



免费赠送
电子课件

高等学校应用型特色规划教材

模拟电子技术

郑国平 主 编
钟水平 邱淑贤 副主编



清华大学出版社

高等学校应用型特色规划教材

模 拟 电 子 技 术

郑国平 主 编

钟水平 邱淑贤 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

模拟电子技术是电气、电子、通信、自动化、机电一体化等专业的基础课。本书在编写过程中,坚持以“应用”为宗旨和特征来构建课程和教学体系的指导思想,真正体现了应用型人才的教育理念。

本书内容包括:半导体二极管及其应用,半导体三极管,放大电路基础,场效应管及其电路,集成运算放大器,负反馈放大器,集成运算放大器的基本应用,波形产生电路,低频功率放大电路,直流稳压电源,集成模拟乘法器在高频电路中的应用,晶闸管及其电路,电路仿真等共13章。其中带有“*”号的章节内容视教学难度供选修。实训部分采用先实后虚的编写思路,强化了实际应用能力的培养。

本书内容涉及面广、安排得当,叙述简明扼要、深入浅出,可作为应用型人才培养的本科院校、高职高专院校和成人高校的电气、电子、通信、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供从事电子技术工程的技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/郑国平主编;钟水平,邱淑贤副主编. —北京:清华大学出版社,2006.11

(高等学校应用型特色规划教材)

ISBN 7-302-13738-2

I. 模… II. ①郑… ②钟… ③邱… III. 模拟电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第104496号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:李春明

文稿编辑:杨作梅

封面设计:陈刘源

排版人员:房书萍

印 装 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:20.75 字数:493千字

版 次:2006年11月第1版 2006年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13738-2/TN·353

印 数:1~4000

定 价:28.00元

前 言

本书依据教育部高教司关于应用型人才培养的相关文件精神,参照清华大学出版社组织讨论并确定的《高等院校应用型特色规划教材——电气及电子信息系列》“模拟电子技术”教学大纲,在“基础理论要以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为教学重点,加强专业学习的针对性和实用性,同时应使学生具备一定的可持续发展的能力”的原则下编写的。

本书在编写过程中,坚持以“应用”为宗旨和特征来构建课程和教学体系的指导思想,真正体现应用型人才的教育理念。本书内容涉及面广、安排得当,叙述简明扼要、深入浅出,可作为应用型人才培养的本科院校、高职高专院校和成人高校的电气、电子、通信、自动化、机电一体化等专业的教材,也可供从事电子技术工程技术人员参考。

从 20 世纪末以来,电子技术获得了飞速的发展,现代电子产品几乎已经进入社会的各个领域。半导体工艺技术的发展,表征半导体工艺水平从 90nm(2004 年)开始不断提高。集成电路不断向超大规模、极低功耗和超速的方向发展,这就使得学习者应把目光放在如何利用好集成电路内部资源和使用器件外部的引脚功能的方向上,对于模拟电子技术教材的编写,无论在内容上还是在编排上也必须因此而更新。我们根据多年高职教学工作实践,认为只有培养学生的学习能力、使用能力、创新思维能力和基本技能,才能使学生在电子技术飞速发展的今天不被淘汰并有所作为。这是本书编者的初衷,以飨读者。

本书注重集成电路以及新器件的分析和应用,在内容取材和安排上,与现有的同类教材相比,具有以下特点:

(1) 教学内容以集成电路为主、分立元件电路为辅,在基本理论上安排了一定的分立元件电路作为集成电路学习的导入。

(2) 坚持先“实”后“虚”的整体实训的教学理念。全书安排了 8 个硬件实验,旨在帮助学生掌握电路工作原理和特性,加强对电子技术理论的理解。本书最后一章介绍的仿真软件 Multisim 7,提供了一个功能完善、操作界面友好、容易使用、成本低廉且方便重复实验的工作平台。

(3) 添加了新型电子器件和电子电路。例如:特殊二极管,特殊三极管,光电耦合器,压控振荡器,各种用途的晶闸管,8038 集成函数发生器,Vmos 功率放大器等。

(4) 增加了“集成模拟乘法器在高频电路中的应用”和“晶闸管及其电路”两章,为需要这方面知识的学生选用。体现内容新,用时少的特点。

全书内容共分 13 章,选学的章节用*字符加以注明,按照理论和实训教学 110 学时左右编写,每章有要点、习题,供读者思考和练习。

本书由郑国平任主编,钟水平,邱淑贤任副主编。第 1 章、第 9 章、第 12 章由王朱

劳执笔；第2章、第10章由邱淑贤执笔；第3章、第4章由吴巍执笔；第5章、第8章由钟水平执笔；第6章、第7章由郑国平执笔；第11章、第13章由董建康执笔。

本书承蒙华中科技大学谢瑞和教授审稿，并提供了详细的修改意见，在此表示谢意。

由于作者水平有限，加之时间紧，本书难免存在不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体二极管及其应用	1	2.2.3 电流分配关系的测试	24
1.1 PN 结	1	2.3 三极管的特性曲线	26
1.1.1 半导体基础知识	1	2.3.1 输入特性曲线	26
1.1.2 PN 结	4	2.3.2 输出特性曲线	27
1.2 半导体二极管	6	2.4 三极管的主要参数及温度的影响	28
1.2.1 基本结构、种类与符号	6	2.4.1 主要参数	28
1.2.2 伏安特性	7	2.4.2 温度对三极管的特性 与参数的影响	29
1.2.3 主要参数	8	2.5 特殊三极管简介	30
1.2.4 使用注意事项	9	2.5.1 光电三极管	30
1.3 二极管应用	10	2.5.2 光电耦合器	30
1.3.1 整流	10	2.6 实训 二极管、三极管 的简易判别	31
1.3.2 检波	10	2.7 习题	32
1.3.3 钳位	10	第 3 章 放大电路基础	35
1.3.4 限幅	10	3.1 单管共发射极放大器	35
1.3.5 元件保护	12	3.1.1 电路的组成	35
1.4 特殊二极管	12	3.1.2 静态分析	36
1.4.1 稳压二极管	12	3.1.3 动态分析	38
1.4.2 发光二极管	14	3.2 微变等效电路分析法	41
1.4.3 光敏二极管	15	3.2.1 简化的晶体管共 发射 H 参数	41
1.4.4 变容二极管	15	3.2.2 用 H 参数等效电路 分析共发射极放大器	42
1.4.5 隧道二极管	16	3.3 静态工作点稳定电路	45
1.4.6 肖特基二极管	16	3.3.1 温度影响静态工作点	46
1.4.7 片式二极管	17	3.3.2 分压式电流负 反馈偏置电路	46
1.4.8 快恢复二极管	17	3.4 单管共集电极电路	49
1.5 习题	19	3.4.1 电路的组成	49
第 2 章 半导体三极管	21	3.4.2 静态分析	50
2.1 三极管的结构、符号及分类	21	3.4.3 动态分析	50
2.1.1 三极管的结构与符号	21	3.4.4 射极输出器的应用	52
2.1.2 三极管的分类	22	3.5 共基极放大电路简介	52
2.1.3 三极管的外部结构	22		
2.2 三极管的电流分配与放大作用	22		
2.2.1 载流子的运动及各 电极电流的形成	23		
2.2.2 电流放大作用	24		

3.6 单管共发射极放大器的频率特性.....	53	5.1.1 晶体管恒流源.....	86
3.6.1 RC 电路的频响	53	5.1.2 镜像电流源.....	87
3.6.2 单管共发射极放大器 的频率特性	54	5.1.3 有源负载放大器.....	88
3.6.3 频率失真	56	5.2 差动放大电路.....	88
3.6.4 电路元器件参数的选择.....	57	5.3 集成运算放大器简介.....	96
3.7 多级放大器	57	5.3.1 运算放大器的组成.....	96
3.7.1 四种级间耦合方式.....	58	5.3.2 互补对称功放电路.....	97
3.7.2 多级放大器的频响.....	59	5.3.3 复合管.....	98
3.7.3 放大倍数(增益)的 分贝表示法	60	5.3.4 简单的运算放大器.....	100
3.8 放大器的噪声与抗干扰措施.....	60	5.4 集成运算放大器的类型和 型号命名方法.....	101
3.9 放大器的调整与调试.....	62	5.4.1 集成运算放大器的类型.....	101
3.10 实训 单管共发射极放大器 的组装与调试	63	5.4.2 集成运算放大器的 型号命名方法.....	101
3.11 习题	65	5.5 集成运算放大器的 主要性能参数.....	102
第 4 章 场效应管及其电路	70	5.6 理想运算放大器.....	104
4.1 绝缘栅场效应管(MOSFET)	70	5.6.1 理想运算放大器的 主要技术指标.....	104
4.1.1 N 沟道增强型场效 应管(NMOS 管).....	70	5.6.2 理想运算放大器 在线性时的特性.....	105
4.1.2 P 沟道增强型场效 应管(PMOS 管).....	73	5.6.3 理想运算放大器 在非线性时的特性.....	105
4.1.3 N 沟道耗尽型场效应管.....	73	5.7 习题.....	106
4.1.4 P 沟道耗尽型场效应管.....	74	第 6 章 负反馈放大器	111
4.2 结型场效应管(JFET).....	74	6.1 反馈的基本概念.....	111
4.2.1 结型场效应管的结构.....	74	6.1.1 反馈及反馈方框图.....	111
4.2.2 结型场效应管的工作原理.....	75	6.1.2 负反馈放大器的 两个基本关系式.....	112
4.2.3 特性曲线	76	6.1.3 反馈及反馈方式.....	113
4.2.4 场效应管的主要参数 及使用注意事项.....	78	6.2 负反馈放大器的组态.....	114
4.3 场效应管放大电路.....	79	6.2.1 电压串联负反馈.....	114
4.3.1 共源放大电路.....	79	6.2.2 电压并联负反馈.....	115
4.3.2 共漏放大电路.....	82	6.2.3 电流串联负反馈.....	116
4.3.3 复合互补源极跟随器.....	83	6.2.4 电流并联负反馈.....	116
4.4 习题	84	6.3 负反馈对放大器性能的影响.....	117
第 5 章 集成运算放大器	86	6.3.1 提高放大倍数的稳定性.....	117
5.1 恒流源电路	86	6.3.2 展宽通频带.....	117

6.3.3 减小非线性失真.....	119	7.5 习题.....	162
6.3.4 改变输入电阻和输出 电阻.....	119	第8章 波形产生电路	169
6.4 深度负反馈放大电路的估算.....	122	8.1 正弦波发生器的基本原理.....	169
*6.5 负反馈放大电路的大小信号 频率特征与稳定性.....	125	8.1.1 振荡器的方框图.....	169
6.5.1 关于应用负反馈扩展通 频带的大小信号问题.....	126	8.1.2 振荡条件.....	170
6.5.2 自激振荡问题.....	127	8.1.3 起振和稳定.....	170
6.5.3 消除自激振荡的常用方法.....	127	8.1.4 正弦波振荡电路的分类.....	171
6.6 实训 负反馈放大器安装 及调试.....	128	8.2 RC 桥式正弦波振荡电路.....	171
6.7 习题.....	131	8.2.1 RC 串并联选频网络.....	171
第7章 集成运算放大器的 基本应用	135	8.2.2 RC 桥式振荡电路的 振荡频率和起振条件.....	173
7.1 集成运算放大器的线性应用.....	135	8.3 LC 正弦波振荡电路.....	173
7.1.1 比例运算电路.....	135	8.3.1 LC 并联回路的频率特性.....	173
7.1.2 加法运算电路.....	137	8.3.2 LC 正弦波振荡器的 基本形式.....	174
7.1.3 减法运算电路.....	138	8.4 石英晶体振荡器.....	177
7.1.4 积分运算电路.....	140	8.4.1 石英晶体的基本特性.....	177
7.1.5 微分运算电路.....	142	8.4.2 石英晶体振荡电路的 基本形式.....	179
7.1.6 电压—电流转换电路.....	144	8.5 非正弦波信号发生器.....	180
7.1.7 电流—电压转换电路.....	145	8.5.1 矩形波发生器.....	180
7.1.8 有源滤波器.....	145	8.5.2 三角波发生器.....	181
*7.1.9 精密整流电路.....	152	8.5.3 锯齿波发生器.....	182
7.2 集成运放的非线性应用.....	153	8.5.4 555 时基电路.....	182
7.2.1 单门限电压比较器.....	153	8.5.5 压控振荡器.....	184
7.2.2 滞回电压比较器.....	155	8.5.6 集成函数发生器 8038.....	185
7.3 集成运放的使用常识.....	157	8.6 实训 信号发生器的组装 与测试.....	187
7.3.1 合理选用集成运放型号.....	157	8.7 习题.....	188
7.3.2 集成运放的引脚功能.....	157	第9章 低频功率放大电路	193
7.3.3 消振和调零.....	157	9.1 功率放大电路概述.....	193
7.3.4 保护.....	158	9.1.1 功率放大电路的特点.....	193
7.4 实训.....	159	9.1.2 功率放大器工作状态 的分类.....	194
7.4.1 实训一 微分、积分运算 电路的组装和调试.....	159	9.2 双电源互补对称功率放大电路 (OCL 电路).....	195
7.4.2 实训二 反相滞回电压 比较器的组装与调试.....	161	9.2.1 电路组成和工作原理.....	195

9.2.2 性能分析	195	10.4 串联型稳压电路	222
9.2.3 交越失真的消除	197	10.4.1 串联型稳压电路的 组成和稳压原理	222
9.2.4 用复合管组成互补 对称电路	198	10.4.2 输出电压的调节	222
9.2.5 OCL 电路的应用分析	199	10.4.3 分立元件组成的串联 型稳压电路	223
9.3 单电源互补对称电路 (OTL 电路)	199	10.4.4 稳压电路的保护措施	223
9.3.1 电路特性	200	10.4.5 稳压电路的质量指标	225
9.3.2 电路原理	200	10.5 三端集成稳压电源	226
9.3.3 电路实例	200	10.5.1 概述	226
9.3.4 调试方法	201	10.5.2 线性三端集成稳压器 的分类	226
9.4 BTL 集成功率放大电路	202	10.5.3 应用电路	227
9.4.1 BTL 功放组成及其 工作原理	202	10.5.4 利用三端集成稳压器 组成恒流源	227
9.4.2 集成 BTL 电路	203	10.6 开关直流稳压电源	228
9.5 集成功率放大器 4100 系列简介	204	10.7 DC-DC 变换器	229
9.6 VMOS 功率放大器	204	10.7.1 工作原理	231
9.6.1 功率场效应管(VMOS) 简介	205	10.7.2 电路原理	231
9.6.2 功率场效应管(VMOS) 电路实例	205	10.7.3 典型应用	231
9.7 实训 功率放大器的组 装与测试	206	10.8 实训 集成稳压电源的组装 与调试	232
9.8 习题	209	10.9 习题	235
第 10 章 直流稳压电源	211	*第 11 章 集成模拟乘法器在高频 电路中的应用	237
10.1 单相整流电路	211	11.1 模拟乘法器	237
10.1.1 单相半波整流电路	211	11.1.1 乘法运算电路	237
10.1.2 单相全波整流	213	11.1.2 模拟乘法器的应用	239
10.1.3 桥式全波整流电路	214	11.2 信息传输过程	240
10.2 滤波电路	216	11.2.1 信息的传输过程	240
10.2.1 电容滤波电路	216	11.2.2 信息传输处理	241
10.2.2 电感滤波电路	218	11.3 调幅与检波	241
10.2.3 其他滤波电路	219	11.3.1 调幅	241
10.3 硅稳压管稳压电路	220	11.3.2 模拟乘法器调幅电路	243
10.3.1 硅稳压管电路 及工作原理	220	11.3.3 模拟乘法器检波电路	245
10.3.2 硅稳压管稳压 电路的特点	222	11.4 调频与调相	248
		11.4.1 调频与调相	248
		11.4.2 调频方法	250

11.5 混频、倍频与锁相环路.....	250	12.6.1 光控晶闸管.....	268
11.5.1 混频.....	250	12.6.2 温控晶闸管.....	268
11.5.2 倍频.....	251	12.6.3 可关断晶闸管.....	269
11.5.3 锁相环路.....	252	12.6.4 逆导晶闸管.....	269
11.6 习题.....	253	12.7 晶闸管的应用.....	269
第 12 章 晶闸管及其电路.....	254	12.7.1 交流调光台灯的 应用电路.....	269
12.1 晶闸管概述.....	254	12.7.2 交流固态开关电路.....	270
12.2 晶闸管.....	254	12.8 实训 晶闸管可控整流电路.....	271
12.2.1 晶闸管结构、符号 与外形.....	254	12.9 习题.....	275
12.2.2 晶闸管的工作原理.....	255	第 13 章 电路仿真.....	277
12.2.3 晶闸管的伏安特性 及其主要参数.....	256	13.1 虚拟电子实验室(Multisim 7).....	277
12.2.4 晶闸管的型号.....	258	13.1.1 Multisim 7 基本操作.....	278
12.2.5 普通型晶闸管质量粗测.....	258	13.1.2 Multisim 7 电路 仿真分析.....	289
12.3 单相桥式半控整流电路.....	260	13.2 Multisim 7 基本分析方法.....	289
12.4 单结晶体管触发电路.....	262	13.2.1 直流工作点分析.....	290
12.4.1 对触发电路的要求.....	262	13.2.2 交流分析.....	292
12.4.2 单结晶体管的结构 与特性.....	262	13.3 常用模拟电路分析举例.....	293
12.4.3 单结晶体管张弛振荡器.....	264	13.3.1 单管共发射极放大电路.....	294
12.4.4 单结晶体管同步触发 电路.....	265	13.3.2 整流电路.....	296
12.5 双向晶闸管.....	266	13.4 典型电路设计与测试.....	299
12.5.1 双向晶闸管.....	266	13.5 习题.....	301
12.5.2 触发二极管.....	267	附录 A 部分习题答案.....	303
12.6 其他晶闸管介绍.....	268	附录 B 部分半导体器件及参数.....	306
		附录 C 本书常用文字符号及说明.....	315

第 1 章 半导体二极管及其应用

本章要点

- 半导体基础知识
- PN 结单向导电性
- 半导体二极管结构、符号、伏安特性及应用
- 特殊二极管

本章难点

- 半导体二极管伏安特性
- 半导体二极管应用

半导体器件是近代电子学的重要组成部分。只有掌握了半导体器件的结构、性能、工作原理和特点,才能正确地选择和合理使用半导体器件。半导体器件具有体积小、重量轻、功耗低、可靠性强等优点,在各个领域中得到了广泛的应用。半导体二极管和三极管是最常用的半导体器件,而 PN 结又是组成二极管和三极管及各种电子器件的基础。本章首先介绍有关半导体的基础知识,然后将重点介绍二极管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数以及应用电路等,为后面各章的学习打下基础。

1.1 PN 结

1.1.1 半导体基础知识

1. 半导体特性

自然界中的各种物质,按其导电能力划分为:导体、绝缘体、半导体。导电能力介于导体与绝缘体之间的,称之为半导体。导体如金、银、铜、铝等;绝缘体如橡胶、塑料、云母、陶瓷等;典型的半导体材料则有硅、锗、硒及某些金属氧化物、硫化物等,其中,用来制造半导体器件最多的材料是硅和锗。

半导体之所以用来制造半导体器件,并不在于其导电能力介于导体与绝缘体之间,而在于其独特的导电性能,主要表现在以下几个方面。

(1) 热敏性:导体的导电能力对温度反应灵敏,受温度影响大。当环境温度升高时,其导电能力增强,称为热敏性。利用热敏性可制成热敏元件。

(2) 光敏性:导体的导电能力随光照的不同而不同。当光照增强时,导电能力增强,称为光敏性。利用光敏性可制成光敏元件。

(3) 掺杂性:导体更为独特的导电性能体现在其导电能力受杂质影响极大,称为掺杂性。这里所说的“杂质”,是指某些特定的纯净的其他元素。在纯净半导体中,只要掺入极微量的杂质,导电能力就急剧增加。一个典型的数据是:如在纯净硅中,掺入百万分之

一的硼，其导电能力增加约 50 万倍。

2. 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净、具有晶体结构的半导体。在温度为零开尔文(0K，相当于 -273.15°C)时，每一个原子的外围电子被共价键所束缚，不能自由移动。这样本征半导体中虽然具有大量的价电子，但没有自由电子，此时半导体呈电中性。

用来制造半导体器件的硅、锗等材料，其原子排列均为紧密的整齐的晶体点阵结构，而硅(元素序号 14)或锗(元素序号 28)的原子结构最外层都是四个价电子。但是，对于原子核结构而言，最外层有八个电子才是稳定结构，因此，每个原子都要争夺相邻的四个价电子，以求达到稳定状态，结果使得每个原子最外层的四个价电子都既受自身原子核的吸引，围绕自身的原子核转动，又受相邻原子核的吸引，经常出现在相邻原子的价电子轨道上。这样就形成了一种特殊的结构。从而使每个硅(锗)原子最外层形成了拥有八个共有电子的相对稳定的结构。由于每对价电子是每两个相邻原子共有的，因而将这种结构称为“共价键”结构，如图 1-1 所示。

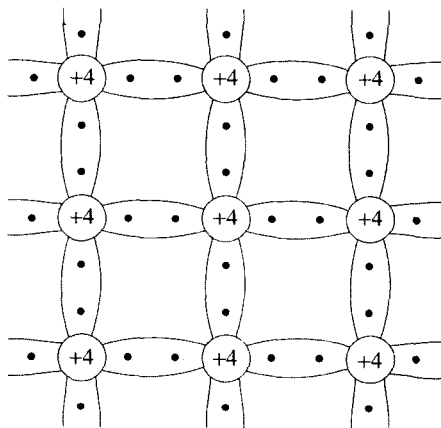


图 1-1 共价键结构

“共价键结构”把相邻的原子结合在一起，由于每个原子的最外层均有八个电子，因而处于相对稳定的状态。但是，也正是由于“共价键”的特殊结构方式，使得原子最外层的共有电子不像绝缘体中被原子核束缚得那样紧。在一定温度下，当共价键中的价电子受到热激发，或从外部获得能量时，共价键中的某些价电子就可以挣脱原子核的束缚，而成为自由电子。既然有些价电子挣脱了原子核的束缚，而成为自由电子，在原来的共价键中，便留下了一些“空位”，我们称之为“空穴”，如图 1-2 所示。自由电子呈负电性，而失去一个价电子的硅原子则成为+1 价离子，好像这个空位带有+1 价电荷一样，因此空穴呈正电性。显然，自由电子和空穴是成对出现的，所以称它们为电子空穴对。在本征半导体中电子与空穴的数量总是相等的。把在热或光的作用下，本征半导体中产生电子空穴对的现象，称为本征激发，又称热激发。

由于共价键中出现空位，在外电场或其他能源的作用下，吸引相邻原子中的价电子来填补空穴，当一个价电子填补空穴时，它原来的位置上又出现了新的空穴。如图 1-3 所示，电子由 $c \rightarrow b \rightarrow a$ ，但仍处于束缚状态，而空位由 $a \rightarrow b \rightarrow c$ 。为了区别于自由电子的运

动,我们把这种价电子的填补运动称为空穴运动,一般认为空穴是一种带正电荷的载流子,它所带电荷和电子相等,符号相反。由此可见,本征半导体中存在两种载流子:电子和空穴。而金属导体中只有一种载流子——电子。本征半导体在外电场作用下,两种载流子的运动方向相反而形成的电流方向相同。

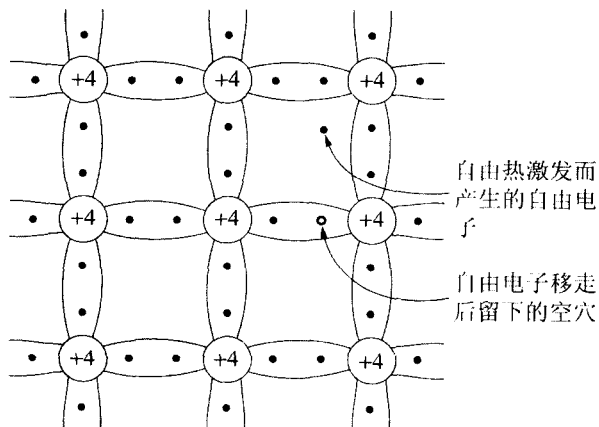


图 1-2 本征激发产生电子空穴对示意图

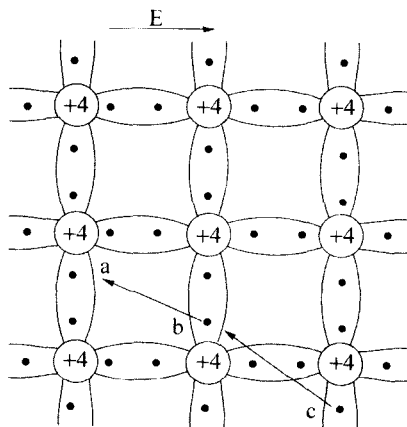


图 1-3 电子与空穴的移动

3. 杂质半导体

在本征半导体中掺入不同的杂质,可以改变半导体中两种载流子的浓度。根据掺入杂质种类的不同,半导体可以分 N 型半导体(掺入五价元素杂质)和 P 型半导体(掺入三价元素杂质)。

(1) N 型半导体

在纯净的半导体硅(或锗)中掺入微量五价元素(如磷)后,就可以成为 N 型半导体,如图 1-4 所示。由于五价的磷原子同相邻四个硅(或锗)原子组成共价键时,有一个多余的价电子不能构成共价键,这个价电子就变成了自由电子。因此在这种半导体中,自由电子数远远大于空穴数,导电以电子为主,故此类半导体亦被称为电子型半导体。

(2) P 型半导体

在硅(或锗)的晶体内掺入少量三价元素杂质,如硼(或镓)等。硼原子只有三个价电子,它与周围硅原子组成共价键时,因缺少一个电子,在晶体中便产生一个空位。当相邻共价键的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,就有可能填补这个空位而在该相邻原子中便出现一个空穴,每个硼原子都能提供一个空穴,这个空穴与本征激发产生的空穴都是载流子,具有导电性能。P 型半导体共价键结构如图 1-5 所示。

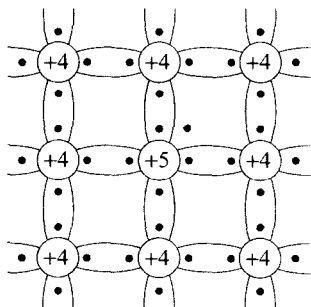


图 1-4 N 型半导体共价键结构

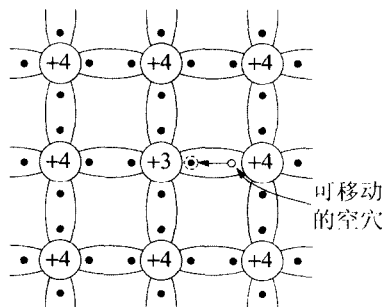


图 1-5 P 型半导体共价键结构

值得注意的是,掺杂在产生空穴的同时,并不能产生新的自由电子,只是原来的晶体本身仍会因热激发产生少量电子空穴对。掺入的三价元素杂质越多,空穴的数量越多。在 P 型半导体中,空穴数远大于自由电子数,空穴为多数载流子(简称“多子”),自由电子为少数载流子(简称“少子”)。导电以空穴为主,故此类半导体又被称为空穴型半导体。

1.1.2 PN 结

1. PN 结的形成

PN 结并不是简单地将 P 型和 N 型材料压合在一起,它是根据“杂质补偿”的原理,采用合金法或平面扩散法等半导体工艺制成的。虽然 PN 结的物理界面把半导体材料分为 P 区和 N 区,但整个材料仍然保持完整的晶体结构。

当 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时,在 N 型和 P 型半导体的界面两侧明显地存在着电子和空穴的浓度差,此浓度差导致载流子的扩散运动: N 型半导体中电子(多子)向 P 区扩散,这些载流子一旦越过界面,就会与 P 区空穴复合,在 N 区靠近界面处留下正离子;同理, P 型半导体中空穴(多子)由于浓度差向 N 区扩散,与 N 区中电子复合,在 P 区靠近界面处留下负离子。伴随着这种扩散和复合运动的进行,在界面两侧附近形成一个由正离子和负离子构成的空间电荷区,如图 1-6 所示。

空间电荷区内存在着由 N 区指向 P 区的电场,这个电场称为内建电场,该内建电场阻止两区多子的扩散,促进少子的漂移。

显然,半导体中多子的扩散运动和少子的漂移运动是一对矛盾的两个方面。随着多子扩散的进行,空间电荷区内的离子数增多,内建电场增强;与此同时,内建电场的增强有利于少子的漂移,漂移电流增大,最终当漂移电流和扩散电流相等时,达到动态平衡,在界面处形成稳定的空间电荷区,通常将其称为 PN 结,如图 1-7 所示。这时,再没有净的电流流过 PN 结,也不会有净的电荷迁移。

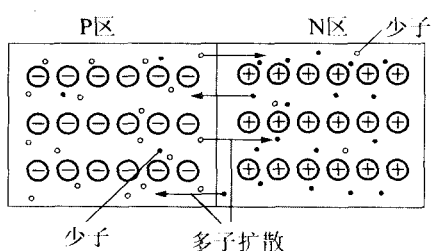


图 1-6 P型半导体与N型半导体的交界面

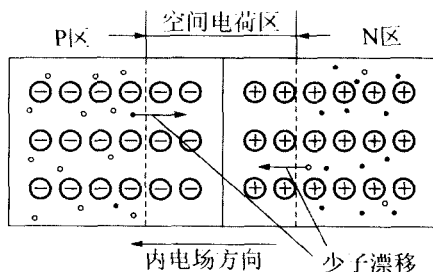


图 1-7 多子的扩散与空间电荷区的形成

2. PN结的单向导电性

(1) PN结加正向电压

所谓PN结加正向电压，也可称为正向偏置，是指将PN结的P区接电源正极，N区接电源负极，如图1-8所示。

这时，有外加电场后，外电场的方向刚好与PN结内电场的方向相反。在外加电场作用下，PN结内部扩散与漂移的平衡被打破，而且由于外电场的作用，P区的多数载流子空穴和N区的多数载流子电子都要向PN结移动。P区的空穴进入PN结后，将和原来PN结中的一部分正离子中和，其结果是使N区的空间电荷量减少，最终结果是使PN结空间电荷区变窄。空间电荷区的变窄，意味着阻挡层的厚度变薄，内电场进一步被减弱，它对多子扩散的阻力减小，P区与N区中能越过PN结的多数载流子数目大大增加，形成了一个扩散电流。而正向偏置下的PN结将相当于一个数值很小的电阻，可视为PN结正向导通。

这种情况下，由少数载流子形成的漂移电流，其方向与扩散电流相反，但数值很小，常常可忽略不计。

(2) PN结加反向电压

PN结加反向电压，是指将PN结的P区接电源负极，将其N区接电源正极，如图1-9所示。

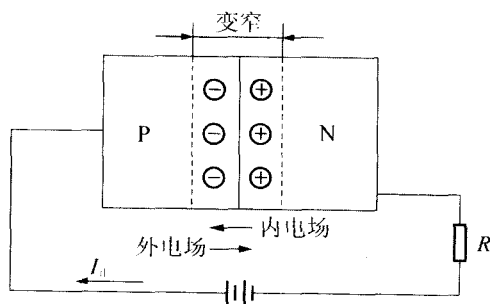


图 1-8 PN结加正向电压

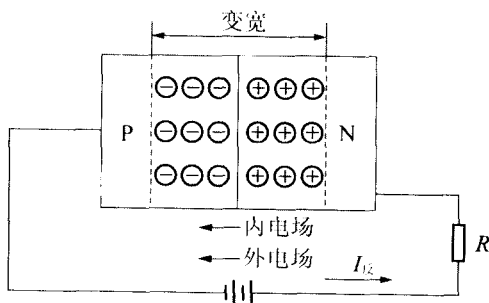


图 1-9 PN结加反向电压

显然，此时外电场的方向与内电场的方向相同，在这一外电场作用下，P区中的多子空穴与N区中的多子电子都将进一步离开PN结，使阻挡层的空间电荷量增加。空间电荷区的变宽，意味着阻挡层厚度加大，使P区和N区的多数载流子很难越过PN结，不能再

形成扩散电流。

另一方面, 由于外电场增强了内电场, 将使少数载流子的漂移运动更容易进行。在这种情况下, 漂移成矛盾的主要方面, 而且形成一个反向漂移电流。由于少子的浓度低, 漂移的数量小, 这个反向漂移电流也很小, 一般为微安数量级。而整个 PN 结表现为一个很大的电阻, 可视为 PN 结反向截止。

这里, 有一点需要特别说明的是, 反向漂移电流具有明显的饱和性, 这是因为, 少数载流子是由本征激发所产生的, 其数值取决于温度, 而与外加电压几乎无关。在一定温度下, 只要外加电压所产生的电场足以把这些少子都吸引过来, 形成漂移电流, 电压即使再增加, 也不能使载流子的数目增多, 电流的数值则趋于稳定, 因而, 常常将这一电流称为反向饱和电流。

也正因为如此, 反向饱和电流虽然数值不大, 但它受温度的影响很大, 在实际应用中必须考虑这一点。

综上所述, 可得出结论: PN 结的正向电阻很小, 可视为正向导通; 反向电阻很大, 可视为反向截止。这就是 PN 结的单向导电性。

1.2 半导体二极管

半导体二极管由一个 PN 结加上电极引线和管壳构成。P 型区引出的电极称为阳极, N 型区引出的电极称为阴极。半导体二极管在电子电路中应用颇多, 本节对二极管作专门介绍。

1.2.1 基本结构、种类与符号

1. 结构与符号

二极管的结构主要可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管如图 1-10(a)所示, 它由一根很细的金属丝与半导体的表面相接触, 经过特殊工艺在接触点上形成 PN 结。其特点是 PN 结的面积小, 极间电容小, 但不能承受高的反向电压和大电流。它的高频性能好, 适用于高频检波和数字电路中的开关及小电流整流。例如, 2AP1 点接触型二极管, 其最大整流电流为 16mA, 最高工作频率可达 150MHz。

面接触型二极管如图 1-10(b)所示。它的 PN 结采用合金法或扩散法制成。PN 结面积大, 可承受较大的电流, 但极间电容也大, 工作频率受到影响。面接触型二极管适用于低频和大功率整流。例如, 2CP1 为面接触型二极管, 最大整流电流可达 400mA, 而最高工作频率只有 3kHz。

半导体二极管的电路符号标志如图 1-11 所示。

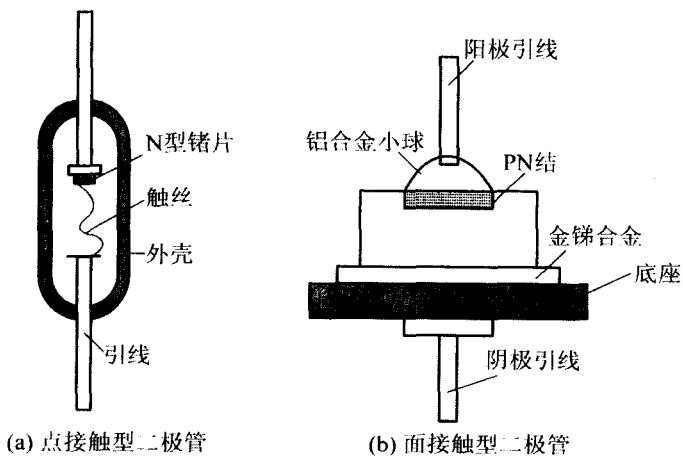


图 1-10 二极管的不同结构



图 1-11 二极管符号

2. 分类

讨论二极管的分类可以从以下几个不同角度进行。

按照二极管的结构分,可分为点接触型和面接触型两大类。

按照二极管的材料,可分为硅二极管和锗二极管。

按照二极管的用途,则可分为普通二极管、整流二极管、稳压二极管、光电二极管及变容二极管等。

1.2.2 伏安特性

半导体二极管的伏安特性指的是流过二极管的电流与二极管两端电压的关系曲线。这一关系曲线如图 1-12 所示,可分为三部分进行分析。

(1) 正向特性: 对应于图 1-12 曲线的第①段, 为二极管伏安特性的正向特性部分。

这时加在二极管两端的电压不大, 从数值上看, 只有零点几伏, 但此时流过二极管的电流却较大, 即此时二极管呈现的正向电阻较小。一般硅管正向导通压降约为 $0.6\sim 0.7\text{V}$, 锗管约为 $0.2\sim 0.3\text{V}$ 。

但是, 在正向特性的起始部分, 即开始加在二极管两端的外加电压较小时, 外电场还不足以克服 PN 结的内电场, 这时的正向电流几乎为零, 二极管仍然呈现较大的电阻, 好像有一个门槛。只有当外加电压超过某一电压后, 正向电流才显著增加。这个一定数值的电压就称为门槛电压, 或死区电压, 记作 U_{TH} 。硅管的死区电压约为 0.5V , 锗管的死区电压约为 0.1V 。

(2) 反向特性: 对应于图 1-12 曲线的第②段, 是当二极管加反向电压时的情况。

当外加反向电压时, 由于少数载流子的漂移, 可以形成反向饱和电流, 又由于少子的数目少, 因此反向电流很小, 用 I_{S} 表示。另一方面, 硅管的反向电流比锗管小得多。如果温度升高, 少数数目增多, 反向电流增大。

(3) 反向击穿特性: 对应于特性曲线的第③段。

当作用在二极管的反向电压高达某一数值后, 反向电流会剧增, 而使二极管失去单向导电性, 这种现象称为击穿, 所对应的电压称为击穿电压。二极管的反向击穿, 亦即 PN