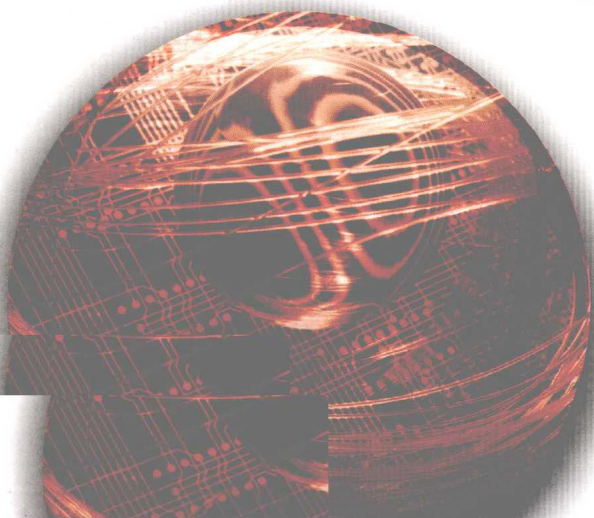




21世纪普通高等职业教育机械电子系列规划教材
21 SHIJI PUTONG GAOJING ZHIYE JIAOYU JIXIE DIANZI XILIE GUIHUA JIAOCAI



模拟电子技术项目教程

Analog Electronic Technology

主编 李福军



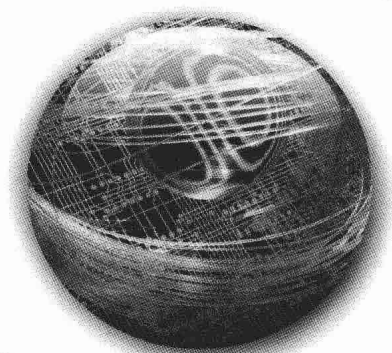
华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



21世纪普通高等职业教育机械电子系列规划教材

21 SHIJI PUTONG GAO DENG ZHIYE JIAOYU JIXIE DIANZI XILIE GUIHUA JIAOCAI



模拟电子技术项目教程

Analog Electronic Technology

主 编 李福军

副主编 唐 静 高 艳 蔡新梅 王 莉



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 提 要

本书从高职教育技能培养的角度出发,以全新的教学理念和教学方式介绍现代电子技术的基本理论和基本技能,以基础知识为引导,突出介绍电子技术的新发展、新器件、新技术、新工艺,特别注重实践应用,采用项目导向、任务驱动、工学结合的学习方式,使知识内容更贴近岗位技能的需要。为增强教学效果和拓展学生技能,在每个项目中配有学习目标、阅读材料、技能实训和项目制作,书后附有习题解答,在重点和难点之处提出“想一想”关键问题,以启发学生主动思考。

全书内容共分5个操作项目,包括“直流稳压电源的制作、实用助听器的制作、集成音频功率放大器的制作、调频无线话筒的制作和多用稳压电源的制作”等教学单元,遵循由浅入深、循序渐进的教育规律,通过亲手制作一些实用电子产品,使学生逐步建立起学习信心和增强成就感。

本书可作为高职高专电气自动化、电子信息、通信、机电一体化、计算机等专业的教材,也可供初学者自学和电子技术工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术项目教程/李福军 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2010年8月

21世纪普通高等职业教育机械电子系列规划教材

ISBN 978-7-5609-6300-6

I. 模… II. 李… 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(2010)第100919号

模拟电子技术项目教程

李福军 主 编

策划编辑:袁 冲

责任编辑:袁 冲 胡程利

责任校对:朱 霞

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:桂子工艺

印 刷:武汉武铁印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:14.5

插页:1

字数:400千字

版次:2010年8月第1版

印次:2010年8月第1次印刷

定价:26.00元

ISBN 978-7-5609-6300-6/TN·163

(本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换)



21 世纪普通高等职业教育机械电子系列规划教材

编审委员会

总顾问/编委会主任

程大章(教育部高等学校高职高专机电设备技术类专业教学指导委员会委员)

编委会副主任(以下排名不分先后)

祖国建	周养萍	杜 涛	杜贵明	张森林	祝木田	杨丽娜	高炳易
陈天祥	马雪峰	蒋洪平	杜文忠	马 彪	陈健巍	刘 骋	许立太
郭庆梁	艾小玲	耿海珍	康 力	张琳琳	张国庆	何克详	万文龙
邵永录	董 霞	孙振强	熊建武	刘秋艳	山 磊	李福军	董 彦
李国会	孙 琳	张 超	王 凯	刘 芬	李晶骅	何冰强	高显宏
于保敏	侯勇强	喻丕珠	慕 灿				

编委会委员(以下排名不分先后)

廖世海	向丽坤	王烈准	肖雪耀	周青云	庞丽芹	李贤温	孟庆平
肖 强	包西平	孙 滨	张世生	李 迅	刘 力	彭丽华	张丽荣
陈庆丰	王建勋	窦本洋	朱 红	和春梅	王 飒	张莉莉	张勇明
赵伟阁	李绍鹏	朱 军	蒋昌华	蒋素清	连为民	王 磊	赵 辉
牛 鑫	王文魁	王 华	葛东霞	纪利琴	周 华	李代席	董 勇
马红奎	余佑财	张智芳	葛广军	汤银忠	刁统山	李虹飞	王晓华
孙玉峰	卜祥安	孙玉芹	梁 健	薛颖操	贾 磊	姜 凌	江 华
张爱华	金 莹	郭佳俊	李景龙	窦 涛	石 玉	尚庆宝	江桂荣
吉 庆	许西惠	吴承恩	滕旭东	姜 芳	童宏永	项 东	李汉平
葛乐清	孙春霞	姚 群	王宜君	王宏元	黄仕彪	胡才万	李艳菲
唐新兴	宋炎荣	沈铁敏	于海玲	李 刚	李晓红	崔立功	公 相
陈 龙	刘正平	张桂花	张晶辉	武海燕	关锐钟	耿晓明	蒋 浩
朱显明	马洪波	唐 静	蔡新梅	高 艳	王 莉	童 星	张 森
朱 敏	王震婷	冯珊珊	张华林	张晓春	刘爱云	姜洪雁	朱晶波
王 艳	李锁牢	肖红波	郭庆梁	胡才万	董海东	范 玉	钟江静
金敦水	段继承	王东刚	李风光	伍端阳	梁德深		

21 世纪普通高等职业教育机械电子系列规划教材 参编院校名录

湖南铁道职业技术学院(国家示范性高职院校)
芜湖职业技术学院(国家示范性高职院校)
平顶山工业职业技术学院(国家示范性高职院校)
辽宁交通高等专科学校(国家示范性高职院校)
兰州石化职业技术学院(国家示范性高职院校)
武汉职业技术学院(国家示范性高职院校)
淄博职业学院(国家示范性高职院校)
西安航空职业技术学院(国家示范性高职院校)
长春职业技术学院(国家示范性高职院校)
昆明冶金高等专科学校(国家示范性高职院校)
吉林工业职业技术学院(国家示范性高职院校)
大庆职业学院(国家示范性高职院校)
徐州建筑职业技术学院(国家示范性高职院校)
永州职业技术学院(国家示范性高职院校)
陕西工业职业技术学院(国家示范性高职院校)
黑龙江农业经济职业学院(国家示范性高职院校)
娄底职业技术学院
常州机电职业技术学院
常德职业技术学院
江西工业工程职业技术学院
六安职业技术学院
郑州职业技术学院
泰山职业技术学院
天津滨海职业学院
辽宁装备制造职业技术学院
武汉交通职业学院
襄樊职业技术学院
广东工贸职业技术学院
广东水利电力职业技术学院
滨州职业学院
随州职业技术学院
徐州工业职业技术学院
南充职业技术学院
内蒙古机电职业技术学院
宣城职业技术学院
成都电子机械高等专科学校
连云港职业技术学院
黑龙江信息技术职业学院
江西交通职业技术学院
江苏联合职业技术学院
漯河职业技术学院
江苏经贸职业技术学院
长治职业技术学院
济源职业技术学院
南京铁道职业技术学院
台州职业技术学院
辽宁信息职业技术学院
辽宁机电职业技术学院
德州科技职业学院
贵州电子信息职业技术学院
山东胜利职业学院
广州现代信息工程职业技术学院
济南工程职业技术学院
抚顺职业技术学院
咸阳职业技术学院
阜阳职业技术学院
苏州工业职业技术学院
重庆城市职业学院
安徽新华学院
河南城建学院
重庆交通科技职业学院
济南职业学院
江西工程职业学院
盐城纺织职业技术学院
咸宁职业技术学院
贵州航天职业技术学院
青岛滨海学院
辽宁石油化工大学职业技术学院
商丘科技职业学院
浙江工商职业技术学院
郑州工业安全职业学院
黑龙江工商职业技术学院
永城职业学院
华南理工大学广州汽车学院
山西综合职业技术学院
安徽电子信息职业技术学院
黑龙江林业职业技术学院
渤海船舶职业学院
辽阳职业技术学院
四川科技职业学院
曲江广播电视大学
荆州职业技术学院
十堰职业技术学院

《模拟电子技术项目教程》是为高职院校电气自动化、电子信息、通信、机电一体化、计算机等专业编写的一本崭新的教材。

电子技术日新月异,新知识、新技术、新工艺不断涌现。但不论电子技术如何发展,其基本理论与基本技能都是遵循相同认知规律的。授之以鱼不如授之以渔,教会学生电子技术的基本知识,并培养学生会思考、会学习、会应用,才能使学生适应电子技术飞速发展的社会要求。

传统的电子技术教材偏重学科体系,理论性过强,这对培养高职类应用型技术人才很不利,往往造成了教师难教、学生难学的局面。产生这种现象的原因是多方面的,其中主要有:一是只讲电子元器件电路符号,很少介绍器件实物、型号选用等实用知识;二是只讲电子电路的原理,很少介绍电路的实际应用与制作,使学生感到学无所用。

本书力求突破这一瓶颈,主要做了以下两点尝试:首先从项目导向和任务驱动出发,提出学习目标,并围绕相应实用电子产品的制作展开教学;二是将过于学科化的章节变为项目形式,并将有关章节整合为一大项目,如将过去的差动放大器、集成运算放大器、负反馈放大器及功率放大器等内容整合为“集成音频功率放大器的制作”一个项目,这样便于使学生将分散的知识集中起来学习,从而形成知识链。

根据高职教育培养的是面向生产第一线的高级应用技术型人才的要求,本书在力求保证基础、掌握基本技能的基础上,注重集成电路以及新器件、新电路的分析与应用,具有以下特点:

(1)通过典型、实用的操作项目以及大量的电路仿真测试和电路实验的形式,使学生初步建立感观认识,然后对操作结果及出现的问题进行讨论、分析、研究,并得出结论。

(2)有利于学生在操作中学习,渐进式加深理解和巩固知识点,逐步提高自身的电子技术实际应用能力和计算机设计自动化(EDA)软件的应用技能。

(3)在重点难点之处给出“想一想”核心问题,变学生被动学习为主动思考学

习。通过阅读材料、技能训练和项目制作等及时将理论知识与实际产品制作结合起来,实现工学结合,建立学习信心并增强成就感。

本书语言通俗易懂、层次清晰严谨,内容丰富实用、图文并茂,特别是一些实际应用与教学经验的融入,使本书更具有特色。全书共分为5个操作项目,按照“以全面素质为基础、以就业为导向、以能力为本位、以学生为主体、以职业技能为主线”的总体设计要求,以形成掌握电子技术的基本技术和操作技能的基本目标,紧紧围绕工作任务完成的需要来选择和组织课程内容。本书每一部分内容都配有项目制作及技能训练,可以帮助读者在短时间内完成电子技术基本理论和基本技能的学习。

本书由辽宁机电职业技术学院李福军老师担任主编,同时编写项目二和附录,并对全书进行统稿;渤海船舶职业学院蔡新梅老师编写项目一;辽宁信息职业技术学院唐静老师编写项目三;芜湖职业技术学院高艳老师编写项目四;黑龙江工商职业技术学院王莉老师编写项目五。

本书在编写过程中,得到了湖北众邦文化传播有限公司、华中科技大学出版社的大力支持和帮助,在此对为本书出版做出贡献的同志们表示衷心的感谢。

为了配合教学,本书配有免费的电子教案,欢迎选用本书作为教材的单位索取。

由于编者水平所限,加之时间仓促,书中难免存在差错和疏漏,我们热切期望使用本教材的广大老师和学生对书中存在的问题提出批评和建议(编者信箱:lifujun0415@163.com),以便进一步修订和完善本教材。

编 者

2010年3月

Contents

目 录

项目 1 直流稳压电源的制作	(1)
项目剖析	(1)
项目目标	(2)
任务1 二极管的认识与选择	(2)
1.1.1 半导体基本知识	(2)
1.1.2 PN 结的形成	(5)
1.1.3 二极管的认识	(8)
1.1.4 二极管的应用	(13)
任务拓展 Multisim 7 电子仿真软件介绍	(17)
实用资料 1N40 $\times$ $\times$ 系列二极管及其参数	(21)
实训 二极管的识别与检测	(22)
任务2 单相整流滤波电路的分析与应用	(23)
1.2.1 半波整流电路	(24)
1.2.2 单相桥式整流电路	(25)
1.2.3 滤波电路的作用	(27)
实训 桥式整流电容滤波电路的仿真及调试	(29)
任务3 三端式集成稳压器的应用	(34)
1.3.1 三端式集成稳压器的类型	(34)
1.3.2 固定电压输出三端式集成直流稳压电源的设计	(37)
1.3.3 可调电压输出三端式集成直流稳压电源的设计	(39)
实用资料 三端式集成电路稳压器的系列型号	(42)
项目制作 三端式集成直流稳压电源的组装与调试	(42)
项目小结	(46)
思考与练习 1	(47)

**项目2 实用助听器制作 (51)**

项目剖析	(51)
项目目标	(52)
任务1 晶体三极管的认识与选择	(52)
2.1.1 三极管的认识	(52)
2.1.2 三极管的主要参数、型号及其选用	(57)
实用资料 90××系列和 8050、8550 三极管的主要参数	(60)
实训 三极管的识别与检测	(60)
任务拓展 场效应晶体管介绍	(62)
任务2 三极管基本放大电路的认识	(67)
2.2.1 放大电路预备知识	(67)
2.2.2 对固定偏置式共发射极放大电路的认识	(68)
2.2.3 分压偏置式放大电路的分析	(77)
2.2.4 射极跟随器的应用	(79)
实训 分压偏置式放大电路的仿真及调试	(81)
任务3 多级放大电路的认识	(84)
2.3.1 多级放大电路的分析	(85)
2.3.2 放大器的频率响应	(88)
任务4 功率放大电路的分析及其应用	(90)
2.4.1 功率放大电路的性能和对器件的要求	(91)
2.4.2 常见的几种功放电路介绍	(92)
阅读材料 PCB 制作工艺	(96)
项目制作 实用助听器的制作与调试	(98)
项目小结	(100)
思考与练习 2	(100)

项目3 集成音频功率放大器的制作 (104)

项目剖析	(104)
项目目标	(105)
任务1 差动放大电路的认识	(105)
3.1.1 基本差动放大电路的原理	(105)
3.1.2 差动放大电路的改进	(107)
任务2 集成运算放大器的认识	(112)
3.2.1 集成运算放大电路的组成及其特点	(112)



3.2.2 集成运放工作的两个区域	(115)
3.2.3 集成运放的发展与选用	(116)
任务3 负反馈在放大器中的应用	(119)
3.3.1 反馈的作用	(119)
3.3.2 负反馈的基本类型及其判断方法	(120)
3.3.3 负反馈对放大性能的影响	(123)
实训 两级电压串联负反馈放大电路仿真与测试	(126)
任务4 集成运算放大器的应用	(128)
3.4.1 集成运放的线性应用分析——运算电路	(128)
3.4.2 集成运放的非线性应用分析——电压比较器	(133)
实用资料 进口集成电压比较器的主要参数	(135)
实训 集成运放的线性应用电路仿真与测试	(136)
任务5 集成功率放大电路的介绍	(139)
3.5.1 常用的几种集成功放电路	(139)
3.5.2 集成功率放大器使用注意事项	(141)
阅读材料 集成电路好坏的判别方法	(142)
项目制作 TDA2030 双声道扩音机的装调	(143)
项目小结	(146)
思考与练习 3	(147)

项目4 调频无线话筒的制作 (151)

项目剖析	(151)
项目目标	(152)
任务1 正弦波振荡电路分析	(152)
4.1.1 振荡电路的组成及特点	(153)
4.1.2 RC 正弦波振荡电路的分析	(155)
4.1.3 LC 正弦波振荡电路的分析	(158)
4.1.4 石英晶体振荡器	(165)
实训 RC 桥式音频信号发生器的调试	(168)
任务2 介绍集成多种函数信号发生器	(171)
4.2.1 5G8038 集成多种函数信号发生器的组成及其功能	(171)
4.2.2 5G8038 的典型应用——构成多功能信号发生器	(172)
任务3 调频无线话筒的分析及实现	(173)
任务拓展 小信号调谐放大电路分析	(176)
阅读材料 无线通信技术	(178)
项目制作 远距离调频无线话筒的制作与调试	(181)



项目小结	(182)
思考与练习 4	(183)
项目 5 多用稳压电源的制作	(186)
项目剖析	(186)
项目目标	(187)
任务1 并联式直流稳压电源的分析	(187)
5.1.1 稳压二极管的型号与工作特性	(187)
5.1.2 二极管稳压电路的分析	(189)
任务2 串联调整式直流稳压电源的分析	(191)
5.2.1 三极管串联调整式稳压电路的组成	(191)
5.2.2 三极管串联调整式稳压电路的分析	(192)
任务3 开关型直流稳压电源的分析	(202)
5.3.1 开关型直流稳压电源的组成与特点	(202)
5.3.2 并联型开关稳压电源及其应用	(205)
5.3.3 串联型开关稳压电源及其应用	(209)
阅读材料 SMT 技术	(214)
项目制作 充电/稳压两用电源的制作与调试	(215)
项目小结	(218)
思考与练习 5	(219)
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	(220)
附录 B 常用集成运算放大器国内外型号对照表	(223)
参考文献	(224)

项目 1

直流稳压电源的制作



项目剖析

直流稳压电源广泛应用于实验室、工矿企业、电解、电镀、充电设备等的直流供电。当由交流电网供电时,则需要把电网供给的交流电转换为稳定的直流电。直流稳压电源一般由交流电源变压器、整流、滤波和稳压电路等几部分组成。如图 1.1 所示。

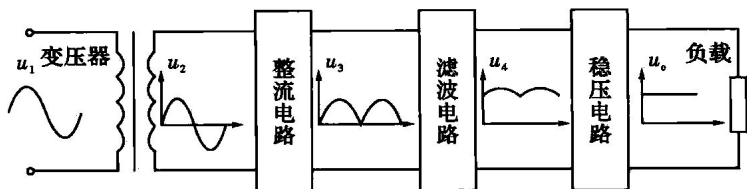


图 1.1 直流稳压电源的组成

图 1.2 所示的电路为固定式输出的直流稳压电源的电路图,它的功能是将交流电转换成稳定输出的直流电,本图的输出为 15 V 的直流电。

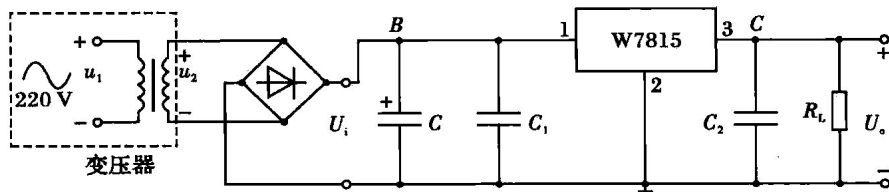


图 1.2 直流稳压电源

那么集成稳压电源各个部分的工作原理是什么? 什么样的元件可以构成这样的电路? 相信通过本项目的学习,这样的问题就会迎刃而解。除此之外,本章还详细介绍了 Multisim 电子仿真软件,可对上述电路进行仿真。

本项目由以下三个任务组成:

任务 1 二极管的认识与选择



任务2 单相整流滤波电路的分析与应用

任务3 三端式集成稳压器的应用



项目目标

根据直流稳压电源的组成,学习本项目的主要目标为:

1. 掌握半导体特性,PN结的形成及导电特性,二极管的应用。
2. 掌握半波整流电路、单相桥式整流电路、滤波电路的电路图及工作原理。
3. 掌握三端式集成稳压器的类型及应用电路。
4. 熟悉 Multisim 电子仿真软件的操作及使用方法。

任务1 二极管的认识与选择

【任务目标】

1. 了解半导体基本知识,掌握PN结的形成及特性。
2. 掌握二极管结构和符号、伏安特性、主要参数、理想等效。
3. 掌握二极管的应用电路。

1.1.1 半导体基本知识

1. 半导体材料的基本特性

在自然界中,物质存在的形式多种多样。根据其导电性能的不同,大体可分为导体、绝缘体和半导体三大类。通常将很容易导电、导热、电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质,称为导体;将很难导电、导热、电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质,称为绝缘体;将导电、导热能力介于导体和绝缘体之间,电阻率在 $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物质称为半导体,例如锗、硅、硒、砷化镓及许多金属氧化物和金属硫化物等材料。与导体和绝缘体相比,半导体材料的发现是最晚的,直到20世纪30年代,当材料的提纯技术改进以后,一向沉默于世的半导体才真正被学术界认可,并应用于电子技术中。

利用半导体材料制作电子元器件,并不是因为它的导电能力介于导体和绝缘体之间,而是由于其导电能力会随着温度的变化、光照或掺入杂质的多少发生显著的变化,这就是半导体不同于导体的特殊性质。

(1)热敏性。所谓热敏性就是半导体的导电能力随着温度的升高而迅速增加。半导体的电阻率对温度的变化十分敏感。例如纯净的锗从 20°C 升高到 30°C 时,它的电阻率几乎减小为原来的 $1/2$ 。而一般的金属导体的电阻率则变化较小,比如铜,当温度同样升高 10°C 时,它的电阻率几乎不变。

(2)光敏性。半导体的导电能力随光照的变化有显著改变的特性叫做光敏性。一种硫



化铜薄膜在暗处其电阻为几十兆欧姆,受光照后,电阻可以下降到几十千欧姆,只有原来的1%。自动控制中用的光电二极管和光敏电阻,就是利用光敏特性制成的。而金属导体在阳光下或在暗处其电阻率一般没有什么变化。

(3)杂敏性。所谓杂敏性就是半导体的导电能力因掺入适量杂质而发生很大的变化。在半导体硅中,只要掺入亿分之一的硼,电阻率就会下降到原来的几万分之一。所以,利用这一特性,可以制造出不同性能、不同用途的半导体器件。而金属导体即使掺入千分之一的杂质,对其电阻率也几乎没有什么影响。

半导体之所以具有上述特性,根本原因在于其特殊的原子结构和导电机理。

① 半导体材料区别于一般导体的特性有哪些?

2. 本征半导体

半导体按其是否掺入杂质可分为本征半导体和杂质半导体两类。

常用的半导体材料是单晶硅(Si)和单晶锗(Ge)。所谓单晶,是指整块晶体中的原子按一定规则整齐地排列着的晶体。无杂质的纯净单晶半导体称为本征半导体。

(1)本征半导体的原子结构。

原子由原子核和电子构成,原子核由带正电的质子和不带电的中子构成,电子带负电并围绕原子核旋转。电子以不同的距离在核外分层排布,距核越远,电子的能量越高,最外层的电子被称为价电子,物质的化学性质就是由价电子的数目决定的。

目前所用的半导体材料仍然主要是硅和锗,所以在这里只讨论硅和锗的原子结构,图 1.3 所示是硅和锗的原子结构简化模型。硅和锗的外层电子都是 4 个,它们是四价元素。随着原子间的相互靠近,价电子相互作用并形成晶体。晶体的最终结构是四面体,每个原子(硅或锗)周围都有 4 个临近的(硅或锗)原子,分布在两个原子间的价电子构成共价键,图 1.4 所示是硅和锗四面体结构。



图 1.3 硅和锗的原子结构简化模型

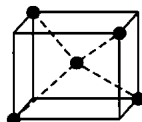


图 1.4 硅和锗四面体结构

硅和锗四面体结构一般用二维平面图来表示,图 1.5 所示是硅和锗晶体结构平面图。在晶体结构中,通过电子运动,每一个半导体原子最外层的 4 个价电子与相邻的 4 个半导体原子的各一个价电子组成 4 对共价键,并按规律排列,图中的原子间每条线代表一个价电子。

本征半导体在热力学温度 $T=0\text{ K}(-273\text{ }^{\circ}\text{C})$ 无外部激发能量时,每个电子都处于最低能量状态,所有的电子都被束缚在共价键中,整个晶体中没有可以导电的自由电子,所以,绝对零度时的本征半导体是“绝缘体”。

(2)本征激发。

一般来说,共价键中的价电子不完全像绝缘体中价电子所受束缚那样强,当价电子在外

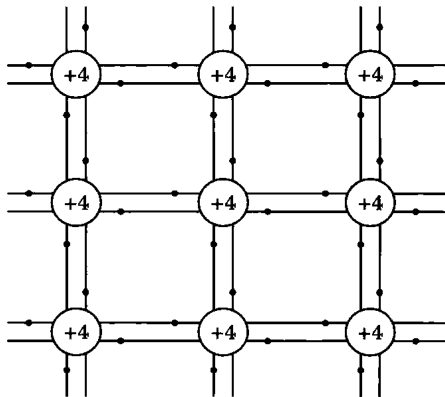


图 1.5 硅和锗晶体结构平面图



部能量(如光照、升温、电磁场激发等)作用下,一部分价电子就可能挣脱共价键的束缚成为自由电子,这一过程叫**本征激发**。自由电子是带负电荷量的粒子,它是本征半导体中的一种载流子。在外电场作用下,自由电子将逆着电场方向运动形成电流。载流子的这种运动叫**漂移**,所形成的电流叫**漂移电流**。价电子脱离共价键的束缚成为自由电子后,在原来的共价键中便留下一个空位,这个空位叫**空穴**。空穴很容易被邻近共价键中跳过来的价电子填补上,于是在邻近共价键中又出现新的空穴,这个空穴再被别处共价键中的价电子来填补。这样,在半导体中出现了价电子填补空穴的运动。在外部能量的作用下,填补空穴的价电子做定向移动也形成漂移电流。但这种价电子的填补运动是由于空穴的产生引起的,而且始终是在原子的共价键之间进行的,它不同于自由电子在晶体中的自由运动。同时,价电子填补空穴的运动无论在形式上还是在效果上都相当于空穴在与价电子运动相反的方向上运动。为了区分电子的这两种不同的运动,把后一种运动叫做空穴运动,空穴被看做带正电荷的带电粒子,称它为**空穴载流子**。图 1.6 所示是半导体中的

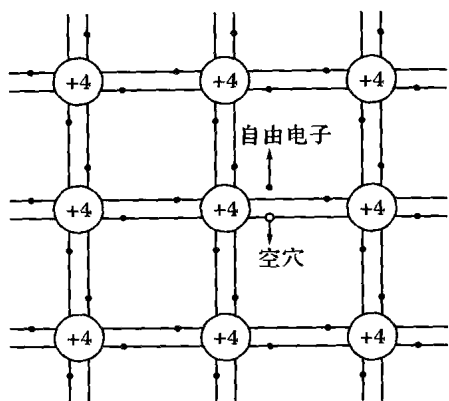


图 1.6 半导体中的两种载流子

两种载流子。

综上所述,本征半导体中存在两种载流子:带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。它们是成对出现的,也叫**电子-空穴对**。由于两者电荷量相等,极性相反,所以本征半导体是电中性的。本征半导体在外界的作用下,电子形成电子电流,空穴形成空穴电流,虽然两种载流子的运动方向相反,但因为它们所带的电荷极性也相反,所以两种电流的实际方向是相同的,它们的和就是半导体中的电流。

另外需要指出的是,价电子在热运动中获得能量产生了电子空穴对,这种物理现象称为**激发**;同时自由电子在运动中与空穴相遇,使电子、空穴对消失,这种现象称为**复合**。在一定温度下,载流子的产生过程和复合过程是相对平衡的,载流子的浓度是一定的。本征半导体中载流子的浓度,除了与半导体材料本身的性质有关以外,还与温度有关。而且随着温度的升高,基本上呈指数规律增加。因此,半导体载流子浓度对温度十分敏感。

3. 杂质半导体

🔍 为什么要对半导体进行掺杂?

本征半导体的电阻率比较大,载流子浓度又小,且对温度变化敏感,因此它的用途很有限。在本征半导体中,人为地掺入少量其他元素(称**杂质**),可以使半导体的导电性能发生显著的变化。例如,在硅本征半导体中掺入百万分之一的其他微量元素,其导电能力可大大增加。利用这一特性,可以制成各种性能不同的半导体器件,这样使得它的用途大大增加。掺入杂质的本征半导体叫**杂质半导体**。根据掺入杂质性质的不同,可分为两种:电子型半导体和空穴型半导体。载流子以电子为主的半导体叫**电子型半导体**,因为电子带负电,取英文单词“负”(Negative)的第一个字母“N”,所以电子型半导体又称为**N型半导体**。载流子以空穴为主的半导体叫**空穴型半导体**。取英文单词“正”(Positive)的第一个字母“P”,空穴型半导体又称为**P型半导体**。下面以硅材料为例进行讨论。



(1) N 型半导体。

在本征半导体中掺入正五价元素(如磷、砷)使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置,可以形成 N 型半导体。掺入的元素原子有 5 个价电子,其中有 4 个与硅原子结合成共价键,余下的一个不在共价键之内,掺入的五价元素原子对它的束缚力很小。因此只需较小的能量便可激发而成为自由电子。由于掺入的五价元素原子很容易贡献出一个自由电子,故称为施主杂质。掺入的五价元素原子提供一个电子(成为自由电子)后,它本身因失去电子而成为正离子。

在上述情况下,半导体中除了大量的由掺入的五价元素原子提供的自由电子外,还存在由本征激发产生的电子空穴对,它们是少数载流子。这种杂质半导体以自由电子导电为主,因而是电子型半导体,或 N 型半导体。在 N 型半导体中,由于自由电子是多数,故 N 型半导体中的自由电子称为多数载流子(简称多子),而空穴称为少数载流子(简称少子)。N 型半导体见图 1.7(a)所示。

(2) P 型半导体。

当本征半导体中掺入正三价杂质元素(如硼、镓)时,三价元素原子为形成四对共价键使结构稳定,常吸引附近半导体原子的价电子,从而产生一个空穴和一个负离子,故这种杂质半导体的多数载流子是空穴,因为空穴带正电,所以是空穴型半导体,也称为 P 型半导体。除了多数载流子空穴外,还存在由本征激发产生的电子空穴对,可形成少数载流子自由电子。由于所掺入的杂质元素原子易于接受相邻的半导体原子的价电子成为负离子,故称为受主杂质。在 P 型半导体中,由于空穴是多数,故 P 型半导体中的空穴称为多数载流子(简称多子),而自由电子称为少数载流子(简称少子)。P 型半导体见图 1.7(b)所示。

P 型半导体和 N 型半导体均属非本征半导体。其中多数载流子的浓度取决于掺入的杂质元素原子的密度;少数载流子的浓度主要取决于温度;而所产生的离子,不能在外电场作用下作漂移运动,不参与导电,不属于载流子。

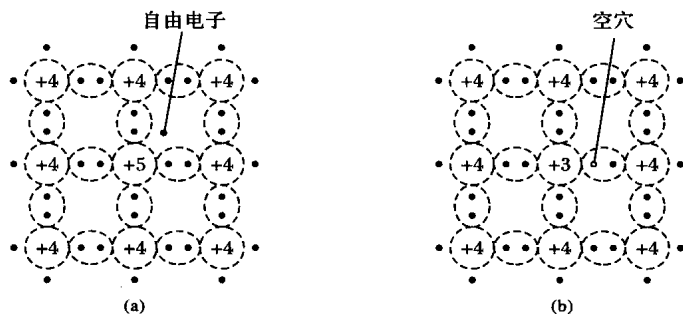


图 1.7 两种杂质半导体

(a) N 型半导体; (b) P 型半导体

1.1.2 PN 结的形成

如果将一块半导体的一侧掺杂成为 P 型半导体,而另一侧掺杂成为 N 型半导体,则在两者的交界处将形成一个 PN 结。

1. PN 结的形成

在 P 型和 N 型半导体结合体的界面两侧,由于自由电子和空穴的浓度相差悬殊(N 型



区内自由电子很多而空穴很少,P型区内空穴很多而自由电子很少),这样,自由电子和空穴都要从浓度高的地方向浓度低的地方扩散,即N区中的多数载流子自由电子要向P区扩散,同时P区中的多数载流空穴也要向N区扩散,并且当电子和空穴相遇时,将发生复合而消失。它们扩散的结果就使P区一边失去空穴,留下了带负电的杂质离子,N区一边失去自由电子,留下了带正电的杂质离子。于是,在交界面两侧将分别形成不能移动的正、负离子区(半导体中的正、负离子处于晶格位置而不能移动,因此不参与导电)。这些不能移动的带电

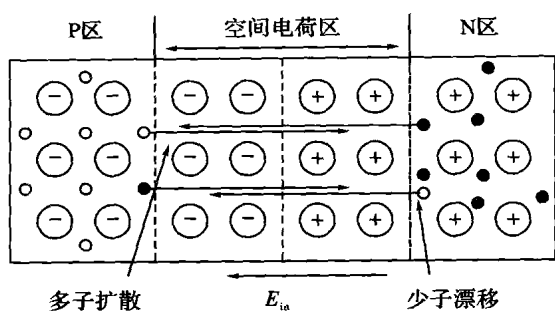


图 1.8 PN 结的形成

粒子在P和N区交界面附近,形成了一个很薄的空间电荷区,就是所谓的PN结。扩散越强,空间电荷区越宽。由于空间电荷区内的载流子数量极少,近似分析时可忽略不计,所以也称其为耗尽层。如图1.8所示,在出现了空间电荷区以后,由于正负电荷之间的相互作用,在空间电荷区就形成了一个内电场 E_{in} ,其方向是从带正电的N区指向带负电的P区。显然,这个电场的方向与载流子扩散运动的方向相反,它是阻止扩散的。另一方面,这个电

场将使N区的少数载流子空穴向P区漂移,使P区的少数载流子电子向N区漂移,漂移运动的方向正好与扩散运动的方向相反。从N区漂移到P区的空穴补充了原来交界面上P区所失去的空穴,从P区漂移到N区的电子补充了原来交界面上N区所失去的电子,这就使空间电荷减少,因此,漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。当漂移运动达到和扩散运动相等时,PN结便处于动态平衡状态。内电场促使少子向对方漂移,阻止多子向对方扩散。当扩散运动的多子数量与漂移运动的少子数量相等,即两种运动达到动态平衡的时候,空间电荷区的宽度一定,PN结就形成了。一般情况下,空间电荷区的宽度很薄,为几微米至几十微米。由于空间电荷区内几乎没有载流子,其电阻率很高。

① PN结是如何形成的?在PN结的形成过程中存在哪两种运动?

2. PN 结的单向导电性

在PN结的两端引出电极,P区的一端称为阳极,N区的一端称为阴极。在PN结的两端外加不同极性的电压时,PN结表现出截然不同的导电性能,称为PN结的单向导电性。

(1)在外加正向电压时PN结处于导通状态。

当外加电压使PN结的阳极电位高于阴极时,称PN结外加正向电压或PN结正向偏置(简称正偏),如图1.9所示。图中实心点代表电子,空心圈代表空穴。此时,外加电场 E_{out} 与内电场 E_{in} 的方向相反,其作用是增强扩散运动而削弱漂移运动。所以,外电场驱使P区的多子进入空间电荷区抵消一部分负空间电荷,也使N区的多子电子进入空间电荷区抵消一部分正空间电荷,其结果是使空间电荷区变窄,PN结呈现低电阻(一般为几百欧姆);同时由于扩散运动占主导,形成较大的正向电流(mA级),此时PN结导通,相当于开关的闭合状态。由于PN结导通时,其电位差只有零点几伏,且呈现低电阻,所以应该在其所在回路中串联一个限流电阻,以防止PN结因过流而损坏。