

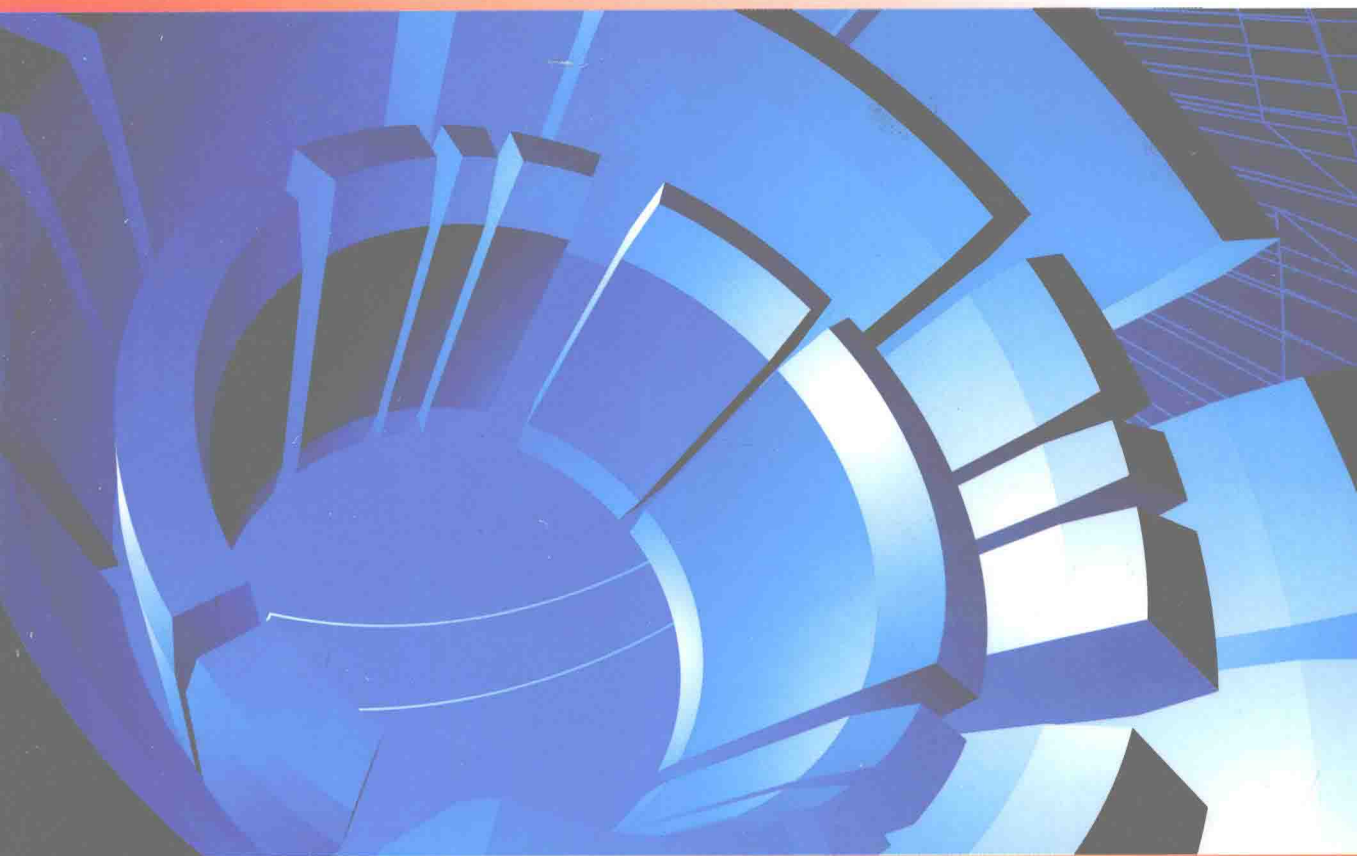
- 中国高等职业技术教育研究会推荐
- 高职高专电子、通信类专业“十一五”规划教材

模拟电子技术

主编 金泽安

参编 王红然 徐欢

主审 于宝明



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

★ 教育部推荐教材 普通高等院校教材

★ 教育部规划教材 普通高等院校“十一五”规划教材

模拟电子技术

主编 张毅刚
副主编 王志强 李 强
主审 李 强



★ 清华大学出版社出版
★ 清华大学出版社发行

□ 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 金泽安

参 编 王红然 徐 欢

主 审 于宝明

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书以实际应用为目标,以实验教学为引导,融入作者多年教学经验,并结合高职高专的教育特点编写而成。书中内容叙述力求浅显易懂,言简意赅。

本书共分五章。第1章常用半导体元器件及其特性,主要讲述了二极管、三极管的基本特性,重点突出器件模型及其数学表达式、曲线和电路等各种表示形式,系统地介绍了利用器件模型进行电路分析的方法。第2章基本放大电路,主要介绍了三种基本组合状态放大电路的交直流电路分析方法。第3章反馈放大电路,主要介绍了反馈的基本概念和各种反馈的判断方法及反馈电路的常见应用。第4章集成运算放大电路,主要介绍了差动放大电路的工作原理及其应用。第5章功率放大电路,主要分析了多种形式的功率放大电路。

本书可作为高职高专院校电子信息与通信类专业的教材,也可作为相关领域职业技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/金泽安主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.1

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

ISBN 978-7-5606-2153-1

I. 模… II. 金… 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 175589 号

策 划 张 媛

责任编辑 李惠萍

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: xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2009年1月第1版 2009年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 10.875

字 数 248千字

印 数 1~4000册

定 价 16.00元

ISBN 978-7-5606-2153-1/TN·0470

XDUP 2445001-1

*** 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,根据技术领域和职业岗位群任职要求,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

“模拟电子技术”是一门研究电子器件原理及其运用的基础课程，是电气、自控、电子信息等电类专业和部分非电类专业的必修课，是电子技术方面入门性质的技术基础课，具有很强的实践性。对于初学者而言，总是抱怨其概念抽象，难于记忆、理解，内容庞杂，所以围绕该课程教学改革的教材不断涌现。笔者结合高职高专的教育特点和其它教材的长处编写了本书，书中力求做到语言叙述浅显易懂、言简意赅，理论联系实际，方便理解与自学。

本书以“精选内容、够用为本、力图创新”为原则，并且深化概念，配以例题详解，结合各知识模块的小制作，再现教学思想的创新。书中整体突出了以贴切实际生活中的试验教学带动放大电路的分析，依次有三极管放大电路的分析，反馈放大电路的分析，差动放大电路的分析，功率放大电路的分析。通过本课程的学习，要求熟练掌握电子器件的符号、性能参数、作用、原理和使用方法；掌握电子器件与电路组成的基本原理、基本概念、单元电路的组成原则，并有一定的分析、设计、安装、调试简单电路的能力；同时兼备一定的阅读和分析简单电子系统的能力，力求使学生初步掌握电子系统的构成和分析方法，培养学生用工程概念去分析问题和解决问题，为深入学习电子技术某些领域中的后续内容，以及为掌握电子技术专业领域中的应用打下良好的基础。

本书共五章及三个附录。第1章为常用半导体元器件及其特性，第2章为基本放大电路，第3章为反馈放大电路，第4章为集成运算放大电路，第5章为功率放大电路；附录A为半导体器件命名方法，附录B为MF-47型万用表使用简介，附录C为仿真软件EWB使用简介。

参加本书编写的人员有：安徽电子信息职业技术学院金泽安老师（第2~4章），安徽工业大学王红然老师（第1章和附录A、B），安徽电子信息职业技术学院徐欢老师（第5章和附录C）。全书由南京信息职业技术学院于宝明老师担任主审，金泽安老师负责总体策划和全书的统稿。在此对本书出版过程中给予帮助的所有人员表示诚恳的谢意。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2008年5月

目 录

第 1 章 常用半导体元器件及其特性	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 半导体的特性	1
1.1.2 本征半导体和杂质半导体	2
1.2 PN 结	5
1.2.1 PN 结的形成	5
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.3 半导体二极管	7
1.3.1 二极管的结构与符号	7
1.3.2 二极管的伏安特性	8
1.3.3 二极管的主要参数	10
1.3.4 理想二极管的特点及其电路的分析方法	10
1.3.5 二极管的应用	12
1.4 半导体三极管	15
1.4.1 结构与符号	15
1.4.2 电流分配关系	16
1.5 场效应管	20
1.5.1 结型场效应管	20
1.5.2 金属-氧化物-半导体场效应管	26
1.5.3 各类场效应管的比较与使用注意事项	31
本章小结	32
思考与练习题	32
第 2 章 基本放大电路	35
2.1 放大电路基本知识	35
2.1.1 放大的概念和放大电路的主要性能指标	35
2.1.2 基本放大电路的组成及交直流通路	37
2.1.3 基本放大电路的工作原理	41
2.2 共发射极基本放大电路	42
2.2.1 共发射极基本放大电路的构成	42
2.2.2 共发射极基本放大电路的分析	44
2.2.3 共发射极基本放大电路的失真分析	49
2.2.4 共发射极基本放大电路工作点的稳定	51
2.3 其他连接形式的放大电路	56
2.3.1 共集电极放大电路	56
2.3.2 共基极放大电路	60

2.4 多级放大电路	62
2.4.1 多级放大电路的耦合	62
2.4.2 多级放大电路的分析	64
2.5 场效应管放大电路	66
2.5.1 场效应管放大电路的三种接法	66
2.5.2 场效应管放大电路的特点	70
小知识——生活中的放大电路	70
本章小结	71
思考与练习题	72
 第3章 反馈放大电路	 79
3.1 反馈的基本概念	79
3.1.1 反馈放大器的框图	79
3.1.2 反馈放大器的基本关系式	80
3.2 反馈的判断和基本组态	81
3.2.1 反馈的判断	81
3.2.2 负反馈放大电路的四种基本组态	85
3.3 负反馈对放大电路性能的改善	88
3.3.1 对放大倍数的影响	88
3.3.2 减小非线性失真	90
3.3.3 负反馈对频率特性的影响	91
3.3.4 负反馈对输入、输出电路的影响	91
3.4 负反馈放大电路的应用	94
3.4.1 负反馈放大电路的稳定性	94
3.4.2 引入负反馈的原则	95
3.4.3 负反馈放大电路的应用——串联反馈式稳压电源	96
3.5 正弦波振荡器	98
3.5.1 正弦波振荡器概述	99
3.5.2 RC 振荡器	100
3.5.3 LC 振荡器	102
3.5.4 石英晶体振荡电路	106
小制作——0~12 V 可调串联反馈型直流稳压电源	108
本章小结	109
思考与练习题	110
 第4章 集成运算放大电路	 115
4.1 差动放大电路	115
4.1.1 零点漂移的分析	116
4.1.2 差动放大电路的构成及工作原理	116
4.2 恒流源电路	119
4.2.1 电流源概述	119
4.2.2 三极管基本电流源	120
4.2.3 镜像电流源	120

4.2.4 微电流源	121
4.3 集成运放的应用	121
4.4 基本运算电路	124
4.4.1 比例运算电路	124
4.4.2 求和运算电路	125
4.4.3 积分运算电路	126
4.4.4 微分运算电路	127
小知识——卡拉 OK 消声电路	127
本章小结	129
思考与练习题	129
第 5 章 功率放大电路	133
5.1 功率放大电路概述	133
5.1.1 功率放大电路的基本要求	133
5.1.2 功率放大电路的分类	134
5.2 OCL 功率放大电路	135
5.2.1 乙类双电源互补对称功率放大电路	135
5.2.2 甲乙类双电源互补对称功率放大电路	137
5.3 单电源供电的 OTL 互补功率放大电路	138
5.4 改进型 OTL 功率放大电路	139
小知识——适合自制的功率放大器	139
本章小结	140
思考与练习题	141
附录 A 半导体器件命名方法	143
附录 B MF-47 型万用表使用简介	146
附录 C 仿真软件 EWB 使用简介	151
参考文献	163

第1章 常用半导体元器件及其特性

半导体器件是信息化时代的基础。从个人用品如 MP3、手机,到计算机、通信网等电子设备,其核心组成部分是半导体器件。典型的半导体器件有半导体二极管(简称二极管)、半导体三极管(简称三极管)、场效应管(FET)和集成电路(IC)。集成电路特别是大规模和超大规模集成电路不断更新换代,使电子设备在微型化、可靠性和多功能等方面有了重大发展,使电子信息技术成为当代高新技术的核心领域之一。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 半导体的特性

1. 半导体的概念

半导体是指导电能力介于导体和绝缘体之间的一种物质。常用的半导体材料有元素半导体(如硅(Si)、锗(Ge)等),化合物半导体(如砷化镓(GaAs)等),以及掺杂或制成其他化合物半导体的材料。其中硅和锗是目前最常用的半导体材料,而硅应用得更为广泛。半导体材料区别于其他物质的独特特性有:

(1) 当半导体受到外界光和热的激发时,其导电能力将发生显著变化(即光敏与热敏特性)。

(2) 在纯净的半导体中掺入微量的杂质,其导电能力也会有显著的增加(即掺杂特性)。

2. 半导体的共价键结构

硅和锗的简化原子结构模型如图 1.1.1 所示。硅和锗都是 4 价元素,它们的原子最外层电子都是 4 个,称为价电子。由于原子呈中性,因此原子核用带圆圈的+4 符号表示。价电子受原子核的束缚力最小,物质的化学性质及其导电能力是由价电子决定的,所以,价电子是重点讨论的对象。

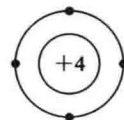


图 1.1.1 硅和锗的简化原子结构模型

制造半导体器件的材料都要制成晶体结构,晶体硅或晶体锗结构是由硅或锗原子按一定的规则整齐地排列(称为空间点阵)而成的。硅或锗制成晶体后,由于晶体中原子之间距离很近,价电子不仅受到原来所属原子核的吸引而且还受到相邻原子核的吸引,即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这样,相邻原子之间通过共有价电子的形式而结合起来,即形成“共价键”结构。共价键指的是两个相邻原子各提供一个价电子作为共有价电子所形成的束缚作用。因此,每个硅或锗的原子都必将以

对称的形式与其邻近的 4 个原子通过共价键紧密地联系起来,如图 1.1.2 所示,其中两个相邻原子间的两条虚线表示原子间的共价键。

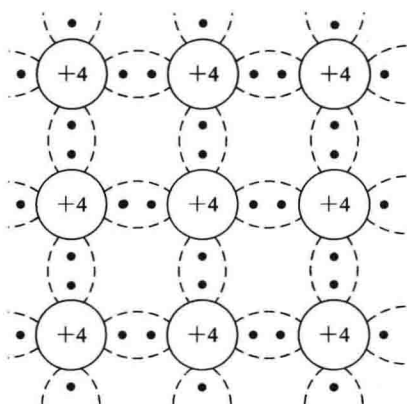


图 1.1.2 硅或锗晶体的共价键结构示意图

1.1.2 本征半导体和杂质半导体

1. 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。半导体的重要物理特性是它的电导率,电导率与材料内单位体积中所含的电荷载流子(carrier,即可移动的带电粒子,如自由电子等)的数目有关。电荷载流子的浓度愈高,其电导率愈高。半导体内载流子的浓度取决于许多因素,包括材料的基本性质、温度值以及杂质的存在。在热力学温度为零开($T=0\text{ K}$,相当于 -273.15°C)时,价电子不能挣脱共价键的束缚,也就不能自由移动,所以共价键内的价电子又称为束缚电子(bonded electron)。这样,本征半导体中虽有大量的价电子,但没有自由电子,此时半导体是不导电的。但是,半导体的共价键实际上是一种“松散联合”,其中的价电子并不像在绝缘体中被束缚得很紧。当温度升高或受光照射时,价电子以热运动的形式不断从外界获得一定的能量,少数价电子因获得的能量较大而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,如图 1.1.3 中的 B 处所示,这种现象称为本征激发。

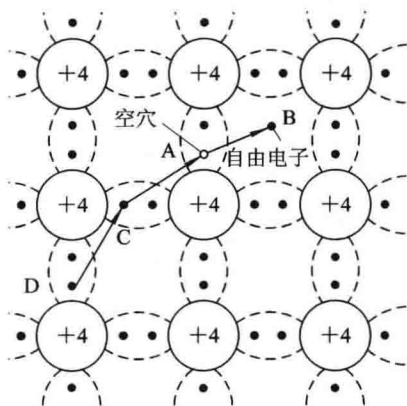


图 1.1.3 本征激发现象

1) 空穴

当电子挣脱共价键的束缚成为自由电子后,就同时原来的共价键的相应位置上留下一个空位,这个空位称为空穴,如图 1.1.3 所示。其中 A 处为空穴, B 处为自由电子。

空穴的出现是半导体区别于导体的一个重要特点。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。

2) 两种载流子

本征激发产生的自由电子,将在电场作用下定向运动形成电流,因此它构成本征半导体中的一种载流子,即电子载流子。下面讨论空穴在电场作用下的情况。

由于共价键中出现了空穴,在外加电场或其他能源的作用下,邻近价电子就可填补到这个空位中来,而该价电子原来所在的位置上就留下一个新的空位,以后其他电子有可能转移到这个新的空位。这样就在共价键中出现了一定的电荷迁移。

在图 1.1.3 中,设外加电场的方向为从右至左,若 A 处出现一个空位, C 处电子就可填补到这个空位中来,从而使空穴从 A 处移到 C 处;同样,邻近的 D 处的电子又可以填补 C 处的空穴,空穴又从 C 处移到 D 处。在这个过程中,价电子由 D 处到 C 处再到 A 处,虽然可以移动,但仍处于束缚状态。价电子填补空穴的运动,可以等效为带正电荷的空穴在向与价电子运动相反的方向运动。为了区别于自由电子的运动,通常把这种价电子的填补运动称为空穴运动,认为空穴是一种带正电荷的载流子,它所带的电量与电子电量相等,符号相反。这里不说价电子的运动而说是空穴的运动是因为本征半导体的导电能力只取决于电子空穴对的多少,而与价电子多少无关。在电场作用下,并非所有的价电子都参与导电,而只是少量价电子在共价键中依次填补运动才起导电作用。

可见,在本征半导体中存在两种载流子,带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。需要特别指出的是,金属导体中只有一种载流子,即电子载流子,这是二者的一个重要区别。

必须指出的是,在本征激发产生电子空穴对的同时,自由电子在运动中因能量的损失有可能和空穴相遇,重新被共价键束缚起来,电子空穴对消失,这种现象称为“复合”。显然,在一定的温度下,激发和复合都在不停地进行,但最终将处于动态平衡状态,这时半导体中的载流子浓度保持在某一定值。

由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少,载流子浓度很低,因此,本征半导体的导电能力很弱。

2. 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就会使半导体的导电性能发生显著改变。根据掺入杂质的化合价不同,杂质半导体分为 N 型和 P 型两大类。

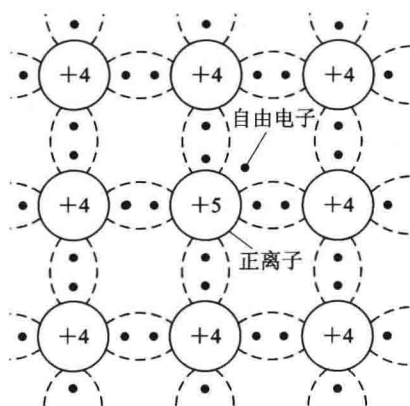
1) N 型半导体

在 4 价元素的硅(或锗)晶体中,掺入微量的 5 价元素磷(或砷、锑等)后,磷原子将散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。磷原子有 5 个价电子,它以 4 个价电子与周围的硅原子组成共价键,多余的一个价电子处于共价键之外。由于这个价电子不受共价键的束缚,因此使杂质磷的原子变成带正电荷的离子,如图 1.1.4(a)所示。由于这种杂质原子可以提供电子,因此称为施主原子(donor atom)。施主原子的数目虽然不多,但在室温下每掺入一个施主原子,都能产生一个自由电子和一个正离子,自由电子则成为该杂质半导体主要的导电载流子。值得注意的是,正离子被束缚在晶体点阵中,不能自由移动,对半导体的导电毫无作用。显然,掺入的杂质越多,杂质半导体的导电性能越好。

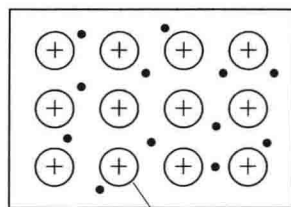
通常,掺杂所产生的自由电子浓度远大于本征激发所产生的自由电子或空穴的浓度,所以杂质半导体的导电性能远超过本征半导体。显然,这种半导体中自由电子浓度远大于

空穴浓度，所以称电子为多数载流子(majority carrier)，简称多子，空穴为少数载流子(minority carrier)，简称少子。因为这种半导体的导电主要依靠电子，所以称为 N 型半导体或电子型半导体。

不难理解，N 型半导体总体上仍为电中性，其多子(电子)的浓度取决于所掺杂质的浓度，而少子(空穴)是由本征激发产生的，因此它的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 N 型半导体导电特性的主要特征，通常把 N 型半导体画成如图 1.1.4(b)所示的简化形式，其中的自由电子和正离子总是成对出现，当然，在某些场合还需要考虑 N 型半导体受热激发而产生的少子的影响。



(a) 结构示意图



(b) 离子和载流子(不计本征激发)

图 1.1.4 N 型半导体

2) P 型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入微量的 3 价元素硼(或铝、镓等)后，杂质原子也散布于硅原子中，且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。由于硼原子只有 3 个价电子，它与周围的硅原子组成共价键时，因缺少一个电子而产生一个空位，在室温下它很容易吸引邻近硅原子的价电子来填补，于是杂质原子变为带负电荷的离子，而邻近硅原子的共价键因缺少一个电子，出现了一个空穴，如图 1.1.5(a)所示。由于这种杂质原子能吸收电子，因此称为受主原子。受主负离子不能移动，也不参与导电，只有空穴才对杂质半导体的导电做贡献。同样，掺入的杂质越多，这种杂质半导体的导电性能越好。

在常温下，每掺入一个受主原子，都能产生一个空穴和一个负离子。在这种半导体中，空穴是多子，自由电子是少子，它的导电主要依靠空穴，因此称为 P 型半导体或空穴型半导体。与 N 型半导体类似，P 型半导体总体上也是电中性的，其多子(空穴)的浓度取决于所掺杂质的浓度，少子(电子)的浓度与温度或光照密切相关。为了突出 P 型半导体导电特性的主要特征，通常把 P 型半导体画成如图 1.1.5(b)所示的简化形式，它的空穴和负离子总是成对地出现，当然，在某些场合还需要考虑 P 型半导体受热激发而产生的少子的影响。

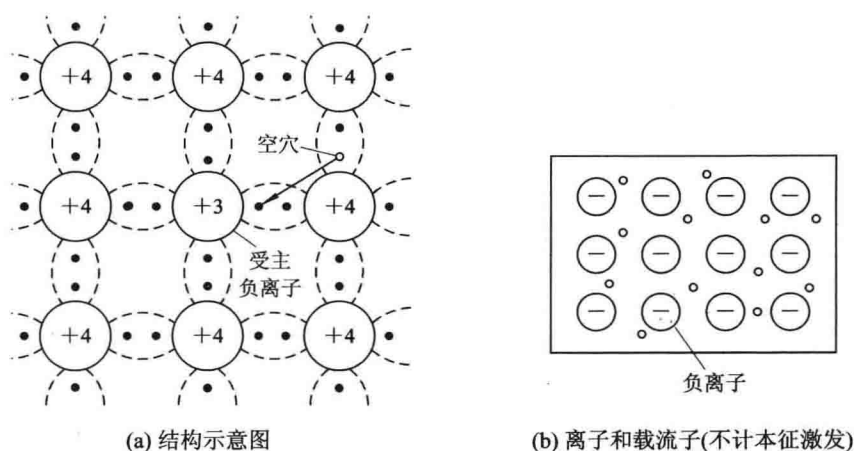


图 1.1.5 P 型半导体

关于掺杂的概念在这里还可以有一些引申。如果半导体中的同一区域既有施主杂质，又有受主杂质，则其导电类型(N型还是P型)取决于浓度大的杂质。因此，N型半导体中若掺入浓度更大的受主杂质，则将变为P型半导体，反之亦然。这种因杂质的相互作用而改变半导体类型的过程，称为杂质补偿，它在半导体器件的制造中得到广泛应用。

1.2 PN 结

1.2.1 PN 结的形成

当P型半导体与N型半导体结合后，在交界处两侧就出现了电子和空穴的浓度差别，即N区的电子多空穴少，而P区内则相反，空穴多电子少。这样，N区的电子必然向P区扩散，P区的空穴也要向N区扩散，这种由于浓度差产生的自然扩散力(方向为高浓度区指向低浓度区)所引起的运动称为扩散运动，如图1.2.1(a)所示。由于电子和空穴都是带电粒子，因此扩散的结果使P区和N区原来的电中性被破坏，于是在交界处附近，N区的一侧出现不能移动的杂质正离子区，P区的一侧出现不能移动的杂质负离子区，这些不能移动的带电离子区称为空间电荷区，这就是所谓的PN结，如图1.2.1(b)所示。由于空间电荷区内多数载流子已扩散到对方区域并被复合掉，或者说耗尽了，因此空间电荷区又称为耗尽层或耗尽区，它的电阻率很高。

出现空间电荷区的同时，也产生了一个由N区指向P区的电场，这个电场不是外加的，而是空间电荷区内部电荷产生的，因此称为内电场。显然，内电场阻止多子的扩散，即对多子的扩散起着类似堡垒的阻挡作用，因此空间电荷区又称为势垒区或阻挡层。但另一方面，内电场却使少子在电场力的作用下产生与扩散运动方向相反的运动，通常把这种在电场力的作用下载流子所产生的运动称为漂移运动(drift moving)。因此，交界处两侧同时存在扩散和漂移这两种相反的运动。容易理解，当扩散和漂移运动处于动态平衡状态时，空间电荷区的宽度基本保持不变，且扩散电流与漂移电流大小相等，方向相反，因此流过PN结的总电流为零。

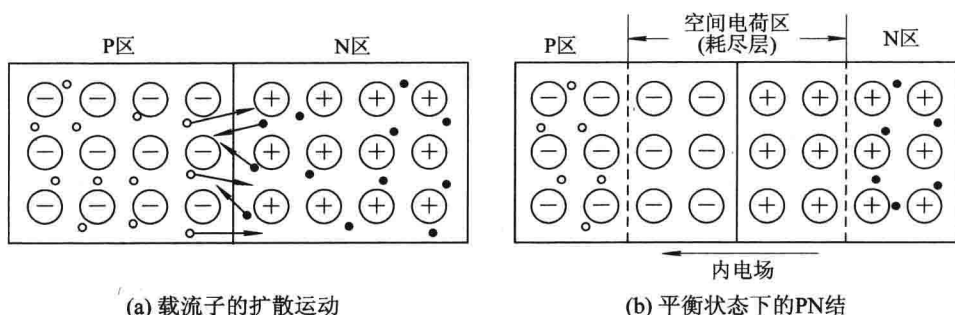


图 1.2.1 PN 结的形成

PN 结的空间电荷区存在电场, 即有电位差, 通常称该电位差为内建电位差或接触电位差, 其值约为零点几伏。

1.2.2 PN 结的单向导电性

若在 PN 结两端接上外接电源, 则 PN 结原来的平衡状态将被打破, 这种情况被称为偏置, 相应的外接电源被称为偏置电源。PN 结的 P 区接电源正极、N 区接电源负极的接法称为正向接法或正向偏置, 简称正偏; PN 结的 P 区接电源负极、N 区接电源正极的接法称为反向接法或反向偏置, 简称反偏。正偏和反偏的接法分别如图 1.2.2 所示, 其中的电阻 R 为限流电阻。

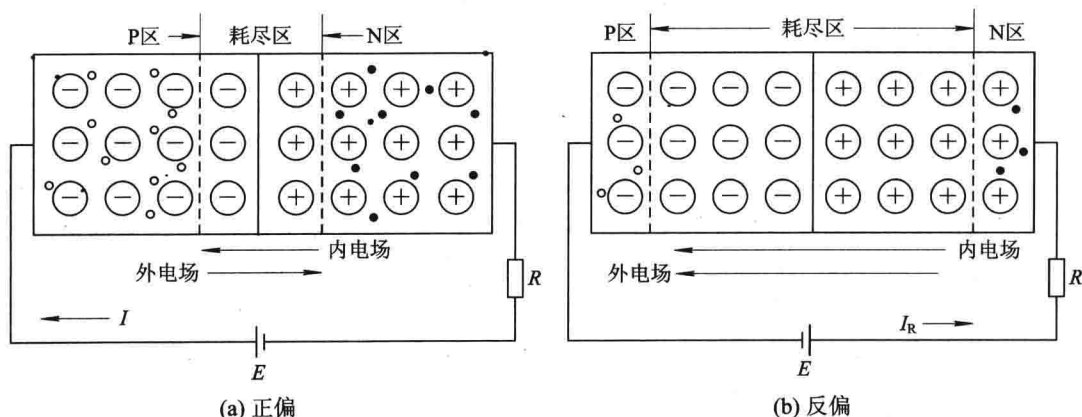


图 1.2.2 外加电压时的 PN 结

如图 1.2.2(a)所示, 正偏时, 外加电场与内电场的方向相反, 内电场被削弱, PN 结的原有平衡状态被打破。这时扩散运动将增强, 而漂移运动将减弱, 由于多子的数量多, 因此可以形成较大的由多子扩散而产生的电流; 少子的数量少, 由少子漂移而产生的电流很小, 可以忽略不计。通常把正偏时 PN 结流过的电流称为正向电流 I , 其方向由 P 区指向 N 区。

由于正偏时正向电流较大, PN 结对外电路呈现较小的电阻, 所以这种状态称为 PN 结的导通 (cut in)。

如图 1.2.2(b)所示, 反偏时, 外加电场与内电场的方向相同, 内电场被增强, PN 结的

原有平衡状态被打破。这时漂移运动将增强，而扩散运动将减弱。虽然多子的数量多，但由于此时扩散运动很难进行，因此由多子扩散而产生的电流几乎为零；而少子的数量少，尽管漂移运动增强了，但是由少子漂移而产生的电流仍然很小。通常把反偏时 PN 结流过的电流称为反向电流 I_R ，其方向由 N 区指向 P 区。

由于反偏时反向电流很小，PN 结对外电路呈现较高的电阻，这种状态称为 PN 结的截止。

由于 PN 结的反向电流是由本征激发产生的少子的漂移电流，其浓度很低，只要外加不大的反向电压(零点几伏以上)即可导致所有的少子都参与导电，此时若增加反向电压，则反向电流几乎保持不变，因此称为反向饱和电流，用 I_{sat} 表示。 I_{sat} 很小，约为几纳安到几微安。不难理解， I_{sat} 受温度影响较大。

简而言之，PN 结正向导通、反向截止，这就是 PN 结的单向导电性。PN 结的单向导电性即为二极管的单向导电性。

1.3 半导体二极管

1.3.1 二极管的结构与符号

常用的普通二极管的外形图及封装形式如图 1.3.1 所示。

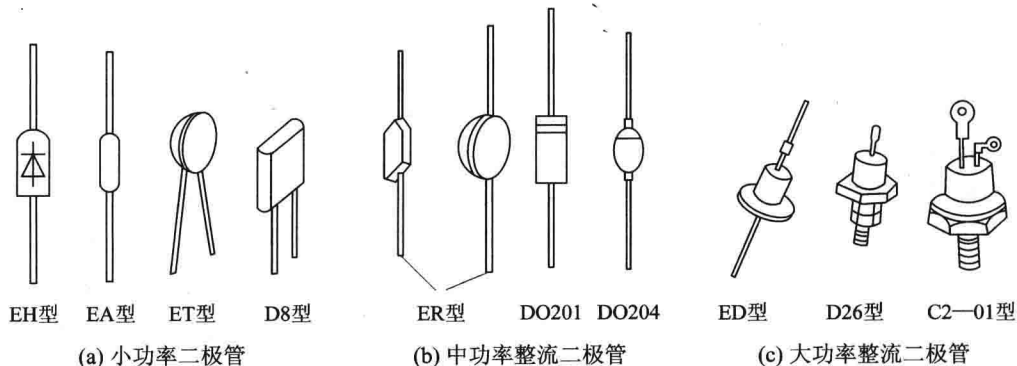


图 1.3.1 各种普通二极管外形图及封装形式

二极管的基本结构如图 1.3.2(a)所示。其核心组成部分管芯由 P 型半导体和 N 型半导体相互紧密结合所构成。为了使二极管能与外部电路进行可靠连接，需要在 P 区和 N 区两端引出电极引线或贴片焊接区(贴片元器件)，并加以封装(管壳)。二极管的电路符号如图 1.3.2(b)所示，其箭头方向表示正向电流的方向，即由阳极指向阴极的方向。

二极管种类很多，按所用的半导体材料可分为硅管(大部分采用)和锗管；按功能可分为整流管、开关管、稳压管、变容管、发光管和光电(敏)管等，其中整流管和开关管统称为普通二极管，其他则统称为特殊二极管；按工作电流大小可分为小电流管和大电流管；按耐压高低可分为低压管和高压管；按工作频率高低可分为低频管和高频管等。具体型号及选择可查阅有关手册。