



21世纪

高等学校本科电子电气专业系列实用教材

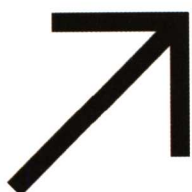
电子技术基础教程

何一鸣 主编

王 燚 郭国林 副主编

华容茂 主审

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



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

内 容 简 介

本书针对应用型本科院校工科非电类专业的师生,介绍了半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源、晶闸管及其应用、逻辑代数与逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路、数/模(D/A)转换和模/数(A/D)转换、存储器等内容。

本书是以介绍应用知识为主的实践性教材,突出实用性和工程适用性,既能作为工程技术人员的参考书,也能作为应用型本科院校和高职高专学校相关专业的教材。

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

电子技术基础教程/何一鸣主编. —北京:电子工业出版社,2006.6

(21世纪高等学校本科电子电气专业系列实用教材)

ISBN 7-121-02675-9

I. 电… II. 何… III. 电子技术—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 060061 号

责任编辑:刘继红

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:17.25 字数:441.6 千字

印 次:2006 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5000 册 定价:24.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,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。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

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五百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,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

本书是根据国家教委高教司制定的电子技术课程教学基本要求,由以培养应用型人才为主要目的的高等院校从事电类和非电类专业电子技术课程教学的老师编写的。

面对电子技术日新月异的发展,为了适应我国现代化建设事业的发展需要,在工科院校,无论电类专业还是非电类专业对电子技术教学,在课程体系、教学内容、教学模式等各方面的改革都在深入进行。作者用多年从事电子技术教学及参与教育教学研究和实践的一些经验,编写了这本教材。

本书具有以下特色。

(1) 本书内容以工科非电类专业的教学要求为主,适当涵盖管理类、农、林、医等对电子技术有教学要求的专业。

(2) 着重介绍电子技术领域的基础知识、基本理论、基本技能训练的同时,注意吸收新知识、新器件相关内容。

(3) 电子技术的研究与应用日益广泛、深入,但电子技术基础作为一门技术基础课,对于非电类专业有提高综合素质的作用,必须精选内容,重点放在应用。

(4) 对分立元件电路的介绍,主要为培养学生看图、识图、分析原理的思路与方法,在电子电路中尤以中小规模集成电路为主,以外特性为主。

本教材按课程总学时约 72 学时(包括 8~10 个实验课时)安排,教学中要注意各个教学环节的配合,必须切实安排好习题课与实验课,这对于培养应用型人才尤为重要。

本书由何一鸣任主编,王焱、郭国林任副主编,第 1、2、3 章由王焱编写,第 4、5 章由李青龙编写,第 6、7、8 章由郭国林编写,第 9、10 章由易风编写。全书由何一鸣统稿,做了很多重要的修改与补充。华容茂审阅了全部书稿并提出了很多宝贵意见。华路纲为本书的编辑、录入做了大量工作。张立臣对本教材的编写给予了很多指导,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加上时间仓促,书中疏漏之处在所难免,恳请使用本书的老师 and 同学批评指正。

编 著 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	1
1.1.2 杂质半导体	2
1.2 半导体二极管	4
1.2.1 PN 结	4
1.2.2 半导体二极管	5
1.3 双极型三极管	11
1.3.1 三极管的结构和类型	11
1.3.2 三极管的放大作用	12
1.3.3 三极管的特性曲线	14
1.3.4 三极管的特性和参数受温度的影响	18
1.3.5 三极管的主要参数	18
1.4 场效应管	20
1.4.1 结型场效应管	20
1.4.2 绝缘栅型场效应管	23
1.4.3 场效应管的主要参数	27
小结	28
习题	29
第 2 章 放大电路概述	32
2.1 放大电路的主要技术指标	32
2.2 晶体管放大电路的组成和工作原理	34
2.2.1 基本放大电路的电路组成	34
2.2.2 基本放大电路的工作原理	35
2.3 晶体管放大电路的状态分析	35
2.3.1 放大电路的两种工作状态	35
2.3.2 图解法	37
2.4 共发射极放大电路	41
2.4.1 双极型三极管的微变等效模型	42
2.4.2 放大电路的微变等效电路	43
2.4.3 放大电路主要技术指标的微变等效电路法求解	43
2.4.4 发射极接入电阻的单管共射放大电路	45
2.4.5 分压式偏置放大电路	46
2.5 共集电极放大电路	49
2.5.1 共集电极放大电路的电路组成	49

2.5.2 共集电极放大电路的静态分析和动态分析	49
2.6 场效应管放大电路	52
2.6.1 基本共源极放大电路	52
2.6.2 分压-自偏压式共源极放大电路	55
2.6.3 共漏极放大电路	56
小结	58
习题	59
第3章 集成运算放大器	63
3.1 差分放大电路	63
3.1.1 基本式差分放大电路	63
3.1.2 长尾式差分放大电路	66
3.1.3 具有恒流源的差分放大电路	69
3.1.4 差分放大电路的输入/输出方式	71
3.2 集成运算放大器	75
3.2.1 集成运算放大器的结构组成	75
3.2.2 集成运放的主要技术指标和电压传输特性	77
3.3 集成运放在信号运算方面的应用	80
3.3.1 比例运算电路	80
3.3.2 加减法运算电路	82
3.3.3 积分、微分运算电路	84
3.4 集成运放在信号处理方面的应用	85
3.4.1 有源滤波器	85
3.4.2 电压比较器	88
3.5 集成运放在信号产生方面的应用	92
3.5.1 正弦波振荡电路	92
3.5.2 非正弦波发生电路	98
3.6 功率放大电路	100
3.6.1 功率放大电路的特点和分类	100
3.6.2 互补对称功率放大电路	100
小结	102
习题	103
第4章 直流稳压电源	107
4.1 整流与滤波	107
4.1.1 整流电路	107
4.1.2 滤波电路	113
4.2 线性集成稳压器	117
4.2.1 硅稳压管稳压电路	117
4.2.2 串联型稳压电路	118
4.2.3 集成稳压器	120
4.3 开关型稳压电源	122
小结	124
习题	125
第5章 晶闸管及其应用	127

5.1	晶闸管的结构和伏安特性	127
5.1.1	晶闸管的结构	127
5.1.2	晶闸管的工作原理	128
5.1.3	晶闸管的伏安特性	129
5.1.4	晶闸管的主要参数	130
5.2	晶闸管的整流电路	133
5.2.1	单相半波可控整流电路	133
5.2.2	单相半控桥式整流电路	136
5.3	晶闸管的触发与调功电路	138
5.3.1	单结晶体管的结构和伏安特性	139
5.3.2	单结晶体管振荡电路	140
5.3.3	单结晶体管触发电路	143
5.4	功率开关电路	145
5.4.1	晶闸管直流开关电路	145
5.4.2	晶闸管交流开关电路	145
5.4.3	应用实例	146
小结		147
习题		148
第6章	逻辑代数与逻辑门电路	150
6.1	数字逻辑基础	150
6.1.1	基本逻辑运算	150
6.1.2	复合逻辑运算	152
6.1.3	逻辑代数的基本定律和规则	154
6.1.4	逻辑函数及其表示方法	157
6.1.5	逻辑函数的标准形式	158
6.2	逻辑函数的化简	160
6.2.1	公式化简法(代数法)	160
6.2.2	图解法(卡诺图法)	161
6.3	逻辑门电路及其应用	165
6.3.1	晶体管的开关特性	166
6.3.2	基本逻辑门	169
6.4	典型集成门的结构与特性	171
6.4.1	TTL 门电路	171
6.4.2	MOS 逻辑门	176
小结		180
习题		180
第7章	组合逻辑电路	183
7.1	组合逻辑电路的分析	183
7.2	组合逻辑电路的设计	185
7.3	常用中规模组合逻辑部件的原理和应用	188
7.3.1	半加器和全加器	188
7.3.2	编码器	190
7.3.3	译码器	194

7.3.4	数据选择器	199
7.3.5	数值比较器	201
7.4	组合逻辑电路的竞争冒险	204
7.4.1	冒险的类型	204
7.4.2	冒险的判别方法	205
小结		207
习题		207
第8章	触发器及时序逻辑电路	211
8.1	基本触发器	211
8.2	钟控触发器	212
8.3	触发器功能的转换	216
8.4	寄存器	218
8.4.1	数码寄存器	218
8.4.2	移位寄存器	218
8.5	计数器	219
8.5.1	二进制计数器	219
8.5.2	十进制计数器	221
8.6	555 定时器及其应用	222
8.6.1	555 定时器的电路结构	222
8.6.2	555 定时器应用举例	223
8.7	时序逻辑电路的应用	226
8.7.1	智力竞赛抢答器	226
8.7.2	多功能数字钟	226
8.7.3	优先裁决电路	227
8.7.4	彩灯控制器	228
小结		229
习题		229
第9章	数/模(D/A)转换和模/数(A/D)转换	234
9.1	数/模转换(D/A转换器)	234
9.1.1	D/A转换器的基本原理	234
9.1.2	D/A转换器的电路	235
9.1.3	D/A转换器的主要性能指标	238
9.2	模/数转换(A/D转换器)	239
9.2.1	A/D转换器的基本原理	239
9.2.2	A/D转换器的电路	242
9.2.3	A/D转换器的主要技术指标	246
小结		247
习题		247
第10章	存储器	248
10.1	随机存取存储器(RAM)	248
10.1.1	RAM的结构	248
10.1.2	RAM的地址译码方式	249

10.1.3	RAM 的存储单元	251
10.1.4	RAM 的扩展	252
10.2	只读存储器	253
10.2.1	固定只读存储器	254
10.2.2	可编程只读存储器	255
10.2.3	可擦除的可编程存储器	256
10.3	可编程逻辑阵列(PLA)	257
10.3.1	PLA 的结构与工作原理	257
10.3.2	用 PLA 实现组合逻辑电路	258
10.3.3	用 PLA 实现时序逻辑电路	259
小结		261
习题		261
部分习题参考答案		262
参考文献		264

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,由于它体积小、重量轻、功耗小且使用寿命长,因此得到了广泛的应用。本章在简要介绍了半导体的基础知识之后,介绍了半导体二极管的结构、特性与参数,然后介绍了半导体三极管和场效应管的基本结构、分类、工作特性、主要参数及应用,对常用半导体器件重点强调其外特性,注重应用。

1.1 半导体基础知识

自然界中有各种各样的物质,根据导电性能不同,可分为导体、半导体和绝缘体。导体是很容易导电的物质,如金、银、铜、铁等金属物质;绝缘体是不容易导电的物质,如玻璃、橡胶、塑料、陶瓷等;导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,如硅、锗、硒等。半导体具有热敏性、光敏性,且体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高。半导体掺入某些杂质又可使其导电性能改变,这些特点使半导体材料在电子器件的制造中得到了广泛的应用。

1.1.1 本征半导体

纯净、不含杂质且以晶体结构存在的半导体称为本征半导体。物质的结构决定了它的导电性能。在原子结构中,原子最外层轨道上的电子称为价电子。常用的半导体材料有硅(Si)和锗(Ge)两类,其中硅的原子序数是14,锗的原子序数是32,但两者最外层轨道上的电子数都为4,即价电子数都为4。

导体之所以容易导电,是因为其价电子受原子核的束缚力很小,很容易挣脱原子核的束缚成为自由电子。这些自由电子在外电场作用下产生定向运动,形成电流。绝缘材料由于最外层电子受原子核的束缚力很强,不易挣脱原子核的束缚成为自由电子,故其导电性能很差。在半导体材料中,原子核对最外层电子的束缚力介于导体和绝缘体之间,故半导体的导电特性介于二者之间。

在硅或锗的单晶中,原子按一定间隔排列成有规律的空间点阵,称为晶格。其价电子不仅受到自身原子核的束缚,还受到相邻原子核的吸引,在两种力的作用下,价电子一方面围绕自身的原子核运动,另一方面又将出现在相邻原子核的轨道上。这样每个价电子就为相邻两个原子共有,两个相邻原子共用一对价电子,由这一对共用价电子形成共价键。图1.1.1所示为共价键的结构示意图。单晶硅或锗依靠共价键有很强的结合力使每个原子与相邻的4个原子紧密结合,规则排列,形成晶体。

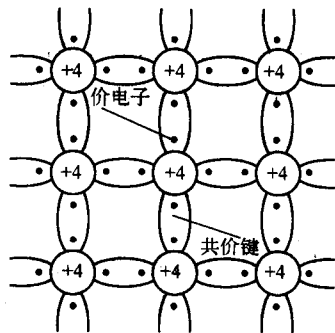


图 1.1.1 本征半导体的晶体结构示意图

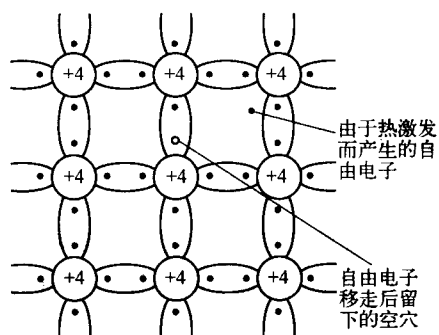


图 1.1.2 本征半导体中的自由电子和空穴

每个原子的 4 个价电子分别与相邻 4 个原子中的价电子形成稳定的共价键后,每个原子核最外层等效有 8 个价电子。在 $T=0\text{ K}$,即 -273°C 时,共价键中的价电子不足以挣脱原子核和共价键的束缚,因此本征半导体中无自由电子,所有价电子均为束缚电子,本征半导体不能导电,相当于绝缘体。在一定的光照、温度条件下,本征半导体中的一些价电子受外界激发获得足够的能量,挣脱共价键的束缚,成为自由电子,同时在共价键中留下一个空位,我们把这类空位称为空穴,如图 1.1.2 所示。邻近的价电

子有可能被吸引过来填补这一空穴,同时也产生了新的空穴。其他原子中的电子又可能进入这一新空穴中,从而又产生新的空穴。这一过程既是电子填补空穴的运动,又可以看作是空穴从原位置移到了新位置的运动,空穴的运动方向与价电子的运动方向相反。

由于空穴是在价电子挣脱共价键束缚形成自由电子的同时形成的,因此自由电子和空穴是一一对应的,两者都是可以自由移动的带电粒子。自由电子带负电荷,空穴带正电荷。因此在本征半导体中,存在两种载流子,即自由电子与空穴。众所周知,导体中只有自由电子一种导电物质,而半导体中存在着自由电子和空穴两种载流子。空穴的出现正是半导体区别于导体的重要特征。本征半导体中,自由电子与空穴总是成对出现,称为电子—空穴对,两者的数目或浓度总是相等的,即

$$n_i = p_i$$

其中, n_i 表示本征半导体中自由电子的浓度, p_i 表示本征半导体中空穴的浓度。

温度一定时,本征半导体中的自由电子和空穴不断产生,并不断复合(即自由电子和空穴相遇后使电子—空穴对消失)。最终产生和复合的运动达到动态平衡,使本征半导体中的自由电子和空穴的浓度一定。

本征半导体的导电性能取决于两种载流子的浓度。常温下,自由电子和空穴很少,因此本征半导体的导电能力很弱,接近于绝缘体。当外界温度升高时,本征半导体被热激发,产生的电子—空穴对数目逐渐增加,基本上按指数规律增加,其导电性能也得到提高。这说明半导体载流子浓度对温度十分敏感,即半导体的热敏性。对于硅材料,大约温度每升高 8°C ,本征载流子浓度增加 1 倍;对于锗材料,大约温度每升高 12°C ,本征载流子浓度增加 1 倍。显然,温度是影响本征半导体导电性能的一个重要因素。另外,光照对本征半导体导电性能也产生很大影响,即半导体的光敏性。当然,本征半导体中载流子的浓度还与自身的结构有关,也可通过改变本征半导体的内部结构来增强其导电性能。

1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力很差。采用扩散工艺在本征半导体中掺入少量杂质元素,可改变载流子的浓度,从而改善半导体的导电性能,由此得到的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的性质不同,杂质半导体主要分为 N 型半导体(电子半导体)和 P 型半导体(空穴半导体)两类。

1. N型半导体

在本征半导体硅中掺入少量5价元素,如磷、锑、砷等,此处以磷为例。由于磷原子的最外层有5个价电子,其中4个价电子与周围4个硅原子中的价电子组成共价键,剩余的1个价电子只受自身原子核的束缚,而不受共价键的束缚。自身原子核对它的束缚力比共价键的束缚力小得多,故在常温下,该类价电子较共价键中的价电子更容易成为自由电子,如图1.1.3所示。而留下带正电的杂质离子,由于杂质离子不能自由移动,因此不能参与导电。共价键中的价电子只有少数在常温下获得足够的能量,挣脱共价键的束缚形成自由电子,同时伴随产生空穴。显然,在N型半导体中,自由电子的浓度远远大于空穴的浓度,即

$$n > p$$

其中, n 表示N型半导体中自由电子的浓度, p 表示N型半导体中空穴的浓度。N型半导体主要依靠自由电子导电,故也称电子半导体。

N型半导体的载流子中多数为自由电子,少数为空穴。自由电子简称多子;空穴为少数载流子,简称少子。N型半导体中的杂质原子提供自由电子,故被称为施主原子。

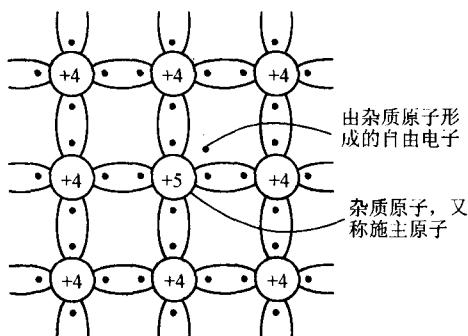


图 1.1.3 N型半导体的结构示意图

2. P型半导体

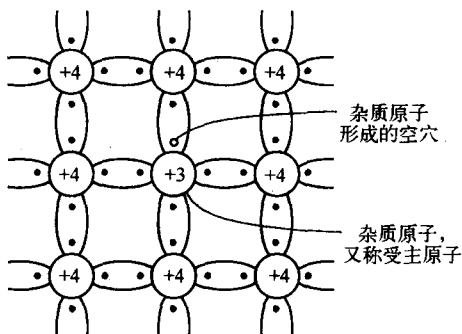


图 1.1.4 P型半导体的结构示意图

在硅(或锗)晶体中掺入少量3价元素(如硼、铝等),晶体中的少量本质原子被杂质原子取代。由于杂质原子最外层只有3个价电子,它与周围硅原子组成共价键时将会缺少一个电子而产生一个空位,相邻共价键上的电子就有可能填补这个空位,杂质原子为不能移动的负离子,而本质硅原子中的某个共价键则因缺少一个价电子而形成了空穴,如图1.1.4所示。另外,常温下本质晶体中仍会产生少量的电子—空穴对,可以看出,在P型半导体中空穴的浓度远远大于自由电子的浓度,即

$$p > n$$

其中, n 表示P型半导体中自由电子的浓度, p 表示P型半导体中空穴的浓度。可见,P型半导体中的多数载流子为空穴,少数载流子为自由电子,其中的杂质原子因能接受电子而被称为受主原子。这类杂质半导体主要依靠空穴导电,故也称为空穴半导体。

总之,不论是N型半导体还是P型半导体,杂质半导体中多数载流子的浓度都主要取决于掺入的杂质浓度,掺入杂质越多,则多数载流子的浓度越大。少数载流子的浓度则与温度密切相关,温度越高,则少数载流子的浓度越大。杂质半导体是在本征半导体的基础上掺入杂质形成的,掺入杂质后使半导体的导电性能大大提高,但是两类杂质半导体整体上总是保持着电中性。

1.2 半导体二极管

在工程应用中的半导体二极管是利用 P 型、N 型半导体有机结合构成的。

1.2.1 PN 结

1. PN 结的形成

在同一块半导体基片的两边掺入不同的杂质分别形成 N 型半导体和 P 型半导体。N 型半导体中,自由电子多、空穴少;P 型半导体中,空穴多、自由电子少。根据物质的扩散原理,在界面处,两种载流子由于浓度不同将会产生扩散运动,如图 1.2.1(a)所示。N 型半导体中的自由电子向 P 型半导体一侧扩散,扩散过程中与 P 型半导体中的空穴复合。P 型半导体中的空穴向 N 型半导体一侧扩散,并与 N 型半导体中的自由电子复合,从而在界面处形成由不可移动的正、负离子组成的空间电荷区,如图 1.2.1(b)所示。我们将这一空间电荷区称为 PN 结。

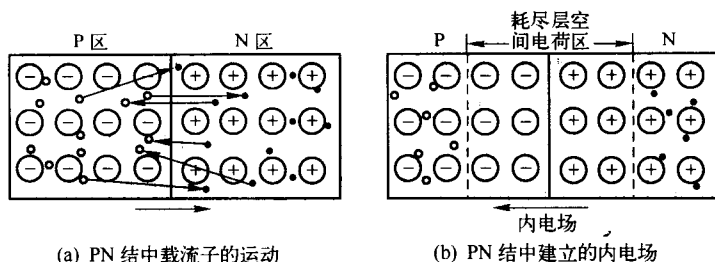


图 1.2.1 PN 结的形成

由于空间电荷区中已经没有可移动的多数载流子,故也称耗尽层。我们知道 N 型半导体和 P 型半导体如果不放到一起的话,它们各自都应该保持电中性。两者相遇后,由于扩散、复合的作用使 PN 结中靠近 P 型半导体一端只剩下负离子,靠近 N 型半导体一端只剩下正离子,因此在界面两侧形成了一个电场,其方向由 N 型半导体指向 P 型半导体,如图 1.2.1(b)所示,称为内电场。空间电荷区两侧的电位差称为电位壁垒,用 U_D 表示。内电场虽然是由多子的扩散运动形成的,但根据它的方向可以知道,内电场阻碍着两种多子的扩散运动,空间电荷区由此又被称为阻挡层。

另外,内电场对于两侧杂质半导体中的少子,即 P 型半导体中的自由电子和 N 型半导体中的空穴起到推动作用。我们将少子的这种运动称为漂移运动,内电场越强,少子的漂移运动越强,空间电荷区越窄,而与之相反的多子的扩散运动将使空间电荷区变宽。这两种相反的运动最终将达到动态平衡,从而使空间电荷区的宽度基本保持不变。空间电荷区通常较薄,宽度在几微米到几十微米之间。对于硅材料, U_D 约为 0.6~0.8 V, 锗材料 U_D 约为 0.1~0.3 V。由扩散运动产生的电流称为扩散电流,漂移运动产生的电流称为漂移电流,两者也将达到动态平衡,使这两种电流大小相等、方向相反。因此,PN 结中总电流为零。

2. PN 结的单向导电性

当 PN 结中 P 区接电源的正极, N 区接电源的负极时,如图 1.2.2 所示,我们将这样的电

压定义为正向电压,并称PN结正向偏置。此时外加电场的方向是由P区指向N区的,与内电场的方向刚好相反。外电场的加入将推动P区多子空穴向N区扩散,与空间电荷区的负离子中和,N区的多子电子向P区扩散,与空间电荷区的正离子中和,从而使空间电荷区变薄,如图1.2.2所示。这时,外电场起到了削弱内电场的作用,从而打破了原来的动态平衡,使多子的扩散运动加强,少子的漂移运动减弱。因此由扩散运动产生的扩散电流也远大于由漂移运动产生的漂移电流,而成为电路中的主导电流,我们定义该方向的电流为正向电流。由于正向电流由扩散运动产生,而扩散运动又是由多数载流子产生的,因此正向电流的数值较大,其方向由P区指向N区。PN结正向偏置时,由于空间电荷区较窄,对外呈现出较小的阻值,并有很大的电流产生,因此认为PN结处于正向导通状态。

将PN结中的N区接电源的正极,P区接电源的负极,如图1.2.3所示,这种连接方式称为PN结反向偏置。由图1.2.3可见,此时外电场方向与内电场方向一致,外电场将进一步阻碍P区中的多子向N区扩散,N区中的多子向P区扩散,使空间电荷区变宽。另外,外电场增强了内电场的作用,从而打破了原来的动态平衡,使多子的扩散运动进一步被抑制,少子的漂移运动加剧,因此,由漂移运动产生的漂移电流成为电路中的主导电流。由于漂移电流由少数载流子产生,因此数值很小,并且其方向由N区指向P区,与正向电流方向相反,故也称为反向电流。PN结反向偏置时,由于空间电荷区较宽,对外呈现出较大的阻值,并且反向漂移电流非常小,可忽略,故可认为PN结反向截止。

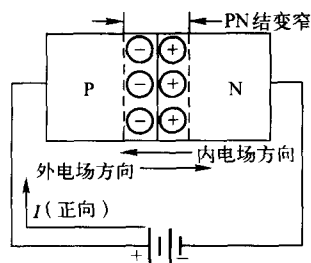


图 1.2.2 PN 结正向偏置

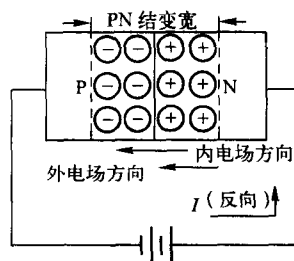


图 1.2.3 PN 结反向偏置

由于少数载流子是在一定环境温度下价电子获得能量挣脱共价键的束缚而产生的,其数量与温度密切相关。当环境温度一定时,少数载流子的数量一定,外加反向电压足够大就可以形成反向电流。换言之,即使将外加反向电压增大,反向电流的数值也不会变化,将趋于恒定,这一反向电流被称为反向饱和电流,用 I_S 表示。反向饱和电流 I_S 对温度非常敏感,温度上升时,反向饱和电流将急剧增大。

综上所述,PN结正向偏置时,正向电流很大,处于导通状态;PN结反向偏置时,反向电流很小,处于截止状态。因此可以得出结论,PN结具有单向导电特性。

1.2.2 半导体二极管

1. 半导体二极管的结构

将PN结用外壳封装起来,并加上相应的电极和导线就构成了半导体二极管。半导体二极管又称晶体二极管,简称二极管。二极管种类繁多,按功能可分为普通二极管、整流二极管、

稳压二极管、发光二极管、光电二极管；按材料可分为硅二极管和锗二极管；按照结构可分为点接触型二极管和面接触型二极管等。

点接触型二极管是由一根很细的金属触丝通过特殊工艺和一块半导体的表面相接触形成PN结,并对其引出电极引线,加以管壳密封而成的,具体结构如图1.2.4(a)所示。这类管子的PN结面积较小,不能承受高的反向电压和大电流,但由于极间电容很小,因此适用于高频检波和脉冲数字电路里的开关元件,以及用作小电流的整流管。

面接触型二极管又称面结型二极管,其结构如图1.2.4(b)所示。这种二极管采用合金法或扩散法工艺制成,PN结面积大,能够流过较大的电流,但由于其极间电容大,因此不宜用于高频电路中,只能在较低频率下工作,通常用作整流管。

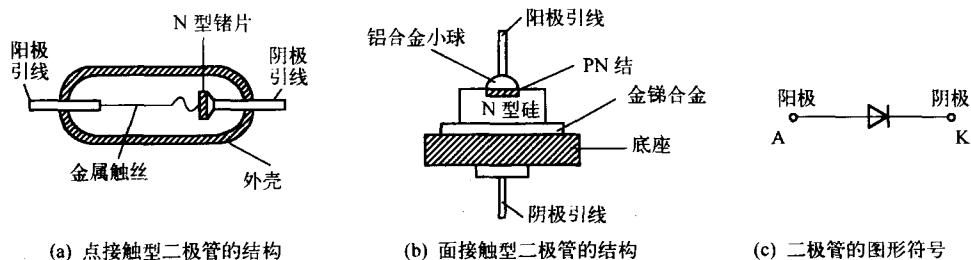


图 1.2.4 半导体二极管的结构及符号

二极管的图形符号如图1.2.4(c)所示,其中从P区引出的电极称为阳极(A),从N区引出的电极称为阴极(K)。

2. 半导体二极管的伏安特性

在二极管两端加上电压 U ,测出流过管子的电流 I ,该电流 I 随电压 U 变化的关系曲线被定义为二极管的伏安特性,即

$$I = f(U)$$

二极管的伏安特性曲线如图1.2.5所示。

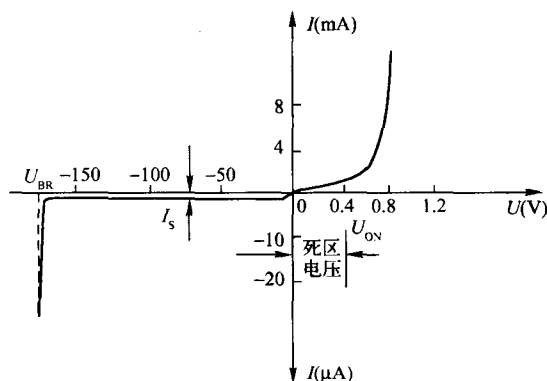


图 1.2.5 半导体二极管的伏安特性曲线

当二极管两端加上正向电压时,如果正向电压很低,则外电场不足以克服内电场的作用,

多子的扩散运动仍受到抑制,因此正向电流很小,几乎为零。正向电压高于某一数值 U_{ON} 后,外电场大大地削弱内电场,使多子的扩散运动加剧,正向电流才明显增大,我们将这一特殊的电压称为死区电压,也称为门限电压或导通电压,其大小与二极管的材料及所处环境的温度等有关。通常,硅二极管的死区电压约为 $0.5V$,锗二极管的死区电压约为 $0.2V$ 。

当二极管两端加上反向电压时,由于少子的漂移运动占主导地位,由此产生的反向电流数值很小,反向电流具有以下三大特点。

(1) 当环境温度上升时,反向电流迅速增大。

(2) 在一定温度下,当反向电压超过零点几伏时,该电流基本不变,达到饱和状态,称为反向饱和电流,用 I_S 表示。硅管的反向饱和电流为纳安(nA)数量级,锗管的反向饱和电流为微安(μA)数量级。

(3) 当反向电压增大到超过反向击穿电压 U_{BR} 时,反向电流将急剧增加。二极管被击穿,这时电压的微小变化会引起电流很大的变化,二极管表现出较好的恒压特性。二极管的击穿电压根据不同的型号,从几十伏到几千伏不等。击穿后,PN 结中反向电流很大,外加反向电压又很高,因此消耗在 PN 结上的功率很大。只要反向电压和反向电流的乘积不超过 PN 结的允许耗散功率,则加在二极管两端的反向电压降低后,管子仍可以恢复原状。如果 PN 结发热超过允许的耗散功率,由于热量不能散出去导致管子温度上升,管子温度的升高使反向电流增大,反向电流增大又使管子温度进一步升高,这时二极管中的电流和温升之间出现恶性循环,管子很快就会因过热而被烧毁。

PN 结内部载流子运动说明二极管具有单向导电性,正向偏置时,正向电流大,管子呈现导通状态;反向偏置且未击穿时,呈现很高的电阻,在电路中呈现截止状态。

图 1.2.5 所示的二极管的伏安特性定量地反映了二极管的单向导电性。该图中的横坐标为二极管两端所加的电压,纵坐标表示二极管中的电流。整个伏安特性分为两部分,第一象限中的伏安特性被称为二极管的正向特性,正向特性主要由死区和正向导通区两部分组成;第三象限中的伏安特性被称为二极管的反向特性,反向特性主要由反向饱和区和反向击穿区两部分组成。注意,第一象限中电流的单位为 mA,而第三象限中电流的单位仅为 μA ,说明正向电流远大于反向电流。

工程上用一个近似的数学表达式来描述上述伏安特性,即

$$I = I_S(e^{U/U_T} - 1) \quad (1.2.1)$$

式中, I_S 为反向饱和电流, U_T 为温度的电压当量,常温(300 K)下, $U_T \approx 26 \text{ mV}$ 。

式(1.2.1)又称为二极管方程,根据二极管方程,当二极管两端所加的电压大于零时,二极管正向偏置,其中的电流与电压近似呈指数关系;若所加电压小于零,二极管反向偏置,则 $I \approx -I_S$ 。

【例 1.2.1】 已知在图 1.2.6 中, $u_i = 10 \sin \omega t (V)$, $R = 1 \text{ k}\Omega$,试画出二极管的电流 i_D 、电压 u_D 及输出电压 u_o 的波形,设二极管的正向压降和反向电流可以忽略。

解: 输入电压为正半周且大于死区电压时,二极管正向偏置,处于导通状态,忽略二极管的正向管压降,输入电压全部加到负载电阻上,由该电路可得到

$$u_D = 0$$

$$u_o = u_i = 10 \sin \omega t (V)$$