

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

电子技术

王建珍 主编

柳欣 王艳 副主编

工业和信息化部普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

Electronic Technology



高校系列



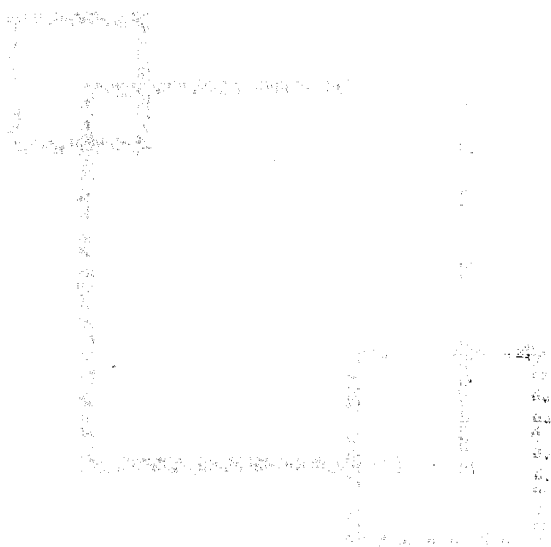
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

王建珍 主编
柳欣王艳 副主编

电子技术

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Electronic Technology



人民邮电出版社

北京



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

电子技术 / 王建珍主编. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2012.3
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-26128-1

I. ①电… II. ①王… III. ①电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第179497号

内 容 提 要

本书根据教育部颁布的电子技术基础课程的教学规范,结合目前教学改革的新要求和电子技术的新发展,在参编者近几年教学改革实践总结的基础上,为进一步提高学生的综合素质与自主创新能力编写而成。

全书分模拟电子技术篇和数字电子技术篇共12章,分别介绍了半导体器件、放大电路、负反馈放大电路、集成运算放大电路及其应用、逻辑代数基础、逻辑门电路基础、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲单元电路模—数和数—模转换、半导体存储器与可编程逻辑器件。全书有配合每章教学的设计实例、技能题和利用EWB等软件的训练题。

本书可作为高校电子、计算机、电气、通信、自动化等专业及相关专业的通用教材,也可供从事电子与信息技术工作的工程技术人员学习和参考。高等专科学校、高等职业院校和成人教育学院同类专业可对其中的内容进行选讲。

工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

电 子 技 术

-
- ◆ 主 编 王建珍
 - ◆ 副 主 编 柳 欣 王 艳
 - 责任编辑 邹文波
 - ◆ 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 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 21.25 2012年3月第1版
字数: 518千字 2012年3月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-26128-1

定价: 43.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

本教材参编者结合目前课程教学改革的标准和要求,以及电子技术的新发展,在多年“电子技术”课程教学改革和实践探索的基础上,总结经验,按照教育部高等学校工科电子技术课程教学指导小组制订的《电子技术基础课程教学基本要求》,针对学生学习中经常遇到的困难问题,尝试采用教、学、做相结合的教学模式,以“理论够用、着眼应用”的观点,编写了这本以现代电子技术应用为主线,体现学科技术新发展的教材。教材体现的教学内容及组织体系凝聚了编者近几年进行教学改革的经验体会和进行教育教学改革研究项目的研究成果,教学的可操作性和适用性很强。

与同类教材相比,本教材具有如下特色。

1. 适应国家“高校教学质量与改革工程”实施对课改提出“少时高效”的要求,精选内容缩减篇幅。

课程教学改革的深入开展使课程知识体系结构得以优化调整,在电子技术课程知识内容数量增加和新技术不断涌现的同时,需要精简和压缩学时。本教材顺应这一两极发展的形势变化,将“模拟电子技术”和“数字电子技术”合成“电子技术”,合二为一。从知识体系结构整体角度对课程进行优化,精选常规、通用性强的教学内容,进行有机整合,合理控制教材的深度和广度;从课程微观内容的设计角度,注重内容按层次展开,叙述力求简洁明了,从而达到精选内容、缩短篇幅的目标。

2. 与时俱进优化教学内容,完善基础性和系统性,体现先进性,突出实践性和应用性。

考虑到目前国内外电子器件生产和应用随电子技术迅速发展而出现集成化走高趋势,本教材在对电子技术的基本概念、理论、方法和技术做必要、适当和准确明晰的阐述基础上,以分立元件为基础,以集成电路为重点;轻内部结构,重外部特性;轻原理分析,重应用技术;轻解题技巧,重开发工具和方法,系统而有侧重地编撰教材内容。本教材此次还加强了集成运放的应用内容,扩展、加深性能优越的 CMOS HC、TTL LS 系列、GAL、PAL、PLD 电路等内容,力求基本理论和方法完整、信息量与时俱进、实践性强。除去正文部分,还通过“知识链接”、“知识拓展”、“阅读导航”等栏目,拓宽和提高课程内容的知识层次,使学生在有限学时内受益最大,为继续学习打下良好基础。

3. 围绕高校培养可持续发展、应用和创新人才的培养目标,融入核心能力培养内容。

本教材编写时将培养学生自主学习能力、创新能力、应用能力的要求有机地嵌入整个教学内容中,突出能力培养目标。(1)教材通过设计学习探究情景,通过有一定内在联系的问题串、问题链的形式展开各章内容,以旧带新实现课程内外新旧知识的链接和转化,适应学生在教师指导下自主学习的教学模式的实施。(2)理论与实践融于一体,实践部分

有理论分析,理论部分有实践作为依托,互相补充,利于培养学生实践应用能力。(3)通过教学目标、教学要求以及与知识点紧密联系的例题、深入浅出的练习题、技能题、EWB 虚拟环境训练题和典型设计实例等多种途径帮助学生建立本课程学习的正确方法,抓住重点,明确思路,融会贯通,引导学生深入地思考问题,培养学生的问题意识,锻炼学生分析、解决问题的能力。

4. 教材内容采用模块化结构设计,根据不同教学要求,可实现按需组合。

教材内容采用二级模块化设计结构:半导体器件模块(二极管、双极型三极管、单极型晶体管子模块)、放大电路模块(共射、共集、共基、多级、差分、功放子模块)、集成放大电路模块(线性、非线性应用子模块)、负反馈放大电路模块、直流电源模块;逻辑代数工具模块、逻辑门电路基础模块(开关特性、分立元件、TTL、CMOS 子模块)、组合逻辑电路模块(SSSI 小规模、MSI 中规模集成子模块)、触发器模块、时序逻辑电路模块(小规模、中规模集成子模块)、模数信号转换模块(DAC、ADC 子模块)、大规模集成电路模块(半导体存储、可编程逻辑电路子模块)。模块化的结构设计能够适应和体现电子技术内容的动态发展,适应多元化的教育发展态势,也能够适应“以人为本、以学生为主体”的教育理念的实施。

5. 重视教学内容之间的衔接转化设计,注重向学生传递科学探究与学习的方法。

本教材不仅向学生传输有利于知识增长、能力提高的有效知识量,更侧重于科学探究与学习方法在学生头脑中的形成。注重本专业课程内外前后知识点、课程内部新旧知识点的衔接方式,通过旧知新识的不同结合点自然导入要解决的新问题,并利用旧知当中已掌握的工具和方法研究解决新问题,在巩固旧知接纳新知的过程中,使学生学会学习的方法。同时通过虚拟实验训练项目,使学生能方便地求证并体验科学研究方法和思维方法的真谛,发展学生的理性思维能力,引导学生掌握自我获取知识与更新知识的能力,力求将“知识教学”上升到“能力教学”,落在实处。

6. 重视专业课程体系结构下与本专业前导后续课程、相关专业知识的融合沟通。

电子技术基本理论与实践技能是许多后续课程的基础。本教材充分考虑了与前导课程“普通物理”、“电路分析”,后续课程“计算机组成原理”、“微机原理与接口技术”、“多媒体技术与应用”等的衔接,衔接得当,合理统筹,融会贯通。有益于学生初步掌握应用电子技术知识解决本专业的相关实际问题。

7. 联系当前科学技术发展新成果,关注本学科发展前沿动态。

教材通过“正文”、“知识链接”、“知识拓展”、“EWB 训练”、“Karnaugh Minimizer 工具软件”、“ISP Synario System 软件”、“阅读导航”等栏目,帮助学生了解与电子技术有关的社会、环境、文化等问题。引导学生关注电子技术学科发展的前沿,展示高新科学技术成果,增进学生对电子技术学科的了解,扩大知识范围,提升知识层次。

本教材由王建珍任主编,柳欣、王艳任副主编。其中第1章、第6章、第7章、第11章由柳欣编写;第2章、第3章、第4章由苏俊生编写;第5章由王建珍编写;第8章、第10章由苏晋荣编写;第9章、第12章由王艳编写。全书由王建珍统稿,张永奎教授主审。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不妥之外,恳请读者批评指正。

编者

2011年7月

目 录

第一篇 模拟电子技术篇

第1章 半导体器件	2	2.2.2 解析法的直流分析	30
1.1 半导体基础知识	2	2.3 放大电路的动态分析	
1.1.1 本征半导体	2	(交流分析)	30
1.1.2 杂质半导体	3	2.3.1 图解法的交流分析	31
1.1.3 PN结及其单向导电性	5	2.3.2 微变电路等效法的	
1.2 半导体二极管	7	交流分析	32
1.2.1 二极管的结构和符号	7	2.4 静态工作点稳定的共发射极	
1.2.2 二极管的伏安特性	8	放大电路	35
1.2.3 二极管的主要参数	9	2.4.1 温度对静态工作点的	
1.2.4 稳压二极管及其应用	9	影响	35
1.3 双极型晶体管	11	2.4.2 工作点稳定的典型电路	36
1.3.1 三极管的结构和类型	11	2.5 共集电极放大电路	40
1.3.2 三极管电流控制作用	12	2.5.1 电路的结构	40
1.3.3 三极管的共射特性曲线	14	2.5.2 电路分析	40
1.3.4 三极管的主要参数	16	2.6 共基极放大电路	42
1.4 单极型晶体管	18	2.6.1 电路的组成	42
1.4.1 基本结构和工作原理	19	2.6.2 电路分析	42
1.4.2 绝缘栅型场效应管的		2.7 场效应管放大电路	43
特性曲线	20	2.8 多级放大电路	44
1.4.3 绝缘栅型场效应管的		2.8.1 多级放大电路的组成	44
主要参数	22	2.8.2 多级放大电路的耦合	
习题	23	方式	44
技能题	26	2.8.3 多级放大电路电压放大	
EWB 训练题	26	倍数的估算	45
第2章 放大电路	27	2.9 差分放大电路	46
2.1 共发射极放大电路	27	2.9.1 电路的组成	46
2.1.1 电路的组成	28	2.9.2 差分放大电路的分析	47
2.1.2 直流通路和交流通路	28	2.9.3 具有恒流源的差分放大器	51
2.2 放大电路的静态分析		2.9.4 差分放大电路输入、输出	
(直流分析)	29	方式的4种组态	55
2.2.1 图解法的直流分析	29	2.10 功率放大电路	55

2.10.1 功率放大电路的分类	56	3.3.2 深度负反馈放大电路的特点及性能估算	77
2.10.2 功率放大电路的要求	56	3.3.3 负反馈放大电路的稳定性	79
2.10.3 互补对称功率放大电路	56	习题	80
习题	62	EWB 训练题	82
EWB 训练题	66	第4章 集成运算放大电路及其应用	83
设计实例	67	4.1 集成运算放大器	83
第3章 负反馈放大电路	69	4.1.1 集成运算放大器的组成及各部分的作用	83
3.1 负反馈放大电路的组成及基本关系式	69	4.1.2 集成运放的主要性能指标	84
3.1.1 负反馈放大电路的组成	69	4.1.3 理想集成运算放大电路	85
3.1.2 负反馈放大电路的基本关系式	69	4.1.4 集成运放的电压传输特性	86
3.1.3 反馈放大电路的类型	70	4.2 集成运放在信号方面的应用	87
3.1.4 反馈的判断	70	4.2.1 比例运算	87
3.1.5 负反馈放大电路的分析	71	4.2.2 加法与减法运算	89
3.2 负反馈对放大电路性能的影响	73	4.2.3 微分与积分运算	91
3.2.1 提高了放大电路增益的稳定性	73	4.2.4 指数和对数运算电路	92
3.2.2 减小了非线性失真	73	*4.2.5 乘法和除法运算电路	93
3.2.3 扩展了放大器的通频带	74	4.2.6 基本运算电路应用举例	95
3.2.4 改变了放大电路的输入、输出电阻	74	4.3 集成运放的非线性应用——电压比较器	97
3.3 负反馈放大电路应用中的几个问题	76	4.3.1 单限电压比较器	97
3.3.1 放大电路引入负反馈的一般原则	76	4.3.2 滞回比较器	98
		4.3.3 窗口比较器	99
		习题	100
		EWB 训练题	103
		设计实例	104

第二篇 数字电子技术

第5章 逻辑代数基础	106	5.3 逻辑函数及其表示方法	117
5.1 概述	106	5.3.1 逻辑函数的概念	117
5.1.1 数字信号和模拟信号	106	5.3.2 逻辑函数的表示方法	118
5.1.2 数制及其转换	107	5.3.3 逻辑函数的两种标准形式	120
5.1.3 编码	111	5.4 逻辑代数的公式、定理及规则	123
5.2 逻辑代数中的基本运算	114	5.4.1 基本公式	123
5.2.1 逻辑代数的基本概念	114	5.4.2 基本定理	123
5.2.2 逻辑代数中的基本运算	114	5.4.3 逻辑代数的3个重要规则	124
5.2.3 复合逻辑运算	116	5.5 逻辑函数的化简	126

5.5.1 逻辑函数的最简形式	126	设计实例 火车站列车优先出行	
5.5.2 逻辑函数的代数化简法	126	电路设计	162
5.5.3 逻辑函数的卡诺图化简法	129	第7章 组合逻辑电路	164
5.6 具有无关项的逻辑函数及其化简	133	7.1 概述	164
5.6.1 约束项、任意项和逻辑函数中的无关项	133	7.1.1 组合逻辑电路的特点	164
5.6.2 无关项在逻辑函数中的应用	133	7.1.2 组合电路逻辑功能的描述	164
习题	134	7.2 组合逻辑电路的分析方法	165
EWB 训练题	136	7.2.1 基本分析方法	165
设计实例	136	7.2.2 分析举例	165
第6章 逻辑门电路基础	138	7.3 组合逻辑电路的设计	166
6.1 概述	138	7.3.1 组合逻辑电路的设计方法	166
6.2 二极管的开关特性	139	7.3.2 设计举例	167
6.2.1 二极管的理想开关特性	139	7.4 常用组合逻辑电路	169
6.2.2 二极管的实际开关特性	139	7.4.1 编码器	169
6.3 双极型三极管的开关特性	140	7.4.2 译码器	175
6.4 MOS 晶体管的开关特性	141	7.4.3 数据选择器和分配器	183
6.4.1 MOS 管的基本开关电路	141	7.4.4 加法器	188
6.4.2 MOS 管的开关等效电路	142	7.5 组合逻辑电路中的竞争—冒险现象	190
6.5 基本逻辑门电路	142	7.5.1 竞争—冒险现象及其成因	190
6.5.1 二极管与门	142	7.5.2 如何判断是否存在竞争—冒险现象	191
6.5.2 二极管或门	144	7.5.3 消除竞争—冒险现象的方法	192
6.5.3 三极管非门	145	习题	193
6.6 TTL 集成门电路	146	技能题	196
6.6.1 TTL 与非门的电路结构和工作原理	146	EWB 训练题	196
6.6.2 TTL 与非门的特性	148	设计实例 代码转换电路	196
6.6.3 其他类型的 TTL 与非门电路	152	第8章 触发器	198
6.7 CMOS 集成逻辑门电路	155	8.1 概述	198
6.7.1 CMOS 反相器	155	8.2 基本 RS 触发器	199
6.7.2 其他功能的 CMOS 门电路	156	8.2.1 电路结构与工作原理	199
6.7.3 CMOS 集成电路的特点	158	8.2.2 逻辑功能及其描述方法	201
习题	159	8.3 同步触发器	203
技能题	162	8.3.1 同步 RS 触发器	203
EWB 训练题	162	8.3.2 同步 D 触发器	205

8.3.3 同步 JK 触发器	207	10.1.2 脉冲电路	260
8.3.4 同步 T 触发器与 T' 触发器	209	10.2 集成逻辑门构成的脉冲 单元电路	260
8.3.5 同步触发器存在的问题—— 空翻	210	10.2.1 施密特触发器	260
8.4 主从触发器	210	10.2.2 单稳态触发器	265
8.4.1 主从 RS 触发器	211	10.2.3 多谐振荡器	271
8.4.2 主从 JK 触发器	213	10.3 555 定时器及其应用	273
8.5 边沿触发器	215	10.3.1 555 定时器的电路结构	273
8.5.1 边沿 JK 触发器	215	10.3.2 用 555 定时器构成施密 特触发器	275
8.5.2 维持阻塞 D 触发器	218	10.3.3 用 555 定时器构成单 稳态触发器	276
8.5.3 CMOS 边沿触发器	219	10.3.4 用 555 定时器构成 多谐振荡器	277
8.6 各种触发器之间的转换	220	习题	280
8.6.1 不同类型触发器之间转换的 方法和转换步骤	220	技能题	284
8.6.2 JK 触发器转换成其他 类型的触发器	221	EWB 训练题	284
8.6.3 D 触发器转换成其他类型的 触发器	222	设计实例	284
习题	223	第 11 章 数-模和模-数转换	286
技能题	226	11.1 概述	286
EWB 训练题	226	11.2 数-模转换器 (DAC)	287
设计实例 数字抢答器的设计	227	11.2.1 数-模转换原理及 组成	287
第 9 章 时序逻辑电路	229	11.2.2 权电阻网络 DAC 转换器	288
9.1 概述	229	11.2.3 R-2R 倒 T 形电阻网络 DAC 转换器	290
9.2 同步时序逻辑电路的分析和 设计方法	231	11.2.4 DAC 转换器的转换精度与 转换速度	291
9.2.1 同步时序逻辑电路的 分析方法	231	11.3 模-数转换器	293
9.2.2 同步时序逻辑电路的 设计方法	234	11.3.1 模-数转换基本原理	293
9.3 若干常用的时序逻辑电路	238	11.3.2 直接 ADC 转换器	296
9.3.1 计数器	238	11.3.3 间接 ADC 转换器	300
9.3.2 寄存器和移位寄存器	248	11.3.4 ADC 转换器的转换精度与 转换速度	303
习题	254	习题	303
EWB 训练题	257	技能题	305
设计实例	257	EWB 训练题	305
第 10 章 脉冲单元电路	259	设计实例 高速并行 ADC 转换系统	306
10.1 脉冲信号与脉冲电路	259		
10.1.1 脉冲信号	259		

第 12 章 半导体存储器与可编程逻辑器件	308
12.1 半导体存储器.....	308
12.1.1 只读存储器 (ROM)	309
12.1.2 随机存取存储器 (RAM)	313
12.1.3 存储容量的扩展.....	315
12.2 可编程逻辑器件 (PLD)	317
12.2.1 PLD 的基本结构	317
12.2.2 PLD 的分类	318
12.2.3 几种常见的逻辑符号表示方法.....	319
12.3 可编程阵列逻辑 (PAL)	320
12.3.1 PAL 的基本电路结构.....	320
12.3.2 PAL 的输出电路结构和反馈形式	320
12.4 通用阵列逻辑 (GAL)	322
12.4.1 GAL 器件的基本电路结构	323
12.4.2 GAL16V8 基本结构	323
12.4.3 GAL16V8 输出逻辑宏单元 (OLMC)	324
12.5 可编程逻辑器件 PLD 的开发过程	327
习题	328
参考文献	330

第一篇 模拟电子技术篇

第 1 章 半导体器件

第 2 章 放大电路

第 3 章 负反馈放大电路

第 4 章 集成运算放大电路及其应用

本章讨论的问题

1. 为什么采用半导体材料制作电子器件？
2. 空穴是一种载流子吗？空穴导电时电子运动吗？
3. 什么是N型半导体？什么是P型半导体？两种半导体制作在一起时会产生什么现象？
4. PN结上所加端电压与电流符合欧姆定律吗？它为什么具有单向导电性？在PN结加反向电压时果真没有电流吗？
5. 三极管是通过什么方式来控制集电极电流的？
6. 场效应管是通过什么方式来控制漏极电流的？
7. 为什么晶体管和场效应管都可以用于放大？

1.1 半导体基础知识

自然界中的各种物质如果按导电性能强弱可分三大类：一类是导电能力很强的物质，称为**导体**，如铜、铁、铝等金属材料；另一类是在一般条件下很难导电的物质，称为**绝缘体**，如橡胶、陶瓷、玻璃等；还有一类导电能力介于导体和绝缘体之间，称为**半导体**。自然界中属于半导体的物质很多，主要有硅（Si）、锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等，其中硅用得最为广泛。**半导体器件**就是用半导体材料经过特殊加工制作而成，它是构成电子线路的基本元件，常见的半导体器件有二极管和三极管。

半导体之所以得到广泛的应用，主要原因不是由于其导电能力与导体和绝缘体有差别，而在于导电能力在各种因素（温度、光照、掺杂等）作用下将出现非常大的不同。第一，半导体导电能力随着温度的上升而明显提高；第二，半导体导电能力因光照不同而改变，光照愈强，导电能力越强；第三，半导体导电能力受杂质影响很大。

半导体为什么具有上述特点，需要从它的内部导电机理来说明。

1.1.1 本征半导体

完全纯净、没有任何杂质、结构完整的半导体单晶体称为**本征半导体**。常用半导体材料有硅和锗，它们都是4价元素，其最外层原子轨道上有4个价电子。在单晶结构中，由于原子排列的有序性，价电子为相邻原子所共有，如图1-1所示。硅原子的每一个价电子分别与

其相邻硅原子的一个价电子形成价电子对，该价电子对为相邻的两个原子所共有，这样每个硅原子就会和其四周 4 个相邻硅原子之间形成 4 个价电子对，我们将这种共有价电子对所形成的束缚作用称为共价键。由于共价键中的价电子被束缚，此时本征半导体中没有可以自由运动的带电粒子，故不能导电。若在一定温度或在一定强度光的照射下，少数价电子可以从外界获得足够的能量而挣脱共价键的束缚成为自由电子，同时在共价键中留下相同数量的空位，这种现象称为本征激发（热激发），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出现的，如图 1-2 所示。应当指出，晶体中的共价键具有很强的结合力，因此，常温下由本征激发产生的自由电子和空穴是极少数的。

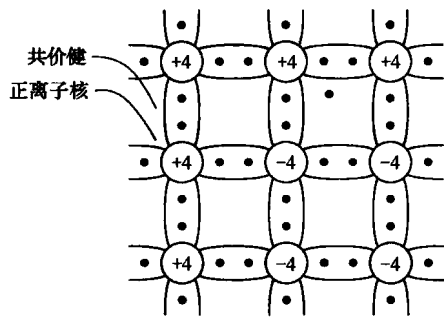


图 1-1 单晶硅的共价键平面模型

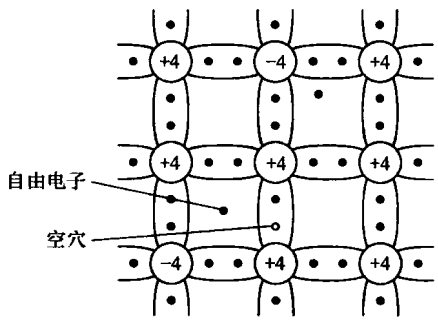


图 1-2 热激发产生的电子—空穴对

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。自由电子可以运载电荷形成电流，空穴也可以运载电荷形成电流。这是因为共价键失去一个价电子出现一个空穴时，在外加电场和其他能源的作用下，邻近的价电子能很容易地填补到这个空穴中，而这个价电子在原来的位置上又留下新的空穴，其他价电子又可转移到这个新空穴中，于是就形成了空穴的迁移，也就是正电荷的运动。可见，半导体中的自由电子和空穴都可以作定向移动，从而形成电子电流和空穴电流，由于自由电子和空穴所带电荷极性不同，所以它们的运动方向相反，本征半导体中的电流是两个电流之和。

我们把运载电荷的粒子称为载流子。导体导电只有一种载流子，即自由电子导电；而本征半导体导电有两种载流子，即自由电子和空穴均参与导电，这是半导体导电的特殊性质。

本征半导体在本征激发下会产生自由电子—空穴对，自由电子在运动过程中如果和空穴相遇就会填补空穴，使两者同时消失，这种现象称为复合。在一定温度下，本征激发所产生的自由电子—空穴对与复合的自由电子—空穴对数目相等，达到动态平衡，这时自由电子和空穴的浓度一定。

从上述讨论可见，本征半导体在光和热的作用下，会产生载流子，导电能力得到加强。但这种载流子浓度很低，故导电能力还是很弱，所以，本征半导体不能直接用来制作半导体元件。在实际应用中，为了提高其导电能力，需要在本征半导体中掺入杂质，这样一方面可以显著提高其导电能力，另一方面还可以通过控制掺入杂质的多少达到控制半导体导电能力强弱的目的。

1.1.2 杂质半导体

通过扩散工艺，在本征半导体中掺入少量杂质元素，便可得到杂质半导体。根据半导体

掺入杂质元素的不同，可以形成 N 型半导体和 P 型半导体。通过控制掺入杂质元素的浓度，就可控制杂质半导体的导电性能。

1. N 型半导体

在硅（或锗）的本征半导体中掺入微量的 5 价元素（磷），形成 N 型半导体。由于掺入杂质的原子数与整个半导体的原子数相比，其数量非常少，因此，半导体的晶体结构基本不变，只是晶体中某些硅（或锗）原子的位置被磷原子所代替。由于杂质磷原子最外层 5 个价电子中有 4 个要与相邻硅原子组成共价键，如图 1-3 所示，这样杂质磷原子最外层多余的 1 个价电子不受共价键束缚，受磷原子核的束缚小，只要获得很少的能量，就能成为自由电子。几乎每一个杂质磷原子都能提供一个自由电子，故磷（或锗）称为施主杂质。杂质磷原子本身因失去电子而成为带正电的正离子，它固定在晶格上，不能移动。在掺入施主杂质的半导体中，自由电子数量远远大于空穴数量，故 N 型半导体也称为电子型半导体，如图 1-5（a）所示。

N 型半导体的显著特点为：自由电子是多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子），是由热激发（本征激发）产生的。N 型半导体以自由电子导电为主，由于自由电子的增多，空穴遇到电子而被复合的几率也增大，所以空穴的浓度远小于相同温度下本征半导体中的空穴浓度。

2. P 型半导体

在硅（或锗）本征半导体中掺入微量 3 价元素（硼），形成 P 型半导体。由于杂质硼原子最外层有 3 个价电子，所以当每个硼原子与周围相邻的 4 个硅原子组成共价键时，因缺少一个电子而产生一个空位，如图 1-4 所示。在室温或其他能量激发下，与硼原子相邻的硅原子共价键上的电子就可能填补这些空位，从而在电子原来所处位置上形成带正电的空穴，硼原子本身因获得电子而成为不能移动的杂质负离子。因杂质原子中的空位能吸收电子，故称硼为受主杂质。

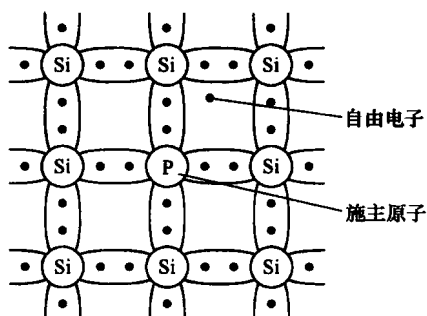


图 1-3 N 型半导体

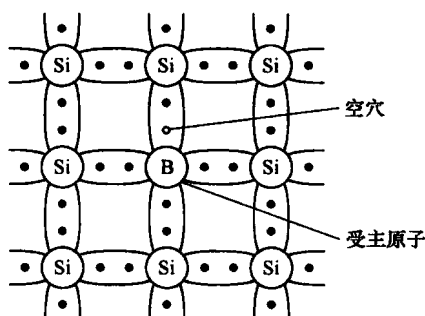


图 1-4 P 型半导体

P 型半导体的显著特点为：自由电子是少数载流子（少子），空穴为多数载流子（多子）。P 型半导体导电性主要取决于空穴数，如图 1-5（b）所示，这种半导体也称为空穴型半导体。

从以上分析可知，由于掺入的杂质使多子数目大大增加，使多子和少子复合的机会也大大增多，因此，对于杂质半导体，多子浓度越高，少子浓度就越低。可以认为多子浓度

约等于所掺杂质原子的浓度，因而它受温度影响很小；而少子是本征激发形成的，所以尽管其浓度很低，但却对温度非常敏感，其大小随温度的升高而增大，这将影响半导体器件的性能。

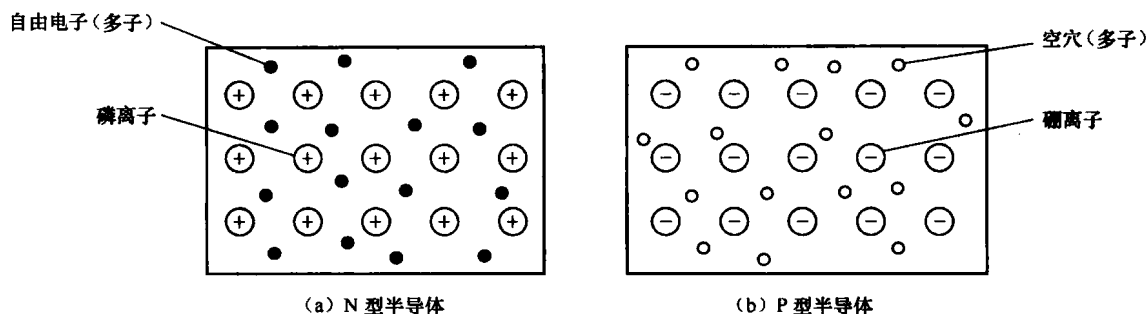


图 1-5 两种杂质半导体

1.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成

采用不同的掺杂工艺，将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上，由于它们的交界面两侧同性载流子浓度差的存在，引起两区多子向对方区域扩散，这种由于浓度差而产生的运动称为**扩散运动**，如图 1-6 (a) 所示。在 P 型区一侧，由于多子（空穴）向 N 区扩散，扩散到 N 区的空穴与自由电子复合；在 N 型区一侧，由于多子（自由电子）向 P 区扩散，扩散到 P 区的自由电子与空穴复合，所以交界面处附近多子的浓度下降，P 区出现不能移动的受主杂质（硼）的负离子，形成一个负电荷区；N 区剩下不能移动的施主杂质（磷）的正离子，形成一个正电荷区。这样，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界处形成一个很薄的**空间电荷区**，如图 1-6 (b) 所示。在空间电荷区内，由于正负杂质离子相互作用，形成一个电场，其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区，称为**内建电场**。随着扩散运动的进行，空间电荷区加宽，内电场增强。内电场将产生两个作用：一方面它阻止多子继续扩散；另一方面促使两个区靠近交界面处的少子在电场力作用产生运动。

通常把这种在电场力作用下，载流子的运动称为**漂移运动**。起初内电场较小，扩散运动较强，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 1-7 所示。这时空间电荷区的宽度一定，内电场一定，形成所谓的**PN 结**。室温下，硅材料 PN 结的内电场电位差为 0.5~0.7V，锗材料 PN 结的内电场电位差为 0.2~0.3V。

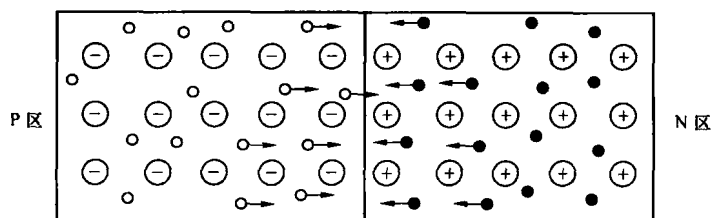
由于空间电荷区载流子很少，都被消耗殆尽，所以空间电荷区又称为**耗尽区**。

2. PN 结的单向导电性

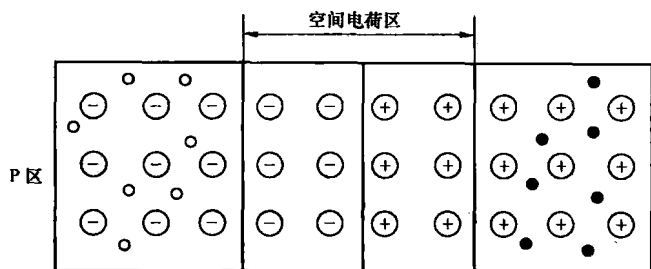
(1) PN 结外加正向电压时处于导通状态

如果在 PN 结的两端外加电压（也称**偏置电压**），就将破坏原来的动态平衡状态，此时扩散电流不再等于漂移电流。在图 1-8 (a) 中，若 P 区接电源正极，N 区接电源负极，则称 PN

结外接正向电压或 PN 结正向偏置, 简称正偏。此时在外电场作用下, P 区的多子(空穴)被推向空间电荷区, 将抵消空间电荷区的部分负离子, N 区的多子自由电子也向 PN 结运动, 和空间电荷区的部分正离子中和。因此, 空间电荷区的电荷量将减少, 空间电荷区变窄, 导致内电场被削弱, 多数载流子的扩散运动加强, 少数载流子的漂移运动减弱, 扩散运动将大于漂移运动。由于电源的作用, 扩散运动将源源不断的进行, 从而通过回路形成较大的扩散电流(正向电流)从 P 区指向 N 区。当外加正向电压增加到一定值时, 正向电流将显著增加, 此时 PN 结呈现很小的电阻, 这种情况称为 PN 结正向导通, 表现为图 1-8 (a) 所示的实验电路中灯泡点亮。正向导通的 PN 结两端结压降只有零点几伏。为了限制正向电流值, 防止 PN 结因正向电流过大而损坏, 应在它所在回路中串接限流电阻。



(a) P 型区与 N 型区中载流子的扩散运动



(b) 形成的空间电荷区

图 1-6 PN 结的形成

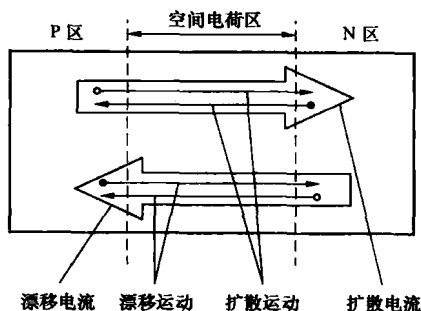
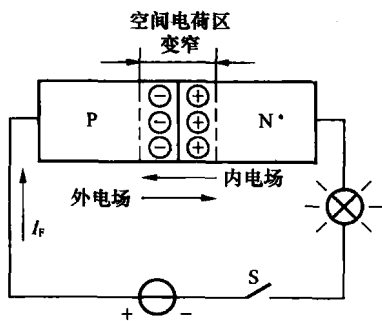
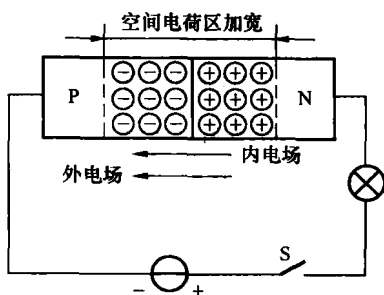


图 1-7 动态平衡时 PN 结中的载流子运动及电流

正向电流包括空穴电流和电子电流两部分。空穴和电子带有不同的电性, 但它们的运动方向相反, 所以电流方向是一致的。



(a) 加正向电压导通



(b) 加反向电压截止

图 1-8 PN 结的单向导电性

(2) PN 结外加反向电压时处于截止状态

如果在图 1-8 (b) 中, P 区接电源负极, N 区接电源正极, 称 PN 结外接反向电压或反向偏置, 简称反偏。此时在外电场作用下, 两区的多子向着背离空间电荷区的方向运动, 在两区交界处留下更多的杂质离子。因此, 空间电荷量将增多, 空间电荷区加宽, 导致内电场加强, 多数载流子的扩散运动难以进行, 少子的漂移运动得到加强, 造成漂移运动大于扩散运动。此时 PN 结电流由少子的漂移电流决定, 我们把两区的少子在内电场作用下漂移过 PN 结而形成的电流称为反向电流。反向电流的方向由 N 区流向 P 区。由于在室温下, 少子浓度很低, 所以反向电流极小, 一般为微安级, 相对于正向电流可以忽略不计。这时 PN 结所呈现的反向电阻很大, 一般可达几百千欧到几十兆欧, 这种情况就称为 PN 结反向截止, 表现为如图 1-8 (b) 所示的实验电路中灯泡熄灭。

必须指出, 由于少子是由热激发产生的, 数目极少, 在一定温度下, 即使所有的少子都参与漂移运动, 反向电流也非常小, 而且基本上不随外加反向电压而变化, 故称为反向饱和电流, 用 I_S 表示。 I_S 虽小, 但是它将随温度上升而显著增加, 因此, 在使用半导体器件时, 必须考虑到环境温度的影响。

综上所述, PN 结正偏时导通, 形成较大的正向电流, 呈现很小的导通电阻; 反偏时截止, 反向电流近似为零, 呈现很大的截止电阻。因此, PN 结具有单向导电特性。

3. PN 结的伏安特性

PN 结两端外加电压 U 和流过 PN 结电流 I 之间的关系曲线, 称为 PN 结伏安特性曲线。如图 1-9 所示, 其中 $U > 0$ 的部分称为正向特性, $U < 0$ 的部分称为反向特性。当反向电压超过一定数值 $U_{(BR)}$ 后, 反向电流急剧增加, 称为反向击穿。

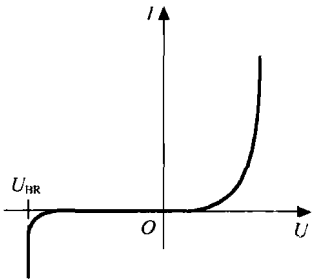


图 1-9 PN 结伏安特性曲线

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构和符号

将 PN 结用外壳封装起来, 从 P 区和 N 区分别引出电极引线就构成半导体二极管, 简称二极管。由 P 区引出的电极称为阳极或正极, 由 N 区引出的电极称为阴极或负极。图 1-10 所示为二极管的图形符号。

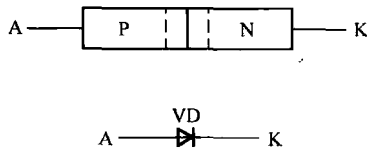


图 1-10 二极管图形符号

按 PN 结面积大小, 二极管可分为点接触型和面接触型两类。点接触型二极管是由一根很细的金属丝 (如 3 价元素铝) 和一块 N 型半导体 (如锗) 的表面接触, 然后在正方向通过很大的瞬时电流, 使触丝和半导体牢固地熔接在一起, 两者结合构成 PN 结, 如图 1-11 (a) 所示。由于这种二极管金属丝很细, 形成的 PN 结面积很小, 所以它不能承受大的电流和高的反向电压。由于极间电容很小, 这类二极管适用于高频电路和小功率整流。例如, 2AP1 是点接触型锗管, 其最大整流电流为 16mA, 最高工作频率为 150MHz, 但最高反向工作电压只有 20V。

面接触型二极管是用合金法工艺制成的, 其结构如图 1-11 (b) 所示。这种二极管 PN 结