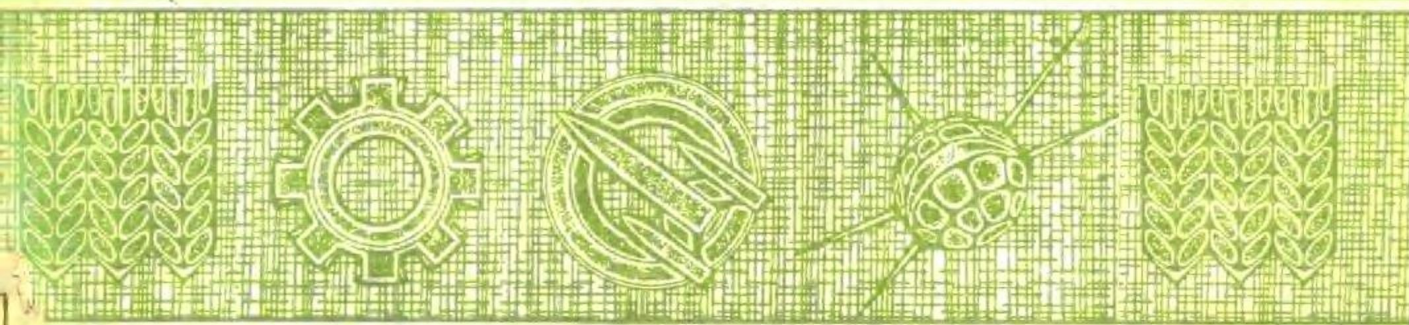


中等专业学校试用教材

工业电气自动化专业适用

# 电子技术基础

福建机电学校 林存良主编



人民教育出版社

《电子技术基础》共分十章,包括晶体管整流电路、晶体管放大电路基础、晶体管交流放大器、晶体管直流放大器、晶体管运算放大器、晶体管调制型放大器、晶体管直流稳压电源、晶体管正弦波振荡器、场效应管及其电路、电子管及其电路等内容。全书以晶体管电路为主,把器件、电路和应用结合起来讨论。各章还附有一定数量的练习题。

本书供中等专业学校“工业电气自动化”专业和相近专业作为“电子技术基础”课程的试用教材,也可作为工厂业余学校和技术训练班的教学参考书。

中等专业学校试用教材

工业电气自动化专业适用

电子技术基础

福建机电学校 林存良主编

\*

人民邮电出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海中华印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 504,000

1978年10月第1版 1979年3月第1次印刷

印数 1—300,000

书号 15012·098 定价 1.80 元

## 前 言

本书作为一机部中等专业学校“工业电气自动化”专业的“电子技术基础”课程的试用教材,其任务是授予学员有关电子技术的基础理论,及其在工业上应用的基本知识,掌握阅读、安装、调试电子电路的基本技能,为今后正确地使用、调整电子设备打下良好基础。

本书按照一机部中等专业学校教材会议制定的编写大纲进行编写。在编写中我们有以下几方面考虑:

一、本书以晶体管电路的基本概念、基本原理和基本分析方法作为重点。把器件、电路和应用结合起来讨论,而以电路为主。注重物理概念,把定性分析、定量估算和实验调整的方法结合起来,以加深对电路的理解。

二、从专业的培养要求出发,对整流、交流放大、直流放大、运算放大、振荡、稳压等电路均作了较详细的分析讨论,以打好牢固的基础。同时,对场效应管和电子管的电路也作了专章介绍。

三、考虑到课程的设置和分工情况,有关可控硅和脉冲与数字电路的内容,另设专门课程讲授,故本书不包括这些内容。

四、各章选有一定数量的练习题,通过习题作业,可以培养学生分析问题和解决问题的能力。

五、本书中凡用“†”表示的内容均为附加教材,供各校在教学中酌情选择,也可作为学生自学的参考内容。

本书已经教材审稿会议通过,参加审稿的有:一机部教材编辑室、福州大学、福州无线电厂、湘潭电机制造学校、上海机器制造学校、广西机械工业学校、哈尔滨电机制造学校、黑龙江机械制造学校、吉林机械工业学校、河北机电学校、内蒙古工业学校、西安航空工业学校、青岛轻工业学校、福建机电学校,共计14个单位和学校代表。全书由福建机电学校负责主编。湘潭电机制造学校、上海机器制造学校、广西机械工业学校参加协编。编写的具体分工如下:第一章由上海机器制造学校陈祖植同志执笔;第二、三、四、五、六章由福建机电学校林存良同志执笔;第八、九章由湘潭电机制造学校冼剑铭同志执笔;第七章和第十章分别由广西机械工业学校冯守汉同志和卢仁广同志执笔。初稿经审稿会议通过后,又在补充修改的基础上,最后由林存良同志负责定稿。

由于我们的政治思想水平和业务水平都不高,加上编写时间短促,一定会有缺点和错误,希望广大师生和读者,多给予批评指正。

编 者

1978年8月

## 本书所用的符号说明

### 一、关于符号表示的说明

1. 本书尽量采用标准的和国际通用的符号,少数沿用了汉语拼音字母。

2. 符号中凡直流量,交流量的有效值和最大值,静态参数用大写字母表示。例如:  $U$  表示直流电压;  $R$  表示静态电阻。

凡变化量和动态参数用小写字母表示。例如:  $e$  表示变化电势总的瞬时值;  $r$  表示动态电阻。

### 3. 采用的辅助符号有

#### (1) 顶记号

~ 正弦交流量。如  $\tilde{u}$  为正弦交流电压的瞬时值,  $\tilde{U}$  为正弦交流电压的有效值,  $\tilde{U}_m$  为正弦交流电压的最大值。

— 直流量。如  $\overline{\beta}$  为直流电流放大系数。

• 复数量。如  $\dot{U}$  为正弦交流电压的复数值。

#### (2) 侧记号

$\Delta$  变化量、增量。如  $\Delta I$  为电流  $I$  的变化量。

#### (3) 脚记号

$m$  幅值。如  $U_M$  为变化电压的幅值。

$M$  最大允许值。如  $P_{cM}$  为集电极最大允许耗散功率。

max 最大的。如  $I_{\max}$  为最大的电流。

min 最小的。如  $I_{\min}$  为最小的电流。

$sr$  输入。如  $U_{sr}$  为输入电压(国际通用符号为  $U_{in}$ )。

$sc$  输出。如  $r_{sc}$  为输出电阻(国际通用符号为  $r_{out}$ )。

$L$  负载。如  $R_L$  为负载电阻。

$F$  反馈。如  $U_F$  为反馈电压。

#### (4) 右上角记号

' 等效。如  $R'_L$  为等效负载电阻。

#### (5) 简化记号

// 并联。如  $R_1 // R_2$  为  $R_1$  与  $R_2$  并联。

### 二、主要符号

A 安培表; 电流的单位(安培)。

$a$  电子管的阳极(屏极)。

$B$  变压器; 频带宽度。

$b$  晶体管的基极。

CMRR 共模抑制比。

$C$  电容。

$c$  晶体管的集电极。

$D$  二极管; 电动机; 场效应管的漏极。

$D_w$  稳压管。

db 放大器增益的单位(分贝)。

$E$  直流电源的电势; 变化电势总的有效值。

$\tilde{E}$  正弦交流电势的有效值。

$e$  晶体管的发射极; 变化电势总的瞬时值; 自然对数的底。

$\tilde{e}$  正弦交流电势的瞬时值。

$F$  电容的单位(法拉)。

$F$  反馈系数。

$f$  频率。

$G$  电子管; 放大器的增益; 场效应管的栅极。

$g$  电子管的栅极。

$g_m$  场效应管的跨导。

$H$  电感的单位(亨利)。

Hz 频率的单位(赫兹)。

$h$  晶体管的混合参数。

$I$  直流电流; 变化电流总的有效值。

$\tilde{I}$  正弦交流电流的有效值。

$i$  变化电流总的瞬时值。

$\tilde{i}$  正弦交流电流的瞬时值。

$J$  继电器。

$K$  放大倍数的绝对值; 开关。

$\bar{K}$  交流放大器放大倍数的复数符号。

$\bar{K}$  直流放大器放大倍数的符号。

$k$  国际制词冠“千”(即  $10^3$ )。

$k$  电子管的阴极; 系数。

$L$  电感。

$M$  国际制词冠“兆”(即  $10^6$ )。

$M$  互感。

$m$  国际制词冠“毫”(即  $10^{-3}$ )。

$N$  电子型半导体。

$n$  变压器的匝数比。

$P$  空穴型半导体。

$P$  平均功率。  
 $P$  国际制词冠“皮”(即  $10^{-12}$ )。  
 $Q$  静态工作点; 品质因数。  
 $q$  电荷。  
 $R$  直流电阻。  
 $r$  动态电阻。  
 $s$  时间的单位(秒)。  
 $S$  电子管的跨导; 场效应管的源极; 脉动系数。  
 $T$  晶体管; 场效应管; 周期。  
 $t$  时间。  
 $U$  直流电压; 变化电压总的有效值。  
 $\tilde{U}$  正弦交流电压的有效值。  
 $u$  变化电压总的瞬时值。  
 $\tilde{u}$  正弦交流电压的瞬时值。  
 $V$  伏特表; 电压的单位(伏特)。  
 $W$  功率的单位(瓦特)。  
 $W$  电位器。  
 $w$  线圈的匝数。  
 $X$  电抗。  
 $Z$  阻抗。  
 $\alpha$  共基极电流放大系数; 角度。  
 $\beta$  共发射极电流放大系数。  
 $\gamma$  波纹因数。  
 $\Delta$  变化量; 增量; 三角形。  
 $\eta$  效率。  
 $\mu$  电子管的放大系数。国际制词冠“微”(即  $10^{-6}$ )。  
 $\tau$  时间常数。  
 $\varphi$  相位角。  
 $\Omega$  电阻的单位(欧姆)。  
 $\omega$  角频率。

# 目 录

## 第一章 晶体管整流电路

|               |    |               |    |
|---------------|----|---------------|----|
| 第一节 半导体的基本知识  | 1  | 第四节 滤波电路      | 15 |
| 一、什么是半导体      | 1  | 一、各种整流电路的脉动情况 | 15 |
| 二、P型半导体和N型半导体 | 2  | 二、电容滤波器       | 17 |
| 三、PN结和它的单向导电性 | 3  | 三、电感滤波器       | 19 |
| 第二节 半导体二极管    | 5  | 四、复式滤波器       | 20 |
| 一、半导体二极管的结构   | 5  | 第五节 倍压整流电路    | 23 |
| 二、半导体二极管的特性   | 6  | 一、二倍压整流电路     | 23 |
| 三、半导体二极管的主要参数 | 7  | 二、三倍压和多倍压整流电路 | 24 |
| 四、二极管性能的简易测试法 | 7  | 第六节 三相整流电路    | 26 |
| 五、稳压二极管       | 8  | 一、三相半波整流电路    | 26 |
| 第三节 单相整流电路    | 8  | 二、三相桥式整流电路    | 27 |
| 一、单相半波整流电路    | 8  | 三、六相双反星形整流电路  | 29 |
| 二、单相全波整流电路    | 10 | 四、三相整流电路的应用举例 | 30 |
| 三、单相桥式整流电路    | 12 | 本章小结          | 31 |
| 四、整流元件的串、并联   | 13 | 练习题           | 32 |
| 五、单相整流电路的应用举例 | 14 |               |    |

## 第二章 晶体管放大电路基础

|                   |    |                  |    |
|-------------------|----|------------------|----|
| 第一节 半导体三极管        | 34 | 二、动态工作的图解分析法     | 55 |
| 一、半导体三极管的结构       | 34 | 三、放大器接负载时的工作情况   | 58 |
| 二、晶体管内载流子的运动过程    | 35 | 四、波形的失真及其改进      | 60 |
| 三、晶体管的电流放大作用      | 37 | 五、晶体管的等效电路       | 61 |
| 四、晶体管的特性曲线        | 38 | 六、电压放大倍数         | 64 |
| 五、晶体管的主要参数        | 41 | 第四节 放大器的偏置稳定电路   | 67 |
| 六、晶体管的工作状态        | 45 | 一、温度对放大器工作点的影响   | 67 |
| 七、晶体管的测试方法        | 46 | 二、具有电压负反馈的偏置稳定电路 | 68 |
| 第二节 放大电路的组成和工作原理  | 49 | 三、具有电流负反馈的偏置稳定电路 | 69 |
| 一、简单的放大电路         | 49 | 四、典型的分压式偏置稳定电路   | 69 |
| 二、放大器在输入信号时的工作情况  | 50 | 第五节 单管放大电路的计算    | 71 |
| 三、放大电路中晶体管的三种基本接法 | 52 | 本章小结             | 73 |
| 第三节 放大电路的基本分析方法   | 54 | 练习题              | 74 |
| 一、静态工作点           | 54 |                  |    |

## 第三章 晶体管交流放大器

|            |    |                        |    |
|------------|----|------------------------|----|
| 第一节 概述     | 76 | 二、对交流放大器的基本要求          | 76 |
| 一、交流放大器的组成 | 76 | 三、在工业自动控制系统中所用交流放大器的特点 | 77 |

|                |     |                  |     |
|----------------|-----|------------------|-----|
| 第二节 交流电压放大器    | 77  | 一、功率放大器的任务和要求    | 105 |
| 一、级间耦合方式       | 77  | 二、单管功率放大器        | 106 |
| 二、输入与输出电阻      | 80  | 三、推挽功率放大器        | 112 |
| 三、电压放大倍数       | 81  | 四、无输出变压器功率放大器    | 120 |
| 四、频率特性         | 84  | †五、功率放大管的并联和散热问题 | 125 |
| †五、阻容耦合放大器的计算  | 86  | 第六节 交流放大器的调试     | 127 |
| 第三节 反馈在放大器中的应用 | 87  | 一、静态调试           | 127 |
| 一、反馈的基本概念      | 87  | 二、动态调试           | 128 |
| 二、反馈对放大器性能的影响  | 89  | 三、干扰和噪声的抑制       | 128 |
| 三、负反馈放大器的基本电路  | 95  | 四、自激振荡的消除        | 130 |
| 四、多级负反馈电路      | 98  | 第七节 交流放大器的应用举例   | 132 |
| 第四节 射极输出器      | 99  | 一、电感比较仪中的电压放大器   | 132 |
| 一、射极输出器的工作原理   | 99  | †二、超声压焊机中的功率放大器  | 133 |
| 二、射极输出器的跟随特性   | 100 | 三、手提式晶体管扩音机      | 134 |
| 三、射极输出器的计算     | 101 | 四、交流电压表          | 135 |
| 四、射极输出器的应用     | 104 | 本章小结             | 136 |
| 第五节 功率放大器      | 105 | 练习题              | 137 |

## 第四章 晶体管直流放大器

|                     |     |                   |     |
|---------------------|-----|-------------------|-----|
| 第一节 概述              | 140 | 三、单端输入、双端输出的差动式电路 | 157 |
| 一、直流放大器的用途          | 140 | 四、双端输入、单端输出的差动式电路 | 158 |
| 二、直流放大器的主要问题        | 140 | 五、差动式电路几种接法的比较    | 159 |
| 第二节 直接耦合放大器         | 142 | 六、多级差动式放大电路       | 162 |
| 一、级间耦合方式            | 142 | †第五节 直流放大器的计算和调试  | 162 |
| 二、零点漂移及其抑制方法        | 144 | 一、选择电路时考虑的一般原则    | 162 |
| 第三节 差动式放大电路         | 147 | 二、电路参数的选择原则       | 163 |
| 一、差动式放大电路的基本原理      | 147 | 三、设计举例            | 163 |
| 二、具有公共发射极电阻的差动式电路   | 149 | 四、装配工艺上采取的措施      | 165 |
| 三、具有辅助电源的差动式电路      | 150 | 五、调试工作            | 165 |
| 四、具有恒流源的差动式电路       | 152 | 第六节 直流放大器的应用举例    | 166 |
| †五、“对管”差动式电路        | 153 | 一、滑差电机调速系统        | 166 |
| †六、放大倍数的调节方法        | 153 | 二、F-2J 型直流放大器     | 168 |
| 第四节 差动式电路的输入、输出接线方式 | 155 | 本章小结              | 169 |
| 一、双端输入、双端输出的差动式电路   | 155 | 练习题               | 170 |
| 二、单端输入、单端输出的差动式电路   | 155 |                   |     |

## 第五章 晶体管运算放大器

|                |     |                  |     |
|----------------|-----|------------------|-----|
| 第一节 概述         | 171 | 四、积分运算           | 175 |
| 一、什么叫运算放大器     | 171 | 五、微分运算           | 176 |
| 二、信号的组合运算法     | 172 | 六、积分求和运算         | 177 |
| 第二节 运算放大器的基本功能 | 174 | 第三节 运算放大器的输入接线方式 | 178 |
| 一、比例运算         | 174 | 一、两种基本的输入方式      | 178 |
| 二、变号运算         | 174 | 二、同相输入时的运算关系     | 178 |
| 三、加法运算         | 175 | 三、差动输入方式         | 179 |

|                     |     |                     |     |
|---------------------|-----|---------------------|-----|
| 四、闭环的输入与输出电阻.....   | 180 | 第六节 运算放大器的应用举例..... | 187 |
| †第四节 对运算放大器的要求..... | 180 | 一、恒压源和恒流源.....      | 187 |
| 第五节 线性集成组件.....     | 182 | 二、自动检测电路.....       | 188 |
| 一、线性集成电路简介.....     | 182 | 三、电机调速用自动调节器.....   | 189 |
| 二、BG301 线性集成组件..... | 183 | 四、锯齿波发生器.....       | 192 |
| †三、线性集成组件的主要参数..... | 184 | 本章小结.....           | 192 |
| 四、线性集成组件的使用方法.....  | 186 | 练习题.....            | 193 |

## 第六章 晶体管调制型放大器

|                      |     |                      |     |
|----------------------|-----|----------------------|-----|
| 第一节 概述.....          | 195 | 三、晶体管解调器.....        | 206 |
| 一、调制型直流放大器的基本原理..... | 195 | 四、二极管解调器.....        | 208 |
| 二、调制型放大器的用途.....     | 197 | 五、晶体管相敏放大器.....      | 209 |
| 第二节 调制器.....         | 197 | 第四节 调制型放大器的应用举例..... | 212 |
| 一、调制器的工作原理.....      | 197 | 一、自动电子电位差计.....      | 212 |
| 二、机械振子调制器.....       | 199 | †二、电子自动秤量仪表.....     | 214 |
| 三、晶体管调制器.....        | 201 | †三、温度调节仪.....        | 216 |
| 四、调制变换器.....         | 202 | 四、电感比较仪.....         | 217 |
| 第三节 解调器.....         | 205 | 本章小结.....            | 219 |
| 一、解调器的工作原理.....      | 205 | 练习题.....             | 219 |
| 二、机械振子解调器.....       | 205 |                      |     |

## 第七章 晶体管直流稳压电源

|                        |     |                         |     |
|------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第一节 硅稳压管稳压电路.....      | 221 | 第四节 稳压电源的过电流保护措施.....   | 239 |
| 一、稳压管的特性和参数.....       | 221 | 一、限流型过电流保护电路.....       | 239 |
| 二、稳压管稳压电路的工作原理.....    | 223 | 二、截止型过电流保护电路.....       | 241 |
| 三、稳定度和内阻.....          | 224 | 第五节 稳压电源的调试方法.....      | 242 |
| 四、设计方法.....            | 225 | 第六节 稳压电源的应用实例.....      | 243 |
| 第二节 晶体管串联型固定式稳压电源..... | 227 | 一、实验室用可调稳压电源.....       | 243 |
| 一、电路形式.....            | 227 | †二、UJ-1 型电位差计用稳压电源..... | 245 |
| 二、工作原理.....            | 228 | 三、利用运算放大器组件的稳压电源.....   | 245 |
| 第三节 晶体管串联型可调式稳压电源..... | 229 | 四、W1-1202 型稳压器组件.....   | 246 |
| 一、基本电路的工作原理.....       | 229 | 本章小结.....               | 247 |
| 二、提高稳压电源性能的措施.....     | 230 | 练习题.....                | 247 |
| 三、设计方法.....            | 235 |                         |     |

## 第八章 晶体管正弦波振荡器

|                     |     |                      |     |
|---------------------|-----|----------------------|-----|
| 第一节 振荡器的基本原理.....   | 249 | 二、RC 桥式正弦波振荡器.....   | 254 |
| 一、概述.....           | 249 | 第三节 LC 型正弦波振荡器.....  | 257 |
| 二、自激振荡的条件.....      | 250 | 一、概述.....            | 257 |
| 三、建立振荡的过程.....      | 250 | 二、变压器反馈式 LC 振荡器..... | 258 |
| 四、正弦波振荡器的组成.....    | 251 | 三、电感反馈式 LC 振荡器.....  | 259 |
| 第二节 RC 型正弦波振荡器..... | 251 | 四、电容反馈式 LC 振荡器.....  | 260 |
| 一、RC 移相式正弦波振荡器..... | 252 | †五、LC 振荡器的选择.....    | 261 |

|                    |     |                |     |
|--------------------|-----|----------------|-----|
| 六、LC 振荡器的应用举例..... | 264 | 二、石英晶体振荡器..... | 268 |
| 第四节 石英晶体振荡器.....   | 266 | 本章小结.....      | 269 |
| 一、石英晶体谐振器.....     | 266 | 练习题.....       | 270 |

## 第九章 场效应管及其电路

|                         |     |                      |     |
|-------------------------|-----|----------------------|-----|
| 第一节 场效应管的工作原理及特性.....   | 271 | 五、场效应管调制器.....       | 287 |
| 一、结型场效应管的原理及特性.....     | 271 | 第三节 场效应管的应用举例.....   | 287 |
| 二、绝缘栅场效应管的原理及特性.....    | 274 | 一、场效应管峰值电压表.....     | 287 |
| 三、场效应管的主要参数及使用注意事项..... | 278 | 二、场效应管 RC 桥式振荡器..... | 288 |
| 第二节 场效应管的基本电路.....      | 280 | 三、晶体管示波器的输入级.....    | 289 |
| 一、共源放大器.....            | 280 | 四、自激振荡的调制型放大器.....   | 290 |
| 二、源极输出器.....            | 284 | 本章小结.....            | 291 |
| 三、差动放大器.....            | 285 | 练习题.....             | 292 |
| 四、场效应管与晶体管耦合电路.....     | 286 |                      |     |

## 第十章 电子管及其电路

|                    |     |                   |     |
|--------------------|-----|-------------------|-----|
| 第一节 电子管整流电路.....   | 293 | 一、电子管 LC 振荡器..... | 312 |
| 一、真空二极管.....       | 293 | 二、电子管 RC 振荡器..... | 314 |
| 二、充气二极管.....       | 296 | 第四节 闸流管电路.....    | 315 |
| 三、真空二极管整流电路.....   | 297 | 一、闸流管的结构及其特性..... | 315 |
| 第二节 电子管放大电路.....   | 299 | 二、闸流管的控制方法.....   | 317 |
| 一、三极电子管.....       | 299 | 三、闸流管可控整流电源.....  | 320 |
| 二、多极电子管.....       | 304 | 本章小结.....         | 322 |
| 三、电子管放大电路.....     | 307 | 练习题.....          | 322 |
| 第三节 电子管正弦波振荡器..... | 311 |                   |     |

## 附 录

|                            |     |                        |     |
|----------------------------|-----|------------------------|-----|
| 附录 I 半导体器件型号命名方法.....      | 324 | 附录 IV 使用电子管的基本知识.....  | 329 |
| 附录 II 晶体管的 $h$ 参数等效电路..... | 325 | 附录 V 常用阻容元件的标称值.....   | 332 |
| 附录 III 放大器增益的表示法.....      | 327 | 附录 VI 典型半导体器件参数选录..... | 333 |

# 第一章 晶体管整流电路

本章从半导体材料和半导体器件的基本结构 PN 结讲起,介绍最简单的半导体器件——二极管的结构原理和特性参数。然后重点讨论利用二极管的单向导电性组成的各种整流电路,包括单相半波整流电路、全波整流电路、桥式整流电路和各种滤波电路的电路原理和参数计算。此外,还介绍了倍压整流电路和三相整流电路。

## 第一节 半导体的基本知识

### 一、什么是半导体

大家知道,金、银、铜、铝等金属材料都是很好的导电体,简称为导体。而陶瓷、云母、塑料、橡胶、石英等物质一般情况下不能导电,尽管施加较高的电压,仍然基本上没有电流,所以通常称之为电的绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。如锗、硅、硒及许多金属氧化物和硫化物都是半导体。

要知道不同物质的导电性能为什么会有不同,必须先从物质的原子结构讲起。大家知道,自然界的一切物质都是由原子组成的。而原子又是由一个带正电的原子核与若干个带负电的电子所组成。电子分层围绕原子核作不停的旋转运动,其中内层的电子受原子核的吸引力较大,外层的电子受原子核的吸引力较小。

对于金属材料来说,其原子的外层电子受原子核的束缚力最小,因此有大量电子能够挣脱原子核的束缚而成为自由电子。在外电场的作用下,这些自由电子将作定向运动而形成电流,所以金属的导电性能良好。自由电子就是金属导体内的载流子。

对于绝缘材料来说,其原子的外层电子受原子核的束缚力很大,因此电子很不容易挣脱出来,使形成自由电子的机会非常小,所以绝缘材料的导电性能很差。

对于半导体材料来说,它的原子结构比较特殊,其原子的外层电子既不象金属导体那样容易挣脱出来,也不象绝缘材料那样束缚很紧,所以它的载流子数目不会太多也不会太少,这就决定了它的导电性能介于导体和绝缘体之间。

下面我们来研究半导体内部的导电规律。常见半导体材料硅和锗的原子结构如图 1-1 所示。由图可见,硅和锗原子结构的共同特点是最外层的电子都是 4 个。通常称最外层的电子为价电子,有几个价电子就叫做几价元素,所以硅和锗都是 4 价元素。

当硅和锗半导体材料被制成单晶体时,其原子排列就由杂乱无章的状态变成非常整齐的状态。每个原子最外层的 4 个价电子,不仅受自身原子核的束缚,而且还

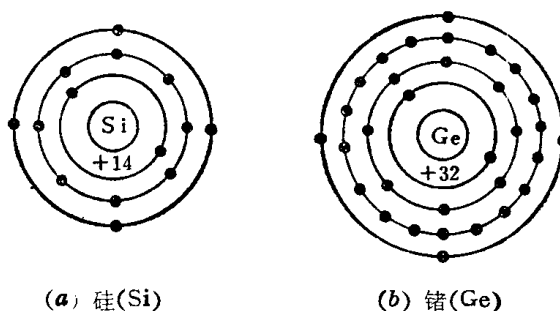


图 1-1 硅和锗原子结构平面示意图

与周围相邻的 4 个原子发生联系。这些价电子,一方面围绕自身的原子核运动,另一方面也时常出现在相邻原子所属的轨道上。这样相邻的原子就被共有的价电子联系在一起,原子的这种组合就叫做共价键结构。如图 1-2 所示。

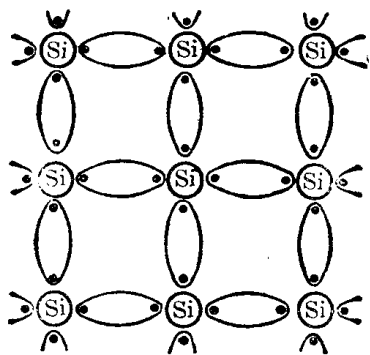


图 1-2 硅单晶体的共价键结构

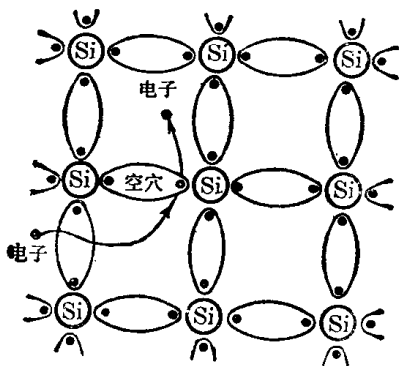


图 1-3 单晶体中热运动产生电子与空穴

由原子理论可知,当每个原子的最外层电子数有八个时属于比较稳定的状态。但是硅、锗的共价键结构的特点是它们的外层共有电子所受到的束缚力,并不象在绝缘体里那样紧,在一定的温度下,由于热运动,其中少数电子还是可能挣脱束缚而成为自由电子,形成电子载流子。当共有电子在挣脱束缚成为自由电子后,同时在原来共价键的位置上就留下了一个空位叫“空穴”(见图 1-3)。有了这样一个空穴,附近的电子就很容易来进行填补,从而形成共有电子的运动。这种运动无论是从效果上还是从现象上说,都好像一个带有和束缚电子电量相等而符号相反的正电荷粒子,沿着束缚电子相反方向的运动。为了区别于自由电子的运动,就把这种运动叫做“空穴”运动。从本质上来说,空穴运动就是束缚电子由一种束缚状态转到另一种束缚状态的运动。打个通俗的比喻,好比大家坐在剧场里看节目,如果前面走了一个人,就出现一个空位子,坐在后面的观众喜欢向前坐,这样,就出现了人们依次填补空位而向前坐的情况,看起来就好象空位子向后运动。显然,这种空位的移动同没有坐位的人到处走动不一样,后者好比自由电子的运动,而前者则好比空穴的运动。

由此可见,空穴也是一种载流子。当半导体在外加电场作用下,通过它的电流可以看作是由两部分组成:一部分是自由电子定向运动所形成的电子电流,另一部分是空穴运动所形成的空穴电流。在半导体中,不仅有电子载流子,还有空穴载流子,这是半导体导电的一个重要特征。

上面的分析都是对于纯净单晶体来讲的。这种纯净单晶体就是不含其它杂质的半导体,所以叫做本征半导体。尽管其中存在着电子、空穴等载流子,但数目很少,因此导电性能很差。如果在纯净的半导体中掺入有用的杂质,就可以大大地改善半导体的导电性能。

二、P 型半导体和 N 型半导体

利用掺入杂质的办法,制作的 P 型和 N 型半导体,都叫掺杂半导体,下面分别加以说明。

1. P 型半导体

如果在硅(Si)单晶体中掺入微量的三价元素,例如硼(B),这样每个硼原子同相邻的四个

硅原子组成共价键时,其中的一个键上缺少一个电子,形成了一个空穴。如图 1-4(a)所示。因此,掺入硼杂质的硅晶体中具有大量的空穴。这种半导体主要靠空穴导电,所以叫空穴型半导体,简称P型半导体。同时由于热运动在半导体中还产生电子-空穴对。因此,在P型半导体中,不但有数量很多的空穴,也有少数的电子存在。显然,空穴是多数载流子,而电子是少数载流子。

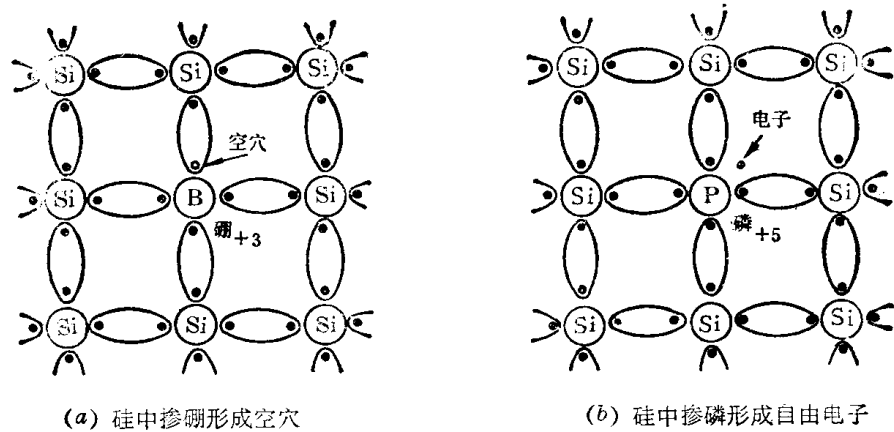


图 1-4 硅单晶中掺杂的示意图

2. N 型半导体

如果在硅单晶体中掺入微量的五价元素,例如磷(P)、砷(As)、锑(Sb)等,这样每个磷原子同相邻的四个硅原子结成共价键时,多出一个受原子核束缚很弱的电子成为自由电子,如图 1-4(b)所示。因此,掺入磷杂质的硅晶体中将有大量的自由电子。这种半导体主要靠电子导电,所以叫做电子型半导体,简称N型半导体。同时由于热运动在半导体中还产生了电子-空穴对。因此,在N型半导体中,不但有数量很多的自由电子,也有少量的空穴存在。显然,电子是多数载流子,而空穴是少数载流子。

实际上,在半导体掺杂时,经常是既有P型杂质,又有N型杂质,哪一种杂质的浓度大,就由哪种杂质决定其导电类型。例如,在硅单晶中先掺入五价元素锑,成为N型硅,然后再掺入三价元素硼,当硼的浓度大大超过锑的浓度时,N型硅就转化成P型硅。使原来的自由电子绝大部分都与空穴复合,剩下的自由电子数目就变得很少了,成为少数载流子,而空穴则成为多数载流子。

综上所述,在纯净半导体中,掺入适量的有用杂质以后,可以使半导体的导电性能大大增强,由此获得所需要的P型半导体或N型半导体,作为各种半导体器件的组成部分。

三、PN 结和它的单向导电性

如果采取某种方法将一块P型半导体和一块N型半导体结合在一起,那么,在两者的交界处就会形成一种特殊的薄层,这种薄层就叫做PN结。如果我们在电源和灯泡所组成的电路中,接入这样一个PN结,如图 1-5 所示,改变电源的极性,观察灯泡亮度的变化,可以发现,当电源的正极与P型半导体连接(即为正向连接)时,灯泡就亮,说明电流较大;当电源的负极与P型半导体连接(即为反向连接)时,则灯泡不亮,说明流过灯泡的电流非常小。由此可见,

PN 结具有单向导电的特性。PN 结之所以具有这种特性,是由于它的内部矛盾所决定的。

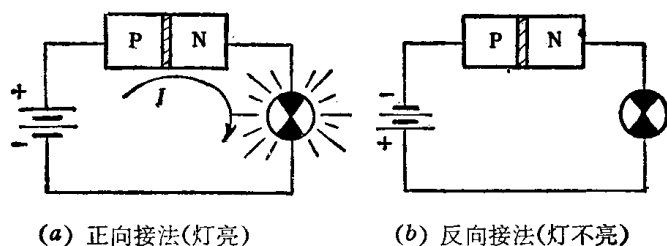


图 1-5 PN 结单向导电性的实验

## 1. PN 结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体相接触时,如图 1-6 (a)所示,由于 P 型半导体中有大量的空穴和少量的电子, N 型半导体中有大量的电子和少量的空穴,浓度相差很大。因此,将产生载流子的扩散运动。所谓扩散就是物质从浓度大的地方向浓度小的地方运动。例如:在一杯清水中滴入一滴蓝墨水,蓝颜色水分子,就会在清水中逐渐扩散开来,最后把一杯清水染蓝,这个运动就叫做扩散。

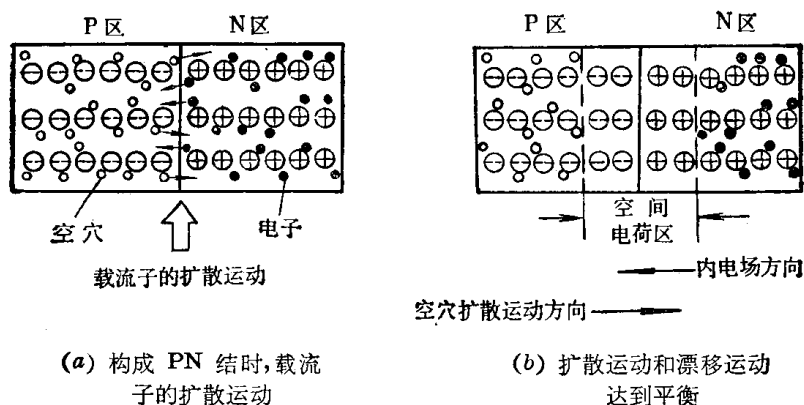


图 1-6 PN 结的形成过程

在 PN 结中的扩散运动也是如此。由于 P 区有大量空穴, N 区有大量电子,因此空穴就要由 P 区向 N 区扩散,使 P 区中空穴减小,结果在 P 区中靠近交界面的一边出现一层负电荷;同样,电子就由 N 区向 P 区扩散,使 N 区中电子减小,结果在 N 区中靠近交界面的一边出现一层正电荷。于是在交界面附近便形成一个空间电荷区,它的左边带负电,右边带正电,由此产生一个内电场,其方向与空穴扩散运动的方向相反,将对扩散运动起阻碍作用,所以空间电荷区又叫阻挡层\*,如图 1-6(b)所示。

实际上,内电场所产生的阻力是要使载流子向相反方向运动,我们把载流子在电场作用下的运动称为漂移运动,于是,由空间电荷产生的电场所作用下的漂移运动和由于载流子浓度差所产生的扩散运动形成了一对矛盾,这对矛盾决定了 PN 结的本质。在扩散开始时,扩散运动占优势,随着扩散的不断进行,PN 结电荷区不断加宽,电场所引起的漂移运动也不断加强,最后漂移运动与扩散运动达到动态平衡。这是在没有外加电场作用时的情况。

\* 阻挡层又称耗尽区(即载流子数目很少的区域)。

## 2. PN 结的单向导电性

由于 PN 结内部的特殊矛盾决定了它具有单向导电的特性。

给 PN 结加上正向电压(外电源正极接 P 区、负极接 N 区),如图 1-7 (a)所示。这时,外加电场与内电场方向相反,因而削弱了内电场,使空间电荷区变窄。这样一来,大大有利于扩散运动,于是多数载流子在外加电场作用下将顺利通过 PN 结(这表明电阻是很小的),形成较大的电流。外加电压愈大,扩散电流也愈大,所以正向电流就愈大。

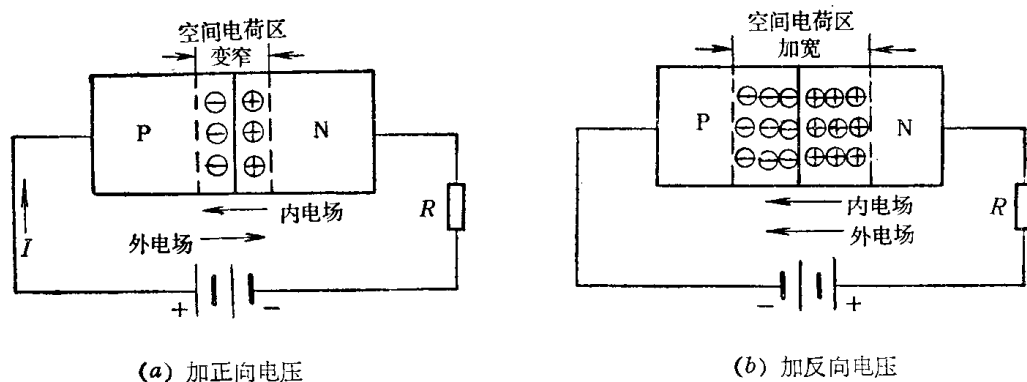


图 1-7 PN 结的单向导电性

若 PN 结加一个反向电压(外电源正极接 N 区、负极接 P 区),如图 1-7 (b)所示。这时,外电场与内电场的方向一致,因而加强了内电场,使空间电荷区加宽。当电场作用下的漂移运动超过扩散运动时,扩散运动被削弱得几乎无法进行下去,于是少数载流子将在外加电场作用下通过 PN 结,电路中即出现微小的反向电流。必须指出:由于反向电流是由少数载流子形成的,而 P 区中极少量的自由电子和 N 区中极少量的空穴都是由热运动产生的,所以 PN 结的反向电流将随温度的变化而变化。因此,在使用半导体器件时,必须考虑到环境温度的影响。

PN 结的单向导电性是 PN 结最主要的特性,半导体二极管的整流作用就是建立在这个基础上的。此外,PN 结也是构成晶体管、可控硅和固体组件等多种半导体器件的基础。

## 第二节 半导体二极管

### 一、半导体二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结加上相应的引出线和管壳做成的。常见二极管的外形如图 1-8 所示。

图 1-9 中画出了点接触型、面结型和平面型三种二极管结构的示意图。它们都有二个电极:一个正极(即 P 型半导体),一个负极(即 N 型半导体)。

点接触型二极管的 PN 结是用电形成法的工艺制成的。其管心是用一根金属触丝压在 P 型晶片上,在金属触丝与晶片之间通以瞬时的大电流,以致在接触处产

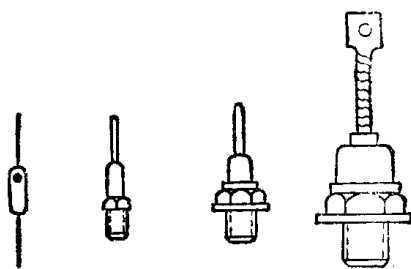


图 1-8 常见几种二极管的外形图

生大量的热量,使得金属丝上的一部分金属原子扩散到P型晶片中去,从而形成一种导电类型与原来晶片相反的薄层。这就构成了PN结。点接触型二极管由于结面积小,因而结电容小,可以在很高频率下工作,适用于检波、调制及各种开关电路,但不能通过大电流。

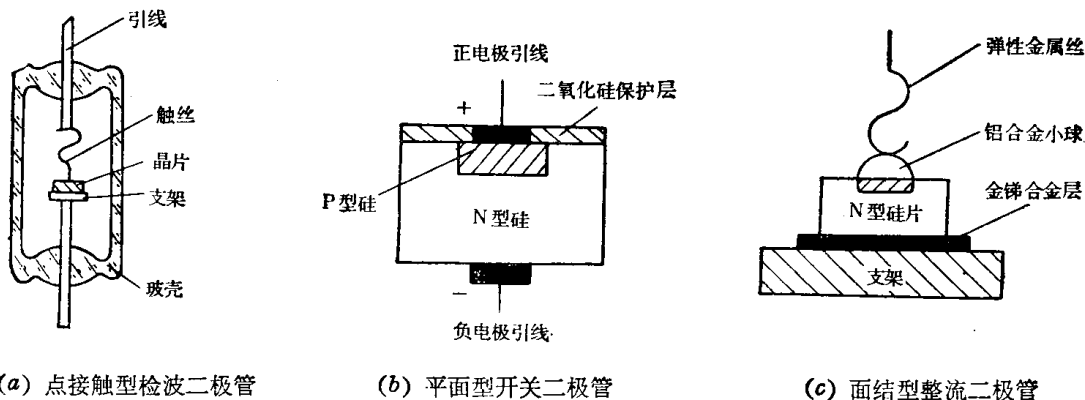


图 1-9 二极管的几种主要结构类型

面结型二极管的PN结是用合金烧结法或用扩散法的工艺制成的。这种二极管的结面积大,能通过较大的正向电流。但因为结电容大,所以面结型二极管主要用于一般的交流电整流,不宜在高频下运用。

平面型二极管的制造工艺大致是:先在N型硅片的氧化膜上,用光刻\*的方法刻出一个窗口,然后进行高浓度的硼扩散,获得P型硅。这样在N型硅和P型硅之间就形成了PN结。最后再做出电极引线,并加以密封而成。

通常,二极管用符号  $\rightarrow|$  来表示,箭头表示正向电流的方向。

## 二、半导体二极管的特性

半导体二极管根据半导体材料的不同,可分为硅二极管和锗二极管,它们最主要的特性就是单向导电性,这可以通过研究二极管的电压与电流的关系来得到进一步的认识。二极管的

电压与电流关系曲线,叫做二极管的伏安特性曲线,如图 1-10 所示。

### 1. 正向特性

当二极管的两端加以正向电压,就产生正向电流。但是,正向电压比较小的时候,由于外部电场还不足以克服内部电场对载流子扩散运动所造成的阻力,所以这时的正向电流很小,二极管呈现的电阻较大。当二极管两端的正向电压超过一定数值以后(这个数值称为死区电压,锗管约为 0.2 伏左右,硅管约为 0.5 伏左右,随管子材料和温度不同而改变),内部电场被大大

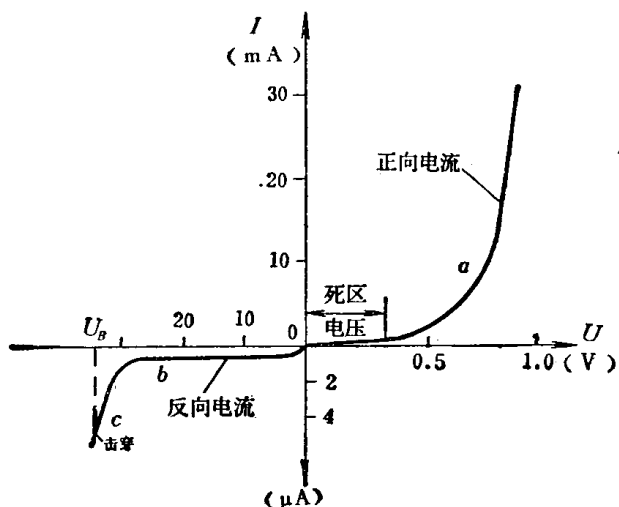


图 1-10 二极管的伏安特性

\* 光刻就是利用照相、制版、腐蚀等技术来刻出所需要的部分。

削弱,二极管的电阻变得很小,于是正向电流随着电压的增长很快上升(如图中的  $a$  点)。锗管电流上升曲线比较斜、硅管电流上升曲线比较陡。

## 2. 反向特性

当二极管两端加反向电压时,由于P型半导体和N型半导体中存在着少数载流子,在反向电压的作用下通过PN结,因此形成了很小的反向电流。反向电流具有二个特点:第一,它随着温度的上升而急剧增长;第二,只要外加的反向电压在一定的范围之内,反向电流基本上不随反向电压的变化而变化,如图1-10中的  $b$  点附近。这是因为少数载流子数量很少,在一定温度下,每个单位时间里只能提供一定数量的载流子,只要外加电压所产生的电场,足够把它们都吸引过来形成电流之后,则电压即使再高也不能使少数载流子数目增加。所以反向电流常被称为反向饱和电流。因为反向饱和电流由少数载流子所形成,所以它会随着环境温度的升高而增大。

反向电流大,表明管子的反向特性差。一般,硅管的反向电流约在1微安以下到几十微安,锗管则可达几百微安。大功率管将更大些。

## 3. 反向击穿现象

当反向电压继续增大到一定数值以后,反向电流突然增大,这种现象称为反向击穿,如图1-10中的  $c$  点。出现反向击穿的原因,是外加电场足够强,以致把原子的外层电子强行拉出,因而使载流子数目急剧增加。发生击穿时的电压称为反向击穿电压。各类二极管的反向击穿电压大小不同,通常为几十到几百伏。最大的可达1,000伏以上。

## 三、半导体二极管的主要参数

整流二极管的主要参数有:

### 1. 最大整流电流。

最大整流电流是指在一定温度下,允许长期通过二极管的平均电流的最大值。硅整流二极管的最大整流电流与环境温度有关,例如2CP21管,当环境温度从25℃增加到100℃时,最大整流电流从100%减小到50%。

最大整流电流是二极管的一个重要参数,使用时应注意通过二极管的电流不能大于这个数值,否则将导致二极管损坏。

### 2. 最高反向工作电压。

最高反向工作电压是指允许加在整流二极管上的反向电压最大值,它反映了二极管反向工作的耐压程度。一般手册上给出的最高反向工作电压,通常是击穿电压的一半,就是为了防止二极管因反向击穿而损坏,选用时必须加以注意。

半导体二极管的寿命很长,但是,如果我们使用不当,就可能使它损坏。所以在使用时,必须根据二极管的主要参数进行选择。

## 四、二极管性能的简易测试法

使用二极管时,首先要判定管脚的正负极性,否则电路非但不能正常工作,甚至可能烧毁管子和其它元件。目前国产二极管,有些已在管壳外面标有正负极记号,有些可根据型号和结构形式来辨别。但是也会遇到有的二极管没有任何标志,或身边没有手册可查,这时我们可以