

高等职业教育电子技术技能培养规划教材
Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

模拟 电子技术

(第2版)

苏士美 主编 李伟 副主编



Analog Electronic Technology
(2nd Edition)

引入工程实践，内容通俗易懂
突出基本概念，贴近学科前沿
提供实训项目，注重技能训练

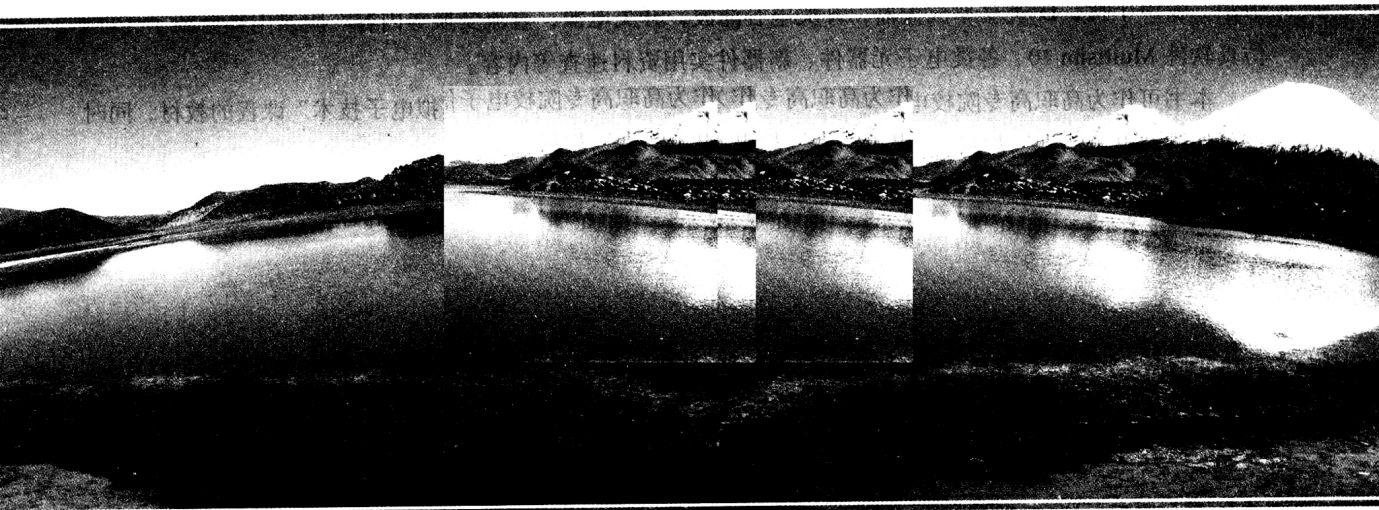
 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

高等职业教育电子技术技能培养规划教材
Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jinqing Peiyang Guihua Jiaocai

模拟 电子技术

(第2版)

苏士美 主编 李伟 副主编



Analog Electronic Technology
(2nd Edition)

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术 / 苏士美主编. — 2版. — 北京 :
人民邮电出版社, 2010.4
高等职业教育电子技术技能培养规划教材
ISBN 978-7-115-22150-6

I. ①模… II. ①苏… III. ①模拟电路—电子技术—
高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第017401号

内 容 提 要

本书内容分为基础理论篇和实践训练篇两部分,基础理论篇包括半导体器件基础、基本放大电路和多级放大电路、差动放大电路与集成运算放大器、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、直流稳压电源;实践训练篇包含12个实训内容。

为了体现电子技术的发展创新和实际应用,本书专门增加了电子元件、集成器件的选用、识别、测试方法,噪声干扰,D类功率放大器,开关电容滤波,开关电源,直流变换等内容。附录中还介绍了EDA仿真软件Multisim 10、各类电子元器件、新器件实用资料速查等内容。

本书可作为高职高专院校电子信息类和电气、自动化类各专业的“模拟电子技术”课程的教材,同时也可作为“电子实训”教材,也可供本科学生、相关工程技术人员参考。

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

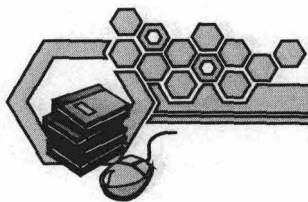
模拟电子技术 (第2版)

-
- ◆ 主 编 苏士美
副 主 编 李 伟
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>
北京华正印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 19.25
字数: 488千字
印数: 26 001—29 000册
 - 2010年4月第2版
2010年4月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22150-6

定价: 34.00元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67179223
反盗版热线: (010)67171154



第2版前言

本书是《模拟电子技术》的修订本,在修订过程中除了保持前版的“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”的编写思路外,考虑到高职高专教育培养的模式以及技术型人才的需要,对本书内容做出如下调整。

1. 全书分为基础理论篇和实践训练篇两部分。
2. 基础理论篇基础知识突出对基本概念的讲解,每章的实用电路举例则强调了实践性。书中每一章均设有导读、基本要求、小结和思考复习题,以便学生自检和自测。
3. 实践训练篇中既有非线性元器件二极管、三极管的识别和检测,也有常用的线性元器件电阻、电容、电感的识别与检测,另外,还有集成电路的识别与检测,电子电路焊接技术,直流稳压电源、函数发生器、超外差式收音机、电子猫的装配与调试等内容。实训内容可以结合基础理论课程的进度安排教学,也可以单独作为电子实践训练课程。
4. 在实践训练中安排有识图练习,同时增加了 EDA 仿真软件 Multisim 的实践训练。
5. 各类电子器件和新器件实用资料速查调整到附录 B 中,同时增加了一些常用元器件、新器件的资料。
6. 附录 A 中介绍了最新的 EDA 仿真软件 Multisim 10。

本书的基础理论教学参考课时约为 60 学时。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;实践训练参考课时约为 56 学时,不同的专业可根据教学所需及课时安排进行选择。

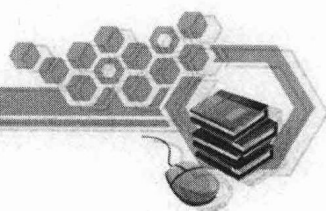
本书由郑州大学苏士美任主编,并编写基础理论篇中的第 1 章、第 2 章、第 4 章,同时撰写前言和常用符号表;河南职业技术学院李伟任副主编,并编写实践训练篇中的实训一、实训四、实训九、实训十及实训十一;郑州大学叶会英编写基础理论篇中的第 3 章、第 5 章、第 6 章;河南职业技术学院任枫轩编写基础理论篇中的第 7 章、第 8 章以及实践训练篇中的实训三、实训五、实训六、实训七和附录 A;郑州大学包毅编写实践训练篇中的实训二、实训八、实训十二和附录 B。

本版相对于前版虽有所改进,但鉴于编者水平所限,书中的错误和不足在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者

2009 年 12 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	r_z 稳压管动态电阻
I_{om} 输出电流峰值	S 开关
I_R 参考电流 (基准电流)	S_R 转换速率
I_s 二极管反向饱和电流	s (S) 场效应管的源极
I_Z 稳压管稳定电流	T 变压器
IC 集成电路	T 绝对温度
K 热力学温度单位 (开尔文)	t 时间
K 玻尔兹曼常数	U_B 三极管基极直流电压
K_{CMR} 共模抑制比	U_{BB} 三极管基极电源电压
L 电感	U_{BC} 三极管基极和集电极间的直流电压
LED 发光二极管	U_{BE} 三极管基极和发射极间的直流电压
N_F 噪声系数	U_{BEQ} 三极管基极和发射极间的静态直
P_C 三极管消耗的功率	流电压
P_{CM} 三极管的最大耗散功率	U_{BQ} 三极管基极静态直流电压
P_{DM} 场效应管的最大耗散功率	U_{BR} 反向击穿电压
P_E 直流电源消耗的功率	U_C 三极管集电极直流电压
P_M 二极管最大耗散功率	U_{CBO} 三极管集电极和基极间的反向击
P_n 噪声功率	穿电压
P_o 输出功率	U_{CC} 三极管集电极电源电压
P_{omax} 最大不失真输出功率	U_{CE} 三极管集电极与发射极间的直流电
P_s 信号功率	压
Q 静态工作点	U_{CEO} 三极管集电极与发射极间的反向
Q 品质因数	击穿电压
R 电阻	U_{CEQ} 三极管集电极与发射极间的静态
R_b 三极管基极偏置电阻	直流电压
r_{be} 三极管基极和发射极之间的交流输	U_{CES} 三极管的饱和电压
入电阻	U_{CQ} 三极管集电极静态直流电压
R_c 三极管的集电极电阻	U_{DD} 场效应管漏极电源电压
R_f 反馈电阻	U_{DS} 场效应管漏源极之间的直流电压
R_{GS} 场效应管直流输入电阻	U_E 三极管发射极直流电压
R_i 放大电路的输入电阻	U_{EE} 三极管发射极电源电压
r_{id} 差模输入电阻	U_{EQ} 三极管发射极静态直流电压
R_{if} 反馈放大电路的输入电阻	u_f 串联负反馈反馈信号电压
R_L 负载电阻	U_{GD} 场效应管栅极和漏极之间的直流电
R_o 放大电路的输出电阻	压
r_{od} 差模输出电阻	U_{GG} 场效应管栅极电源电压
R_{of} 反馈放大电路的输出电阻	U_{GS} 场效应管栅源之间的直流电压
R_P 电位器 (可变电阻)	U_n 热噪声电压
R_s 信号源内阻	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_f 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_{id} 差模输入电压、串联反馈净输入电压

U_{IO} 运算放大器输入失调电压

U_L 负载平均电压

u_o 交流输出电压

u'_o 交流开路输出电压

U_{OH} 运放正向最大输出电压

U_{OL} 运放负向最大输出电压

U_{om} 输出电压峰值

U_{omax} 最大输出电压幅值

U_{REF} 基准电压

U_{RM} 二极管最高反向工作电压

u_s 信号源电压

U_{TH} 阈值电压或门限电压

U_{TH1} 上限阈值电压

U_{TH2} 下限阈值电压

ΔU_{TH} 回差电压

U_Z 稳压管稳定电压

u_+ 运算放大器同向端输入电压

u_- 运算放大器反向端输入电压

VD 二极管

VZ 稳压管

VT 三极管、场效应管

X_i 反馈放大电路的输入信号

X_{id} 反馈放大电路的净输入信号

X_f 反馈放大电路的反馈信号

X_o 反馈放大电路的输出信号

α 共基极电流放大系数

β 共射极电流放大系数

η 效率

θ 整流元件的导电角

φ_a 基本放大电路的附加相位移

φ_f 反馈网络的附加相位移

τ 时间常数

ω 角频率

基础理论篇

第 1 章 半导体器件基础.....3

1.1 半导体基础知识.....3

1.1.1 本征半导体.....4

1.1.2 杂质半导体.....5

1.1.3 PN 结及其单向导电性.....6

1.2 半导体二极管.....7

1.2.1 二极管的结构及符号.....7

1.2.2 二极管的伏安特性和主要参数.....8

1.2.3 二极管的测试.....10

1.2.4 二极管应用电路举例.....10

1.2.5 特殊二极管.....12

1.3 半导体三极管.....14

1.3.1 三极管的结构及符号.....14

1.3.2 三极管的电流分配原则及放大作用.....15

1.3.3 三极管的特性曲线及主要参数.....18

1.3.4 三极管的检测.....21

1.3.5 特殊三极管.....22

* 1.4 场效应管.....23

1.4.1 结型场效应管.....23

1.4.2 绝缘栅场效应管.....26

1.4.3 各种场效应管的特性曲线与符号比较.....29

1.4.4 三极管与场效应管的性能特点比较及检测与选用.....30

本章小结.....31

思考复习题.....32

第 2 章 基本放大电路和多级放大电路..... 36

2.1 基本共射极放大电路..... 36

2.1.1 三极管在放大电路中的 3 种连接方式..... 36

2.1.2 基本放大电路的组成和工作原理..... 37

2.1.3 放大电路的主要性能指标..... 39

2.2 基本放大电路的分析方法..... 41

2.2.1 放大电路的图解分析法..... 41

2.2.2 放大电路的微变等效电路分析法..... 46

2.2.3 两种分析方法特点的比较..... 49

2.3 工作点稳定电路..... 50

2.3.1 温度变化对 Q 点的影响..... 50

2.3.2 工作点稳定电路的组成及稳定 Q 点的原理..... 50

2.3.3 工作点稳定电路的分析..... 51

2.4 共集和共基放大电路..... 53

2.4.1 共集电极放大电路..... 53

* 2.4.2 共基极放大电路..... 55

2.4.3 3 种组态放大电路的性能比较..... 56

* 2.5 场效应管放大电路..... 57

2.5.1 场效应管放大电路的构成..... 57

2.5.2 场效应管放大电路的分析..... 58

2.6 多级放大电路及复合管..... 59

2.6.1 多级放大电路的耦合方式..... 60

2.6.2 多级放大电路的分析方法..... 61

2.6.3 复合管..... 63

2.7 放大电路的频率响应..... 64



2.7.1 频率响应的基本概念	64	表达式	94
2.7.2 单级共射放大电路的频率响应	65	4.2 反馈的类型及其判定方法	95
2.7.3 多级放大电路的频率响应	66	4.2.1 正反馈和负反馈	95
* 2.8 放大电路中的噪声与干扰	67	4.2.2 交流反馈和直流反馈	96
2.8.1 放大电路中的噪声	67	4.2.3 电压反馈和电流反馈	97
2.8.2 放大电路中的干扰	68	4.2.4 串联反馈和并联反馈	97
* 2.9 实际应用电路举例	70	4.2.5 交流负反馈放大电路的4种组态	98
2.9.1 高输入阻抗、低噪声前置放大电路	70	4.3 负反馈对放大电路性能的影响	100
2.9.2 低阻抗传声器前置放大电路	71	4.3.1 负反馈对放大电路性能的影响	100
2.9.3 单位增益缓冲器	71	4.3.2 放大电路引入负反馈的一般原则	102
本章小结	72	* 4.3.3 负反馈放大电路的稳定问题	103
思考复习题	73	4.4 深度负反馈放大电路的估算	104
第3章 差动放大电路与集成运算放大器	78	4.4.1 深度负反馈放大电路的特点	104
3.1 差动放大电路	78	4.4.2 深度负反馈放大电路的估算	105
3.1.1 零点漂移的概念	78	* 4.5 实际应用电路举例	107
3.1.2 差动放大电路的基本形式	79	本章小结	108
3.1.3 差动放大电路的输入、输出形式	82	思考复习题	109
3.1.4 恒流源式差动放大电路	84	第5章 功率放大电路	112
3.2 集成运算放大器	86	5.1 功率放大电路的几个问题	112
3.2.1 集成运算放大器的基本组成	86	5.1.1 功率放大电路的特点及主要技术指标	112
3.2.2 集成运算放大器的主要性能指标	86	5.1.2 功率放大电路工作状态的分类	113
3.2.3 集成运算放大器的选择与使用	87	5.2 几种常见的功率放大电路	114
本章小结	90	5.2.1 OCL 乙类互补对称功率放大电路	114
思考复习题	91	5.2.2 OCL 甲乙类互补对称功率放大电路	117
第4章 反馈放大电路	93	5.2.3 OTL 甲乙类互补对称功率放大电路	118
4.1 反馈的基本概念	93		
4.1.1 反馈的概念	93		
4.1.2 反馈放大电路的一般			



5.2.4 采用复合管的互补功率放大电路	119	第 8 章 直流稳压电源	163
* 5.3 D 类功率放大电路简介	119	8.1 小功率单相整流滤波电路	163
* 5.4 集成功率放大器及其应用	120	8.1.1 整流电路	164
本章小结	122	8.1.2 滤波电路	167
思考复习题	122	8.2 串联反馈稳压电路	169
第 6 章 集成运算放大器的应用	126	8.2.1 稳压电路主要技术指标	169
6.1 理想运放及运放工作的两个区域	126	8.2.2 串联反馈式稳压电路	170
6.1.1 理想运算放大器	126	8.2.3 三端集成稳压器及其应用	171
6.1.2 集成运放的两个工作区域	127	* 8.3 其他电源电路	173
6.2 运放的线性应用电路	128	8.3.1 开关电源电路	173
6.2.1 信号运算电路	128	8.3.2 直流-直流 (DC-DC) 电压变换电路	175
6.2.2 有源滤波电路	132	* 8.4 实际应用电路举例	176
6.3 运放的非线性应用电路——电压比较器	136	本章小结	177
6.3.1 单限比较器	136	思考复习题	178
6.3.2 滞回比较器 (迟滞比较器)	137	实践训练篇	
* 6.4 实际应用电路举例	139	实训一 线性器件电阻、电容、电感的识别与检测	183
6.4.1 精密整流电路	139	实训二 非线性器件二极管、三极管的识别与检测	196
6.4.2 精密放大器	140	实训三 Multisim 实践训练 1——单管及多级放大电路的仿真设计与分析	202
本章小结	141	实训四 集成电路的识别和检测	207
思考复习题	141	实训五 Multisim 实践训练 2——负反馈放大电路的仿真设计与分析	215
第 7 章 信号产生电路	145	实训六 电子电路焊接技术	218
7.1 正弦波信号振荡电路	145	实训七 Multisim 实践训练 3——集成运放应用电路的仿真设计与分析	223
7.1.1 正弦波信号振荡电路的基本概念	145	实训八 识图练习——典型放大电路单元实例	228
7.1.2 RC 桥式正弦波振荡电路	147	实训九 直流稳压电源的装配与调试	233
7.1.3 LC 正弦波振荡电路	150	实训十 函数发生器的装配与调试	237
7.1.4 石英晶体振荡电路	154		
7.2 非正弦波信号振荡电路	155		
* 7.3 集成函数产生器 8038 的功能及应用	157		
* 7.4 应用电路举例	159		
本章小结	160		
思考复习题	161		



实训十一 超外差式收音机的装配 与调试	241
实训十二 电子猫的仿真设计与装 配调试	247
附录 A EDA 仿真软件 Multisim 10 简介	253
A.1 NI Multisim 10 系统简介	253
A.2 Multisim 10 的基本界面	254
A.3 Multisim 10 的基本操作	262
A.4 电路创建的基础	266
A.5 仪器仪表的使用	267
附录 B 实用资料速查	276
B.1 半导体器件型号命名法	276
B.2 各种典型半导体器件的 型号与参数	280
B.3 常用集成运算放大器的性 能参数	290
B.4 典型集成功率放大器的 型号与参数	295
B.5 集成电压比较器的型号与 参数	295
B.6 常用集成稳压器的型号与 性能指标	296
参考文献	297

基础理论篇

第 1 章 半导体器件基础

第 2 章 基本放大电路和多级放大电路

第 3 章 差动放大电路与集成运算放大器

第 4 章 反馈放大电路

第 5 章 功率放大电路

第 6 章 集成运算放大器的应用

第 7 章 信号产生电路

第 8 章 直流稳压电源

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。

半导体导电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。

利用半导体导电的这些特点，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 4 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，这个空位被称为空穴。

在本征半导体中，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。

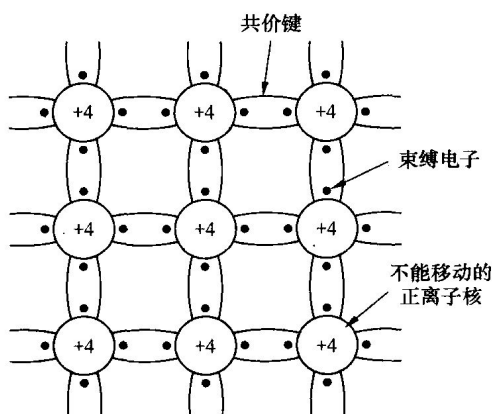


图 1.1 硅和锗的原子结构和共价键结构

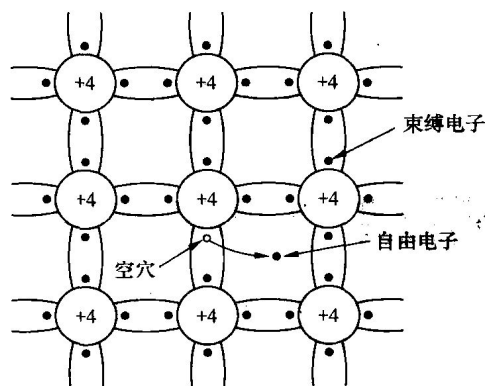


图 1.2 本征激发产生电子空穴对

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，将此束缚电子填补空穴的运动称为空穴运动。

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于导体导电的一个主要特征。

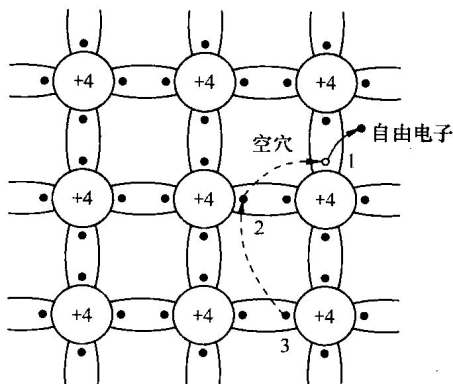


图 1.3 束缚电子填补空穴的运动

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 5 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原子，在与相邻的硅原子组成共价键时，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，但此时没有相应的空穴产生，如图 1.4 所示。

例如在室温 27℃ 时，每立方厘米本征硅材料中约有 1.5×10^{10} 个自由电子或空穴，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 3 个价电子，在与相邻的硅原子组成共价键时，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，但此时没有相应的自由电子产生，如图 1.5 所示。

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。

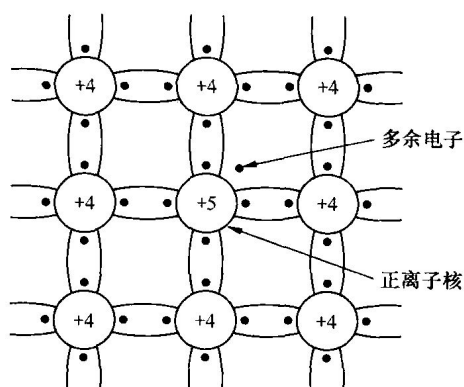


图 1.4 N 型半导体的共价键结构

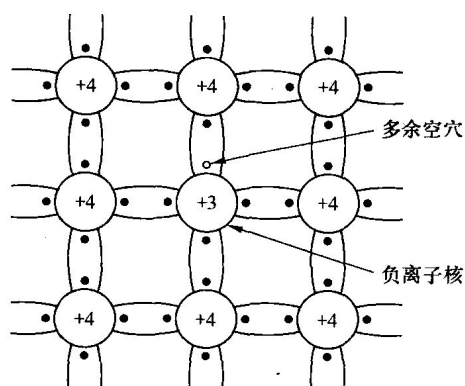


图 1.5 P 型半导体共价键结构

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 区的自由电子会向 P 区扩散，在 N 区则留下不能移动的正离子。这种多数载流子因浓度上的差异而形成的运动称为扩散运动，如图 1.6 所示。

空穴和自由电子均是带电的粒子，扩散的结果是使 P 区和 N 区原来的电中性被破坏，在交界面的两侧形成一个不能移动的带异性电荷的离子层，此离子层被称为空间电荷区，这就是所谓的 PN 结，如图 1.7 所示。在空间电荷区，多数载流子已经扩散到对方并复合掉了，或者说消耗尽了，因此又称空间电荷区为耗尽层。

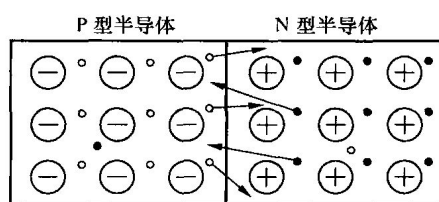


图 1.6 P 型和 N 型半导体交界处载流子的扩散

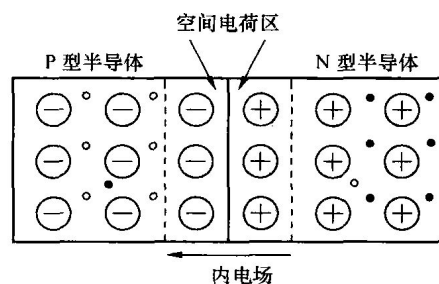


图 1.7 PN 结的形成

空间电荷区出现后，因为正负电荷的作用，将产生一个从 N 区指向 P 区的内电场。内电场的方向会对多数载流子的扩散运动起阻碍作用。同时，内电场可推动少数载流子（P 区的自由电子和 N 区的空穴）越过空间电荷区，进入对方。少数载流子在内电场作用下有规则的运动称为漂移运动。漂移运动和扩散运动的方向相反。无外加电场时，通过 PN 结的扩散电流等于漂移电流，PN 结中无电流流过，PN 结的宽度保持一定而处于稳定状态。

2. PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加上不同极性的电压，PN 结会呈现出不同的导电性能。