

21

21 SHIJI GAOZHIGAOZHUAN DIANZI JISHU GUIHUA JIAOCAI

世纪高职高专电子技术规划教材

模拟电子技术

苏士美 主编

- 引入工程实践
- 突出基本概念
- 注重技能训练

免费提供
电子教案
习题解答



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

21 世纪高职高专电子技术规划教材

模拟电子技术

苏士美 主编

人民邮电出版社

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/苏士美主编. —北京:人民邮电出版社,2005.8

21 世纪高职高专电子技术规划教材

ISBN 7-115-13467-7

I. 模... II. 苏... 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(2005)第 075780 号

内 容 提 要

本书共分 8 章,包括半导体器件基础、基本放大电路和多级放大电路、差动放大电路和集成运算放大器、反馈放大电路、功率放大电路、集成运算放大器的应用、信号产生电路和直流稳压电源等内容。为突出对学生实际应用能力的培养,书中每章末增加了实用电路举例、实训项目、读图练习、各类电子器件和新器件实用资料速查的内容,并结合目前电子技术的发展,增加了电子元件、集成器件的选用、识别、测试方法,噪声干扰, D 类功放, 开关电容滤波, 开关电源, 直流变换等内容。附录为 EDA 电子设计自动化、电子工作台 EWB 仿真软件的简单介绍。本书注重理论联系实际,避免复杂的数学推导和计算。

本书为高职高专院校电子信息、电气、自动化等相关专业的教材,也可供有关工程技术人员参考。

21 世纪高职高专电子技术规划教材

模拟电子技术

◆ 主 编 苏士美

责任编辑 赵慧君

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号

邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

北京通州大中印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 14.75

字数: 339 千字

印数: 3 001—5 000 册

2005 年 8 月第 1 版

2006 年 2 月北京第 2 次印刷

ISBN 7 115-13467-7 / TN · 2507

定价: 20.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

21 世纪高职高专电子技术规划教材

编 委 会

主 任 王俊鹏

副 主 任 张惠敏 向 伟

编 委 (以姓氏笔画为序)

朱乃立 阮友德 许恒玉 苏本庆 余本海

李存永 肖 琰 邱寄帆 张新成 林训超

胡修池 胡起宙 赵慧君 曾令琴 韩 丽

程 勇 潘春燕

丛书出版前言

遵照教育部提出的以就业为导向,高职高专教育从专业本位向职业岗位和就业为本转变的指导思想,人民邮电出版社协同一些高职高专院校和相关企业共同开发了 21 世纪高职高专电子技术规划教材。

随着职业教育在我国不断深化,各高职高专院校越来越关注人才培养的模式与专业课程设置,越来越关心学生将来的就业岗位,并开始注重培养学生的职业能力。但是我们看到,高职高专院校所培养的人才与市场上需要的技术应用型人才仍存在差距。那么如何在保证知识体系完整性的同时,能在教材中体现正在应用的技术、正在发展的技术和前沿的技术成了本套教材探讨的重点,为此我们在如下几个方面做了努力和尝试。

1. 针对电子类专业基础课程较经典,及知识点又相对统一、固定的特点,采取本科老师与高职高专老师合作编写的方式,借助本科老师在理论方面深厚的功底,在写作质量上进行把关,高职高专老师则发挥其熟悉职业教育教学需求的优势把握教材的广度与深度,力图解决专业基础课程理论与应用相结合的目的。

2. 高职高专教育培养的人才面向生产、管理第一线的技术型人才,基础课程的教学应以必需、够用为原则,以掌握概念、强化应用为教学重点,注重岗位能力的培养。本套教材在保证基本知识点讲解的同时,掌握“突出基本概念,注重技能训练,强调理论联系实际,加强实践性教学环节”的原则,在内容安排上避免复杂的数学推导和计算。

3. 专业课程引入工程实例,强化培养职业能力。让学生了解在实际工作中利用单片机和 PLC 做项目的流程,并通过一系列小的实例逐步让学生产生学习兴趣,并了解开发过程,最后通过一个大的完整案例对学生进行综合培训,从而达到对职业能力的培养。

以上这些仅是高职高专教材出版的初步。如何配合学校做好为国家培养人才的工作,出版高质量的教材将是我们不断追求和奋斗的目标。

我们衷心希望,关注高等职业教育的广大读者能对本套教材的不当之处给予批评指正,提出修改意见,同时也热切盼望从事高等职业教育的老师、企业专家和我们联系,共同探讨相关专业的教学方案和教材编写等问题。来信请发至 zhaohuijun@ptpress.com.cn。

21 世纪高职高专电子技术规划教材编委会

2005 年 8 月

编者的话

高职高专教育培养的人才面向生产、管理第一线，是技术型人才，基础课程的教学应以必需、够用为原则，以掌握概念、强化应用为教学重点，注重岗位能力的培养。本书在编写的过程中按照“保证基础知识，突出基本概念，注重技能训练，强调理论联系实际，加强实践性教学环节”的原则，力求避免复杂的数学推导和计算。

本书有如下特点。

1. 在内容的安排上，除了包含模拟电子技术的基本内容外，还增加了实用电路举例、读图练习、实训项目、各类电子器件和新器件实用资料速查等内容。结合电子技术的发展，书中增加了 D 类功率放大器、直流变换、开关电源、集成开关电容滤波、噪声干扰等内容。附录中还安排了 EDA 电子设计自动化、电子工作台 EWB 软件和电子电路仿真实验分析的内容，从而保证了课程基本知识的连续性和知识的先进性。

2. 在知识的讲解上，力求用简练的语言循序渐进，深入浅出地让学生理解并掌握基本概念，熟悉各种典型的单元电路。对电子器件着重介绍其外部特性和参数，重点放在使用方法和实际应用上；对典型电路进行分析时，不做过于繁杂的理论推导；对集成电路主要介绍新器件的型号、特点和应用。

3. 在实践性教学方面，增加电子元件、集成器件的选用、识别、测试方法等内容的介绍；选择一些比较新的、实用的电路作为实训项目，让学生设计制作，以增强学生的实际动手能力；选择一些基本特色实用电路作为例子介绍，以开拓学生的电路视野；安排一些具体的实例作为读图练习的内容，培养学生理论联系实际，电子电路读图的能力；相关章节安排的实用资料速查，具有一定的先进性和实用性，为学生的学习和知识拓展提供了方便。

4. 为了方便学生自学和复习，书中每章均有导读、基本要求、小结和习题，以便于学生自检和自测。

本书教学参考课时共为 60 学时左右。书中带有 * 号的内容，不同的专业可根据课时安排及需要选讲，或安排课外学习。教学过程中，可另外安排 12 课时的实训；教学课程结束后，可安排一周的模拟电子技术课程设计。

本书由郑州大学苏士美担任主编并编写第 1 章、第 2 章 2.1 节至 2.3 节和第 4 章，郑州大学叶会英编写第 3 章、第 5 章、第 6 章，郑州大学张洪编写第 2 章 2.4 节至 2.9 节和附录 A，河南职业技术学院任枫轩编写第 7 章、第 8 章和附录 B。

在本书编写的过程中，郑州大学王俊鹏教授，河南职业技术学院李伟老师，对本书提出了许多宝贵的意见和建议，在此编者表示衷心的感谢。

尽管我们做出了很多的努力，但鉴于编者水平所限，书中的错误和缺点在所难免，不当之处，敬请专家和读者批评指正。

编者

2005 年 4 月

书中常用符号表

A 基本放大电路

A 开环放大倍数 (增益)

A_f 闭环放大倍数 (增益)

A_i 电流放大倍数 (增益)

A_{od} 开环差模电压放大倍数

A_u 电压放大倍数 (增益)

A_{uc} 共模电压放大倍数 (增益)

A_{ud} 差模电压放大倍数 (增益)

A_{uf} 闭环电压放大倍数 (增益)

A_{uo} 开环电压放大倍数 (增益)

b 三极管的基极

BW 放大电路的带宽

BW_f 闭环放大电路的带宽

C 电容

C_e 三极管的射极旁路电容

C_b 三极管的基极旁路电容

C_f 反馈电容

c 三极管的集电极

d (D) 场效应管的漏极

e 三极管的发射极

F 反馈网络

F 放大电路的反馈系数

F_u 电压反馈系数

f 频率

f_H 放大电路的上限频率

f_{Hf} 闭环放大电路的上限频率

f_L 放大电路的下限频率

f_{Lf} 闭环放大电路的下限频率

f_M 最高工作频率

f_P 晶体并联谐振频率

f_S 晶体串联谐振频率

f_T 三极管的特征频率

f_β 三极管的共射截止频率

f_0 振荡频率、谐振频率

g (G) 场效应管的栅极

g_m 场效应管的跨导

I_B 三极管基极直流电流

I_b 三极管的基极交流电流有效值

i_B 三极管基极瞬时电流

i_b 三极管基极交流电流

I_{bm} 三极管基极交流电流峰值

I_{BQ} 三极管基极静态直流电流

I_C 三极管集电极直流电流

i_C 三极管集电极瞬时电流

i_c 三极管集电极交流电流

I_{cm} 三极管集电极交流电流峰值

I_{CQ} 三极管集电极静态直流电流

I_{CBO} 三极管集电极基极反向饱和电流

I_{CEO} 三极管穿透电流

I_{CM} 三极管集电极最大允许电流

I_D 场效应管漏极直流电流

i_D 场效应管漏极瞬时电流

i_d 场效应管漏极交流电流

I_{DSS} 场效应管饱和漏极电流

I_E 三极管发射极直流电流

i_E 三极管发射极瞬时电流

i_e 三极管发射极交流电流

I_{EQ} 三极管发射极静态直流电流

I_F 二极管最大整流电流

i_f 并联反馈的反馈电流

i_i 输入电流

I_{IB} 运算放大器输入偏置电流

i_{id} 并联反馈电路净输入电流

I_{IO} 运算放大器输入失调电流

I_{OM} 最大输出电流

I_L 负载平均电流

- i_o 输出电流
 I_{om} 输出电流峰值
 I_R 参考电流 (基准电流)
 I_S 二极管反向饱和电流
 I_Z 稳压管稳定电流
 IC 集成电路
 K 热力学温度单位 (开尔文)
 K 玻尔兹曼常数
 K_{CMR} 共模抑制比
 L 电感
 LED 发光二极管
 N_F 噪声系数
 P_C 三极管消耗的功率
 P_{CM} 三极管的最大耗散功率
 P_{DM} 场效应管的最大耗散功率
 P_E 直流电源消耗的功率
 P_M 二极管最大耗散功率
 P_n 噪声功率
 P_o 输出功率
 P_{omax} 最大不失真输出功率
 P_s 信号功率
 Q 静态工作点
 Q 品质因数
 R 电阻
 R_b 三极管基极偏置电阻
 r_{be} 三极管基极和发射极之间的交流输入电阻
 R_c 三极管的集电极电阻
 R_f 反馈电阻
 R_{GS} 场效应管直流输入电阻
 R_i 放大电路的输入电阻
 r_{id} 差模输入电阻
 R_{if} 反馈放大电路的输入电阻
 R_L 负载电阻
 R_o 放大电路的输出电阻
 r_{od} 差模输出电阻
 R_{of} 反馈放大电路的输出电阻
 R_P 电位器 (可变电阻)
 R_S 信号源内阻
 r_z 稳压管动态电阻
 S 开关
 S_R 转换速率
 s (S) 场效应管的源极
 T 变压器
 T 热力学温度
 t 时间
 U_B 三极管基极直流电压
 U_{BB} 三极管基极电源电压
 U_{BC} 三极管基极和集电极间的直流电压
 U_{BE} 三极管基极和发射极间的直流电压
 U_{BEQ} 三极管基极和发射极间的静态直流电压
 U_{BQ} 三极管基极静态直流电压
 U_{BR} 反向击穿电压
 U_C 三极管集电极直流电压
 U_{CBO} 三极管集电极和基极间的反向击穿电压
 U_{CC} 三极管集电极电源电压
 U_{CE} 三极管集电极与发射极间的直流电压
 U_{CEO} 三极管集电极与发射极间的反向击穿电压
 U_{CEQ} 三极管集电极与发射极间的静态直流电压
 U_{CES} 三极管的饱和电压
 U_{CQ} 三极管集电极静态直流电压
 U_{DD} 场效应管漏极电源电压
 U_{DS} 场效应管漏源极之间的直流电压
 U_E 三极管发射极直流电压
 U_{EE} 三极管发射极电源电压
 U_{EQ} 三极管发射极静态直流电压
 U_{GD} 场效应管栅极和漏极之间的直流电压
 U_{GG} 场效应管栅极电源电压
 U_{GS} 场效应管栅源之间的直流电压
 U_n 热噪声电压
 U_T 场效应管开启电压
 U_{th} 死区电压、门坎电压
 U_P 场效应管夹断电压
 U_{GSQ} 场效应管栅源静态电压
 u_i 串联反馈的反馈电压
 u_i 交流输入电压

u_{ic} 共模输入电压	u_+ 运算放大器同向端输入电压
u_{id} 差模输入电压、串联反馈净输入电压	u_- 运算放大器反向端输入电压
U_{IO} 运算放大器输入失调电压	VD 二极管、稳压二极管
U_L 负载平均电压	VT 三极管、场效应管
u_o 交流输出电压	X_i 反馈放大电路的输入信号
u'_o 交流开路输出电压	X_{id} 反馈放大电路的净输入信号
U_{OH} 运算放大器正向最大输出电压	X_f 反馈放大电路的反馈信号
U_{OL} 运算放大器负向最大输出电压	X_o 反馈放大电路的输出信号
U_{om} 输出电压峰值	α 共基极电流放大系数
U_{omax} 最大输出电压幅值	β 共射极电流放大系数
U_{REF} 基准电压	η 效率
U_{RM} 二极管最高反向工作电压	θ 整流元件的导电角
u_s 信号源电压	φ_a 基本放大电路的附加相位移
U_{TH} 阈值电压或门限电压	φ_f 反馈网络的附加相位移
U_{TH1} 上限阈值电压	τ 时间常数
U_{TH2} 下限阈值电压	ω 角频率
ΔU_{TH} 回差电压	⊗ 比较环节
U_Z 稳压管稳定电压	

目 录

第 1 章 半导体器件基础	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	2
1.1.3 PN 结及其单向导电性	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构及符号	5
1.2.2 二极管的伏安特性及主要参数	6
1.2.3 二极管的测试	7
1.2.4 二极管应用电路举例	8
1.2.5 特殊二极管	9
1.3 半导体三极管	12
1.3.1 三极管的结构及符号	12
1.3.2 三极管的电流分配原则及放大作用	13
1.3.3 三极管的特性曲线及主要参数	15
1.3.4 三极管的检测	18
1.3.5 特殊三极管	20
* 1.4 场效应管	21
1.4.1 结型场效应管	21
1.4.2 绝缘栅场效应管	24
1.4.3 各种场效应管的符号、电压极性及特性曲线	27
1.4.4 三极管与场效应管的性能特点及检测与选用	28
本章小结	29
实训项目	29
实用资料速查	30
思考复习题	36
第 2 章 基本放大电路和多级放大电路	40
2.1 基本共射极放大电路	40
2.1.1 三极管在放大电路中的三种连接方式	40
2.1.2 基本放大电路的组成和工作原理	41
2.1.3 放大电路的主要性能指标	43
2.2 基本放大电路的分析方法	45
2.2.1 放大电路的图解分析法	45

2.2.2	放大电路的微变等效电路分析法	50
2.2.3	两种分析方法特点比较	52
2.3	工作点稳定电路	53
2.3.1	温度变化对Q点的影响	53
2.3.2	工作点稳定电路的组成及稳定Q点的原理	54
2.3.3	工作点稳定电路的分析	54
2.4	共集和共基放大电路	57
2.4.1	共集电极放大电路	57
2.4.2	共基极放大电路	58
2.4.3	三种组态放大电路的性能比较	59
* 2.5	场效应管放大电路	60
2.5.1	场效应管放大电路的构成	60
2.5.2	场效应管放大电路的分析	61
2.6	多级放大电路及复合管	63
2.6.1	多级放大电路的耦合方式	63
2.6.2	多级放大电路的分析	64
2.6.3	复合管	66
2.7	放大电路的频率响应	67
2.7.1	频率响应的基本概念	67
2.7.2	单级共射放大电路的频率响应	68
2.7.3	多级放大电路的频率响应	69
* 2.8	放大电路中的噪声与干扰	70
2.8.1	放大电路中的噪声	70
2.8.2	放大电路中的干扰	71
* 2.9	实际应用电路举例	73
2.9.1	高输入阻抗、低噪声前置放大电路	73
2.9.2	低阻抗传声器前置放大电路	74
2.9.3	单位增益缓冲器	74
	本章小结	75
	实训项目	76
	实用资料速查	77
* 读图练习		79
	思考复习题	80
第3章	差动放大电路与集成运算放大器	85
3.1	差动放大电路	85
3.1.1	零点漂移的概念	85
3.1.2	差动放大电路的基本形式	85
3.1.3	差动放大电路的输入、输出形式	89
3.1.4	恒流源式差动放大电路	91

3.2 集成运算放大器	93
3.2.1 集成运算放大器的基本组成	93
3.2.2 集成运算放大器的主要性能指标	93
3.2.3 集成运算放大器使用中的几个具体问题	94
本章小结	97
实训项目:集成运算放大器的外观识别	98
* 读图练习:典型集成运放单元实例	98
实用资料速查:典型集成运放参数列表	99
思考复习题	101
第4章 反馈放大电路	103
4.1 反馈的基本概念	103
4.1.1 反馈的概念	103
4.1.2 反馈放大电路的一般表达式	104
4.2 反馈的类型及其判定方法	104
4.2.1 正反馈和负反馈	104
4.2.2 交流反馈和直流反馈	106
4.2.3 电压反馈和电流反馈	107
4.2.4 串联反馈和并联反馈	107
4.2.5 交流负反馈放大电路的四种组态	108
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	109
4.3.1 负反馈对放大电路性能的影响	109
4.3.2 放大电路引入负反馈的一般原则	111
* 4.3.3 负反馈放大电路的稳定问题	112
4.4 深度负反馈放大电路的估算	114
4.4.1 深度负反馈放大电路的特点	114
4.4.2 深度负反馈放大电路的估算	114
* 4.5 实际应用电路举例	116
本章小结	117
实训项目:制作电子助听器	118
* 读图练习	119
思考复习题	119
第5章 功率放大电路	123
5.1 功率放大电路的几个问题	123
5.1.1 功率放大电路的特点及主要技术指标	123
5.1.2 功率放大电路工作状态的分类	124
5.2 几种常见的功率放大电路	125
5.2.1 OCL 乙类互补对称功率放大电路	125
5.2.2 OCL 甲乙类互补对称功率放大电路	127
5.2.3 OTL 甲乙类互补对称功率放大电路	129

5.2.4 采用复合管的互补功率放大电路	129
* 5.3 D类功率放大电路简介	130
* 5.4 集成功率放大器及其应用	131
本章小结	132
实训项目:集成音频功率放大器的调整与测试	133
* 读图练习:一种实际功率放大电路	133
实用材料速查:典型集成功率放大器的型号和参数	134
思考复习题	134
第6章 集成运算放大器的应用	138
6.1 理想运放及运放工作的两个区域	138
6.1.1 理想运算放大器	138
6.1.2 集成运放的两个工作区	139
6.2 运放的线性应用电路	140
6.2.1 信号运算电路	140
6.2.2 有源滤波电路	144
6.3 运放的非线性应用电路——电压比较器	148
6.3.1 单限比较器	148
6.3.2 滞回比较器(迟滞比较器)	149
* 6.4 实际应用电路举例	151
6.4.1 精密整流电路	151
6.4.2 精密放大器	152
本章小结	153
实训项目:阶梯波发生器	153
* 读图练习:集成仪表用放大器	154
实用资料速查:集成电压比较器型号和参数	155
思考复习题	156
第7章 信号产生电路	160
7.1 正弦波信号振荡电路	160
7.1.1 正弦波信号振荡电路的基本概念	160
7.1.2 RC桥式正弦波振荡电路	162
7.1.3 LC正弦波振荡电路	164
7.1.4 石英晶体振荡电路	168
7.2 非正弦波信号振荡电路	170
* 7.3 集成函数产生器 8038 的功能及应用	172
* 7.4 应用电路举例	173
本章小结	174
实训项目	175
* 读图练习:特色信号产生电路实例	176
思考复习题	177

第 8 章 直流稳压电源	179
8.1 小功率单相整流滤波电路	179
8.1.1 整流电路	180
8.1.2 滤波电路	182
8.2 串联反馈稳压电路	185
8.2.1 稳压电路主要技术指标	185
8.2.2 串联反馈式稳压电路	186
8.2.3 三端集成稳压器及其应用	186
* 8.3 其他电源电路	189
8.3.1 开关电源电路	189
8.3.2 直流—直流(DC-DC)电压变换电路	191
* 8.4 实际应用电路举例	192
本章小结	193
实训项目	193
* 读图练习:实用电源电路	194
实用资料速查:常用集成稳压器型号与性能指标	195
思考复习题	195
附录 A EDA(电子设计自动化)简介	197
A1 EDA 技术的概念	197
A2 EDA 常用的工具软件	197
A3 EDA 技术的发展及趋势	198
附录 B EWB 简介和基本应用	200
B1 EWB 的基本使用方法	200
B1.1 EWB 对系统的要求和软件安装	200
B1.2 EWB 的主窗口	200
B1.3 EWB 的电路创建	203
B1.4 虚拟仪器仪表的使用	206
B1.5 电路的仿真分析	210
B2 模拟电子电路的仿真实验与分析	211
B2.1 小信号交流放大电路仿真实验	211
B2.2 LC 正弦波振荡电路	213
B2.3 电路分析	214
参考文献	217

第 1 章

半导体器件基础

本章导读：半导体器件是现代电子技术的基础，学习电子技术，首先要学习有关半导体器件的基础知识。本章首先介绍半导体基础知识以及半导体器件的核心内容 PN 结，接着引出半导体二极管、三极管和场效应管的结构、特性曲线、参数、检测及应用。

本章基本要求：掌握 PN 结的结构及单向导电性；熟悉二极管的伏安特性、主要参数、测试方法和典型应用电路；熟悉三极管和场效应管的符号、特性曲线、主要参数及测试方法；了解半导体器件的内部结构以及内部工作原理。

1.1 半导体基础知识

自然界中的物质，按其导电能力可分为三大类：导体、半导体和绝缘体。易于传导电流的物质称为导体，如金、银、铜、铝等金属材料；很难传导电流的物质称为绝缘体，如橡胶、塑料等材料；半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。现代电子技术中常用的半导体材料主要有硅（Si）、锗（Ge）和化合物半导体砷化镓（GaAs）等，硅是目前最常用的一种半导体材料，其次是锗半导体材料。

半导体除了在导电能力方面不同于导体和绝缘体外，它还具有一些其他物质不具备的特点：①热敏性：当半导体材料受外界热刺激时，其导电能力将发生显著改变；②光敏性：当半导体材料受外界光照射时，其导电能力将发生显著改变；③掺杂性：在纯净半导体材料中，掺入微量杂质，半导体的导电能力会有显著增加。

利用半导体的这些特点，可以制成半导体热敏器件、光敏器件和半导体二极管、三极管、场效应管等器件。

1.1.1 本征半导体

完全纯净的、结构完整的半导体材料称为本征半导体。

1. 本征半导体的原子结构及共价键

硅和锗都是四价元素，它们都具有四个价电子。在本征半导体材料硅和锗中，每个原子外层的价电子不仅受到自身原子核的束缚，而且受到周围相邻原子核的束缚，每个价电子的个别轨道，成为相邻两个原子间两个价电子的公共轨道，此即晶体中的共价键结构。共价键内的两个电子由相邻的原子各用一个价电子组成，称为束缚电子。图 1.1 所示为硅和锗的原子结构和共价键结构。

2. 本征激发和两种载流子——自由电子和空穴

绝对零度（ $T=0\text{K}$ ， $T=t+273$ ）下，本征半导体中没有可以自由移动的带电粒子（载

流子), 半导体材料不导电。但在一定的温度下, 如 $T=300\text{K}$ 时, 由于热激发, 少数束缚电子会获取足够的能量脱离共价键的束缚而成为自由电子 (可以自由移动的电子载流子), 这种现象叫本征激发。温度越高, 半导体材料中产生的自由电子便越多。束缚电子脱离共价键成为自由电子后, 在原来的位置留有一个空位, 称此空位为空穴。

本征半导体中, 自由电子和空穴成对出现, 数目相同。图 1.2 所示为本征激发所产生的电子空穴对。

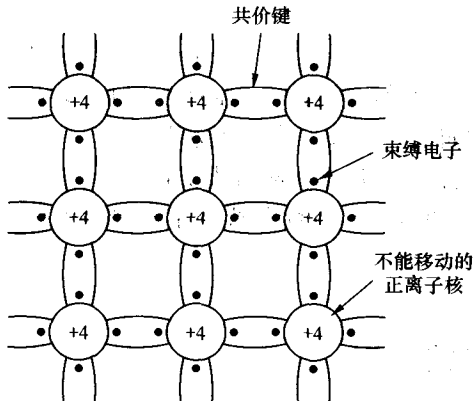


图 1.1 硅和锗的原子结构和共价键结构

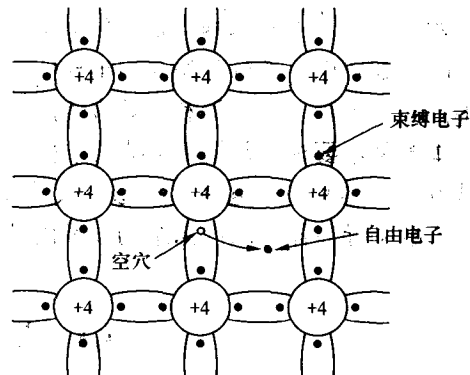


图 1.2 本征激发产生电子空穴对

如图 1.3 所示, 空穴 (如图中位置 1) 出现以后, 邻近的束缚电子 (如图中位置 2) 可能获取足够的能量来填补这个空穴, 而在这个束缚电子的位置又出现一个新的空位, 另一个束缚电子 (如图中位置 3) 又会填补这个新的空位, 这样就形成束缚电子填补空穴的运动。为了区别自由电子的运动, 称此束缚电子填补空穴的运动为空穴运动。

由此可见, 空穴也是一种载流子。半导体材料中空穴越多, 其导电能力也就越强。

3. 结论

- (1) 半导体中存在两种载流子, 一种是带负电的自由电子, 另一种是带正电的空穴, 它们都可以运载电荷形成电流。
 - (2) 本征半导体中, 自由电子和空穴相伴产生, 数目相同。
 - (3) 一定温度下, 本征半导体中电子空穴对的产生与复合相对平衡, 电子空穴对的数目相对稳定。
 - (4) 温度升高, 激发的电子空穴对数目增加, 半导体的导电能力增强。
- 空穴的出现是半导体导电区别导体导电的一个主要特征。

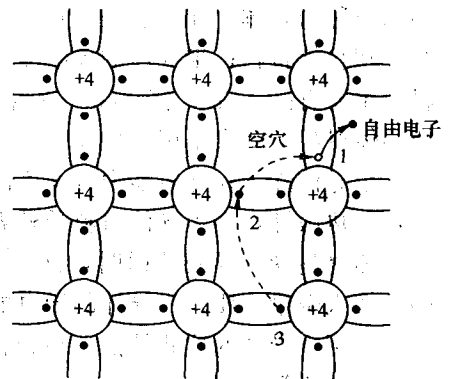


图 1.3 束缚电子填补空穴的运动

1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中加入微量杂质, 可使其导电性能显著改变。根据掺入杂质的性质不同, 杂质半导体分为两类: 电子型 (N 型) 半导体和空穴型 (P 型) 半导体。

1. N型半导体

在硅（或锗）半导体晶体中，掺入微量的五价元素，如磷（P）、砷（As）等，则构成N型半导体。

五价的元素具有五个价电子，它们进入由硅（或锗）组成的半导体晶体中，五价的原子取代四价的硅（或锗）原子，在与相邻的硅（或锗）原子组成共价键时，因为多一个价电子不受共价键的束缚，很容易成为自由电子，于是半导体中自由电子的数目大量增加。自由电子参与导电移动后，在原来的位置留下一个不能移动的正离子，半导体仍然呈现电中性，但与此同时没有相应的空穴产生，如图1.4所示。

例如在室温 27°C 时，每立方厘米本征硅材料中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个，掺杂后成为N型半导体，其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会，空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个以下。所以N型半导体中，自由电子为多数载流子，简称为多子；空穴为少数载流子，简称为少子。N型半导体主要靠自由电子导电。

2. P型半导体

在硅（或锗）半导体晶体中，掺入微量的三价元素，如硼（B）、镓（Ga）等，则构成P型半导体。

三价的元素只有三个价电子，在与相邻的硅（或锗）原子组成共价键时，由于缺少一个价电子，在晶体中便产生一个空位，邻近的束缚电子如果获取足够的能量，有可能填补这个空位，使原子成为一个不能移动的负离子，半导体仍然呈现电中性，但与此同时没有相应的自由电子产生，如图1.5所示。

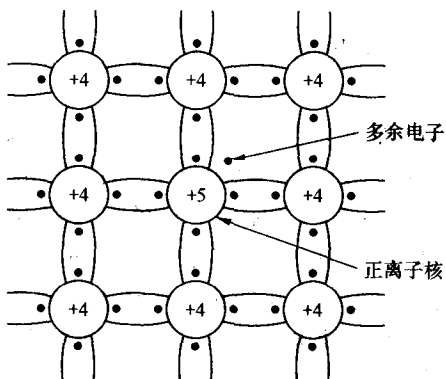


图 1.4 N型半导体的共价键结构

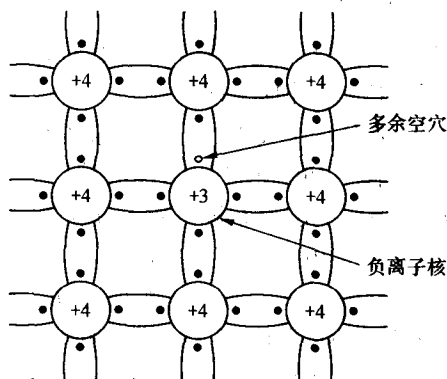


图 1.5 P型半导体共价键结构

P型半导体中，空穴为多数载流子（多子），自由电子为少数载流子（少子）。P型半导体主要靠空穴导电。

1.1.3 PN结及其单向导电性

1. PN结的形成

将一块半导体的两边分别做成P型半导体和N型半导体。由于P型半导体中空穴的浓度大、自由电子少，N型半导体中自由电子的浓度大、空穴少，即载流子存在浓度的差别，P区的空穴将越过交界面向N区扩散，在P区留下不能移动的负离子，而N区的自由电子