



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电子线路基础

张晓林 张凤言 编著



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS



普通高等教育“十一五”国家级

# 电子线路基础

Dianzi Xianlu Jichu

张晓林 张凤言 编著



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是关于电子线路设计基础的教材。内容紧扣教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“电子线路与电子技术类课程教学基本要求”。

本书共分六章,内容包括:半导体基础、基本单元电路和输出级、放大电路的频率特性、集成运算放大器、放大电路反馈原理与稳定化基础、直流稳压电源。

学生通过学习本书,可以系统地掌握电子线路的基本原理、基本概念和各种功能单元电路的工作原理和分析设计方法,为电子系统的工程实现和后续课程学习打下必备的基础。

本书强调理论联系实际,注重培养学生解决实际问题的能力和工程实践能力。本书的主要特色是:强调基本知识点、强调 EDA 的应用并给出实验的建议内容。

本书可作为高等学校理工科电子信息、通信、自动化、计算机等各专业本科生教材或教学参考书,可供研究生和教师参考,也可作为相关工程技术人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子线路基础/张晓林,张凤言编著. —北京:高等教育出版社,2011. 6

ISBN 978-7-04-032220-0

I. ①电… II. ①张… ②张… III. ①电子电路-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 095313 号

策划编辑 吴陈滨  
插图绘制 尹 莉

责任编辑 杨 希  
责任校对 姜国萍

封面设计 于文燕  
责任印制 韩 刚

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 天津新华一印刷有限公司  
开 本 787mm × 960mm 1/16  
印 张 20.75  
字 数 380 千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2011 年 6 月第 1 版  
印 次 2011 年 6 月第 1 次印刷  
定 价 30.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物 料 号 32220-00

# 前 言

随着现代通信和电子电路的应用领域出现新的拓展与需求,超大规模集成电路设计与应用技术不断进步,电子线路与系统设计技术也得到了飞速的发展。电子线路与系统设计技术与信息和网络技术相结合,在国防、航空航天、信息网络、通信、工业控制、消费电子与家电等众多领域得到应用。

电子线路与系统设计技术带动了集成电路设计学科、微电子学科的不断发展,也促使系统设备设计、开发、调试与测试技术不断进步。目前我国真正掌握电子线路与系统设计技术的人才依然匮乏,这集中地体现在企事业单位对于此类型人才的需求和高校教学与课程实践的安排之间的矛盾上。

在多年的教学和课程实践过程中,我们深刻认识到高校开设电子线路基础课程的必要性与重要性。电子线路基础的教学必须从理论和实践两个环节同时入手,针对学生的学习特点,既要培养学生的理论和技术知识,又要培养学生的动手实践能力,更要培养学生的创新意识,打好基础,这样才能造就电子线路与系统设计人才。

电子线路课程是电子信息类专业的基础课程。该课程的基本作用和任务是:通过对常用电子器件、模拟电路及其系统的分析和设计的学习,使学生系统地掌握电子线路的基本原理、基本概念和各种功能单元电路的工作原理和分析设计方法,为电子系统的工程实现和后续课程学习打下必备的基础。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。内容紧扣教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会制定的“电子线路与电子技术类课程教学基本要求”。本书共分为六章,内容包括:第1章半导体基础、第2章基本单元电路和输出级、第3章放大电路的频率特性、第4章集成运算放大器、第5章放大电路反馈原理与稳定化基础、第6章直流稳压电源。

第1章介绍半导体材料基础知识、PN结导电性质以及利用这些性质制成的双极结型三极管(BJT)和场效应晶体管(FET),讨论BJT和MOS管的工作原理。

第2章讨论BJT和FET的三种基本组态放大单元电路的工作原理、基本概念、主要特性和基本分析方法。还介绍了电流源、差分放大器电路、MOS模拟集成基本单元电路、推挽输出级电路的一些基础知识。

第3章先阐述频率特性的基本概念及复频域分析法,介绍波特图绘制方法,

而后分析基本放大电路频率特性,最后分析多级放大电路的频率特性。

第4章介绍集成运放的主要技术参数,讨论集成运放原理及等效模型,并分析某些集成运放的特性,介绍同类产品,最后介绍集成运放的实际应用知识。

第5章介绍反馈放大器的基本理论及负反馈放大器稳定化的理论与技术基础。学习这一章要掌握负反馈放大器的分析与计算,并会判断负反馈放大器的稳定性,学会相位补偿。

第6章主要介绍几种基本的直流稳压电源,分析其原理及设计要点。

本书强调理论联系实际,注重培养学生解决实际问题的能力和工程实践能力。本书的主要特色如下:

1) 强调基本知识点:本书紧扣电子线路基础教学大纲,按照课程安排,对每个教学重点内容反复强调基本概念、介绍基本单元电路,并通过例题和习题锻炼学生的电路基本分析能力。努力帮助学生掌握本课程最基本的知识和方法。

2) 强调对方法和能力的要求:本书使学生对电路从结构到功能有感性认识,再通过从简单到复杂的电路系统实现使学生基本掌握从理论到电路设计实现的方法,提高学生的综合分析与设计能力,达到理论与实践的结合,加深对课程基本理论和方法的理解,进而能够自行设计和实现基本的仿真分析。

3) 强调了EDA的应用:希望本书读者掌握应用Spice分析设计电子电路的基本方法,它是电子信息专业学生EDA实验技能训练的开端,是对理论课程学习的重要辅助手段,是理论联系实际的必然途径。

4) 本书的习题部分给出了EDA实验的建议内容:首先,通过实验,使学生掌握常用EDA软件的操作方法,掌握示波器、信号发生器、频率计和扫频仪等常用仪器仪表的使用方法,掌握电子线路的基本测试技术。其次,通过实验,使学生了解电路的基本原理,由软件的熟练使用上升到对大型电路的独立设计与深入理解,掌握电路的装配、调试和故障排除方法。加深对模拟电路学习的理解和认识,从而提高学生的综合分析与设计能力,达到理论与实践相结合的目的。

本书采用国际单位制(SI)和国标(GB)。

本书可作为高等学校理工科电子信息、通信、自动化、计算机等各专业本科生教材或教学参考书,可供研究生和教师参考,也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书是在北京航空航天大学电子线路教研组的部分科研工作经验、成果和本科生、研究生课程教学实践的基础上,参考张凤言教授编著的《电子电路基础》(第二版)编写而成的。

本书由张晓林教授、张凤言教授主编,参与书稿的部分编写和习题实验验证工作的有张展、夏温博、宋丹、李怀周、常啸鸣、孙杨、刘文婷、申晶;书稿的部分图表制作和校对工作由李彩伟、徐主峰、丁晓坤、翟文强、李棚完成。

清华大学董在望教授主审了本书全稿,提出了重要的宝贵意见。高等教育出版社一直关心本书的出版,给予编者具体的指导,为本书的出版创造了良好的条件,在此表示衷心的感谢!

电子技术发展日新月异,教学改革任重道远,由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请读者批评指正,以便今后不断改进。

编者

2011年2月于北京航空航天大学

# 本书常用符号

|                                  |                                              |
|----------------------------------|----------------------------------------------|
| 1.                               |                                              |
| $A$                              | 增益或放大倍数的通用符号<br>(下面 $A$ 的不同符号的下标代表不同物理意义的增益) |
| $A_v$                            | 电压增益                                         |
| $A_i$                            | 电流增益                                         |
| $A_{od}$                         | 差模电压增益                                       |
| $A_{vc}$                         | 共模电压增益                                       |
| $A_v(s)$                         | 集成运放电压增益函数                                   |
| $A_{if}, A_{vf}, A_{rf}, A_{gf}$ | 反馈放大器的电流、电压、互阻、互导增益                          |
| 2.                               |                                              |
| $B$                              | 基极、反馈网络                                      |
| $B$                              | 反馈系数的通用符号                                    |
| $B_i, B_v, B_r, B_g$             | 电流、电压、互阻、互导反馈系数                              |
| $BW$                             | 带宽                                           |
| 3.                               |                                              |
| $C$                              | 电容                                           |
| $C_{ox}$                         | 栅氧化层单位面积电容                                   |
| $C_\pi, C_\mu, C_{CS}$           | BJT 的分布电容                                    |
| $C_{gs}, C_{ds}, C_{dg}$         | FET 的分布电容                                    |
| $C_m, C_\varphi$                 | 密勒电容、相位补偿电容                                  |
| $C$                              | 集电极                                          |
| 4.                               |                                              |
| $D$                              | 二极管、场效应管漏极                                   |
| $D$                              | 非线性失真系数、扩散系数                                 |
| $D_Z$                            | 稳压管                                          |
| 5.                               |                                              |
| $E$                              | 发射极                                          |
| $E$                              | 能量、电场强度、误差                                   |
| $e_n$                            | 集成运放等效输入噪声电压                                 |
| 6.                               |                                              |
| $F$                              | 反馈深度、调制频率                                    |
| $f$                              | 频率                                           |

|            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| $f_H$      | 上截止(-3 dB)频率                       |
| $f_L$      | 下截止(-3 dB)频率                       |
| $f_T$      | 特征频率                               |
| $f_\beta$  | 截止频率                               |
| $f_{BW}$   | 放大电路的通频带                           |
| 7.         |                                    |
| $G$        | 网络参数,增益                            |
| $G$        | FET 栅极,门电路                         |
| $g_m$      | 低频跨导                               |
| $g_{mf}$   | 具有反馈时的等效跨导                         |
| 8.         |                                    |
| $I, i$     | 电流                                 |
| $I_B, I_C$ | 大写字母,大写下标,表示直流电流                   |
| $i_B, i_C$ | 小写字母,大写下标,表示包含直流在内的电流总量            |
| $i_b, i_c$ | 小写字母,小写下标,表示电流的交流分量                |
| $I_b, I_c$ | 大写字母,小写下标,表示电流的交流分量有效值             |
| $I_{IB}$   | 集成运放输入偏置电流                         |
| $I_{IO}$   | 集成运放输入失调电流                         |
| $i_n$      | 集成运放等效输入噪声电流                       |
| $I_{CM}$   | $\beta$ 下降到其额定值的 2/3 时所允许的最大集电极电流值 |
| $I_F$      | 二极管最大正向电流                          |
| $I_R$      | 二极管反向电流                            |
| 9.         |                                    |
| $K$        | 热力学温度单位(开尔文)                       |
| $K$        | 常数,增益系数                            |
| $K_T$      | 稳压电源温度系数                           |
| $k$        | 玻耳兹曼常数                             |
| $K_{CMR}$  | 集成运放共模抑制比                          |
| $K_{SVR}$  | 集成运放电源电压抑制比                        |
| 10.        |                                    |
| $N$        | 电子型半导体                             |
| $N$        | 电子浓度                               |
| $NF$       | 噪声系数                               |
| $n_i$      | 本征半导体热平衡时的自由电子浓度                   |
| $n_n$      | 掺入施主杂质后自由电子的浓度                     |
| 11.        |                                    |
| $P$        | 功率                                 |
| $P_i, P_o$ | 表示输入和输出信号功率                        |

|                          |                           |
|--------------------------|---------------------------|
| PWM                      | 脉冲宽度调制器                   |
| P                        | 空穴型半导体                    |
| $p_i$                    | 本征半导体热平衡时的空穴浓度            |
| $p_n$                    | 掺入施主杂质后空穴的浓度              |
| 12.                      |                           |
| $Q, q$                   | 电荷                        |
| 13.                      |                           |
| $R$                      | 电阻                        |
| $R_b, R_e, R_c$          | BJT 的基极、发射极和集电极电阻         |
| $R_g, R_s, R_d$          | FET 的栅极、源极和漏极电阻           |
| $R_{id}, R_{od}$         | 差模输入、输出电阻                 |
| $R_{if}, R_{of}$         | 反馈电路的输入和输出电阻              |
| $R_f$                    | 反馈电阻                      |
| $R_{CM}$                 | 共模负反馈电阻                   |
| $R_s$                    | 信号源内阻                     |
| 14.                      |                           |
| S                        | FET 源极                    |
| S                        | 面积                        |
| $S_R$                    | 转换速率                      |
| 15.                      |                           |
| T                        | 晶体管, 磁感应强度单位(特斯拉)         |
| $T$                      | 热力学温度                     |
| $t_{set}$                | 集成运放建立时间                  |
| 16.                      |                           |
| $V, v$                   | 电压                        |
| $V_{BE}, V_{CE}, V_{BC}$ | 大写字母, 大写下标, 表示直流电压        |
| $v_{BE}, v_{CE}, v_{BC}$ | 小写字母, 大写下标, 表示包含直流在内的电压总量 |
| $v_{be}, v_{ce}, v_{bc}$ | 小写字母, 小写下标, 表示电压的交流分量     |
| $V_{be}, V_{ce}, V_{bc}$ | 大写字母, 小写下标, 表示电压的交流分量有效值  |
| $V_\phi$                 | 动态平衡下的接触电位差               |
| $V_T$                    | 热力学电压                     |
| $V_{IO}$                 | 集成运放输入失调电压                |
| $V_{op-p}$               | 集成运放输出峰-峰电压               |
| $V_{REF}$                | 基准电压                      |
| $v_{id}$                 | 差模输入电压                    |
| $v_{ic}$                 | 共模输入电压                    |
| 17.                      |                           |
| W                        | 基区宽度                      |

---

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| $\omega_c$     | 中心角频率           |
| 其他符号:          |                 |
| $\eta$         | 亚阈值斜率因子,放大电路的效率 |
| $\phi_F$       | 反型层的表面电势        |
| $\alpha$       | 共基 BJT 的电流放大倍数  |
| $\beta$        | 共射 BJT 的电流放大倍数  |
| $\tau$         | 非平衡载流子的平均寿命     |
| $\alpha_{VIO}$ | 集成运放输入失调电压的温度系数 |
| $\alpha_{IO}$  | 集成运放输入失调电流的温度系数 |
| $\sigma$       | 复频率的实部          |
| $\varphi_m$    | 相位裕度            |
| $G_m$          | 增益裕度            |

# 目 录

|                            |    |
|----------------------------|----|
| 第1章 半导体基础                  | 1  |
| 引言                         | 1  |
| 1.1 半导体基础知识                | 1  |
| 1.1.1 本征半导体                | 1  |
| 1.1.2 杂质半导体                | 3  |
| 1.1.3 载流子在半导体中的运动          | 4  |
| 1.2 PN结                    | 5  |
| 1.2.1 PN结的形成过程             | 5  |
| 1.2.2 PN结的伏安特性             | 6  |
| 1.2.3 PN结和半导体二极管           | 8  |
| 1.3 双极结型三极管(BJT)           | 13 |
| 1.3.1 BJT的结构和制造工艺          | 13 |
| 1.3.2 BJT的工作原理             | 14 |
| 1.3.3 BJT的器件模型             | 19 |
| 1.4 金属-氧化物-场效应晶体管(MOSFET)  | 27 |
| 1.4.1 MOS管的结构和制造工艺         | 28 |
| 1.4.2 MOS管的工作原理            | 30 |
| 1.4.3 MOS管的伏安特性曲线和大信号特性方程  | 34 |
| 1.4.4 MOS管的小信号模型           | 40 |
| 1.5 场效应管(FET)              | 45 |
| 1.5.1 场效应管及其分类             | 45 |
| 1.5.2 结型场效应管(JFET)的结构及工作原理 | 45 |
| 小结                         | 49 |
| 习题                         | 50 |
| 第2章 基本单元电路和输出级             | 54 |
| 引言                         | 54 |
| 2.1 基本单管放大器                | 54 |
| 2.1.1 共射组态                 | 54 |
| 2.1.2 共基组态                 | 59 |
| 2.1.3 共集组态(射随器)            | 62 |
| 2.1.4 共源组态                 | 65 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 2.1.5 共漏组态(源极跟随器) .....               | 68  |
| 2.1.6 共栅组态 .....                      | 69  |
| 2.2 放大电路的分析方法 .....                   | 71  |
| 2.2.1 图解分析法 .....                     | 72  |
| 2.2.2 等效电路分析法 .....                   | 74  |
| 2.3 放大电路的主要性能指标 .....                 | 75  |
| 2.3.1 放大倍数 .....                      | 76  |
| 2.3.2 最大输出幅度 .....                    | 76  |
| 2.3.3 非线性失真 .....                     | 76  |
| 2.3.4 输入电阻 .....                      | 77  |
| 2.3.5 输出电阻 .....                      | 77  |
| 2.3.6 通频带 .....                       | 77  |
| 2.3.7 最大输出功率与效率 .....                 | 78  |
| 2.3.8 失真和噪声系数 .....                   | 78  |
| 2.4 集成电路中的电流源 .....                   | 78  |
| 2.4.1 稳定偏置电路的重要性 .....                | 78  |
| 2.4.2 镜像电流源 .....                     | 79  |
| 2.5 差分放大电路的特性与分析 .....                | 85  |
| 2.5.1 差放的偏置、输入和输出信号及连接方式 .....        | 86  |
| 2.5.2 基本共射差放理想对称时的大信号差模特性与非线性失真 ..... | 90  |
| 2.5.3 基本共射差放理想对称时的微变等效分析 .....        | 92  |
| 2.5.4 JFET 共源差放的大信号特性及差模电压增益 .....    | 95  |
| 2.5.5 MOS 共源差放微变等效分析 .....            | 103 |
| 2.5.6 实际差放的共模抑制比 .....                | 104 |
| 2.5.7 差分放大电路的应用举例 .....               | 107 |
| 2.6 MOS 模拟集成基本单元电路 .....              | 111 |
| 2.6.1 MOS 电流源 .....                   | 111 |
| 2.6.2 MOS 单级放大器 .....                 | 113 |
| 2.6.3 MOS 源耦对与差分放大器 .....             | 115 |
| 2.6.4 CMOS 互补输出级 .....                | 118 |
| 2.7 多级放大器 .....                       | 119 |
| 2.7.1 共集-共射, 共集-共集及达林顿组态 .....        | 119 |
| 2.7.2 串接组态 .....                      | 122 |
| 2.8 推挽输出级放大电路 .....                   | 127 |
| 2.8.1 乙类推挽输出级放大电路的组成与工作原理 .....       | 128 |
| 2.8.2 甲乙类互补推挽输出级放大电路的组成与工作原理 .....    | 131 |
| 小结 .....                              | 132 |
| 习题 .....                              | 132 |

|                                              |     |
|----------------------------------------------|-----|
| 第3章 放大电路的频率特性 .....                          | 143 |
| 引言 .....                                     | 143 |
| 3.1 放大电路频率特性的基本概念 .....                      | 143 |
| 3.1.1 频率特性和通频带 .....                         | 143 |
| 3.1.2 频率失真和相位失真 .....                        | 146 |
| 3.1.3 增益带宽积 .....                            | 147 |
| 3.2 放大电路的波特图 .....                           | 148 |
| 3.2.1 复频域中的网络函数 .....                        | 148 |
| 3.2.2 复频率 $s = \sigma + j\omega$ 的物理意义 ..... | 149 |
| 3.2.3 网络函数的零点、极点和零极点图 .....                  | 150 |
| 3.2.4 波特图绘制方法 .....                          | 151 |
| 3.2.5 主极点的概念 .....                           | 158 |
| 3.2.6 开路时间常数分析法 .....                        | 159 |
| 3.3 单级放大电路的频率特性分析 .....                      | 162 |
| 3.3.1 共射差放的高频特性 .....                        | 162 |
| 3.3.2 用密勒定理及其近似条件分析 BW .....                 | 164 |
| 3.3.3 共基放大电路的频率特性 .....                      | 168 |
| 3.3.4 共集放大电路的频率特性 .....                      | 169 |
| 3.4 多级放大电路的频率特性分析 .....                      | 170 |
| 小结 .....                                     | 172 |
| 习题 .....                                     | 173 |
| 第4章 集成运算放大器 .....                            | 186 |
| 引言 .....                                     | 186 |
| 4.1 集成运放的主要技术参数 .....                        | 186 |
| 4.1.1 集成运放的主要直流和低频参数 .....                   | 187 |
| 4.1.2 集成运放的主要交流参数 .....                      | 189 |
| 4.2 集成运放电路简介 .....                           | 190 |
| 4.2.1 模拟标准双极工艺典型运放电路 .....                   | 190 |
| 4.2.2 模拟 CMOS 工艺典型运放电路 .....                 | 192 |
| 4.3 集成运放的等效模型及运算特性 .....                     | 193 |
| 4.3.1 理想集成运放 .....                           | 193 |
| 4.3.2 理想集成运放的等效模型 .....                      | 194 |
| 4.3.3 理想集成运放等效模型的应用举例 .....                  | 194 |
| 4.4 运算放大器的应用 .....                           | 196 |
| 4.4.1 反馈的基本概念 .....                          | 196 |
| 4.4.2 反相放大器 .....                            | 197 |
| 4.4.3 同相放大器 .....                            | 198 |

|                                 |               |     |
|---------------------------------|---------------|-----|
| 4.4.4                           | 差分放大器 .....   | 199 |
| 4.4.5                           | 积分器和微分器 ..... | 200 |
| 4.4.6                           | 电压比较器 .....   | 201 |
| 4.4.7                           | 波形发生器 .....   | 203 |
| 4.4.8                           | RC有源滤波器 ..... | 206 |
| 小结                              | .....         | 210 |
| 习题                              | .....         | 210 |
| <b>第5章 放大电路反馈原理与稳定化基础</b>       | .....         | 221 |
| 引言                              | .....         | 221 |
| 5.1 反馈放大器的基本概念                  | .....         | 221 |
| 5.1.1 反馈极性与反馈形式                 | .....         | 221 |
| 5.1.2 理想反馈方块图和基本反馈方程式           | .....         | 223 |
| 5.1.3 环路增益和反馈深度                 | .....         | 225 |
| 5.1.4 负反馈放大器的分类                 | .....         | 226 |
| 5.2 负反馈对放大器性能的影响                | .....         | 228 |
| 5.2.1 闭环增益的稳定性                  | .....         | 228 |
| 5.2.2 输入电阻                      | .....         | 230 |
| 5.2.3 输出电阻                      | .....         | 231 |
| 5.2.4 信号源内阻对负反馈放大器性能的影响         | .....         | 234 |
| 5.2.5 关于负反馈改善非线性失真的证明及条件        | .....         | 235 |
| 5.2.6 负反馈放大器的噪声特性               | .....         | 237 |
| 5.3 负反馈放大器的分析与计算                | .....         | 238 |
| 5.3.1 四种类型负反馈放大器的电压增益 $A_{vif}$ | .....         | 238 |
| 5.3.2 深度负反馈时 $A_{vif}$ 的计算      | .....         | 239 |
| 5.3.3 负反馈放大器的方块图分析法(AB分离法)      | .....         | 240 |
| 5.4 负反馈对放大器频域和时域特性的影响           | .....         | 251 |
| 5.4.1 负反馈对放大器传输函数零极点的影响         | .....         | 251 |
| 5.4.2 单极点闭环系统的响应特性              | .....         | 252 |
| 5.4.3 具有双极点开环增益函数的负反馈系统         | .....         | 253 |
| 5.5 负反馈放大器的稳定性                  | .....         | 259 |
| 5.5.1 负反馈放大电路产生自激振荡的原因及条件       | .....         | 259 |
| 5.5.2 负反馈放大电路稳定性的判断             | .....         | 260 |
| 5.5.3 稳定裕度                      | .....         | 261 |
| 5.6 相位补偿原理与技术                   | .....         | 262 |
| 5.6.1 主极点补偿                     | .....         | 262 |
| 5.6.2 极点分离的密勒电容补偿               | .....         | 265 |
| 小结                              | .....         | 267 |

---

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 习题 .....                      | 268        |
| <b>第 6 章 直流稳压电源 .....</b>     | <b>277</b> |
| 引言 .....                      | 277        |
| 6.1 稳压电路原理概述 .....            | 277        |
| 6.2 直流稳压电源架构 .....            | 278        |
| 6.3 整流电路 .....                | 279        |
| 6.3.1 单相半波整流 .....            | 279        |
| 6.3.2 单相全波整流 .....            | 280        |
| 6.3.3 桥式整流 .....              | 281        |
| 6.4 滤波电路 .....                | 282        |
| 6.4.1 电容滤波 .....              | 283        |
| 6.4.2 电感电容滤波 .....            | 283        |
| 6.5 稳压电路概述 .....              | 284        |
| 6.5.1 稳压电路输出电压不稳定的原因 .....    | 284        |
| 6.5.2 稳压电路的技术指标 .....         | 285        |
| 6.6 线性稳压电源 .....              | 287        |
| 6.6.1 误差放大电路 .....            | 287        |
| 6.6.2 调整管 .....               | 289        |
| 6.6.3 线性稳压电路 .....            | 291        |
| 6.7 开关电源 .....                | 293        |
| 6.7.1 开关电源概述 .....            | 293        |
| 6.7.2 串联型开关稳压电源 .....         | 294        |
| 6.7.3 并联开关稳压电源 .....          | 299        |
| 6.8 稳压电源中的保护电路 .....          | 301        |
| 6.9 集成稳压电源 .....              | 302        |
| 6.9.1 $\mu$ A7800 系列稳压器 ..... | 303        |
| 6.9.2 保护电路与启动电路 .....         | 303        |
| 6.10 基准稳压源 .....              | 305        |
| 小结 .....                      | 306        |
| 习题 .....                      | 307        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>312</b> |

# 第 1 章 半导体基础

## ◆ 引 言

电子电路的基本单元是元器件,其中最主要的是由半导体材料制成的元器件,简称半导体元器件。半导体(Semiconductor)是指导电性能介于导体与绝缘体之间的材料,它具有很多特殊的导电性质,可以利用这些性质制成各种元器件。

本章将从半导体材料的基础知识入手,介绍 PN 结的导电性质以及利用这些性质制成的双极结型三极管(BJT)和场效应晶体管(FET),使读者了解它们的工作原理,为学习电子电路的后续章节打好基础。

## 1.1 半导体基础知识

### 1.1.1 本征半导体

#### 一、本征半导体的共价键结构

物体根据导电能力(电阻率)的不同,可划分为导体、绝缘体和半导体。导体和绝缘体中的载流子浓度几乎保持不变,对电流的控制能力很弱,而半导体材料中的载流子浓度能在不同条件下(如受外界光和热刺激或掺进微量杂质元素时)迅速变化,对电流具有强烈的控制作用,因此人们采用半导体材料制成了各种实用性能很强的元器件。

而半导体材料为什么具有这样的导电特性呢?这要从半导体材料的共价键结构说起。

半导体是位于金属和非金属之间的物质,其金属性和非金属性均很弱,原子之间只能形成很弱的共价键,对价电子的束缚能力不强,价电子在接受较小的外界能量后就可以挣脱共价键的束缚,成为自由电子,因此半导体具有导电能力,而随着外界输入能量的增强,比如说温度升高,光照加强,半导体中的自由电子会迅速增多。完全纯净的、结构完整的半导体晶体称为**本征半导体**,把本征半导体中价电子接受外界能量从共价键中脱离出来成为自由电子的过程叫做**本征激**

发。随着本征激发的进行,半导体的导电能力迅速增强。

在这里,我们用最常用的半导体材料——硅(Si)作为例子来进一步解释半导体的共价键结构及其导电特性。图 1.1.1 是硅的共价键结构图,硅的最外层有 4 个电子,原子核带有 4 个单位正电荷,故用 +4 来表示其原子核,每个原子核周围有 4 个价电子,分别和周围原子的价电子形成共价键。

## 二、本征激发和复合

图 1.1.2 是硅材料中的本征激发示意图,当共价键中留下空位时,在外加电场或其他能源的作用下,邻近共价键中的价电子可补充到这个空位上,而在该电子原位上又留下新的空位,而后其他价电子又可转移到这个新的空位。这样继续下去就相当于空位在硅单晶中运动。由于带负电荷的价电子依次填补空位的运动效果与带正电荷的粒子作反向运动的效果是一样的,因此把空位看作带正电荷的粒子,并称做空穴。可见,半导体中存在自由电子和空穴两种载流子。本征激发的重要特征就是,自由电子和空穴两种载流子总是成对产生,成对消失,因此半导体对外呈现电中性。自由电子和空穴相遇就会落入空穴中,从而成对消失,这个过程称为复合。自由电子和空穴越多,复合的机会就越大,因此复合的速度正比于自由电子和空穴浓度的乘积。在一定的外界条件下,随着本征激发的进行,自由电子和空穴的浓度越来越大,复合的速度也会越来越大,当复合的速度和本征激发的速度一样大时,半导体中的自由电子和空穴的浓度就不再变化了,这称为热平衡状态。

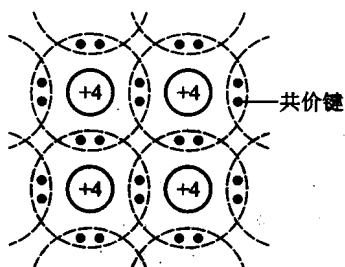


图 1.1.1 共价键结构示意图

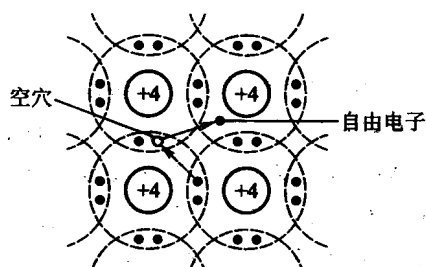


图 1.1.2 硅材料本征激发示意图

分别用  $n_i$  和  $p_i$  表示本征半导体热平衡时的自由电子和空穴浓度,即本征载流子浓度,则它们满足下式

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_{g0}}{2kT}\right) \quad (1.1.1)$$

式中,  $A_0$  和  $E_{g0}$  是与半导体材料有关的常数,硅的  $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ K}^{-3/2}$ ,  $E_{g0}$  是一个价电子脱离共价键成为自由电子所需的最小能量,  $T=0 \text{ K}$  时,硅的  $E_{g0} = 1.21 \text{ eV}$ ,  $k$  是玻耳兹曼常数,  $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。