

高等学校试用教材

# 电工学基本教程

孙骆生 主编

DIANGONGXUE

JIBEN

JIAOCHENG

下

高等教育出版社

## 内 容 提 要

本书是根据1980年6月制定的高等工业学校120学时类型《电工学教学大纲(草案)》编写的,经过高等学校工科电工教材编审委员会电工学教材编审小组评选,作为高等工业学校非电专业120学时类型电工学课程的基本教材。

本书分上、下册出版。下册包括二极管和整流电路、晶体管和交流放大电路、晶体管振荡器、晶体管直流放大电路、晶闸管及其应用,书后附有常用电子器件型号和参数的附表。每章均穿插有例题、思考题,并附有小结、习题和部分习题答案。

高等学校试用教材  
**电工学基本教程**

下 册

孙骆生 主编

\*

高等教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
河北省香河县印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 7.25 字数 175,000

1984年4月第1版 1984年10月第1次印刷

印数 00,001— 27,000

书号 15010·0570 定价1.10元

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| <b>第九章 二极管和整流电路</b> .....   | 1  |
| 9-1 半导体的导电方式.....           | 1  |
| 9-2 PN 结及其单向导电性.....        | 4  |
| 9-3 半导体二极管的伏安特性和主要参数.....   | 7  |
| 9-4 单相桥式整流电路.....           | 11 |
| 9-5 三相整流电路.....             | 15 |
| 9-6 滤波电路.....               | 18 |
| 一、电容滤波.....                 | 19 |
| 二、电感滤波.....                 | 22 |
| 三、电感电容(LC)和电阻电容(RC)滤波器..... | 23 |
| 四、 $\Pi$ 型滤波器.....          | 26 |
| 9-7 硅稳压管和简单稳压电路.....        | 26 |
| 一、硅稳压管.....                 | 27 |
| 二、硅稳压管稳压电路.....             | 29 |
| 本章小结.....                   | 30 |
| 习题.....                     | 31 |
| <b>第十章 晶体管和交流放大电路</b> ..... | 34 |
| 10-1 晶体管.....               | 35 |
| 一、晶体管的外形、结构和命名.....         | 35 |
| 二、晶体管的电流放大作用.....           | 37 |
| 三、晶体管的特性.....               | 41 |
| 四、晶体管的主要参数.....             | 45 |
| 10-2 交流放大电路的基本工作原理.....     | 49 |
| 一、单管交流放大器的组成及各元件的作用.....    | 49 |
| 二、固定偏置放大电路的工作状态.....        | 52 |
| 三、放大器的交流通路和直流通路.....        | 57 |
| 10-3 交流放大电路的图解法及其应用.....    | 60 |
| 一、静态工作点的图解.....             | 60 |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 二、动态工作情况的图解                    | 62         |
| 三、非线性失真的图解和静态工作点的选择            | 65         |
| 10-4 晶体管和放大器的小信号模型             | 70         |
| 一、晶体管的简化小信号模型                  | 70         |
| 二、单管放大器的简化小信号模型                | 72         |
| 三、放大器的输入电阻和输出电阻                | 73         |
| 10-5 静态工作点的稳定                  | 76         |
| 一、温度对静态工作点的影响                  | 76         |
| 二、分压式电流负反馈偏置电路                 | 77         |
| 10-6 多级电压放大器                   | 80         |
| 一、电路的联接                        | 81         |
| 二、电压放大倍数                       | 82         |
| <sup>△</sup> 10-7 阻容耦合放大器的频率特性 | 84         |
| 一、频率特性和失真                      | 84         |
| 二、低频特性                         | 86         |
| 三、高频特性                         | 87         |
| 10-8 放大器中的负反馈                  | 88         |
| 一、放大器中负反馈的基本类型                 | 88         |
| 二、常用的负反馈放大电路                   | 93         |
| 三、负反馈对放大器性能的影响                 | 100        |
| 10-9 功率放大器                     | 103        |
| 一、无输出变压器的功率放大器                 | 104        |
| <sup>△</sup> 二、变压器耦合推挽功率放大器    | 114        |
| 本章小结                           | 118        |
| 习题                             | 120        |
| <b>第十一章 晶体管振荡器</b>             | <b>127</b> |
| 11-1 自激振荡器的基本工作原理              | 127        |
| 一、自激振荡现象                       | 127        |
| 二、自激振荡条件                       | 129        |
| 11-2 LC 振荡器                    | 131        |
| 一、LC 振荡电路及其选频特性                | 131        |
| 二、变压器反馈 LC 振荡器                 | 135        |
| 三、自激振荡的建立和振幅的稳定                | 137        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 11-3 $RC$ 振荡器                | 138        |
| 一、 $RC$ 串并联网络的选频特性           | 139        |
| 二、桥式 $RC$ 振荡器                | 141        |
| 本章小结                         | 143        |
| 习题                           | 143        |
| <b>第十二章 晶体管直流放大电路</b>        | <b>145</b> |
| 12-1 单端式直接耦合放大电路             | 145        |
| 一、静态工作点的设置                   | 146        |
| 二、电压放大倍数                     | 147        |
| 三、零点漂移                       | 148        |
| 12-2 差动式放大电路                 | 150        |
| 一、基本电路                       | 150        |
| 二、具有射极电阻的差动式放大电路             | 153        |
| 三、差动放大电路的几种接法                | 155        |
| <sup>Δ</sup> 四、具有恒流源的差动式放大电路 | 160        |
| 12-3 运算放大器和线性集成放大电路          | 161        |
| 一、线性集成放大电路简介                 | 162        |
| 二、运算放大器的基本联接方式               | 165        |
| 12-4 运算放大器的应用                | 170        |
| 一、比例运算                       | 170        |
| 二、加、减运算                      | 170        |
| 三、积分运算                       | 172        |
| 四、电压-电流和电流-电压转换器             | 173        |
| 五、比较器                        | 174        |
| 本章小结                         | 176        |
| 习题                           | 177        |
| <b>第十三章 晶闸管及其应用</b>          | <b>181</b> |
| 13-1 晶闸管的结构、特性和参数            | 182        |
| 一、晶闸管的结构和可控单向导电特性            | 182        |
| 二、晶闸管的伏安特性                   | 184        |
| 三、晶闸管的参数                     | 186        |
| 13-2 单相半波可控整流电路              | 188        |
| 一、带电阻负载的电路                   | 188        |

|  |            |
|--|------------|
| 二、带感性负载的电路 .....                                 | 191        |
| 13-3 单相半控桥式整流电路 .....                            | 194        |
| 13-4 晶闸管的保护 .....                                | 198        |
| 一、晶闸管的过电流保护 .....                                | 198        |
| 二、晶闸管的过电压保护 .....                                | 199        |
| 13-5 单结晶体管触发电路 .....                             | 200        |
| 一、单结晶体管的结构和特性 .....                              | 200        |
| 二、单结晶体管的自振荡电路 .....                              | 203        |
| 三、可控整流的单结晶体管触发电路 .....                           | 204        |
| 本章小结 .....                                       | 206        |
| 习题 .....   | 207        |
| <b>附表一 常用半导体二极管的型号和主要参数 .....</b>                | <b>209</b> |
| <b>附表二 常用晶体管的型号和主要参数 .....</b>                   | <b>214</b> |
| <b>附表三 普通晶闸管的参数及各种单相可控整流电路的<br/>    比较 .....</b> | <b>221</b> |
| <b>参考文献 .....</b>                                | <b>225</b> |

## 第九章 二极管和整流电路

通常, 电力网供给的是交流电, 而在工业生产、交通运输和科学实验中, 却常常要用直流电。这就需·要把交流电变换为直流电。本章讲的就是用来实现这种变换的整流电路。

整流电路中必需有整流元件, 以前主要用电子管和离子管, 从六十年代起已广泛采用半导体二极管。

半导体二极管所以能用作整流元件, 关键在于管子内部的PN结具有单向导电性。有关半导体的理论, 物理学中作过介绍, 本章只作扼要复习, 而主要讲述半导体二极管的伏安特性和参数, 以及整流电路的分析计算, 最后还要简略介绍稳压管及简单稳压电路。

### 9-1 半导体的导电方式

常用的半导体, 例如硅和锗, 属于四价元素, 即其原子的最外层轨道上有四个价电子。硅和锗的单晶体, 原子排列非常整齐, 且每个原子的四个价电子各为相邻的四个原子所分别共有, 如图9-1所示。原子间的这种结合叫做共价键结构。温度为绝对零度时, 共价键中的电子被束缚得很紧, 这种情况下的半导体几乎相当于绝缘体。在一般情况下, 硅单晶体(或锗单晶体)受室温作用或光的照射, 共价键中的束缚电子, 有的吸收一定能量而冲破键的束缚, 成为自由电子, 这个过程叫做激发。被冲破的键, 失去一个电子, 就在键中出现一个电子的空位, 通常把它叫做空穴, 如图9-2所示。空穴既然是共价键失去电子的结果, 自然呈正电性。一个

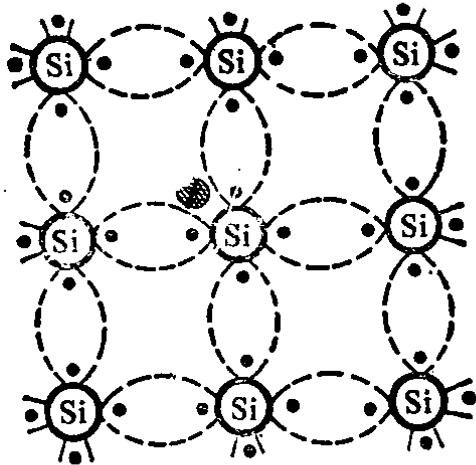


图 9-1 硅原子间的共价键结构

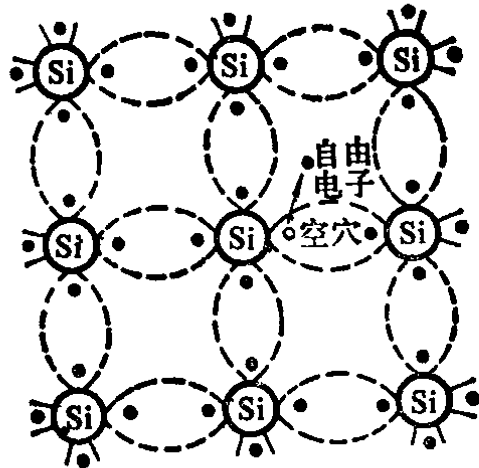


图 9-2 由激发产生的自由电子和空穴

共价键中出现的空穴，很容易被附近另一共价键中的电子移过来填充，从而又在移出电子的键中出现空穴，如此连续进行，表现为空穴的移动，即相当于正电荷的移动。如有外电场作用，由激发产生的自由电子将逆着电场方向运动，而空穴则顺着电场方向连续移动，前者形成电子电流，后者形成空穴电流，二者方向相反，所带电荷符号也相反，但电流效应相同。可见，半导体中的电流是电子流和空穴流的总和。电子和空穴统称为半导体中的载流子。

在半导体中，自由电子如果同空穴相遇，可能放出吸收的能量而填充到空穴中去，这个过程叫做复合。每一次复合，都有一个自由电子和一个空穴同时消失。而且，激发和复合总是在半导体中不断地进行。所以，在一定环境下，半导体中的载流子数目基本上一定。

在结构完整和高度纯净的半导体中，电子和空穴总是成对出现，彼此数目完全相等，两种载流子同时产生，又同时参加导电，这样的半导体叫做本征半导体。

在室温条件下，本征半导体的载流子数量很少，其导电性能远比导体差。

如在纯净的硅中掺入微量三价元素硼(或铝、镓等)，在硼原子



(B)同周围四个硅原子(Si)组成的共价键结构中,因硼原子只有三个价电子而出现空穴(图 9-3),从而使空穴的数目相应增加,自由电子的数目仍然极少。这种半导体主要靠空穴导电,叫做空穴型半导体,又称 P 型半导体。换句话说, P 型半导体中的多数载流子为空穴。应当指出,因掺入三价元素而引起空穴数目的增加,并不使半导体带电,即半导体对外仍呈电中性。

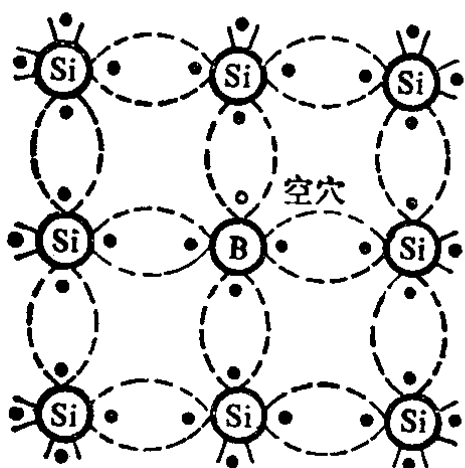


图 9-3 硅单晶体中掺入硼(B)元素形成空穴

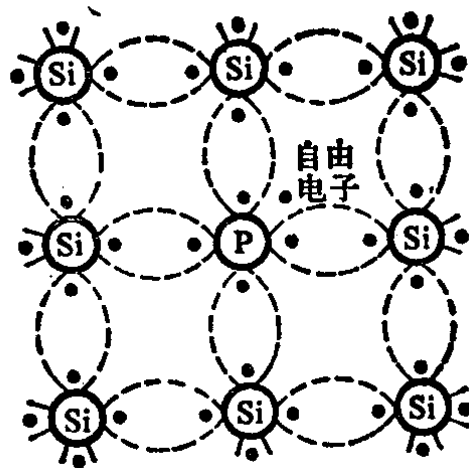


图 9-4 硅单晶体中掺入磷(P)元素提供自由电子

如果在硅的单晶体中掺入微量的五价元素磷(或锑),则在磷原子(P)同周围四个硅原子组成的共价键结构中,因磷原子有五个价电子而多出一个电子(图 9-4),从而使自由电子的数目相应增加,空穴仍然极少。这种半导体主要靠电子导电,或者说,它的多数载流子为电子,故叫做电子型半导体,又叫做 N 型半导体。同样,自由电子数目的增加,并不改变半导体的电中性。

上述两种掺杂半导体的多数载流子浓度,基本上取决于掺杂浓度,而少数载流子浓度则随着温度的升高而增大。

思考题 9-1 在半导体中,空穴的移动实质上也是电子的移动。那末,它和自由电子的移动有何区别?

## 9-2 PN 结及其单向导电性

如果采取某种措施在同一块半导体上形成 P 型区和 N 型区两部分,就构成了所谓的 PN 结。

制造 PN 结的方法,常用的有扩散法和合金法,而前者用得较多。用扩散法制造平面型 PN 结的工艺流程大致如图 9-5 所示,先用氧化法在 N 型硅片的表面生成一层二氧化硅薄膜,如图 (a)。再用光刻法在二氧化硅薄膜上开出一个“窗口”,如图 (b),然后通过窗口对 N 型硅片进行高浓度的硼扩散,如图 (c),就能使靠近窗口的部分获得足够的硼原子而转化为 P 型硅,如图 (d)。适当控制扩散温度和扩散时间,此 P 型区将有合适的杂质浓度和深度。

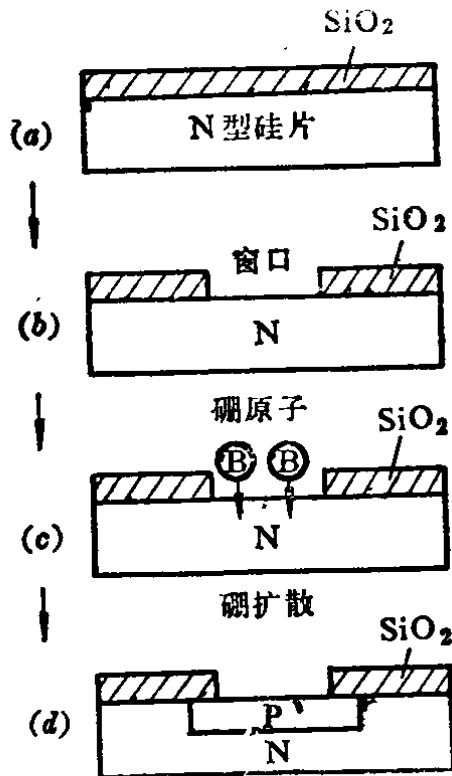


图 9-5 用扩散法制造 PN 结的过程示意

由于 P 区空穴浓度高, N 区却几乎没有空穴, P 区的空穴就要穿过 P 区和 N 区的交界面向 N 区扩散。同样,因 P 区电子浓度远低于 N 区, N 区的电子也要向 P 区扩散。随着扩散的进行,在交界面附近, P 区的空穴和 N 区的电子都将消失。前面曾经指出,无论是 P 型半导体还是 N 型半导体都是电中性的,如图 9-6 (a) 所示。现在,由于相互扩散的结果,交界面两侧将分别出现带电荷的薄层,如图 9-6 (b) 所示。P 区的薄层带负电, N 区的薄层带正电,统称为空间电荷区。在这个区域内,电子和空穴都已复合,基本上没有载流子,有的只是不能移动的正离子和负离子,在

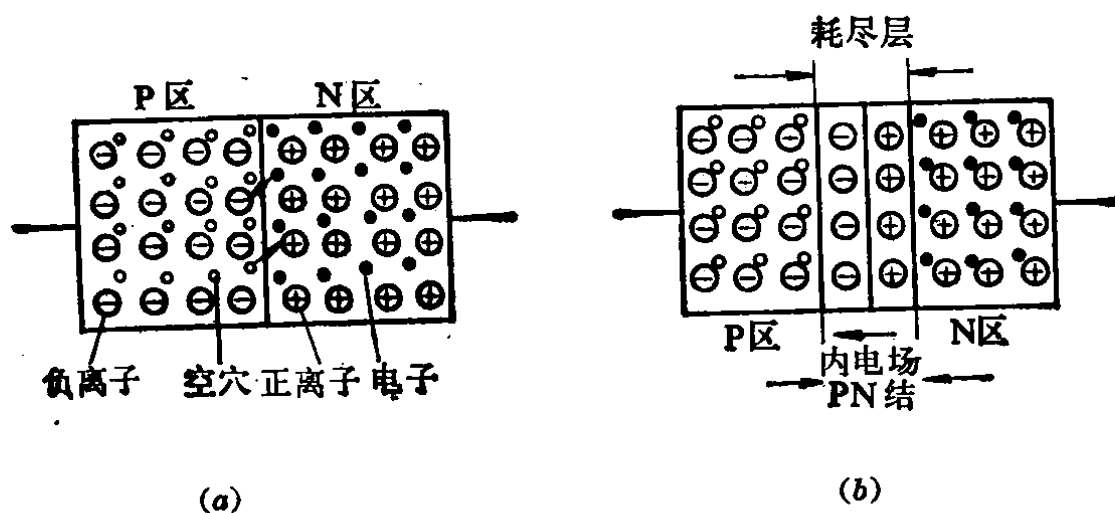


图 9-6 PN 结的形成

P 区是获得了电子的三价杂质原子，在 N 区是失去了电子的五价杂质原子，它们都处在半导体的晶格结构中，都是不能移动的。所以，空间电荷区有很高的电阻率，故又叫做阻挡层，或叫做耗尽层（载流子耗尽了）。

随着交界面两侧正、负电荷层的出现，同时形成一个电场，叫做内电场或自建电场，其方向为从 N 区指向 P 区，如图 9-6(b) 所示。这个自建电场，既阻碍 P 区的空穴向 N 区扩散，又阻碍 N 区的电子向 P 区扩散。或者说，自建电场要使两种载流子分别向着与前述扩散方向相反的方向运动。载流子在电场作用下的运动叫做漂移运动。PN 结没有外加电压时，其中的扩散运动和漂移运动处于动平衡状态，总的看来，没有载流子越过 PN 结。

实际工作中的半导体器件，PN 结上总有外加电压。由于外加电压的方向不同，PN 结的情况也有明显的不同。

PN 结加正向电压的情况，如图 9-7(a) 所示。直流电源正极接 P 区，负极接 N 区，外加电压在 PN 结上形成外加电场，其方向从 P 区指向 N 区，恰好与自建电场方向相反，削弱了自建电场，打破了 PN 结中的动平衡状态，载流子的扩散运动超过了漂移运动。于是，P 区和 N 区的多数载流子又能越过 PN 结向对方扩散。从

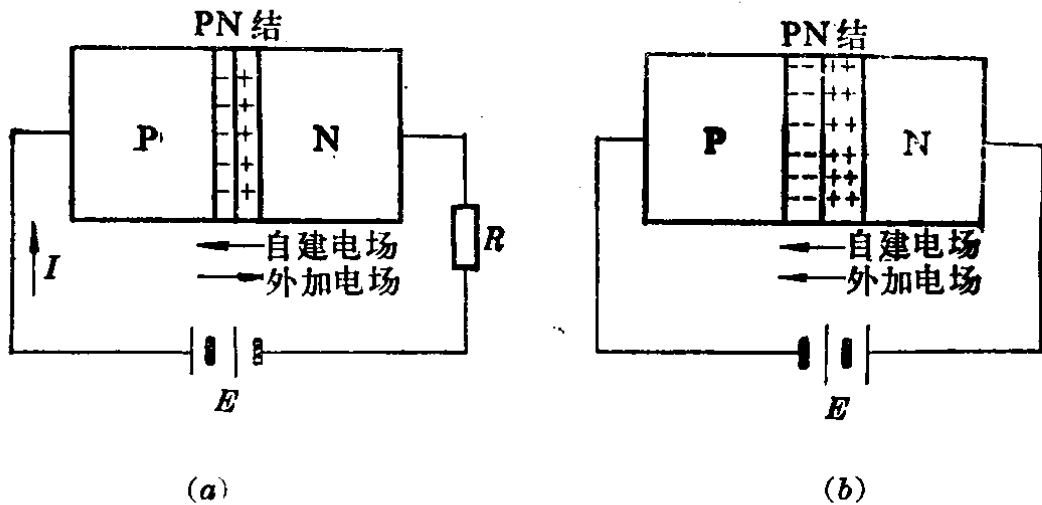


图 9-7 外加电压对 PN 结的影响

N 区注入到 P 区的电子，在扩散过程中先后同 P 区的空穴复合，外加电源正极则不断给 P 区补充空穴（实际是拉走共价键中的电子，从而留下空穴）；同样，从 P 区注入到 N 区的空穴，也先后同 N 区的电子复合，电源负极则不断给 N 区补充电子。可见，在给 PN 结加正向电压情况下，整个电路中有载流子的连续和定向的移动，即形成了电流。此电流通过 PN 结的方向为从 P 区到 N 区，叫做正向电流。

PN 结加反向电压的情况，如图 9-7(b) 所示。直流电源负极接 P 区，正极接 N 区，在 PN 结上的外加电场方向与自建电场方向相同，使空间电荷区电场强度增强，即正、负电荷量加大。由于空间电荷区的电荷密度是由杂质浓度决定的，不随外加电压变化，因此，空间电荷量的加大，将表现为空间电荷区的加宽。于是，P 区的空穴和 N 区的电子更难以越过 PN 结而向对方扩散，只有少数载流子（P 区的电子和 N 区的空穴）在外加电场作用下越过 PN 结，形成从 N 区流向 P 区的电流，叫做反向电流。由于少数载流子数量极微，故反向电流很小，可以看成 PN 结反向不导通。

上述情况表明，PN 结具有单向导电性，导电方向从 P 区到 N 区。导电条件是加正向电压。

PN 结加反向电压时,空间电荷区电场强度增强,正、负电荷量加大,PN 结加宽。所加反向电压越高,交界面两侧的正、负电荷量越大;反向电压降低,正、负电荷量则随之减小,即 PN 结上反向电压改变  $\Delta U$  时,空间电荷区的电荷量将随之改变  $\Delta Q$ ,这说明 PN 结空间电荷区有电容效应,称为结电容,其电容量为  $C_j = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$ ,具有非线性的性质。利用结电容的非线性,可制成变容二极管。对其它一些 PN 结器件,如晶体三极管,结电容会给它的高频特性和开关特性带来不良影响。

### 9-3 半导体二极管的伏安特性和主要参数

半导体二极管的外形因型号和规格的不同而有所不同,图 9-8 所示是常见的几种。由图可见,不管二极管的外形如何,都有

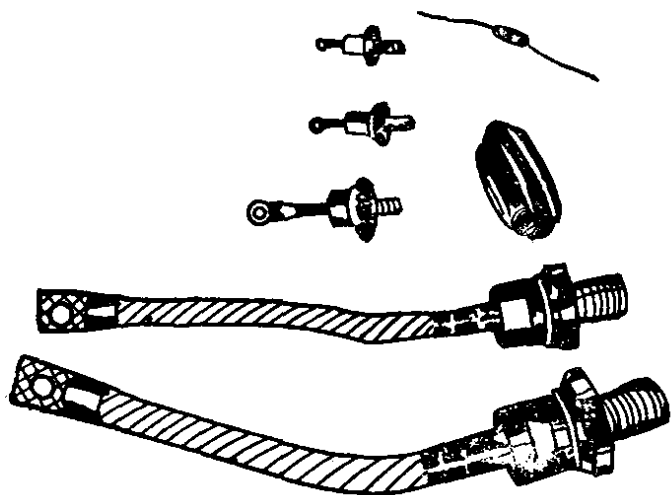


图 9-8 几种半导体二极管的外形

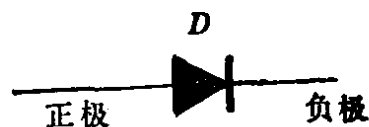


图 9-9 二极管的符号

两个电极,一为正极(又叫阳极),一为负极(又叫阴极)。在电路图中,二极管的图形符号如图 9-9 所示,文字符号用  $D$  表示。

半导体二极管的结构,就是一个 PN 结加上电极引线和管壳,正极从 P 区引出,负极从 N 区引出,故它的导电方向是从正极指

向负极。按照 PN 结的构成方式，可将半导体二极管分成点接触型、面结合型和平面型三类，图 9-10 所示是平面型二极管的内部结构。

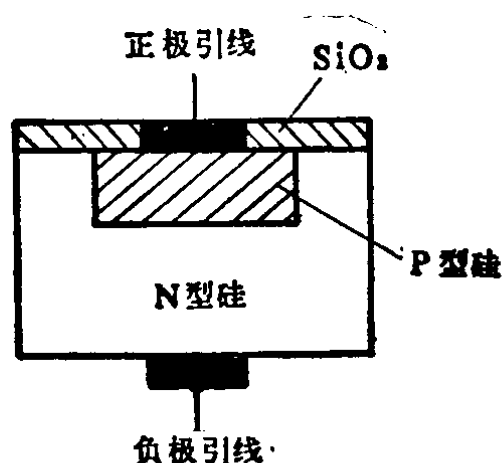


图 9-10 平面型二极管的内部结构

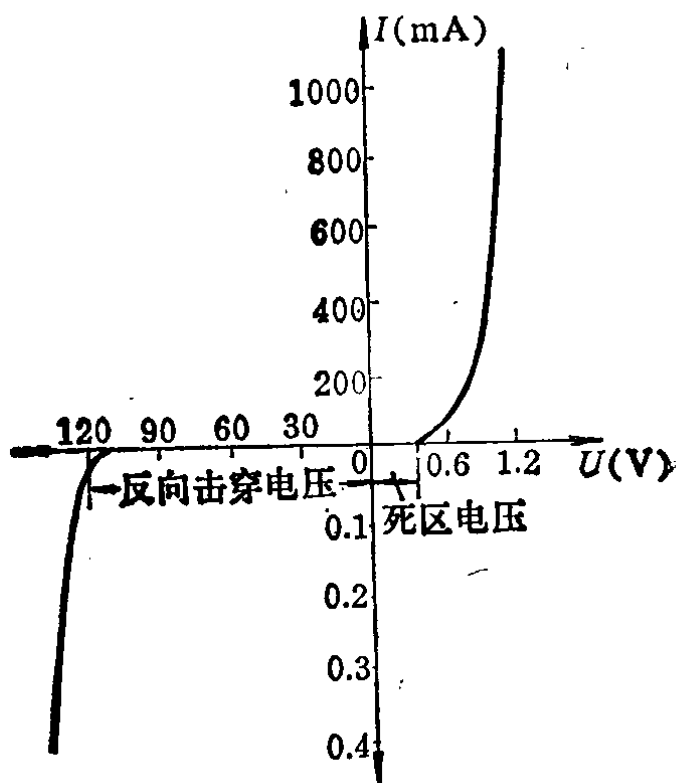


图 9-11 硅二极管伏安特性举例

和一般电路器件特性的表示方法相似，半导体二极管的外部特性，也用二极管两端的电压和二极管中电流的对应关系曲线来表示，称为二极管的伏安特性。各种二极管的伏安特性都可以根据实验数据绘成，也可以从一般半导体器件手册上查到。图 9-11 所示是硅二极管伏安特性的一个具体例子。型号不同的二极管，参数不尽相同，但伏安特性的形状却大致相似。

图 9-11 表明，二极管的伏安特性曲线由正向特性（在第一象限）和反向特性（在第三象限）两部分组成。

正向特性表明，当二极管的正向电压很小时，流过它的正向电流也很小；当正向电压稍为增大（硅管超过 0.5V，锗管超过 0.1V，即所谓死区电压）时，正向电流开始增大。对一定型号的半导体二极管，允许通过的正向电流平均值  $I_F$  有一定限制，这个允许值叫

做二极管的最大整流电流，它是一个重要参数。在最大整流电流范围内，管子正向压降都不大(表 9-2)，或者说，二极管的正向电阻很小。以后在讨论二极管整流电路时，常将管子的正向压降忽略不计。

反向特性表明，二极管的反向电压小于某一数值时，反向电流很小(即二极管的反向电阻很大)，它是由激发所生少数载流子形成的，在一定温度下是个常数，不随外加反向电压的大小而变化，通常称为反向漏电流或反向饱和电流。前面曾经指出，半导体中少数载流子的浓度与温度有关，故半导体二极管反向漏电流的大小也与环境温度有关，它随着温度的升高而剧烈增加。以硅二极管为例，如果设它在室温为  $25^{\circ}\text{C}$  时的反向漏电流等于 1 个单位，则随着室温的升高，其增长情况如表 9-1 所示。

硅二极管的反向电流随环境温度增长的情况 表 9-1

| 环境温度 | $25^{\circ}\text{C}$ | $55^{\circ}\text{C}$ | $95^{\circ}\text{C}$ | $140^{\circ}\text{C}$ |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| 反向电流 | 1                    | 10                   | 100                  | 1000                  |

值得注意的是，即使在室温条件下，若二极管的反向电压大于某一定值，反向电流也会急剧增大，这种现象叫做反向击穿，该一定值叫做二极管的反向击穿电压。一般半导体器件手册上给出的各种二极管的最高反向工作电压  $U_{PR}$ ，就是按其反向击穿电压的  $1/2$  或  $2/3$  规定的，这是它的又一个重要参数。在使用二极管时，一般要注意加给它的反向电压最大值应小于它的  $U_{PR}$  值。

不同型号的半导体二极管有不同的参数值，表 9-2 仅举几例常用的半导体二极管。其中，型号的第一位是数字，2 是二极管的代号；第二位是文字，A 表示管心用 N 型锗作基片，C 表示用 N 型硅作基片；第三位也是文字，表示管子的用途，P 代表普通管，Z 代表整流管；最后一位数字(和文字)是管子序号，详见 36 页表 10-1。

常用半导体二极管主要参数举例

表 9-2

| 型号     | 最大整流电流<br>(mA)   | 最高反向工作电压<br>(峰值)<br>(V) | 反向击穿电压<br>(V) | 最高工作频率<br>(MHz) | 最大整流电流下的正向压降<br>(V) | 最高反向工作电压下的反向电流<br>( $\mu\text{A}$ ) |
|--------|------------------|-------------------------|---------------|-----------------|---------------------|-------------------------------------|
| 2AP3   | 25               | 30                      | $\geq 45$     | 150             | $< 1$               | $\leq 250$                          |
| 2AP6   | 12               | 100                     | $\geq 150$    | 150             | $< 1$               | $\leq 250$                          |
| 2CP10  | 100              | 25                      |               |                 | $\leq 1.5$          | $\leq 5$                            |
| 2CP33H | 500              | 400                     |               |                 | $\leq 1$            | $\leq 300$                          |
| 2CZ11A | 1000             | 100                     |               |                 | $\leq 1$            | $\leq 0.6 \times 10^3$              |
| 2CZ14F | $10 \times 10^3$ | 600                     |               |                 | $\leq 0.8$          | $\leq 6 \times 10^3$                |

思考题 9-2 用一节 1.5 V 的干电池和一个小电珠串联,可作为测定半导体二极管好坏和判别其正、负极的装置。试说明其原理和测试方法。

思考题 9-3 实际上,常用万用表的欧姆( $\Omega$ )挡来测定半导体二极管的好坏和极性,如图 9-12 所示。其中,(a)、(b)两图的差别在于:二极管的正、负极同万用表的红、黑表笔的联接对调了位置,且图(a)显示的电阻小(几百欧),图(b)显示的电阻大(几百千欧)。试指出二极管的好坏和它的正、负极,并说明理由。(提示:万用表端钮上标的“+”、“-”代表万用表测量电流的入端和出端恰好“+”端同其内部电池的负极相联“-”端同电池的正极相联。)

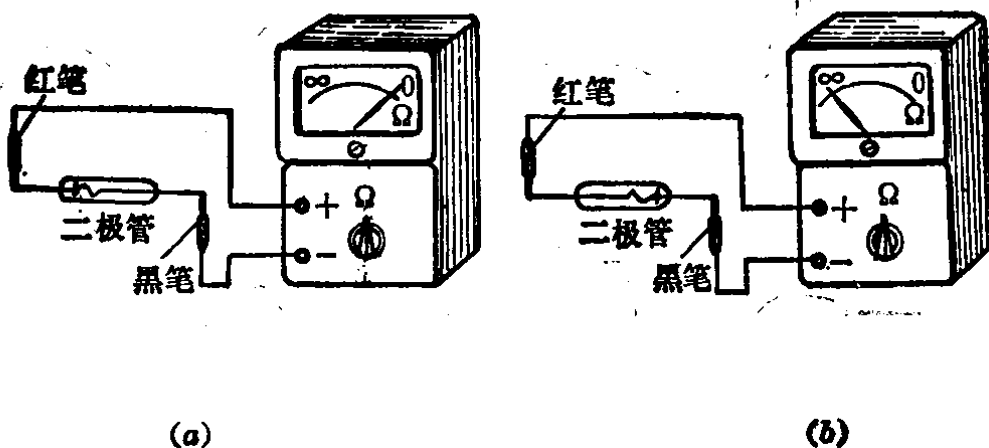


图 9-12 用万用表欧姆挡检测二极管



## 9-4 单相桥式整流电路

利用二极管组成的整流电路,按所接交流电源的相数分,主要有单相整流电路和三相整流电路两大类。而单相整流电路,按联接方式或整流电压的波形分,又可分为半波、全波和桥式等几种。本节只介绍应用最为广泛的单相桥式整流电路。它的电路原理图,如图 9-13(a)所示。在一些电子仪器的电路图中,为简便起见,常将单相桥式整流电路画成图 9-13(b)的形式。

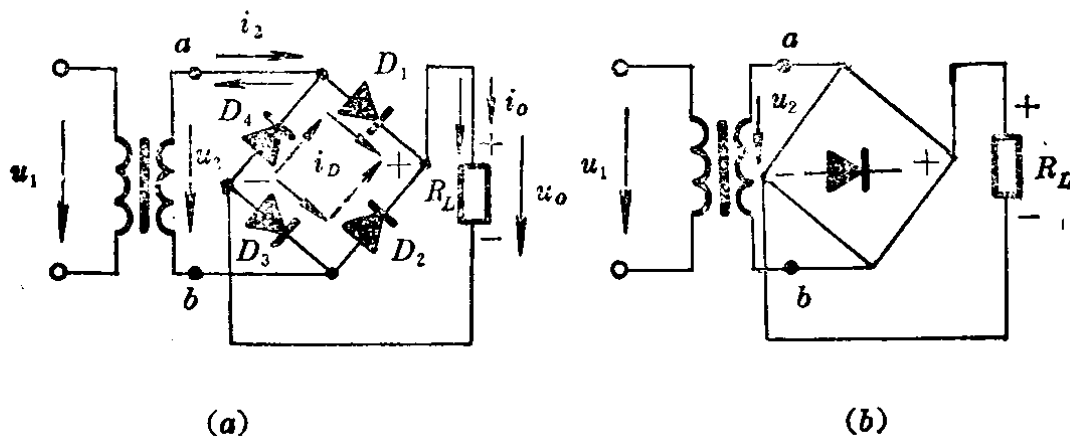


图 9-13 单相桥式整流电路

这种整流电路的工作原理如下:

设变压器副边电压有效值为  $U_2$ , 瞬时值  $u_2 = \sqrt{2} U_2 \sin \omega t$

$$(9-1)$$

在  $u_2$  的正半周, 二极管  $D_1$  和  $D_3$  因受正向电压作用而导通, 电流方向如图 9-13(a) 中实线箭头所示, 即从变压器  $a$  端流出, 经  $D_1$ 、 $R_L$  和  $D_3$  后, 到  $b$  端流入变压器。忽略  $D_1$  和  $D_3$  的正向压降, 可认为输出给负载的电压为  $u_o = u_2$ 。此时,  $D_2$  和  $D_4$  均受反向电压作用而截止。反向电压的大小近似等于  $u_2$  其最大值为  $\sqrt{2} U_2$ , 即

$$U_{RM} = \sqrt{2} U_2 \quad (9-2)$$