



面向

21世纪

高级应用型人才

中国高等职业技术教育研究会推荐
高职高专系列教材

电子技术基础——模拟电子技术

郝波 主编
郝波 秦宏 李川 编著

西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

□ 中国高等职业技术教育研究会推荐

高职高专系列教材

电子技术基础

——模拟电子技术

郝波 主编

郝波 秦宏 李川 编著

西安电子科技大学出版社

2004

内 容 简 介

本书根据高职高专电子技术基础课程教学基本要求编写。全书充分考虑到高等职业教育的特点与要求,将电子技术基础课程在结构与内容上都做了实用性处理,使其更通俗易懂、好学实用。

本书为《〈电子技术基础〉——模拟电子技术》分册,共8章,内容包括基本半导体分立器件、基本放大电路、集成运算放大器、放大电路中的负反馈、信号的运算与处理电路、低频功率放大器、信号产生电路、直流稳压电源。书中每节后都配有思考题,每章配有小结,习题及锻炼实际应用能力的技能实训,其目的是使学生更好地掌握本门课程的基本理论及实际应用技能。

本书编写时力求精选内容,深入浅出,图文并茂,便于阅读。本书可与《电子技术基础——数字电子技术》配套使用,也可单独使用。

本书可作为各类高职高专电子、电气、自动化、机电类专业教材或教学参考书,也可供相关工程技术人员参考。

★ 本书配有电子教案,需要的教师可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础——模拟电子技术/郝波主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2004.7

(高职高专系列教材)

ISBN 7-5606-1397-7

I. 电… II. 郝… 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(2004)第 045937 号

策 划 马武装

责任编辑 杨宗周 马武装

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 陕西宏业印刷有限责任公司

版 次 2004年7月第1版 2004年7月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 18.75

字 数 441千字

印 数 1~4000册

定 价 20.00元

ISBN 7-5606-1397-7/TN·0268(课)

XDUP 1668001-1

*** 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

1999年以来,随着高等教育大众化步伐的加快,高等职业教育呈现出快速发展的形势。党和国家高度重视高等职业教育的改革和发展,出台了一系列相关的法律、法规、文件等,规范、推动了高等职业教育健康有序的发展。同时,社会对高等职业技术教育的认识在不断加强,高等技术应用型人才及其培养的重要性也正在被越来越多的人所认同。目前,高等职业技术教育在学校数、招生数和毕业生数等方面均占据了高等教育的半壁江山,成为高等教育的重要组成部分,在我国社会主义现代化建设事业中发挥着极其重要的作用。

在高等职业教育大发展的同时,也有着许多亟待解决的问题。其中最主要的是按照高等职业教育培养目标的要求,培养一批具有“双师素质”的中青年骨干教师;编写出一批有特色的基础课和专业主干课教材;创建一批教学工作优秀学校、特色专业和实训基地。

为解决当前信息及机电类精品高职教材不足的问题,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分两轮联合策划、组织编写了“计算机、通信电子及机电类专业”系列高职高专教材共100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。该系列教材着力把握高职高专“重在技术能力培养”的原则,结合目标定位,注重在新颖性、实用性、可读性三个方面能有所突破,体现高职教材的特点。第一轮教材共36种,已于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二等奖。第二轮教材预计在2004年全部出齐。

教材建设是高等职业院校基本建设的主要工作之一,是教学内容改革的重要基础。为此,有关高职院校都十分重视教材建设,组织教师积极参加教材编写,为高职教材从无到有,从有到优、到特而辛勤工作。但高职教材的建设起步时间不长,还需要做艰苦的工作,我们殷切地希望广大从事高等职业教育的教师,在教书育人的同时,组织起来,共同努力,编写出一批高职教材的精品,为推出一批有特色的、高质量的高职教材作出积极的贡献。

中国高等职业技术教育研究会会长

李宗尧

机电类专业系列高职高专教材

编审专家委员会名单

主任：刘跃南（深圳职业技术学院教务长，教授）

副主任：方新（北京联合大学机电学院副院长，副教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑，教授）

成员：（按姓氏笔画排列）

刘守义（深圳职业技术学院工业中心主任，副教授）

李七一（南京工业职业技术学院机械工程系主任，副教授）

李望云（武汉职业技术学院机械系主任，副教授）

宋文学（西安航空技术高等专科学校机械系副主任，副教授）

邱士安（成都电子机械高等专科学校机电工程系副主任，副教授）

胡德淦（郑州工业高等专科学校机械工程系副教授）

高鸿庭（上海电机技术高等专科学校机械系副教授）

郭再泉（无锡职业技术学院自控与电子工程系副主任，副教授）

蒋敦斌（天津职业大学机电工程系主任，教授）

董建国（湖南工业职业技术学院机械工程系主任，副教授）

翟 轰（陕西工业职业技术学院院长，教授）

项目总策划：梁家新

项目策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

为了适应新世纪高职高专教育的需要,根据中国高等职业技术教育研究会,电类专业系列高职高专教材编审专家委员会的要求,我们编写了这套《电子技术基础》高职高专教材。

电子技术基础课程是传统的电类基础课,主要内容有电子技术的基本原理、基本器件、基本电路及基本分析方法等电子技术基础问题。随着现代电子技术的飞速发展,新器件、新技术不断更新,给电子技术基础课程带来了新的内涵。而高职高专教育是以应用为本,注重培养学生的综合素质能力,这样对本门课程提出了更新的要求。如何既保证掌握基本理论,又注重培养实际能力;既反映现代电子技术的新技术、新成果,又保证传统知识的系统性,本套教材在结构及内容安排上都作了积极的尝试。

本套教材根据模拟电子技术和数字电子技术的内容分为二册。模拟电子技术部分主要内容有基本半导体器件、集成半导体器件和由它们构成的电压放大电路、功率放大电路、反馈放大电路、信号产生电路和电源电路。数字电子技术部分主要内容有数字电路基础、集成逻辑门和触发器、组合逻辑和时序逻辑电路、半导体存储器与可编程逻辑器件、数模和模数转换器、脉冲信号的产生与整形。

在内容的安排上,本套教材以各种分立及集成电子器件为基础,以模拟及数字基本电路、基本分析方法为重点,以集成电路的应用为目的,没有安排一些繁琐的理论推导及集成电路内部的一些复杂原理电路分析等内容,而是更加注重集成电路的实用性。书中对所讨论的集成电路,都从其实际使用的角度,给出了外特性,外引线图及使用方法。

在结构上,本套教材各章配有小结及习题,除个别章节外,还安排有技能实训内容,主要目的是配合理论学习,进行实际操作和综合能力方面的训练。具体使用方法是:在学习完一章的相关内容后,教师指导学生根据章后技能实训要求完成其实训内容,有条件的最好根据所给器件及电路进行实训实测。这样,配合试验、课程设计和实习等教学环节可更好地培养学生掌握本门课程的实际应用能力。另外,本书每个小节后都给出了一定的思考题,以帮助学生掌握其学习重点。

本套书为高职高专电类专业电子技术基础课程教材,也可供其他专业及相关工程技术人员参考。

本书为《模拟电子技术》分册,共分8章。

本书由郝波主编。第6章由郝波编写并由其统稿全书;第1、2、3、4、7章由秦宏编写;第5、8章由李川编写。西安电子科技大学出版社及马武装、杨宗周两位编辑对本书的出版给予了大力支持和帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免出现不妥和错误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2004年3月

目 录

第 1 章 基本半导体分立器件	1	习题	40
1.1 半导体的基本知识与 PN 结	1	技能实训	44
1.1.1 半导体的基本特性	1	第 2 章 基本放大电路	48
1.1.2 本征半导体	2	2.1 概述	48
1.1.3 杂质半导体	4	2.1.1 放大的意义与放大器框图	48
1.1.4 PN 结的形成与单向导电性	5	2.1.2 基本单级放大电路的连接形式	49
思考题	7	2.1.3 基本放大电路中常见元器件的 作用	50
1.2 半导体二极管	8	2.1.4 放大电路的主要性能指标	52
1.2.1 二极管的结构与类型	8	思考题	55
1.2.2 二极管的伏安特性曲线与 近似模型	9	2.2 三极管共射极单级放大电路	55
1.2.3 二极管的主要参数	10	2.2.1 放大电路的静态分析	55
1.2.4 二极管在电子技术中的应用	11	2.2.2 放大电路的动态分析	59
思考题	13	2.2.3 影响放大电路静态工作点稳定的 因素	69
1.3 特殊二极管	14	思考题	73
1.3.1 稳压二极管	14	2.3 共集电极放大电路	73
1.3.2 发光二极管与光电二极管	15	2.3.1 共集电极放大电路的组成与 分析	73
* 1.3.3 变容二极管	16	2.3.2 共集电极放大电路的应用	76
思考题	17	思考题	77
1.4 半导体三极管	17	2.4 共基极放大电路	78
1.4.1 三极管的结构与类型	17	* 2.4.1 共基极放大电路的 组成与分析	78
1.4.2 三极管的基本工作原理	18	2.4.2 三种三极管基本放大电路的 比较	79
1.4.3 三极管的特性曲线	21	思考题	80
1.4.4 三极管的主要参数	23	2.5 场效应管放大电路	80
1.4.5 温度对三极管参数的影响	25	2.5.1 场效应管的直流偏置电路与 静态分析	81
1.4.6 三极管在电子技术中的应用	26	2.5.2 交流分析	82
思考题	28	思考题	86
1.5 场效应晶体管	28	小结	87
1.5.1 结型场效应管	29		
1.5.2 绝缘栅场效应管	33		
1.5.3 场效应管和三极管的 特点比较	38		
思考题	39		
小结	39		

习题	87	习题	134
技能实训	93	技能实训	139
第3章 集成运算放大器	95	第4章 放大电路中的负反馈	141
3.1 概述	95	4.1 负反馈的基本概念与分类	141
3.1.1 集成运算放大器电路设计上的特点	95	4.1.1 反馈的基本概念	141
3.1.2 集成运算放大器的基本结构	96	4.1.2 反馈放大电路的分类	144
3.2 差动放大电路	96	4.1.3 负反馈的四种基本类型与判别方法	146
3.2.1 为什么选用“差动”的电路形式	97	思考题	152
3.2.2 基本差动放大电路的分析	97	4.2 引入负反馈对放大电路性能的影响	152
3.2.3 差动放大电路的输入、输出形式	102	4.2.1 降低放大电路的放大倍数	152
3.2.4 差动放大电路的改进形式	105	4.2.2 提高放大倍数的稳定性	152
思考题	107	4.2.3 减少非线性失真	154
3.3 电流源电路与输出级电路	107	4.2.4 扩展带宽	155
3.3.1 基本电流源电路	107	4.2.5 对反馈放大电路输入电阻和输出电阻的影响	155
3.3.2 其他电流源形式	109	思考题	158
3.3.3 输出级电路	110	4.3 深度负反馈放大电路的分析计算方法	158
思考题	113	4.3.1 什么是深度负反馈	159
3.4 MOS集成运算放大器中的主要单元电路	113	* 4.3.2 深度负反馈放大电路的分析计算	159
3.4.1 MOS集成运放的主要特点	113	思考题	163
3.4.2 MOS集成运放中的基本单元电路	113	小结	163
思考题	114	习题	164
3.5 多级放大电路	114	技能实训	167
3.5.1 多级放大电路的耦合方式	115		
* 3.5.2 多级放大电路的指标计算	117	第5章 信号的运算与处理电路	169
思考题	119	5.1 概述	169
3.6 放大电路的频率特性	120	思考题	170
3.6.1 频率特性的一般概念	120	5.2 基本运算电路	171
3.6.2 单级放大电路的频率特性	121	5.2.1 比例运算电路	171
3.6.3 多级放大电路的频率特性	123	5.2.2 加法运算电路	172
思考题	123	5.2.3 减法运算电路	172
3.7 常用集成运算放大器	124	5.2.4 积分和微分运算电路	173
3.7.1 集成运算放大器的基本概念	124	5.2.5 对数和指数运算电路	174
3.7.2 集成运放的电路组成与工作原理	125	思考题	175
3.7.3 集成运放的主要参数	128	5.3 有源滤波电路	176
3.7.4 集成运放的主要类型	129	5.3.1 基本概念	176
3.7.5 集成运放在电子技术中的应用	131	5.3.2 低通滤波电路	176
小结	133	5.3.3 高通滤波电路	177
		5.3.4 带通滤波电路和带阻滤波电路	178

思考题	180	思考题	222
5.4 模拟乘法器	180	7.3 LC 正弦波振荡电路	222
5.4.1 基本概念及外特性	180	7.3.1 变压器反馈式 LC 正弦波 振荡电路	222
5.4.2 集成模拟乘法器的应用	181	7.3.2 电感反馈式 LC 正弦波 振荡电路	226
思考题	181	7.3.3 电容反馈式 LC 正弦波 振荡电路	227
5.5 电压比较器	181	7.3.4 石英晶体振荡电路	229
5.5.1 简单电压比较器	182	思考题	232
5.5.2 滞回比较器	182	7.4 非正弦信号产生电路	232
思考题	183	7.4.1 比较器	232
5.6 集成运放应用中的一些实际问题	183	7.4.2 矩形波产生电路	237
思考题	184	7.4.3 锯齿波产生电路	239
小结	184	思考题	240
习题	184	7.5 集成函数发生器 8038 简介	241
技能实训	188	小结	243
第 6 章 低频功率放大器	190	习题	244
6.1 概述	190	技能实训	249
6.1.1 功率放大电路的主要特点	190	第 8 章 直流稳压电源	252
6.1.2 功率放大电路的工作状态与 效率的关系	192	8.1 概述	252
思考题	193	思考题	252
6.2 互补对称功率放大电路	193	8.2 整流电路	252
6.2.1 双电源互补对称 电路(OCL 电路)	193	8.2.1 单相半波整流电路	252
6.2.2 单电源互补对称 电路(OTL 电路)	198	8.2.2 单相全波整流电路	253
6.2.3 实际功率放大电路举例	201	8.2.3 单相桥式整流电路	254
思考题	202	思考题	256
6.3 集成功率放大器	202	8.3 滤波电路	256
6.3.1 集成功率放大器概述	202	8.3.1 电容滤波电路	256
6.3.2 集成功放应用简介	202	8.3.2 其他形式的滤波电路	257
小结	206	8.3.3 倍压电路	258
习题	206	思考题	260
技能实训	210	8.4 线性稳压电路	260
第 7 章 信号产生电路	212	8.4.1 直流稳压电源的主要性能指标	260
7.1 正弦波振荡器的基本概念	212	8.4.2 串联反馈式稳压电路	261
7.1.1 正弦波振荡器与正反馈	212	8.4.3 三端集成稳压器	261
7.1.2 起振条件与平衡条件	213	8.4.4 三端集成稳压器的应用	262
思考题	215	思考题	264
7.2 RC 正弦波振荡电路	215	8.5 开关稳压电源	264
7.2.1 RC 桥式正弦波振荡电路	215	8.5.1 开关电源的控制方式	264
7.2.2 RC 移相式正弦波振荡电路	221	8.5.2 脉宽调制式开关电源的 基本原理及应用电路	265

思考题	267	附录 B 二极管和三极管的型号及	
8.6 单相可控硅整流电路	267	主要参数举例	284
8.6.1 晶闸管	267	附录 C 硅整流二极管最高反向	
8.6.2 单相可控硅整流电路	271	工作电压分挡规定	286
8.6.3 晶闸管的触发电路	273	附录 D 国内外集成电路型号	
思考题	277	命名方法	287
小结	277	参考文献	290
习题	277		
技能实训	280		
附录 A 半导体分立器件的型号			
命名方法	281		

第 1 章 基本半导体分立器件

半导体器件是构成电子电路的基础。半导体器件和电阻、电容、电感等器件连接起来，可以组成各种电子电路。在电子电路中完成某种功能的单个半导体器件即为半导体分立器件。它们一般都具有能量控制作用，我们称之为有源器件。

半导体器件是 20 世纪中期开始发展起来的，具有体积小，重量轻，使用寿命长，可靠性高，输入功率小和功率转换效率高等优点，因而在现代电子技术中得以广泛的应用。

本章首先介绍半导体的基本知识，然后介绍基本的半导体器件：半导体二极管、半导体三极管和场效应管的基本结构、工作原理、参数以及它们的简单应用，为以后的电子技术的学习打下基础。

1.1 半导体的基本知识与 PN 结

顾名思义，半导体器件都是由半导体材料制成的。因此，要了解半导体器件的工作原理，就必须对半导体材料的特点有一定的了解。

1.1.1 半导体的基本特性

在自然界中存在着许多不同的物质，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、电阻率小于 $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质，称为导体，例如铜、铝、银等金属材料；将很难导电、电阻率大于 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ 的物质，称为绝缘体，例如塑料、橡胶、陶瓷等材料；将导电能力介于导体和绝缘体之间、电阻率在 $10^{-3} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ 范围内的物质，称为半导体。常用的半导体材料是硅(Si)和锗(Ge)。

用半导体材料制作电子元器件，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，这就是半导体的热敏性、光敏性和杂敏性。

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。一种硫化镉薄膜，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。

1.1.2 本征半导体

在近代电子学中，最常用的半导体材料就是硅和锗，下面以它们为例，介绍半导体的一些基本知识。

一切物质都是由原子构成的，而每个原子都由带正电的原子核和带负电的电子构成。由于内层电子受原子核的束缚较大，很难活动，因此物质的特性主要由受原子核的束缚力较小的最外层电子，也就是价电子来决定。硅原子和锗原子的电子数分别为 32 和 14，所以它们最外层的电子都是四个，是四价元素。其原子结构可以表示成如图 1-1 所示的简化模型。

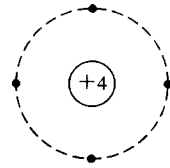


图 1-1 硅和锗的原子结构简化模型

在实际应用中，必须将半导体提炼成单晶体——使它的原子排列由杂乱无章的状态变成有一定规律、整齐地排列的晶体结构，如图 1-2 所示，称为单晶。硅和锗等半导体都是晶体，所以半导体管又称晶体管。通常把纯净的不含任何杂质的半导体称为本征半导体。

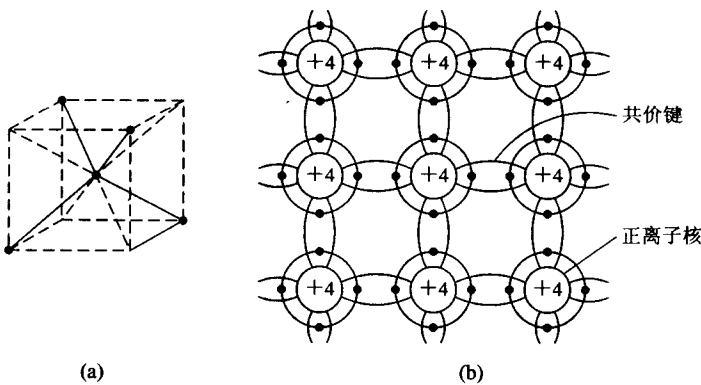


图 1-2 本征硅(或锗)的晶体结构
(a) 结构图；(b) 平面示意图与共价键

从图 1-2(b)的平面示意图可以看出，硅和锗原子组成单晶的组合方式是共价键结构。每个价电子都要受到相邻的两个原子核的束缚，每个原子的最外层就有了八个价电子而形

成了较稳定的共价键结构。所以，半导体的价电子既不像导体的价电子那样容易挣脱成为自由电子，也不像在绝缘体中被束缚的那样紧。由于导电能力的强弱，在微观上看就是单位体积中能自由移动的带电粒子数目的多少，因此，半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

1. 本征激发与复合

在绝对零度($-273\text{ }^{\circ}\text{C}$)时，半导体中的价电子不能脱离共价键的束缚，所以在半导体中没有自由电子，半导体呈现不能导电的绝缘体特性。

当温度逐渐升高或在一定强度的光照下，本征硅或锗中的一些价电子从热运动中获得了足够的能量，挣脱共价键的束缚而成为带单位负电荷的自由电子。同时，在原来的共价键位置上留下一个相当于带有单位正电荷电量的空位，称之为空穴，也叫空位。这种现象，叫做本征激发。在本征激发中，带一个单位负电荷的自由电子和带一个单位正电荷的空穴总是成对出现的，所以称之为自由电子—空穴对，如图 1-3 所示。自由电子和空穴在热运动中又可能重新相遇结合而消失，叫做复合。本征激发

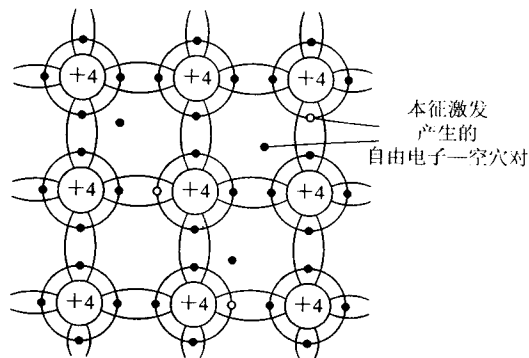


图 1-3 本征激发产生自由电子—空穴对

和复合总是同时存在、同时进行的，这是半导体内部进行的一对矛盾运动。在温度一定的情况下，本征激发和复合达到动态平衡，单位时间本征激发出的自由电子—空穴对数目正好等于复合消失的数目，这样在整块半导体内，自由电子和空穴的数目保持一定。一般在室温时，纯硅中的自由电子浓度 n 和空穴浓度 p 为

$$n_i = n = p \approx 1.5 \times 10^{10} (\text{个}/\text{cm}^3) \quad (1-1)$$

对于纯锗来说，这个数据约为 $2.5 \times 10^{13} \text{ 个}/\text{cm}^3$ ，而金属导体中的自由电子浓度约为 $10^{22} \text{ 个}/\text{cm}^3$ 。从数字上可以看出，本征半导体的导电能力是很差的。温度越高，本征激发越激烈，产生的自由电子—空穴对越多，当半导体重新达到动态平衡时的自由电子或空穴的浓度就越高，导电能力就越强。这实际上就是半导体材料具有热敏性和光敏性的本质原因。

但要注意，整块本征半导体的自由电子和空穴数是相等的，所以整块半导体是呈电中性的，不带电量。

2. 自由电子运动与空穴运动

经过分析，我们知道在本征半导体中，每本征激发出一个自由电子，就会留下一个空穴，这时本来不带电的原子，就相当于带正电的正离子，或者说留下的这个空穴相当于带一个单位的正电荷。在热能或外加电场的作用下，邻近原子带负电的价电子很容易跳过来填补这个空位，这相当于此处的空穴消失了，但却转移到相邻的那个原子处去了，如图 1-4 所示，价电子由 B 到 A 的运动，就相当于空穴从 A 移动到 B。而新形成的这个空位，又会被其他相邻原子的价电子所填补。这样依次递补就形成了空穴的相对运动。所以空穴

运动的实质就是价电子依次填补空位的运动，就像一个带正电的空穴在价电子移动的相反方向上运动一样。这样，可以把空穴看成是一种可以运动的带正电荷的粒子，它和自由电子一样都是可以运动的、带电荷的粒子，所以称这两种粒子都是载流子。

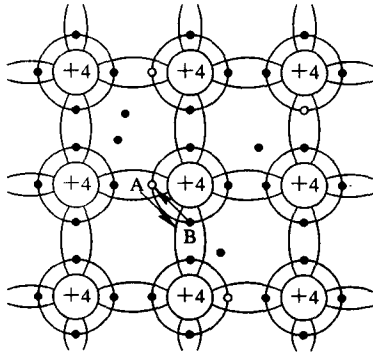


图 1-4 空穴运动

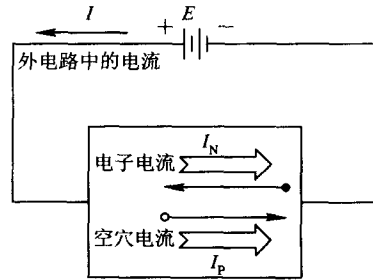


图 1-5 本征半导体中载流子的导电方式

因此，半导体中有两种载流子：一种是带负电荷的自由电子，一种是带正电荷的空穴。它们在外加电场的作用下都会出现定向移动。微观上载流子的定向运动，在宏观上就形成了电流。自由电子逆电场方向移动形成电子电流 I_N ，空穴顺电场方向移动形成空穴电流 I_P ，如图 1-5 所示。所以半导体在外加电场作用下，电路中总的电流 I 是空穴电流 I_P 和电子电流 I_N 的和，即

$$I = I_N + I_P \quad (1-2)$$

同时有两种载流子参与导电是半导体所独有的。虽然金属导体中只有自由电子一种载流子，但它的浓度要远远高于本征半导体中自由电子与空穴浓度之和，因此金属导体的导电能力还是远远地高于半导体。

1.1.3 杂质半导体

由于半导体具有杂敏性，因此利用掺杂可以制造出不同导电能力、不同用途的半导体器件。根据掺入杂质的不同，又可分为 N 型(电子型)半导体和 P 型(空穴型)半导体。

1. N 型半导体

在四价的本征硅(或锗)中，掺入微量的五价元素磷(P)之后，磷原子由于数量较少，不能改变本征硅的共价键结构，而是和本征硅一起组成共价键，如图 1-6 所示。

磷原子最外层有五个价电子，因此用四个价电子与和它相邻的四个硅原子构成共价键后，尚余的一个价电子就成为了带负电的自由电子。同时，磷原子由于失去一个电子，而成为带正电的离子，因此，每掺入一个杂质原子，就相当于掺入了一个自由电子，而掺入杂质的

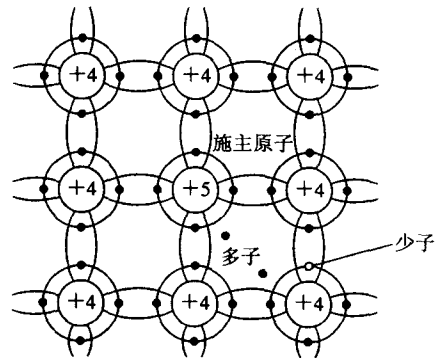


图 1-6 N 型半导体

浓度越高,提供的自由电子浓度就越高。

在本征硅中掺入亿分之一的五价元素,则掺入的自由电子数为 $10^{-8} \times 10^{22}$ 个/ $\text{cm}^3 = 10^{14}$ 个/ cm^3 , 远远高于 10^{10} 个/ cm^3 的本征载流子浓度,所以自由电子数大大增多,半导体的导电能力增强。但整块半导体并没有额外获得电荷,仍然呈电中性。

由于磷元素杂质可以提供自由电子,故称之为施主杂质。在这种掺杂半导体中的自由电子数远远大于空穴数,因此称自由电子为多数载流子,简称多子;本征激发产生的空穴为少数载流子,简称少子。这种掺杂半导体称为 N 型或电子型半导体。

在 N 型半导体中,由于掺杂带来的自由电子浓度远远高于本征载流子浓度,因此多子浓度约等于掺杂的杂质浓度,远远高于少子空穴的浓度。所以当外加电场时,流过 N 型半导体的电流应为

$$I = I_N + I_P \approx I_N \quad (1-3)$$

2. P 型半导体

在四价的本征硅(或锗)中掺入微量的三价元素硼(B)之后,参照上述分析,硼原子也和周围相邻的硅原子组成共价键结构,如图 1-7 所示。

三价硼原子的最外层只有三个价电子,和相邻的三个硅原子组成共价键后,尚缺一个价电子不能组成共价键,因此出现了一个空位,即空穴。这样邻近原子的价电子就可以跳过来填补这个空位。所以硼原子掺入后一方面提供了一个带正电荷的空穴,一方面自己成为了带负电的离子,即掺入一个硼原子就相当于掺入了一个能接受电子的空穴,所以称三价元素硼为受主杂质,此时杂质半导体中的空穴浓度约等于掺杂浓度,远远大于自由电子浓度,称空穴为多子、自由电子为少子。这种杂质半导体叫做 P 型(空穴型)半导体。

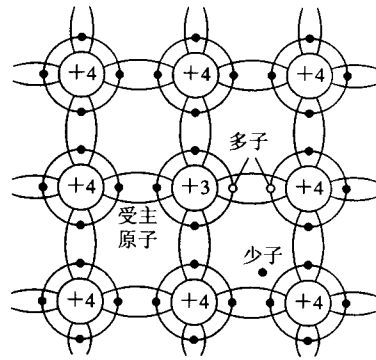


图 1-7 P 型半导体

同样,这种 P 型半导体在外加电场的作用下,总的电路电流应为

$$I = I_N + I_P \approx I_P \quad (1-4)$$

整块半导体宏观上仍为电中性。

总之,半导体的导电能力随掺入的杂质及温度、光照的不同而显著变化。半导体不仅有本征半导体,还有杂质半导体。半导体中有两种载流子:自由电子和空穴。本征半导体中两种载流子浓度相同,杂质半导体中两种载流子浓度不同。杂质半导体有 N 型和 P 型之分:在 N 型半导体中,自由电子是多子,空穴是少子;在 P 型半导体中,空穴是多子,自由电子是少子。本征半导体和杂质半导体都是电中性的。

1.1.4 PN 结的形成与单向导电性

几乎所有的半导体器件都是由不同数量和结构的 PN 结构成的,因此,我们先来了解 PN 结的结构与特点。

1. PN 结的形成

在一块本征半导体上通过某种掺杂工艺,使其形成 N 型区和 P 型区两部分后,在它们的交界处就形成了一个特殊薄层,这就是 PN 结。

1) 多子的扩散运动建立内电场

如图 1-8(a)所示,⊖和⊕分别代表 P 区和 N 区的受主和施主离子(为了简便起见,硅原子未画出),由于 P 区的多子是空穴, N 区的多子是自由电子,因此在 P 区和 N 区的交界处自由电子和空穴都要从高浓度处向低浓度处扩散。这种载流子在浓度差作用下的定向运动,叫做扩散运动。多子扩散到对方区域后,使对方区域的多子因复合而耗尽,所以 P 区和 N 区的交界处就只剩下了不能移动的带电施主和受主离子, N 区形成正离子区, P 区形成负离子区,形成了一个电场方向从 N 区指向 P 区的空间电荷区,这个电场称为内建电场,简称内电场,如图 1-8(b)所示。在这个区域内,多子已扩散到对方因复合而消耗殆尽,所以又称耗尽层。在耗尽层以外的区域仍呈电中性。

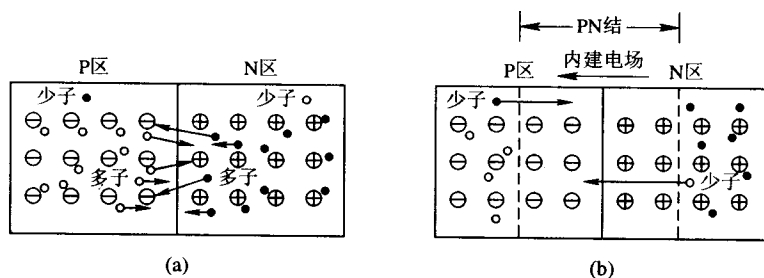


图 1-8 PN 结的形成

(a) 多子的扩散运动; (b) PN 结中的内电场与少子漂移

2) 内电场阻碍多子扩散、帮助少子漂移运动,形成平衡 PN 结

由于内电场的方向是从 N 区指向 P 区,因此这个内电场的方向对多子产生的电场力正好与其扩散方向相反,对多子的扩散起了一个阻碍的作用,使多子扩散运动逐渐减弱。内电场对 P 区和 N 区的少子同样产生了电场力的作用。由于 P 区的少子是自由电子, N 区的少子是空穴,因此内电场对少子的运动起到了加速的作用。这种少数载流子在电场力作用下的定向移动,称为漂移运动,如图 1-8(b)所示。随着内电场从无到有,从弱到强的建立,少子的漂移运动也从无到有并逐渐增强。随着扩散运动的逐渐减弱,漂移运动的逐渐增强,最后形成了一种动态平衡,即单位时间内 P 区和 N 区交界处的少子漂移数目和多子扩散数目相等。这样空间电荷区的厚度,内电场的大小都不再发生变化,宏观上 N 区和 P 区的交界面上也没有电流流过,这个空间电荷区就称为 PN 结,也称平衡 PN 结,其厚度约为几微米。

2. PN 结的单向导电特性

未加外部电压时,PN 结内无宏观电流,只有外加电压时,PN 结才显示出单向导电性。

1) 外加正偏电压时 PN 结导通

将 PN 结的 P 区接较高电位(比如电源的正极),N 区接较低电位(比如电源的负极),

称为给 PN 结加正向偏置电压，简称正偏，如图 1-9 所示。

PN 结正偏时，外加电场使 PN 结的平衡状态被打破，由于外电场与 PN 结的内电场方向相反，内电场被削弱，扩散增强，漂移几乎减弱为 0，因此，PN 结中形成了以扩散电流为主的正向电流 I_F 。因为多子数量较多，所以 I_F 较大。为了防止较大的 I_F 将 PN 结烧坏，应串接限流电阻 R 。扩散电流随外加电压的增加而增加，当外加电压增加到一定值后，扩散电流随正偏电压的增大而呈指数上升。由于 PN 结对正向偏置呈现较小的电阻(理想状态下可以看成是短路情况)，因此称之为正偏导通状态。

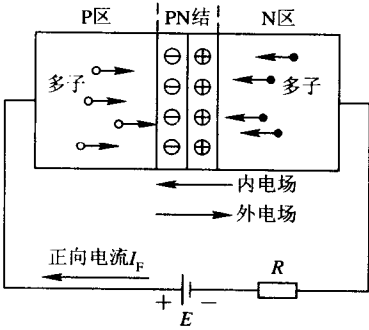


图 1-9 PN 结外加正偏电压

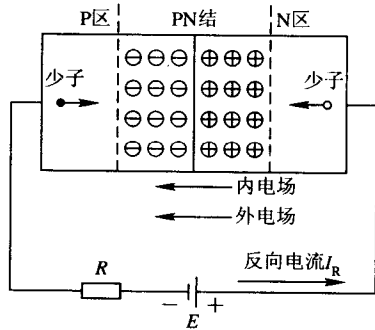


图 1-10 PN 结外加反偏电压

2) 外加反偏电压时 PN 结截止

将 PN 结的 P 区接较低电位(比如电源的负极)，N 区接较高电位(比如电源的正极)，称为给 PN 结加反向偏置电压，简称反偏，如图 1-10 所示。

PN 结反偏时，外加电场方向与内电场方向相同，内电场增强，使多子扩散减弱到几乎为零。而漂移运动在内电场的作用下，有所增强，在 PN 结电路中形成了少子漂移电流。漂移电流和正向电流的方向相反，称为反向电流 I_R 。因为漂移电流是由少子形成的，数目很少，所以 I_R 很小，常温下锗管为微安数量级，硅管仅有纳安数量级。由于少子是本征激发产生的，浓度几乎只与温度有关，因此当外加反向电压大于一定值后，反向电流 I_R 就不会再随反偏电压的增加而增大了。但少子电流 I_R 受温度的影响较大，尤其当温度变化较大时，必须予以考虑，并尽量采用硅管。

在反向偏置下，PN 结呈现出一个很大的电阻(几百千欧姆以上)，理想情况下几乎可以看作是断路，因此称 PN 结处于反偏截止状态。

综上所述，PN 结具有单向导电性：正偏时，处于导通状态，正向电阻很小；反偏时，处于截止状态，反向电阻很大。

思考题

1. 半导体有什么特性？这些特性有什么应用？

2. 解释下列几组名词的意义，指出它们的特点和区别。

(1) 自由电子、价电子、空穴、正离子、负离子。

(2) 电子导电、空穴导电；金属导电，半导体导电；本征半导体导电，掺杂半导体导电。