

619740

501  
33471;2  
T.2

高等学校试用教材

# 电 工 学

中 册

浙江大学电工学教研室编



成都科学技术大学图书馆

基本馆藏

人民教育出版社

高等学校试用教材

# 电 工 学

中 册

浙江大学电工学教研室编

人 民 教 育 出 版 社

高等学校试用教材  
**电 工 学**  
中 册

浙江大学电工学教研室编

\*

人民教育出版社出版  
新华书店北京发行所发行  
湖南省新华印刷二厂印刷

\*

开本 $787 \times 1092$  1/32 印张14.75 字数366,000

1979年8月第1版 1981年3月第2次印刷

印数 43,501—64,500

书号 15012·0189 定价 1.20 元

## 本篇文字符号说明

本篇尽量采用四机部标准化所编制的半导体器件电参数符号和国际通用符号。

表示电压、电流、功率等的电量符号，随时间变化的瞬时值采用相应的小写字母表示： $v$ 、 $i$ 、 $p$  等。直流值、平均值、有效值和最大值(峰值)的电压、电流、功率等用相应的大写字母表示： $V$ 、 $I$ 、 $P$  等。

为了表明电量符号在电路或器件中的意义，使用相应的下标。下标使用的原则是：

(1) 下标符号常用下标英文词的第一(或前 2~3)个字母，放在基本符号的右下角，例如基极电流为  $I_B$ ，关断时间为  $t_{off}$ 。

(2) 下标符号大写、小写的选择：直流值、总的最大值(峰值)，总的平均值、总的瞬时值使用大写下标；变化的分量值[有效值、平均值、最大值(峰值)、瞬时值]使用小写字母下标。

若以基极电流  $I_B$  为例，下标大、小写这样使用：

大写下标用来表示

- |              |             |
|--------------|-------------|
| a. 无信号时的直流值  | $I_B$       |
| b. 总的最大值(峰值) | $I_{BM}$    |
| c. 总的平均值     | $I_{B(AV)}$ |
| d. 总的瞬时值     | $i_B$       |

小写下标用来表示变化的分量，即

- |            |             |
|------------|-------------|
| a. 有效值     | $I_b$       |
| b. 平均值     | $I_{bav}$   |
| c. 最大值(峰值) | $I_{b\max}$ |
| d. 瞬时值     | $i_b$       |

如要表示出电流通过的电极,则用电流的第一个下标来表示,例如通过基极的电流表示为  $I_B$ 、 $I_b$ 、 $i_B$ 、 $i_b$ 。

如要表示出所测电压的两端,则用电压的开头两个下标来表示,第一个下标表示电路(或器件)的一个端点(或电极),第二个下标表示另一个电路端点(或电极),例如三极管的基极-发射极电压表示为  $V_{BE}$ 、 $V_{be}$ 、 $v_{BE}$ 、 $v_{be}$ 。

电源电压用重复相应电极下标表示,例如  $V_{CC}$ 、 $V_{BB}$ 、 $V_{EE}$ 。

多字母下标在可能发生混淆的地方,加上括弧,例如  $V_{ce(sat)}$ 、 $V_{GS(off)}$ 。

# 目 录

## 第二篇 工业电子技术

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 本篇文字符号说明 .....            | 9  |
| 第五章 半导体二极管和三极管 .....      | 1  |
| 5-1 PN 结及其单向导电性 .....     | 1  |
| 5-2 半导体二极管 .....          | 4  |
| 一、半导体二极管的结构 .....         | 4  |
| 二、半导体二极管的伏安特性 .....       | 5  |
| 三、半导体二极管的主要参数 .....       | 7  |
| 5-3 稳压二极管 .....           | 7  |
| 5-4 半导体三极管 .....          | 11 |
| 一、半导体三极管的结构 .....         | 11 |
| 二、半导体三极管的电流放大作用 .....     | 11 |
| 三、半导体三极管的特性曲线 .....       | 15 |
| 四、半导体三极管的主要参数 .....       | 19 |
| 五、温度对三极管特性和参数的影响 .....    | 23 |
| 习 题 .....                 | 25 |
| 第六章 交流放大器 .....           | 29 |
| 6-1 交流放大器的基本原理 .....      | 30 |
| 一、简单的单管交流放大电路 .....       | 30 |
| 二、交流放大电路的工作情况 .....       | 31 |
| 三、放大器增益的概念 .....          | 35 |
| 6-2 放大电路的图解分析法 .....      | 38 |
| 一、放大器静态工作情况图解分析法 .....    | 38 |
| 二、放大器动态工作情况图解分析法 .....    | 40 |
| 三、静态工作点的选择 .....          | 44 |
| *6-3 放大电路的微变等效电路分析法 ..... | 47 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 一、三极管的 $h$ 参数微变等效电路 .....     | 47  |
| 二、简化 $h$ 参数微变等效电路 .....       | 51  |
| 三、单管交流放大器的微变等效电路和电压放大倍数 ..... | 53  |
| 6-4 静态工作点的稳定 .....            | 56  |
| 一、具有电压负反馈的稳定电路 .....          | 58  |
| 二、具有电流负反馈的稳定电路 .....          | 59  |
| *三、具有电流负反馈的双管直接耦合放大电路 .....   | 63  |
| 6-5 阻容耦合多级放大器 .....           | 64  |
| 一、放大器的输入阻抗和输出阻抗 .....         | 65  |
| 二、多级放大器的电压放大倍数 .....          | 68  |
| *三、阻容耦合放大器的频率特性 .....         | 70  |
| 6-6 反馈放大器 .....               | 75  |
| 一、负反馈对放大器性能的影响 .....          | 75  |
| 二、负反馈放大器的基本电路 .....           | 81  |
| 6-7 功率放大器 .....               | 92  |
| 一、单管功率放大器 .....               | 93  |
| 二、推挽功率放大器 .....               | 103 |
| 三、无变压器功率放大器 .....             | 110 |
| 习 题 .....                     | 117 |

## 第七章 场效应管放大器 .....

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7-1 结型场效应管 .....             | 123 |
| 一、结型场效应管的结构和工作原理 .....       | 123 |
| 二、结型场效应管的特性曲线 .....          | 127 |
| 7-2 绝缘栅场效应管 .....            | 129 |
| 一、绝缘栅场效应管的结构 .....           | 129 |
| 二、耗尽型绝缘栅场效应管的工作原理和特性曲线 ..... | 130 |
| 三、增强型绝缘栅场效应管的工作原理和特性曲线 ..... | 131 |
| 7-3 场效应管的主要参数和使用注意事项 .....   | 133 |
| 一、场效应管的主要参数 .....            | 133 |
| 二、场效应管使用注意事项 .....           | 134 |
| 7-4 场效应管放大器的偏置电路 .....       | 135 |
| 一、分压式偏置电路 .....              | 136 |

|                                                |     |
|------------------------------------------------|-----|
| 二、自给式偏置电路 .....                                | 137 |
| *7-5 源极输出器 .....                               | 138 |
| 习 题 .....                                      | 141 |
| <b>第八章 正弦波振荡器</b> .....                        | 142 |
| 8-1 振荡器的自激条件 .....                             | 142 |
| 8-2 $LC$ 正弦波振荡器 .....                          | 144 |
| 一、从谐振放大器到 $LC$ 振荡器 .....                       | 144 |
| 二、振荡的建立与稳定 .....                               | 146 |
| 三、 $LC$ 正弦波振荡器的基本电路 .....                      | 147 |
| 四、 $LC$ 振荡器应用举例——XCT 型温度指示调节仪中的 $LC$ 振荡器 ..... | 152 |
| 8-3 $RC$ 正弦波振荡器 .....                          | 154 |
| *8-4 石英晶体振荡器 .....                             | 157 |
| 一、石英晶体谐振器的结构 .....                             | 157 |
| 二、石英晶体谐振器的电特性 .....                            | 158 |
| 三、石英晶体振荡器的基本电路 .....                           | 160 |
| 四、石英晶体谐振器的使用注意事项 .....                         | 162 |
| 习 题 .....                                      | 163 |
| <b>第九章 直流放大器</b> .....                         | 166 |
| 9-1 直流放大器的级间耦合和零点漂移 .....                      | 166 |
| 9-2 单端式直流放大电路 .....                            | 168 |
| 一、直接耦合电路 .....                                 | 168 |
| 二、具有发射极电阻的直接耦合电路 .....                         | 169 |
| 三、发射极接有稳压二极管或二极管的直接耦合电路 .....                  | 169 |
| 四、NPN 和 PNP 管的直接耦合电路 .....                     | 170 |
| 9-3 差动式直流放大电路 .....                            | 171 |
| 一、差动式放大电路的工作原理 .....                           | 171 |
| 二、典型的差动式放大电路 .....                             | 175 |
| 三、差动式放大电路的共模输入 .....                           | 178 |
| 四、差动式放大电路的改进 .....                             | 180 |
| 五、其它几种差动式放大电路 .....                            | 183 |
| *9-4 调制型直流放大器 .....                            | 186 |
| 一、调制器 .....                                    | 186 |



|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 二、解调器 .....                  | 191        |
| 9-5 运算放大器 .....              | 193        |
| 一、比例运算和变号运算 .....            | 193        |
| 二、加(减)法运算 .....              | 199        |
| 三、积分运算 .....                 | 201        |
| *四、比例-积分运算 .....             | 203        |
| *五、比例-微分运算 .....             | 204        |
| *六、比例-积分-微分运算 .....          | 205        |
| 9-6 线性集成电路 .....             | 206        |
| 习 题 .....                    | 214        |
| <b>第十章 脉冲和数字电路 .....</b>     | <b>219</b> |
| 10-1 晶体管三种工作状态的转换 .....      | 222        |
| 10-2 限幅器和钳位电路 .....          | 225        |
| 一、限幅器(削波电路) .....            | 226        |
| 二、钳位电路 .....                 | 229        |
| 10-3 逻辑(门)电路 .....           | 232        |
| 一、“与”门电路 .....               | 232        |
| 二、“或”门电路 .....               | 235        |
| 三、“非”门电路 .....               | 238        |
| 10-4 集基耦合双稳态触发器 .....        | 240        |
| 一、双稳态触发器的稳定状态 .....          | 241        |
| 二、双稳态触发器的触发方式 .....          | 242        |
| 10-5 射极耦合双稳态触发器(施密特电路) ..... | 247        |
| 一、工作原理 .....                 | 247        |
| 二、应用举例 .....                 | 251        |
| 10-6 集基耦合单稳态触发器 .....        | 254        |
| 一、工作原理 .....                 | 255        |
| 二、电路主要技术指标 .....             | 259        |
| 三、应用举例 .....                 | 261        |
| 10-7 射极耦合单稳态触发器 .....        | 262        |
| 一、无外加触发脉冲时电路的初始稳定状态 .....    | 262        |
| 二、在触发脉冲作用时的暂稳态过程 .....       | 263        |

|                                   |            |
|-----------------------------------|------------|
| 10-8 自激多谐振荡器 .....                | 265        |
| 一、工作原理 .....                      | 266        |
| 二、电路输出波形的主要参数 .....               | 269        |
| 10-9 双极型数字集成电路 .....              | 269        |
| 一、HTL“与非”门电路 .....                | 270        |
| 二、TTL“与非”门电路 .....                | 276        |
| 10-10 金属-氧化物-半导体(MOS)数字集成电路 ..... | 279        |
| 一、PMOS 集成电路 .....                 | 280        |
| 二、CMOS 集成电路 .....                 | 283        |
| 10-11 集成电路触发器 .....               | 286        |
| 一、基本 RS 触发器 .....                 | 286        |
| 二、同步式(钟控)RS 触发器 .....             | 288        |
| 三、主从型 J-K 触发器 .....               | 290        |
| 10-12 数字集成电路应用举例——计数器 .....       | 295        |
| 一、二进制计数器 .....                    | 295        |
| 二、二——十进制计数器 .....                 | 298        |
| 10-13 译码器 .....                   | 301        |
| 一、二进制译码器 .....                    | 302        |
| 二、二——十进制译码器 .....                 | 304        |
| 10-14 数字显示 .....                  | 308        |
| 一、辉光数字管显示 .....                   | 308        |
| 二、荧光数码管显示 .....                   | 310        |
| 10-15 数字-模拟(D/A)转换器 .....         | 315        |
| 一、权电阻解码网络 .....                   | 317        |
| 二、T型电阻解码网络 .....                  | 320        |
| 三、二——十进制 T 型解码网络 .....            | 322        |
| 10-16 模拟-数字(A/D)转换器 .....         | 325        |
| 一、扫描定时法 .....                     | 325        |
| 二、逐步逼近法 .....                     | 327        |
| 习 题 .....                         | 331        |
| <b>第十一章 半导体直流电源 .....</b>         | <b>335</b> |
| 11-1 单相整流电路 .....                 | 335        |

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 一、单相半波整流电路 .....        | 336 |
| 二、单相桥式整流电路 .....        | 339 |
| 三、单相全波整流电路 .....        | 342 |
| *四、倍压整流电路 .....         | 344 |
| 11-2 三相桥式整流电路 .....     | 345 |
| 11-3 滤波电路 .....         | 348 |
| 一、电容滤波电路 .....          | 349 |
| 二、电感滤波电路 .....          | 351 |
| 三、CRC 滤波电路 .....        | 353 |
| *四、有源滤波电路 .....         | 354 |
| 五、整流滤波电路元件的选择 .....     | 357 |
| 11-4 硅稳压二极管稳压电路 .....   | 360 |
| 一、硅稳压二极管稳压电路的工作原理 ..... | 360 |
| 二、硅稳压二极管稳压电路元件的选择 ..... | 361 |
| 11-5 串联型晶体管稳压电路 .....   | 364 |
| 一、基本电路 .....            | 364 |
| *二、提高稳定度的电路 .....       | 371 |
| 11-6 集成稳压电路 .....       | 375 |
| *11-7 开关型稳压电路 .....     | 378 |
| 习 题 .....               | 381 |

## 第十二章 可控硅技术 .....

|                     |     |
|---------------------|-----|
| 12-1 可控硅元件 .....    | 384 |
| 一、可控硅的结构 .....      | 384 |
| 二、可控硅的工作原理 .....    | 386 |
| 三、可控硅的伏安特性 .....    | 387 |
| 四、可控硅的主要参数 .....    | 389 |
| 12-2 可控整流电路 .....   | 391 |
| 一、单相半波可控整流电路 .....  | 391 |
| 二、单相桥式可控整流电路 .....  | 398 |
| 三、单相全波可控整流电路 .....  | 401 |
| *四、三相半控桥式整流电路 ..... | 403 |
| 12-3 可控硅的触发电路 ..... | 405 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 一、单结晶体管触发电路 .....               | 406        |
| *二、晶体管触发电路 .....                | 414        |
| 12-4 可控硅的保护和串并联应用 .....         | 416        |
| 一、可控硅的过流保护 .....                | 417        |
| 二、可控硅的过压保护 .....                | 420        |
| 三、可控硅的串并联应用 .....               | 423        |
| *12-5 可控硅无源逆变电路 .....           | 426        |
| 习 题 .....                       | 430        |
| <b>附录一 电阻器、电位器及电容器的类别 .....</b> | <b>432</b> |
| <b>附录二 国产半导体器件型号命名法 .....</b>   | <b>436</b> |
| <b>附录三 常用半导体器件参数 .....</b>      | <b>437</b> |
| <b>附录四 本篇部分习题答案 .....</b>       | <b>456</b> |

## 第二篇 工业电子技术

### 第五章 半导体二极管和三极管

本世纪五十年代初出现了由半导体制成的晶体管这一新的电子器件,由于其体积小、重量轻、寿命长、工作可靠性高一系列优点,在电子技术中逐步取代了电子管器件,这是电子技术领域的一次飞跃。因此人们往往把电子管称为第一代电子器件,把晶体管称为第二代电子器件。到了六十年代,更小型化的集成电路的出现和大量生产,又从分立元件电路跨进到集成电路的阶段。因此集成电路通常被称为第三代电子器件。从电路的集成进一步发展到系统的集成,这就是大规模集成电路。这种大规模集成电路被称为第四代电子器件。目前正在进入第五代超大规模集成电路的发展时期。

本章主要介绍晶体管电路中最常用到的几种半导体器件——半导体二极管、稳压二极管和三极管的基本结构及其特性和参数。关于集成电路将在以后的章节中再介绍。

#### 5-1 PN 结及其单向导电性

在物理学中我们已经知道,如果半导体内空穴的数目比自由电子的数目多得多,主要是靠空穴导电的,称为空穴型半导体,简称P型半导体。对于P型半导体中的空穴称为多数载流子,而把电子称为少数载流子。

如果半导体内自由电子的数目比空穴的数目多得多,主要是靠电子导电的,称为电子型半导体,简称N型半导体。对于N型半

导体中的电子是多数载流子，而空穴则是少数载流子。

单是一块P型或N型半导体，在电路中只能作为电阻用。但是，如果将P型和N型半导体用不同的方式加以组合，就能够构成各种不同特性的半导体器件。尽管目前半导体器件的种类很多，但它们都是由最基本的结构，即P型半导体和N型半导体相“结合”而形成的PN结所组成。所谓PN结不是机械的结合，而是将一块P型或N型半导体，用扩散、烧结或外延等半导体工艺掺杂，使其一部分形成另一种导电类型的半导体。这样，在一块半导体内将具有两种不同导电类型的P型和N型两部分。

当P型半导体和N型半导体结合在一起时，如图5-1所示。由于P型半导体中的空穴浓度远大于N型半导体中的空穴浓度，因此空穴将向N型半导体扩散。同理，N型半导体中的电子将向P型半导体扩散。于是，在P型和N型半导体交界面附近形成了电子和空穴的扩散运动。N型区的电子扩散到P型区以后，在N型区留下了带正电的离子(图中用 $\oplus$ 表示)；P型区中的空穴扩散到N型区以后，在P型区留下了带负电的离子(图中用 $\ominus$ 表示)。这样，由于扩散运动的结果，在P型和N型半导体交界面附近形成了一层很薄的“空间电荷区”(也称为耗尽区或阻挡层)，如图5-2所示。上述PN结就是指的这个区域。

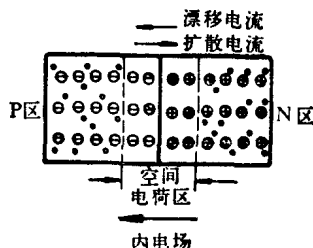
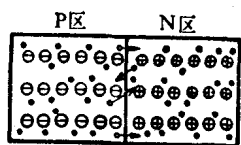


图 5-1 PN 结中载流子的扩散运动

图 5-2 PN 结中的扩散与漂移运动

我们知道，这层空间电荷区将产生一个电场，称为内电场。它的方向从正电荷到负电荷，即由N型区指向P型区。显然，这个

电场产生的电场力将阻止P型区多数载流子——空穴向N型区扩散,并阻止N型区多数载流子——电子向P型区扩散。同时,这个电场会使P型区少数载流子——电子向N型区漂移,N型区少数载流子——空穴向P型区漂移。我们把载流子在电场力作用下的运动称为漂移运动,以区别于因浓度差而形成的扩散运动。在开始的时候,扩散运动占优势,随着扩散的进行,PN结(空间电荷区)逐渐加宽,内电场力愈来愈强,扩散运动急剧减弱,而漂移运动却愈来愈强。当扩散运动与漂移运动两种作用相等时,PN结不再加宽,达到了暂时的平衡。由此可见,PN结是扩散运动与漂移运动平衡的结果。

但是,如果在PN结两端加上不同的外部电压,就可以打破原来的平衡,而呈现单向导电的性能。

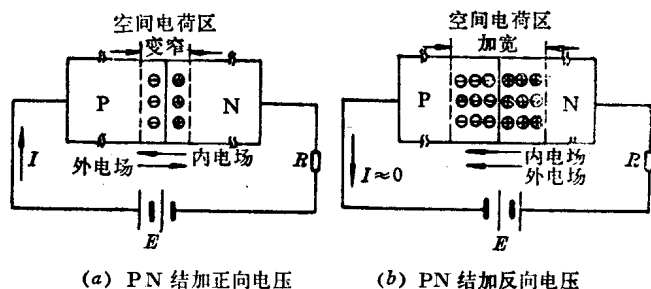


图 5-3 PN 结的单向导电性

当在PN结两端加上正向电压(又称为正向偏置)时,即在图5-3(a)中电源E的正极接P侧,负极接N侧。此时电源E在PN结中产生的外电场与其内电场的方向相反,使空间电荷区变窄<sup>⊖</sup>,

⊖ 当PN结加上正向电压时,外加电压驱使P区空穴向右运动,N区电子向左运动。P区中的空穴向右运动进入空间电荷区后,就与原来的负离子复合,而使空间电荷量减少;同样,N区中的电子向左运动进入空间电荷区,与原来的正离子复合,也是使空间电荷量减少。空间电荷量的减少,使得空间电荷区变窄。

从而削弱了内电场。于是扩散运动超过漂移运动，有利于扩散运动持续不断地进行。这样，PN 结两侧的多数载流子就能越过 PN 结而形成电流。这个电流从电源  $E$  的正极流出，经过 PN 结返回负极，称为正向电流。PN 结在正向偏置时，载流子能通畅地越过 PN 结，形成较大的电流，也即 PN 结处于导电状态。此时的电阻称为正向电阻，它的数值是很小的。

当在 PN 结两端加上反向电压（又称为反向偏置）时，即在图 5-3(b) 中电源  $E$  的正极接 N 侧，负极接 P 侧。此时外电场与内电场的方向相同，使空间电荷区加宽，从而加强了内电场。这样，载流子的扩散运动就很难进行，因此，由于电子的热运动而在 N 型区中产生的空穴，以及在 P 型区中产生的电子（称为热激发），就会在内电场的作用下产生漂移运动而形成漂移电流。然而，这部分载流子是少数载流子，它们的数量通常是很少的，所以在反向电压作用下形成的漂移电流，称为反向电流，也是很小的，通常在微安的数量级。这样，PN 结在反向偏置时，可以认为基本上不导电，此时的电阻称为反向电阻，它的数值是很大的。

综上所述可见：PN 结在加正向偏置时导电，加反向偏置时不导电，即 PN 结具有“单向导电性”，这是它的一个重要特性。PN 结的导电方向是从 P 到 N。

## 5-2 半导体二极管

### 一、半导体二极管的结构

半导体二极管实际上就是由一个 PN 结，加上电极引线和管壳而构成。按内部结构的不同，有“点接触型”和“面接触型”两类，分别如图 5-4(a) 和 (b) 所示。半导体二极管的图形符号如图 5-4(c) 所示，三角箭头的方向表示其导电方向。通常把由 P 区引出的



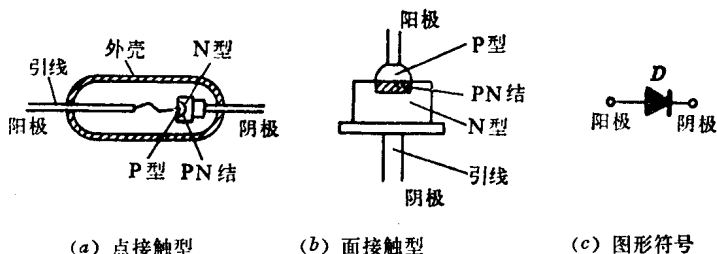


图 5-4 半导体二极管的结构示意图和图形符号

电极称为阳极，N区引出的电极称为阴极。点接触型二极管由于其PN结的面积小，不能通过大的电流（在几十毫安以下），但其PN结的结电容小，因此可用于高频信号的检波、脉冲电路及微小电流的整流电路。面接触型二极管，由于其PN结的面积大，可以通过较大的电流（几百毫安至几百安），但其结电容大，不能用于高频电路中，主要用于低频电路和整流电路。

常用的半导体二极管按所用半导体材料的不同，有硅二极管和锗二极管两种。例如2CP型为硅二极管，2AP型为锗二极管。

## 二、半导体二极管的伏安特性

半导体二极管的单向导电性，可以用它的伏安特性来描述。所谓二极管的伏安特性就是加到二极管两端的电压和通过二极管电流的关系曲线。

图 5-5 所示为二极管的伏安特性曲线。由特性曲线可以看出，当二极管加以正向电压时，就产生正向电流。但是，当正向电压较小时，由于外电场还不足以克服内电场对多数载流子扩散运动所造成的阻力，因此，这时的正向电流仍然很小，二极管呈现的电阻较大。这一段称为死区。硅管的死区电压约为  $0 \sim 0.5$  伏（图中  $OA$ ）之间，锗管约为  $0 \sim 0.2$  伏（图中  $OB$ ）之间。当二极管两端的