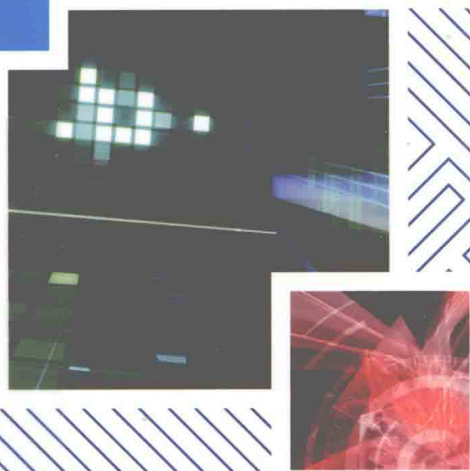


21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

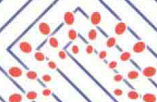
模拟电路与 数字电路 (第2版)

林捷 杨绪业 郭小娟 主编
朱小明 熊辉 王建国 编著

Analog Circuits and
Digital Circuits (2nd Edition)



 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS


高校系列

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

模拟电路与 数字电路 (第2版)

林捷 杨绪业 郭小娟 主编
朱小明 熊辉 王建国 编著

Analog Circuits and
Digital Circuits (2nd Edition)

人民邮电出版社
北京



图书在版编目(CIP)数据

模拟电路与数字电路 / 林捷, 杨绪业, 郭小娟主编
; 朱小明, 熊辉, 王建国编著. — 2版. — 北京: 人民
邮电出版社, 2011.2

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

ISBN 978-7-115-24720-9

I. ①模… II. ①林… ②杨… ③郭… ④朱… ⑤熊
… ⑥王… III. ①模拟电路—高等学校—教材②数字电路
—高等学校—教材 IV. ①TN710②TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第006228号

内 容 提 要

本书分为上、下两篇,共11章。上篇为模拟部分,共4章,内容包括:半导体基础知识,放大电路基础,集成运算放大器,正弦波振荡电路。下篇为数字部分,共7章,内容包括:数字逻辑基础,门电路,组合逻辑电路,时序逻辑电路,脉冲产生与整形电路,数/模和模/数转换器,半导体存储器和可编程逻辑器件。

本书既注重基本概念、基本原理的介绍,又强调实际应用,其内容力求叙述简明扼要,通俗易懂,可以作为高等学校非电类各专业的“电子技术基础”课程教材,也可供有关技术人员参考。

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

模拟电路与数字电路(第2版)

-
- ◆ 主 编 林 捷 杨绪业 郭小娟
编 著 朱小明 熊 辉 王建国
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 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
中国铁道出版社印刷厂印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20 2011年2月第2版
字数: 488千字 2011年2月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-24720-9

定价: 35.00元

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

反盗版热线: (010)67171154

本书自从第 1 版出版以来,已印刷多次,深受广大读者的喜爱。编者根据教育部高等学校工科《电子技术基础课程教学基本要求》,参照非电类模拟电路和数字电路课程教学大纲的最新要求,结合多年来的教学体会和经验,对本书第 1 版进行了增补和修订,以便更适合最新的教学需求。本次修订保持了原书的主要特点和框架结构,增补了重要内容及最新内容,主要改动包括以下几个方面。

(1) 模拟部分增加了“功率放大电路”一节(第 2 章第 9 节)。功率放大电路在电子线路中具有重要的作用,本节主要介绍功放的原理和电路组成,以及各种放大电路的区别和联系。

(2) 模拟部分增加了“正弦波振荡电路”一章(第 4 章)。正弦波振荡电路是应用最为广泛的一类电子线路,本节主要介绍正弦波振荡的原理和条件等,为电子、计算机等专业后续课程的学习做准备。

(3) 数字部分修订了“触发器和时序逻辑电路”(第 8 章)中的本章小结,加入了有限状态机概念。

(4) 数字部分增加了“CPLD/FPGA 简介”一节(第 11 章第 4 节),主要介绍了 CPLD 和 FPGA 的基本结构和设计流程。随着可编程逻辑器件的快速发展,目前 CPLD/FPGA 已渐渐渗透到数字电路的各个应用领域。

(5) 对于增补的内容也增加了对应的习题,供读者思考和学习。

本书分为上、下两篇,共 11 章。上篇为模拟部分,共 4 章,内容包括:半导体基础知识,放大电路基础,集成运算放大器,正弦波振荡电路。下篇为数字部分,共 7 章,内容包括:数字逻辑基础,门电路,组合逻辑电路,触发器和时序逻辑电路,脉冲产生和整形电路,数/模和模/数转换器,半导体存储器和可编程逻辑器件。

本书第 1~3 章由北京师范大学信息科学与技术学院杨绪业老师编写,第 5~10 章由中国农业大学信息与电气工程学院的林捷老师编写,第 4 章和第 11 章及第 2 章和第 8 章的部分内容由北京师范大学信息科学与技术学院郭小娟老师编写。另外,北京师范大学信息科学与技术学院朱小明老师,北京师范大学珠海分校熊辉老师,忻州师范学院王建国老师参与本书的编写工作。书稿承蒙北京师范大学信息科学与技术学院姚力教授审阅,提出了许多建议和意见,福建师范大学信息学院的陈利永教授在写作过程中也为我们提供了很多帮助,在此一并深表谢意!

2 | 模拟电路与数字电路 (第2版)

由于编者的水平有限，书中难免存在错误及疏漏之处，敬请广大读者批评指正，以期进一步完善。

编者
2011年1月

本教材是根据教育部高等学校工科《电子技术基础课程教学基本要求》，并参照非电类模拟电路和数字电路课程教学大纲编写的。本书的编者来自于中国农业大学、北京师范大学、北京师范大学珠海分校和忻州师范学院的一线教师。本书将原来的“模拟电子技术基础”和“数字电子技术基础”两门课程的内容有机地整合起来，形成新的课程体系，该课程体系可在一个学期内完成原来要两个学期才能完成的教学内容。虽然压缩了课时，但我们希望在本书里，能够保证非电类专业教学所需要的基本内容，且便于自学。为了适应当前电子技术的发展，该课程体系的主要特点表现在以下的几个方面。

(1) 本教材针对非电类的教学要求，力求简明扼要，并且语言通俗易懂，便于学生学习。

(2) 突出基础课的特点，强调基础，尽量简化分析，避免大量、繁杂的公式推导。注重应用，使学生在在学习过程中逐步建立理论联系实际的观点。

(3) 本教材通过整合，将模拟电路和数字电路两门课程中交叉重复的内容归并起来，为了确保所叙述内容的深度和广度，本书在归并交叉重复的内容时，不是采用简单的删除办法，而是采用前后呼应的整合方法，将被归并掉的内容以基本原理、实际应用的例题等形式，出现在相关的章节中。这样做的目的是，既可保证基础知识的完整性和连贯性，又可增加学生习作的机会，加深学生对所学知识的理解，也有时间对某些重点的课题进行深入的讨论，使学生的知识更加系统化。

(4) 本书在叙述的过程中，注意引导学生对物理概念的理解，注意引导学生开放性的思维方法，有意识的培养学生从不同的渠道，利用不同的方法对同一个问题进行讨论，让学生掌握一题多解的方法，加深学生对基本概念和基础知识的理解。

(5) 在内容的取舍上，由于数字电子技术的迅猛发展，因此数字电路内容较传统的非电类教材有一定篇幅的增加，模拟电路部分有一定的减少，使得教材更适合当前国际电子科技的发展趋势。

(6) 我们将原来要上两个学期的两门课程，利用周学时为四的一个学期上完。有利于教学计划的安排，保证学生在二年级学完本课程，为三年级后的专业课打下扎实的基础。书中带有“*”号是选讲内容，可以根据学时多少，决定取舍。

本书分为上、下两篇，共 10 章。上篇为模拟部分，共 3 章。内容包括：半导体基础知识，放大电路基础，集成电路运算放大器。

下篇为数字部分，共 7 章。内容包括：数字逻辑基础，门电路，组合逻辑电路，触发

2 | 模拟电路与数字电路 (第2版)

器和时序逻辑电路, 脉冲产生和整形电路, 数/模和模/数转换器, 半导体存储器和可编程逻辑器件。

本书上篇由北京师范大学信息科学与技术学院杨绪业老师编写, 下篇由中国农业大学信息与电气工程学院的林捷老师编写; 另外, 北京师范大学信息科学与技术学院朱小明老师, 北京师范大学珠海分校熊辉老师, 忻州师范学院王建国老师参与本书的编写工作。书稿承蒙北京师范大学信息科学与技术学院姚力教授审阅, 并提出了许多建议和意见, 福建师范大学信息科学学院的陈永利教授在写作过程中也为我们提供了很多帮助, 在此一并深表谢意!

限于编者的水平, 书中的错误疏漏之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

编 者

2006年10月

目 录

上篇 模拟部分

第 1 章 半导体器件	1	1.7.2 绝缘栅型场效应管的类型和构造	26
1.1 半导体基础知识	1	1.7.3 场效应管的主要参数	30
1.1.1 本征半导体	1	本章小结	31
1.1.2 本征激发和两种载流子	2	习题	31
1.1.3 杂质半导体	2	第 2 章 基本放大电路	34
1.1.4 PN 结	4	2.1 共发射极放大电路	34
1.2 二极管	7	2.1.1 电路的组成	34
1.2.1 二极管的几种常见结构	7	2.1.2 放大电路的直流通路和交流通路	35
1.2.2 二极管的伏—安特性	7	2.1.3 共发射极电路图解分析法	35
1.2.3 二极管的主要参数	8	2.1.4 微变等效电路分析法	39
1.2.4 二极管极性的简易判别法	8	2.2 放大电路的分析	44
1.2.5 二极管的等效电路	9	2.2.1 稳定工作点的必要性	44
*1.3 二极管的基本应用电路	9	2.2.2 工作点稳定的典型电路	44
1.3.1 二极管整流电路	9	2.2.3 复合管放大电路	47
1.3.2 桥式整流电路	10	2.3 共集电极电压放大器	48
1.3.3 倍压整流电路	11	2.4 共基极电压放大器	50
1.3.4 限幅电路	12	2.5 多级放大器	51
1.3.5 与门电路	12	2.5.1 阻容耦合电压放大器	52
*1.4 稳压管	13	*2.5.2 共射—共基放大器	53
1.4.1 稳压管的结构和特性曲线	13	2.5.3 直接耦合电压放大器	55
1.4.2 稳压管的主要参数	14	2.6 差动放大器	57
1.5 其他类型的二极管	15	2.6.1 电路组成	57
1.5.1 发光二极管	15	2.6.2 静态分析	59
1.5.2 光电二极管	16	2.6.3 动态分析	59
1.6 三极管	16	2.6.4 差动放大器输入、输出的 4 种组态	61
1.6.1 三极管的结构及类型	16	2.7 放大器的频响特性	64
1.6.2 三极管的电流放大作用	17	2.7.1 三极管高频等效模型	64
1.6.3 三极管的共射特性曲线	19	2.7.2 三极管电流放大倍数 β 的频率响应	66
1.6.4 三极管的主要参数	21		
1.7 场效应管	23		
1.7.1 结型场效应管的类型和构造	23		

2.7.3 单管共射放大电路的频响特性.....	68	4.2.1 正弦波振荡电路的振荡条件.....	111
2.8 场效应管基本放大电路.....	74	4.2.2 振荡电路的基本组成、分类及分析方法.....	113
2.8.1 电路的组成.....	74	4.3 LC 振荡电路.....	113
2.8.2 场效应管与三极管的比较.....	77	4.3.1 互感耦合振荡电路.....	114
2.9 功率放大电路.....	77	4.3.2 三点式振荡电路.....	114
2.9.1 概述.....	77	4.4 RC 振荡电路.....	116
2.9.2 甲类功率放大电路.....	78	4.4.1 RC 相移振荡电路.....	116
2.9.3 乙类推挽功率放大电路.....	79	4.4.2 文氏桥振荡电路.....	117
本章小结.....	81	4.5 石英晶体振荡电路.....	118
习题.....	82	本章小结.....	120
第3章 集成运算放大器.....	89	习题.....	121
3.1 概述.....	89	下篇 数字部分	
3.1.1 集成运放电路的特点.....	89	第5章 数字逻辑基础.....	122
3.1.2 集成运放电路的组成框图.....	89	5.1 数制与BCD码.....	122
3.2 电流源电路.....	90	5.1.1 数制.....	122
3.2.1 基本电流源电路.....	91	5.1.2 几种简单的编码.....	125
*3.2.2 以电流源为有源负载的放大器.....	92	5.2 逻辑代数基础.....	126
3.3 集成运放原理电路和理想运放的参数.....	92	5.2.1 与运算.....	126
3.3.1 集成运放原理电路分析.....	92	5.2.2 或运算.....	127
3.3.2 集成运放的主要参数.....	93	5.2.3 非运算.....	128
3.4 理想集成运放的参数和工作区.....	94	5.2.4 复合运算.....	129
3.4.1 理想运放的性能指标.....	95	5.2.5 正逻辑和负逻辑.....	130
3.4.2 理想运放在不同工作区的特征.....	95	5.3 逻辑代数的基本关系式和常用公式.....	131
3.5 基本运算电路.....	96	5.3.1 逻辑代数的基本关系式.....	131
3.5.1 比例运算电路.....	97	5.3.2 基本定律.....	132
3.5.2 加减运算电路.....	100	5.3.3 常用的公式.....	133
3.5.3 积分和微分运算电路.....	103	5.3.4 基本定理.....	134
3.5.4 对数和指数(反对数)运算电路.....	104	5.4 逻辑函数的表示方法.....	135
本章小结.....	105	5.4.1 逻辑函数的表示方法.....	135
习题.....	106	5.4.2 逻辑函数的真值表表示法.....	135
第4章 正弦波振荡电路.....	111	5.4.3 逻辑函数式.....	136
4.1 概述.....	111	5.4.4 逻辑图.....	138
4.2 正弦波振荡电路的基本原理.....	111	5.4.5 工作波形图.....	138
		5.5 逻辑函数式的化简.....	139
		5.5.1 公式化简法.....	139

5.5.2 逻辑函数的卡诺图化简法	140	第7章 组合逻辑电路	178
5.5.3 具有无关项的逻辑函数的化简	145	7.1 概述	178
5.6 研究逻辑函数的两类问题	146	7.1.1 组合逻辑电路的特点	178
5.6.1 给定电路分析功能	146	7.1.2 组合逻辑电路的分析和设计方法	178
5.6.2 给定逻辑问题设计电路	148	7.2 常用组合逻辑电路	179
本章小结	150	7.2.1 编码器	179
习题	151	7.2.2 优先编码器	181
第6章 门电路	154	7.2.3 译码器	185
6.1 概述	154	7.2.4 显示译码器	189
6.2 分立元件门电路	155	7.2.5 数据选择器	191
6.2.1 二极管与门电路	155	7.2.6 加法器	195
6.2.2 二极管或门电路	156	7.2.7 数值比较器	198
6.2.3 三极管非门电路	156	7.3 组合逻辑电路中的竞争—冒险现象	199
6.3 TTL 集成门电路	158	7.3.1 竞争—冒险现象	199
6.3.1 TTL 非门电路	158	7.3.2 竞争—冒险现象的判断方法	200
6.3.2 TTL 与非门及或非门电路	161	本章小结	201
6.3.3 集电极开路的门电路	163	习题	202
6.3.4 三态门电路	165	第8章 触发器和时序逻辑电路	205
6.4 CMOS 门电路	168	8.1 概述	205
6.4.1 CMOS 反相器电路的组成和工作原理	168	8.2 触发器的电路结构与工作原理	205
6.4.2 CMOS 与非门电路的组成和工作原理	169	8.2.1 基本 RS 触发器	205
6.4.3 CMOS 或非门电路的组成和工作原理	169	8.2.2 同步 RS 触发器的电路结构与工作原理	208
6.4.4 CMOS 传输门电路的组成和工作原理	171	8.2.3 主从 RS 触发器的电路结构与工作原理	209
6.5 集成电路使用知识简介	172	8.2.4 由 CMOS 传输门组成的边沿触发器	213
6.5.1 国产集成电路型号的命名法	172	8.3 触发器逻辑功能的描述方法	214
6.5.2 集成门电路的主要技术指标	172	8.3.1 RS 触发器	214
6.5.3 多余输入脚的处理	173	8.3.2 JK 触发器	215
6.5.4 TTL 与 CMOS 的接口电路	173	8.3.3 D 触发器	216
本章小结	175	8.3.4 T 触发器	216
习题	175	8.3.5 触发器逻辑功能的转换	217
		8.4 时序逻辑电路的分析方法和设计方法	219

8.4.1 同步时序电路的分析方法	219	10.3 模/数转换器	269
8.4.2 异步时序逻辑电路的分析 方法及举例	223	10.3.1 A/D转换器的基本组成	269
8.4.3 同步时序电路的设计方法	224	10.3.2 直接A/D转换器	271
8.5 常用的时序逻辑电路	228	10.3.3 间接A/D转换器	275
8.5.1 寄存器和移位寄存器	228	10.4 A/D和D/A的使用参数	276
8.5.2 同步计数器	231	10.4.1 A/D和D/A的转换精度	276
8.5.3 移位寄存器型计数器	244	10.4.2 A/D和D/A的转换速度	277
8.6 时序逻辑电路分析设计综合 例题	246	本章小结	277
本章小结	248	习题	277
习题	249	第11章 半导体存储器和可编程 逻辑器件	279
第9章 脉冲产生和整形电路	253	11.1 半导体存储器	279
9.1 概述	253	11.1.1 只读存储器	279
9.2 555定时器的应用	253	11.1.2 ROM的扩展及应用	281
9.2.1 555定时器的电路结构	253	11.1.3 几种常用的ROM	283
9.2.2 用555定时器组成施密特 触发器	255	11.2 可编程逻辑器件	284
9.2.3 用555定时器组成单稳态 电路	256	11.2.1 PLD的连接方式及基本门 电路的PLD表示法	285
9.2.4 用555定时器组成多谐 振荡器	258	11.2.2 可编程阵列逻辑	286
9.2.5 555定时器的应用电路	260	11.2.3 可编程通用阵列逻辑器件的 基本结构	288
9.3 石英晶体多谐振荡器	262	11.2.4 在系统可编程逻辑器件	290
9.4 压控振荡器	263	11.3 可编程逻辑器件的编程	296
本章小结	264	11.3.1 PLD的开发系统	296
习题	264	11.3.2 PLD编程的一般步骤	297
第10章 数/模和模/数转换器	266	11.4 CPLD及FPGA简介	297
10.1 概述	266	11.4.1 CPLD及FPGA基本结构	297
10.2 数/模转换器	266	11.4.2 FPGA/CPLD设计流程	300
10.2.1 权电阻网络D/A转换器	266	本章小结	302
10.2.2 倒T形电阻网络D/A 转换器	268	习题	302
		附录A 常用数字集成电路型号及 引脚	306

上篇 模拟部分

第 1 章 半导体器件

半导体器件是组成各种电子电路的基础。本章首先介绍半导体基础知识，包括半导体材料的特性、半导体中载流子的运动、PN 结的单向导电性等，然后介绍半导体二极管、三极管和场效应管的结构、工作原理、特性曲线及主要参数。

1.1 半导体基础知识

自然界的物质，按照导电能力的强弱，可分为导体、半导体和绝缘体 3 类。物质的导电性能取决于原子结构。低价元素一般导电性能好，如银、铜、铝等金属材料，都是良好的导体，它们的特点是，最外层电子容易摆脱原子核的束缚，成为自由电子，可以在外电场的作用下产生定向移动，即产生电流。而高价元素，如惰性气体，或高分子物质，如橡胶，它们的最外层电子很难挣脱原子核的束缚成为自由电子，所以导电性极差，我们称之为绝缘体。半导体是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，它的电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内。

目前，制作半导体器件的主要材料是硅 (Si)、锗 (Ge)、砷化镓 (GaAs) 等。其中硅用得最广泛，它是当前制作集成器件的主要材料，而砷化镓主要用来制作高频高速器件。

半导体器件是近代电子学的重要组成部分，它是构成电子电路的基本元件，半导体器件是由经过特殊加工且性能可控的半导体材料制成的。

1.1.1 本征半导体

将纯净的半导体经过一定工艺过程制成的单晶体，称为本征半导体。

常用的半导体材料有硅 (Si) 和锗 (Ge)，它们都是四价元素，它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱原子核的束缚成为自由电子，也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧，内部几乎没有自由电子，所以半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

本征半导体中的四价元素是靠共价键结合成分子的，图 1-1 所示为本征半导体硅和锗晶体的共价键结构平面示意图。

半导体之所以被人们重视，主要的原因是它的导电能力在不同的条件下有显著的差异。例如，当有些半导体受到热或光的激发时，导电能力将明显增长。如果在纯净的半导体中掺

入微量“杂质”，半导体的导电能力将猛增到几千、几万乃至上百万倍。人们就是利用半导体的热敏、光敏特性制作成半导体热敏元件和光敏元件，利用半导体的掺杂特性制造了种类繁多，且具有不同用途的半导体器件，如二极管、三极管、场效应管等。

1.1.2 本征激发和两种载流子

晶体的共价键具有很强的结合力，在常温下，本征半导体内部仅有极少数的价电子可以在热运动的激发下，挣脱原子核的束缚而成为晶格中的自由电子，与此同时，在共价键中将留下一个带正电的空位子，称为空穴，如图 1-2 所示。

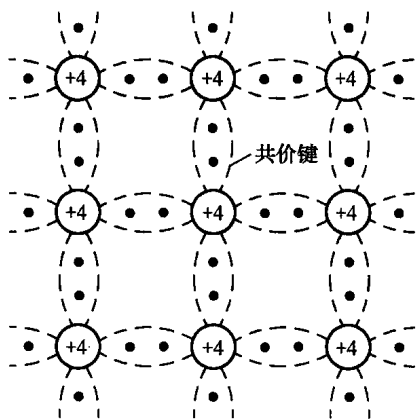


图 1-1 共价键结构平面示意图

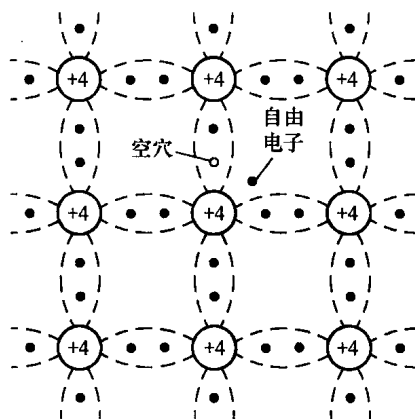


图 1-2 本征激发示意图

热运动激发所产生的电子和空穴总是成对出现的，称为电子—空穴对。本征半导体因热运动而产生电子—空穴对的现象称为本征激发。

本征激发所产生的电子—空穴对，在外电场的作用下，都会作定向移动而形成电流。自由电子的移动与导体中自由电子移动的方式相同，它将形成一个与自由电子移动方向相反的电流。

空穴的移动，可以看成是自由电子定向依次填充空穴而形成的，这种填充作用相当于教室的第一排有一个空位，后排的同学依次往前挪来填充空位，以人为参照系，人填充空位的作用等效于人不动，空位往后走。因空穴带正电，空穴的这种定向移动会形成与空穴运动方向相同的空穴电流。

半导体内部同时存在着自由电子和空穴移动所形成的电流是半导体导电方式的最大特点，也是半导体与金属导体在导电机理上本质的差别。

在电子技术中把参与导电的物质称为载流子。因为本征半导体内部参与导电的物质有自由电子和空穴，所以本征半导体中有两种载流子，一种是带负电的自由电子，另一种是带正电的空穴。

本征半导体导电能力的大小与本征激发的激烈程度有关，温度越高，由本征激发所产生的电子—空穴对越多，本征半导体内部载流子的数目也越多，本征半导体的导电能力就越强，这就是半导体导电能力受温度影响的直接原因。

本征半导体本征激发的现象还与原子的结构有关，硅的最外层电子离原子核较铗的最外层电子近，所以硅最外层电子受原子核的束缚力较铗的强，本征激发现象比较弱，热稳定性比铗好。

1.1.3 杂质半导体

半导体的导电能力除了与温度有关外，还与半导体内部所含的杂质有关。在本征半导体

中掺入微量的杂质，可以使杂质半导体的导电能力得到改善，并受所掺杂质的类型和浓度控制，使半导体获得重要的用途。由于掺入半导体中的杂质不同，杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两大类。

1. N型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，掺入微量的五价元素，如磷（P）。掺入的杂质并不改变本征半导体硅（或锗）的晶体结构，只是半导体晶格点阵中的某些硅（或锗）原子被磷原子所取代。五价元素的四个价电子与硅（或锗）原子组成共价键后，将多余一个价电子。如图1-3所示，这一多余的电子不受共价键的束缚，只需获得较小的能量，就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子。于是，半导体中自由电子的数量增加。

五价元素的原子团因失去电子而成为正离子，但它不产生空穴，不能像空穴那样能被电子填充而移动参与导电，所以它不是载流子。

杂质半导体中，除了杂质元素施放出的自由电子外，半导体本身还存在本征激发所产生的电子—空穴对。由于增加了杂质元素所施放出的自由电子数，导致这类杂质半导体中的自由电子数大于空穴数。自由电子导电成为此类杂质半导体的主要导电方式，故称它为电子型半导体，简称N型半导体。

在N型半导体中，电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。由于杂质原子可以提供电子，故称为施主原子。N型半导体主要靠自由电子导电，在本征半导体中掺入的杂质越多，所产生的自由电子数也越多，杂质半导体的导电能力就越强。

2. P型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价杂质元素，如硼（B）。杂质原子取代晶体中某些晶格上的硅（或锗）原子，三价元素的3个价电子与周围4个原子组成共价键时，缺少1个电子而产生了空位，如图1-4所示。此空位不是空穴，所以不是载流子，但是邻近的硅（或锗）原子的价电子很容易来填补这个空位，于是在该价电子的原位上就产生了1个空穴，而三价元素却因多得了1个电子而成了负离子。

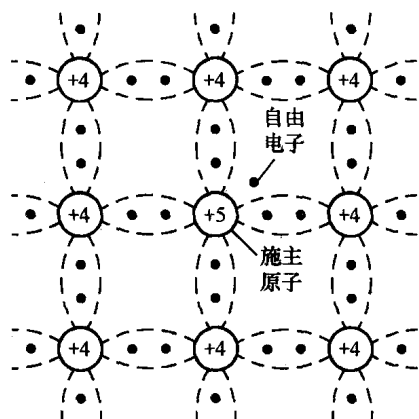


图 1-3 N型半导体的晶体结构

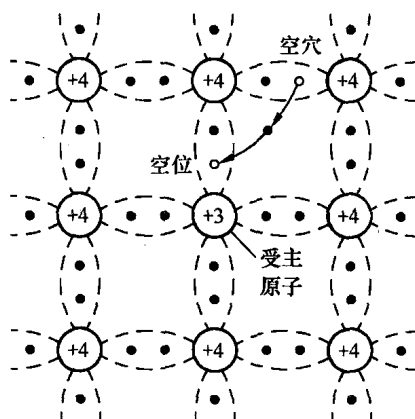


图 1-4 P型半导体的晶体结构

在室温下，价电子几乎能填满杂质元素上的全部空位，而使其成为负离子，与此同时，半导体中产生了与杂质元素原子数相同的空穴，除此之外，半导体中还有因本征激发所产生

的电子—空穴对。所以, 在这类半导体中, 空穴的数目远大于自由电子的数目, 导电是以空穴载流子为主, 故称空穴型半导体, 简称 P 型半导体。

P 型半导体中的多子是空穴, 少子为自由电子, 主要靠空穴导电。与 N 型半导体相同, 掺入的杂质越多, 空穴的浓度越高, 导电能力就越强。因杂质原子中的空位吸收电子, 故称之为受主原子。

1.1.4 PN 结

杂质半导体增强了半导体的导电能力, 利用特殊的掺杂工艺, 可以在一块晶片的两边分别生成 N 型半导体和 P 型半导体, 在两者的交界处将形成 PN 结。PN 结具有单一型的半导体所没有的特性, 利用该特性可以制造出各种类型的半导体器件。下面介绍 PN 结的特性。

1. PN 结的形成

单个的 P 型半导体或 N 型半导体内部虽然有空穴或自由电子, 但整体是电中性的, 不带电。人们利用特殊的掺杂工艺, 在一块晶片的两边分别生成如图 1-5 (a) 所示的 N 型半导体和 P 型半导体。

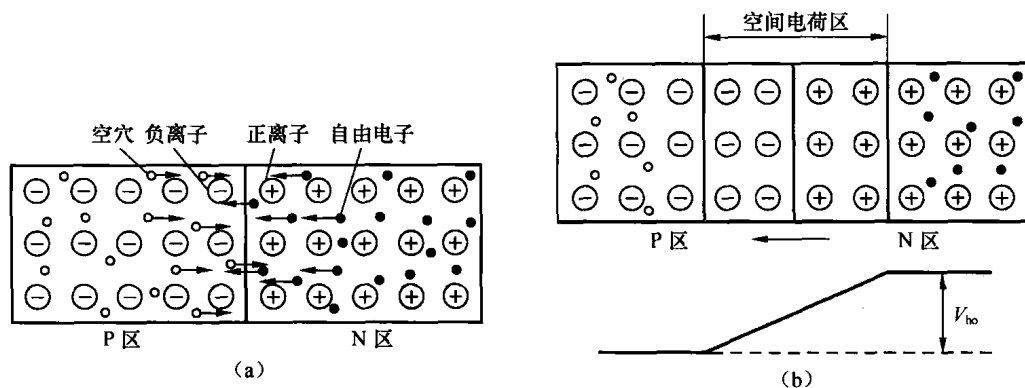


图 1-5 PN 结的形成

因为 P 区的多子是空穴, N 区的多子是电子, 在两块半导体交界处, 同类载流子的浓度差别极大, 这种差别将产生 P 区浓度高的空穴向 N 区扩散, 与此同时, N 区浓度高的电子也会向 P 区扩散。

扩散运动的结果, 使 P 型半导体的原子在交界处得到电子成为带负电的离子, N 型半导体的原子在交界处失去电子成为带正电的离子, 形成如图 1-5 (b) 所示的空间电荷区。

空间电荷区随着电荷的积累, 将建立起一个内电场 E , 该电场对半导体内多数载流子的扩散运动起阻碍的作用, 但对少数载流子的运动却起到促进的作用, 少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。在无外电场和其他因素的激励下, 当参与扩散的多数载流子和参与漂移的少数载流子在数目上相等时, 空间电荷区电荷的积累效应将停止, 空间电荷区内电荷的数目将达到一个动态的平衡, 并形成如图 1-5 (b) 所示的 PN 结。此时, 空间电荷区具有一定的宽度, 内电场也具有一定的强度, PN 结内部的电流为零。

由于空间电荷区在形成的过程中, 移走的是载流子, 留下的是不能移动的正、负离子, 这种作用与电容器存储电荷的作用相等效, 因此, PN 结也具有电容的效应, 该电容称为 PN

结的结电容，PN 结的结电容有势垒电容和扩散电容两种。

2. PN 结的单向导电性

处于平衡状态下的 PN 结没有实用的价值，PN 结的实用价值只有在 PN 结上外加电压时才能显示出来。

(1) 外加正向电压

在 PN 结上外加正向电压时的电路如图 1-6 所示，处在这种连接方式下的 PN 结，称为正向偏置（简称正偏）。由图 1-6 可见，当 PN 结处在正向偏置时，P 型半导体接高电位，N 型半导体接低电位。

处在正向偏置的 PN 结，外电场和内电场的方向相反。在外电场的作用下，P 区的空穴和 N 区的电子都要向空间电荷区移动，进入空间电荷区的电子和空穴分别和原有的一部分正、负离子中和，破坏了空间电荷区的平衡状态，使空间电荷区的电荷量减少，空间电荷区变窄，内电场相应的被削弱，这种情况有利于 P 区空穴和 N 区的电子向相邻的区域扩散，并形成扩散电流，即 PN 结的正向电流。

在一定范围内，正向电流随着外电场的增强而增大，此时的 PN 结呈现出低电阻值，PN 结处于导通状态。PN 结正向导通时的压降很小，理想情况下，可认为 PN 结正向导通时的电阻为 0，所以导通时的压降也为 0。

PN 结的正向电流包含空穴电流和电子电流两部分，外电源不断向半导体提供电荷，使电路中的电流得以维持。正向电流的大小主要由外加电压 V 和电阻 R 的大小来决定。

(2) 外加反向电压

在 PN 结上外加反向电压时的电路如图 1-7 所示，处在这种连接方式下的 PN 结称为反向偏置（简称反偏）。由图 1-7 可见，当 PN 结处在反向偏置时，P 型半导体接低电位，N 型半导体接高电位。

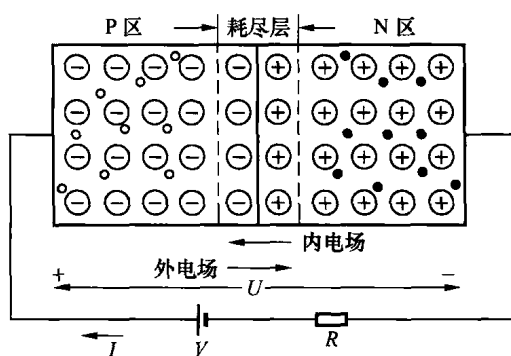


图 1-6 PN 结外加正向电压时导通

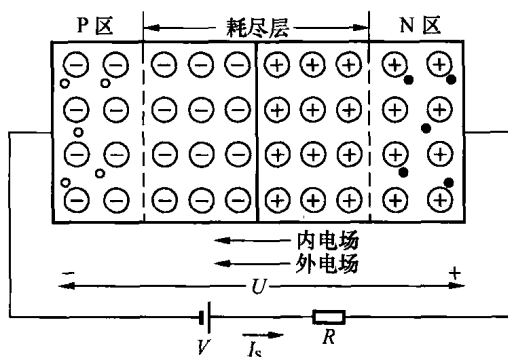


图 1-7 PN 结外加反向电压时截止

由图 1-7 可见，处在反向偏置的 PN 结，外电场和内电场的方向相同。当 PN 结处在反向偏置时，PN 结内部扩散和漂移运动的平衡被破坏了。P 区的空穴和 N 区的电子由于外电场的作用都将背离空间电荷区，结果使空间电荷量增加，空间电荷区加宽，内电场加强，内电场的加强进一步阻碍了多数载流子扩散运动的进行，对少数载流子的漂移运动却有利，少数载流子的漂移运动所形成的电流称为 PN 结的反向电流。

由于少数载流子的数目有限，在一定范围内，反向电流极微小，该电流又被称为反向饱

和电流,用符号 I_s 来表示。反向偏置时的 PN 结呈高电阻态,理想的情况下,反向电阻为 ∞ ,此时 PN 结的反向电流为 0,PN 结不导电,即 PN 结处在截止的状态。

由于少数载流子与半导体的本征激发有关,本征激发与温度有关,所以 PN 结的反向饱和电流会随着温度的上升而增大。

由以上的分析可见,PN 结的导电能力与加在 PN 结上电压的极性有关。当外加电压使 PN 结处在正向偏置时,PN 结会导电;当外加电压使 PN 结处在反向偏置时,PN 结不导电。PN 结的这种导电特性称为 PN 结的单向导电性。

3. PN 结的电流方程

根据半导体材料的理论可得,加在 PN 结上的端电压 v 与流过 PN 结的电流 i 之间的关系为

$$i = I_s(e^{\frac{qv}{kT}} - 1) \quad (1-1)$$

式(1-1)是描述 PN 结的电流随输入电压而变化的电流方程,式中的 I_s 为反向饱和电流, q 为电子电量, k 为玻耳兹曼常数, T 为热力学温度。

令 $V_T = \frac{kT}{q}$, V_T 称为温度电压当量,在 $T=300\text{K}$ 的常温下,温度电压当量 $V_T \approx 26\text{mV}$ 。将温度电压当量的表达式代入式(1-1)中可得

$$i = I_s(e^{\frac{v}{V_T}} - 1) \quad (1-2)$$

由式(1-2)可见,PN 结电流和电压的约束关系不像电阻元件那样是线性的关系,而是非线性的关系,具有这种特性的元件称为非线性元件。非线性元件电流和电压的约束关系不能用欧姆定律来描述,必须用伏—安特性曲线来描述。

4. PN 结的伏—安特性曲线

由 PN 结的电流方程式(1-2)可得,当 PN 结外加正向电压 $v \geq V_T$ 时,式(1-2)中的指数项远大于 1,1 可忽略,故 $i \approx I_s e^{\frac{v}{V_T}}$,即电流随电压按指数规律变化。

当 PN 结外加反向电压 $|v| \geq V_T$ 时,式(1-2)中的指数项约等于 0, $i \approx -I_s$,式中的负号也说明了反向偏置时电流的方向与正向偏置时电流的方向相反。根据式(1-2)所作的曲线称为 PN 结的伏—安特性曲线,如图 1-8 所示。

图 1-8 中 $v > 0$ 的部分称为正向特性, $v < 0$ 的部分称为反向特性。由图 1-8 可见,当反向电压超过 V_{BR} 后,PN 结的反向电流急剧增加,这种现象称为 PN 结反向击穿。

PN 结的反向击穿有雪崩击穿和齐纳击穿两种,当掺杂溶度比较高时,击穿通常为齐纳击穿;当掺杂溶度比较低时,击穿通常为雪崩击穿。无论哪种击穿,若对电流不加限制,都可能造成 PN 结的永久性损坏。

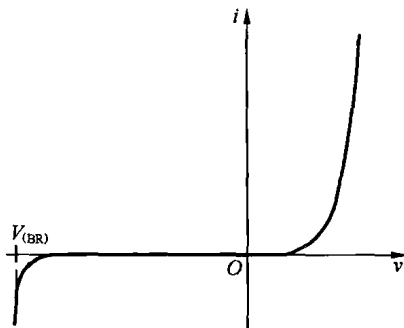


图 1-8 PN 结的伏安特性曲线