

模拟电子技术 及应用

Analog Electronic Technology
and Its Application

◎ 主编 林 汉 ◎ 副主编 朱齐媛 陈新原

Analog Electronic



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.cn>

模拟电子技术及应用

主 编 林 汉

副主编 朱齐媛 陈新原

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

全书共分 10 章：第 1 章主要介绍电子技术的发展历史；第 2 章主要讲述半导体器件的工作原理；第 3 章主要讲述晶体管（场效应管）基本放大电路的组成原理、工作状态的分析及放大电路的指标计算，这是本书的重要内容及基础；第 4 章主要讲述功率放大电路的组成及重要性能的指标计算；第 5 章主要讲述负反馈放大电路，负反馈是改善放大电路性能的重要措施；第 6 章主要讲述集成运算放大器的性能及电路组成；第 7 章主要讲述集成运算放大器的应用；第 8 章主要讲述波形产生与变换电路；第 9 章主要讲述直流稳压电源；第 10 章主要讲述模拟电子系统设计技能。

本书针对应用型本科院校电子信息类、电气类、自动化类和计算机类专业的“模拟电子技术基础”“模拟电子线路”等课程而编写，也可作为应用型本科及专科院校电类专业“模拟电子技术”“低频电子线路”等课程的教材，还可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术及应用/林汉主编. —北京：北京交通大学出版社，2016.8
ISBN 978-7-5121-2956-6

I. ①模… II. ①林… III. ①模拟电路-电子技术 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 180162 号

模拟电子技术及应用

MONI DIANZI JISHU JI YINGYONG

责任编辑：谭文芳 助理编辑：龙嫚嫚

出版发行：北京交通大学出版社 电话：010-51686414 <http://www.bjtup.com.cn>

地 址：北京市海淀区高粱桥斜街 44 号 邮编：100044

印 刷 者：北京交大印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：185 mm × 260 mm 印张：14.75 字数：368 千字

版 次：2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 978-7-5121-2956-6/TN · 106

印 数：1~2 000 册 定价：33.00 元

本书如有质量问题，请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评，我们表示欢迎和感谢。

投诉电话：010-51686043, 51686008；传真：010-62225406；E-mail: press@bjtu.edu.cn。

前 言

电子技术是目前发展最快的技术之一。随着科学技术的发展,许多专业相继开设了电子技术相关课程。

本书按“管—路—系统”的思路编写,以求在学完本书后,能对电子系统有一个较为清晰的了解,为后续课程的学习打下良好的基础。

全书共10章,分别是:绪论、半导体器件、基本放大电路分析方法、功率放大电路、放大电路中的反馈、集成运算放大器、集成运算放大器的应用、波形产生与变换电路、直流稳压电源及模拟电子系统设计技能。

本书以培养电子技术应用能力为主线,适应电子技术发展形势,突出集成电路及其应用。同时,本书将电子电路基本知识、基本分析方法与应用相结合,突出实用性,力求做到通俗易懂。但电子电路可在咫尺之间产生千变万化,因此要充分发挥想象力和创造力,加强对创新意识和创新能力的培养,故习题中增加具有实用性和有利于创新能力培养的题目。

通过对本书中知识的学习,要树立“三个观念”:①工程观念——电子技术中“忽略次要,抓住主要”的近似估算方法、等效模型的构造方法等可以培养学生更切合工程实际的思维;②实践观念——任何电子电路和系统的设计都要通过硬件实现,才能证明其正确性和可行性,此外还要解决该电路和环境(温度、湿度等)的关系问题;③系统观念——一个电路从信号输入、中间的处理到最后的输出,各级之间的增益分配、参数设置、逻辑关系都是相互协调、相互制约的,只有通盘考虑、全面调试才能获得理想效果,从而培养学生的仿真能力、系统集成能力及综合应用能力。

参与本书编写工作的有:岭南师范学院林汉、朱齐媛、陈新原、黄晓桃;广东海洋大学寸金学院叶伟慧、韦发清。林汉任主编,负责全书的组织、修改、定稿,朱齐媛、陈新原任副主编。

由于编者水平有限,加之时间仓促,对于书中的错误和不足,恳请读者批评、指正。

编 者
2016年7月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电子技术的发展	1
1.1.1 电子技术的定义	1
1.1.2 电子技术的发展史	1
1.2 信号与电路	3
1.3 电子信息系统	4
1.4 模拟电子技术的特点	4
1.5 课程学习要求	5
第2章 半导体器件	6
2.1 PN结的形成及特性	6
2.1.1 半导体的基本知识	6
2.1.2 PN结	8
2.2 半导体二极管	11
2.2.1 普通二极管	12
2.2.2 稳压二极管	15
2.2.3 发光二极管	16
2.2.4 光电二极管	17
2.2.5 变容二极管	17
2.2.6 快恢复二极管	17
2.2.7 肖特基二极管	17
2.3 晶体管	18
2.3.1 晶体管的结构与符号	18
2.3.2 晶体管的电流放大作用	19
2.3.3 晶体管的共射特性曲线	21
2.3.4 晶体管的主要参数	23
2.4 场效应管	25
2.4.1 结型场效应管	25
2.4.2 绝缘型场效应管	28
本章小结	33
习题	33
第3章 基本放大电路分析方法	36
3.1 放大电路的基本概念	36

3.1.1 放大的基本概念	36
3.1.2 放大电路的主要性能指标	36
3.2 单管共射放大电路	38
3.2.1 共射放大电路的组成	38
3.2.2 放大电路的工作原理及波形分析	39
3.3 放大电路的基本分析方法	40
3.3.1 直流通路与交流通路	40
3.3.2 共射放大电路的静态工作点分析	41
3.3.3 放大电路的动态性能分析	43
3.4 放大电路的工作点稳定问题	51
3.4.1 温度对静态工作点的影响	51
3.4.2 分压式共射偏置放大电路	52
3.5 共集放大电路与共基放大电路	55
3.5.1 共集放大电路	55
3.5.2 共基放大电路	57
3.6 场效应管放大电路	59
3.6.1 共源放大电路的组成及工作原理	59
3.6.2 分压-自偏压式共源放大电路	61
3.6.3 共漏放大电路	63
3.7 多级放大电路	64
3.7.1 多级放大电路的级间耦合方式	64
3.7.2 多级放大电路的分析方法	67
3.8 放大电路的频率响应	67
3.8.1 频率响应的基本概念	67
3.8.2 晶体管的频率参数	69
3.8.3 晶体管的混合 π 型等效电路	70
3.8.4 阻容耦合单管共射极放大电路的频率响应	72
3.8.5 多级放大电路的频率响应	75
本章小结	78
习题	79
第4章 功率放大电路	84
4.1 低频功率放大电路概述	84
4.1.1 功率放大电路的分类	84
4.1.2 功率放大电路的特点	85
4.1.3 提高输出功率的方法	85
4.2 互补对称功率放大电路	86
4.2.1 OCL 功率放大电路	86
4.2.2 OTL 功率放大电路	90
4.3 集成功率放大器	92

4.3.1 LM386 电路组成	92
4.3.2 LM386 的引脚图	93
4.3.3 LM386 集成功率放大器的典型电路图	93
4.3.4 BTL 功率放大电路	93
本章小结	94
习题	95
第5章 放大电路中的反馈	97
5.1 反馈的基本概念	97
5.1.1 反馈的定义	97
5.1.2 反馈的分类	98
5.2 负反馈放大电路的四种基本组态	99
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	100
5.3.1 提高放大倍数的稳定性	100
5.3.2 展宽通频带	101
5.3.3 对输入电阻和输出电阻的影响	102
5.3.4 减小非线性失真和抑制干扰、噪声	103
5.4 负反馈放大电路的指标计算	104
5.4.1 等效电路法	104
5.4.2 估算方法	104
5.5 负反馈放大电路的自激振荡	107
5.5.1 产生自激振荡的原因及条件	107
5.5.2 自激振荡的判断方法	108
5.5.3 消除自激振荡的常用方法	109
本章小结	109
习题	110
第6章 集成运算放大器	113
6.1 集成运算放大器概述	113
6.1.1 电路组成及符号	113
6.1.2 电路结构特点	114
6.2 基本单元电路	114
6.2.1 电流源电路	114
6.2.2 差分放大电路	117
6.2.3 中间级电路	125
6.2.4 输出级电路	125
6.3 典型集成运放	126
6.3.1 通用型集成运放 LM741	126
6.3.2 CMOS 集成电路 C14573	130
6.4 集成运放在使用中应注意的问题	131
6.4.1 集成运放的参数测试	132

6.4.2 使用过程中可能会出现异常情况	132
6.4.3 集成运放的保护	132
本章小结	133
习题	134
第7章 集成运算放大器的应用	137
7.1 集成运放基础	137
7.1.1 集成运放的低频等效电路	137
7.1.2 集成运放的理想化指标	137
7.1.3 集成运放的线性工作区	138
7.1.4 集成运放的非线性工作区	138
7.2 比例运算电路	139
7.2.1 反相比例运算电路	139
7.2.2 同相比例运算电路	140
7.2.3 差分比例运算电路	141
7.3 求和电路	143
7.3.1 反相输入求和电路	143
7.3.2 同相输入求和电路	144
7.4 积分电路和微分电路	146
7.4.1 积分电路	146
7.4.2 微分电路	147
7.5 对数电路和指数电路	148
7.5.1 对数电路	148
7.5.2 指数电路	149
7.6 乘法电路和除法电路	149
7.6.1 乘法电路	149
7.6.2 除法电路	150
7.7 滤波器	150
7.7.1 滤波器的作用和分类	150
7.7.2 低通滤波器 (LPF)	151
7.7.3 高通滤波器 (HPF)	153
7.7.4 带通滤波器 (BPF)	154
7.7.5 带阻滤波器 (BEF)	156
7.8 电压比较器	157
7.8.1 过零比较器	158
7.8.2 单限比较器	159
7.8.3 滞回比较器	159
7.8.4 双限比较器	160
7.8.5 集成电压比较器	161
本章小结	163

习题	165
第8章 波形产生与变换电路	167
8.1 正弦波振荡条件及电路	167
8.1.1 正弦波振荡条件	167
8.1.2 正弦波振荡电路的组成	168
8.1.3 正弦波振荡电路的分析	168
8.2 RC 正弦波振荡电路	169
8.2.1 RC 串并网络的选频特性	169
8.2.2 RC 串并联正弦波振荡电路	169
8.3 LC 正弦波振荡电路	170
8.3.1 LC 并联电路的频率特性	170
8.3.2 变压器反馈式振荡电路	171
8.3.3 电感三点式振荡电路	172
8.3.4 电容三点式振荡电路	173
8.3.5 改进型电容三点式振荡电路	174
8.4 石英晶体振荡器	174
8.4.1 石英晶体的基本特性与等效电路	174
8.4.2 石英晶体振荡电路	175
8.5 非正弦波发生电路	176
8.5.1 矩形波发生电路	176
8.5.2 三角波发生电路	178
8.5.3 锯齿波发生电路	178
本章小结	179
习题	180
第9章 直流稳压电源	187
9.1 直流稳压电源概述	187
9.1.1 直流稳压电源的组成	187
9.1.2 直流稳压电源的主要性能指标	187
9.2 单相整流电路	188
9.2.1 单相半波整流电路	188
9.2.2 单相桥式整流电路	190
9.3 滤波电路	192
9.3.1 电容滤波电路	193
9.3.2 电感滤波电路	194
9.3.3 其他形式的滤波电路	195
9.4 倍压整流电路	195
9.4.1 二倍压整流电路	195
9.4.2 多倍压整流电路	196
9.5 稳压电路	196

9.5.1 稳压管稳压电路	196
9.5.2 串联型稳压电路	199
9.5.3 集成稳压电路	203
9.6 开关型稳压电源	205
本章小结	206
习题	207
第10章 模拟电子系统设计技能	211
10.1 模拟电路设计基础	211
10.1.1 模拟电路设计的特点及注意事项	211
10.1.2 模拟电子系统的设计原则	211
10.2 模拟电子系统的设计	212
10.2.1 系统级设计	212
10.2.2 电路级设计	213
10.2.3 模拟电子系统设计的步骤	213
10.3 常用模拟电子系统的设计	215
10.3.1 运算放大器应用电路的设计	215
10.3.2 有源滤波器电路的设计	217
10.3.3 功率放大器电路的设计	218
10.4 扩音机的设计	220
10.4.1 语音放大与混放电路	220
10.4.2 音调控制电路	221
10.4.3 功率放大电路	222
10.5 直流稳压电源的设计	223
10.5.1 模拟线性稳压电源设计	223
10.5.2 开关型稳压电源	225

第1章 绪论

内容提要:

了解电子技术的发展历程,理解电子技术的分类,了解电子技术在生活、生产、国防等方面的应用。

在人们的现实生活中,电子技术无处不在,近至家电(空调、冰箱、电视、音响)、计算机、手机、电子玩具、各类报警器等产品,远至航天(卫星定位、测控)、军事(雷达、电子导航)、工业(数控机床)等领域都可看到电子技术的身影。

电子技术是在19世纪末、20世纪初开始发展起来的应用技术,它在20世纪的迅速发展大大推动了航空技术、遥测传感技术、通信技术、计算机技术及网络技术的迅速发展,因此它成为近代科学技术发展的一个重要标志。

1.1 电子技术的发展

1.1.1 电子技术的定义

电子技术研究的是电子元器件及由电子元器件构成的电路的应用,包括信息电子技术和电力电子技术两大分支,其中信息电子技术又包括模拟电子技术和数字电子技术。电子技术是对电子信号进行处理的技术,处理的方式主要有:信号的发生、放大、滤波、转换等。

1.1.2 电子技术的发展史

电子技术的发展很大程度上可以反映在元器件的发展上。电子技术经历了电子管时代、晶体管时代、集成电路时代、超大规模集成电路时代,目前发展到了近现代电子技术,近现代电子技术包括微电子技术、纳米技术、EDA技术、嵌入式技术等。

1. 电子管时代

电子管时代起源于20世纪初,在20世纪30年代达到了鼎盛时期。第一代电子技术的核心是电子管。1904年,英国物理学家弗莱明制成了第一个电子二极管并用于检测电波,这标志着电子管时代的到来。不久后,美国发明家德福雷斯特在灯丝和极板之间加入了栅极,从而发明了三极管,并于1906年申请了专利。比起二极管,三极管有更高的敏感度,而且集检波、放大和振荡三种功能于一体。

由于电子管有着体积大、笨重、能耗大、寿命短的缺点,于是,人们迫切需要一种新的电子元件来替代电子管。

2. 晶体管时代

1947年12月23日, 贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿制成了世界上第一个晶体管——点接触型三极管, 它标志着电子技术从电子管时代进入到晶体管时代。1948年11月贝尔实验室的肖克利又提出一种结型晶体管的设想。1954年, 实用型晶体管开发研制成功, 并由贝尔实验室率先应用在电子开关系统中。

与电子管相比, 晶体管具有体积小、能耗低、寿命长、更可靠等特点。因此, 随着半导体技术的进步, 晶体管在众多领域逐步取代了电子管。

3. 集成电路时代

1952年, 英国雷达研究所著名科学家达默提出: 能否将晶体管等元件不通过连接线而直接集成在一起从而构成一个有特定功能的电路。之后, 美国德州仪器公司的基比尔按其思路, 于1958年制成了世界上第一个集成电路的模型。1959年, 德州仪器公司宣布发明集成电路, 从此, 电子技术进入集成电路时代。同年, 美国著名的仙童电子公司也宣布集成电路研制成功, 该公司赫尔尼等人发明的一整套制造微型晶体管的“平面工艺”被移用到集成电路的制作中, 集成电路很快就由实验室试验阶段转入了工业生产阶段。1959年, 德州仪器公司建成世界上第一条集成电路生产线。1962年, 世界上第一块集成电路商品正式问世。集成电路发明后, 其发展非常迅速, 制作工艺不断进步, 极大地推动了电子技术的发展。

与分立元件的电路相比, 集成电路体积大大减小, 质量也大大减轻。同时, 功耗小, 更可靠, 更适合大批量生产。

4. 超大规模集成电路时代

在一块芯片上集成的元件数超过10万个, 或门电路数超过万门的集成电路, 称为超大规模集成电路。超大规模集成电路是在20世纪70年代后期研制成功的, 主要用于制造存储器和微处理机。64 Kb 位随机存取存储器是第一代超大规模集成电路, 大约包含15万个元件, 线宽为 $3\mu\text{m}$ 。

随着硅平面工艺技术的发展, MOS 集成电路遵循摩尔定律, 即一个芯片上所集成的器件, 以每隔18个月提高一倍的速度向前飞速发展。至今集成电路的集成度已提高了500万倍, 特征尺寸缩小到了 $1/200$, 单个器件成本下降到了 $1/1\,000\,000$ 。

超大规模集成电路研制成功, 是微电子技术的一次飞跃, 大大推动了电子技术的进步, 从而带动了军事技术和民用技术的发展。超大规模集成电路已成为衡量一个国家科学技术和工业发展水平的重要标志。

5. 近现代电子技术时代

1) 微电子技术

微电子学是研究在固体(主要是半导体)材料上构成微小型电路、子系统及系统的电子学分支, 是一门主要研究电子或离子在固体材料中的运动及应用, 并利用它实现信号处理功能的学科。

随着集成电路技术的发展, 微电子技术也在不断发展, 如SOC技术、MEMS技术等。

SOC(system on chip)即片上系统, 这一概念是20世纪90年代提出的, 它从整个系统的角度出发, 把处理机制、模拟算法、软件、芯片结构、各层次电路直至器件的设计都紧密结合起来, 用一块芯片实现以往由多块芯片组成的电子系统功能。SOC的出现, 使得微电

子技术由电路集成 (IC) 向系统集成 (IS) 发展。由于 SOC 技术使得电路成本下降, 可靠性提高, 所以, SOC 是电子技术发展的新途径。

MEMS (micro - electro - mechanical system) 即微电子机械系统, 它将传感器、处理电路和执行器集成在一起, 是微电子技术与其他学科结合的典型。MEMS 将电子系统与外界环境联系起来, 系统不仅能感应到外界的信号, 同时能处理这些信号并由此做出相应的操作。MEMS 是微电子技术的拓宽和延伸, 它将微电子技术 with 精密加工技术结合起来, 实现了微电子与机械融为一体。MEMS 技术及其产品开辟了一个全新的领域和产业, 它们不仅能降低机电系统的成本, 而且还能完成许多大尺寸机电系统所无法完成的任务。

2) 纳米电子技术

纳米电子学主要在纳米尺度空间内研究电子、原子和分子的运动规律和特性, 研究纳米尺度空间内的纳米膜、纳米线。由纳米点和纳米点阵构成的基于量子特性的纳米电子器件, 其性能涉及放大、振荡、脉冲技术、运算处理和读写等方面, 其原理主要基于电子的波动性、电子的量子隧道效应、电子能级的不连续性、量子尺寸效应和统计涨落特性等。

从微电子技术到纳米电子技术将是电子器件发展的第二次变革, 与从真空管到晶体管的第一次变革相比, 它有着更深刻的理论意义和更丰富的科技内容。在这次变革中, 传统理论将不再适用, 需要发展得出新的理论, 并探索出相应的材料和技术。

3) EDA 技术

电子设计技术的核心就是 EDA 技术。EDA 是指以计算机为工作平台, 融合应用电子技术、计算机技术、智能化技术而研制成的电子 CAD 通用软件包, 主要能辅助进行 4 方面的设计工作, 即 IC 设计、电子电路设计、PCB 设计和 PLD 设计。EDA 技术应用广泛、工具多样、软件功能强大, 开发的产品朝着超高速、高密度、低功耗、低电压和复杂的片上系统器件的方向发展。

其中 IC 设计软件供应商主要有 Cadence、Mentor Graphics、Synopsys 等公司; 电子电路设计与仿真软件主要包括 SPICE/PSpice、Multisim 和 System View 等; PCB 设计软件种类很多, 如 Protel、OrCAD、Viewlogic、PCB Studio 等; 而 PLD 设计软件主要包括 Altera、Xilinx、Atmel 等。

4) 嵌入式技术

嵌入式系统的核心部件是各种类型的嵌入式处理器, 常用的有两类, 一类是采用通用计算机的 CPU 处理器, 另一类是采用微控制器。微控制器具有单片化、体积小、功耗低、可靠性高及芯片上的外设资源丰富等特点, 成为嵌入式系统的主流器件。嵌入式处理器已经从单一的微处理器嵌入、发展到 DSP 和目前主要采用的 32 位嵌入式 CPU, 未来发展方向为片上系统。

1.2 信号与电路

1. 模拟信号与数字信号

模拟信号是指用连续变化的物理量所表达的信息, 如温度、湿度、压力、长度、电流、电压等, 通常又把模拟信号称为连续信号, 它在一定的时间范围内可以有无限多个不同的取值。而数字信号是指在取值上是离散的、不连续的信号。

实际生产生活中的各种物理量, 如摄像机摄下的画面、录音机录下的声音、车间控制室

所记录的压力、流量、转速、湿度等都是模拟信号。数字信号则是在模拟信号的基础上经过采样、量化和编码而形成的。

2. 模拟电路与数字电路

模拟电路是对模拟信号进行处理的电路，最基本的处理是对信号的放大。

数字电路是对数字信号进行算术运算和逻辑运算的电路。数字电路有各种门电路、触发器，以及由它们构成的各种组合逻辑电路和时序逻辑电路。

1.3 电子信息系统

通常将由电子元器件或部件组成的能够产生、传输或处理电信号及信息的电路称为电子信息系统，如通信系统、雷达系统、计算机系统、电子测量系统、自动控制系统等，它们都是能够完成某种任务的电子设备。一般把规模较小、功能单一的电子电路称为单元电路；把功能复杂，由若干个单元电路（功能块）组成规模较大的电子电路称为电子系统。电子系统一般包括输入/输出、信息处理和控制三大部分，可实现信号的变换、处理、控制或负载驱动。图 1.1 所示为电子信息系统的 basic 组成框图。

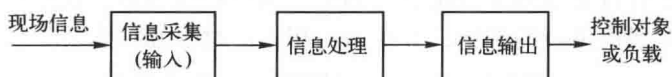


图 1.1 电子信息系统的 basic 组成框图

模拟电路和数字电路是构成各种电子系统的基础。模拟电路将各类待处理的物理量通过不同种类传感器转换为电信号，使电信号的电压、电流、相位、频率等参数与某物理量具有直接的对应关系。经过处理的电信号有的需要还原成模拟量，如电视系统将光信号转换成电信号，再将电信号转换成光信号；有的则转换成其他物理量，如测量温度的仪表将温度转换成电信号后经处理再转换成磁信号，通过指针表示温度值。数字电路主要用来对不随时间做连续变化的数字信号进行传输、处理和控制，一般由控制器和若干逻辑功能较单一的子系统构成，如存储器、译码器、比较器、计数器等。

1.4 模拟电子技术的特点

1. 工程性

电子技术的工程性就是“忽略次要，抓住主要”的近似估算方法、等效模型的构造方法、电子电路设计中可行性分析的方法等。实际工程需要证明其可行性，强调定性分析。在满足基本性能指标的前提下总是容许存在一定的误差范围的，定量分析为“估算”。电子电路归根结底是电路，但在不同条件下构造模型不同。

2. 实践性

任何电子电路和系统的设计，只有通过硬件实现，才能证明其正确性和可行性，并且在实际应用中还要解决电路和环境（温度、湿度等）关系的问题。

3. 系统性

一个实用电路，从信号输入、中间的处理到最后的输出，各级之间的增益分配、参数设置、逻辑关系都是相互协调、相互制约的，只有通盘考虑、全面调试才能获得理想效果。

1.5 课程学习要求

电子技术是一门硬件方面的重要基础课。任务是使学生获得电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,掌握电子技术的基本分析方法和设计方法,培养学生的分析问题、解决问题及工程实践的能力,具体的课程学习要求如下。

(1) 掌握基本概念、基本电路和基本分析方法。

(2) 注意定性分析和近似分析的重要性。

(3) 学会辩证、全面地分析电子电路中的问题。根据需求,设计最适用的电路,要研究利弊关系,通常“有一利必有一弊”。

(4) 注意电路中常用定理在电子电路中的应用。

(5) 具有实际应用中的基本能力。

① 会看:看图,定性分析。

② 会算:定量计算,培养分析问题的能力。

③ 会选:电路形式、器件、参数,培养解决问题的能力——设计能力。

④ 会调:培养解决问题的能力——实践能力综合应用所学知识的能力。

第 2 章 半导体器件

内容提要:

半导体器件是组成电子电路的基本元件,常用的半导体器件有二极管、晶体管、场效应管等。本章将学习 PN 结的形成,二极管、晶体管、场效应管的结构及其工作原理,特性曲线和主要参数等。

2.1 PN 结的形成及特性

按导电性能的不同,物质可分为导体、半导体和绝缘体。目前用来制造电子器件的半导体材料主要是硅(Si)、锗(Ge)等,它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,但其导电能力的大小与外部因素有关,例如,温度、光照的变化或掺入某些杂质,都可能使其导电能力发生显著变化。

2.1.1 半导体的基本知识

1. 本征半导体

常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)都是四价元素,其原子结构中最外层轨道上均有四个价电子,如图 2.1 (a) 和图 2.1 (b) 所示。半导体材料的导电能力与价电子关系密切,为了突出价电子的作用,习惯上用图 2.1 (c) 所示的简化原子结构模型来表示硅和锗原子。



图 2.1 Si 和 Ge 原子结构模型图

纯净的单晶半导体称为**本征半导体**。在 Si 和 Ge 本征半导体中,原子按一定的间隔排列成有规律的空间点阵。通过价电子的共有化运动,每一个原子最多有四个价电子分别与相邻的四个原子的各一个价电子形成**共价键**结构。单晶硅(锗)的共价键结构平面示意图如图 2.2 所示。这样,价电子不仅受到自身原子核的约束,而且也受到相邻原子核的吸引。

在绝对温度零度 (-273.15°C) 和没有外界影响的条件下, 本征半导体中所有价电子都被束缚在共价键内, 晶体中没有自由电子, 这时的本征半导体不导电。当半导体温度升高或者受到光照射时, 共价键内的价电子从外界获得能量, 其中获得能量较大的一部分价电子, 可以挣脱共价键的束缚而离开原子成为自由电子。当一个价电子离开原子后, 在其共价键内留下一个空位, 这种空位称为空穴。本征半导体受外界能量 (热能、光能、电能等) 的激发, 产生自由电子与空穴对的过程称为本征激发, 如图 2.3 所示。由于共价键内出现了空穴, 在外电场的作用下, 邻近的价电子就可填补到这个空位上, 而在这个电子原来的位置上又将产生一个新的空穴。这种空穴的转移可看作带正电荷的粒子在外电场的作用下, 沿上述价电子填补空穴的相反方向运动。一个空穴相当于带一个电子电荷的正电荷量, 因此, 空穴和自由电子一样可以参与导电, 所以, 把它们统称为载流子。空穴参与导电是半导体区别于导体的一个重要特征。

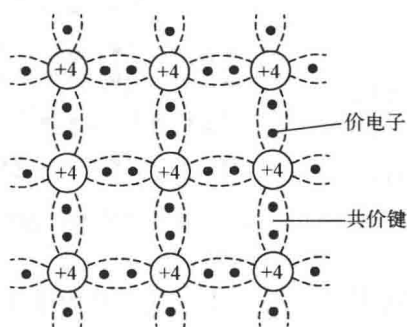


图 2.2 晶体中的价电子和共价键

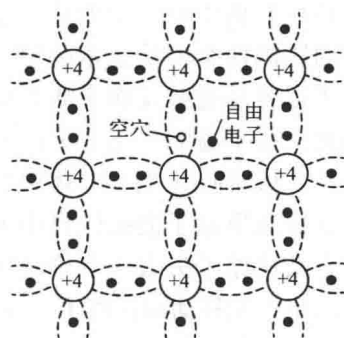


图 2.3 本征半导体中的自由电子和空穴

在本征半导体中, 由于本征激发, 不断产生自由电子和空穴对, 使载流子浓度增加。与此同时, 又会有相反的过程发生, 由于正电荷的吸引, 会使自由电子在运动中填补空穴而成为束缚电子, 从而消失一对自由电子和空穴, 这一过程称为复合。在一定的温度下, 如果没有其他外界因素的影响, 激发和复合处于动态平衡之中。因此, 在一定的温度下, 本征半导体中的载流子浓度是一定的。

2. 杂质半导体

在本征半导体中, 有选择地加入微量的其他元素, 可使其导电能力发生显著变化。所掺入的元素称之为杂质, 掺入了杂质的半导体称之为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同, 杂质半导体可分为 P (空穴) 型半导体和 N (电子) 型半导体两种。

1) P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价元素, 如硼 (B) 等元素杂质时, 即形成 P 型半导体, 如图 2.4 所示。因为三价元素的原子只有三个价电子, 当一个杂质原子替代晶格中的一个四价元素的原子, 并与周围的四个四价元素的原子形成共价键时, 因缺少一个电子便产生了一个空位。由于空位的存在, 当相邻共价键内的价电子获得一定能量时, 就可填补这个空位, 使杂质原子因多了一个价电子而成为

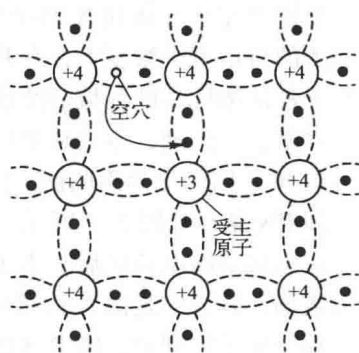


图 2.4 P 型半导体的晶体结构