



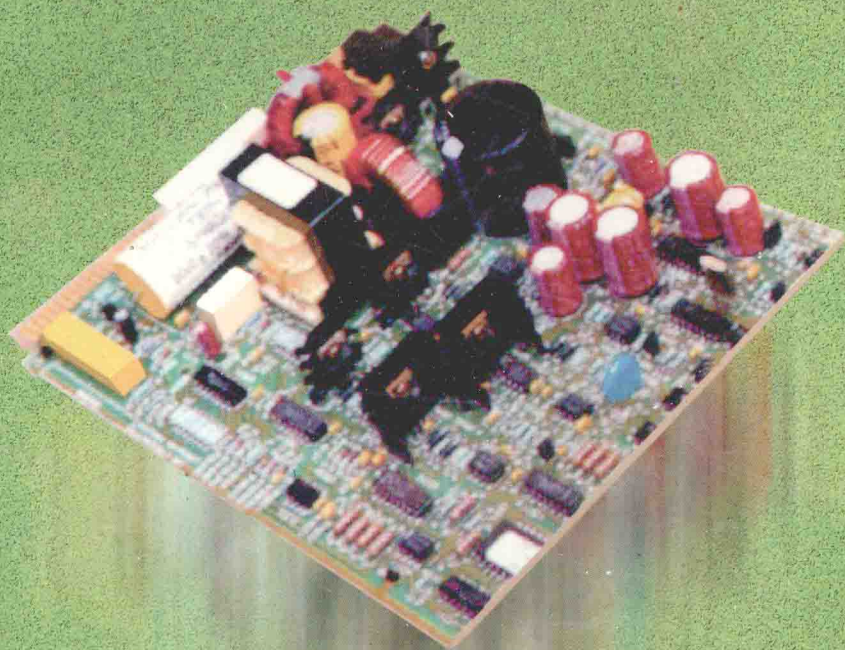
中等专业学校教材

电子通信类专业通用

# 电子线路

(第二版)

陈继生 编



高等教育出版社

中等专业学校教材

# 电 子 线 路

(第二版)

陈继生 编

高等教育出版社

(京)112 号

## 内 容 简 介

本书是在第一版基础上,根据国家教育委员会 1988 年 8 月颁布的《中等专业学校模拟电子线路(Ⅰ)(Ⅱ)教学大纲》(工科电子、通信类专业通用)同时考虑电子技术发展新趋势的要求修编而成。

书中以集成电路的基本组成电路为主要线索,阐述了各种模拟单元电路的基本概念、基本原理和基本分析方法,以较大的篇幅介绍了集成运算放大器、集成宽频带放大器、集成功率放大器、集成模拟乘法器和集成稳压电源的原理和应用,适当地介绍了 MOS 集成电路和半导体集成工艺基本知识。

全书除绪论外共有十一章,内容包括:半导体二极管和三极管、放大电路基础、场效应管放大器、集成运算放大器、负反馈放大器、放大器的频率响应和稳定性、集成运算放大器的应用电路、低频功率放大器、直流稳压电源、正弦波振荡器和调制与解调。各章有小结和大量习题,书末附有常用电子器件的主要参数等附录和部分习题参考答案。

本书经清华大学电子工程系尹达衡教授和湖南邮电学校王家继高级讲师审阅。

本书可作为中等专业学校工科电子、通信类专业通用教材,也可以作为中等和高等职业学校有关专业的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子线路/陈继生编. - 2 版. - 北京:高等教育出版社 1995  
ISBN 7-04-005371-3

I. 电… II. 陈… III. 电子电路 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 01230 号

\*

高等教育出版社出版  
新华书店上海发行所发行  
丹阳兴华印刷厂印装

\*

开本 787×1092 1/16 印张 33.75 字数 840 000  
1987 年 1 月第 1 版 1996 年 2 月第 2 版 1997 年 7 月第 2 次印刷  
印数 13629—27737  
定价:24.50 元

## 第二版前言

由国家教育委员会中等专业学校电子线路课程组组织制订,经国家教育委员会批准的《中等专业学校模拟电子线路(I)(II)教学大纲》已于1988年8月正式颁布。该教学大纲是教学指导性文件,是作为中专学生学习本课程必须达到的合格要求,也是修改本教材的依据。

“电子线路”是中专工科电子、通信类专业的主要技术基础课。在专业课程中具有承上启下的重要作用,课程本身又具有实践性很强的特点。本教材把熟悉各种电子器件的内部机理并掌握其外特性,掌握各种模拟单元电子线路的基本概念、基本原理和基本分析方法作为最关键和核心问题。取材时,注意理论联系实际,加强物理概念的阐述,尽量避免过深的繁琐数学推导,强调工程估算方法。

与本教材第一版比较,新版有如下特点:

1. 当前,在集成电路大量涌现的同时,原来的某些基本理论和某些分立电路仍有适用价值,在一段时期内,集成电路和分立电路在国内仍然会同时并存。因此,新版教材力图将集成电路和分立电路有机地结合起来,在突出集成电路的同时,把集成电路的内容渗透到各个章节之中。一方面让集成运算放大器提前出台,将它视作通用的电子器件。另一方面删减或压缩只在分立电路出现而在集成电路不被采用的内容,加强二者相同的部分。比如删除了负反馈放大器的拆环分析方法,代之以深度负反馈条件下源电压增益估算。删除了电子管及其放大器的附录,压缩了晶体管偏置电路部分内容,把变压器耦合功率放大器列为选学内容等。而将差动放大器、有源负载放大器作为重点单元电路对待。这样,不仅可以做到从分立电路为主转变为集成电路为主,而且对分立电路的基本知识并未削弱。

2. 用微变等效电路进行动态分析时,以集成电路中的基本组成电路为主要对象,以混合 $\pi$ 型等效电路为手段,一开始就建立晶体管等效电路的完整概念,从而可以利用统一的等效电路来分析高频电路和低频电路。

3. 以较大的篇幅介绍了集成运算放大器、集成宽频带放大器、集成功率放大器、集成模拟乘法器和集成稳压电源的原理和应用,适当地增加了MOS集成电路基本知识和半导体集成工艺知识。

4. 集成运算放大器的大量使用,保证其稳定工作成为优先考虑的问题,本版增加了“放大器的频率响应与稳定性”一章。除集中讲解频率响应的分析方法和宽频带放大器基本知识外,还增加了放大器稳定性分析方法和相位补偿等基本内容。

本教材由清华大学电子工程系尹达衡教授和湖南邮电学校王家继高级讲师主审,二位审者提出了许多宝贵的意见。高等教育出版社姚玉洁编审和国家教育委员会中等专业学校电子线路课程组各位委员给编者许多帮助和指导。武汉无线电工业学校陈国瑞高级讲师、张中洲讲师、杨腊运讲师和张一婵老师为本书出版作过许多有益的工作,在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平,谬误之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

编者

1993年11月于武汉无线电工业学校

## 第一版前言

本书是根据国家教育委员会(原教育部)1983年1月颁发的《中等专业学校电子线路教学大纲》(试行草案)的基本要求编写的,经电子工业部中专教材编审委员会(电类)无线电技术编审小组审定,可作为中等专业学校工科电子类各专业“电子线路”课程的通用教材。全书教学总学时约为200。其中讲课140学时,实验40学时,机动20学时。

由于电子技术发展迅速,所牵涉到的知识面广,而且各个学校的具体情况不同,因此对“电子线路”课程的要求不可能完全一样。组织教学时,可根据各校的不同专业、不同对象、不同学制对教材内容进行适当的删减或补充。

本书力求反映现代电子技术发展的水平,又适当照顾国内现状。本书在重点讲清以晶体管为器件的单元电路的基本概念、基本原理和基本分析方法的同时,用较大的篇幅介绍了集成运算放大器、集成功率放大器和集成稳压电源的原理、特点、分析方法和应用举例。在内容叙述上,尽量采用通俗的语言由浅入深地阐明问题,突出重点不追求面面俱到,强调物理概念不拘泥于严格的数学演算。

本书是由武汉无线电工业学校编写的。参加编写工作的有:胡炎山(第一章和第六章)、王金明(第十章和附录一)和陈继生(其余各章)。陈继生任主编并最后定稿。

本书由大连电子技术学校张绪华老师主审。

南京工学院谢洪隲老师、常州无线电工业学校戴德霖老师、福建电子工业学校潘平仲老师、上海电子技术学校吴汉森老师和贵州无线电工业学校郭勇老师审阅了本书的初稿并提出了许多宝贵的意见。电子工业部中专教材编审委员会(电类)无线电技术编审小组的各位编委也给予了许多具体的指导。我们在此谨对上述这些同志表示深切的谢意。

由于编者的水平所限,书中定会有许多错误和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

编者

1985年8月

## 本书常用符号表

- $A$  放大器;二极管的阳极(正极)。  
 $\dot{A}$  放大器增益(放大倍数,下同)。  
 $A(t)$  幅度变化函数。  
 $\dot{A}_f$  负反馈放大器闭环增益。  
 $\dot{A}_o$  基本放大器输出端开路时增益。  
 $\dot{A}_s$  基本放大器输出端短路时增益;基本放大器源增益。  
 $\dot{A}_g$  基本放大器互导增益。  
 $\dot{A}_i$  基本放大器电流增益。  
 $\dot{A}_r$  基本放大器互阻增益。  
 $\dot{A}_u$  基本放大器电压增益。  
 $\dot{A}_{uof}, \dot{A}_{uo}$  放大器有、无反馈时源电压增益<sup>①</sup>。  
 $\dot{A}_{uh}$  基本放大器高频电压增益。  
 $\dot{A}_{ul}$  基本放大器中频电压增益。  
 $\dot{A}_{uL}$  基本放大器低频电压增益。  
 $\dot{A}_{uo}$  基本放大器输出端开路时电压增益;谐振放大器谐振时电压增益;低频电压传输函数。  
 $\dot{A}_{uoo}$  基本放大器输出端开路时源电压增益。  
 $\dot{A}_{ios}$  基本放大器输出端短路时源电流增益。  
 $\dot{A}_{uc}$  共模电压增益。  
 $\dot{A}_{ud}$  差模电压增益。  
 $B$  晶体管的基极;衬底。  
 $B'$  晶体管的有效基极。  
 $BW$  频带宽度;频谱宽度。  
 $C$  电容。  
 $C$  晶体管的集电极。  
 $C_{b'e}, C_{b'c}$  晶体管极间电容。  
 $C_C, C_E, C_B$  晶体管电路隔直(耦合或旁路)电容。  
 $C_D$  扩散电容。  
 $C_G, C_S$  场效应管电路隔直(耦合或旁路)电容。  
 $C_{gs}, C_{gd}, C_{ds}$  场效应管极间电容。  
 $C_i, C_o$  输入电容和输出电容。  
 $C_j$  结电容。  
 $C_L$  负载电容。  
 $C_M$  密勒等效电容。  
 $C_{ie}, C_{oe}$  共射组态输入和输出电容。  
 $C_T$  势垒电容。  
 $D$  二极管;场效应管的漏极。  
 $D$  反馈深度;占空比。  
 $D_Z$  稳压二极管  
 $E$  晶体管的发射极  
 $e$  电子电荷量。  
 $F$  调制信号频率  
 $F$  反馈系数,分别标以下标  $g, i, r, u$  时相应为互导反馈系数、电流反馈系数、互阻反馈系数和电压反馈系数。  
 $f$  频率。  
 $f_c$  载波频率。  
 $f_g$  增益交界频率;中频频率。  
 $f_H$  放大器上限频率。  
 $f_L$  放大器下限频率;本振频率。  
 $f_{hfe}, f_{hb}$  晶体管共射截止频率和共基截止频率。  
 $f_{max}$  最高振荡频率;最高工作频率。  
 $f_0$  中心频率;回路固有谐振频率。  
 $f_p$  并联谐振频率;转折频率。  
 $f_s$  串联谐振频率;信号频率。  
 $f_T$  晶体管特征频率。  
 $f_\varphi$  相位交界频率。  
 $G$  电导。  
 $G$  场效应管的栅极。  
 $g$  微变电导。  
 $G \cdot BW$  增益带宽积。  
 $G_m$  等效跨导;增益裕度。  
 $G_p$  放大器功率增益。  
 $g_D$  鉴频灵敏度。

- $g_m$  微变跨导。  
 $g_{mb}$  背栅跨导。  
 $g_m(t)$  时变跨导。  
 $h_{ie}$  共发射极小信号短路输入阻抗(电阻)。  
 $h_{re}$  共发射极小信号开路电压反馈系数。  
 $h_{fe}$  共发射极小信号短路电流放大系数。  
 $h_{oe}$  共发射极小信号开路输出导纳(电导)。  
 $I, i$  电流<sup>②</sup>。  
 $I_f$  反馈电流。  
 $I_i$  输入电流。  
 $I_{IB}$  输入偏置电流。  
 $I_{IO}$  输入失调电流。  
 $I_o$  输出电流。  
 $I_o'$  试验电流。  
 $I_{OM}$  最大输出电流。  
 $I_{OO}$  输出失调电流。  
 $I_{os}$  输出短路电流。  
 $I_L$  负载电流。  
 $I_Q$  静态工作点电流。  
 $I_{REF}$  参考电流。  
 $I_s$  信号源电流。  
 $I_S$  反向饱和电流。  
 $K$  热力学温度的单位(开尔文);二极管的阴极(负极)。  
 $K$  乘积系数。  
 $k$  玻耳兹曼常数;导电因子;耦合系数。  
 $K_{CMR}$  共模抑制比。  
 $K_{(np)}$  脉动系数。  
 $K_{SVR}$  电源电压抑制比。  
 $k_f, k_p$  调频灵敏度和调相灵敏度。  
 $L$  自感系数;电感。  
 $l$  长度。  
 $M$  互感系数;乘法器。  
 $m$  变容二极管电容调制度。  
 $m_a, m_f, m_p$  调幅、调频、调相的调制系数。  
 $N$  绕组匝数。  
 $N$  电子型半导体。  
 $n$  变压比;取样比;接入系数;变容管的变容指数。  
 $N_a, N_d$  受主杂质浓度和施主杂质浓度。  
 $NF$  噪声系数。  
 $n_0$  热平衡状态下自由电子浓度。  
 $P$  功率。  
 $P$  空穴型半导体。  
 $P_C$  集电极耗散功率;载波功率。  
 $P_{CM}$  集电极最大耗散功率。  
 $P_{dc}$  直流电源提供功率。  
 $P_i, P_o$  输入功率和输出功率。  
 $P_L$  负载获得的功率。  
 $P_{\Omega}$  边频功率。  
 $p_0$  热平衡状态下空穴浓度。  
 $Q$  静态工作点。  
 $Q_e$  回路有载品质因素。  
 $Q_0$  回路空载品质因素。  
 $q_e$  电荷。  
 $R$  电阻(直流电阻或静态电阻)  
 $R_B, R_C, R_E$  基极、集电极、发射极电阻。  
 $R_G, R_D, R_S$  栅极、漏极、源极电阻。  
 $R_{EE}$  发射极稳流电阻。  
 $R_f$  反馈电阻。  
 $R_L$  负载电阻。  
 $R_L$  等效负载电阻。  
 $R_P, R_N$  集成运放同相输入端和反相输入端外接电阻。  
 $R_S$  信号源内阻。  
 $R_W$  可变电阻。  
 $R_{th}$  热阻。  
 $r$  微变电阻(交流电阻或动态电阻)  
 $r_{bb'}, r_{cc}, r_{ee}$  晶体管各区体电阻。  
 $r_e$  发射结电阻。  
 $r_{b'e}$  折算到基极回路的发射结电阻。  
 $r_{oe}$  晶体管的输出电阻。  
 $R_i, R_o$  放大器的输入电阻和输出电阻。  
 $R_i'$  不包括偏置电阻的放大器输入电阻。  
 $R_o'$  不包括集电极(或发射极)负载电阻的放大器输出电阻。  
 $R_i$  包括信号源内阻在内的放大器输入电阻。  
 $R_{if}, R_{of}$  反馈放大器的输入电阻和输出电阻。  
 $R_K$  回路并联谐振电阻。

RFC 高频扼流圈。

S 开关;场效应管的源极。

$S/N$  信噪比。

$S_R$  转换速率。

$S_{(np)}$  纹波因数。

$S_T$  输出电压温度变化率。

$S_u$  稳压系数。

$T$  周期;温度

$T$  晶体管。

$T$  环路传输系数。

$t$  时间。

THD 非线性失真系数。

Tr 变压器。

$U, u$  电压<sup>①</sup>。

$U_f$  反馈电压。

$U_i, U_o$  输入电压和输出电压。

$U_{ID}, U_{IC}$  差模输入电压和共模输入电压。

$U_{IO}$  输入失调电压。

$U_{\infty}$  输出端漂移电压。

$U_{\infty}$  开路输出电压。

$U_o$  试验电压。

$U_Q$  静态工作点电压。

$U_s$  信号源电压。

$U_{REF}$  参考电压,基准电压。

$U_T$  温度电压当量。

$U_+, U_-$  同相输入端电压和反相输入端电压。

$U_{(th)}, U_{(on)}$  门限电压和导通电压。

$U_{(BR)}$  反向击穿电压。

$u_a(t)$  调制信号电压瞬时值。

$u_c(t)$  载波电压瞬时值。

$u_s(t)$  信号电压瞬时值。

$u_g(t)$  中频电压瞬时值。

$u_L(t)$  本振电压瞬时值。

$V_{CC}, V_{EE}, V_{BB}$  晶体管电路外接电源电压。

$V_{DD}, V_{GG}, V_{SS}$  场效应管电路外接电源电压。

$W$  宽度。

$X, x$  电抗;反馈电路中的信号量。

$Y$  导纳。

$Z$  阻抗。

$\alpha_{I_{IO}}$  输入失调电流温度系数。

$\alpha_{U_{IO}}$  输入失调电压温度系数。

$\alpha$  共基极电流放大系数。

$\beta$  共发射极电流放大系数。

$\delta$  倾斜率。

$\zeta$  一般失谐量。

$\eta$  效率;跨导比。

$\theta$  导电角。

$\lambda$  波长。

$\tau$  时间常数。

$\varphi$  相角。

$\phi$  时钟脉冲。

$\phi_m$  相位裕度。

$\Omega$  调制信号角频率。

$\omega$  角频率。

①放大器有、无反馈时电流增益、互阻增益、互导增益的表示方法与电压增益的表示方法类同。

②大写字母  $I$  表示:直流值(恒定值)、最大值(峰值)、平均值、均方根值(有效值)。小写字母  $i$  表示随时间变化的瞬时值。直流和包含直流分量的瞬时值采用大写字母下标,交流分量采用小写字母下标。以晶体管基极电流为例,表示如下:

$I_B$  大写字母、大写下标表示基极直流电流。

$I_b$  大写字母、小写下标表示基极正弦电流均方根值(有效值)。

$i_B$  小写字母、大写下标表示包含有直流分量的基极电流瞬时值。

$i_b$  小写字母、小写下标表示基极交流分量电流瞬时值。

$I_b$  表示基极正弦电流复数值。

$I_{BQ}$  表示基极静态工作点电流。

$I_{bm}$  表示基极正弦电流最大值。

$I_{b(av)}$  表示基极交变电流平均值。

$\Delta I_B$  表示基极直流电流变化量。

$\Delta i_B$  表示基极瞬时电流变化量。

③  $U, u$  的各种不同表示方法与  $I, i$  的表示方法类同。

# 目 录

|                           |    |                          |     |
|---------------------------|----|--------------------------|-----|
| 绪论 .....                  | 1  | 2.3.1 常见的分立偏置电路 .....    | 57  |
| 第 1 章 半导体二极管和三极管 .....    | 4  | 2.3.2 常见的集成偏置电路 .....    | 61  |
| § 1.1 半导体的基本知识 .....      | 4  | § 2.4 放大器的微变等效电路分析       |     |
| 1.1.1 本征半导体的原子结构和本征       |    | 法 .....                  | 65  |
| 激发 .....                  | 4  | 2.4.1 晶体管的微变等效电路 .....   | 65  |
| 1.1.2 杂质半导体 .....         | 6  | 2.4.2 用微变等效电路分析放大器 ..... | 70  |
| 1.1.3 半导体中的漂移电流和扩散电       |    | § 2.5 多级放大器 .....        | 81  |
| 流 .....                   | 8  | 2.5.1 多级放大器需要考虑的问题 ..... | 82  |
| § 1.2 PN 结的基本特性 .....     | 9  | 2.5.2 多级放大器的电压增益 .....   | 86  |
| 1.2.1 动态平衡下的 PN 结 .....   | 9  | § 2.6 差动放大器 .....        | 90  |
| 1.2.2 PN 结的单向导电性 .....    | 10 | 2.6.1 差动放大器的工作原理 .....   | 90  |
| 1.2.3 PN 结的击穿特性 .....     | 12 | 2.6.2 差动放大器基本性能分析 .....  | 91  |
| 1.2.4 PN 结的电容效应 .....     | 13 | 2.6.3 其它形式的差动放大器 .....   | 99  |
| § 1.3 半导体二极管的基本特性 .....   | 14 | 2.6.4 差动放大器的调零电路 .....   | 103 |
| 1.3.1 二极管的伏安特性 .....      | 15 | § 2.7 有源负载放大器 .....      | 105 |
| 1.3.2 二极管的主要参数 .....      | 16 | 2.7.1 有源负载共射放大器 .....    | 105 |
| 1.3.3 二极管的等效电路 .....      | 17 | 2.7.2 有源负载差动放大器 .....    | 106 |
| 1.3.4 特殊二极管简介 .....       | 20 | * 2.7.3 有源负载射随器 .....    | 107 |
| § 1.4 半导体三极管的基本特性 .....   | 22 | 本章小结 .....               | 108 |
| 1.4.1 晶体管的基本结构和电路符号 ..... | 23 | 习题 .....                 | 110 |
| 1.4.2 晶体管的工作原理 .....      | 24 | 第 3 章 场效应管放大器 .....      | 126 |
| 1.4.3 晶体管共射特性曲线 .....     | 27 | § 3.1 结型场效应管的基本特性 .....  | 126 |
| 1.4.4 晶体管的主要参数 .....      | 30 | 3.1.1 结型场效应管的基本结构和工作     |     |
| 本章小结 .....                | 35 | 原理 .....                 | 126 |
| 习题 .....                  | 35 | 3.1.2 伏安特性曲线 .....       | 129 |
| 第 2 章 放大电路基础 .....        | 41 | § 3.2 绝缘栅场效应管的基本特性 ..... | 131 |
| § 2.1 放大器的基本概念 .....      | 41 | 3.2.1 N 沟道增强型 MOS 管的工作   |     |
| 2.1.1 放大器的主要性能指标 .....    | 41 | 原理和伏安特性 .....            | 131 |
| 2.1.2 放大器的工作原理 .....      | 44 | 3.2.2 其它类型的绝缘栅场效应管 ..... | 135 |
| 2.1.3 最简单的放大器 .....       | 45 | § 3.3 场效应管的主要参数、场效       |     |
| § 2.2 放大器的图解分析法 .....     | 48 | 应管与双极型晶体管之比较 .....       | 138 |
| 2.2.1 静态工作点图解过程 .....     | 48 | 3.3.1 场效应管的主要参数 .....    | 138 |
| 2.2.2 动态工作时的图解过程 .....    | 50 | 3.3.2 场效应管与双极型晶体管之比较     |     |
| 2.2.3 波形失真与静态工作点的关系 ..... | 53 | .....                    | 140 |
| § 2.3 晶体管放大器的偏置电路 .....   | 54 | § 3.4 场效应管放大器的基本电路       |     |

|                                       |     |                                    |     |
|---------------------------------------|-----|------------------------------------|-----|
| 组态 .....                              | 141 | <b>第 5 章 负反馈放大器</b> .....          | 195 |
| 3.4.1 场效应管放大器的偏置电路 .....              | 141 | § 5.1 负反馈的基本概念与分类 .....            | 195 |
| 3.4.2 场效应管的微变等效电路 .....               | 144 | 5.1.1 反馈的基本概念 .....                | 195 |
| 3.4.3 场效应管共源、共栅、共漏放大器 .....           | 145 | 5.1.2 负反馈放大器的分类 .....              | 199 |
| 3.4.4 场效应管差动放大器 .....                 | 148 | § 5.2 负反馈放大器的方框图和增益的一般表达式 .....    | 204 |
| * § 3.5 使用有源负载的场效应管放大器 .....          | 149 | 5.2.1 负反馈放大器的方框图 .....             | 204 |
| 3.5.1 场效应管恒流源电路 .....                 | 149 | 5.2.2 负反馈放大器增益的一般表达式 .....         | 204 |
| 3.5.2 使用有源负载的 MOS 管共源放大器 .....        | 151 | § 5.3 负反馈对放大器性能的影响 .....           | 205 |
| 3.5.3 使用有源负载的 MOS 管差动放大器 .....        | 153 | 5.3.1 提高增益的稳定性 .....               | 205 |
| 本章小结 .....                            | 154 | 5.3.2 减小非线性失真 .....                | 206 |
| 习题 .....                              | 155 | 5.3.3 扩展通频带 .....                  | 208 |
| <b>第 4 章 集成运算放大器</b> .....            | 163 | 5.3.4 改变输入电阻和输出电阻 .....            | 209 |
| § 4.1 概述 .....                        | 163 | § 5.4 负反馈放大器的分析方法 .....            | 212 |
| 4.1.1 集成电路的主要类型和集成运算放大器的发展与应用概况 ..... | 163 | 5.4.1 深度负反馈条件下闭环源电压增益的间接计算法 .....  | 213 |
| 4.1.2 半导体集成电路中元、器件的特点 .....           | 164 | 5.4.2 利用虚短和虚断概念直接计算源电压增益 .....     | 216 |
| 4.1.3 集成运算放大器的基本组成部分 .....            | 169 | 本章小结 .....                         | 219 |
| § 4.2 典型集成运算放大器电路分析举例 .....           | 170 | 习题 .....                           | 219 |
| 4.2.1 F007 双极型集成运算放大器 .....           | 170 | <b>第 6 章 放大器的频率响应和稳定性</b> .....    | 228 |
| * 4.2.2 CH4573 CMOS 集成运算放大器简介 .....   | 177 | § 6.1 简单 RC 电路的频率响应和晶体管的频率参数 ..... | 230 |
| 4.2.3 集成运算放大器的电路符号和理想集成运算放大器的特点 ..... | 178 | 6.1.1 RC 低通电路的高频响应 .....           | 230 |
| § 4.3 集成运算放大器的主要参数 .....              | 179 | 6.1.2 RC 高通电路的低频响应 .....           | 231 |
| § 4.4 集成运算放大器的使用常识 .....              | 181 | 6.1.3 晶体管的频率参数和密勒电容 .....          | 233 |
| 4.4.1 使用前的准备工作 .....                  | 181 | § 6.2 单级 RC 放大器的频率响应 .....         | 237 |
| 4.4.2 扩展集成运算放大器功能的方法 .....            | 183 | 6.2.1 单级 RC 共射放大器的高频响应 .....       | 238 |
| 4.4.3 集成运算放大器的保护措施 .....              | 186 | 6.2.2 单级 RC 共射放大器的低频响应 .....       | 239 |
| 4.4.4 使用集成运算放大器可能出现的其它异常现象 .....      | 189 | 6.2.3 共基、共集放大器的高频响应 .....          | 244 |
| 本章小结 .....                            | 189 | § 6.3 多级放大器的频率响应 .....             | 247 |
| 习题 .....                              | 190 | 6.3.1 多级 RC 共射放大器频率响应的一般问题 .....   | 248 |
| · 2 ·                                 |     | * 6.3.2 集成运算放大器的频率响应 .....         | 250 |
|                                       |     | * 6.3.3 负反馈放大器的频率响应 .....          | 252 |
|                                       |     | § 6.4 集成宽频带放大器和展宽放大器通频带的方法 .....   | 254 |

|                                 |     |                              |     |
|---------------------------------|-----|------------------------------|-----|
| 6.4.1 采用组合电路的宽频带放大器 .....       | 254 | 8.3.3 交越失真和电路的改进 .....       | 332 |
| 6.4.2 引入负反馈的宽频带放大器 .....        | 256 | 8.3.4 OTL 电路 .....           | 336 |
| 6.4.3 采用高频补偿的宽频带放大器 .....       | 259 | 8.3.5 OCL 电路 .....           | 340 |
| § 6.5 负反馈放大器的稳定性 .....          | 261 | * 8.3.6 BTL 电路 .....         | 342 |
| 6.5.1 负反馈放大器稳定工作条件 .....        | 262 | § 8.4 集成功率放大器 .....          | 344 |
| 6.5.2 稳定性的波特图分析法 .....          | 263 | 8.4.1 4100 系列集成音频功率放大器 ..... | 344 |
| 6.5.3 集成运算放大器的相位补偿 .....        | 266 | 8.4.2 集成功率放大器的应用电路 .....     | 345 |
| § 6.6 放大器中的干扰及其抑制               |     | * § 8.5 变压器耦合功率放大器 .....     | 347 |
| 方法 .....                        | 273 | 8.5.1 变压器的阻抗变换作用 .....       | 348 |
| 本章小结 .....                      | 275 | 8.5.2 变压器耦合功率放大器 .....       | 348 |
| 习题 .....                        | 276 | § 8.6 功率管的安全使用与散热 .....      | 351 |
| <b>第 7 章 集成运算放大器的应用电路</b> ..... | 282 | 8.6.1 功率管的热致击穿与散热 .....      | 351 |
| § 7.1 基本运算放大器 .....             | 282 | 8.6.2 功率管的二次击穿与安全使用 .....    | 354 |
| 7.1.1 反相输入组态 .....              | 282 | 本章小结 .....                   | 355 |
| 7.1.2 同相输入组态 .....              | 283 | 习题 .....                     | 356 |
| 7.1.3 差动输入组态 .....              | 284 | <b>第 9 章 直流稳压电源</b> .....    | 365 |
| § 7.2 运算电路 .....                | 286 | § 9.1 整流与滤波电路 .....          | 365 |
| 7.2.1 加法和减法运算电路 .....           | 286 | 9.1.1 单相桥式整流电路 .....         | 365 |
| 7.2.2 微分和积分运算电路 .....           | 289 | 9.1.2 滤波电路 .....             | 368 |
| * 7.2.3 对数和指数运算电路 .....         | 291 | * 9.1.3 倍压整流电路 .....         | 375 |
| * 7.2.4 模拟乘法器及其应用 .....         | 292 | § 9.2 硅稳压管稳压电路 .....         | 376 |
| § 7.3 有源滤波器 .....               | 297 | 9.2.1 稳压电路的主要质量指标 .....      | 377 |
| 7.3.1 RC 有源滤波器 .....            | 297 | 9.2.2 硅稳压管稳压电路 .....         | 377 |
| * 7.3.2 开关电容滤波器 .....           | 303 | § 9.3 串联型稳压电路 .....          | 380 |
| § 7.4 电压比较器 .....               | 306 | 9.3.1 串联型稳压电路的组成和工作          |     |
| 7.4.1 单限比较器 .....               | 306 | 原理 .....                     | 380 |
| 7.4.2 迟滞比较器 .....               | 308 | 9.3.2 串联型稳压电路性能指标分析 .....    | 381 |
| § 7.5 波形产生器 .....               | 309 | 9.3.3 串联型稳压电路中的保护电路 .....    | 385 |
| 7.5.1 方波和矩形波产生器 .....           | 310 | 9.3.4 使用集成运算放大器作比较放          |     |
| * 7.5.2 三角波和锯齿波产生器 .....        | 312 | 大器的稳压电路 .....                | 387 |
| 本章小结 .....                      | 314 | § 9.4 三端集成稳压器 .....          | 389 |
| 习题 .....                        | 315 | 9.4.1 三端式集成稳压器的的工作原理 .....   | 390 |
| <b>第 8 章 低频功率放大器</b> .....      | 327 | 9.4.2 W7800 系列产品应用电路举例 ..... | 392 |
| § 8.1 概述 .....                  | 327 | § 9.5 开关稳压电路 .....           | 394 |
| 8.1.1 功率放大器的特点 .....            | 327 | 9.5.1 他激式开关稳压电路的工作原理         |     |
| 8.1.2 功率放大器的分类 .....            | 328 | .....                        | 394 |
| § 8.2 大信号下的射极输出器 .....          | 329 | * 9.5.2 自激式开关稳压电路 .....      | 397 |
| § 8.3 互补对称功率放大器 .....           | 331 | 本章小结 .....                   | 399 |
| 8.3.1 乙类互补对称电路的工作原理 .....       | 331 | 习题 .....                     | 400 |
| 8.3.2 互补对称电路的输出功率和效率            |     |                              |     |

|                                      |     |                                        |     |
|--------------------------------------|-----|----------------------------------------|-----|
| <b>第 10 章 正弦波振荡器</b> .....           | 407 | 10.6.3 振荡的建立与稳定 .....                  | 436 |
| § 10.1 反馈式正弦波振荡器的工作原理 .....          | 407 | 本章小结 .....                             | 437 |
| * 10.1.1 LC 单调谐放大器 .....             | 408 | 习题 .....                               | 438 |
| 10.1.2 反馈式振荡器的平衡条件和起振条件 .....        | 411 | <b>第 11 章 调制与解调</b> .....              | 447 |
| § 10.2 变压器反馈式 LC 振荡器 .....           | 412 | § 11.1 概述 .....                        | 447 |
| 10.2.1 变压器反馈式 LC 晶体管振荡器 .....        | 412 | 11.1.1 调制的目的和种类 .....                  | 447 |
| 10.2.2 变压器反馈式差动对管振荡器和场效应管振荡器 .....   | 414 | 11.1.2 调幅波和调角波的基本特性 .....              | 448 |
| § 10.3 三点式 LC 振荡器 .....              | 415 | § 11.2 振幅调制及解调 .....                   | 454 |
| 10.3.1 相位平衡条件的判断准则 .....             | 415 | 11.2.1 振幅调制电路 .....                    | 454 |
| 10.3.2 三点式振荡器的起振条件和振荡频率 .....        | 416 | 11.2.2 振幅调制的解调电路 .....                 | 459 |
| 10.3.3 改进型电容反馈三点式振荡器 .....           | 420 | § 11.3 角度调制及解调 .....                   | 466 |
| 10.3.4 由场效应管和集成运算放大器所构成的三点式振荡器 ..... | 423 | 11.3.1 实现频率调制的方法与电路 .....              | 467 |
| § 10.4 振荡器的频率稳定问题 .....              | 423 | 11.3.2 调频波的解调 .....                    | 471 |
| 10.4.1 频率的准确度和频率稳定度 .....            | 423 | § 11.4 调幅收音机分析举例 .....                 | 481 |
| 10.4.2 振荡频率的稳定过程和造成振荡频率不稳定的原因 .....  | 424 | 11.4.1 超外差式收音机的工作原理 .....              | 481 |
| 10.4.3 主要稳频措施 .....                  | 426 | 11.4.2 超外差式收音机各组成电路 .....              | 483 |
| § 10.5 晶体振荡器 .....                   | 427 | 本章小结 .....                             | 487 |
| 10.5.1 石英谐振器 .....                   | 427 | 习题 .....                               | 488 |
| 10.5.2 晶体振荡器电路 .....                 | 431 | 附录 I 半导体器件型号命名方法 (国家标准 GB249-74) ..... | 495 |
| § 10.6 RC 桥式振荡器 .....                | 434 | 附录 II 部分常用国产半导体器件的主要参数 .....           | 497 |
| 10.6.1 文氏桥振荡器的原理电路 .....             | 434 | 附录 III 部分国产集成运算放大器的主要参数 .....          | 502 |
| 10.6.2 RC 串并网络的选频特性 .....            | 435 | <b>参考书目</b> .....                      | 503 |
|                                      |     | <b>部分习题参考答案</b> .....                  | 504 |
|                                      |     | <b>本书中主要名词术语(汉英对照)</b> .....           | 516 |

# 绪 论

## 一、电子技术发展与应用概况

电子技术最早应用于通信方面。随着电子科学技术不断发展,尤其是在最近几年来,以信息科学技术为中心的包括计算机技术、遗传工程、光电子技术、军事电子学、生物电子学、新型材料、新的能源、海洋开发等新兴技术群的兴起,引起了人类从生产到生活各个方面的巨大变革。电子技术是新兴技术群中高科技的“龙头”,它的发展带动新兴技术群的发展。因此,在现今世界上,没有一个国家不是把发展电子技术摆在优先地位的。

进行科学研究,先进的科学仪器离不开电子技术。电子计算机更是科研人员进行科学计算、数据存储、辅助设计的得力助手。电子技术同其它工业相结合,将开发出一系列新产品。如电子技术同机械技术相结合引起机械工业巨大变革就是明证。手表和计算机原来都是机械产品,应用电子技术后就产生了全电子产品。后者不但精度高,质量好,而且价格便宜。电子计算机的运算速度和具有的丰富功能是机械计算机无法与之比拟的。电子技术应用于机床,使机床的加工精度大大提高,性能价格比产生质的飞跃。在军事上,现代军事装备也离不开电子技术。电子制导武器的出现除明显地增加了武器反应速度和杀伤破坏力以外,还大大提高了命中目标的准确性。实施电子侦察和电子干扰更与电子技术密不可分。建立以电子计算机为核心的通信、情报、控制和指挥系统,被认为是继核武器、战略导弹之后的军事上的第三次革命。这个系统的应用对于提高作战能力、掌握战场动态信息、夺取战争的主动权具有极其重要意义。以电子计算机为核心的信息科学技术应用于核能开发,将使系统设计更为合理;将它用于电站建设和电网调度,可实现合理建站和使电网保持为最佳状态,将它用于石油和煤田等地质勘探,可以做到省能源、省资源;将它用于交通管理,不仅可以大大改善车站、码头、机场的调度能力,而且还可以大大提高营运系统的效益;将它用于钢铁冶炼,既能节省原料、燃料,又能缩短冶炼时间和提高冶炼质量;将它用于企业管理,可大大提高经济效益;将它用于气象及病虫害预报,可提高预报的准确性,以便及时采取相应措施。总之,信息科学不仅广泛地应用于研究、工程、国防、工农业生产,而且广泛地应用于系统管理,渗透到国民经济的各个领域。

信息科学技术与电子技术密切相关。只有当信息的收集、存储、传送、处理和应用都采用电子技术,信息才能发挥空前的作用。正是电子技术的应用,使人们得以观察到小至原子量级的微观物体和远至几百光年之外的天体,使人们突破了时间和空间的局限性,建起了世界性的通信网,它帮助人们在物质生产和社会管理中及时掌握以往难以想像的丰富的信息资源。

电子技术每一新的进展与突破,是和电子器件的改进与创新分不开的。自1904年和1906年相继发明真空二极管和真空三极管以来,20世纪前50年是真空管或电子管年代,所有电子产品都是由真空管器件组成的。1948年发明晶体管以后,20世纪后50年即进入了晶体管和集成电路年代。晶体管的广泛使用,开创了电子设备朝小型化、微型化方向发展的新局面,到集成电路出现以后,这方面的发展才得以突飞猛进。

集成电路是本世纪60年代发展起来的。它的出现打破了由分立元件组成电路的传统观念,

使电子技术的发展与应用产生了新的突破。由于集成电路是在一小块硅片上同时制成许多晶体管和电阻、电容等元、器件,并按电路功能连接而成的固体组件,所以外接元件少;可靠性高,便于安装与调试。而且集成度以每 10 年以 100 倍的速度提高的同时,产品价格却按直线下降,因而它的应用范围迅速扩大。集成电路已从 60~70 年代的小、中规模进入 80~90 年代的大规模和超大规模。差不多每隔十年创新一代产品。目前,当双极型集成电路向更超大规模、高速度、多功能、低功耗、宽频带、高电压、大功率等方面迅速发展的同时,CMOS 集成电路也发展很快。未来 10 年中,双极和 CMOS 兼容技术将成为集成电路发展方向的主流。

随着集成度的迅速提高,加工线宽将受到限制,用于大规模、超大规模集成电路平面制造工艺的加工线宽已减到 $(0.5\sim 0.1)\mu\text{m}$ 。已接近微细加工技术的极限,现有技术很难逾越这一障碍。集成电路高速发展的势头将受到抑制。面对这种情况,寻找新的信息载体以取代目前以硅材料为主的半导体器件,是电子技术发展的新课题。世界上各发展国家现已建立起一门新的电子学即分子电子学,着手研制分子电子器件。

## 二、课程的性质和任务

“电子线路”是中专工科电子、通信类专业的主要技术基础课,是一门实践性很强的课程。在专业课程中具有承上启下的重要作用。学生通过本课程的学习,应了解常见电子器件的内部机理,掌握其外部特性和主要参数,深刻理解并掌握各种模拟单元电路的基本工作原理和基本分析方法,具备必要的工程估算能力和基本的实验技能。结合课程教学,培养学生自学能力和独立工作能力,特别是分析问题和解决问题的能力。为学生学习后续课程和将来从事电子技术工作并能适应新技术发展的要求打好基础。

任何电子设备(整机)都是由若干个单元电路所组成的系统。单元电路的基本功能为传输和处理信号。所谓信号是指包含有信息的随时间变化的电流或电压。根据信号的方式不同,基本单元电路分为模拟电子线路和数字电路两类。在时间上和数量上取值连续变化的信号是模拟信号。传输和处理模拟信号的电路是模拟电子线路,简称模拟电路。在时间上和数量上取值不连续的信号统称为数字电路,传输和处理数字信号的电路是数字电路。整机分析是专业课要解决的问题,单元电路则是技术基础课研究的对象。在若干门技术基础课中,“电子线路”主要分析和讨论模拟单元电子线路,研究模拟信号的产生、放大、变换和比较等的过程和原理。

基础课(电工学)所学知识是学习“电子线路”的基础。模拟电子线路与电工学所学电路既有区别又有联系。共同点是它们都遵从电路的基本定律和定理,不同点是电子线路中引入了各种电子器件。由于电子器件的输出信号受输入信号的控制和流过电子器件的电流与其端电压的关系不是线性的。我们将这两个特性称之为有源器件的可控性和非线性。针对电子器件可控性和非线性,“电子线路”有不同于一般电路的分析方法,如静态工作点估算法、图解分析法、微变等效电路分析法、反馈分析法、运算放大器虚短分析法等。掌握基本的模拟单元电路如共射放大器、共基放大器、共集放大器、差动放大器、反馈放大器、同相运算放大器、反相运算放大器、振荡电路、调制解调器和稳压电路等的工作原理和基本分析方法是电子线路课程的主要任务。

由于电子线路的技术基础课程性质,它为后续课程准备了一些典型的、已经广泛使用的系统知识。掌握了这些具有普遍意义的基本内容,不仅可以减少与后续课程内容的重复,提高效率。而且还能学习和吸取新知识以适应科技发展需要奠定基础。

## 三、课程的特点及相应的学习方法

模拟电子线路是包含电子器件的电路。对电子器件侧重讨论它们的外特性和功能,对其内部导电机理不进行深入探讨,只要能达到根据电路要求会选用电子器件就可以了。对电子电路则着重阐述模拟基本单元电路的特性及其基本分析方法。要明了学习电子器件的目的是为学习电子线路服务的,学习电子线路则是为学习后续课程和今后从事电子技术工作打好基础。电子技术发展到今天,集成电路已占主导地位,分立电路正逐渐被集成电路取代。因此,对那些只在分立电路中出现而在集成电路中不被采用的内容只作一般了解就行了,对分立电路和集成电路相同的内容则应加强。即重点讨论以集成运放为主的模拟集成电路的功能和应用。这是学习本课程必须注意的第一个特点。

其次,电子器件具有非线性,流过器件的电流与其端电压之间变化特性呈非线性关系,不满足欧姆定律和叠加原理。一般地说,随着工作点不同,它的参数具有不同数值。但是,对电路进行分析与计算时,可从实际情况出发,只考虑影响电路的主要因素,忽略次要因素,采用工程观点进行合理近似,而不追求精确的分析和严格的数学计算。这样的工程估算方法,不仅简便易行,而且能得到工程上满意的结果。例如,在分析由二极管所组成的功能电路时,二极管的非线性主要表现在单向导电性上,而导通后伏安特性的非线性是第二位的。因此,可用折线线段来逼近实际的伏安特性,从而可将非线性的二极管当作线性器件处理。在讨论晶体管小信号放大器时,通过调整静态工作点,可将小信号范围内的晶体管特性曲线用直线线段代替,从而可采用线性电路分析方法对放大器进行分析与计算。在讨论由晶体管所组成的频率变换电路时,着重考虑晶体管非线性电阻特性,而对其非线性电容特性则不予考虑。根据具体情况做必要近似忽略后,就能得到晶体管合理的近似数学模型,以使用简单的分析方法获得具有实际意义的结果,概念清晰,易于掌握。这是学习本课程必须注意的第二个特点。

第三,电子线路实现各种功能的电路形式虽然很多,但它们毕竟都是在为数不多的基本电路上发展起来的。例如,多级放大器和组合放大器不外乎是共射、共基、共集放大器等基本组态按一定规律的级联。集成运算放大器的输入级几乎毫不例外地都是差动放大器或者它的变形电路;集成运放的输出级差不多全都采用射极输出级形式。负反馈放大器和振荡器都可以看作是由基本放大器和反馈网络组成的。二者之间主要差别在于反馈的极性不同,前者利用负反馈改善放大器的性能,后者利用正反馈产生振荡。振幅调制、检波和变频电路都是频谱的线性搬移电路,都能用乘法器来实现。不同点只是输入信号频率、参考电压频率以及相应的输出信号频率的差异。因此,在学习本课程时,不要满足于只了解一个具体电路的工作原理,而要致力于洞悉各种功能电路的内在联系、实现各种基本电路原理以及由此导出的基本电路结构。这是学习本课程必须注意的第三个特点。

第四,电子线路是在科学和生产实践中发展起来的,它不但有自身的理论体系,而且实践性也很强,课程中讲到的电路一般可以方便地在实验中真实地实现。通过实验既可加深学生对基本理论的理解,开阔学生思路,增强学习兴趣;又可以使学生学到实验技能、实际知识和电子仪器的使用方法,提高学生动手能力,分析问题和解决问题的能力。因此,学习本课程必须高度重视实验环节,坚持理论联系实际。这是学习本课程必须注意的第四个特点。

# 第 1 章 半导体二极管和三极管

半导体二极管和三极管广泛地应用于各种电子设备。本章研究它们的基本特性和基本工作原理。从半导体的基础知识开始,讲述半导体中载流子的产生和载流子的两种基本运动形式——扩散运动和漂移运动;分析构成半导体器件基础的 PN 结形成过程和基本特性。然后介绍半导体二极管和三极管的结构、基本工作原理、特性曲线和主要参数。

学习半导体二极管和三极管应遵循“管用为路”原则,重在器件外部特性和功能,对其内部的导电机理不宜进行过深的、过详细的探讨,只要求重点掌握它们的外部特性和参数,学会正确使用和合理选择管子,为分析电子电路打下基础。

## § 1.1 半导体的基本知识

在自然界各种物质中,按其导电能力区别,可分为导体、半导体和绝缘体三类。金属一般都是导体,它们很容易传导电流,电阻率通常小于  $10^{-3}\Omega\cdot\text{cm}$ ,如银、铜、铝等。也有一些几乎不传导电流的物质,称为绝缘体。它们的电阻率很高,一般大于  $10^9\Omega\cdot\text{cm}$ ,如云母、橡胶、陶瓷和塑料等。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质,其电阻率在  $(10^{-3}\sim 10^9)\Omega\cdot\text{cm}$  范围内。自然界中属于半导体的物质很多,如硅、锗、砷化镓,一些硫化物和氧化物等。但用来作为制造半导体器件的材料则以硅和锗最为普遍。

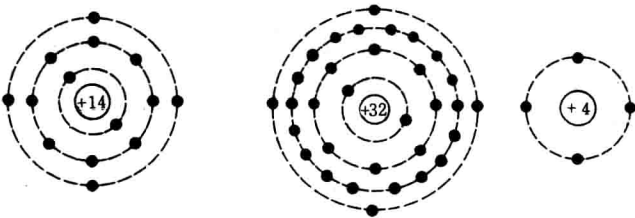
半导体除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,它还具有以下特点:导电能力受温度、杂质、光照等的影响很大。当半导体受到外界热或光的刺激时,其导电能力将发生显著变化;在纯净的半导体中掺入微量的杂质,其电阻率会显著减小。半导体之所以具备这些特点,是由于它的原子结构不同于其它物质的缘故。

### 1.1.1 本征半导体的原子结构和本征激发

众所周知,一切物质的原子都是由带正电荷的原子核和分层围绕原子核运动的电子所组成的,每个电子带有一个负电子电荷量,原子核所带的正电荷量正好与电子所带的负电荷量相等。物质在通常情况下呈中性。硅(Si)和锗(Ge)的原子结构模型分别如图 1-1(a)(b)所示,它们的最外层都有四个电子,由于这层电子受原子核的束缚力最小,故将它们称为价电子、物质的许多物理和化学性质都由价电子决定,导电性能也与价电子有关。为了简化起见,常常把内层电子和原子核看作一个整体,称为惯性核,惯性核周围是价电子。显然,硅和锗的惯性核模型是相同的。若用  $\oplus$  代表惯性核所带有的四个正电子电荷量,则硅和锗的惯性核模型如图 1-1(c)所示。

硅和锗都是晶体,在它们的单晶结构中,原子在空间排列成有规则的晶格,整块晶体内部晶格排列完全一致。单晶硅和单晶锗是制造半导体器件的基本材料。单晶结构是通过由价电子所组成的共价键把相邻的原子牢固地联系在一起而形成的。由于晶体中原子之间的距离很近,原来分属各个原子的价电子,不仅受到自身原子核的束缚,同时还要受到相邻原子核的吸引,使得每个原子的价电子不仅要围绕本身原子核运动,同时也出现在围绕相邻原子核的轨道上,即每相

邻的两个原子各拿出一个价电子为两个原子核所共有, 这样的“公共价电子对”所形成原子间相互作用力就是共价键。由此可见, 单晶结构中的每个原子都和四个相邻的原子构成四个共价键, 它们的最外层轨道上将出现八个价电子, 其中有四个价电子是该原子自身的, 其余四个价电子是相邻原子的。共价键结构示意图如图 1-2 所示。



(a) 硅原子结构模型 (b) 锗原子结构模型 (c) 简化模型  
图 1-1 硅(Si)和锗(Ge)的原子结构模型

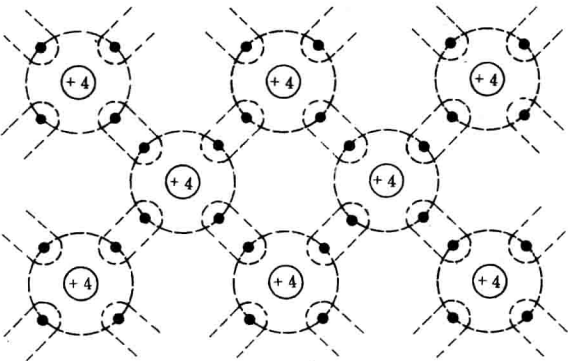


图 1-2 硅和锗的共价键结构示意图

完全纯净且晶格完整的半导体(硅或锗)称为本征型半导体(本征硅或本征锗)。由于本征半导体共价键上的价电子受到两个原子核引力的约束, 其束缚力很强, 如果没有足够的能量它们不容易脱离共价键。在热力学零度(即  $-273^{\circ}\text{C}$ ) 和无外界影响条件下, 价电子全都束缚在共价键上, 这时就不存在可以自由运动的带电粒子, 故不能导电, 这样的本征半导体相当于绝缘体。

但是, 当温度升高或受到光线照射时, 半导体的导电情况就要发生变化。在室温或光线较弱条件下, 少数共价键中的价电子能吸取足够热量或光最子的能量, 从而挣脱共价键的束缚, 离开原子而成为自由电子, 本征半导体就具有一定的导电能力。因为此时的温度不是很高或者光照不是很强, 自由电子的数量还很少, 导电能力很差。随着温度进一步升高或光照进一步加强, 挣脱共价键束缚而形成自由电子的数量将明显增多, 半导体的导电能力随之显著增强, 这种现象称为本征激发。

每个价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后, 原来共价键上就留下一个缺少电子的空位, 这个空位叫做空穴。由于原子失去电子后不再是电中性的, 因此每个空穴可认为是带有一个正电子电荷量的带电粒子。当共价键上出现空穴时, 相邻原子中的价电子就很容易地离开它所在的共价键, 跳过来填补这个空穴(填充空穴的价电子仍然束缚在共价键上), 而在这个价电子原来的位置上, 又留下一个新的空穴, 以后新的空穴又被相邻的价电子填补, 这样就在共价键上出现