

函授大学教材



# 模拟电子技术

武汉水利电力学院 刘正清 杨国涛 合编



# 前 言

1984年我们教研室根据电力类函授教学大纲的要求,编写了《模拟电路》函授教材。经过教研室多年函授教学实践,在总结经验的基础上,根据函授教学的特点,同时参考全国工科院校的《电子技术基础课的教学基本要求》(1985年草案修改稿第三稿),于1987年重新编写了《模拟电子技术》函授试用教材。本书是在该试用教材的基础上又经过两年的实践修改而成,其深度和广度与全日制高等院校的教材相当。

为了适应电子技术迅速发展的需要,教材的内容体现了“集成电路”为主的思想。书的前四章为基础部分,后五章重点是对应用电路进行分析。本书可与函授教材《数字电子技术》(武汉水利电力学院陈一尧编)配套使用。

为了便于自学,每章之后编有小结和习题,习题的部分参考答案汇总列于书后。习题中最后几题没有答案,这些题是作为读者自我检查掌握所学内容用的。

本书的第一、三、四、七、八章由杨国涛编写,第二、五、六、九章由刘正清编写,全书由杨国涛统稿。在编写本书的初期,张德静、回荣德及其他同志提出过许多宝贵意见,在此表示感谢。

初稿完成之后,由唐懋官教授主审,在此,对唐教授的精心审查和耐心指正表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中难免有疏漏和不妥,欢迎读者批评指正。

编 者

1989年10月

# 文 字 符 号 表

|                              |                                                  |
|------------------------------|--------------------------------------------------|
| $A$ 放大倍数 (或称增益) <sup>①</sup> | $e$ 电子的电荷量或自然对数的底                                |
| $a$ 整流元件的阳极 (正极)             | $e$ 半导体三极管的发射极                                   |
| $A_F$ 反馈放大器的放大倍数 (或称增益)      | $F$ 反馈系数                                         |
| $A_G$ 互导增益                   | $f$ 频率                                           |
| $A_I$ 电流放大倍数 (或称电流增益)        | $f_{BW}$ 放大器的通频率                                 |
| $A_P$ 功率放大倍数 (或称功率增益)        | $f_L$ 放大器的下限频率                                   |
| $A_R$ 互阻增益                   | $f_H$ 放大器的上限频率                                   |
| $A_U$ 电压放大倍数 (或称电压增益)        | $f_o$ 振荡器的谐振频率                                   |
| $A_{UC}$ 共模电压放大倍数            | $f_T$ 特征频率                                       |
| $A_{UD}$ 差模电压放大倍数            | $f_{\alpha}$ 半导体三极管共基极截止频率                       |
| $A_{UF}$ 闭环电压放大倍数            | $G$ 电导                                           |
| $b$ 半导体三极管的基极                | $g$ 微变电导, 场效应管的栅极                                |
| $BW$ 频带宽度 (或称带宽)             | $g_m$ 双口有源器件的互导 (跨导)                             |
| $C$ 电容                       | $h_{ie}, h_{re}, h_{fe}, h_{oe}$ 三极管共射接法的 $h$ 参数 |
| $C_b$ 隔直电容 (耦合电容)            | $I, i$ 电流 <sup>②</sup>                           |
| $C_e$ 发射极旁路电容                | $I_s$ 信号源电流                                      |
| $C_B$ 势垒电容                   | $I_i$ 输入电流                                       |
| $C_{b'e}$ 基极—集电极电容           | $I_f$ 反馈电流                                       |
| $C_{b'e}$ 基极—发射极电容           | $I_o$ 输出电流                                       |
| $C_f$ 反馈电容                   | $I_L$ 负载电流                                       |
| $C_D$ 扩散电容                   | $I_B$ 偏置电流                                       |
| $C_j$ 结电容                    | $I_{os}$ 输入失调电流                                  |
| $C_i$ 输入电容                   | $I_n$ 噪声电流                                       |
| $C_o$ 输出电容                   | $I_R$ 基准电流 (参考电流)                                |
| $c$ 半导体三极管的集电极               | $I$ 光电池的短路电流百分值                                  |
| $C_S$ 引线及管壳等的寄生电容            | $J$ 电流密度                                         |
| $CTR$ 光电耦合器的传输效率             | $J_e$ 光电流密度                                      |
| $CMRR$ 共模抑制比                 | $K_y$ 光谱相对灵敏度                                    |
| $D$ 扩散系数或数据端的数据              | $k$ 玻尔兹曼常数, 整流元件的阴极 (负极)                         |
| $D$ 二极管                      | $L$ 电感, 自感系数                                     |
| $d$ 场效应管的漏极                  | $LED$ 发光二极管                                      |
| $D_w$ 稳压管                    | $L_S$ 引线电感                                       |
| $E$ 电势                       | $LSB$ 数字量最低有效位                                   |
| $E_C$ 双电源中的正电源               | $l$ 长度                                           |
| $E_E$ 双电源中的负电源               | $M$ 互感系数                                         |
| $E_e$ 光的照度                   | $N$ 电子型半导体                                       |
| $E_n$ 噪声电势                   | $n$ 脉冲个数                                         |

① 放大倍数的复数形式用  $\lambda$  表示, 以下各量均同。

②  $I, i$  两符号可标注不同的下标, 表示不同的电流值。

如  $I_c$  集电极静态电流;  $I_c$  集电极电流交流分量有效值;  $I_{cm}$  集电极交流电流分量最大值;  $\Delta I_c$  集电极电流变化量;  $i_c$  集电极总电流;  $i_c$  集电极电流交流分量。

|                                     |                                            |
|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| $n$ 电子浓度                            | $U_i$ 输入电压                                 |
| $N_F$ 噪声系数                          | $U_o$ 输出电压                                 |
| $P$ 功率                              | $U_{RM}$ 二极管的最大反向电压                        |
| $P$ 空穴型半导体                          | $U_{th}$ 二极管的阈值电压                          |
| $P_i$ 输入功率                          | $U_T$ 场效应管的开启电压, 温度电压当量                    |
| $P_o$ 输出功率                          | $U_P$ 场效应管的夹断电压                            |
| $p$ 空穴浓度                            | $U_L$ 负载电压                                 |
| $Q, q$ 电荷                           | $U_+$ 正电源电压                                |
| $Q$ 品质因数                            | $U_-$ 负电源电压                                |
| $Q$ 静态工作点, 触发器的输出端                  | $U_f$ 反馈电压                                 |
| $R$ 电阻                              | $U_{oi}$ 输入失调电压                            |
| $R_b, R_e, R_c$ 半导体三极管的基极、发射极和集电极电阻 | $U_{omax}^+$ 运算放大器正向最大输出幅度                 |
| $R_j$ PN结的结电阻                       | $U_{omax}^-$ 运算放大器负向最大输出幅度                 |
| $R_g, R_d$ 场效应管的栅极和漏极电阻             | $U_R$ 基准电压(参考电压)                           |
| $R_i$ 信号源内阻                         | $U_{CBO}$ 发射极开路, 半导体三极管的集-基反向击穿电压          |
| $R_s$ PN结外的半导体电阻及引线电阻               | $U_{EBO}$ 集电极开路, 半导体三极管的射-基反向击穿电压          |
| $R_f$ 反馈电阻                          | $U_{CEO}$ 基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压              |
| $R_L$ 负载电阻                          | $U_{CE0}$ 基极开路, 集电极-发射极反向击穿电压 <sup>③</sup> |
| $r$ 微变电阻(交流电阻或动态电阻)                 | $X, x$ 电抗, 反馈电路中的信号 <sup>③</sup>           |
| $r_{bb'}$ 三极管的基区体电阻                 | $Y, y$ 导纳                                  |
| $r_{b'e}$ 三极管的集电结电阻                 | $Z, z$ 阻抗                                  |
| $r_{b'e}$ 三极管的发射结电阻                 | $Z_i$ 输入阻抗                                 |
| $r_{be}$ 半导体三极管的输入电阻                | $Z_o$ 输出阻抗                                 |
| $r_{ce}$ 半导体三极管的输出电阻                | $Z_f$ 反馈阻抗                                 |
| $R_i$ 直流输入电阻                        | $a$ 半导体三极管共基接法的电流放大系数, 晶闸管整流电路中的移相角        |
| $r_i$ 放大器的交流输入电阻                    | $\beta$ 半导体三极管共射接法的电流放大系数, 晶闸管电路中的逆变角      |
| $r_{if}$ 反馈放大器的交流输入电阻               | $\gamma$ 稳压系数, 光的灵敏度                       |
| $r_o$ 放大器的交流输出电阻                    | $\delta$ 阶跃响应的平顶降落(或称倾斜率)                  |
| $r_{of}$ 反馈放大器的交流输出电阻               | $\eta$ 效率                                  |
| $S$ 面积, 开关, 脉动系数                    | $\theta$ 整流元件的导电角                          |
| $s$ 复频率变量, 场效应管的源极                  | $\lambda$ 光的波长                             |
| $S/N$ 信噪比                           | $\mu_P$ 半导体三极管的内部电压反馈系数(即 $h_{re}$ )       |
| $SR$ 转换速率                           | $\rho$ 电阻率                                 |
| $T$ 温度                              | $\sigma$ 电导率                               |
| $T$ 变压器, 双口有源器件 <sup>①</sup>        | $\varphi, \varphi(\omega)$ 相角              |
| $T, t$ 时间                           | $\phi$ 时钟脉冲                                |
| $t_f$ 脉冲的下降时间                       | $\tau$ 时间常数                                |
| $t_P$ 脉冲的宽度                         | $\Omega$ 电阻的单位(欧姆)                         |
| $t_r$ 脉冲的上升时间                       | $\Omega, \omega$ 角频率                       |
| $U, u$ 电压 <sup>②</sup>              |                                            |
| $U_s$ 信号源电压                         |                                            |

① 双口有源器件指半导体三极管、场效应管、晶闸管等; ②  $U, u$  的各种不同表示方法与  $I, i$  的注释类同; ③ 反馈电路中的信号通常用复数量表示, 如  $\dot{X}_i$  输入信号;  $\dot{X}_f$  反馈信号;  $\dot{X}_o$  输出信号;  $\dot{X}_e$  误差信号;  $\dot{X}_s$  谐波信号。

# 目 录

前言

文字符号表

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第一章 半导体器件 .....                                                               | 1   |
| 第一节 集成电路中的半导体管 .....                                                          | 1   |
| 一、半导体管基础； 二、集成电路中的特殊问题； 三、集成电路中的半导体管； 四、半导体管的模型                               |     |
| 第二节 特种半导体二极管 .....                                                            | 13  |
| 一、变容二极管； 二、肖特基势垒二极管； 三、隧道二极管                                                  |     |
| 第三节 光电子器件 .....                                                               | 14  |
| 一、发光二极管； 二、光敏电阻； 三、光电池； 四、光敏晶体管； 五、光电耦合器                                      |     |
| 小结 .....                                                                      | 24  |
| 习题 .....                                                                      | 24  |
| 第二章 晶体管基本放大电路 .....                                                           | 25  |
| 第一节 共射放大电路及其图解分析 .....                                                        | 25  |
| 一、固定基流的共射放大器； 二、共射固定基流电路的图解分析                                                 |     |
| 第二节 用解析法分析共射放大电路 .....                                                        | 34  |
| 一、计算静态工作点； 二、晶体管微变等效电路； 三、计算交流放大倍数； 四、计算输入电阻 $r_i$ 和输出电阻 $r_o$ ； 五、近似估算输出动态范围 |     |
| 第三节 静态工作点的选择与稳定 .....                                                         | 44  |
| 一、静态工作点的选择； 二、静态工作点的稳定                                                        |     |
| 第四节 共集极放大电路和共基极放大电路 .....                                                     | 49  |
| 一、共集极放大电路； 二、共基极放大器                                                           |     |
| 第五节 场效应管放大器 .....                                                             | 56  |
| 一、场效应管共源极放大电路的组成和工作原理； 二、共源放大电路分析； 三、共漏极场效应管放大电路                              |     |
| 第六节 $RC$ 耦合多级放大器 .....                                                        | 63  |
| 一、多级放大器的极间耦合方式； 二、 $RC$ 耦合多级放大器                                               |     |
| 小结 .....                                                                      | 68  |
| 习题 .....                                                                      | 68  |
| 第三章 单级放大器的频率特性 .....                                                          | 75  |
| 第一节 频率特性的概念 .....                                                             | 75  |
| 一、线性失真和 $RC$ 电路的频率特性； 二、增益的分贝表示法； 三、波特图的画法                                    |     |
| 第二节 单级阻容耦合放大器的频率特性 .....                                                      | 80  |
| 一、典型电路； 二、中频区的频率特性； 三、低频区的频率特性； 四、高频区的频率特性                                    |     |
| 第三节 单级阻容耦合放大器的阶跃响应 .....                                                      | 88  |
| 一、上升时间； 二、倾斜率                                                                 |     |
| 第四节 多级放大器的频率特性 .....                                                          | 91  |
| 小结 .....                                                                      | 93  |
| 习题 .....                                                                      | 94  |
| 第四章 反馈放大器与正弦波振荡器 .....                                                        | 96  |
| 第一节 反馈的基本概念与分类 .....                                                          | 96  |
| 一、正反馈与负反馈； 二、反馈的分类； 三、反馈电路的判别方法                                               |     |
| 第二节 负反馈放大器的方框图及放大倍数的一般表达式 .....                                               | 101 |
| 一、负反馈放大器的方框图； 二、负反馈放大器放大倍数的一般表达式； 三、狭义的放大倍数和反馈系数                              |     |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 第三节 负反馈对放大器性能的影响                                                                       | 106 |
| 一、提高放大倍数的稳定性； 二、扩展频带； 三、减小非线性失真和抑制干扰； 四、对输入电阻和输出电阻的影响                                  |     |
| 第四节 负反馈放大器放大倍数的近似估算                                                                    | 113 |
| • 第五节 负反馈电路的输入电阻和输出电阻表达式的推导                                                            | 116 |
| 一、电压串联负反馈电路的输入电阻和输出电阻； 二、电流并联负反馈电路的输入电阻和输出电阻                                           |     |
| 第六节 寄生反馈及其克服办法                                                                         | 119 |
| 一、磁寄生耦合； 二、寄生电容引起的寄生反馈； 三、公共电源内阻引起的寄生反馈； 四、通过地线引起的寄生反馈； 五、抑制寄生反馈的办法                    |     |
| 第七节 负反馈放大器的稳定问题                                                                        | 123 |
| 一、负反馈放大器产生自激振荡的原因及稳定工作的条件； 二、消除反馈放大器自激的方法介绍                                            |     |
| 第八节 负反馈概念中的若干问题                                                                        | 126 |
| 一、负反馈判别中的问题； • 二、信号源内阻对负反馈放大器的影响                                                       |     |
| 第九节 $RC$ 正弦波振荡器                                                                        | 132 |
| 一、文氏电桥振荡器； 二、 $RC$ 移相式振荡器                                                              |     |
| 第十节 $LC$ 正弦波振荡器                                                                        | 137 |
| 一、 $LC$ 并联谐振回路的选频特性； 二、变压器反馈式 $LC$ 振荡器； • 三、 $LC$ 三点式振荡器； 四、石英振荡器                      |     |
| 第十一节 压控振荡器                                                                             | 146 |
| 一、 $LC$ 压控振荡器； 二、 $RC$ 压控振荡器                                                           |     |
| 小结                                                                                     | 150 |
| 习题                                                                                     | 151 |
| 第五章 集成组件的基本单元电路                                                                        | 157 |
| 第一节 级间耦合方式与零点漂移问题                                                                      | 159 |
| 一、级间耦合方式； 二、零点漂移                                                                       |     |
| 第二节 组合电路                                                                               | 161 |
| 一、复合管； 二、组合放大电路                                                                        |     |
| 第三节 电流源电路                                                                              | 167 |
| 一、晶体管电流源电路； 二、场效应管电流源电路； 三、镜像电流源； 四、微电流源； 五、多路比例电流源； 六、高传输精度的电流源； 七、有源负载               |     |
| 第四节 差动放大器                                                                              | 174 |
| 一、差动放大器的基本电路； 二、单端输入方式； 三、差动放大器的改进电路； 四、两级差动放大器及反相求和与网络                                |     |
| 第五节 输出电路                                                                               | 190 |
| 一、互补对称放大器； 二、改进的互补对称电路； 三、单片集成功率放大器 $LM384$ 的原理及应用举例                                   |     |
| 第六节 典型运放电路分析                                                                           | 200 |
| 一、5G24 型集成运放电路原理分析； 二、集成运放的主要参数； 三、改进的运放组件电路                                           |     |
| 小结                                                                                     | 212 |
| 习题                                                                                     | 212 |
| 第六章 集成组件的应用基础                                                                          | 219 |
| 第一节 负反馈运放电路的输入与输出方式                                                                    | 219 |
| 一、集成运放放大器的等效电路； 二、反相输入方式的负反馈比例运算放大器； 三、同相输入方式的负反馈比例运放电路； 四、差动输入方式的负反馈比例运放电路； 五、电压电流变换器 |     |
| 第二节 集成运放组成的基本运算电路                                                                      | 229 |
| 一、反相加法器； 二、积分器； 三、微分器； 四、比例—微分—积分运算； 五、对数、指数运算放大器                                      |     |
| 第三节 集成模拟乘法器及乘除法运算电路                                                                    | 236 |
| 一、二象限变跨导乘法器原理； 二、四象限模拟乘法器； 三、集成组件构成的乘除法运算电路                                            |     |
| 第四节 集成运放组成的其它线性运用电路                                                                    | 249 |
| 一、有源滤波器； 二、检测放大器； 三、采样—保持电路； 四、集成运放组成的非线性波形变换电路                                        |     |
| 第五节 集成比较器与非正弦波产生器                                                                      | 264 |
| 一、开环比较器； 二、施密特触发器； 三、方波和矩形波发生器； 四、三角波发生器； 五、锯齿波发生器                                     |     |
| 第六节 使用集成运放中的实际问题                                                                       | 275 |
| 一、集成运放的粗测； 二、集成运放主要指标测试； 三、消振； 四、保护电路； 五、调零电路                                          |     |
| 小结                                                                                     | 285 |

|                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------|-----|
| 习题                                                                | 285 |
| 第七章 直流稳压电源                                                        | 294 |
| 第一节 概述                                                            | 294 |
| 第二节 单相桥式整流电路                                                      | 295 |
| 一、单相桥式整流电路的构成； 二、单相桥式整流电路的整流原理； 三、定量分析                            |     |
| 第三节 滤波电路                                                          | 298 |
| 一、电容滤波电路； 二、电感滤波电路； 三、阻容滤波电路； 四、LC滤波电路                            |     |
| 第四节 倍压整流电路                                                        | 304 |
| 一、二倍压整流电路； 二、多倍压整流电路                                              |     |
| 第五节 集成稳压器                                                         | 306 |
| 一、单片集成稳压器的基本单元电路； 二、典型集成稳压器电路分析； 三、集成稳压器的典型运用                     |     |
| 小结                                                                | 327 |
| 习题                                                                | 327 |
| 第八章 数/模与模/数转换                                                     | 329 |
| 第一节 概述                                                            | 329 |
| 第二节 数/模转换器(DAC)                                                   | 330 |
| 一、二进制权电阻DAC； 二、R-2R梯形网络DAC； 三、BCD码DAC； 四、DAC的参数及指标                |     |
| 第三节 模/数转换器(ADC)                                                   | 340 |
| 一、双积分型ADC； 二、逐次近似比较型ADC； 三、并行型和并串行型ADC； 四、ADC的基本参数                |     |
| 第四节 DAC和ADC的典型运用                                                  | 352 |
| 一、DAC的典型运用； 二、ADC的典型运用                                            |     |
| 小结                                                                | 360 |
| 习题                                                                | 361 |
| 第九章 晶闸管电路                                                         | 363 |
| 第一节 晶闸管                                                           | 363 |
| 一、晶闸管的结构和工作原理； 二、晶闸管的伏安特性； 三、晶闸管的主要参数                             |     |
| 第二节 可控整流电路                                                        | 373 |
| 一、单相桥式半控整流电路； 二、单相桥式全控整流电路； 三、三相桥式半控整流电路                          |     |
| 第三节 逆变电路                                                          | 394 |
| 一、逆变的概念； 二、三相桥式全控逆变电路                                             |     |
| 第四节 晶闸管的触发电路                                                      | 402 |
| 一、对晶闸管触发电路的要求； 二、单结晶体管触发电路； 三、锯齿波触发电路； 四、触发脉冲与主回路电压的同步问题； 五、集成触发器 |     |
| 第五节 晶闸管的保护                                                        | 425 |
| 一、晶闸管的过电流保护； 二、晶闸管的过电压保护                                          |     |
| 第六节 晶闸管应用电路实例                                                     | 426 |
| 小结                                                                | 429 |
| 习题                                                                | 429 |
| 习题答案                                                              | 532 |
| 参考文献                                                              | 437 |

# 第一章 半导体器件

集成电路中的半导体管包括二极管、三极管、场效应管和稳压管等。集成电路按其功能可分为模拟集成电路和数字集成电路。本书主要介绍模拟集成电路。

## 第一节 集成电路中的半导体管

本节将要介绍的半导体的工作原理是全书的基础，其中有许多概念和名词术语是后续内容经常要用到的。

### 一、半导体管基础

#### (一) 半导体

##### 1. 半导体的性质

从导电的角度讲，半导体是一种介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、硒、硫化物、氧化物等。半导体具有许多特殊性质：如受光、热的照射（或称激发），导电性能会发生很大变化，又如在纯净的半导体材料中掺入微量杂质，对半导体的导电性能有很大影响。

物质是否能导电需要满足两个条件。一是要有外加电压—外部条件；二是该物质要有能自由导电的电子—内部条件。半导体的上述特性，说明半导体的导电机构不同于其他物质。半导体内部的导电机构可以用硅或锗的原子结构说明。

##### 2. 共价键

硅或锗原子最外层都只有四个电子，它们绕核运转。如图1-1-1所示。最外层的四个电子称价电子，它们受原子核的束缚力最小。当用纯净的材料制成

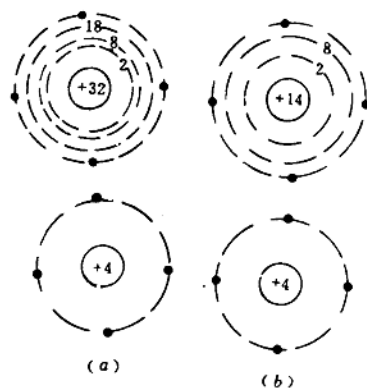


图 1-1-1 硅和锗的简化原子模型  
(a) 锗；(b) 硅

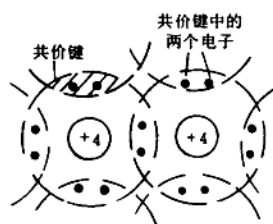


图 1-1-2 硅(或锗)晶体共价键

晶体时，原子核靠得很近，而且排列得很整齐。每个原子核外的价电子除受本核吸引外还受相邻原子核的吸引，为两核共有。这样，每个价电子的轨道就变成两相邻原子核间两个价电子的公共轨道，形成了晶体中的共价键，见图1-1-2。共价键中的两个价电子称束缚电子，束缚电子为两核共有，结合也较紧密。它们只有获得足够的能量才能挣脱共价键的束缚成为自由电子。在绝对零度和无外界激发时，共价键中的电子不能跑出来，呈现出绝缘体的性质。在常温下或在光的

激发下，少数束缚电子将获得足够能量，挣脱共价键的束缚成为自由电子。共价键中缺少一个电子的空位置称空穴。可见在纯净的半导体中自由电子和空穴是成对出现的。电子带负电荷，空穴带正电荷，都是带电的粒子，故它们都称作载流子。有载流子就可以在外加电压作用下导电，此时呈现出导体的性质。温度越高受热激发产生的自由电子越多，导电性能越强。所以半导体器件受温度影响很大，使用时要考虑温度的影响。

### 3. 杂质半导体

纯净的半导体称本征半导体；掺入微量化学元素的半导体称杂质半导体。杂质半导体的导电性能大为改善。根据所掺杂质的不同，分为N型（电子型）半导体和P型（空穴型）半导体。

（1）N型半导体 在本征半导体中掺入五价元素，如氮（或磷、砷），形成的杂质半导体称N型半导体。五价元素最外层有五个价电子，在制成晶体时，氮和硅组成共价键时多出一个电子见图1-1-3。这个电子受核的束缚远小于共价键中的电子，它只要受到一点激发就很容易挣脱原子核的束缚成为自由电子。这个自由电子不是从共价键中挣脱来的，所以不会形成新的空穴，只是五价元素的原子核此时显出正电荷。杂质给出了多余的电子，故该杂质称施主杂质。杂质半导体中也有本征激发产生的电子空穴对。在N型半导体中，电子是多数，空穴是少数，所以N型半导体中的电子称多数载流子，空穴称少数载流子。

（2）P型半导体 在本征半导体中掺入三价元素，如硼（或铝、镓），便形成了P型半导体。因三价元素最外层只有三个价电子，制成晶体并组成共价键时，缺少一个电子，于是共价键中多出一个空穴，这个空穴不是共价键中挣脱电子后形成的，相邻的共价键中的电子可能会填补这个空位，这个杂质粒子就带了负电荷，所以这种杂质称受主杂质。在P型半导体中，本征激发也会产生电子、空穴对，但P型半导体中空穴是多数，故空穴是P型半导体中的多数载流子，电子是P型半导体中的少数载流子。

（二）PN结

#### 1. PN结的形成

无论是N型还是P型半导体，在室温下受热激发会产生许多电子和空穴对，还有杂质所形成的电子、空穴，它们各自的正负电荷相等，是电中性的。当N型和P型两种半导体结合在一起时，由于多数载流子浓度的差别，N区的多数载流子电子及P区的多数载流子空穴就会向对方扩散，见图1-1-4。电子填补空穴。失去电子的N区就形成一层带正电荷的离子，得到电子的P区形成一层带负电荷的离子。由于扩散的结果，形成了内部电场 $E$ ，其方向由N

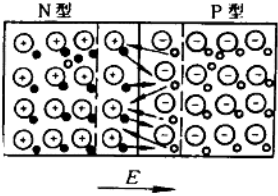


图 1-1-4 PN结的形成

区指向P区。内电场一旦形成,就阻止N区的电子继续向P区扩散、P区的空穴向N区扩散。但允许N区中的空穴向P区移动,P区中的电子向N区移动。这种移动称漂移。漂移的结果又削弱了内电场而有利于扩散,扩散的结果又加强了内电场。最后扩散和漂移达到动平衡。P区和N区交界处形成的一层不能移动的带电离子,称空间电荷区。这个区中的内电场阻止多数载流子继续扩散,故又称阻挡层。在这个空间电荷区内多数载流子扩散到对方,消耗完了,故这个空间电荷区又称耗尽层。

## 2. PN结的单向导电性

PN结形成之后,内电场 $E$ 就形成了,方向由N区指向P区。N区电位高,P区电位低,两者之差 $U_0$ 约零点几伏,如图1-1-5所示。

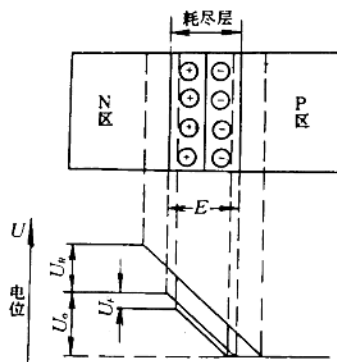


图 1-1-5 PN结的内电场变化情况

外加正向电压 $U_F$ :电源正端接P区,负端接N区,称PN结加正向电压,或称正向偏置,简称正偏。此时,P区中的多数载流子空穴和N区中的多数载流子电子都向PN结界面运动,使空间电荷区变窄,内电场被削弱,PN结电位差减小(减小到 $U_0 - U_F$ )。因此,有利于扩散作用的进行,从而形成正向电流 $I_F$ 。PN结表现为很小电阻。

外加反向电压 $U_R$ :电源正端接N区,负端接P区,称PN结加反向电压,又称反向偏压简称反偏。反偏时,外加电压的方向正好与内电场方向相同,使PN结电位差升高到 $U_0 + U_R$ ,扩散更加困难,只有漂移电流 $I_R$ 流过。漂移电流由少数载流子形成,它决定于PN结的材料和当时的温度,在 $U_0 + U_R$ 的作用下,少数载流子几乎全部漂移过来,达到了饱和程度,故此电流又称反向饱和电流 $I_s$ 。因为 $I_s$ 极小,可认为基本上不导电。PN结表现出很大电阻。

上述PN结的正向电阻小、反向电阻大,这就是PN结的单向导电性。二极管就是利用PN结的单向导电性制成的。

## (三) 三极管的放大作用

### 1. 三极管的结构

两种杂质半导体结合在一起构成一个PN结,一个PN结就是一个二极管,它具有单向导电的特性。通过一定的工艺将两个PN结做在一起就制成了三极管,三极管具有电流放大的功能。对于二极管的单向导电性,因其内部存在着内电场,在外部加上正向和反向偏压才显示出来。三极管的电流放大功能,也一定有其内部运动规律,外部也一定有特殊条件。三极管是三层结构,根据夹在中间的杂质半导体的不同,可分为NPN型和PNP型两种三极管。其结构以NPN型为例加以说明,见图1-1-6。

NPN三极管三层结构的中间是一层P型半导体,称基区。基区的厚度制作得极薄(微米级),基区的杂质浓度也较低。两边都是N型半导体,但两边的杂质浓度不一样,浓度高的为发射区,低的为集电区。三层形成两个结,基区与发射区形成的结称发射结,基区与集电区形成的结称集电结。三个区分别引出三条引线,引线对应称作基极 $b$ 、发射极 $e$ 和集电

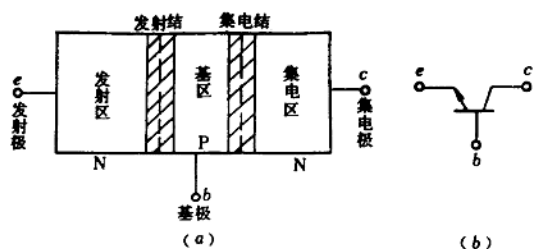


图 1-1-6 NPN型三极管结构示意图

(a)结构示意图; (b)符号

很容易通过发射结到达基区;基区中的空穴也扩散到发射区,由于空穴的数量极少,这部分电流可以忽略。到达基区的电子只有少量的与基区中的空穴复合形成基极电流 $I_B$ ,绝大多数多余的电子作为基区的少数载流子到达集电结附近。当集电结加反向偏置时,外加电压使集电结内电场加强,有利于漂移,于是基区中的多余电子便轻易地通过集电结到达集电区形成集电极电流 $I'_C$ 。当然集电区中的空穴也漂移到基区形成反向饱和电流 $I_{CBO}$ , $I_{CBO}$ 的数值较小(微安级),对电流放大毫无作用,且受温度影响较大,制造时应尽量减小它。载流子的传输过程参见图1-1-7。

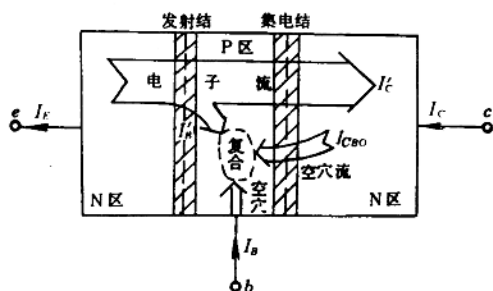


图 1-1-7 三极管中载流子的传输过程

由上述分析可知:①要三极管能正常工作,必须外加正确的电压,即发射加正偏,集电结加反偏;②两种载流子都参与导电,所以三极管又称双极型器件。

### 3. 三极管的电流分配

发射区发出的电子一部分在基区复合了,余下大部分到达集电区,即 $I_E = I'_C + I_B$ (见图1-1-7)。当三极管制成后,各层杂质浓度一定,基区宽度也确定了,所以集电极电流和发射极电流的比例就确定了,这个比例用共基极电流放大系数 $\alpha$ 表示

$$\alpha = \frac{I'_C}{I_E}$$

$\alpha$ 一般为0.9~0.99。

集电极总电流 $I_C = I'_C + I_{CBO}$

所以

$$\alpha = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}$$

由于 $I_C \gg I_{CBO}$

故

$$\alpha \approx \frac{I_C}{I_E} \quad (1-1-1)$$

由发射区来的电子到达基区与空穴复合的电流为  $I'_B$ 。基区中的空穴，一部分由电源来，即基极电流  $I_B$ ；另一部分空穴是  $I_{CBO}$  提供的，所以基极电流

$$I_B = I'_B - I_{CBO}$$

综上所述，三极管中电流分配关系为

$$\left. \begin{aligned} I_C &= \alpha I_E + I_{CBO} \\ I_E &= I_B + I_C \\ I_B &= I'_B - I_{CBO} \\ I'_B &= (1 - \alpha) I_E \end{aligned} \right\} \quad (1-1-2)$$

#### 4. 三极管的放大作用

利用三极管的发射极电流与集电极电流成比例这一特点，可实现对信号的放大。

图1-1-8是一个简单的放大电路。待放大的信号  $\Delta u_i$  接在基极和发射极之间，被放大的信号由  $R_L$  两端取出。发射结由  $E_B$  加正偏压。为了使三极管能正常工作，集电结需加反偏。 $E_C$  通过  $R_L$   $1\text{k}\Omega$  电阻加在三极管的C极和e极，即加在电阻和两个结上。 $E_C$  对集电结是反偏，反偏结的电阻极大； $E_C$  对发射结是正偏，正偏结的电阻极小， $1\text{k}\Omega$  电阻也比较小，所以  $E_C$  电压实际上绝大部分加在集电结上。

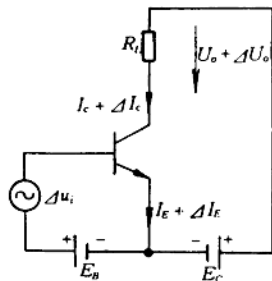


图 1-1-8 三极管的简单放大电路

当信号电压为零时，由于  $E_B$  和  $E_C$  的作用，发射极流过电流  $I_E$ ，集电极流过电流  $I_C$ 。当信号变化  $\Delta u_i$  时（设  $\Delta u_i = 30\text{mV}$ ）， $\Delta u_i$  对发射结内电场的影响很敏感，使发射极产生一个增量  $\Delta I_E$ （设变化了  $1.5\text{mA}$ ），集电极电流也跟着变化一个增量  $\Delta I_C$ （设  $\alpha = 0.97$ ，则  $\Delta I_C = \alpha \Delta I_E = 0.97 \times 1.5 = 1.455(\text{mA})$ ）， $\Delta I_C$  在  $R_L$  上就产生一个增量  $\Delta U_o$ 。〔 $\Delta U_o = \Delta I_C R_L = 1.455 \times 1 = 1.455(\text{V})$ 〕。

输入  $30\text{mV}$ ，输出  $1.455\text{V}$ ，于是电压被放大了，放大倍数用  $A_u$  表示，则

$$A_u = \frac{1.455}{30 \times 10^{-3}} = 48.5$$

电压被放大了  $48.5$  倍。

## 二、集成电路中的特殊问题

随着半导体技术的发展，现在可以在一块  $5 \times 5\text{mm}^2$  的芯片上制成具有一定功能的器件，它把半导体管、电阻、电容等电子元件及其引线都集成在一起。它们和分立元件相比有许多特殊的地方，如元件之间需要隔离，有时因隔离而产生寄生效应等等。

集成电路中的隔离技术有两种：PN结隔离和介质隔离。

### 1. PN结隔离

PN结在反向偏置情况下，反向电阻很高。将元件所在的区域四周全部用加反偏的PN结包围起来，便可把所需隔离的元件隔离开来。图1-1-9(a)就是两个三极管用PN结隔离的示意图。两个三极管分别安排在两个隔离区内。两管的集电区之间隔着两个背靠背的PN结。只要P(或P<sup>+</sup>)型衬底的电位比三极管的集电区低，两管就被加反向电压的PN结隔

离开来，从而实现了电气隔离。图1-1-9(b)就是隔开了的两个三极管的等效电路。G是衬底。

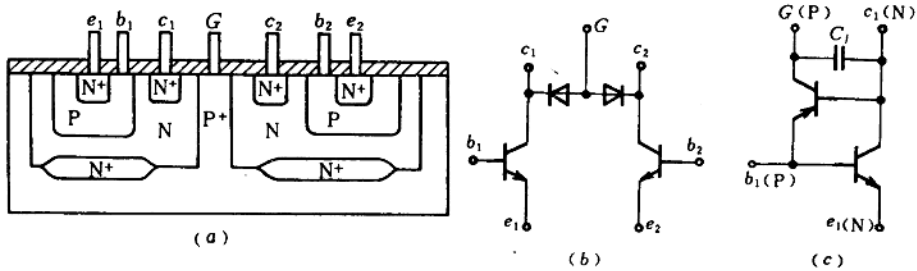


图 1-1-9 两个三极管用PN结实现隔离  
(a)示意图；(b)等效电路；(c)寄生元件及电路

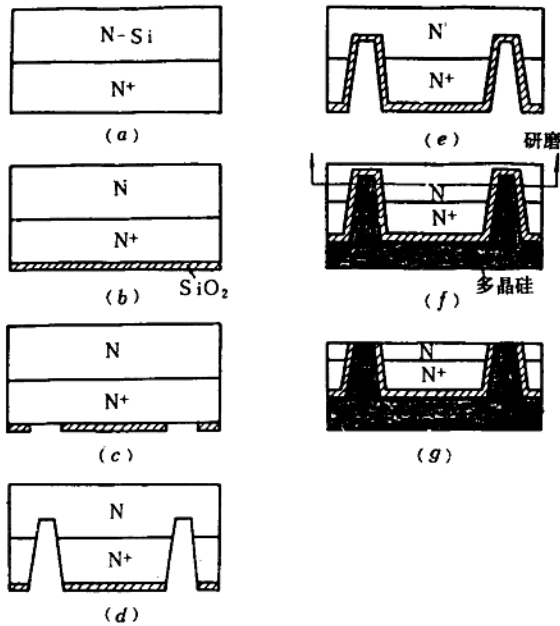


图 1-1-10 介质隔离工艺流程

除去氧化层，形成一个窗口；

(d)腐蚀窗口，形成隔离壕沟；

(e)再次氧化；

(f)在氧化层上用外延法制一层多晶硅，把这层多晶硅作衬底，同时对N型基片进行研磨、抛光，直到将隔离壕沟的底部全部暴露出来；

(g)最后形成N (N<sup>+</sup>)隔离岛。在“岛”上制造半导体管便不会产生寄生效应了。

## 2. 介质隔离

PN结隔离技术不可能达到真正的电气绝缘。其原因是：①反向的PN结的直流电阻有限，而且这个电阻受温度影响较大；②反向的PN结会产生寄生电容 $C_j$ ，频率越高、隔离作用越差；③用PN结隔离会产生寄生有源器件，如PNP或NPN器件等，见图1-1-9(c)。

为了克服上述缺点，采用了介质隔离技术。下面用图1-1-10来说明介质隔离技术的工艺流程及特点，其中：

(a)在N型硅片上利用扩散法或外延法制作一个N<sup>+</sup>层，此层又称隐埋层；

(b)将隐埋层的表面氧化，作保护作用；

(c)在需要隔离的部位用光刻法

### 三、集成电路中的半导体管

#### 1. NPN型三极管

用PN结隔离技术制造的三极管与分立元件的三极管有许多不同的地方，最主要的有三点：①由于寄生效应的存在，尤其是受寄生电容的影响，高频特性很差；②分立元件的NPN管中电子运动的路径短，如图1-1-11(a)所示，而对于集成电路中的NPN管，为了便于器件之间相互连线，集电极和发射极在同一侧引出，使电子流的通道加长，增大了集电区等效串联电阻，故饱和压降大，集电区功耗增大(因此常常设置 $N^+$ 埋层加以改善)；③同一块芯片上的所有元件制造工艺相同，故所有的三极管的参数误差很小，如 $\beta$ 的偏差小于10%， $U_{BE}$ 的偏差小于 $\pm 2\text{mV}$ ，因此，适于制造对称的电路，如差动放大器。

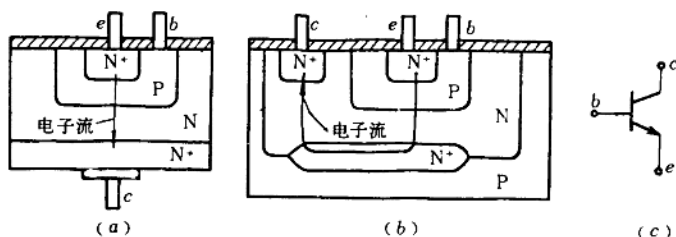


图 1-1-11 NPN型三极管

(a)分立元件中电子运行路径；(b)集成电路中电子运行路径；(c)符号

#### 2. PNP型三极管

采用生产NPN管的工艺，在同一芯片上制出的PNP管性能都较差。通常用来制造PNP管的工艺有两种：衬底PNP管和横向PNP管。

衬底PNP管是以P型衬底作集电极的，故只有采用PN结隔离的工艺才可能制作这种结构的三极管，图1-1-12(a)为其示意图。载流子运动方向是垂直于半导体管断面的，故又称作纵向PNP管。由于用PN结隔离，衬底必须接电源最低电压端，运用中受到限制，所以这种PNP管在集成电路中用得很少，只能作射极输出器用。另外，它的基区较宽，所以电流放大系数 $\beta$ 较小，高频特性比NPN管还要差。

横向PNP管的P型发射区和集电区，在制作NPN管的P型基区时同时制成。它的N

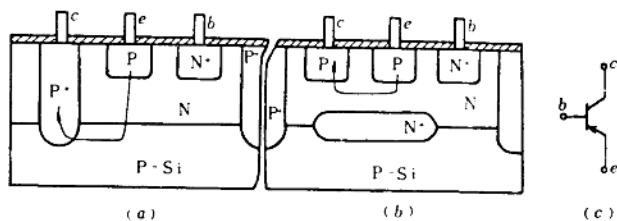


图 1-1-12 两种集成化PNP三极管

(a)衬底PNP管；(b)横向PNP管；(c)符号

型基区则与NPN管的集电区同时形成，如图1-1-12(b)所示。由于工艺技术的限制，集电区与发射区之间的间隔不可能做得很小，即基区较宽，所以横向PNP管的电流放大系数 $\beta$ 极低，频率特性也极差。不过这种管在集成电路中可与NPN管组成复合管，以克服上述缺点。另外，它还可制成各种组态。特别是由于它的集电结及发射结有较高的反向击穿电压，因此，比衬底PNP管优越，用得也较多。

### 3. 二极管

利用制造NPN管的工艺，可同时制作二极管。因为二极管就是一个PN结。在集成电路中常用三极管的发射结制成二极管。其他还有衬底二极管、用集电结做的二极管等。它们的结构形式如图1-1-13所示。

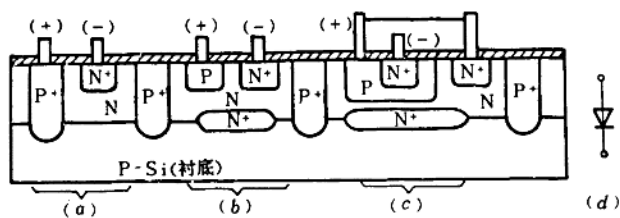


图 1-1-13 集成电路中的三种二极管  
(a)衬底二极管；(b)c-b结二极管；(c)b-c结二极管；(d)符号

衬底二极管是在采用PN结隔离技术时，由衬底和N外延层之间的隔离PN结构成的。它的特点是反向击穿电压较高。由于衬底须接电源最低电压端，故限制了它的应用。

集电结二极管由NPN管的集电区和基区构成，反向击穿电压也较高。但是当此二极管加正向电压时，将与衬底一起形成一个寄生PNP管，且会流过寄生电流。故不能得到广泛运用。

发射结二极管由NPN管的集电极和基极短接后再与发射极形成二极管。这种二极管由于有PN结隔离，不会形成寄生管，因此在集成电路中得到普遍运用。它的唯一缺点就是反向击穿电压较低，仅5~7V。

### 4. 稳压管

分立元件稳压管的PN结是采用重掺杂工艺制造的。由于杂质浓度高，又可对浓度进行控制，所以PN结空间电荷区可做得很薄，在较小的反向电压作用下，就可产生齐纳击穿，击穿电压就是稳定电压，其值可从几伏到几十伏。

集成电路中的稳压管是利用反向击穿电压比较低的NPN管的发射结构成的，工作于反偏状态下，稳压范围小，大约为5~7V。它比分立元件的稳压管的动态电阻大，约为60~100Ω，电压温度系数约为+2mV/℃（或+3×10<sup>-4</sup>/℃）。

图1-1-14(a)是集成电路中稳压管的图形符号。有时为了减小稳压管的动态电阻常采用射极输出器与之配合，见图1-1-14(b)。由于射极输出器的发射结处于正向，它有-2mV/℃的温度系数，于是稳压管和射极输出器配合的结果减小了稳压电路的动态电阻，但是同时增大了温度系数（增加到+4mV/℃），图1-1-14(c)是降低温漂的电路，将两个

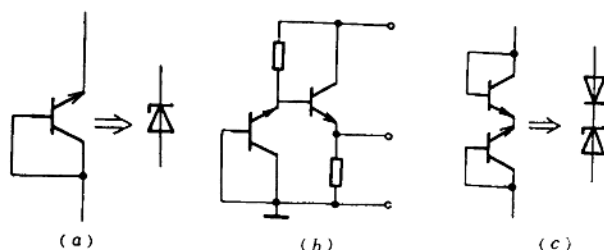


图 1-1-14 集成稳压管

(a)图形符号；(b)利用射极输出器减小动态电阻的稳压管；(c)具有温度补偿的稳压管

PN结反向串联，正负两个温度系数相抵，可使温度系数减到最小。这种办法又带来稳压管动态电阻增大的缺点。将图1-1-14(b)、(c)两种办法综合起来，就可制造出动态电阻小、温度系数小的稳压电路。

### 5. 场效应管

场效应管因制造工艺简单、集成度高和成本低而得到迅速发展，成为电子器件中重要的一个分支。场效应管分结型和绝缘栅型两大类。根据载流子运动通道的不同，结型场效应管又分为N沟道和P沟道。绝缘栅型场效应管除有沟道之别外，还有增强型和耗尽型之分。

图1-1-15为N沟道结型场效应管的示意图。

它的源极和漏极制作在同一个N区内，N区就是沟道。两电极间插入的一个P<sup>+</sup>区引出线作栅极，同时形成了PN结。漏极和源极之间加上恒定电压 $U_{DS}$ ，漏极加正电压，源极加负电压，电子就通过N区沟道形成电流。电流的大小除决定于 $U_{DS}$ 外，还决定于N沟道的宽度，这个宽度又受栅、源极间的电压控制。信号就是由栅、源间加入的，栅极加负，源极加正。因此栅、源之间的PN结加上了反向电压。反向电压越大，耗尽层越宽，流过电流的通道越窄。反之，沟道加宽。

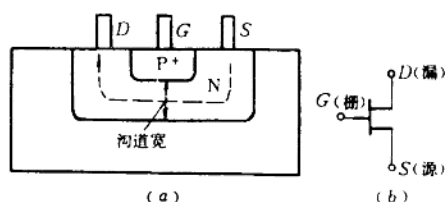


图 1-1-15 N沟道结型场效应管

(a)结构示意图；(b)符号

按标准工艺制成的场效应管其沟道太宽，不能获得满意的特性，因而需要采用特殊工艺，如加深扩散P<sup>+</sup>区的深度，才可使沟道变窄。

由于结型场效应管的栅、源极工作在反向状态，故输入电阻比三极管（射、基间正向工作状态）的输入电阻要大。为了进一步提高输入电阻，出现了绝缘栅场效应管。

绝缘栅场效应管又称MOS管（是金属—氧化物—半导体场效应管的简称）。它的栅极为金属电极，此电极与半导体之间由一层氧化物绝缘，通常是SiO<sub>2</sub>，即玻璃。所以，MOS管比结型场效应管具有更高的输入电阻。图1-1-16所示为P沟道增强型MOS场效应管（简称PMOS管）的结构示意图。此管可用制造NPN管的标准工艺略加修改制得。在NPN管标准工艺中，当金属连线连接两个P区而中间隔着一个N区时，金属线便等效于栅极，从而形成寄生PMOS器件。通常，这种器件的开启电压较大。但是，外加电压一旦达到开启电

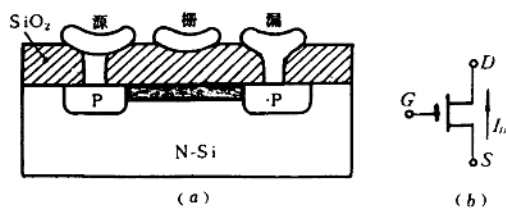


图 1-1-16 P 沟道增强型 MOS 管  
(a) MOS 管示意图; (b) 符号

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) = I_S (e^{\frac{qu}{KT}} - 1) \quad (1-1-3)$$

式中  $U_T$ ——热电压。在  $300^\circ\text{K}$  时,  $U_T = \frac{KT}{q} \approx 26\text{mV}$ 。故  $U_T$  又称温度的电压当量;

$K$ ——波尔兹曼常数, 约为  $1.38 \times 10^{-23}\text{J/K}$  ( $\text{J}$  的单位为焦耳,  $K$  为绝对温度);

$q$ ——基本电荷,  $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ;

$T$ ——PN 结的绝对温度;

$I_S$ ——PN 结的反向饱和电流。

PN 结加正向电压时,  $u$  和  $i$  为正; 加反向电压时,  $u$  和  $i$  都为负。

由式 (1-1-3) 可知, 二极管的伏安特性是非线性的。设加正向电压, 当该正向电压小于某电压  $U_{th}$  时, 流过 PN 结的电流很小, 可近似认为二极管截止,  $i \approx 0$ ; 当加的正向电压大于  $U_{th}$  时,  $i = I_S e^{\frac{u}{U_T}}$ , 结电流明显增大, 二极管导通,  $U_{th}$  称为二极管的阈值电压。  $U_{th}$  的大小不但与 PN 结的材料和结两侧杂质的浓度有关, 而且还与流过 PN 结电流的大小有关。图 1-1-17 示出了集成电路中, 硅 PN 结二极管的正向典型特性。由图可见, 硅  $b-e$  结二极管的阈值电压约为  $0.7\text{V}$ ,  $b-c$  结二极管的  $U_{th}$  约为  $0.2\text{V}$ 。在数字电子技术中, 考虑阈值电压  $U_{th}$  的理想二极管模型用图 1-1-18(a) 来表示。当  $u < U_{th}$  时, 二极管截止; 当  $u \geq U_{th}$  时, 二极管导通。因此可用一个没有内阻的理想二极管和一个理想电压源  $U_{th}$  来等效。

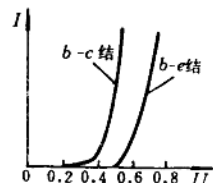


图 1-1-17 集成二极管的伏安特性

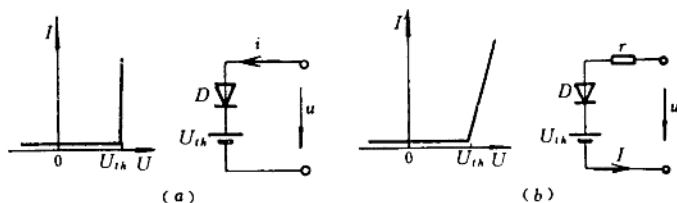


图 1-1-18 二极管的模型

(a) 数字电路中的伏安特性和等效电路; (b) 模拟电路中的伏安特性和等效电路