

21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

模拟电子技术 教程 (第3版)

余辉晴 主编 吴雪芬 王其红 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

模拟电子技术 教程 (第3版)

余辉晴 主编 吴雪芬 王其红 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书从模拟电子技术的应用角度出发,系统地介绍半导体器件、基本放大电路、多级放大电路、集成运算放大电路、集成运算放大器的应用、负反馈放大电路、信号产生电路、功率放大电路、直流稳压电路、模拟电路设计和 Multisim 11 在模拟电路分析中的应用等内容。

本书可作为高等院校“模拟电路”课程(60~80学时)的教材,适用于电子科学与技术、电子信息工程、电气工程与自动化、计算机科学与技术等电子信息类专业,也可供其他相关专业选用和工程技术人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术教程/余辉晴主编.—3版.—北京:电子工业出版社,2014.7

21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材

ISBN 978-7-121-23513-9

I. ①模… II. ①余… III. ①模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第125595号

责任编辑:张 剑(zhang@phei.com.cn)

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:北京市李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:18 字数:461千字

版 次:2006年6月第1版

2014年7月第3版

印 次:2014年7月第1次印刷

印 数:3000册 定价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

编委会名单

主任委员：过 军

副主任委员：张建生 堵 俊 范剑波 吴晓渊 邬正义

潘 毅 华容茂

委 员：(以姓氏笔画为序)

万国庆 王其红 冯泽民 史建平 左全生

何一鸣 余辉晴 吴志祥 吴建国 吴 晓

吴雪芬 张立臣 杨 奕 羌予践 肖闽进

陆国平 陈丽兰 荣大龙 徐 维 蒋渭忠

鲍吉龙

序 言

随着世界经济一体化的进程,我国已成为世界最大的加工基地和制造基地,尤其是长江三角洲地区更为突出,已有近百家名列世界 500 强的企业落户该地区,带动了该地区经济突飞猛进的发展,同时也为就业创造了广阔的前景。企事业单位对应用型本科人才的需求多了,但要求也提高了。这就对工程教育的发展提出了新的挑战,同时也提供了新的发展机遇。

在此形势下,国家教育部近年来批准组建了一批以培养应用型本科人才为宗旨的高等院校,同时举办了多次“应用型本科人才培养模式研讨会”,对应用型本科教育的办学思想和发展定位进行初步探讨。并于 2002 年在全国高等院校教学研究中心立项,成立了 21 世纪中国高等学校应用型人才培养体系的创新与实践课题组,有十几所应用型本科院校参加了课题组的研究工作,取得了多项研究成果,并于 2004 年结题验收。我们就是在这种形势下,组织了多所应用型本科院校编写本系列教材,以适应国家对工程教育的新要求,满足培养素质高、能力强的应用型本科人才的需要。

工程强调知识的应用和综合,强调方案优缺点的比较并做出论证和合理应用。这就要求我们对应用型本科人才的培养需实施与之相配套的培养方案和培养模式,采用具有自身特点的教材。同时,避免重理论、轻实践、工程教育“学术化”的倾向;避免在工程实践能力的培养中,轻视学生个性及创新精神的培养;避免工程教育在实践中与社会经济、产业的发展脱节。为使我国应用型人才培养适应社会发展的新形势,我们必须开拓进取,努力改革。

组织编写本系列教材,有利于应用型人才培养所需要的,富有特色的本科教材的建设。本系列教材的编写原则如下。

1. 确保基础

在内容安排上,本系列教材确保学生掌握基本的理论基础,满足本科教学的基本要求。

2. 富有特色

围绕培养目标,以工程应用为背景,通过理论与实践相结合,构建应用型本科教育系列教材特色。在融会贯通本科教学内容的基础上,挑选最基本的内容、方法和典型应用,将有关技术进步的新成果、新应用纳入教学内容,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进;在保持本科教学基本体系的前提下,处理好与交叉学科的关系,并按新的教学系统重新组织;在注重理论与实践相结合的基础上,注入工程概念,包括质量、环境等诸多因素对工程的影响,突出特色,强化应用。

3. 精选编者,保证质量

参编院校根据编委会要求推荐了一批具有丰富工程实践经验和教学经验的教师参加编写工作。本系列教材的许多内容都是在优秀教案、讲义的基础上编写的,并由主编全文统稿,以确保教材质量。

本系列教材的编写得到了电子工业出版社的大力支持。他们为编好这套教材做了大量认真细致的工作,为教材的出版提供了许多有利条件,在此深表感谢!

编委会

前 言

电子技术是高等学校电子信息类专业的一门重要专业基础课,是学习其他相关课程的基础,模拟电路是电子技术的重要组成部分。为了进一步适应电子技术的发展和应用型本科教学要求,本书第3版除对原有章节进行修订外,还增加了第11章 Multisim 11 在模拟电路分析中的应用。

本书在内容安排上特别考虑了以下几点:

- (1) 将二极管、三极管、场效应管集中起来单独设一章;
- (2) 将集成电路的应用部分单独组成一章,增加了集成电路在书中的比重;
- (3) 将频率响应的内容分放在基本放大电路、多级放大电路中,重点加强频率失真和频率响应的概念,减少一些分析计算。

在教材编写过程中,我们注意精选内容,突出重点,加强了基本概念、基本原理、基本分析方法的论述,本教材有如下特点:

- (1) 为了便于教学,编写时强调从物理概念上把问题讲清楚;
- (2) 以分立元件电路为基础,以集成电路为重点;
- (3) 把基本概念、基本原理和基本分析方法讲深、讲透。

本教材是按60~80学时数编写的,根据教学需要可增删部分章节。模拟电路是在学完电路和高等数学后开设的一门专业基础课程,具有很强的实践性。为了加深对理论知识的理解,还必须开设一定的实验课,作为必要的补充。

本书由余辉晴担任主编,由吴雪芬、王其红担任副主编。第1~3章由吴雪芬编写,第4~5章由王其红编写,第6章由薛苏云编写,第7~11章由余辉晴编写,徐达文也参加了部分内容的编写工作。全书由余辉晴统稿。在本书的编写过程中,得到了宁波工程学院和常州工学院领导与老师的大力支持和帮助,同时参考了大量有关教材和资料,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 半导体器件	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 本征半导体及杂质半导体	1
1.1.2 PN 结	3
1.2 半导体二极管	5
1.2.1 二极管的结构	5
1.2.2 二极管的伏安特性	6
1.2.3 二极管的参数	9
1.3 半导体三极管	9
1.3.1 三极管的结构	10
1.3.2 三极管的工作原理	10
1.3.3 三极管的特性曲线	13
1.3.4 三极管的主要参数	14
1.4 场效应管.....	17
1.4.1 结型场效应管的结构和工作原理	17
1.4.2 结型场效应管的特性曲线和参数	18
1.4.3 增强型绝缘栅场效应管的结构和工作原理	20
1.4.4 增强型绝缘栅场效应管的特性曲线和参数	21
1.4.5 耗尽型绝缘栅场效应管的工作特点	23
本章小结	24
习题	25
第 2 章 基本放大电路	29
2.1 共发射极放大电路.....	29
2.1.1 电路组成和工作原理	29
2.1.2 工作点稳定的共发射极放大电路	31
2.2 放大电路的图解分析法.....	33
2.2.1 放大电路的静态图解分析.....	33
2.2.2 放大电路的动态图解分析.....	34
2.3 放大电路的微变等效电路分析法.....	38
2.3.1 三极管的微变等效电路	39
2.3.2 放大电路的微变等效电路.....	41
2.3.3 用微变等效电路法分析放大电路	41
2.4 共集电极放大电路和共基极放大电路.....	44

2.4.1	共集电极放大电路	44
2.4.2	共基极放大电路	47
2.5	场效应管放大电路	48
2.5.1	场效应管放大电路静态工作点分析	49
2.5.2	场效应管放大电路的微变等效电路分析法	50
2.5.3	三种基本放大电路性能比较	54
2.6	放大电路的频率响应	54
2.6.1	RC 电路的频率响应	55
2.6.2	放大电路的低频响应	58
2.6.3	放大电路的高频响应	59
	本章小结	65
	习题	65
第3章	多级放大电路	75
3.1	多级放大电路的级间耦合方式	75
3.2	多级放大电路的分析方法	78
3.3	多级放大电路的频率特性	81
3.3.1	多级放大电路的低频特性	81
3.3.2	多级放大电路的高频特性	82
	本章小结	83
	习题	83
第4章	集成运算放大电路	88
4.1	直接耦合放大器	88
4.1.1	直接耦合放大器的特点	88
4.1.2	零点漂移	90
4.2	差动放大电路	91
4.2.1	基本差动放大电路	91
4.2.2	长尾式差动放大电路	94
4.2.3	恒流源式差动放大电路	99
4.2.4	差动放大电路传输特性	100
4.3	集成运算放大器	102
4.3.1	集成电路概述	102
4.3.2	通用型集成运算放大器简介	108
	本章小结	110
	习题	110
第5章	集成运算放大器的应用	112
5.1	基本运算电路	112
5.1.1	比例运算电路	113
5.1.2	求和运算电路	115

5.1.3	微分与积分运算电路	118
5.1.4	对数与指数运算电路	120
5.2	有源滤波电路	121
5.2.1	低通滤波电路	122
5.2.2	高通滤波电路	123
5.2.3	带通和带阻滤波电路	125
5.3	电压比较器	126
5.3.1	过零比较器	126
5.3.2	电压比较器	127
5.3.3	施密特触发器	127
	本章小结	130
	习题	130
第6章	负反馈放大电路	135
6.1	反馈的基本概念与分类	135
6.1.1	反馈的基本概念	135
6.1.2	反馈的分类与判断	136
6.2	负反馈放大器的框图及一般表达式	141
6.2.1	负反馈放大器的框图	141
6.2.2	负反馈放大器的一般表达式	141
6.3	负反馈对放大器性能的影响	142
6.3.1	负反馈对放大倍数的影响	142
6.3.2	负反馈对通频带和失真的影响	144
6.3.3	负反馈对噪声的影响	147
6.3.4	负反馈对输入电阻和输出电阻的影响	148
6.4	负反馈放大器的4种组态	152
6.4.1	电压串联负反馈	152
6.4.2	电压并联负反馈	153
6.4.3	电流串联负反馈	154
6.4.4	电流并联负反馈	155
6.5	深度负反馈电压放大倍数的近似计算	159
6.5.1	利用关系式 $\dot{A}_f \approx \frac{1}{F}$ 估算闭环电压放大倍数	159
6.5.2	利用关系式 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ 估算闭环电压放大倍数	160
6.6	负反馈放大器的自激振荡及其消除方法	163
6.6.1	产生自激振荡的原因及条件	163
6.6.2	消除自激振荡的方法	165
	本章小结	167
	习题	168

第7章 信号产生电路	173
7.1 正弦波振荡电路	173
7.1.1 正弦波振荡产生的条件	173
7.1.2 RC 正弦波振荡器	174
7.1.3 LC 正弦波振荡器	175
7.1.4 石英晶体正弦波振荡器	178
7.2 非正弦波产生电路	180
7.2.1 矩形波产生电路	180
7.2.2 三角波产生电路	182
7.2.3 锯齿波产生电路	183
本章小结	184
习题	185
第8章 功率放大电路	187
8.1 功率放大电路的特点	187
8.2 甲类功率放大器	188
8.2.1 甲类功率放大器组成	188
8.2.2 甲类功率放大器分析	189
8.2.3 甲类功率放大器功率和效率计算	190
8.3 乙类互补对称功率放大器	190
8.3.1 乙类互补功率放大器组成	191
8.3.2 乙类互补功率放大器工作原理	191
8.3.3 乙类互补功率放大器分析计算	191
8.4 甲乙类互补对称功率放大器	195
8.4.1 甲乙类双电源互补对称功率放大器	195
8.4.2 甲乙类单电源互补对称功率放大器	197
8.4.3 具有自举功能的乙类功率放大器	198
本章小结	198
习题	199
第9章 直流稳压电路	200
9.1 整流电路	200
9.1.1 半波整流电路	200
9.1.2 单相全波整流电路	202
9.1.3 单相桥式整流电路	203
9.2 滤波电路	205
9.2.1 电容滤波电路	205
9.2.2 其他滤波电路	207
9.3 稳压电路	208
9.3.1 稳压管	208

9.3.2 并联型稳压电路	208
9.3.3 串联型稳压电路	210
本章小结	212
习题	212
第10章 模拟电路设计	215
10.1 阻容耦合单管放大电路设计	215
10.1.1 选择电路	215
10.1.2 确定参数	215
10.2 差动放大电路设计	216
10.2.1 选择电路	216
10.2.2 确定参数	216
10.3 正弦波振荡电路设计	217
10.3.1 选择电路	217
10.3.2 确定参数	218
10.4 稳压电路设计	218
10.4.1 选择电路	218
10.4.2 确定参数	218
10.5 由运算放大器组成的万用表的设计	219
10.5.1 直流电压表的设计	220
10.5.2 直流电流表的设计	220
10.5.3 交流电压表的设计	221
10.5.4 交流电流表的设计	221
10.5.5 欧姆表的设计	222
第11章 Multisim 11 在模拟电路分析中的应用	223
11.1 Multisim 11 系统简介	223
11.2 模拟电路的创建	225
11.3 三极管共发射极单管放大电路分析测试	231
11.3.1 放大器静态工作点的分析测试	231
11.3.2 放大电路动态指标的分析测试	232
11.3.3 放大电路的仿真分析	233
11.4 负反馈放大电路的分析测试	236
11.4.1 负反馈对放大电路性能的影响	236
11.4.2 放大电路反馈类型分析与检测	237
11.5 模拟运算电路分析与测试	239
11.5.1 反相比例运算放大电路的分析与测试	239
11.5.2 同相比例运算放大电路的分析与测试	240
11.5.3 反相加法电路的分析与测试	240
11.5.4 差动放大电路(减法器)的分析与测试	241

11.5.5	积分运算电路的分析与测试	241
11.5.6	微分运算电路的分析与测试	242
11.5.7	对数运算电路的分析与测试	243
11.6	波形产生电路的分析与测试	244
11.6.1	RC 桥式正弦波振荡电路的分析与测试	244
11.6.2	方波发生器的分析与测试	245
11.6.3	三角波/方波发生器的分析与测试	246
11.7	信号处理及有源滤波器的分析与测试	248
11.7.1	低通滤波器的分析与测试	248
11.7.2	高通滤波器的分析与测试	249
11.7.3	带通滤波器的分析与测试	250
11.7.4	带阻滤波器的分析与测试	251
11.8	低频功率放大器的分析与测试	252
11.8.1	低频功率放大器的分析	252
11.8.2	低频功率放大器的测试	254
自测题		256
参考文献		267
部分习题答案		268
自测题答案		274

第 1 章 半导体器件

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。本章首先介绍半导体的特性,阐明 PN 结的单向导电性,然后介绍半导体二极管、三极管及场效应管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

1.1 半导体基础知识

按导电性能的不同,自然界的物质可分为导体、绝缘体和半导体。目前用来制造电子器件的材料主要是半导体,其导电能力介于导体和绝缘体之间,常用的半导体有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。

1.1.1 本征半导体及杂质半导体

1. 本征半导体的结构

本征半导体就是完全纯净(不含任何杂质)且具有完整晶体结构的半导体。硅和锗是四价元素,在原子最外层轨道上的 4 个电子称为价电子,它们分别与周围的 4 个原子的价电子形成共价键,共价键中的价电子为这些原子所共有,并被它们所束缚,在空间形成排列有序的晶体。简化的原子结构模型如图 1-1 所示。本征半导体共价键晶体结构示意图如图 1-2 所示。

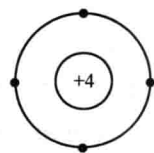


图 1-1 简化的原子结构模型

2. 电子空穴对

由于晶体中共价键结合力很强,当半导体处于 0 K 温度(相当于 -273°C)时,价电子的能量不足以挣脱共价键的束缚,晶体中没有自由电子,半导体不能导电,如同绝缘体一样。当温度升高或受到光照时,价电子能量增高,有的价电子可以挣脱原子核的束缚,而成为自由电子,在其原来的共价键中就出现了空位,原子的电中性被破坏,呈现出正电性,其正电量与自由电子的负电量相等,人们常称呈现正电性的这个空位为空穴,这一现象称为本征激发(也称热激发),如图 1-3 所示。本征半导体中因热激发而出现两种载流子,即自由电子和空穴。它们是成对出现的,故称为电子空穴对。受热激发而生成自由电子,可以在晶格间运动,当电子和空穴在运动过程中相遇时,电子填入空穴成为价电子,同时释放出相应的能量,从而消失一对电子、空穴,这一过程称为复合。本征激发和复合在一定温度下最终会达到动态平衡,使本征半导体中载流子的浓度一定,而整个半导体仍呈现为中性。理论分析表明,本征载流子的浓度为

$$n_i = p_i = K_1 T^{3/2} e^{-E_{\text{co}}/2kT} \quad (1-1)$$

式中, n_i 、 p_i 分别为自由电子和空穴的浓度 (cm^{-3}); T 为热力学温度 (K); E_{co} 为 $T=0\text{K}$ 时的禁带宽度(硅为 1.2eV , 锗为 0.78eV); k 为玻耳兹曼常数 ($8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K}$); K_1 是与半导体材

料有关的常量(硅为 $3.87 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$, 锗为 $1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \cdot \text{K}^{-3/2}$)。总之,本征半导体的导电性能很差,且与环境温度有关,当温度升高时,载流子浓度增加,导电性能较好。利用半导体材料对温度的敏感性,可以制作热敏器件,但也造成半导体器件温度稳定性变差。

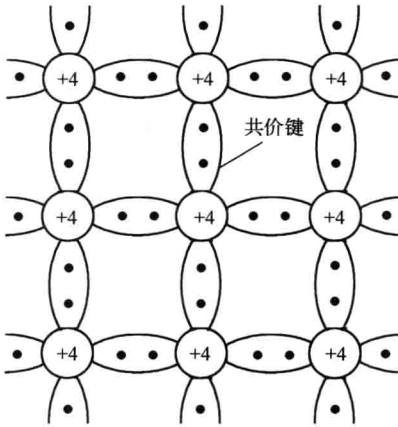


图 1-2 本征半导体共价键晶体结构示意图

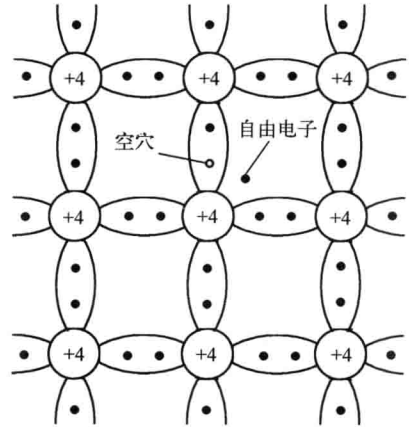


图 1-3 本征激发产生自由电子和空穴

3. 杂质半导体

在本征半导体中有选择地掺入某些微量元素作为杂质,可使半导体的导电性能发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素,掺入杂质的半导体称为杂质半导体,根据掺入的杂质不同,分为 N 型半导体和 P 型半导体两种。

1) **N 型半导体** 在本征半导体中掺入少量五价元素,如磷、砷、锑等,则可形成 N 型半导体,也称电子型半导体。

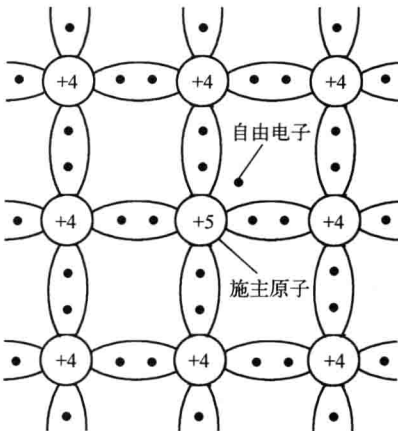


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

因五价杂质原子中只有 4 个价电子能与周围 4 个半导体原子中的价电子形成共价键,而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子,于是半导体中自由电子的数量急剧增加,使得自由电子的数目远远多于空穴的数目。因此,在 N 型半导体中自由电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流子(简称少子),主要依靠自由电子来导电,所以称为电子型半导体。

提供自由电子的五价杂质原子因带正电荷而成为正离子,因此五价杂质原子也称为施主原子。N 型半导体的结构示意图如图 1-4 所示。

2) **P 型半导体** 在本征半导体中掺入少量三价元素,如硼、镓、铟等,则可形成 P 型半导体,也称为空穴型半导体。

因三价杂质原子在与相邻 4 个硅原子组成共价键时,缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴。在这种杂质半导体中,空穴的浓度比自由电子的浓度高得多,是多数载流子,自由电子是少数载流子,它主要依靠空穴来导电,所以称为空穴型半导体或 P 型半导体。多数载流子空穴主要由掺杂而形成,而少数载流子自由电子由热激发形成。空穴很容易俘获自由电

子,使杂质原子成为负离子,三价杂质因而也称为受主杂质。P型半导体的结构示意图如图1-5所示。

由以上分析可知,本征半导体通过掺杂,可以大大改变半导体内载流子的浓度,并使一种载流子增多,而另一种载流子减少。对于多数载流子,其浓度可通过掺杂浓度来严格控制,而温度变化对其影响很小;对于少数载流子,主要由本征激发决定,当温度变化时,少数载流子浓度有明显变化。因此在杂质半导体中,多数载流子的浓度主要取决于掺入杂质的浓度;而少数载流子的浓度主要取决于温度。对于杂质半导体来说,无论是N型半导体还是P型半导体,从总体上看,仍然保持着电中性。

杂质半导体的应用非常广泛,实用的半导体器件都是由杂质半导体构成的。杂质半导体的导电能力与本征半导体的导电能力相比大大提高了,其导电性能取决于掺杂浓度,如在四价硅中掺入百万分之一的杂质硼后,导电能力将提高数十万倍。当然,提高导电能力不是最终目的,杂质半导体之所以具有很大的用途,是因为掺入不同性质、不同浓度的杂质,并使P型半导体和N型半导体采用不同的方式组合,就可以制造出品种繁多、用途各异的半导体器件。

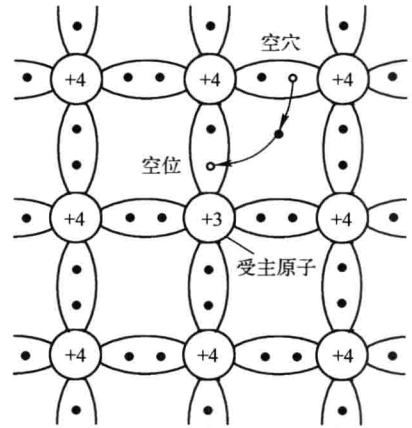


图1-5 P型半导体的结构示意图

1.1.2 PN结

将一块P型半导体与一块N型半导体通过特殊的工艺结合在一起时,在它们的交界面处就会形成一个很薄的特殊物理层,称之为PN结。PN结具有单一型半导体所没有的特性,利用该特性可以制造出各种半导体器件。

1. PN结的形成

PN结形成的过程包含两种运动。当P型半导体和N型半导体有机地结合在一起时,将在结合面上形成如下物理过程:由于交界处两侧载流子存在浓度差,导致P型区的多子——空穴,向N型区扩散,N型区的多子——自由电子,向P型区扩散,这种因浓度差而产生的定向运动称为多数载流子的扩散运动,如图1-6所示。

这样就在P区和N区分别留下了不能移动的受主负离子和施主正离子,结果在交界面的两侧形成了由等量正、负离子组成的空间电荷区,称之为PN结,如图1-7所示。空间电荷区将存在一个内电场,其方向由N区指向P区。因此内电场能阻止P区的空穴向N区扩散和N区的自由电子向P区扩散,即阻止多数载流子的扩散运动。同时,内电场将推动P区的自由电子流向N区和N区的空穴流向P区。少数载流子在内电场作用下产生的这种运动称为少数载流子的漂移运动。

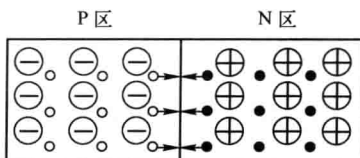


图1-6 多数载流子的扩散运动

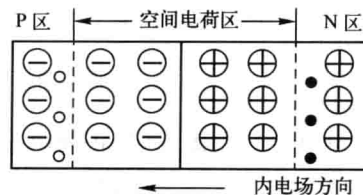


图1-7 PN结的形成

当 P 型半导体和 N 型半导体开始结合在一起时,扩散运动占优势,随着扩散运动的不断进行,界面两侧显露出的正、负离子逐渐增多,空间电荷区展宽,使内电场不断增强,于是漂移运动随之增强,而扩散运动相对减弱,最后扩散运动和漂移运动达到动态平衡。这时,虽然扩散和漂移仍在不断进行,但通过界面的净载流子数为零。平衡时,空间电荷区的宽度一定。在空间电荷区,由于缺少多子,所以也称为耗尽层。又因为空间电荷区的内电场对扩散有阻挡作用,好像壁垒一样,所以又称它为阻挡区或势垒区。

2. PN 结的单向导电特性

PN 结的单向导电性是指 PN 结在正向电压作用下导通,在反向电压作用下截止的现象。

当 PN 结上外加正向电压时,即 P 型半导体接高电位, N 型半导体接低电位,此时 PN 结呈低阻性,流过 PN 结的电流较大,处在这种连接方式下的 PN 结称为正向偏置,简称正偏。

当 PN 结上外加反向电压时,即 P 型半导体接低电位, N 型半导体接高电位,此时 PN 结呈高阻性,流过 PN 结的电流很小,处在这种连接方式下的 PN 结称为反向偏置,简称反偏。

1) **PN 结外加正向电压** PN 结外加正向电压或正向偏置的导电情况如图 1-8(a) 所示。此时外加电压形成的外电场与内电场方向相反,削弱了内电场,使阻挡层变窄。显然,扩散作用大于漂移作用,在电源作用下,多数载流子向对方区域扩散形成正向电流,其方向由电源正极通过 P 区、N 区到达电源负极。此时,PN 结处于导通状态,它所呈现出的电阻为正向电阻,其电阻值很小。正向电压越大,正向电流越大。

2) **PN 结外加反向电压** PN 结外加反向电压的情况如图 1-8(b) 所示。外加的反向电压有一部分降落在 PN 结上,其方向与 PN 结内电场方向相同,从而加强了内电场。内电场的加强阻碍了多数载流子扩散运动,却有利于少数载流子的漂移运动,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,所以反向偏置时的 PN 结呈高阻性。在一定的温度条件下,由本征激发决定的少数子浓度是一定的,故少数子形成的漂移电流是恒定的,基本上与所加反向电压的大小无关,这个电流也称为反向饱和电流。

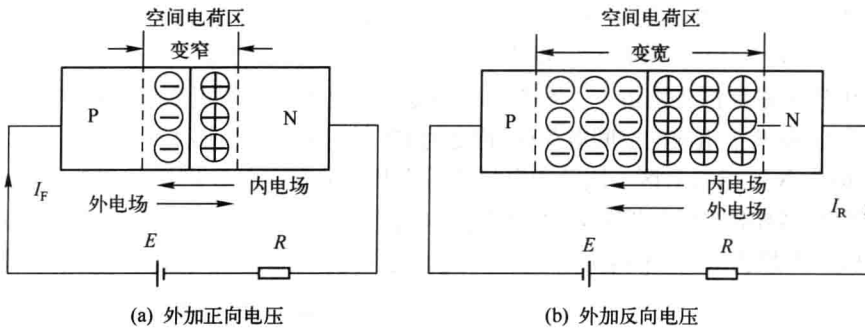


图 1-8 PN 结单向导电特性

总之,PN 结外加正向电压时,正向电阻减小,正向电流较大,处于导通状态;PN 结外加反向电压时,反向电阻很大,反向电流很小,处于截止状态。PN 结的这种特性称为单向导电性,它是 PN 结最重要的特性。

3. PN 结的电容效应

PN 结具有一定的电容效应,称为结电容(C_J),其数值较小,在中低频时可视为开路,但在高频下它的影响不可忽视,它可造成反向漏电,破坏单向导电性。

结电容由两种电容组成,即势垒电容 C_B 和扩散电容 C_D , $C_J = C_B + C_D$ 。

1) 势垒电容 C_B 势垒电容是由空间电荷区的离子薄层形成的。当外加电压使 PN 结上电压降发生变化时,离子薄层的厚度也相应地随之改变,这时 PN 结中存储的电荷量也随之变化。PN 结变薄时存储的电荷量减少,PN 结变厚时存储的电荷量增加,这种现象与电容的充/放电类似。空间电荷区厚薄变化所等效的电容称为势垒电容 C_B ,其数值约为数皮法至一二百皮法。

2) 扩散电容 C_D 扩散电容是由多子作扩散运动时的积累所形成的电容效应。正偏时,由 P 区扩散到 N 区的空穴(多子)不可能同时与自由电子全部复合,尚未来得及复合的空穴与 P 区中的少子(自由电子)、N 区中的部分多子(自由电子)分别组成点电容,所有点电容的集合称为扩散电容。 C_D 的数值约为十几皮法至数千皮法。

PN 结正偏时,主要是扩散运动,所以结电容主要由 C_D 决定;而反偏时,阻挡层变厚,结电容主要由 C_B 决定。

1.2 半导体二极管

半导体二极管的用途非常广泛,根据用途可分为整流管、检波管和开关管等,它们的工作原理基本上是相同的,都是基于 PN 结的单向导电性。

1.2.1 二极管的结构

在一个 PN 结上加上电极引线和管壳封装,就构成一个半导体二极管。二极管有两根电极引线,由 P 区引出的电极为阳极(或正极),由 N 区引出的电极为阴极(或负极),常见的外形如图 1-9 所示。

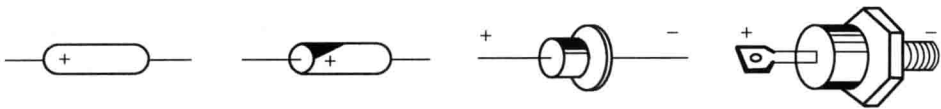


图 1-9 二极管的外形图

二极管按结构可分为点接触型、面接触型两大类。二极管的结构示意图和电路图形符号如图 1-10 所示。

1) 点接触型二极管 这类二极管的 PN 结是用电形成法制造的,用 1 根很细的含有三价元素的金属触丝与 1 块 N 型半导体的表面接触,然后在正方向上通过很大的瞬时电流(约为数安培),使触丝尖端被加热熔化,三价元素渗入到 N 型半导体中,触丝下面的那部分 N 型半导体变成 P 型,从而形成一个 PN 结。点接触型二极管的 PN 结面积很小,所以不能通过较大的电流;但其结电容很小,所以适于做高频检波和脉冲数字电路里的开关元件。其结构示意图如图 1-10(a)所示。

2) 面接触型二极管 面接触型二极管的 PN 结是用合金法或扩散法制成的,结构如图 1-10(b)所示。其 PN 结面积大,可承受较大的电流,适用于整流电路;但其结电容也大,不宜用于高频电路。图 1-10(c)所示的是硅工艺平面型二极管的结构图,是集成电路中常见的