R} = \frac{0.9V_i}{R} \quad (1-4)$$

根据输出电压脉动系数 $S$ 的定义：整流输出电压的基波峰值电压 $V_{OM}$ 与输出电压的平均值 $V_{O(AV)}$ 的比可得

$$S = \frac{V_{OM}}{V_{O(AV)}} = \frac{\frac{2}{3} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i} = \frac{2}{3} \approx 0.67 \quad (1-5)$$

式中的基波峰值电压 $V_{OM}$ 实际上就是傅里叶级数基波信号的系数，因为桥式整流输出基波信号的频率是输入信号的 2 倍，即周期为 $\pi$ ，且该函数为偶函数，根据傅里叶级数系数的计算公式可得

$$V_{OM} = a_1 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{2}V_i \cos \omega t \cos(2\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{3} \cdot \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_i \quad (1-6)$$

利用 $S$ 的定义也可以计算出半波整流的脉动系数约为 1.57，所以桥式整流的脉动系数比半波整流小很多，因此，它被广泛应用在各种电器设备的电源电路中。目前市场上已有各种不同性能指标的桥式整流集成电路，称为“整流桥堆”。

### 1.3.3 倍压整流电路

利用电容器存储电能的作用，由多个二极管和电容器可以获得几倍于输入电压的输出电压，这种电路称为倍压整流电路，如图 1-15 所示。

12 | 模拟电路与数字电路（第2版）

该电路的工作原理是：当输入信号 $v_2$ 处在正半周时，二极管 $VD_1$ 导通，并对电容 $C_1$ 充电，充电电压的正极如图 1-15 所示；当输入信号 $v_2$ 处在负半周时，二极管 $VD_1$ 截止， $VD_2$ 导通，并对电容 $C_2$ 充电，充电电流的流向如图 1-15 中的虚线所示， $C_2$ 充电的电压为 $V_{BA}$ 与 $V_{C1}$ 的和，在 $C_2$ 两端可获得二倍输入电压的输出电压，所以该电路称为二倍压整流电路。

同理，还可组成三倍压、四倍压的整流电路。在图 1-16 所示的电路中，若输出信号是 $C_1$ 和 $C_3$ 两端电压的和，则输出电压为输入电压的三倍压，组成三倍压整流电路；若输出信号是 $C_2$ 和 $C_4$ 两端电压的和，则输出电压为输入电压的四倍压，组成四倍压整流电路。

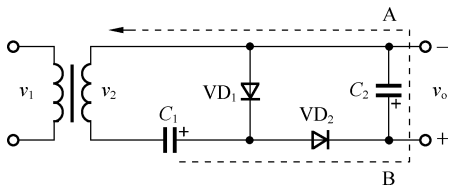


图 1-15 倍压整流电路

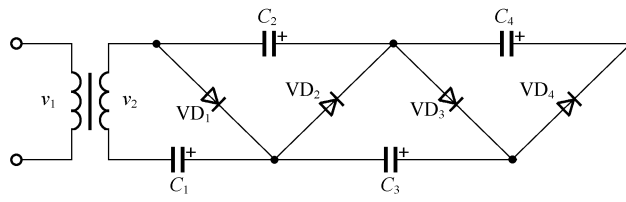


图 1-16 三倍压、四倍压整流电路

1.3.4 限幅电路

在电子电路中，为了保护电路不会因电压过高而损坏，需要对输入电压进行限制，利用二极管限幅电路就可实现该目的。二极管限幅电路及波形如图 1-17 所示。

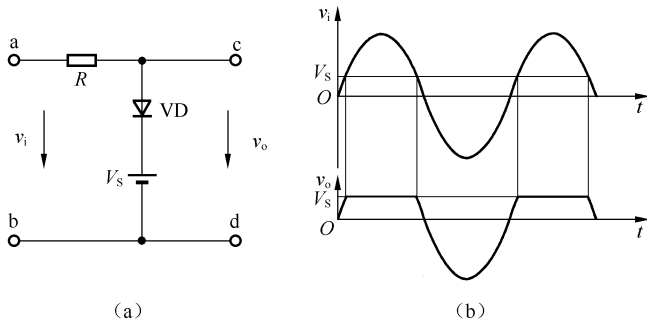


图 1-17 二极管限幅电路及波形

该电路的工作原理是：设二极管 $VD$ 的导通电压  $0.7V$ 可忽略，当输入电压 $v_i > V_S$ 时，二极管 $VD$ 导通， $V_S$ 与输出端并联，输出电压的值被限制在 $V_S$ ，实现限幅的目的；当输入电压 $v_i < V_S$ 时，二极管 $VD$ 截止， $V_S$ 从输出端断开，输出电压等于输入电压。

1.3.5 与门电路

利用二极管通、断的开关特性，可以组成实现与逻辑函数关系的电路，该电路称为与门电路。二极管与门电路如图 1-18 所示。

为了讨论该电路的工作原理，设电源电压 $V_{CC}=5V$ ，二极管导通的压降为  $0.7V$ ，输入信号是脉冲信号，脉冲电压幅度 $A$ 、 $B$ 均为  $3V$ ，求输出电压 $Y$ 。

当 $A$ 、 $B$ 的输入电压都是  $0V$ 时，二极管 $VD_1$ 和 $VD_2$ 同时导通，

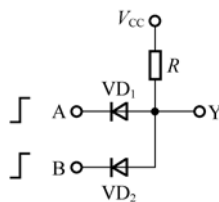


图 1-18 与门电路

输出电压Y为 0.7V；当输入电压A为 0V，B为 3V时，二极管VD<sub>1</sub>两端将承受比VD<sub>2</sub>大的电压，二极管VD<sub>1</sub>导通，输出电压Y被钳制在 0.7V，二极管VD<sub>2</sub>因反偏而截止；同理，当输入电压B为 0V，A为 3V时，二极管VD<sub>2</sub>导通，VD<sub>1</sub>截止，输出电压Y为 0.7V；当A、B的输入电压都是 3V时，二极管VD<sub>1</sub>和VD<sub>2</sub>同时导通，输出电压Y为 3.7V。

在规定高电压用 1 来表示，低电压用 0 来表示的前提下，上述的关系可表示成表 1-1 所示的真值表。该真值表的特征是有 0 出 0，这正是与逻辑关系的特征，即利用该电路可以实现与逻辑关系，所以，该电路称为二极管与门电路。

表 1-1 与门真值表

A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

**【例 1-1】** 求如图 1-19 所示电路的输出电压V<sub>ab</sub>的值。

**解** 求V<sub>ab</sub>的关键点是判断二极管VD<sub>1</sub>和VD<sub>2</sub>的通、断状态。二极管VD<sub>1</sub>和VD<sub>2</sub>的通、断状态可根据它们的偏置来判断，判断的方法是：先找出电路的最高和最低电位点，观察这些点与二极管正、负极的连接情况，即可确定二极管的偏置状态。

在图 1-19 所示的电路中，电源的正极接地，所以，接地点是电路的最高电位点；因二极管VD<sub>2</sub>的负极与电路的最低电位点 -6V 相接，所以，二极管VD<sub>2</sub>因正向偏置而导通，二极管VD<sub>1</sub>因反向偏置而截止。设二极管导通的电压为 0.7V，则

$$V_{ab} = -6 + 0.7 = -5.3V$$

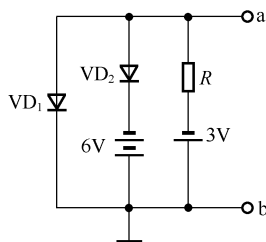


图 1-19 例 1-1

## \*1.4 稳压管

### 1.4.1 稳压管的结构和特性曲线

前面讨论的二极管不允许在反向击穿的状态下工作，当二极管反向击穿时，因流过二极管 PN 结的电流太大，将造成永久性的损坏。由二极管的特性曲线可知，当二极管反向击穿时，流过二极管的电流急剧增大，但二极管两端的电压却保持不变。利用二极管的这一特性，采用特殊的工艺制成在反向击穿状态下工作，而不损坏的二极管，就是稳压管。

稳压管与二极管的外形相似，稳压管的特性曲线如图 1-20 (a) 所示，常用的图符如图 1-20 (b) 所示，稳压管在电路中用字符VD<sub>Z</sub>来表示。

由稳压管的伏安特性曲线可见，稳压管的正向特性和普通二极管基本相同，但反向特性较陡。当反向电压较低时，反向电流几乎为零，此时稳压管仍处在截止的状态，不具有稳压的特性。当反向电压增大到击穿电压V<sub>Z</sub>时，反向电流I<sub>Z</sub>将急剧增加。击穿电压V<sub>Z</sub>为稳压管的工作电压，I<sub>Z</sub>为稳压管的工作电流。

从特性曲线上还可见，当I<sub>Z</sub>在较大的范围内变化时，管子两端电压V<sub>Z</sub>基本保持不变，显示出稳压的特性。使用时，只要I<sub>Z</sub>不超过管子的允许值I<sub>ZM</sub>，PN结就不会因过热而损坏，当外

14 | 模拟电路与数字电路 (第 2 版)

加反向电压去除后, 稳压管内部的PN结又自动恢复原性能。

由上面的分析可见, 稳压管和二极管的差别是工作状态的不同, 二极管是利用 PN 结的单向导电性来实现整流和限幅的目的, 而稳压管却是利用 PN 结击穿时输出电压稳定的特点来实现稳压的目的。

稳压管工作于反向击穿状态, 击穿电压从几伏到几十伏, 反向电流也比一般的二极管大。能在反向击穿状态下正常工作而不损坏, 是稳压管工作的特点, 稳压管在电路中正确的连接方法如图 1-21 所示。

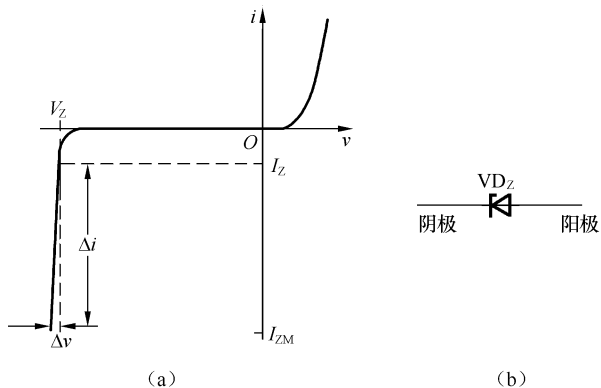


图 1-20 稳压管的特性曲线

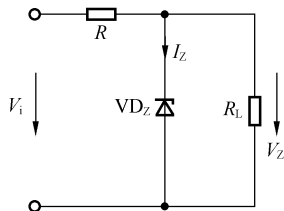


图 1-21 稳压管的连接

### 1.4.2 稳压管的主要参数

#### 1. 稳定电压 $V_Z$

稳定电压  $V_Z$  是稳压管正常工作时管子两端的电压, 也是与稳压管并联的负载两端的工作电压, 按需要可在半导体器件手册中选用。

#### 2. 稳定电流 $I_Z$

稳定电流  $I_Z$  是稳压管工作在稳压状态时的参考电流, 电流低于此值时稳压效果变坏, 甚至根本不稳压, 故  $I_Z$  常记作  $I_{Zmin}$ 。稳压管在工作时, 流过稳压管的电流只要不超过稳压管的额定功率, 电流愈大, 稳压效果愈好。

#### 3. 额定功耗 $P_{ZM}$

额定功耗  $P_{ZM}$  等于稳压管的稳定电压  $V_Z$  与最大稳定电流  $I_{Zmax}$  的乘积, 稳压管的功耗超过此值时, 会因PN结温度过高而损坏。

#### 4. 动态电阻 $r_d$

动态电阻  $r_d$  是稳压管工作在稳压区时, 端电压变化量与电流变化量的比, 即  $\Delta V_Z / \Delta I_Z$ ,  $r_d$  愈小, 电流变化时  $V_Z$  的变化愈小, 即稳压管的稳压特性愈好。

## 5. 温度系数 $\alpha$

温度系数 $\alpha$ 表示温度每变化 $1^{\circ}\text{C}$ 时,稳压管稳压值的变化量。稳压管的稳定电压小于 $4\text{V}$ 的管子具有负温度系数(属于齐纳击穿),即温度升高时稳定电压值下降;稳定电压大于 $7\text{V}$ 的管子具有正温度系数(属于雪崩击穿),即温度升高时稳定电压值上升;而稳定电压为 $4\sim 7\text{V}$ 的管子,温度系数非常小,齐纳击穿和雪崩击穿均有,互相补偿,温度系数近似为零。

由于稳压管的反向电流在小于 $I_{Z\min}$ 时工作不稳压,大于 $I_{Z\max}$ 时会因超过额定功耗而损坏,所以在稳压管电路中必须串联一个电阻来限制电流,以保证稳压管正常工作,该电阻称为限流电阻。限流电阻的取值合适时,稳压管才能安全、稳定地工作。

计算限流电阻 $R$ 时应考虑当输入电压处在最小值 $V_{Z\min}$ ,负载电流处在最大值 $I_{L\max}$ 时,稳压管的工作电流应比 $I_{Z\min}$ 大;当输入电压处在最大值 $V_{i\max}$ ,负载电流为最小值零时,稳压管的工作电流应小于 $I_{Z\max}$ 。综合考虑上述两个因素,可得计算限流电阻的公式为

$$\frac{V_{i\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}} \geq R \geq \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{ZM}} \quad (1-7)$$

**【例 1-2】** 如图 1-21 所示电路, $V_i=10\text{V}$ ,波动的幅度为 $\pm 10\%$ , $V_Z=6\text{V}$ , $I_{Z\min}=5\text{mA}$ , $I_{ZM}=30\text{mA}$ , $R_L$ 的变化范围是 $600\Omega\sim\infty$ ,求限流电阻 $R$ 的取值范围。

**解** 因为输入电压变化的幅度是 $\pm 10\%$ ,所以输入电压的最大值为 $11\text{V}$ ,最小值为 $9\text{V}$ 。该电路带负载两个极限的情况是,输入电压最小时,带最大的负载 $600\Omega$ ,负载电流最大 $I_{L\max}$ 为 $10\text{mA}$ ,此时稳压管应工作在最小击穿电流 $I_{Z\min}$ 的状态下,限流电阻的值为

$$R_1 = \frac{V_{i\min} - V_Z}{I_{Z\min} + I_{L\max}} = \frac{(9-6)\text{V}}{(5+10)\text{mA}} = 200\Omega$$

输入电压最大时,带最小的负载 $R=\infty$ ,此时稳压管应工作在最大击穿 $I_{Z\max}$ 的状态下,限流电阻的值为

$$R_2 = \frac{V_{i\max} - V_Z}{I_{ZM}} = \frac{(11-6)\text{V}}{30\text{mA}} = 167\Omega$$

根据 $R_1 \geq R \geq R_2$ 的关系,取 $R=180\Omega$ 。

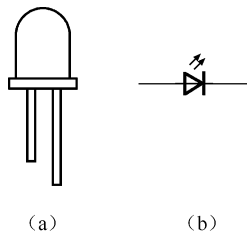
## 1.5 其他类型的二极管

除了上面介绍的普通二极管和稳压管外,还有发光二极管、光电二极管等。

### 1.5.1 发光二极管

发光二极管包括可见光、不可见光、激光等不同的类型,这些二极管除了具有PN结的单向导电性外,还可以将电能转换成光能输出。常见的发光二极管可以发出红、绿、黄、橙等颜色的光,发光二极管所发光的颜色取决于所用的材料。发光二极管的外形如图 1-22 (a) 所示,符号如图 1-22 (b) 所示。

发光二极管在外加的正向电压使二极管产生足够大的正向电流时才发光,它的开启电压比普通二极管大,红色的发光二极管开启



(a) (b)  
图 1-22 发光二极管

## 16 | 模拟电路与数字电路（第2版）

电压为 1.6~1.8V，绿色的发光二极管开启电压约为 2V。正向电流愈大，发光二极管所发的光愈强。使用时，应特别注意不要超过发光二极管的最大功耗、最大正向电流、反向击穿电压等极限参数。

发光二极管因其驱动电压低、功耗小、寿命长、可靠性高等优点被广泛用于显示电路中。

### 1.5.2 光电二极管

光电二极管是一种远红外线接收管，它可将所接收到的光能转换成电能。PN 结型光电二极管充分利用 PN 结的光敏特性，将接收到光能的变化转换成电流的变化。光电二极管的外形如图 1-23 (a) 所示，符号如图 1-23 (b) 所示。

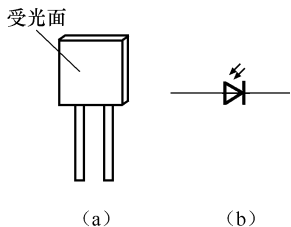


图 1-23 光电二极管

除上述特殊的二极管外，还有利用 PN 结势垒电容制成的变容二极管，变容二极管可用于电子调谐频率的自动控制调频、调幅、调相、滤波等电路之中。利用高掺杂材料所形成的 PN 结隧道效应可制成隧道二极管，隧道二极管用于振荡、过载保护、脉冲数字电路之中。利用金属与半导体之间的接触势垒而制成的肖特基二极管，因其正向导通电压小、结电容小而用于微波混频、检测、集成化数字电路等场合。

## 1.6 三极管

三极管又称双极型器件（用 BJT 表示），它的基本组成部分是两个靠得很近的，且背对背排列的 PN 结。根据排列方式不同，分为 PNP 型三极管和 NPN 型三极管两种类型。

### 1.6.1 三极管的结构及类型

二极管内部只有一个 PN 结，若在二极管 P 型半导体的旁边，再加上一块 N 型半导体，由图 1-24 (a) 可见，这种结构的器件内部有两个 PN 结，且 N 型半导体和 P 型半导体交错排列形成 3 个区，分别称为发射区、基区和集电区。从 3 个区引出的引脚分别称为发射极、基极和集电极，用符号 e、b、c 来表示。处在发射区和基区交界处的 PN 结称为发射结，处在基区和集电区交界处的 PN 结称为集电结。具有这种结构特性的器件称为三极管。


三极管在电路中常用字母 VT 来表示。三极管内部的两个 PN 结相互影响，使三极管呈现出单个 PN 结所没有的电流放大的功能，开拓了 PN 结应用的新领域，促进了电子技术的发展。

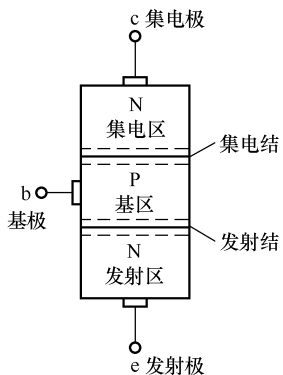
图 1-24 (a) 所示三极管的 3 个区分别由 NPN 型半导体材料组成，所以，这种结构的三极管称为 NPN 型三极管。图 1-24 (b) 所示为 NPN 型三极管的符号，符号中箭头的指向表示发射结处在正向偏置时电流的流向。

根据同样的原理，也可以组成 PNP 型三极管，图 1-25 (a)、(b) 所示分别为 PNP 型三极管的内部结构和符号。

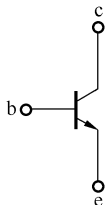
由图 1-24 和图 1-25 可见，两种类型三极管符号的差别仅在发射结箭头的方向上，理解箭头的指向是代表发射结处在正向偏置时电流的流向，有利于记忆 NPN 和 PNP 型三极管的符号，同时还可根据箭头的方向来判别三极管的类型。



例如，当看到“”符号时，因为该符号的箭头是由基极指向发射极的，说明当发射结处在正向偏置时，电流是由基极流向发射极。根据前面所讨论的内容已知，当PN结处在正向偏置时，电流是由P型半导体流向N型半导体，由此可得，该三极管的基区是P型半导体，其他的两个区都是N型半导体，所以该三极管为NPN型三极管。

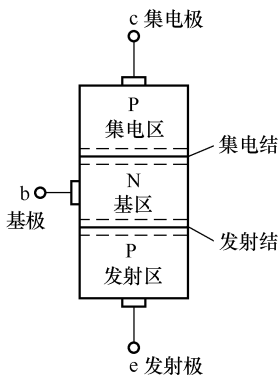


(a)

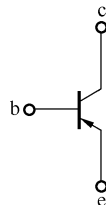


(b)

图 1-24 NPN 型三极管



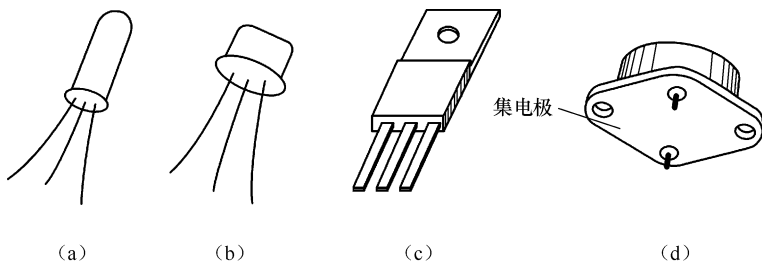
(a)



(b)

图 1-25 PNP 型三极管

三极管除了 PNP 和 NPN 两种类别的区分外，还有很多种类。根据三极管工作频率的不同，可将三极管分为低频管和高频管；根据三极管消耗功率的不同，可将三极管分为小功率管、中功率管、大功率管。常见三极管的外形如图 1-26 所示。



(a)

(b)

(c)

(d)

图 1-26 三极管的外形图

图 1-26 (a)、(b) 所示为小功率管，图 1-26 (c) 所示为中功率管，图 1-26 (d) 所示为大功率管。

## 1.6.2 三极管的电流放大作用

### 1. 三极管内部 PN 结的结构

对模拟信号进行处理最基本的形式是放大。在生产实践和科学实验中，从传感器获得的模拟信号通常都很微弱，只有经过放大后才能进一步处理，或者使之具有足够的能量来驱动执行机构，完成特定的工作。放大电路的核心器件是三极管，三极管的电流放大作用与三极管内部 PN 结的特殊结构有关。

## 18 | 模拟电路与数字电路（第2版）

从图 1-24 和图 1-25 可见，三极管犹如两个反向串联的 PN 结，如果孤立地看待这两个反向串联的 PN 结，或将两个普通二极管串联起来组成三极管，是不可能具有电流的放大作用。具有电流放大作用的三极管，PN 结内部结构有以下特殊性。

① 为了便于发射结发射电子，发射区半导体的掺杂浓度远高于基区半导体的掺杂浓度，且发射结的面积较小。

② 发射区和集电区虽为同一性质的掺杂半导体，但发射区的掺杂浓度要高于集电区的掺杂浓度，且集电结的面积要比发射结的面积大，便于收集电子。

③ 联系发射结和集电结两个 PN 结的基区非常薄，且掺杂浓度也很低。

上述的结构特点是三极管具有电流放大作用的内因。要使三极管具有电流放大作用，除了三极管的内因外，还要有外部条件。三极管的发射极为正向偏置，集电结为反向偏置是三极管具有电流放大作用的外部条件。

放大器是一个有输入和输出端口的四端网络，要将三极管的 3 个引脚接成四端网络的电路，必须将三极管的一个脚当公共脚。取发射极当公共脚的放大器称为共发射极放大器，基本共发射极放大器的电路如图 1-27 所示。

图 1-27 中的基极和发射极为输入端，集电极和发射极为输出端，发射极是该电路输入和输出的公共端，所以，该电路称为共发射极电路。

图 1-27 中的  $v_i$  是要放大的输入信号， $v_o$  是放大以后的输出信号， $V_{BB}$  是基极电源，该电源的作用是使三极管的发射结处在正向偏置的状态， $V_{CC}$  是集电极电源，该电源的作用是使三极管的集电结处在反向偏置的状态， $R_c$  是集电极电阻。

## 2. 共发射极电路三极管内部载流子的运动情况

共发射极电路三极管内部载流子运动情况的示意图如图 1-28 所示，图中载流子的运动规律可分为以下的几个过程。

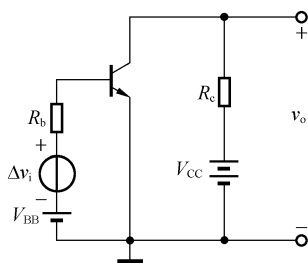


图 1-27 基本共发射极放大电路

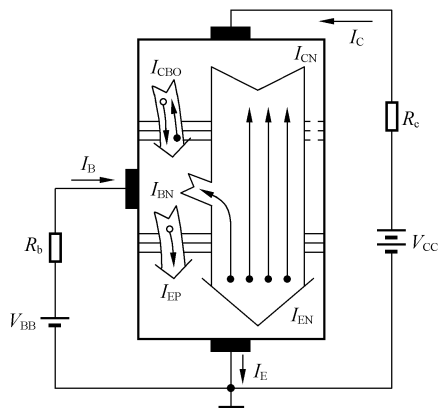


图 1-28 载流子运动情况示意图

### （1）发射区向基区发射电子的过程

发射结处在正向偏置，使发射区的多数载流子（自由电子）不断地通过发射结扩散到基区，即向基区发射电子。与此同时，基区的空穴也会扩散到发射区，由于两者掺杂浓度上的悬殊，形成发射极电流  $I_E$  的载流子主要是电子，电流的方向与电子流的方向相反。发射区所

发射的电子由电源 $V_{CC}$ 的负极来补充。

### (2) 电子在基区中的扩散与复合的过程

扩散到基区的电子,将有一小部分与基区的空穴复合,同时基极电源 $V_{BB}$ 不断地向基区提供空穴,形成基极电流 $I_B$ 。由于基区掺杂的浓度很低,且很薄,在基区与空穴复合的电子很少,所以,基极电流 $I_B$ 也很小。扩散到基区的电子除了被基区复合掉的一小部分外,大量的电子将在惯性的作用下继续向集电结扩散。

### (3) 集电结收集电子的过程

反向偏置的集电结在阻碍集电区向基区扩散电子的同时,空间电荷区将向基区延伸,因集电结的面积很大,延伸进基区的空间电荷区使基区的厚度进一步变薄,使发射极扩散来的电子更容易在惯性的作用下进入空间电荷区。集电结的空间电荷区,可将发射区扩散进空间电荷区的电子迅速推向集电极,相当于被集电极收集。集电极收集到的电子由集电极电源 $V_{CC}$ 吸收,形成集电极电流 $I_C$ 。

## 3. 三极管的电流分配关系和电流放大系数

根据上面的分析和节点电流定律可得,三极管3个电极的电流 $I_E$ 、 $I_B$ 、 $I_C$ 之间的关系为

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-8)$$

三极管的特殊结构使 $I_C$ 远大于 $I_B$ ,令

$$\bar{\beta} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1-9)$$

$\bar{\beta}$ 称为三极管的直流电流放大倍数。它是描述三极管基极电流对集电极电流控制能力大小的物理量, $\bar{\beta}$ 大的管子,基极电流对集电极电流控制的能力就大。 $\bar{\beta}$ 是由三极管的结构来决定的,一个管子做成以后,该管子的 $\bar{\beta}$ 就确定了。

## 1.6.3 三极管的共射特性曲线

三极管的特性曲线是描述三极管各个电极之间电压与电流关系的曲线,它们是三极管内部载流子运动规律在管子外部的表现。三极管的特性曲线反映了管子的技术性能,是分析放大电路技术指标的重要依据。三极管特性曲线可在晶体管图示仪上直观地显示出来,也可从手册上查到某一型号三极管的典型曲线。

三极管共发射极放大电路的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线,下面以NPN型三极管为例,来讨论三极管共射电路的特性曲线。

### 1. 输入特性曲线

输入特性曲线是描述三极管在管压降 $V_{CE}$ 保持不变的前提下,基极电流 $I_B$ 和发射结压降 $V_{BE}$ 之间的函数关系,即

$$i_B = f(v_{BE}) \Big|_{V_{CE}=\text{const}} \quad (1-10)$$

三极管的输入特性曲线如图1-29所示。由图1-29可见,NPN型三极管共射极输入特性曲线的特点如下。

① 在输入特性曲线上也有一个开启电压,在开启电压内, $v_{BE}$ 虽已大于零,但 $i_B$ 几乎仍

20 | 模拟电路与数字电路（第2版）

为零，只有当 $v_{BE}$ 的值大于开启电压后， $i_B$ 的值与二极管一样随 $v_{BE}$ 的增加按指数规律增大。硅三极管的开启电压约为 0.5V，发射结导通电压 $V_{on}$ 为 0.6~0.7V；锗三极管的开启电压约为 0.2V，发射结导通电压为 0.2~0.3V。

② 3 条曲线分别为 $V_{CE}=0V$ ， $V_{CE}=0.5V$ 和 $V_{CE} \geq 1V$ 的情况。当 $V_{CE}=0V$ 时，相当于集电极和发射极短路，即集电结和发射结并联，输入特性曲线和PN结的正向特性曲线相类似。当 $V_{CE}=1V$ ，集电结已处在反向偏置，管子工作在放大区，集电极收集基区扩散过来的电子，使在相同 $v_{BE}$ 值的情况下，流向基极的电流 $i_B$ 减小，输入特性随着 $V_{CE}$ 的增大而右移。当 $V_{CE} > 1V$ 以后，输入特性几乎与 $V_{CE}=1V$ 时的特性曲线重合，这是因为 $V_{CE} > 1V$ 后，集电极已将发射区发射过来的电子几乎全部收集走，对基区电子与空穴的复合影响不大， $i_B$ 的改变也不明显。

因三极管工作在放大状态时，集电结要反偏， $V_{CE}$ 必须大于 1V，所以，只要给出 $V_{CE}=1V$ 时的输入特性就可以了。

2. 输出特性曲线

输出特性曲线是描述三极管在输入电流 $i_B$ 保持不变的前提下，集电极电流 $i_C$ 和管压降 $v_{CE}$ 之间的函数关系，即

$$i_C = f(v_{CE}) \Big|_{i_B} \quad (1-11)$$

三极管的输出特性曲线如图 1-30 所示。由图 1-30 可见，当 $I_B$ 改变时， $i_C$ 和 $v_{CE}$ 的关系是一组平行的曲线族，并有截止、放大和饱和 3 个工作区。

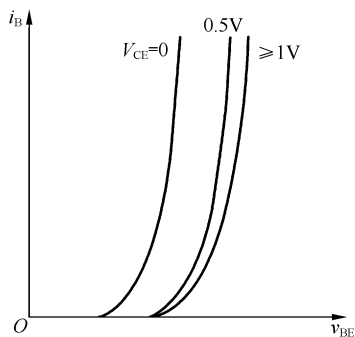


图 1-29 输入特性曲线

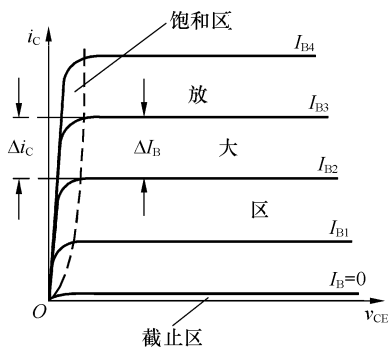


图 1-30 输出特性曲线

(1) 截止区

$I_B=0$  特性曲线以下的区域称为截止区。此时三极管的集电结处于反偏，发射结电压 $v_{BE} < 0$ ，也是处于反偏的状态。由于 $i_B=0$ ，在反向饱和电流可忽略的前提下， $i_C = \beta i_B$ 也等于 0，三极管无电流的放大作用。处在截止状态下的三极管，发射结和集电结都是反偏，在电路中犹如一个断开的开关。

实际的情况是：处在截止状态下的三极管集电极有很小的电流 $I_{CEO}$ ，该电流称为三极管的穿透电流，它是在基极开路时测得的集电极—发射极间的电流，不受 $i_B$ 的控制，但受温度的影响。

(2) 饱和区

在图 1-27 所示的三极管放大电路中，集电极接有电阻 $R_C$ ，如果电源电压 $V_{CC}$ 一定，当集

电极电流 $i_C$ 增大时,  $v_{CE}=V_{CC}-i_C R_C$ 将下降, 对于硅管, 当 $v_{CE}$ 降低到小于 $0.7V$ 时, 集电结也进入正向偏置的状态, 集电极吸引电子的能力将下降, 此时 $i_B$ 再增大,  $i_C$ 几乎就不再增大了, 三极管失去了电流放大作用, 处于这种状态下工作的三极管称为饱和状态。

规定 $V_{CE}=V_{BE}$ 时的状态为临界饱和态, 图 1-30 中的虚线为临界饱和线, 在临界饱和态下工作的三极管集电极电流和基极电流的关系为

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - V_{CES}}{R_C} = \bar{\beta} I_{BS} \quad (1-12)$$

式中,  $I_{CS}$ 、 $I_{BS}$ 、 $V_{CES}$ 分别为三极管处在临界饱和态下的集电极电流、基极电流和管子两端的电压(饱和管压降)。当管子两端的电压 $V_{CE} < V_{CES}$ 时, 三极管将进入深度饱和的状态, 在深度饱和的状态下,  $i_C = \beta i_B$ 的关系不成立, 三极管的发射结和集电结都处于正向偏置会导电的状态下, 在电路中犹如一个闭合的开关。

三极管截止和饱和的状态与开关断、通的特性很相似, 数字电路中的各种开关电路就是利用三极管的这种特性来制作的。

### (3) 放大区

三极管输出特性曲线饱和区和截止区之间的部分就是放大区。工作在放大区的三极管才具有电流的放大作用, 此时三极管的发射结处在正偏, 集电结处在反偏。由放大区的特性曲线可见, 特性曲线非常平坦, 当 $i_B$ 等量变化时,  $i_C$ 几乎也按一定比例等距离平行变化。由于 $i_C$ 只受 $i_B$ 控制, 几乎与 $v_{CE}$ 的大小无关, 说明处在放大状态下的三极管相当于一个输出电流受 $I_B$ 控制的受控电流源。

上述讨论的是 NPN 型三极管的特性曲线, PNP 型三极管特性曲线是一组与 NPN 型三极管特性曲线关于原点对称的图像。

## 1.6.4 三极管的主要参数

### 1. 共射电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 $\beta$

在共射极放大电路中, 若交流输入信号为零, 则管子各极间的电压和电流都是直流量, 此时的集电极电流 $I_C$ 和基极电流 $I_B$ 的比就是 $\bar{\beta}$ ,  $\bar{\beta}$ 称为共射直流电流放大系数。

当共射极放大电路有交流信号输入时, 因交流信号的作用, 必然会引起 $I_B$ 的变化, 相应的也会引起 $I_C$ 的变化, 两电流变化量的比称为共射交流电流放大系数 $\beta$ , 即

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (1-13)$$

上述两个电流放大系数 $\bar{\beta}$ 和 $\beta$ 的含义虽然不同, 但工作在输出特性曲线放大区平坦部分的三极管, 两者的差异极小, 可做近似相等处理, 故在今后应用时, 通常不加区分, 直接互相替代使用。

由于制造工艺的分散性, 同一型号三极管的 $\beta$ 值差异较大。常用的小功率三极管,  $\beta$ 值一般为 $20 \sim 100$ 。 $\beta$ 值过小, 管子的电流放大作用小,  $\beta$ 值过大, 管子工作的稳定性差, 一般选用 $\beta$ 为 $40 \sim 80$ 的管子较为合适。