



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

模拟电子技术

(第3版)

胡宴如 主编
耿苏燕 副主编



高等教育出版社
Higher Education Press

内容提要

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

(高职高专教育)

模拟电子技术

(第3版)

胡宴如 主 编

耿苏燕 副主编

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 胡宴如主编. — 北京: 高等教育出版社, 2008.6

ISBN 955-7-04-03400-2

Ⅰ. 模… Ⅱ. 胡… Ⅲ. 电子技术—教材 Ⅳ. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第083711号

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德胜门内大街2号 邮政编码 100120
总发行 新华书店 经销处 各地新华书店
印刷 北京印刷厂 印刷 电话 (010) 68254300

责任编辑 耿苏燕 封面设计 耿苏燕
版式设计 耿苏燕 责任校对 耿苏燕
责任印制 耿苏燕 电话 (010) 68254300
网址 <http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.janbao.com.cn>
电子邮箱 hep@hep.com.cn

2008年6月第1版 2008年6月第1次印刷
32开 160页 160千字
定价 25.00元

高等教育出版社

地址 北京市西城区德胜门内大街2号

电话 (010) 68254300

内容提要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材（高职高专教育）。为适应电子技术的迅速发展和新形势下高职高专教学需要，在第2版的基础上，总结国家精品课程教学实践、吸取各方面的建议和意见修订而成。

全书由半导体二极管及其基本应用、半导体三极管及其基本应用、放大电路基础、负反馈放大电路、集成运算放大器的应用电路、信号产生电路、直流稳压电源等七章以及电阻器、电容器使用知识和电子设计自动化仿真软件 EWB 的应用两个附录组成，并给出部分自测题与习题答案。

本书以应用为目的，突出理论与实践训练相结合，加强基本概念的叙述，将课堂讲授内容、讨论思考题、技能训练、课外自学内容、自测题与习题等优化组合，有利于启发引导，激发学习积极性。

与本书配套的出版物有学习指导、教学课件、考试系统和自测系统以及网络学习平台，形成完整的立体化教材，以帮助读者掌握本课程的主要内容和解题方法，便于教、学和检查教学效果。

本书可作为高职高专院校电类各专业“模拟电子技术”课程及其实训的教材，也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

模拟电子技术 / 胡宴如主编. —3 版. —北京：高等教育出版社，2008.6

ISBN 978-7-04-024007-8

I. 模… II. 胡… III. 模拟电路-电子技术-高等学校：技术学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 067971 号

策划编辑	孙 杰	责任编辑	曲文利	封面设计	张志奇	责任绘图	吴文信
版式设计	王艳红	责任校对	杨凤玲	责任印制	陈伟光		

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
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京奥鑫印刷厂

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
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>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 20.5
字 数 490 000

版 次 2000 年 8 月第 1 版
2008 年 6 月第 3 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 25.70 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 24007-00

第3版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是“十五”国家级规划教材(高职高专教育)《模拟电子技术》(第2版)的修订版。为了适应电子技术的迅速发展和新形势下高职高专教学的需要,在总结国家级精品课程教学实践的基础上,汲取各方面的建议和意见修订而成的。修订中对部分章节内容作了较大的变动,但仍保持原书的风格和特点,力求重点突出,简明扼要,深入浅出,理论与实践训练紧密结合。

与第2版相比,本版主要对下列内容作了较大的变动:

(1)简化二极管、三极管电路分析方法的讨论,以突出物理概念的叙述,强化应用。

(2)将原第4章基本运算电路部分、第5章和第6章合并组成“集成运算放大器应用电路”一章,减少电路的定量分析,删去模拟乘法器的调幅与解调电路等内容,以加强集成运算放大器线性应用电路的讨论,增加对集成运算放大器频率特性的了解,提高集成运算放大器的实际应用能力。

(3)精选实训内容,适当补充计算机仿真实验,删去常用电子仪器使用方法的介绍,突出重点,使之更符合技能型人才培养的需要。

(4)精选复习讨论题、习题,适当降低深度。每章增加自测题,以便帮助学生巩固本章所学基本知识。

本书以应用为目的,突出理论与实践训练相结合,将课堂讲授内容、讨论思考题、技能训练、课外自学内容、自测题与习题等优化组合,有利于启发引导,激发学习积极性,加强应用能力的培养。

与本书配套的出版物有学习指导、教学课件、考试系统和自测系统以及网络学习平台,形成完整的立体化教材,以帮助读者掌握本课程的主要内容和解题方法,提高应用能力,便于教、学和检查教学效果。

本书由胡宴如任主编,耿苏燕任副主编,胡旭峰、马丽明、王敏珍、项瑞顺等参与本书部分书稿的编写和整理工作。

本书由江苏科技大学张允赛教授仔细审阅,提出了许多修改意见,多年来,得到广大兄弟院校师生的关心和支持,提出了许多宝贵意见和建议,在此一并致以衷心的感谢。

由于我们水平有限,书中错漏及不妥之处在所难免,恳请读者继续给予批评指正。

编 者

2008.2

第2版前言

本书第1版于2000年出版。为了更好地适应高职高专教育发展的需要,现对原版进行修订,同时配套出版学习指导书。本次修订将保持原版的体系和特点,只对部分内容进行调整和修改,使全书内容更加符合高职高专的教学特点。本书体系是在多年教学改革与实践的基础上,吸收当前一些改革教材中成功举措而形成的,其改革的基本思路是:(1)以应用为目的,用工程观点删繁就简,突出重点,加强基本概念的叙述,提高实用性;(2)将课堂讲授、课内讨论、作业和技能训练有机结合融为一体,充分调动学生学习的积极性及主动性;(3)加强理论教学与实践教学的结合,注意理论内容与实践内容的分工和互补,培养学生工程思维方法和应用所学知识解决实际问题的能力。因此,根据上述思路,本书编写中采用了如下一些措施:

1. 将三种组态放大电路、差分放大电路、互补对称放大电路等基本单元电路合并为一章,着重于放大电路的基本工作原理、基本特性的分析,使本章内容简明精练。

2. 将负反馈与基本运算电路合并为一章,采用集成运算放大器构成的反馈放大电路进行反馈基本概念的分析,做到电路简单,概念清楚,容易理解。通过对深度负反馈放大电路特点的分析,引出“虚短”、“虚断”概念,从而为基本运算电路分析打下良好的基础。

3. 设置线性集成电路应用一章,以加强线性集成电路应用中的一些实际问题的介绍,如放大电路的频率特性、集成运算放大器高频参数及其影响、集成运算放大器的单电源供电等。并通过循序渐进的实践训练,加强学生对集成运算放大器和集成功放的应用能力。

4. 根据理论讲授、讨论、自学、作业及技能训练等教学环节安排教学内容,各有侧重又互相联系,以利于教学方法的改革,并使能力的培养贯穿于整个教学过程。书中每节均有复习讨论题,每章编有电路调整测试及技能训练项目、小结、习题等,其内容力求突出本课程特点及基本要求,做到有层次,便于因材施教。

5. 将理论教学内容与实践教学内容合在一起编写,加强理论与工程应用的结合,注意理论教学素材与实践教学素材的分工和互补,形成理论与实践训练相结合的教学模式。每章编写的电路调整测试及技能训练项目,按最基本的调整测试、简单设计安装调试和复杂的综合应用的次序,循序渐进地安排;注意加强集成电路的应用训练,编入部分电子新技术应用电路的实验;既有必讲必做的内容,也有自学选做的内容,以培养学生的创新能力。附录中列出了电阻器、电容器使用知识,电子仪器使用方法,同时较详细地介绍了 EWB 软件的使用及仿真实例,从而形成完整的实践与训练体系。

本书由胡宴如任主编,负责全书的统稿,耿苏燕任副主编,负责实践与训练内容的统稿。第3、5、6、7、8章由胡宴如编写,第1、2、4章及附录B由耿苏燕编写,胡旭峰对技能训练项目进行试做并编写了附录A和C,李晓鸣、马丽祥协助主编对全书复习题、习题进行整理和试做并绘制了大部分图稿。

第1版前言

本书是教育部高职高专规划教材,是在多年教学改革与实践的基础上,依据教育部最新制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》编写而成的,可作为高职高专电气、电子、通信、自动化、计算机等专业模拟电子技术课程的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员参考。

根据高职高专培养目标的要求以及现代科学技术发展的需要,本书在内容取舍上以现代电子技术的基本知识、基本理论为主线,使电子技术的基本理论与各种新技术有机结合在一起;以应用为目的,在保证科学性的前提下,从工程观点考虑,删繁就简,使理论分析重点突出、概念清楚、实用性强。

本书在内容安排上,以培养学生的工作能力为目的,将理论知识的讲授、课内讨论、作业与技能训练有机结合、融为一体,使能力培养贯穿于整个教学过程。每章都有电路调整测试及技能训练项目。技能训练内容丰富、实用,并引入计算机仿真技术 EWB。每章还编有小结、复习思考题、自学、选做等内容,便于组织课内讨论及技能训练,可边讲边练。在精讲与多练、辅导与自学相结合的原则下,使学生逐步提高获取知识的能力,逐步学会解决工程问题的思维方法和工作方法。

本书共八章,第1章为半导体二极管、第2章为半导体三极管、第3章为放大电路基础、第4章为负反馈放大电路与基本运算电路,这是本课程的基本内容,通过这一部分的教学使学生建立模拟电子技术的基本概念,掌握其基本理论、基本分析方法及电子电路调整测试的基本方法。第5章为线性集成电路的应用,重点介绍了线性集成电路的具体应用,根据专业不同可适当取舍。通过必要的讲解及学生自学,完成有关的技能训练项目,使学生熟悉常用线性集成电路的使用及其应用电路中元器件的选择、组装、调测方法。第6章为集成模拟乘法器及其应用,为选学内容,用以扩大知识面。第7章为信号产生电路,主要介绍正弦波和非正弦波振荡电路的工作原理及调整测试方法,并对锁相频率合成技术作简要介绍。第8章集成直流稳压电源主要介绍集成稳压器的应用,本章也可通过讲解及自学、学生独立完成技能训练项目来进行教学。本书每节复习思考题可作课堂讨论题,每章所编的电路调整与测试内容在教学中只作适当讲解,大部分内容可作为技能训练参考及自学内容,技能训练项目可根据具体情况适当选用,时间可多可少。

本书由胡宴如任主编,第1、2、4章及附录B由耿苏燕编写,其余部分均由胡宴如编写。

本书承蒙北京联合大学沈明山副教授仔细审阅,他提出了许多十分宝贵的意见,在此谨表示衷心的感谢。

书中错漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2000年2月

本书常用符号说明

一、常用下标符号意义

- i, o 分别表示输入和输出量
 s, f 分别表示信号源量和反馈量
 L 负载

二、常用符号意义

1. 放大倍数与增益

- A 放大倍数、增益通用符号
 A_u 电压放大倍数、增益
 A_{ud} 差模电压放大倍数、增益
 A_{us} 源电压放大倍数、增益
 A_{uf} 负反馈放大电路闭环电压放大倍数、增益

2. 电阻

- R 直流电阻或静态电阻
 r 器件内部的等效电阻(交流电阻或动态电阻)
 R_p 电位器(可变电阻)
 R_i 电路的输入电阻
 R_o 电路的输出电阻
 R_s 信号源内阻
 R_L 负载电阻
 R_f 反馈电阻

3. 电容、电感

- C 电容通用符号
 C_B, C_E 分别为基极、发射极旁路电容
 C_j PN 结电容
 L 电感、自感系数

4. 频率与通频带

- F, f 频率通用符号
 Ω, ω 角频率通用符号
 f_H 电路高频截止频率(上限频率)
 f_L 电路低频截止频率(下限频率)
 f_T 特征频率
 f_0 振荡频率、谐振频率

BW 3dB 通频带

BW_G 单位增益带宽

5. 功率与效率

P_o 交流输出功率

P_{DC} 直流电源供给功率

P_c 集电极耗散功率

P_{CM} 集电极最大允许功耗

η 效率

6. 其他

F 反馈系数

F_u 电压反馈系数

H 双口网络混合参数

K 乘法器增益系数

K_{CMR} 共模抑制比

Q 静态工作点

V 半导体二极管和三极管

T, t 时间、周期、温度

τ 时间常数

φ 相角

三、 $U(I)$ 不同书写体电压(电流)符号的规定

1. 大写 $U(I)$ 大写下标, 表示直流电压(电流)值, 例如 U_{BE} 表示基极与发射极之间的直流电压。

2. 大写 $U(I)$ 小写下标表示交流电压(电流)的有效值, 例如 U_{be} 表示基极与发射极之间的交流电压的有效值。

3. 小写 $u(i)$ 大写下标, 表示含有直流电压(电流)的瞬时值, 例如, u_{BE} 表示基极与发射极之间含有直流电压的瞬时值。

4. 小写 $u(i)$ 小写下标, 表示交流电压(电流)瞬时值, 例如, u_{be} 表示基极与发射极之间交流电压的瞬时值。

5. 大写 $U(I)$ 小写 m 下标, 表示交流电压(电流)的最大值, 例如, I_{cm} 表示集电极交流电流的最大值。

6. $\dot{U}(\dot{I})$ 为正弦交流电压(电流)的相量表示。

7. 大写 V 大写双字母下标表示直流供电电源电压, 例如, V_{CC} 表示集电极直流供电电源电压。

目 录

第1章 半导体二极管及其基本应用

应用	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.1.3 PN结	3
复习与讨论题	5
1.2 二极管的特性及主要参数	6
1.2.1 二极管的结构	6
1.2.2 二极管的伏安特性	7
1.2.3 温度对二极管特性的影响	8
1.2.4 二极管的主要参数	8
复习与讨论题	8
1.3 二极管的基本应用	8
1.3.1 二极管的大信号模型	8
1.3.2 二极管应用电路举例	10
1.3.3 二极管的直流电阻和交流电阻	12
复习与讨论题	13
1.4 特殊二极管	13
1.4.1 稳压二极管	13
1.4.2 发光二极管与光电二极管	15
1.4.3 变容二极管	16
复习与讨论题	16
1.5 二极管应用电路的测试	16
1.5.1 二极管使用基本知识	16
1.5.2 技能训练项目	19
复习与讨论题	23
本章小结	23
自测题	24
习题	25

第2章 半导体三极管及其基本应用

应用	28
2.1 晶体管的特性和参数	28

2.1.1 晶体管的工作原理	28
2.1.2 晶体管的伏安特性	31
2.1.3 晶体管的主要参数	32
复习与讨论题	35
2.2 晶体管的基本应用	35
2.2.1 晶体管直流电路的分析	35
2.2.2 晶体管开关电路及晶体管工作状态 的判断	37
2.2.3 晶体管基本放大电路及其分析 方法	38
复习与讨论题	45
2.3 场效应管及其基本应用	45
2.3.1 MOS场效应管	46
2.3.2 结型场效应管	50
2.3.3 场效应管的主要参数	52
2.3.4 场效应管的基本应用	53
复习与讨论题	56
2.4 晶体管基本应用电路的测试	56
2.4.1 晶体管使用基本知识	56
2.4.2 技能训练项目	59
复习与讨论题	61
本章小结	61
自测题	63
习题	65

第3章 放大电路基础

3.1 放大电路的基本知识	69
3.1.1 放大电路的组成	69
3.1.2 放大电路的主要性能指标	70
复习与讨论题	74
3.2 三种基本组态放大电路	74
3.2.1 共发射极放大电路	74
3.2.2 共集电极放大电路	79
3.2.3 共基极放大电路	81
3.2.4 场效应管放大电路	82

复习与讨论题	84
3.3 差分放大电路	85
3.3.1 差分放大电路的工作原理	85
3.3.2 具有电流源的差分放大电路	89
3.3.3 差分放大电路的差模传输特性	92
3.3.4 差分放大电路的输入、输出方式	93
复习与讨论题	96
3.4 互补对称功率放大电路	96
3.4.1 放大电路工作状态的分类	96
3.4.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	97
3.4.3 甲乙类互补对称功率放大电路	100
复习与讨论题	103
3.5 多级放大电路	103
3.5.1 多级放大电路的组成及性能指标的估算	103
3.5.2 集成运算放大器及其基本应用电路	106
复习与讨论题	110
3.6 放大电路的调整与测试	110
3.6.1 放大电路调整与测试的基本方法	110
3.6.2 集成运算放大器使用基本知识	114
3.6.3 技能训练项目	117
复习与讨论题	121
本章小结	122
自测题	123
习题	125
第4章 负反馈放大电路	131
4.1 负反馈放大电路的组成及基本类型	131
4.1.1 反馈放大电路的组成及基本关系式	131
4.1.2 负反馈放大电路的基本类型	133
4.1.3 负反馈放大电路分析	134
复习与讨论题	137
4.2 负反馈对放大电路性能的影响	138
4.2.1 提高增益的稳定性	138
4.2.2 减小失真和扩展通频带	138
4.2.3 改变放大电路的输入和输出电阻	139

复习与讨论题	140
4.3 负反馈放大电路应用中的几个问题	140
4.3.1 放大电路引入负反馈的一般原则	140
4.3.2 深度负反馈放大电路的特点及性能估算	141
4.3.3 负反馈放大电路的稳定性	144
复习与讨论题	144
4.4 负反馈放大电路的调整与测试	145
4.4.1 负反馈放大电路调整与测试注意事项	145
4.4.2 技能训练项目	145
复习与讨论题	148
本章小结	148
自测题	149
习题	151

第5章 集成运算放大器的应用

电路	154
5.1 基本运算电路	154
5.1.1 比例运算电路	154
5.1.2 加减运算电路	156
5.1.3 微分与积分运算电路	159
5.1.4 模拟乘法器在运算电路中的应用	161
复习与讨论题	164
5.2 集成运算放大器的频率特性	164
5.2.1 简单 RC 低通和高通电路的频率特性	164
5.2.2 晶体管及其单级放大电路的高频特性	167
5.2.3 集成运算放大器的频率特性及其高频参数	170
复习与讨论题	172
5.3 集成运算放大器交流放大电路	172
5.3.1 反相交流放大电路	173
5.3.2 同相交流放大电路	174
5.3.3 交流电压跟随器与汇集放大电路	176

104	复习与讨论题	176	6.3.2 锁相频率合成器	223
5.4	有源滤波电路	177	复习与讨论题	224
5.4.1	有源低通滤波电路	177	6.4 信号产生电路的调整与测试	224
5.4.2	有源高通滤波电路	179	6.4.1 信号产生电路调整与测试方法	224
5.4.3	有源带通滤波电路	180	6.4.2 技能训练项目	226
5.4.4	有源带阻滤波电路	181	复习与讨论题	228
	复习与讨论题	181	本章小结	228
5.5	集成功率放大器及其应用	181	自测题	230
5.5.1	LM386 集成功率放大器及其应用	182	习题	231
5.5.2	TDA2040 集成功率放大器及其应用	183		
5.5.3	TDA1521 集成功率放大器及其应用	184	第7章 直流稳压电源	235
5.5.4	集成功率放大器使用注意事项	184	7.1 单相整流滤波电路	235
	复习与讨论题	185	7.1.1 单相整流电路	235
5.6	集成运算放大器应用电路的调整与测试	185	7.1.2 滤波电路	237
5.6.1	集成运算放大器应用电路元器件的选择	185	复习与讨论题	239
5.6.2	集成运算放大器应用电路调整与测试	188	7.2 线性集成稳压器	239
5.6.3	技能训练项目	188	7.2.1 串联型稳压电路的工作原理	240
	复习与讨论题	192	7.2.2 三端固定输出集成稳压器	240
本章小结		193	7.2.3 三端可调输出集成稳压器	243
自测题		194	复习与讨论题	244
习题		196	7.3 开关集成稳压电源	245
			7.3.1 开关稳压电源的基本工作原理	245
第6章 信号产生电路		201	7.3.2 集成开关稳压器及其应用	247
6.1 正弦波振荡电路		201	复习与讨论题	251
6.1.1	正弦波振荡电路的工作原理	201	7.4 直流稳压电源的调整与测试	251
6.1.2	RC 振荡电路	204	7.4.1 直流稳压电源的主要技术指标	251
6.1.3	LC 振荡电路	207	7.4.2 直流稳压电源的调整与测试方法	252
6.1.4	石英晶体振荡电路	211	7.4.3 技能训练项目	254
	复习与讨论题	213	复习与讨论题	256
6.2 非正弦波信号产生电路		213	本章小结	256
6.2.1	电压比较器	213	自测题	257
6.2.2	方波、三角波和锯齿波产生电路	217	习题	258
6.2.3	集成压控振荡器	219		
	复习与讨论题	222	附录A 电阻器、电容器使用知识	260
6.3 锁相频率合成电路		222	A1 电阻器	260
6.3.1	锁相环路	222	A2 电容器	264
			附录B 电子设计自动化仿真软件 EWB 的应用	270

第1章

半导体二极管及其基本应用

引言 半导体二极管(简称二极管)是由PN结构成的一种最简单的半导体器件,其主要特性是单向导电性,它在电子技术中有着广泛的应用。

本章先讨论半导体的基础知识、普通二极管的特性和主要参数以及它的应用,然后简要介绍几种特殊二极管,最后列出常用二极管参数及技能训练内容。

1.1 半导体的基础知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多,用来制造半导体器件的材料主要是硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等,其中硅用得最广泛。

1.1.1 本征半导体

纯净的单晶半导体称为本征半导体。用于制造半导体器件的纯硅和锗都是晶体,其原子最外层轨道上有四个电子(称为价电子),它们同属于四价元素。在单晶体结构中,原子在空间形成排列整齐的点阵(称为晶格),价电子成为相邻的原子所共有,形成图 1.1.1 所示的共价键结构,图中 +4 代表四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。共价键中的价电子,将受共价键的束缚。在室温

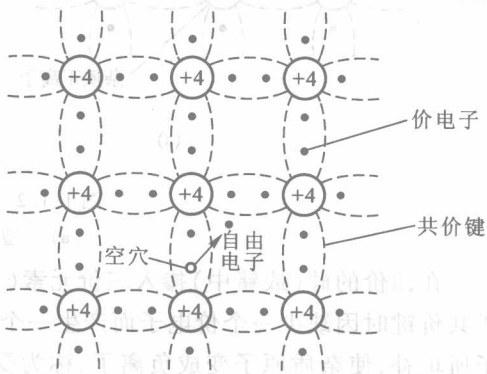


图 1.1.1 硅和锗的原子结构及本征激发示意图

或光照下,少数价电子可以获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,如图 1.1.1 所示,这种现象称为本征激发,这个空位称为空穴,可见本征激发产生的自由电子和空穴是成对的。原子失去价电子后带正电,可等效地看成是因为有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补,使空位发生转移,这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动,但其运动方向与价电子运动方向相反。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失,这种现象称为复合。温度一定时,自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡,这时自由电子和空穴的浓度一定。

在电场作用下,自由电子和空穴将作定向运动,这种运动称为漂移,所形成的电流称为漂移电流。自由电子又称电子载流子,空穴又称空穴载流子。因此,半导体中有自由电子和空穴两种载流子参与导电,分别形成电子电流和空穴电流,这一点与金属导体的导电机理不同。在常温下本征半导体载流子浓度很低,因此导电能力很弱。

1.1.2 杂质半导体

为了提高半导体的导电能力,可在本征半导体中掺入微量杂质元素,掺杂后的半导体称为杂质半导体。按掺入杂质的不同有 N 型半导体和 P 型半导体之分。

在四价的硅(或锗)中掺入五价元素(如磷、砷、锑等)后,杂质原子替代了晶格中某些四价元素原子的位置,如图 1.1.2(a)所示。杂质原子与周围的四价元素原子结合成共价键时多余一个价电子,这个多余的价电子在室温下就能挣脱原子核的束缚成为自由电子,杂质原子则变成带正电荷的离子,称施主离子。掺入多少杂质原子就能电离产生多少个自由电子,因此自由电子的浓度大大增加。这时由本征激发产生的空穴被复合的机会增多,使空穴浓度反而减少。这种以电子导电为主的半导体称为 N 型(或电子型)半导体,其中自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。

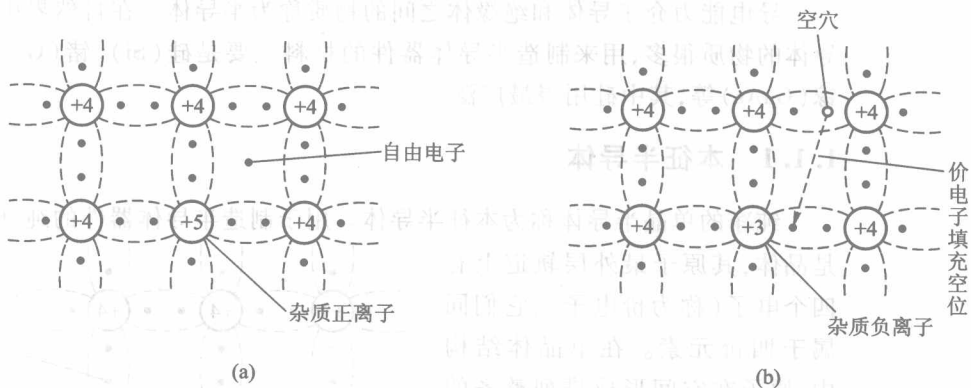


图 1.1.2 杂质半导体结构示意图
(a) N 型半导体 (b) P 型半导体

在四价的硅(或锗)中掺入三价元素(如硼、铝、镓等)后,杂质原子与周围的四价元素原子形成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位,室温下这个空位极容易被邻近共价键中的价电子所填补,使杂质原子变成负离子,称为受主离子,如图 1.1.2(b)所示,这种掺杂使空穴的浓度大大增加,这是以空穴导电为主的半导体,称为 P 型(或空穴型)半导体,其中空穴为多子,自由

电子为少子。

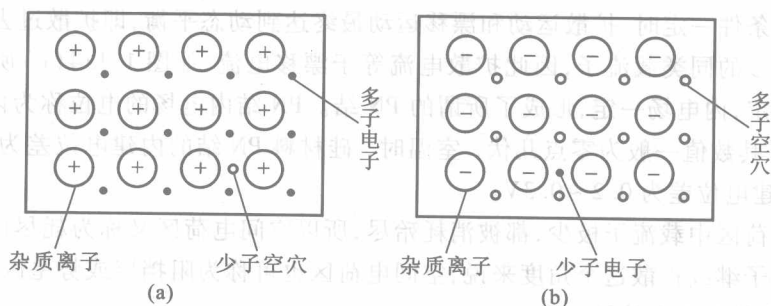


图 1.1.3 杂质半导体中的载流子和离子

(a) N 型半导体 (b) P 型半导体

图 1.1.3 所示为杂质半导体中载流子和杂质离子的示意图。必须指出:杂质离子虽然带电荷,但不能移动,因此它不是载流子;杂质半导体中虽然有一种载流子占多数,但整个半导体仍呈电中性。

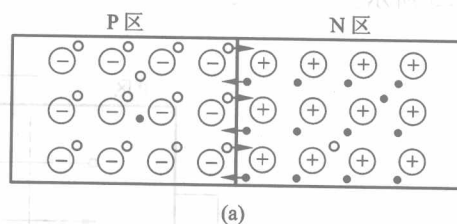
杂质半导体的导电性能主要取决于多子浓度,多子浓度主要取决于掺杂浓度,其值较大并且稳定,因此导电性能得到显著改善。少子浓度主要与本征激发有关,因此对温度敏感,其大小随温度的升高而增大。

1.1.3 PN 结

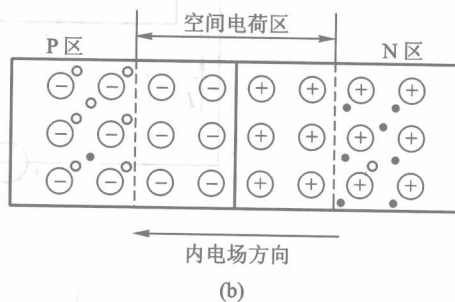
一、PN 结的形成

采用特定的制造工艺,在同一块半导体基片的两边分别形成 N 型和 P 型半导体。由于 P 型和 N 型半导体交界面两侧的两种载流子浓度有很大的差异,因此会产生载流子从高浓度区向低浓度区的运动,这种运动称为扩散,如图 1.1.4(a) 所示。P 区中的多子空穴扩散到 N 区,与 N 区中的自由电子复合而消失;N 区中的多子电子向 P 区扩散并与 P 区中的空穴复合而消失。结果使交界面附近载流子浓度骤减,形成了由不能移动的杂质离子构成的空间电荷区,同时建立了内建电场(简称内电场),内电场方向由 N 区指向 P 区,如图 1.1.4(b) 所示。

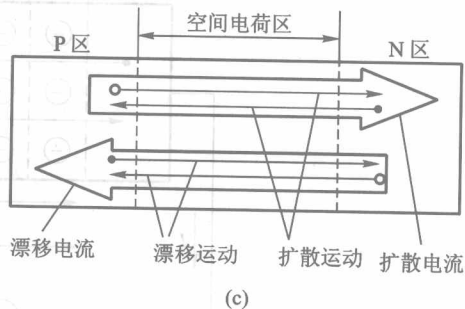
内电场将产生两个作用:一方面阻碍多子的扩散运动,另一方面促使两个区靠近交界面处的少子产生漂移运动。起始时内电场较小,扩散运动较



(a)



(b)



(c)

图 1.1.4 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动 (b) 动态平衡时的 PN 结及其内电场 (c) 动态平衡时 PN 结中的载流子运动及电流

强,漂移运动较弱,随着扩散的进行,空间电荷区增宽,内电场增大,扩散运动逐渐困难,漂移运动逐渐加强。外部条件一定时,扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡,即扩散过去多少载流子必然漂移过来同样多的同类载流子,因此扩散电流等于漂移电流,如图 1.1.4(c) 所示。这时空间电荷区的宽度一定,内电场一定,形成了所谓的 PN 结。PN 结内电场的电位称为内建电位差,又叫接触电位 U_B ,其数值一般为零点几伏,室温时,硅材料 PN 结的内建电位差为 $0.5 \sim 0.7\text{V}$,锗材料 PN 结的内建电位差为 $0.2 \sim 0.3\text{V}$ 。

由于空间电荷区中载流子极少,都被消耗殆尽,所以空间电荷区又称为耗尽区。另外,从 PN 结内电场阻止多子继续扩散这个角度来说,空间电荷区也可称为阻挡层或势垒区。

二、PN 结的单向导电特性

加在 PN 结上的电压称为偏置电压,若 P 区接电位高端、N 区接电位低端,则称 PN 结外接正向电压或 PN 结正向偏置,简称正偏;反之,称 PN 结外接反向电压或反向偏置,简称反偏。如图 1.1.5 所示。

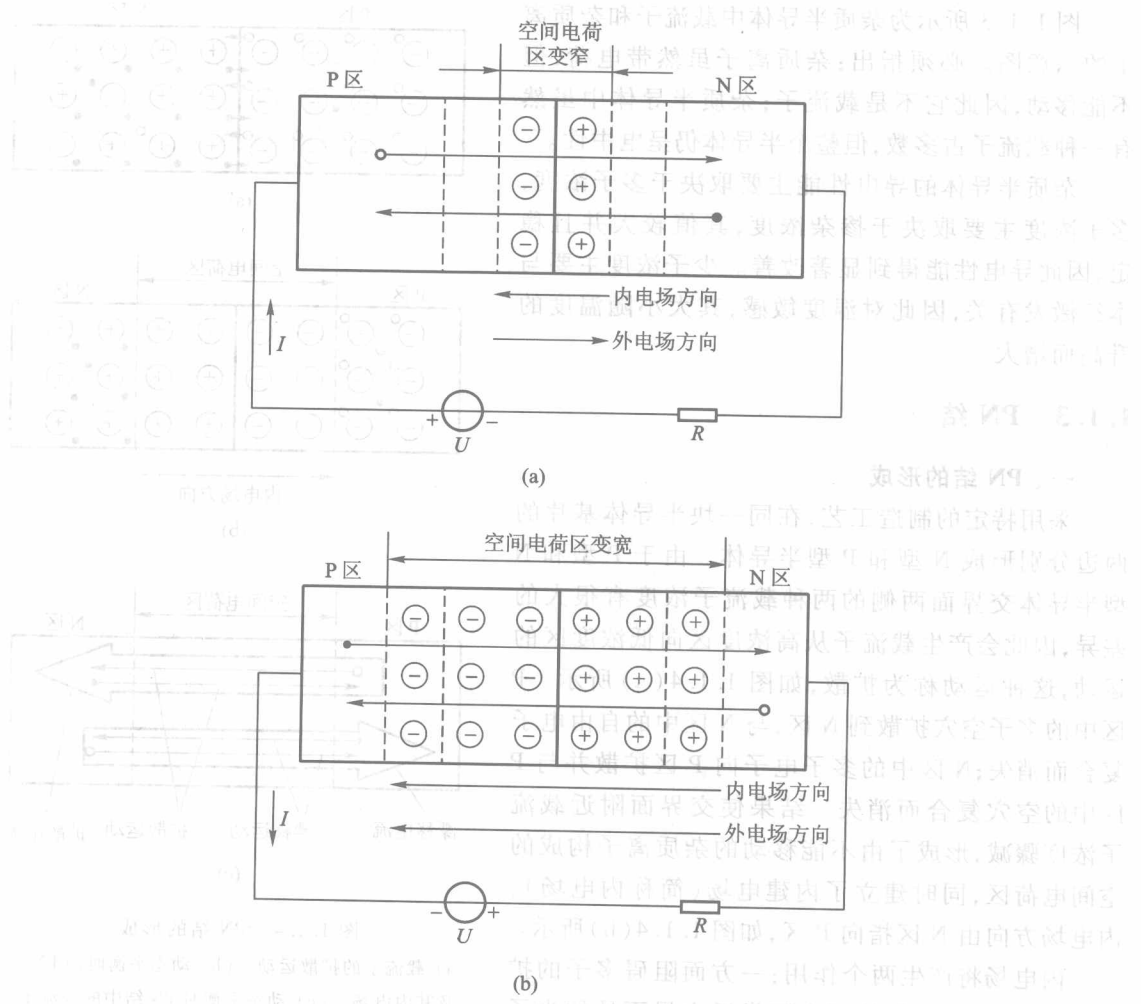


图 1.1.5 PN 结的单向导电特性
(a) 正向偏置, 导通 (b) 反向偏置, 截止