



教育部职业教育与成人教育司推荐教材
(五年制) 高等职业教育电子信息类教学用书

21世纪高职高专系列规划教材

模拟电子技术

主 编 曹天汉 刘树林

副主编 肖春芳



北京师范大学出版社

教育部职业教育与成人教育司推荐教材
21世纪高职高专系列规划教材

模拟电子技术

主 编 曹天汉 刘树林
副主编 肖春芳

 北京师范大学出版社

内容简介

本教材是为高等职业技术教学或相应层次的教学而编写的。在编写方法上充分考虑了高职教学的特点,从基础入手,循序渐进,条理清楚,举例丰富,十分便于知识点的理解和掌握;在知识点的编排上以应用性为目的,避免了过于烦琐的数学推导,摒弃了在应用上和科学技术的发展上显得没有必要再写入教材的内容,从而精练了理论知识,突出了学习模拟电子技术的应知应会,使教材既精练实用又不会有缺失感。全书共分为8章:半导体器件、基本放大电路原理及分析、放大电路中的负反馈、集成运算放大器及其应用、信号发生电路、功率放大电路、直流电源、电子线路读图。本书为便于实践教学,在每章后面还编了相应的具有可操作性的实训内容。

本书可作为高等职业技术学院模拟电子技术教学用书,也可供工程技术人员或专、本科学学生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/曹天汉,刘树林编. —北京:北京师范大学出版社,2005.8
(21世纪高职高专系列规划教材)
ISBN 7-303-07660-3

I. 模… II. ①曹…②刘… 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(2005)第 086360 号

北京师范大学出版社出版发行
(北京新街口外大街 19 号 邮政编码:100875)

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

出版人:赖德胜

北京京师印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:185 mm×260 mm 印张:17.75 字数:357 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~5 000 定价:25.00 元

出版说明

随着我国经济建设的发展,社会对技术型应用人才的需求日趋紧迫,这也促进了我国职业教育的迅猛发展,我国职业教育已经进入了平稳、持续、有序地发展阶段。为了适应社会对技术型应用人才的需求和职业教育的发展,教育部对职业教育进行了卓有成效的改革,职业教育与成人教育司、高等教育司分别颁布了调整后的中等职业教育、高等职业教育专业设置目录,为职业学校专业设置提供了依据。教育部连同其他五部委共同确定数控技术应用、计算机应用与软件技术、汽车运用与维修、护理等四个专业领域为紧缺人才培养专业,选择了上千家高职、中职学校和企业作为示范培养单位,拨出专款进行扶持,力争培养一批具有较高实践能力的紧缺人才。

职业教育的快速发展,也为职业教材的出版发行迎来了新的春天和新的挑战。教材出版发行为职业教育的发展服务,必须体现新的理念、新的要求,进行必要的改革。为此,在教育部高等教育司、职业教育与成人教育司、北京师范大学等的大力支持下,北京师范大学出版社在全国范围内筹建了“全国职业教育教材改革与出版领导小组”,集全国各地上百位专家、教授于一体,对中等职业、高等职业文化基础课、专业基础课、专业课教材的改革与出版工作进行深入地研究与指导。2004年8月,“全国职业教育教材改革与出版领导小组”召开了“全国有特色高职教材改革研讨会”,来自全国20多个省、市、区的近百位高职院校的院校长、系主任、教研室主任和一线骨干教师参加了此次会议。围绕如何编写出版好适应新形势发展的高等职业教育教材,与会代表进行了热烈的研讨,为新一轮教材的出版献计献策。这次会议共组织高职教材50余种,包括文化基础课、电工电子、数控、计算机教材。其特点如下:

1. 紧紧围绕教育改革,适应新的教学要求。教育部等六部委联合发文确定紧缺型人才培养战略,并明确提出了高等职业教育将从3年制逐渐向2年制过渡。过渡时期具有新的教学要求,这批教材是在教育部的指导下,针对过渡时期教学的特点,以2年制为基础,兼顾3年制,以“实用、够用”为度,淡化理论,注重实践,消减过时、用不上的知识,内容体系更趋合理。

2. 教材配套齐全。将逐步完善各类专业课、专业基础课、文化基础课教

材,所出版的教材都配有电子教案,部分教材配有电子课件和实验、习题指导。

3.教材编写力求语言通俗简练,讲解深入浅出,使学生在理解的基础上学习,不囫圇吞枣,死记硬背。

4.教材配有大量的例题、习题、实训,通过例题讲解、习题练习、实验实训,加强学生对理论的理解以及动手能力的培养。

5.反映行业新的发展,教材编写注重吸收新知识、新技术、新工艺。

北京师范大学出版社是教育部职业教育教材出版基地之一,有着近20年的职业教育教材出版历史,具有丰富的编辑出版经验。这批高职教材是针对2/3年制编写的,同时也向教育部申报了“2004—2007年职业教育教材开发编写规划”,部分教材通过教育部审核,被列入职业教育与成人教育司5年制高职推荐教材。我们还将开发电子信息类的通信、机电、电气、计算机等其他专业,以及工商管理、财会等方面教材,希望广大师生积极选用。

教材建设是一项任重道远的工作,需要教师、专家、学校、出版社、教育行政部门的共同努力才能逐步获得发展。我们衷心希望更多的学校、更多的专家加入到我们的教材改革出版工作中来,北京师范大学出版社职业与成人教育事业部全体人员也将备加努力,为职业教育的改革与发展服务。

全国职业教育教材改革与出版领导小组
北京师范大学出版社

参加教材编写的单位名单

(排名不分先后)

沈阳工程学院	常州轻工职业技术学院
山东劳动职业技术学院	河北工业职业技术学院
济宁职业技术学院	太原理工大学轻纺学院
辽宁省交通高等专科学校	浙江交通职业技术学院
浙江机电职业技术学院	保定职业技术学院
杭州职业技术学院	绵阳职业技术学院
西安科技大学电子信息学院	北岳职业技术学院
西安科技大学机械学院	天津职业大学
天津渤海职业技术学院	北京轻工职工职业技术学院
天津渤海集团公司教育中心	石家庄信息工程职业学院
连云港职业技术学院	襄樊职业技术学院
景德镇高等专科学校	九江职业技术学院
徐州工业职业技术学院	青岛远洋船员学院
广州大学科技贸易技术学院	无锡科技职业学院
江西信息应用职业技术学院	广东白云职业技术学院
浙江商业职业技术学院	三峡大学职业技术学院
内蒙古电子信息职业技术学院	西安欧亚学院实验中心
济源职业技术学院	天津机电职业技术学院
河南科技学院	漯河职业技术学院
苏州经贸职业技术学院	济南市高级技工学校
浙江工商职业技术学院	沈阳职业技术学院
温州大学	江西新余高等专科学校
四川工商职业技术学院	赣南师范学院

前 言

作为电子类专业的一门重要的专业基础课,模拟电子技术是每个电子类专业的必修课程,同时这方面的书籍和教材也琳琅满目,层出不穷。

高等职业技术教育有着自己的特殊性,随着我国高等职业技术教育的迅速发展,广大从事高职教学的教师越来越感到现有的教学用书与高职学生的认知特点和培养目标不适应,总希望能找到一本适合高职学生的得心应手的教材来施教,让学生看得懂,教师教得顺,这也是我们编写这本教材所希望达到的目的。

本书在编写过程中遵循以下几条原则:

1. 在教材内容的选取上以有用为标准,而不以难易为标准。只要是生产实践中应知的内容,即使学生感到学起来有些困难,我们也要编入。

2. 避免过于烦琐的数学推导,摒弃了在应用上和科学技术的发展上显得已没有必要再写入教材的内容,从而精练了理论,突出了应知应会。

3. 在内容的编排上倾向于知识的模块化。比如,我们把半导体的二极管、三极管和场效应管作为第1章半导体器件,而把传统的基本放大电路、多级放大电路、放大电路的频率响应、差动放大电路和场效应管放大电路等章合并为第2章基本放大电路原理及分析。这种如计算机中建立文件夹的方法,使学生学起来目的明确,不会产生杂乱的感觉,增加了可读性。

4. 各章知识点的阐述条理清楚,重点突出,符合高职学生的认知特点。语言上既保证了教材的严密性,又力求学生读得懂、学得进。

5. 对每章结束后编写的实训内容,要考虑各院校的实验条件,力求可操作性,使授课教师有条件来实施实训教学。

本教材由杭州职业技术学院曹天汉老师统稿并编写了第1、2章,西安科技大学刘树林老师编写了第3、4、7章,三峡大学职业技术学院肖春芳老师编写了第5、6、8章。在编写过程中也得到了杭州职业技术学院张雪娟、李凡等老师的大力支持,在此一并致以谢意。

由于编者水平有限,书中难免存在不尽如人意的地方,也可能存在一些缺点和错误,敬请各位读者批评指正。

编 者

2005年4月于杭州

目 录

第 1 章 半导体器件	(1)
1.1 半导体基础	(1)
1.1.1 纯净的半导体	(1)
1.1.2 杂质半导体	(3)
1.1.3 PN 结及其单向导电性	(4)
1.2 半导体二极管	(6)
1.2.1 半导体二极管结构及其伏安特性	(6)
1.2.2 半导体二极管的参数	(8)
1.3 半导体二极管的应用	(9)
1.3.1 二极管的线性化处理	(9)
1.3.2 普通二极管及其应用	(13)
1.3.3 其他特殊用途的二极管	(15)
1.4 双极型半导体三极管	(17)
1.4.1 双极型半导体三极管的结构、符号及电流放大作用	(17)
1.4.2 三极管的共发射极伏安特性	(19)
1.4.3 双极型半导体三极管的参数	(22)
1.4.4 双极型半导体三极管的线性化处理	(25)
1.5 单极型半导体三极管	(28)
1.5.1 单极型半导体三极管的结构、符号及其工作原理和特性曲线	(29)
1.5.2 单极型半导体三极管的线	

性化处理	(36)
1.5.3 单极型半导体三极管的参数	(37)
本章小结	(38)
习题与思考题	(39)
实训 1 二极管、三极管的检测与应用	(43)
第 2 章 基本放大电路原理及分析	(45)
2.1 放大电路的基本知识	(45)
2.1.1 放大电路的组成	(45)
2.1.2 放大电路的主要性能指标	(46)
2.2 基本放大电路及其基本分析方法	(50)
2.2.1 基本共发射极放大电路的组成及分析	(50)
2.2.2 稳定静态工作点放大电路的组成及分析	(61)
2.2.3 射极输出电路的组成及工作原理	(66)
2.2.4 共基极放大电路的组成及工作原理	(70)
2.3 放大电路的频率特性	(73)
2.3.1 频率特性的基本概念	(73)
2.3.2 放大电路频率特性的分析	



方法	(74)	3.1.1 反馈的基本概念	(119)
2.3.3 三极管的频率特性	(78)	3.1.2 反馈的方框图及一般表达式	(120)
2.3.4 单管共射极放大电路的频率特性	(82)	3.2 负反馈放大电路的基本类型及判别方法	(121)
2.4 多级放大电路	(88)	3.2.1 正反馈和负反馈	(122)
2.4.1 多级放大电路的组成及耦合方式	(88)	3.2.2 直流反馈和交流反馈 ...	(123)
2.4.2 多级放大电路技术指标的估算	(89)	3.2.3 电压反馈和电流反馈 ...	(123)
2.4.3 多级放大电路的频率响应	(91)	3.2.4 串联反馈和并联反馈 ...	(124)
2.5 差动放大电路	(92)	3.2.5 负反馈的四种组态	(124)
2.5.1 差动放大电路的组成及分析	(92)	3.3 负反馈对放大电路性能的影响	(127)
2.5.2 差动放大电路的几种输入、输出方式	(97)	3.3.1 提高放大倍数的稳定性	(127)
2.5.3 采用恒流源的差动放大电路	(99)	3.3.2 改变放大电路的输入和输出电阻	(127)
2.6 场效应管放大电路 ...	(104)	3.3.3 减小放大电路的非线性失真	(128)
2.6.1 自给偏压共源极放大电路	(104)	3.3.4 展宽放大电路的频带 ...	(129)
2.6.2 分压式自偏压共源极放大电路	(105)	3.4 深度负反馈放大电路的分析估算	(129)
2.6.3 共漏极放大电路	(107)	3.4.1 深度负反馈的条件	(130)
本章小结	(108)	3.4.2 放大电路在深度负反馈条件下的分析估算	(130)
习题与思考题	(109)	3.5 负反馈放大电路的稳定性	(134)
实训2 单管放大电路的静态和动态测试	(113)	3.5.1 负反馈放大电路自激振荡的产生	(134)
实训2.1 单管放大电路的静态测试	(113)	3.5.2 消除自激振荡的措施 ...	(135)
实训2.2 单管放大电路的动态测试	(115)	本章小结	(136)
第3章 放大电路中的反馈	(119)	习题与思考题	(136)
3.1 反馈的基本概念和本关系式	(119)	实训3 负反馈放大电路	(139)
		第4章 集成运算放大器及其应用	(141)

4.1 集成运算放大器的组成及主要技术指标	(141)
4.1.1 集成电路及其分类	(141)
4.1.2 集成运算放大器的基本组成及符号	(143)
4.1.3 集成运算放大器的主要技术指标	(144)
4.2 基本运算电路	(146)
4.2.1 理想运算放大器	(146)
4.2.2 理想运算放大器在线性区的应用	(147)
4.2.3 理想运算放大器在非线性区的应用	(154)
4.3 有源滤波电路	(160)
4.3.1 滤波电路的种类和用途	(160)
4.3.2 有源低通滤波电路	(161)
4.3.3 有源高通滤波电路	(163)
4.3.4 有源带通滤波电路	(164)
4.4 集成运放应用需注意的几个问题	(166)
4.4.1 集成运放参数的测试	(166)
4.4.2 集成运放使用中可能出现的问题	(166)
4.4.3 集成运放的保护	(167)
本章小结	(168)
习题与思考题	(170)
实训4 集成运算放大器的参数测试和基本应用	(171)
实训4.1 集成运算放大器参数测试	(171)
实训4.2 集成运算放大器的基本应用	(174)
第5章 信号发生电路	(178)
5.1 正弦波振荡电路的组	

成及产生振荡的条件	(178)
5.1.1 正弦波振荡电路的基本组成	(178)
5.1.2 产生正弦波振荡的条件	(179)
5.2 LC 正弦波振荡电路	(181)
5.2.1 LC 并联回路的选频特性	(181)
5.2.2 变压器反馈式 LC 正弦波振荡电路	(183)
5.2.3 电感三点式振荡电路	(183)
5.2.4 电容三点式振荡电路	(184)
5.3 石英晶体正弦波振荡电路	(186)
5.3.1 石英晶体的基本特性与等效电路	(186)
5.3.2 石英晶体振荡电路	(187)
5.4 非正弦波形发生电路	(188)
5.4.1 矩形波发生电路	(188)
5.4.2 三角波发生电路	(189)
5.4.3 锯齿波发生电路	(190)
5.4.4 集成波形发生器介绍	(191)
本章小结	(193)
习题与思考题	(194)
实训5 RC 与 LC 正弦波振荡器	(197)
实训5.1 RC 正弦波振荡器	(197)
实训5.2 LC 正弦波振荡器	(198)
第6章 低频功率放大电路	(202)
6.1 功率放大电路的特点	(202)



6.2 互补对称功率放大电路	(203)	7.3.3 单相桥式可控整流电路	(229)
6.2.1 功率放大电路的工作状态	(203)	7.4 滤波电路	(231)
6.2.2 乙类双电源互补对称功率放大电路	(204)	7.4.1 电容滤波电路	(231)
6.2.3 甲乙类互补对称功率放大电路	(206)	7.4.2 几种其他形式的滤波电路	(233)
6.2.4 单电源供电的互补对称功率放大电路	(207)	7.5 直流稳压电路	(234)
6.3 集成功率放大电路	(208)	7.5.1 稳压电路的主要技术指标	(235)
6.3.1 集成功率放大电路概述	(208)	7.5.2 稳压管稳压电路	(235)
6.3.2 几种常用集成功率放大器简介	(209)	7.5.3 串联型稳压电路	(238)
本章小结	(212)	7.5.4 三端集成稳压器	(240)
习题与思考题	(212)	7.6 开关稳压电源	(242)
实训6 OTL功率放大电路与集成功率放大器	(214)	7.6.1 开关稳压电源的组成和工作原理	(243)
实训6.1 OTL功率放大电路	(214)	7.6.2 实用开关电源简介	(245)
实训6.2 集成功率放大器	(217)	本章小结	(248)
第7章 直流电源	(220)	习题与思考题	(250)
7.1 直流电源的组成	(220)	实训7 串联型直流稳压电源和三端集成稳压器	(253)
7.2 单相整流电路	(221)	实训7.1 串联型直流稳压电源	(253)
7.2.1 整流电路的基本参数	(221)	实训7.2 三端集成稳压器的测试与应用	(254)
7.2.2 单相半波整流电路	(221)	第8章 电子线路读图	(258)
7.2.3 单相全波整流电路	(222)	8.1 读图方法	(258)
7.2.4 单相桥式整流电路	(223)	8.1.1 读图的一般方法	(258)
7.3 单相可控整流电路	(225)	8.1.2 读图步骤	(258)
7.3.1 晶闸管	(225)	8.2 读图举例	(259)
7.3.2 单相半波可控整流电路	(228)	本章小结	(264)
		习题与思考题	(265)
		附录	(267)
		参考文献	(269)

第1章 半导体器件

本章提要

纯净的半导体和杂质半导体;
PN 结的形成及其单向导电性;
半导体二极管的结构及伏安特性;
半导体二极管的应用举例;
双极型半导体三极管的结构及电流放大作用;
双极型半导体三极管的共发射极伏安特性及主要参数;
双极型半导体三极管的线性化处理;
单极型半导体三极管即场效应管(Field Effect Transistor, 缩写为 FET)。

1.1 半导体基础

1.1.1 纯净的半导体

我们把导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体,半导体的导电机理与金属导体是有所不同的。在自然界中属于半导体的物质很多,但在大多数半导体器件中,常采用的是硅和锗两种半导体材料。

半导体的导电性能是由其原子结构决定的,它们都是四价元素,在它们原子结构中的最外层轨道上都有四个电子(称为价电子)。由于物质的化学性质和导电性能与价电子均有很大的关系,所以在研究半导体的导电性能时,为突出价电子的作用,常采用图 1.1 所示的原子结构模型,内圈和圈中的+4 表示内层的电子和原子核所带电荷的代数和,外圈及其圈上的 4 个点表示最外层轨道及轨道上的 4 个电子,整个原子呈中性。

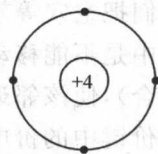


图 1.1 半导体材料原子结构

纯净的半导体又称本征半导体。在其单晶结构中,原子是有序排列的,原子之间的距离很近,所以每个价电子不只受到其原子核的作用,还受到相邻原子核的吸引,



成为相邻的原子核所共有,从而形成了如图 1.2 所示的所谓的共价键结构。

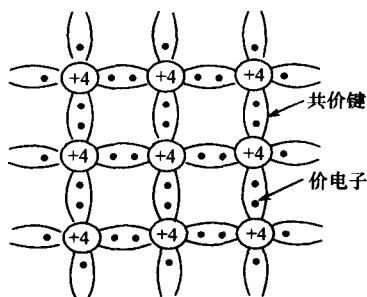


图 1.2 本征半导体中的共价键结构

共价键中的价电子受共价键的束缚,由于晶体中的共价键具有很强的结合力,所以在热力学零度(-273.16°C)时,价电子没有足够的能量来脱离共价键的束缚。在这种情况下,晶体中就不能产生能自由运动的带电粒子,因此半导体也就不能导电。

在室温或光照下,少数价电子因受热激发而获得足够的能量,它们摆脱了共价键的束缚,由束缚电子变成了自由电子,同时在原来的共价键中留下了一个空位,我们把这个空位称为空穴,把这种现象称为本征激发。本征激发产生了自由电子-空穴对,如图 1.3 所示。

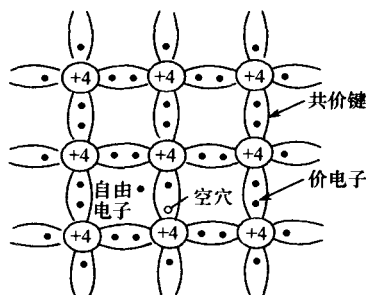


图 1.3 本征激发产生电子-空穴对

我们把自由电子称做带负电的粒子,而对于空穴,因原子失去价电子后带正电,所以我们将空穴等效看成是带正电的粒子。自由电子是能自由运动的,空穴在共价键结构中是不能移动的,但空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子来填补(这种现象称为复合),使该邻近价电子原来所在的共价键中产生空穴,这个空穴又可以吸引其相邻共价键中的价电子来填补,从而产生空穴的转移。这种价电子填补空穴的运动可以看成是空穴在做与价电子运动方向相反的运动。

在电场的作用下,带负电的自由电子做定向的运动形成电子电流,带正电的空穴做定向的运动(即价电子做定向的填补空穴运动)形成空穴电流。我们称自由电子和空穴为载流子,把它们在电场作用下的运动称为漂移运动,所产生的电子电流和空穴电流称为漂移电流。

综上所述,半导体与金属导体的导电机理是有所不同的。半导体中存在两种载

流子,一种是带负电荷的自由电子,还有一种是带正电荷的空穴。在电场的作用下,半导体中两种载流子参与导电产生两种电流,一种是自由电子形成的电子电流,还有一种是空穴形成的空穴电流,按电流方向的规定,它们的方向是相同的。

在常温下,因本征激发产生的载流子浓度很低,本征半导体在电场作用下产生的电流很小,所以说它的导电能力是很弱的。

1.1.2 杂质半导体

研究发现,在本征半导体中掺入微量的其他元素就会使半导体中载流子的浓度大大增加,从而使半导体的导电性能发生显著提高。我们把掺入的其他微量元素称为杂质,掺入微量其他元素的半导体称为杂质半导体。按掺入微量元素的种类不同,杂质半导体分为N型半导体和P型半导体两种。

1. N型半导体

在有四个价电子的四价元素(硅或锗)晶体中掺入有五个价电子的五价元素(如磷、砷、锑等)后,五价元素的原子中的四个价电子与其周围的四价元素的原子中的四个价电子结合成共价键,还多余一个价电子在共价键之外。这个价电子受五价元素原子的束缚较弱,在室温下就可以挣脱束缚被激发成自由电子,而这个五价元素的原子因脱离了一个电子而变成带正电的离子,掺入多少个杂质原子就可激发多少个自由电子,使这种杂质半导体中的自由电子的浓度大大增加。这时由于自由电子的增加,又使杂质半导体中原先由本征激发所产生的空穴被电子填补复合的机会增多,造成空穴浓度减少。

因此,在N型半导体中,自由电子的浓度远大于空穴的浓度,我们称自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子。这种杂质半导体主要以自由电子导电,产生电子电流。N型半导体的示意图如图1.4所示。

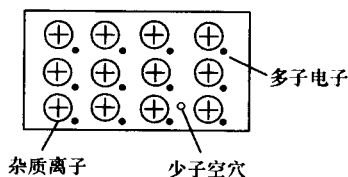
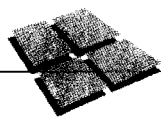


图 1.4 N型半导体

2. P型半导体

在有四个价电子的四价元素(硅或锗)晶体中掺入有三个价电子的三价元素(如硼、铝、镓等)后,三价元素的原子中的三个价电子与其周围的四价元素的原子中的三个价电子结合成共价键时,因缺少一个价电子而在共价键中产生一个空穴。这个空穴在室温下极容易吸引邻近共价键中的价电子来填补,使这个三价元素的原子因吸引了一个电子而变成带负电的离子,掺入多少个杂质原子就可产生多少个空穴,使这种杂质半导体中的空穴的浓度大大增加。这时由于空穴的增加,又使杂质半导体中原先由本征激发所产生的自由电子被空穴吸引复合的机会增多,造成自由电子浓度减少。

因此,在P型半导体中,空穴的浓度远大于自由电子的浓度。我们称空穴为多数载流子,自由电子为少数载流子,这种杂质半导体主要以空穴导电,产生空穴电流。P



型半导体的示意图如图 1.5 所示。

注意几点：

(1) 杂质离子虽然带电荷，但它们在晶体结构中是不能移动的，它们不是载流子；杂质半导体中虽然有一种载流子是多数载流子，但整个杂质半导体中正负电荷平衡，是电中性的。

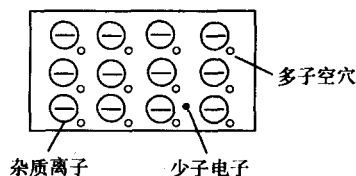


图 1.5 P 型半导体

(2) 杂质半导体的导电性能主要决定于多数载流子的浓度，多数载流子是由掺杂产生的，它在两种杂质半导体中浓度大且稳定，使半导体的导电性得以显著改善。少数载流子是本征激发产生的电子-空穴对，本征激发与温度有关，所以少数载流子虽然浓度很小，但其浓度随温度的变化而变化，这种不稳定性会影响半导体器件的性能。

1.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结

在同一块半导体的基片(如硅片)上采用不同的掺杂工艺，可使其一边形成 N 型半导体(N 区)，另一边形成 P 型半导体(P 区)，两种类型半导体之间形成一个界面。P 型半导体和 N 型半导体界面两侧的两种多数载流子的浓度差别会产生扩散力，所以 P 区的多数载流子空穴从高浓度的 P 区向低浓度的 N 区运动，而 N 区的多数载流子自由电子会从高浓度的 N 区向低浓度的 P 区运动，我们把这种运动称为扩散运动。扩散运动产生的电流称为扩散电流，尽管两种载流子的扩散运动方向相反，但根据电流方向的规定，两种多数载流子的扩散所产生的扩散电流的方向是相同的。

P 区的空穴扩散到交界面的 N 区一侧，与 N 区的电子复合，载流子消失；N 区的电子扩散到交界面的 P 区一侧，与 P 区的空穴复合，载流子消失。结果使界面附近的多数载流子的浓度骤然下降，出现了由不能移动的带电离子组成的区域。由于 P 区一侧为负离子区，N 区一侧为正离子区，所以同时也形成了一个从 N 区指向 P 区的电场。这个电场称为内电场，这个区域称为空间电荷区，即形成了所谓的 PN 结。

扩散运动产生空间电荷区的同时也产生内电场。从内电场方向可以看出，这个电场不但阻止多数载流子的扩散，而且在电场力的作用下，P 区的少数载流子电子产生漂移运动从 P 区漂移到 N 区，而 N 区的少数载流子空穴从 N 区漂移到 P 区。尽管两种载流子的漂移运动方向相反，但根据电流正方向的规定，两种多数载流子的漂移所产生的漂移电流的方向是相同的。这个电流与扩散电流的方向是相反的。

多数载流子的扩散使空间电荷区增宽，内电场增大；少数载流子的漂移使空间电荷区变窄，内电场减弱。在 PN 结的形成过程中，当扩散力和电场力平衡，扩散运动和漂移运动的作用相抵时，空间电荷区的宽度和内电场的强度就确定了。空间电荷区因载流子的稀少而被称为耗尽层，也因其内电场阻碍多数载流子的扩散而被称为阻挡层或势垒区。

PN 结的示意图如图 1.6 所示。

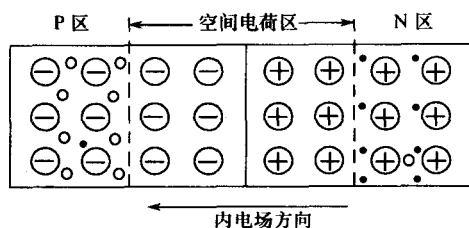


图 1.6 PN 结示意图

2. PN 结的单向导电性

我们把加在 PN 结上的电压称为偏置电压。如果 PN 结的 P 区接电源正极，N 区接电源负极，则称 PN 结加正向电压，又称加正向偏置或正偏；如果 PN 结的 N 区接电源正极，P 区接电源负极，则称 PN 结加反向电压，又称加反向偏置或反偏。

PN 结正偏时，电源施加的外电场力把 P 区的空穴和 N 区的电子推向空间电荷区，它们分别中和 P 区一侧的负离子和 N 区一侧的正离子，使得空间电荷区变窄，内电场减弱，这时 P 区和 N 区的多数载流子的扩散运动增大，少数载流子的漂移运动减弱，大量多数载流子的扩散在外电场的作用下通过外电路形成回路，产生所谓的正向电流。当外加正向电压增大到一定值后，正向电流将显著增大，PN 结呈现的电阻很小，我们把 PN 结的这个状态称为 PN 结导通。

注意，为了防止正向电流过大而损坏 PN 结，正偏时应该在回路中串接限流电阻。

正向偏置的 PN 结示意图如图 1.7 所示。

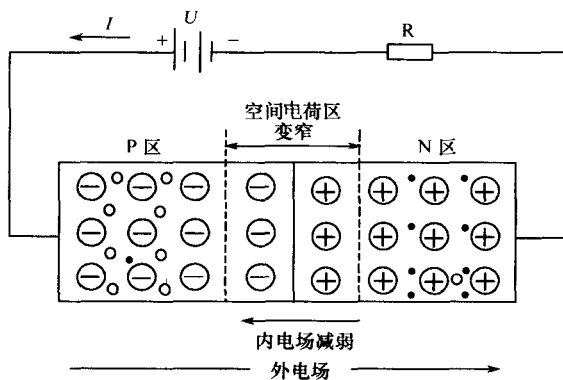


图 1.7 PN 结正向偏置

PN 结反偏时，外电源施加的外电场力把 P 区的空穴和 N 区的电子向离开空间电荷区的方向拉离，使空间电荷区变宽，内电场增强。这时 P 区和 N 区的多数载流子的扩散运动受到内外电场的阻碍，而 P 区和 N 区的少数载流子的漂移运动却受到内外电场的作用而增强，并在外电场的作用下通过外电路形成的回路，产生所谓的反



向电流。由于反向电流是由少数载流子的漂移运动产生的,而少数载流子的数量很少,所以形成的反向电流很小,PN 结呈现的电阻很大,我们把 PN 结的这个状态称为 PN 结截止。

注意,由于少数载流子数量很少,所以在反向电压增大到一定的值后(一般在零点几伏),只要没有被击穿,反向电流基本不随反向电压增大而增大,所以又称它为反向饱和电流。另外,由于少数载流子是本征激发产生的,本征激发与温度有关,所以反向电流要受温度的影响。

综上所述,PN 结在外加电场的作用下正偏导通、反偏截止,具有单向导电的特性。

PN 结反向偏置示意图如图 1.8 所示。

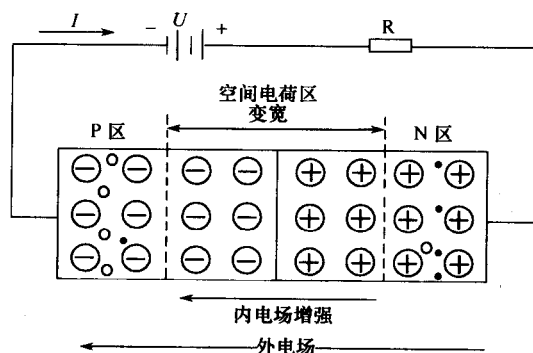


图 1.8 PN 结反向偏置示意图

1.2 半导体二极管

1.2.1 半导体二极管结构及其伏安特性

1. 半导体二极管的结构与符号

在 PN 结两端各引出一根电极引线,然后用外壳封装起来就构成了半导体二极管,从 P 区引出的电极称为正极,从 N 区引出的电极称为负极。半导体二极管的结构示意图和符号如图 1.9 所示,符号中的箭头方向表示二极管导通时正向电流的方向。

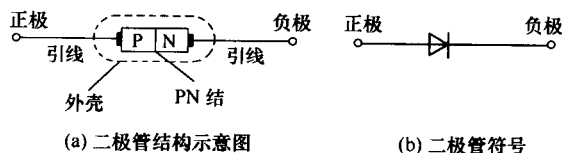


图 1.9 二极管结构与符号示意图

半导体二极管的种类很多,按照所用的半导体材料,可分为锗二极管(Ge 管)和