

- 中国高等职业技术教育研究会推荐
- 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

模拟电子技术

主编 郑学峰

参编 方烈敏 劳五一

严佩敏 张 东

主审 周 雪



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

模拟电子技术

主编 郑学峰

参编 方烈敏 劳五一

严佩敏 张 东

主审 周 雪

西安电子科技大学出版社

2008

内 容 简 介

本书共分 11 章, 内容包括: 半导体二极管及其电路, 晶体三极管和场效应管, 放大电路基础, 负反馈放大电路, 集成运算放大电路及其应用, 信号产生电路, 高频谐振放大器, 振幅调制、解调与混频电路, 角度调制、解调电路, 直流稳压电源, ispPAC 可编程模拟器件及应用等。每章附有丰富的习题, 并提供习题参考答案, 以方便教学与实践。附录部分包括电阻器和电容器的标称值, 半导体分立器件型号命名法, 部分半导体分立器件型号和参数, 半导体集成电路型号命名法等。全书内容丰富、难易适度、重点突出, 方便教师组织教学。

本书可作为高职高专院校通信、电子、计算机及自动化类专业的专业基础课教材, 也可作为广播电视大学、职工大学等相关专业的教学参考书, 并可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

本书为授课教师免费提供电子教案, 需要者可从西安电子科技大学出版社网站下载, 网址为: <http://www.xduph.com>。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/郑学峰主编. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2008. 2

高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-1976-7

I. 模… II. 郑… III. 模拟电路—电子技术—高等学校: 技术学校—教材

IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 008354 号

策 划 薛媛

责任编辑 薛媛

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com> E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2008 年 2 月第 1 版 2008 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 16

字 数 373 千字

印 数 1~4000 册

定 价 23.00 元

ISBN 978-7-5606-1976-7/TN·0405

XDUP 2268001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

序

进入 21 世纪以来,高等职业教育呈现出快速发展的形势。高等职业教育的发展,丰富了高等教育的体系结构,突出了高等职业教育的类型特色,顺应了人民群众接受高等教育的强烈需求,为现代化建设培养了大量高素质技能型专门人才,对高等教育大众化作出了重要贡献。目前,高等职业教育在我国社会主义现代化建设事业中发挥着越来越重要的作用。

教育部 2006 年下发了《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》,其中提出了深化教育教学改革,重视内涵建设,促进“工学结合”人才培养模式改革,推进整体办学水平提升,形成结构合理、功能完善、质量优良、特色鲜明的高等职业教育体系的任务要求。

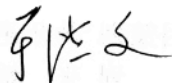
根据新的发展要求,高等职业院校积极与行业企业合作开发课程,根据技术领域和就业岗位群任职要求,参照相关职业资格标准,改革课程体系和教学内容,建立突出职业能力培养的课程标准,规范课程教学的基本要求,提高课程教学质量,不断更新教学内容,而实施具有工学结合特色的教材建设是推进高等职业教育改革发展的重要任务。

为配合教育部实施质量工程,解决当前高职高专精品教材不足的问题,西安电子科技大学出版社与中国高等职业技术教育研究会在前三轮联合策划、组织编写“计算机、通信电子、机电及汽车类专业”系列高职高专教材共 160 余种的基础上,又联合策划、组织编写了新一轮“计算机、通信、电子类”专业系列高职高专教材共 120 余种。这些教材的选题是在全国范围内近 30 所高职高专院校中,对教学计划和课程设置进行充分调研的基础上策划产生的。教材的编写采取在教育部精品专业或示范性专业的高职高专院校中公开招标的形式,以吸收尽可能多的优秀作者参与投标和编写。在此基础上,召开系列教材专家编委会,评审教材编写大纲,并对中标大纲提出修改、完善意见,确定主编、主审人选。该系列教材以满足职业岗位需求为目标,以培养学生的应用技能为着力点,在教材的编写中结合任务驱动、项目导向的教学方式,力求在新颖性、实用性、可读性三个方面有所突破,体现高职高专教材的特点。已出版的第一轮教材共 36 种,2001 年全部出齐,从使用情况看,比较适合高等职业院校的需要,普遍受到各学校的欢迎,一再重印,其中《互联网实用技术与网页制作》在短短两年多的时间里先后重印 6 次,并获教育部 2002 年普通高校优秀教材奖。第二轮教材共 60 余种,在 2004 年已全部出齐,有的教材出版一年多的时间里就重印 4 次,反映了市场对优秀专业教材的需求。前两轮教材中有十几种入选国家“十一五”规划教材。第三轮教材 2007 年 8 月之前全部出齐。本轮教材预计 2008 年全部出齐,相信也会成为系列精品教材。

教材建设是高职高专院校教学基本建设的一项重要工作。多年来,高职高专院校十分重视教材建设,组织教师参加教材编写,为高职高专教材从无到有,从有到优、到特而辛勤工作。但高职高专教材的建设起步时间不长,还需要与行业企业合作,通过共同努力,出版一大批符合培养高素质技能型专门人才要求的特色教材。

我们殷切希望广大从事高职高专教育的教师,面向市场,服务需求,为形成具有中国特色和高职教育特点的高职高专教材体系作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长
2007 年 6 月



高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

编审专家委员会名单

主任: 温希东 (深圳职业技术学院副校长 教授)

副主任: 马晓明 (深圳职业技术学院通信工程系主任 教授)

余 华 (武汉船舶职业技术学院电子电气工程系主任 副教授)

电子组 组长: 余 华(兼) (成员按姓氏笔画排列)

于宝明 (南京信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副研究员)

马建如 (常州信息职业技术学院电子信息工程系副主任 副教授)

刘 科 (苏州职业大学信息工程系 副教授)

刘守义 (深圳职业技术学院 教授)

许秀林 (南通职业大学电子系副主任 副教授)

高恭嫻 (南京信息职业技术学院电子信息工程系 副教授)

余红娟 (金华职业技术学院电子系主任 副教授)

宋 烨 (长沙航空职业技术学院 副教授)

李思政 (淮安信息职业技术学院电子工程系主任 讲师)

苏家健 (上海第二工业大学电子电气工程学院 教授)

张宗平 (深圳信息职业技术学院电子通信技术系 高级工程师)

陈传军 (金陵科技学院电子系主任 副教授)

姚建永 (武汉职业技术学院电信学院院长 副教授)

徐丽萍 (南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师)

涂用军 (广东科学技术职业学院机电学院副院长 副教授)

郭再泉 (无锡职业技术学院自动控制与电子工程系主任 副教授)

曹光跃 (安徽电子信息职业技术学院电子工程系主任 副教授)

梁长垠 (深圳职业技术学院电子工程系 副教授)

通信组 组长: 马晓明(兼) (成员按姓氏笔画排列)

王巧明 (广东邮电职业技术学院通信工程系主任 副教授)

江 力 (安徽电子信息职业技术学院信息工程系主任 副教授)

余 华 (南京信息职业技术学院通信工程系 副教授)

吴 永 (广东科学技术职业学院电子系 高级工程师)

张立中 (常州信息职业技术学院 高级工程师)

李立高 (长沙通信职业技术学院 副教授)

林植平 (南京工业职业技术学院电气与自动化系 高级工程师)

杨 俊 (武汉职业技术学院通信工程系主任 副教授)

俞兴明 (苏州职业大学电子信息工程系 副教授)

项目策划 马乐惠

策 划 张 媛 薛 媛 张晓燕

前 言

随着信息时代的到来和通信技术的不断进步,电子技术正以前所未有的速度向前发展,并且日益广泛地渗透到科学技术、生产和生活的各个领域,为国民经济的发展和人民生活水平的提高带来了新的生机和活力。

“模拟电子技术”是高职高专院校通信和电子信息类专业的一门重要的技术基础课,是研究各种电子器件、电路及其应用的学科,同时也是学习通信类、微机类、测量类、微电子类、电力电子类及控制类课程的基础。

为了适应新世纪信息时代高职教育的发展趋势,达到提高学生创新能力和实践能力的目的,我们结合多年的教学经验,编写了本书。

本书的编写以应用为目的,以必须、够用为度,突出了基本概念、基本原理和基本分析方法,以讲清概念、强化应用为重点。同时,本书还具有以下特点:

1. 在保证模拟电子技术传统内容的基础上,将高频电子线路内容编入本教材,并增加了 ispPAC 可编程模拟器件设计的相关内容,不仅具有系统性、实用性,而且还反映了电子技术的最新发展,使学生能够尽快接触新的知识点。

2. 对于电路的分析,力求简化推导过程,突出物理概念的讲述,使学生不但能够学会定量计算的方法,而且能够掌握定性分析的技巧,为以后学习专业课程打下基础。

3. 对于集成电路的介绍,采用了“淡化中腹,强化周边”的原则,即简化集成电路内部结构及工作原理的分析,重点介绍集成电路的应用方法。

4. 本书易教易学,配套的 PPT 课件形象地分析了难点,突出了重点,增加了信息量。

本书是在总结上海科学技术职业学院模拟电子技术教学组多年教学经验的基础上编写完成的,是 2006 年上海市百门精品课程建设项目之一。其中第 1~4 章由郑学峰副教授编写,第 6~9 章由方烈敏讲师编写,第 5、10 章由劳五一副教授编写,第 11 章由张东工程师编写,各章习题参考答案由严佩敏副教授编写。郑学峰副教授为主编,负责全书的组织和统稿工作。在本书编写过程中,席静芳副教授提出了大量宝贵的意见,同时也得到了课题组和全系同志的大力支持。在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中难免存在疏漏,恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 1 月

目 录

第 1 章 半导体二极管及其电路	1	3.2.2 $u_i = U_m \sin \omega t$ 时的动态情况分析 ...	40
1.1 半导体的基本知识	1	3.2.3 动态分析的微变等效电路法	41
1.1.1 半导体材料及其特性	1	3.2.4 放大电路的主要性能指标	42
1.1.2 本征半导体的结构	1	3.3 放大电路的稳定性	44
1.1.3 杂质半导体	3	3.3.1 温度变化对工作点的影响	44
1.2 PN 结的形成及特性	4	3.3.2 分压式偏置放大电路	45
1.2.1 PN 结的形成	4	3.4 共集电极、共基极放大电路	48
1.2.2 PN 结的单向导电性	5	3.4.1 共集电极放大电路	48
1.2.3 PN 结的反向击穿特性	7	3.4.2 共基极放大电路	49
1.3 二极管及其应用电路	8	3.5 场效应管放大电路	52
1.3.1 半导体二极管的结构和类型	8	3.5.1 场效应管的等效模型	52
1.3.2 半导体二极管的伏安特性	9	3.5.2 共源极基本放大电路	53
1.3.3 二极管的参数	9	3.5.3 共漏极基本放大电路	54
1.3.4 二极管的检测	10	3.6 多级放大电路	55
1.3.5 二极管的典型应用电路	11	3.6.1 多级放大电路的级间耦合方式	55
1.4 特殊二极管	12	3.6.2 多级放大电路的电压放大倍数	57
习题	15	3.7 功率放大电路	58
第 2 章 晶体三极管和场效应管	18	3.7.1 功率放大器的分类	58
2.1 晶体三极管	18	3.7.2 甲乙类互补对称功率 放大电路 OCL	60
2.1.1 晶体三极管的结构特点	18	3.7.3 甲乙类单电源互补对称功率 放大电路 OTL	62
2.1.2 晶体三极管的特性曲线	19	3.7.4 准互补推挽功率放大电路	63
2.1.3 晶体三极管的主要参数	23	3.8 放大电路的频率特性	64
2.2 场效应管	23	3.8.1 影响频率特性的主要因素	65
2.2.1 N 沟道结型场效应管	24	3.8.2 单级 RC 共射放大电路的 频率特性	66
2.2.2 N 沟道增强型绝缘栅场效应管	27	3.8.3 多级放大电路的频率特性	67
2.2.3 场效应管的主要参数	29	习题	67
2.2.4 场效应管的特点及 使用注意事项	30	第 4 章 负反馈放大电路	75
习题	32	4.1 反馈的基础知识	75
第 3 章 放大电路基础	34	4.1.1 反馈的基本概念	75
3.1 共射极基本放大电路	34	4.1.2 反馈的分类和判断	75
3.1.1 放大电路的组成	34	4.2 负反馈放大电路	77
3.1.2 放大电路的基本工作原理	36	4.2.1 负反馈放大电路的四种组态	77
3.2 放大电路的分析方法	37		
3.2.1 静态分析的估算法	37		

4.2.2 反馈放大电路的一般关系式	79	第7章 高频谐振放大器	132
4.3 深度负反馈放大电路的计算	80	7.1 小信号选频放大器	132
4.3.1 深度负反馈的实质	80	7.1.1 LC谐振回路小信号选频 放大器	132
4.3.2 放大倍数的计算	80	7.1.2 小信号集中选频放大器	140
4.4 负反馈对放大电路性能的影响	81	7.2 高频谐振功率放大器	141
4.4.1 提高放大倍数的稳定性	81	7.2.1 谐振功率放大器的工作原理	141
4.4.2 展宽频带	82	7.2.2 谐振功率放大器的调制特性	145
4.4.3 减小非线性失真	82	7.2.3 谐振功率放大电路	147
4.4.4 对输入电阻和输出电阻的影响	83	习题	151
习题	84	第8章 振幅调制、解调与混频电路	154
第5章 集成运算放大电路及其应用	86	8.1 振幅调制的基本原理	154
5.1 集成运算放大电路简介	86	8.1.1 普通调幅信号	154
5.1.1 集成运算放大电路的组成	86	8.1.2 抑制载波的双边带调制信号	158
5.1.2 差分放大电路	87	8.1.3 抑制载波的单边带调制信号	159
5.2 集成运算放大电路的基本电路	91	8.2 振幅调制电路	161
5.2.1 集成运算放大电路的基本特性	91	8.2.1 高电平调幅电路	161
5.2.2 三种基本运算电路	92	8.2.2 低电平调幅电路	162
5.3 集成运算放大电路的应用电路	95	8.3 振幅解调电路	164
5.3.1 加法运算电路	95	8.3.1 同步检波电路	164
5.3.2 积分和微分运算电路	95	8.3.2 包络检波电路	165
5.3.3 电压、电流转换电路	96	8.4 混频电路	168
5.3.4 交流放大电路	97	8.4.1 混频的基本概念	168
5.3.5 精密整流电路	98	8.4.2 混频器	169
5.3.6 有源滤波器	99	8.4.3 混频干扰与失真	171
5.4 电压比较器	104	习题	172
5.4.1 集成运放的非线性工作区	104	第9章 角度调制与解调电路	176
5.4.2 单限比较器	104	9.1 角度调制的基本原理	176
5.4.3 滞回比较器	106	9.1.1 调角信号的基本概念	176
5.5 集成运算放大器的选择和使用	108	9.1.2 调角信号的基本特性	177
5.5.1 集成运算放大器的主要参数	108	9.2 调频电路	180
5.5.2 集成运算放大器的选择和使用	109	9.2.1 直接调频电路	180
习题	111	9.2.2 间接调频电路	182
第6章 信号产生电路	115	9.3 鉴频电路	185
6.1 正弦信号产生电路	115	9.3.1 鉴频方法概述	185
6.1.1 反馈振荡器的组成原理	115	9.3.2 斜率鉴频电路	187
6.1.2 LC正弦波振荡电路	116	9.3.3 相位鉴频电路	188
6.1.3 石英晶体振荡电路	120	习题	190
6.1.4 RC正弦波振荡电路	122	第10章 直流稳压电源	193
6.2 非正弦信号产生电路	123	10.1 直流稳压电源的组成	193
6.2.1 方波信号发生电路	123	10.2 整流电路	193
6.2.2 三角波、锯齿波发生器	124	10.2.1 单相半波整流电路	193
习题	126		

10.2.2 单相全波整流电路	194	11.3 PAC 的接口电路	216
10.2.3 单相桥式整流电路	195	11.4 ispPAC 设计实例	217
10.3 滤波电路	197	11.4.1 简单增益设计	218
10.3.1 电容滤波电路	197	11.4.2 级联增益设计	218
10.3.2 RC 滤波电路	198	11.4.3 分数增益设计	219
10.3.3 电感滤波电路	199	11.4.4 四路加法器设计	219
10.3.4 LC 滤波电路	199	11.4.5 积分电路设计	220
10.4 线性稳压电路	200	11.4.6 切比雪夫滤波器设计	221
10.4.1 并联型稳压电路	200	11.4.7 ispPAC20 的设计	222
10.4.2 串联型稳压电路	202	11.4.8 ispPAC80 的滤波器设计	224
10.5 开关型稳压电路	208	习题	226
习题	209	附录 A 电阻器和电容器的标称值	227
第 11 章 ispPAC 可编程模拟器件		附录 B 半导体分立器件型号命名法	229
及应用	211	附录 C 部分半导体分立器件型号	
11.1 ispPAC 简介	211	和参数	230
11.2 PAC-Designer 软件及其使用	211	附录 D 半导体集成电路型号命名法	233
11.2.1 PAC-Designer 软件的安装	211	附录 E 各章习题参考答案	234
11.2.2 PAC-Designer 软件的		参考文献	235
使用方法	211		

第 1 章 半导体二极管及其电路

本章要点

- * 半导体的基础知识及半导体的导电机理
- * 半导体器件的核心环节——PN 结
- * 半导体二极管的物理结构、工作原理、特性曲线和主要参数
- * 二极管的简单应用

1.1 半导体的基本知识

自然界中的物质,按其导电能力可分为导体、半导体和绝缘体。金、银、铜、铝等金属材料是良导体,塑料、陶瓷、橡胶等材料是绝缘体,这些材料在电力系统中得到了广泛的应用。还有一些物质如硅、锗等,它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,其导电能力受外界因素(光、热、杂质等)的影响,故被称为半导体。20 世纪 40 年代,科学家在实验中发现半导体材料具有一些特殊的性能,可用来制造性能优良的半导体器件,从而引发了电子技术的革命。

1.1.1 半导体材料及其特性

常用的半导体材料如硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料如硼(B)、磷(P)、铟(In)和锑(Sb)等。其中,硅和锗是目前最常用的半导体材料。除了在导电能力方面与导体和绝缘体不同外,半导体还具有一些特殊的性质,如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等,即半导体受到光照和热辐射时,或在纯净的半导体中掺入微量的其它特定元素(也叫“杂质”)后,它的导电能力将有明显的变化。正是利用半导体的这些特点,才制造出许多现代电子器件。为了理解这些特点,必须了解半导体的结构。

1.1.2 本征半导体的结构

完全纯净且结构完整的半导体晶体叫做本征半导体,它们都是四价元素,原子最外层轨道上具有 4 个电子,称为价电子。物质的化学性质是由价电子数决定的,半导体的导电性质也与价电子有关。在研究半导体的导电特性时,常用如图 1-1 所示的简化原子模型。由于原子呈电中性,因此用 $+4$ 表示 4 个与电子等电量的正电荷。

本征半导体为晶体结构,它们的原子形成有序的排列,每个硅(锗)原子的 4 个价电子与相邻的 4 个硅(锗)原子的各一个价电子分别组成 4 个共价键,如图 1-2 所示。

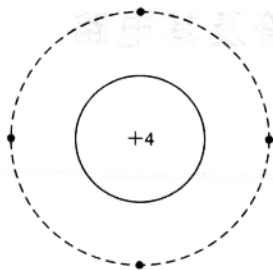


图 1-1 硅和锗的原子结构简化模型

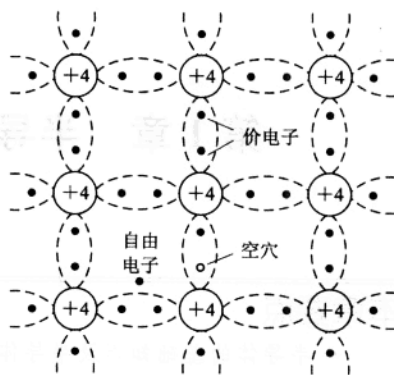


图 1-2 硅和锗的晶格结构图

1. 本征半导体中的两种载流子——电子和空穴

在室温下，本征半导体中少数共价键中的电子因受热而获得能量，摆脱原子核的束缚，从共价键中挣脱出来，成为自由电子。与此同时，失去价电子的硅或锗原子在该共价键上留下了一个空位。因为自由电子带负电荷，所以可把其留下的空位看成带正电荷的粒子，称其为空穴。由于本征硅或锗每产生一个自由电子必然会有一个空穴对应出现，即电子与空穴成对出现，因此称为电子空穴对，如图 1-3 所示。在室温下，本征半导体内产生的电子空穴对数目是很少的，因此导电能力差。

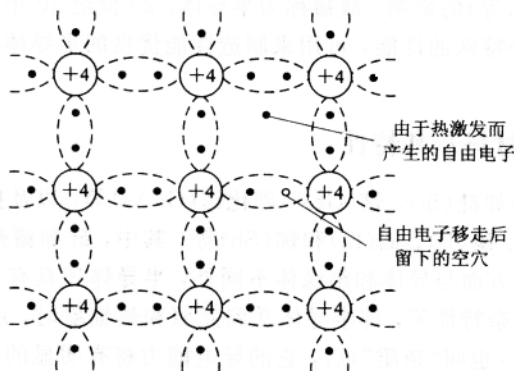


图 1-3 共价键被打破而产生空穴和自由电子

2. 本征半导体的热敏特性和光敏特性

本征半导体受热或光照后其导电能力大大增强。

当温度升高或光照增强时，本征半导体内原子运动加剧，有较多的电子获得能量成为自由电子，即电子空穴对增多，所以本征半导体中电子空穴对的数目与温度和光照有密切关系。温度越高、光照越强，本征半导体内载流子数目越多，导电性越强，这就是本征半导体的热敏特性和光敏特性。利用这种特性就可以做成各种热敏元件和光敏元件，诸如用于控制路灯的光敏管、用于控制温度的热敏管等。

1.1.3 杂质半导体

在本征半导体中掺入其他微量元素，可使其导电能力大大加强。例如，在硅本征半导体中掺入千万分之几的其他微量元素，它的导电能力就会增强数百万倍。这就是本征半导体的掺杂特性。掺入的微量元素称为杂质，掺入杂质后的本征半导体称为杂质半导体。因掺入杂质的性质不同，杂质半导体可分为 P(空穴)型半导体和 N(电子)型半导体两大类。

1. P 型半导体

如果在四价本征半导体中掺入微量三价元素，如硼(B)、镓(Ga)等，那么在半导体内产生的空穴数量就多于电子数量，这种半导体叫做 P 型半导体，如图 1-4 所示。在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，简称“多子”，电子是少数载流子，简称“少子”，但整个 P 型半导体是呈现电中性的。

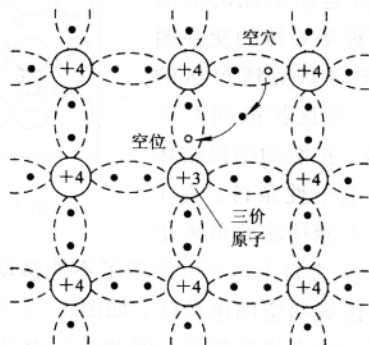


图 1-4 P 型半导体的共价键结构

2. N 型半导体

如果在四价本征半导体中掺入微量五价元素，如磷(P)、砷(As)等，那么在半导体内产生的自由电子数量就多于空穴数量，这种半导体叫做 N 型半导体，如图 1-5 所示。在 N 型半导体中，电子是多数载流子，简称“多子”，空穴是少数载流子，简称“少子”，但整个 N 型半导体是呈现电中性的。

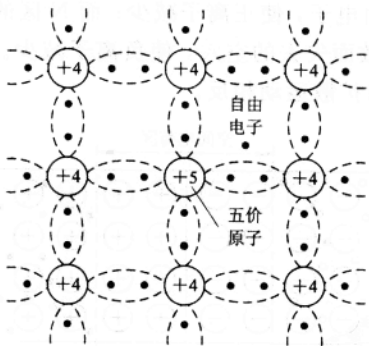


图 1-5 N 型半导体的共价键结构

杂质半导体中“多子”的浓度取决于掺入杂质的多少，而“少子”的浓度与温度有密切的关系。

1.2 PN 结的形成及特性

1.2.1 PN 结的形成

用不同的掺杂工艺使同一半导体(如本征硅)一侧形成 P 型半导体,而另一侧形成 N 型半导体。此时,在它们的交界面处就出现了自由电子和空穴的浓度差别。

P 区的多子空穴浓度大大高于 N 区的少子空穴浓度,而 N 区的多子自由电子浓度大大高于 P 区的少子自由电子浓度。由于存在载流子的浓度差,载流子将从浓度较高的区域向浓度较低的区域扩散,因此 P 区的多子空穴向

N 区扩散,而 N 区的多子自由电子向 P 区扩散,如图 1-6 所示。由载流子扩散运动形成的电流叫扩散电流。当载流子通过两种半导体的交界面后,在交界面附近的区域里,P 区扩散到 N 区的空穴与 N 区的自由电子复合,N 区扩散到 P 区的自由电子与 P 区的空穴复合。扩散的结果破坏了 P 区和 N 区交界面附近的电中性条件。在 P 区一侧由于失去空穴,留下了不能移动的负离子

(受主离子);在 N 区一侧由于失去自由电子,留下了不能移动的正离子(施主离子)。这些不能移动的正、负离子所在的区域叫空间电荷区,如图 1-7 所示。在这个区域内,多数载流子已扩散到对方并复合掉了,或者说消耗了,因此空间电荷区又叫耗尽层,它的电阻率很高。扩散作用越强,空间电荷区越宽。在出现了空间电荷区以后,正、负离子的电荷在空间电荷区中形成了一个由 N 区指向 P 区的电场。由于这个电场是因内部载流子的扩散运动而不是由外加电压形成的,因此叫内电场。空间电荷区越宽,内电场也越强。显然,内电场的方向与多子扩散方向相反,因此它阻碍 P 区和 N 区的多子继续向对方区域扩散。另一方面,在内电场作用下,P 区和 N 区的少数载流子将做定向运动。这种运动叫漂移运动,由此引起的电流叫漂移电流。这样,P 区的少子自由电子向 N 区漂移,从而补充了 N 区交界面附近因扩散而失去的自由电子,使正离子减少;而 N 区的少子空穴向 P 区漂移,从而补充了 P 区交界面附近因扩散而失去的空穴,使负离子减少。因此,漂移运动的结果使空间电荷区变窄,其作用正好与扩散运动相反。

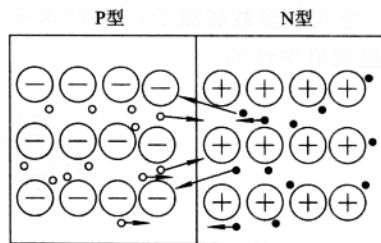


图 1-6 载流子的扩散运动

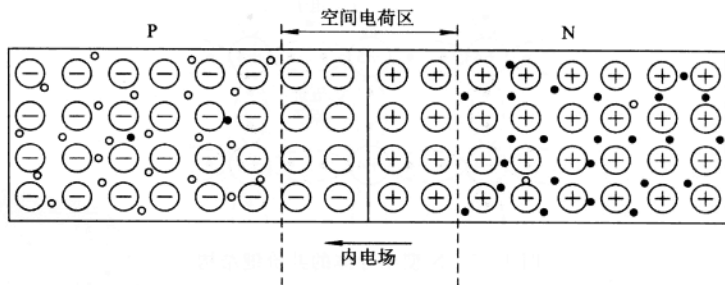


图 1-7 PN 结的形成

由此可见,在有 P 区和 N 区的同一半导体内,多子的扩散运动和少子的漂移运动是相互联系又相互对立的。多子的扩散运动使空间电荷区加宽,内电场增强。内电场的建立和增强又阻止多子的扩散,增强少子的漂移,其结果使空间电荷区变窄,内电场减弱,有利于多子的扩散。如此相互制约,相互促进,最后多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡。此时,扩散电流和漂移电流大小相等,方向相反,通过空间电荷区的净电流等于零,此时,空间电荷区的宽度和内电场的强度为定值。

1.2.2 PN 结的单向导电性

PN 结在外加电压作用下,形成了电流。外加电压的极性不同,流过 PN 结的电流大小有极大的差别。

1. PN 结外加正向电压

如图 1-8 所示,当 PN 结外加电压的正端接 P 区,负端接 N 区(称为正向偏置,简称正偏)时,产生的电场与 PN 结内电场方向相反。在这个外加电场作用下,PN 结原来扩散与漂移之间的动态平衡状态被打破,使多子的扩散运动增强,少子的漂移运动减弱。P 区中的多数载流子空穴和 N 区中的多数载流子电子都要向 PN 结移动,当 P 区空穴进入空间电荷区后,就要和原来的一部分负离子中和,使 P 区一侧的空间电荷量减少。同样,当 N 区电子进入 PN 结时,中和了部分正离子,使 N 区一侧的空间电荷量减少,结果使空间电荷区变窄,即耗尽区厚度变薄(从原来未加电压时的 $11'$ 变到 $22'$)。由于半导体本身的体电阻同 PN 结上的电阻相比是很小的,因此加上外加电压后,这个电压将集中降落在 PN 结上。所以,外加电压将使 PN 结的内电场减弱,有利于多数载流子扩散运动,从而形成了扩散电流。当外加电压升高,PN 结电场便进一步减弱,扩散电流随之增加,在正常工作范围内,PN 结上外加电压只要稍有变化(如 0.1 V),便能引起电流的显著变化,因此电流 I_F 将随外加电压的增加急速上升。这样,正向偏置的 PN 结表现为一个很小的电阻,表现在外电路上便形成一个流入 P 区的电流,称为正向电流 I_F 。

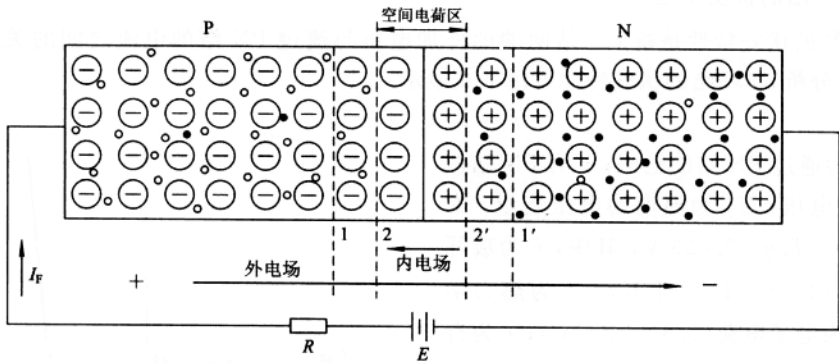


图 1-8 外加正向电压时的 PN 结

2. PN 结外加反向电压

在图 1-9 中,外加电压的正端接 N 区,负端接 P 区,称 PN 结处于反向偏置。这时外加电场方向与 PN 结内电场方向相同,PN 结电场增强。在这种外电场作用下,P 区中的空

穴和N区中的自由电子都将进一步离开PN结,使耗尽区厚度加宽(从11'变为22'),这样P区和N区中的多数载流子就很难越过势垒,因此扩散电流趋近于零。但此时,N区和P区中的少数载流子更容易产生漂移运动而形成漂移电流,因此在这种情况下,PN结的电流主要是漂移电流。漂移电流的方向与扩散电流相反,表现在外电路上是一个流入N区的电流 I_R ,称为反向电流。由于少数载流子的浓度很小,因此 I_R 是很微弱的,一般为 μA 级(甚至是 nA 级)。同时,少数载流子是由本征激发产生的,其数值取决于温度,在一定温度 T 下,由于热激发而产生的少数载流子的数量是一定的,电流的值趋于恒定,如图1-9所示。这时的反向电流 I_R 就是反向饱和电流,用 I_s 表示。由于 I_s 很小,因此PN结在反向偏置时,呈现出一个很大的电阻。此时可认为PN结是不导电的。但 I_s 受温度的影响较大,在某些实际应用中,还必须予以考虑。

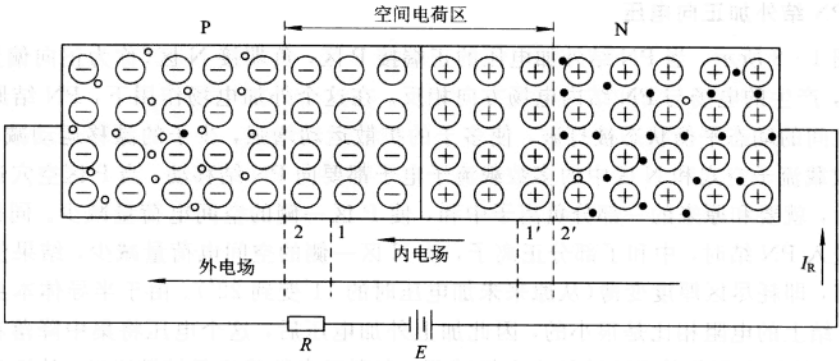


图 1-9 外加反向电压时的 PN 结

综上所述,当PN结正偏时,正向电阻很小,回路产生一个较大的电流,PN结处于导通状态;当PN结处于反偏时,反向电阻很大,回路的电流几乎为零,PN结处于截止状态。这就是PN结的单向导电性。

3. PN 结的伏安特性

PN结的伏安特性是指PN结两端的外加电压与流过PN结的电流之间的关系曲线。根据理论分析,PN结的伏安特性可用下式表示:

$$i = I_s(e^{u/U_T} - 1) \quad (1-1)$$

式中, i 为通过PN结的电流; u 为PN结两端的外加电压; U_T 为温度的电压当量,常温下 $U_T = kT/q \approx 0.026 \text{ V}$,其中, k 为玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T 为热力学温度, q 为电子电荷($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$); e 为自然对数的底; I_s 为反向饱和电流。由式(1-1)可以画出其伏安特性曲线如图1-10所示。关于图1-10,可解释如下:

(1) 当PN结两端加正向电压时,电压 u 为正值,当 u 比 U_T 大几倍时,式(1-1)

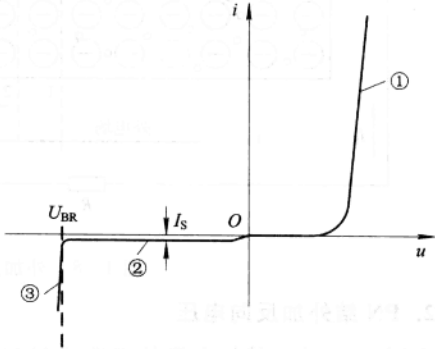


图 1-10 PN 结的伏安特性

中的 e^{u/U_T} 远大于 1, 式中的 1 可以忽略。这样, PN 结的电流 i 与电压 u 成指数关系, 如图 1-10 中的正向电压部分①所示。

(2) 当 PN 结外加反向电压时, u 为负值。当 u 比 U_T 大几倍时, 指数项趋近于零, 因此 $i = -I_S$, 即反向电压达到一定数值后, PN 结的反向电流就是反向饱和电流, 与外加反向电压的大小基本无关, 为一常数 I_S , 如图 1-10 中的反向电压部分②所示。

4. 温度对 PN 结特性的影响

PN 结的特性对温度的变化特别敏感, 反映在伏安特性上即为: 温度升高, 正向特性曲线左移, 反向特性曲线下移。具体变化规律为: 温度每升高 1°C , 正向压降减小 $2 \sim 2.5 \text{ mV}$; 温度每升高 10°C , 反向饱和电流 I_S 约增大一倍。

1.2.3 PN 结的反向击穿特性

当加到 PN 结两端的反向电压增大到一定数值 (U_{BR}) 后, 反向电流会急剧增加, 如图 1-10 中虚线左边部分③所示。这个现象就称为 PN 结的反向击穿。发生击穿所需反向电压 U_{BR} 称为反向击穿电压。由于 PN 结反向击穿后电流很大, 电压又很高, 因此消耗在 PN 结上的功率很大, 容易使 PN 结温度升高, 而结温升高使反向电流更加增大, 电流增大又使结温进一步升高, 如此恶性循环, 很快把 PN 结烧毁, 这种现象称为热击穿。产生 PN 结反向击穿的原因是: 自由电子和空穴的数目在强电场作用下大大地增加, 引起反向电流的急剧增加, 这种现象产生的机理有雪崩击穿和齐纳击穿两种。

雪崩击穿的物理过程可以这样来解释: 当 PN 结外加反向电压增加时, 空间电荷区中的电场随着增强, 从而使在漂移运动中少子(既有电子也有空穴)的运动速度加快, 并获得足够的动能。它们在晶体中不断地与晶体原子发生碰撞, 当电子和空穴的能量足够大时, 通过这样的碰撞, 可使共价键中的电子激发形成自由电子—空穴对, 这种现象称为碰撞电离。新产生的电子和空穴与原有的电子和空穴一样, 在电场作用下, 又会受到电场的加速获得能量, 并撞击别的原子, 再产生电子—空穴对, 这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后, 载流子的倍增情况就像在陡峭的积雪山坡上发生雪崩一样, 载流子增加得多而快, 使反向电流急剧增大, 造成 PN 结击穿, 称为雪崩击穿。雪崩击穿电压与半导体的掺杂浓度有关, 掺杂浓度低时击穿电压数值大。

齐纳击穿只会在掺杂浓度特别大的 PN 结中出现, 因为杂质浓度大, 空间电荷区内电荷密度(即杂质离子)也大, 因而空间电荷区很窄, 进行漂移运动的少子, 在通过空间电荷区时, 由于路径短, 它与晶体中离子的碰撞机会较少, 不会产生雪崩击穿。但因为空间电荷区很窄, 在加有不太高的反向电压(一般为几伏)下, PN 结空间电荷区中就形成一个强电场, 它能够共价键中束缚电子强行拉出产生电子—空穴对, 形成较大的反向电流, 造成 PN 结击穿, 这就叫齐纳击穿。显然, 它的物理过程和雪崩击穿完全不同。发生齐纳击穿需要的电场强度约为 $2 \times 10^5 \text{ V/cm}$, 这只有在杂质浓度特别大的 PN 结中才能达到。

必须指出, 上述两种电击穿过程是可逆的, 当加在 PN 结上的反向电压降低后, PN 结仍可以恢复原来的状态。但它有一个前提条件, 就是反向电流和反向电压的乘积不超过 PN 结允许的耗散功率, 超过了就会因为热量散不出去而使 PN 结温度上升, 直到过热而烧毁。所以热击穿和电击穿的概念是不同的。电击穿往往可为人们所利用(如稳压管), 而

热击穿则是必须尽量避免的。

1.3 二极管及其应用电路

1.3.1 半导体二极管的结构和类型

半导体二极管由 PN 结外加上引线和管壳组成，按结构不同可分为点接触型和面接触型两种。

1. 点接触型二极管

点接触型二极管的结构如图 1-11(a)所示，是由一根金属丝与半导体表面相接触，经过特殊工艺，在触点上形成 PN 结，做出引线，加上管壳封装而成。其突出优点是 PN 结面积很小，因此结电容很小，一般在 1 pF 以下，适用于高频(可达 1000 MHz 以上)环境工作。其缺点是不能承受较高的正向电压和通过大的正向电流。因此点接触型二极管多用于高频检波以及在脉冲数字电路中作开关元件。

2. 面接触型二极管

面接触型二极管的 PN 结是采用合金法(面结型二极管)或扩散法(硅平面二极管)工艺制作的，其结构如图 1-11(b)、(c)所示。面接触型二极管的 PN 结面积较大，结电容也较大，因此，其工作频率低。但是，它能通过较大的正向电流，且反向击穿电压高，工作温度也较高，所以多用在低频整流电路中。二极管的电路符号如图 1-11(d)所示。

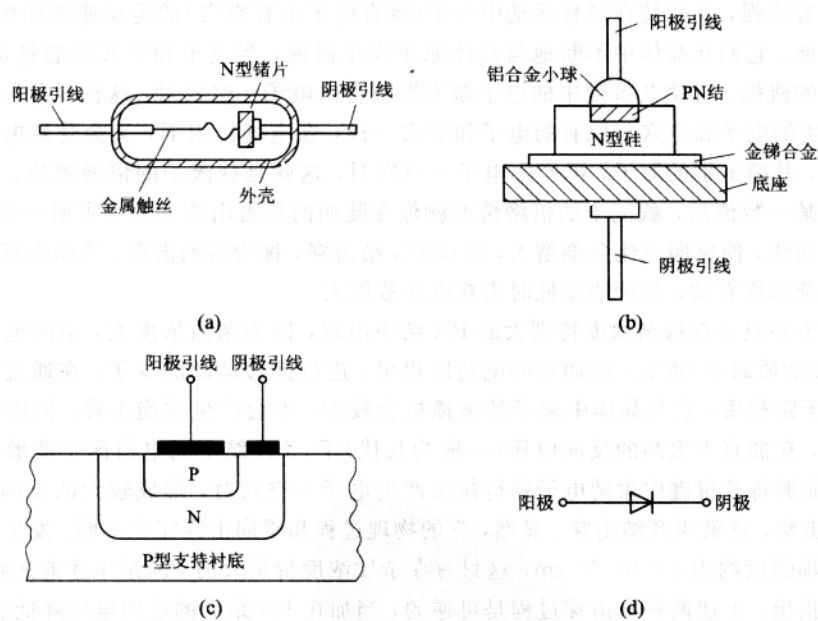


图 1-11 半导体二极管的结构及符号

(a) 点接触型；(b) 面接触型；(c) 集成电路中的平面型；(d) 电路符号