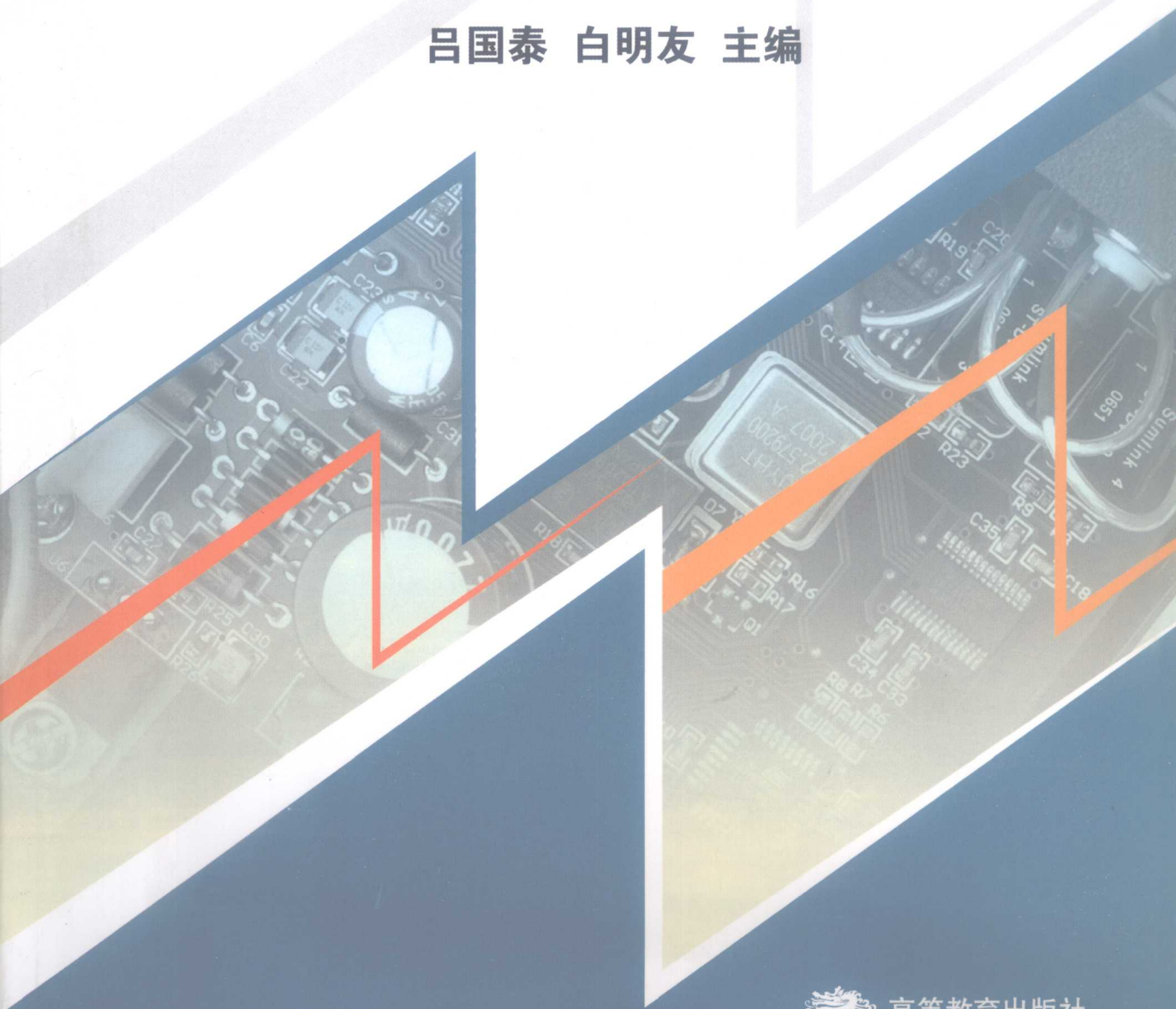




普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电子技术 (第三版)

吕国泰 白明友 主编



高等教育出版社
Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
(高职高专教育)

电子技术

(第三版)

吕国泰 白明友 主编

高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),是在《电子技术》(第二版)的基础上对原有内容进行了精选、改写、调整和补充修订而成的。

本书大幅度缩减模拟电子电路,增加数字电子电路,加强应用及培养实际操作技能。删除了原书的电力电子技术基础,增加了半导体存储器和可编程控制器。全书共九章,包括模拟电子技术和数字电子技术。书中有丰富的例题和思考题,每章后有小结和习题,书末有附录及部分习题参考答案,还附有中英文名词对照表。

本书可供高职高专机械设计制造类专业使用,也适用于高职高专非电类工程技术专业。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/吕国泰,白明友主编. —3 版. —北京:高等教育出版社,2008. 11
ISBN 978 - 7 - 04 - 024582 - 0

I. 电… II. ①吕…②白… III. ①电子技术 - 高等学校
②技术学校 - 教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 120081 号

策划编辑 孙 杰 责任编辑 李葛平 封面设计 张志奇 责任绘图 朱 静
版式设计 王艳红 责任校对 胡晓琪 责任印制 宋克学

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010 - 58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 20.75
字 数 500 000

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 1993 年 4 月第 1 版
2008 年 11 月第 3 版
印 次 2008 年 11 月第 1 次印刷
定 价 26.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 24582 - 00

第三版前言

《电子技术》(第一版)是在原国家教委高教司组织指导下编写的高工专教材,《电子技术》(第二版)是根据教育部修订的《高等学校电工学课程教学基本要求》修订的,被列为教育部高职高专推荐教材,从1993年至2007年,两版教材在全国高职高专非电类工程技术专业普遍使用。

自本书出版以来,电子技术突飞猛进,日新月异,教学改革不断深化。为适应教学改革实践需要,特对本教材进行第三版修订。

《电子技术》(第三版)大幅度缩减模拟电子电路,增加数字电子电路;缩减分立元件电路,增加集成电路;加强应用及培养实际操作技能。修订中,删除了原书第八章电力电子技术基础,增加半导体存储器和可编程控制器作为第八章。对全书各章节内容均作了精选、改写、调整和补充,使全书质量得到较大提高。

全书共九章,包括模拟电子技术和数字电子技术。其中第一、二、三、五、六、七章覆盖了高职高专机械设计制造类专业“电工学”课程关于电子技术教学的基本要求,并适当拓宽,是基本内容;第四、八、九章为非基本内容,是供某些专业选学而编写的。因此本教材内容符合教学基本要求,分量适当。

本书结构合理,体系完整,符合认识规律。本书以电子技术的基本知识、基本技能及其相应的基础理论为主,适当介绍电子技术的新成就。以分立元件电路为基础,以集成电路为重点。在模拟电子技术中,加强集成运算放大器及其应用;在数字电路中,侧重集成数字电路的应用。

本书为突出高职高专教育特色,注重理论联系实际,在保证内容科学性的前提下,简略了某些原理的论证及繁琐的公式推导,充实了较多的工程技术中应用的实例。对于电子器件,重点讲述外部特性,对内部电路或机理一般不作精细描述,或者从略;对于电子电路,以定性分析为主,重点讲述实际应用,体现了掌握概念强化应用的原则,有利于学生能力的培养。本书结构体系具有明显特色和创新,编写层次按教学程序安排,每章开头有概述,每节有练习与思考题,每章末有小结和习题,例题、练习题及习题丰富,充分满足教学需要。书末有本书教学所必需的资料附录,还附有中英文名词对照表。因此本教材教学使用方便。

本书内容较好地体现了课程的基础性、先进性和实践性,内容丰富,实用性强,可供高职高专机械设计制造类专业使用,也可用于其他高职高专非电类工程技术专业。

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材(高职高专教育),为方便教师授课,本书配有授课用电子教案,使用本教材的老师可通过网上下载电子教案([Http://hv.hep.com.cn](http://hv.hep.com.cn))。

《电子技术》(第三版)主编为哈尔滨理工大学吕国泰教授、白明友副教授。本书由哈尔滨理工大学陈涛副教授主审,审者对书稿进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见和修改建议。曾参加本书第一版和第二版编写和修订的有魏玉清老师、吴项老师和张丽娟老师。编者在此谨向为

本书做出贡献各位老师致以衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望使用本书的师生和读者批评指正。

吕国泰

2008年7月于哈尔滨理工大学

第二版前言

《电子技术》(第一版)是根据1991年颁发的《高等学校工程专科电子技术课程教学基本要求》编写的基本教材,出版于1993年4月,已经使用了七年,累计印数50000册,在全国各高等学校工程专科非电类工程技术专业普遍使用。

现根据修订的《高等学校工程专科电工学课程教学基本要求》,并为适应《电工学试题库》的推广使用,对原《电子技术》教材进行修订。修订版中,对半导体器件的内部作用机理及分立元件电路的分析作了必要的删节,加强了集成运算放大器的应用分析;在数字电子电路部分,从使用的角度出发,介绍了一些常用中规模集成芯片的功能、管脚引线图及应用实例;将第八章的内容扩展为电力电子技术,介绍了一些晶闸管派生器件,以及晶闸管在逆变、变频、交流调压等方面的应用;增加了非电量电测技术,作为本书第九章,主要介绍新技术传感器及其应用;并对原版某些章节部分内容做了适当修改,以满足教学改革实践需要。

经修订后,全书内容较好地体现了课程的基础性、先进性和实践性。内容丰富,有很强的实用性。本书不仅适用于高等工程专科非电类工程技术专业,而且适用于高等职业技术教育。

本书修订版主编为哈尔滨理工大学工业技术学院吕国泰教授、中国计量学院吴项副教授,哈尔滨理工大学工业技术学院张丽娟副教授编写了第九章非电量电测技术。本书由北京理工大学刘蕴陶教授和哈尔滨工业大学朱毓芬副教授主审,两位教授对书稿进行了详细的审阅,并提出了许多宝贵的意见和修改的建议。在此,谨向他们致以衷心的感谢,我们根据提出的意见和建议进行了认真的修改。高等教育出版社电工电子室的同志们对本书的修订工作自始至终给予了极大的支持和帮助,在此对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中错误和不妥之处在所难免,殷切希望使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

2000年9月

第一版前言

本书是在国家教育委员会高教司组织指导下,根据《高等学校工程专科电子技术课程教学基本要求》编写的基本教材,经全国高等学校工程专科电工学课程教材编审组审查通过,作为高等学校工程专科非电类专业教材出版,可与席时达主编的《电工技术》教材配套使用。

本书从高等工程专科学校培养应用型技术人才这一总目标出发,以“电子技术”课程教学基本要求为依据,以应用为目的,以必需够用为度,组织编写教材的内容和结构。全书共八章,包括模拟电子技术和数字电子技术。其中第一、二、三、五、六、七章覆盖了“电子技术”课程教学基本要求,并适当拓宽(标“*”部分为选学内容);第四章和第八章是在“电子技术”课程教学基本要求之外,为供某些特殊专业选学而编写的。本书以电子技术的基本知识、基本技能及其相应的基础理论为主,也适当反映或介绍现代电子科学技术发展的新成就。在电子技术中,以分立元件为基础,以集成电路为重点,加强数字电路。在模拟电子技术中,加强集成运算放大器及其应用;在数字电子技术中,侧重集成数字电路及其应用。为体现专科教学“掌握概念,强化应用”的原则,本书在保证内容科学性的前提下,简略了某些原理的论证及繁琐公式的推导。对于电子器件,重点讲述外部特性,对内部电路或机理一般不作精细描述,或者从略;对于电子电路,以定性分析为主;应用力求联系工程实际。为适应当前工程实践的发展需要,本书图形符号及产品型号采用国家最新标准。为便于教学和自学,本书编写层次按教学程序安排,每章开头有概述,每节有练习与思考题,每章末有小结和习题,书末有部分习题参考答案,并有本书教学时必需的资料附录。考虑教师使用及学生阅读方便,本书叙述力求语言通顺,说理清楚,深入浅出,通俗易懂。

本书参考学时为 54~63 学时(第四章和第八章除外),其中实验为 16~20 学时。

参加本书编写的有:哈尔滨机电专科学校吕国泰(编写第一章、第四章、第五章、第六章和第七章),郑州机械专科学校魏玉清(编写第二章、第三章和第八章)。吕国泰担任主编。

本书由汕头大学黄义源副教授主审。

参加《电子技术》杭州审稿会议的有北京轻工业学院孙骆生教授,汕头大学黄义源副教授,上海交通大学孙文卿教授、朱承高高级工程师,上海机械专科学校席时达副教授,哈尔滨机电专科学校吕国泰副教授,山东水利专科学校邱少岳副教授,湖南省纺织专科学校易源屏副教授、武汉冶金建筑专科学校沈时伦高级工程师,江南大学刘琴芳副教授,郑州机械专科学校王文胜副教授、魏玉清老师,上海纺织专科学校周瑞华老师,浙江工学院林镜钊副教授、俞荣泉副教授,合肥联合大学金树德副教授。

在本书编写过程中,还得到了许多学校的老师和同学的大力支持和帮助,在此一并致谢。

由于编者水平有限,书中可能有错误和不妥之处,殷切期望使用本书的师生和广大读者提出批评和修改意见。

编 者

1991 年 11 月

目 录

第一章 半导体二极管和三极管.....	1	二、各元件的作用.....	27
1-1 半导体的导电特性	1	练习与思考	28
一、半导体的特点	1	2-2 放大电路的分析.....	28
二、本征半导体	2	一、静态分析.....	29
三、N 型半导体和 P 型半导体	3	二、动态分析.....	30
练习与思考	4	三、分压式偏置放大电路.....	31
1-2 PN 结.....	4	练习与思考	34
一、PN 结的形成.....	4	2-3 放大电路的微变等效电路分析法.....	34
二、PN 结的单向导电性.....	5	一、三极管的微变等效电路.....	34
练习与思考	6	二、电压放大倍数的计算.....	36
1-3 半导体二极管	6	三、放大电路输入电阻和输出电阻的 计算.....	39
一、二极管的结构	7	练习与思考	40
二、二极管的伏安特性	8	2-4 多级放大电路.....	40
三、二极管的主要参数	9	一、级间耦合方式.....	41
四、半导体二极管应用举例	9	二、多级放大电路电压放大倍数的计算.....	42
练习与思考	11	练习与思考	45
1-4 稳压二极管.....	11	2-5 放大电路中的负反馈.....	45
一、硅稳压二极管及其特性.....	11	一、负反馈的一般概念.....	45
二、硅稳压二极管的主要参数.....	12	二、负反馈放大电路举例.....	46
练习与思考	13	三、负反馈对放大电路工作性能的影响.....	49
1-5 半导体三极管.....	13	练习与思考	54
一、三极管的结构.....	13	2-6 射极输出器.....	54
二、三极管的电流分配关系与电流放大 作用.....	15	一、电路的组成.....	54
三、特性曲线.....	17	二、工作原理.....	55
四、主要参数.....	20	三、射极输出器的用途.....	57
练习与思考	22	练习与思考	58
本章小结.....	23	2-7 功率放大电路.....	58
习题.....	23	一、概述.....	58
第二章 基本放大电路	26	二、互补对称功率放大电路.....	59
2-1 基本放大电路的组成.....	26	三、集成功率放大器.....	61
一、基本电压放大电路的组成.....	26	练习与思考	62

本章小结	62	习题	98
习题	63	第四章 正弦波振荡电路	103
第三章 集成运算放大器	69	4-1 自激振荡	103
3-1 差分放大电路	69	一、自激振荡平衡条件	104
一、直接耦合方式	69	二、振荡的建立与稳定	105
二、差分放大电路	70	三、正弦波振荡电路的基本组成部分	105
练习与思考	73	练习与思考	105
3-2 运算放大器的电压传输特性和主要参数	74	4-2 RC 正弦波振荡电路	106
一、集成运算放大器的符号	74	一、RC 串并联选频电路的选频特性	106
二、主要参数	75	二、桥式 RC 振荡电路	106
三、电压传输特性	76	三、应用举例	108
四、理想运算放大器	76	练习与思考	109
练习与思考	77	4-3 LC 正弦波振荡电路	109
3-3 运算放大器的线性应用	77	一、变压器反馈式振荡电路	110
一、反相输入运算电路	77	二、三点式振荡电路	112
二、同相输入比例运算电路	78	三、应用举例	113
三、加法运算电路	79	练习与思考	115
四、减法运算电路	80	4-4 石英晶体正弦波振荡电路	115
五、积分运算电路	81	练习与思考	117
六、微分运算电路	83	本章小结	117
七、PI 调节器	84	习题	118
八、交流电压表电路	85	第五章 直流电源	120
九、电压源和电流源	85	5-1 整流电路	120
十、有源低通滤波器	87	一、单相桥式整流电路	121
十一、电流、电压转换电路	89	* 二、三相桥式整流电路	123
十二、精密放大电路	90	练习与思考	126
练习与思考	91	5-2 滤波电路	127
3-4 运算放大器的非线性应用	91	练习与思考	130
一、比较器	92	5-3 稳压电路	130
二、方波发生器	94	一、稳压管稳压电路	130
练习与思考	95	二、串联型稳压电路	131
3-5 运算放大器的选用及使用注意事项	95	练习与思考	132
一、选用元件	95	5-4 集成稳压电源	132
二、使用时的注意事项	96	练习与思考	135
三、运算放大器的保护	96	本章小结	136
练习与思考	97	习题	136
本章小结	97	第六章 门电路和组合逻辑电路	138
		6-1 数字电路概述	138

一、数字电路的主要特点	138	7-2 寄存器	192
二、脉冲信号波形与参数	139	一、数码寄存器	193
三、十进制数与二进制数	140	二、移位寄存器	194
练习与思考	143	练习与思考	197
6-2 基本逻辑门电路	143	7-3 计数器	197
一、三种最基本的逻辑关系	143	一、二进制加法计数器	197
二、与门电路	145	二、十进制加法计数器	203
三、或门电路	146	练习与思考	208
四、非门电路	147	7-4 数/模和模/数转换器	209
练习与思考	149	一、数/模转换器	209
6-3 集成逻辑门电路	149	二、模/数转换器	212
一、TTL 与非门	150	练习与思考	215
二、TTL 三态输出与非门电路	152	7-5 555 定时器	215
三、CMOS 门电路	153	一、555 定时器	216
练习与思考	155	二、555 定时器的应用举例	217
6-4 组合逻辑电路的分析	156	练习与思考	220
一、逻辑代数	156	7-6 数字电路应用举例	221
二、组合逻辑电路的分析	163	一、优先裁决电路	221
三、组合逻辑电路的设计	164	二、脉冲顺序分配器	221
练习与思考	166	三、数字钟	222
6-5 加法器	166	本章小结	223
一、半加器	167	习题	223
二、全加器	167		
练习与思考	169	第八章 半导体存储器和可编程	
6-6 二-十进制编码器	170	逻辑器件	228
练习与思考	172	8-1 存储器概述	228
6-7 译码器和数码显示	172	一、概述	228
一、二进制译码器	172	二、存储器的主要技术指标	229
二、二-十进制显示译码器	174	练习与思考	229
练习与思考	179	8-2 只读存储器(ROM)	229
本章小结	179	一、固定 ROM	230
习题	180	二、可编程 ROM(PROM)	233
第七章 触发器和时序逻辑电路	183	三、ROM 的应用实例	236
7-1 双稳态触发器	183	四、逻辑门电路的简化画法	237
一、RS 触发器	183	练习与思考	238
二、JK 触发器	187	8-3 随机存取存储器	238
三、D 触发器	190	一、RAM 的分类	238
练习与思考	192	二、RAM 的结构和工作原理	239
		三、集成 RAM 存储器	240

四、RAM 存储容量的扩展	240	三、光敏电阻	266
练习与思考	241	四、光电子器件的应用	267
8-4 可编程逻辑器件	241	五、电荷耦合摄像器件(CCD)	269
一、PLD 的结构框图	241	练习与思考	270
二、可编程逻辑阵列 PLA 简介	242	9-5 其他传感器及检测技术	271
三、可编程阵列逻辑 PAL 简介	243	一、接近开关	271
四、通用阵列逻辑 GAL 简介	243	二、霍尔传感器	272
五、现场可编程门阵列 FPGA	244	三、生物传感器	274
六、在系统可编程逻辑器件 ispPLD	245	练习与思考	275
七、PLD 发展趋势	247	9-6 非电量电测系统	275
练习与思考	248	一、信号处理电路	276
本章小结	248	二、信号的显示与记录	279
习题	248	练习与思考	279
第九章 非电量电测技术	250	本章小结	280
9-1 非电量电测技术概述	250	习题	280
一、传感器的作用	250	附录	283
二、传感器的基本性能	251	附录一 半导体器件型号命名方法(国家	
三、传感器的选择原则	251	标准 GB249—74)	283
四、关于测量误差	252	附录二 常用半导体器件的参数	285
练习与思考	253	附录三 集成电路型号命名(原部颁	
9-2 温度传感器	253	标准)	289
一、半导体热敏电阻及其应用	253	附录四 半导体集成电路型号命名方法	
二、热电偶及其应用	255	(国家标准 GB3430—82)	290
三、集成温度传感器及其应用	258	附录五 部分国标集成电路的品种、型号	
练习与思考	259	和引脚图	294
9-3 湿度传感器	259	附录六 几种集成运算放大器和 TTL 电	
一、湿敏器件的基本特性	260	路的主要参数	296
二、半导体陶瓷湿度传感器	260	附录七 常用电路图形符号新旧标准对	
三、湿度的测量及湿度传感器的应用	261	照表	298
四、结露传感器及其应用	262	附录八 常用电阻、电容器型号	301
练习与思考	263	汉英名词对照	306
9-4 光电传感器	264	部分习题参考答案	317
一、光电二极管	264	参考文献	320
二、光电三极管	265		

第一章

半导体二极管和三极管

半导体二极管和三极管是电子技术中最基本的半导体电子器件,它们的基本结构、工作原理、特性和参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。而半导体的导电特性和 PN 结的基本原理,又是人们了解半导体二极管和三极管的基础。因此,本章首先简要地介绍半导体的导电特性和 PN 结的基本原理,然后介绍半导体二极管和三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数,为后面各章的讨论打下必要的基础。

1-1 半导体的导电特性

半导体器件由于其体积小、重量轻、耗电少、效率高、寿命长、工作可靠、价格低廉等一系列优点,目前在几乎所有的科学技术领域中获得了极为广泛的应用,并且日益深入地影响着人们的生产活动和日常生活,发挥着巨大作用。

一、半导体的特点

半导体是一种导电能力介于导体与绝缘体之间的物质。常用的半导体材料有锗、硅、硒、砷化镓及大多数金属氧化物和硫化物等。

半导体之所以能获得广泛的应用,主要是因为在各种外界条件的影响下,其导电能力将会发生很大的变化。

① 掺入杂质后导电能力激增。在纯净的半导体材料(称为本征半导体)中掺入微量的某种杂质元素后,其导电能力将猛增几十万到几百万倍。例如在纯硅中加入百万分之一的硼,即可使其电阻率从 $0.214 \times 10^6 \Omega \cdot m$ 减小到 $0.4 \Omega \cdot m$,利用这种特性可制成各种不同的半导体器件,如二极管、三极管、场效应管、晶闸管等。

② 光照影响导电能力。某些半导体材料受到光照射时,其导电能力将显著增强。例如硫化镉(CdS)材料在有光照和无光照的条件下,其电阻率有几十到几百倍的差别,利用半导体的光敏特性,可以制成各种光敏器件,如光敏电阻、光电管等。

③ 对温度的变化反应灵敏。当温度升高时,其电阻率减小,导电能力显著增强。例如纯锗,当温度从 20°C 升高到 30°C 时,其电阻率约降低一半。利用半导体的这种热敏特性,可以制成各种热敏器件,用于温度变化的检测。但是,半导体器件对温度变化的敏感,也常常会严重影响其

正常工作。

二、本征半导体

不含杂质且具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。最常用的本征半导体是锗和硅晶体,它们都是四价元素,即在其原子结构模型的最外层轨道上各有四个价电子。下面以硅晶体为例来说明半导体的导电特性。

图 1-1-1 是硅晶体中原子排列方式的立体示意图,硅原子在空间排列成很有规律的空间点阵,即晶格。由于晶格中原子之间的距离很近,处于每个原子最外层的价电子不仅受到所属原子核的作用,而且还会受到相邻原子核的吸引,因而任何一个价电子都为相邻的原子核所共有,即任何两个相邻的原子都具有一对价电子,称为共价键。图 1-1-2 是硅晶体共价键的示意图。

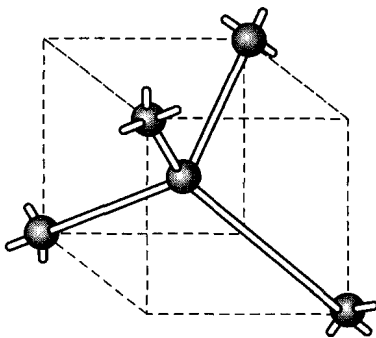


图 1-1-1 硅晶体原子排列方式
立体示意图

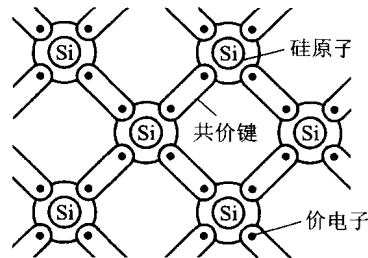


图 1-1-2 硅晶体共价键的示意图

本征半导体在温度 $T=0\text{ K}$ (热力学温度零度) 且没有其他外部能量作用时,其共价键中的价电子被束缚得很紧,不能成为自由电子,这时的半导体不导电,在导电性能上相当于绝缘体。但是,当半导体的温度升高或给半导体施加能量(如光照)时,就会使共价键中的某些价电子获得足够的能量而挣脱共价键的束缚,成为自由电子,这个过程称为激发。显然,自由电子是本征半导体中可以参与导电的一种带电粒子,称为载流子。

价电子脱离共价键成为自由电子之后,在原来的位置上就留下一个空位,称为空穴(图 1-1-3)。由于失去价电子(即带空穴)的原子带正电,它将吸引邻近原子的价电子来填补这个空穴,因而这个邻近原子也因失去价电子而产生新的空穴。这个空穴又会被其他价电子所填补,又产生一个新的空穴。如此下去,就好像是带正电的空穴在一步步移动。实际上,空穴是不动的,移动的只是价电子。于是空穴就可以被看做带正电的载流子,所带电量与电子相等,但符号相反。空穴的运动相当于正电荷的运动。在没有外电场作用时,自由电子和空穴的

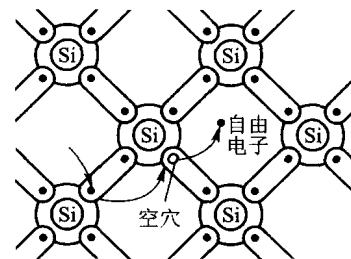


图 1-1-3 自由电子和
空穴的形成

运动都是无规则的,半导体中并不产生电流。

在有外电场作用时,带负电的自由电子将逆着电场方向作定向运动,形成电子电流;带正电的空穴则顺着电场方向作定向运动(实际上是共价键中的价电子在运动),形成空穴电流。两部分电流方向相同,总电流为电子电流与空穴电流之和。由此可见,半导体中具有自由电子和空穴两种载流子,因而存在着电子导电和空穴导电两种导电方式,这是半导体导电方式的最大特点,也是在导电原理上和金属导电方式的本质差别。半导体中载流子数量的多少是衡量其导电能力的主要标志。当然,由于自由电子和空穴总是成对产生的(称为自由电子-空穴对),因而本征半导体在带电性质上仍是中性的。

半导体的导电能力的大小决定于载流子数目的多少,而载流子的数目又与温度、光照程度和掺入杂质浓度等有关,因此半导体的导电能力受温度、光照和掺入杂质等的影响。在本征半导体中,受激发后自由电子和空穴总是成对产生的。同时,自由电子在运动中如果和空穴相遇,可以放出多余的能量而填补这个空穴,二者同时消失,这种现象称为复合。在一定温度下,激发与复合达到动态平衡,于是半导体中的载流子便维持一定数目。当温度接近于热力学温度零度(即 -273°C)时,不能产生电子-空穴对,半导体不能导电。在室温(25°C)下,只有极少量的价电子挣脱共价键的束缚,产生的电子-空穴对数量很少,因此半导体的导电能力很低。当温度升高或受光照时,有更多的共价键中的价电子挣脱束缚,产生的电子-空穴对的数量增多,半导体的导电能力便显著增强。这就是半导体的导电性具有热敏性和光敏性的原因。下面重点讨论掺入杂质对半导体导电能力的影响。

三、N 型半导体和 P 型半导体

本征半导体的载流子数量太少,不能直接用来制造半导体器件。为了提高半导体的导电能力,需在本征半导体中掺入微量的杂质元素,如磷、硼、砷、镓等,成为杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同,可分为 N 型半导体和 P 型半导体两大类。

例如,在本征硅(或锗)晶体中掺入微量的磷(或其他五价元素),则磷原子将取代某些位置上的四价硅原子。由于掺入的杂质磷原子数量很少,因此不会使晶体结构受到破坏。在磷原子的五个价电子中,只需四个价电子和相邻的硅原子组成共价键结构,多余的一个价电子不参加共价键,只受磷原子核的微弱吸引,因而在常温下很容易脱离磷原子而成为自由电子,磷原子则因失去了一个电子变成了正离子,称为空间电荷,如图 1-1-4 所示。磷杂质含量虽很低,但由此而产生的自由电子数量却比本征半导体激发所产生的电子-空穴对数量大得多。这种以自由电子为主的杂质半导体称为 N 型半导体,其中的自由电子为多数载流子,空穴为少数载流子。

若在本征硅(或锗)晶体中掺入微量硼(或镓、铟等三价元素),则晶体中某些位置上的硅原子将被硼原子取代,而硼原子只能提供三个价电子,它与相邻的四个硅原子构成共价键时,必有一个共价键因缺少一个电子而出现空穴,在室温下这个空穴将吸引邻近的价电子来填补,从而使硼原子成为负离子(空间电荷),如图 1-1-5 所示。同样,掺入三价元素将使半导体中的空穴数量大为增加,因而在这种以空穴导电为主的 P 型半导体中,空穴是多数载流子,而自由电子是少数载流子。

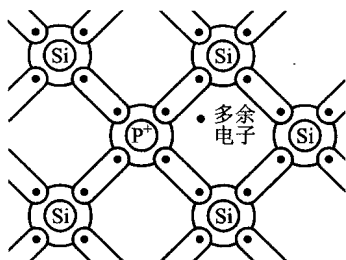


图 1-1-4 硅晶体中掺入磷形成
N 型半导体

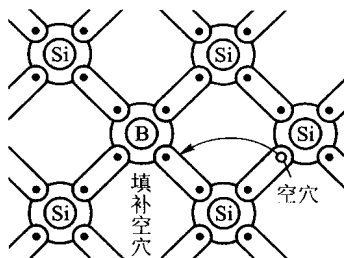


图 1-1-5 硅晶体中掺入硼形成
P 型半导体

由此可见,不论在 N 型半导体还是 P 型半导体中,多数载流子主要由掺杂产生,掺入的杂质愈多(但以不破坏半导体的晶体结构为度),多数载流子的数目就愈多。少数载流子则是由于电子挣脱共价键的束缚而产生的,温度愈高或光照愈强,少数载流子的数目就愈多。掺入少量的杂质元素,可使晶体中的多数载流子数量剧增,这样就大大提高了半导体的导电能力。不过,不论 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍然是电中性的。

由上述可知,在晶体中掺入微量的某种元素,可使晶体中的自由电子或空穴数量剧增。这样,既大大提高了半导体的导电能力,又可控制半导体中自由电子和空穴浓度的相对比例。在 N 型半导体中,自由电子浓度远大于空穴浓度;而在 P 型半导体中,空穴浓度则远大于自由电子浓度。

练习与思考

1-1-1 什么是本征半导体? 什么是杂质半导体? 本征半导体与杂质半导体的载流子有何异同?

1-1-2 电子导电和空穴导电有什么区别?

1-1-3 N 型半导体中的自由电子多于空穴,N 型半导体是否带负电? P 型半导体中的空穴多于自由电子,P 型半导体是否带正电? 为什么?

1-2 PN 结

单一的 N 型半导体或 P 型半导体,还不能直接制成半导体器件。只有将这两种类型的半导体以某种方式结合在一起,才能制成各种具有不同特性的半导体器件。利用掺杂质的方法,可使一块半导体的一部分成为 P 型半导体,而另一部分成为 N 型半导体,它们的交界面就形成一个具有特殊性质的区域,称为 PN 结。PN 结是大多数半导体器件的基本结构,如半导体二极管、三极管、晶闸管分别由一个、二个、三个 PN 结所构成。因此,了解 PN 结的形成和性质对于理解大多数半导体器件的工作原理是非常重要的。

一、PN 结的形成

利用掺杂工艺,可使一块本征硅(或锗)的一边成为 N 型半导体,另一边成为 P 型半导体。在二者交界处,由于 P 型区的空穴浓度远大于 N 型区的空穴浓度,因此,空穴将由 P 型区向 N 型

区扩散,于是,在交界处 P 型一侧留下带负电荷的离子(空间电荷)。同理,交界处 N 型区的自由电子浓度远大于 P 型区的自由电子浓度,因而电子将由 N 型区向 P 型区扩散,并在 N 型区边界留下带正电荷的离子(空间电荷)。于是在 P 型区和 N 型区的交界面上产生了一个空间电荷区,形成一个电场,称为内电场。电场方向是由正电荷区指向负电荷区,即由 N 型区指向 P 型区,如图 1-2-1 所示。

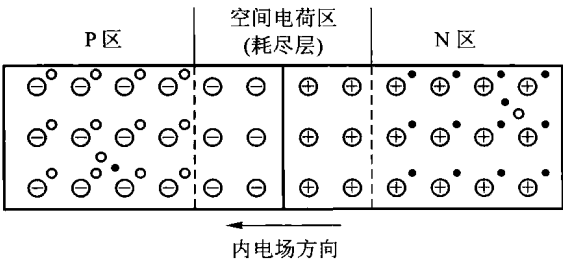


图 1-2-1 PN 结及其内电场

内电场有两种作用。一方面,它对多数载流子的扩散运动起阻挡作用;另一方面,它又可以推动少数载流子越过空间电荷区进入另一侧,称为少数载流子的漂移运动。显然,多数载流子的扩散运动方向和少数载流子的漂移运动方向是相反的。当扩散运动和漂移运动达到平衡时,空间电荷区的宽度便基本稳定下来。这个空间电荷区便称为 PN 结。PN 结内电场的电位差约为零点几伏,宽度一般为几微米到几十微米。

二、PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端加上电压,就会打破载流子扩散运动和漂移运动原有的动态平衡状态。

1. 外加正向电压

如图 1-2-2(a)所示,PN 结两端外加电压为 u_F ,P 区接正极性端,N 区接负极性端,称为外加正向电压或正向偏置。这时外电场方向与内电场方向相反,有利于多数载流子的扩散而不利

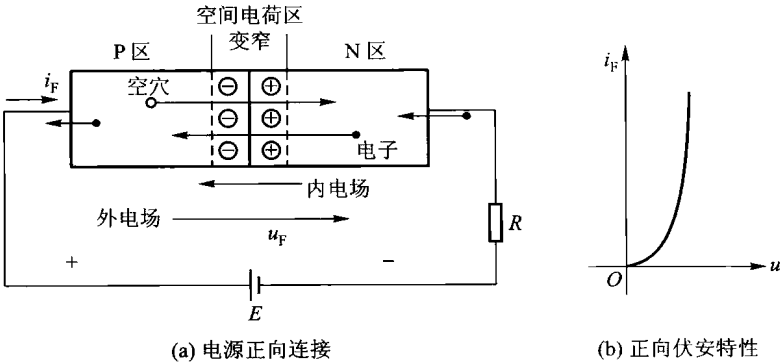


图 1-2-2 PN 结外加正向电压

少数载流子的漂移运动,形成了以扩散运动为主的正向电流 i_F 。在一定范围内,外加电压愈大,外电场愈强,正向电流就愈大,即 PN 结呈现很低的电阻,处于正向导通状态。在外电源的作用下,便可维持电流的流通。图 1-2-2(b) 是 PN 结加正向电压时的伏安特性曲线。

2. 外加反向电压

如图 1-2-3(a) 所示,PN 结两端外加电压 u_R ,P 区接负极性端,N 区接正极性端,称为外加反向电压或反向偏置,此时外加电场与内电场方向一致,有利于少数载流子的漂移而不利多数载流子的扩散,其结果是使空间电荷区变宽,内电场被增强,但因少数载流子在一定温度下数量有限,故由少数载流子漂移运动所构成的反向电流 i_R 很小,PN 结呈现高电阻特性。可以认为 PN 结在反向偏置时基本不导电,即处于截止状态。图 1-2-3(b) 是 PN 结外加反向电压时的伏安特性曲线。

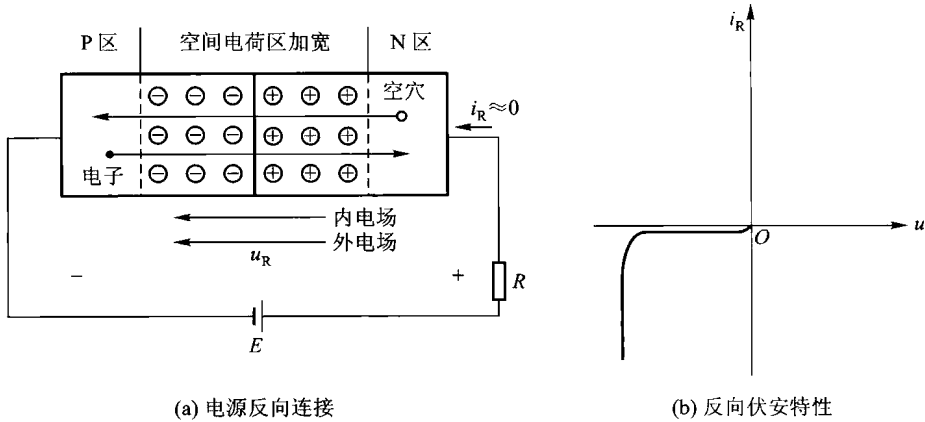


图 1-2-3 PN 结外加反向电压

由上述可知,PN 结正向偏置时,PN 结导通,其正向电阻很低,正向电流 i_F 较大;PN 结反向偏置时,PN 结截止,其反向电阻很高,反向电流 i_R 很小,这就是 PN 结的单向导电性。单向导电性是 PN 结的基本特性。

练习与思考

1-2-1 说明空间电荷区的含义。

1-2-2 什么叫扩散运动? 什么叫漂移运动? PN 结的正向电流和反向电流是何种运动的结果?

1-2-3 当 PN 结两端加正向电压或反向电压时,为什么正向电流比反向电流大? 当环境温度升高时,反向电流会增大吗? 为什么?

1-2-4 既然 PN 结存在内电场,如果将 PN 结两端通过一个电流表短接,电流表中是否有电流通过? 当用光照射这个 PN 结时,情况又怎样? 为什么?

1-3 半导体二极管

半导体二极管是最简单的半导体器件,它的用途十分广泛,例如用于整流、高频检波、元件保