

高等学校通用教材

电子技术

DIANZI JISHU

孙君曼 ◎主 编

王干一 ◎副主编



北京航空航天大学出版社

高等学校通用教材

电子技术

孙君曼 主 编
王干一 副主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会制定的电工学上部电子技术教学基本要求为依据,在高等教育面向 21 世纪电子技术教学内容和课程体系改革研究的基础上编写。本书紧扣 21 世纪对非电类专业人才培养的需求,从工程分析的角度对传统电子技术内容进行了梳理,针对非电类专业的特点及学时分布情况,对教材内容和结构体系作了适当的整合。全书分为 8 章,主要内容包括半导体二极管及三极管、基本放大电路、集成运算放大器及反馈、集成运算放大器应用电路、直流稳压电源、晶闸管及其可控电路、门电路和组合逻辑电路、时序逻辑电路。除绪论外,每章均附有大量的练习与习题,便于学生学习。

本书适合作为普通高等工科大学非电类专业的教材,也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术/孙君曼主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5124-0110-5

I. ①电… II. ①孙… III. ①电子技术 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 097816 号

版权所有,侵权必究。

电子技术

孙君曼 主 编

王千一 副主编

责任编辑 李 青 李冠咏 李徐心

✎

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:bhpress@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:18.75 字数:480 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-0110-5 定价:30.00 元

前 言

本书是按照教育部高等学校电子电气基础课程教学指导委员会制定的电工学上部电子技术教学基本要求编写的,融合了高等教育面向 21 世纪电子技术教学内容和课程体系改革研究的成果;紧扣 21 世纪对非电类专业人才培养的需求,从工程分析的角度对传统电子技术内容进行了梳理,针对非电类专业的特点及学时分布情况对教材内容和结构体系作了适当的整合。编写特点如下。

1. 内容取材紧扣教学大纲,突出基本内容

电子技术的发展日新月异,在各非电类行业应用也更加广泛,学科更加细化,而最终在工程实践中又将学科交叉和融合。如果电子技术教材内容面面俱到,去泛泛介绍细枝末节,则是浪费资源,舍本逐末的做法。本教材紧扣教学大纲要求,强调基础知识的阐述,按照本课程学时要求对电子技术基础知识作了详细介绍;同时,为使学生对新器件扩展认识,也对其有简略介绍。教师也可在讲授时进一步引导学生查阅文献资料,延伸电子新技术的学习。

2. 以电子器件为主线,采用工程技术分析方法

本书先从半导体器件的形成介绍二极管、晶体管、场效应管;然后,从简单到复杂,采用逐步深入的方法介绍各类基本放大电路的组成及其特性;最后,逐步深入到集成器件以及各种门电路器件和组成各类时序电路的触发器部件等。通过不同元器件组成的电子电路的功能特点,引入重要概念、分析方法及电路设计思路。比如分立元件放大电路中为稳定静态工作点直流反馈电阻的选用,集成运算放大器应用中负反馈的引入等。

3. 适合 60 学时为主的课程选用,也可适用 80 学时以内的课程选用

本书基本教学学时为 60 学时,由于非电类专业较多,对教学内容的要求不一,学时也有差异,为了使教材具有灵活性,将内容划分为计划讲解内容及扩展了解内容两个方面,书中无特殊标示的部分表示为必修内容,以基本原理、基本概念、基本方法、基本问题为出发点,课堂讲授、作业习题、实验等各教学环节应协调配合,反复强调,使学生概念清楚,牢固掌握。标示“*”的为选学拓宽内容,学生可结合学习兴趣,了解相关内容或结合相关书籍扩展学习。

本教材是在高校电工学教师讨论与规划的基础上,参考了第五届电子电气课程论坛上的好的经验、建议,由郑州轻工业学院的电工学编委组多次讨论、分工编

写的。孙君曼老师任主编,负责全书的规划、统稿及初稿修改工作,并编写了第1章、第2章;王干一老师任副主编,编写第3章、第4章;谢泽会老师编写第5章、第6章;曹卫锋老师编写第7章;黄春老师编写第8章;扈刚、王健东老师编写整理了附录。本教材凝结了编者的辛勤汗水和智慧,融入了老师们多年从事电工学教学研究和教学改革的实践体会,结合了教学过程中积累的经验,想呈现给工科院校非电类专业学生一本更具有针对性且易于学习的好教材。当然,任何优秀教材都要经过反复修改订正,本教材虽然已经过教学组多次核对,但也难免会出现一些失误和不足之处,还希望读者在使用过程中发现问题,并及时与作者联系,真心希望读者能给我们提出宝贵的修改意见,我们将进一步修改、完善。

本书在编写中得到郑州轻工业学院教务处及电气信息工程学院等部门的大力支持,宋寅卯教授为本书的编写、出版给予了帮助并提供了宝贵建议,在此表示衷心感谢。另外,还要感谢那些为本书编写提供宝贵意见和建议的同行们以及在出版过程中给予帮助的各位朋友。

作 者

2010年5月

目 录

第 0 章 绪 论	1
第 1 章 半导体二极管及三极管	3
1.1 半导体的导电特性	3
1.1.1 导体、半导体和绝缘体	3
1.1.2 本征半导体	4
1.1.3 N 型半导体和 P 型半导体	5
1.2 PN 结	7
1.2.1 PN 结的形成	7
1.2.2 PN 结的单向导电性	7
1.3 半导体二极管	9
1.3.1 半导体二极管的类型、结构及符号	9
1.3.2 半导体二极管的伏安特性曲线	10
1.3.3 半导体二极管的主要参数	10
1.3.4 半导体二极管的应用	11
1.4 稳压管	14
1.4.1 稳压管的结构和特性曲线	14
1.4.2 稳压管的主要参数	15
1.4.3 其他类型的二极管	16
1.5 半导体三极管	17
1.5.1 半导体三极管的基本结构	18
1.5.2 三极管的电流放大作用	19
1.5.3 三极管的共射特性曲线	20
1.5.4 三极管的主要参数	23
* 1.6 场效应管	26
1.6.1 绝缘栅型场效应管的类型和构造	26
1.6.2 场效应管的主要参数	30
习 题	32
单元测试题	35
第 2 章 基本放大电路	38
2.1 放大电路的概念及主要性能指标	38
2.1.1 放大电路的概念	38
2.1.2 放大电路的性能指标	39

2.2	放大电路的组成	40
2.2.1	基本共射放大电路的构成	41
2.2.2	直流通路和交流通路	42
2.3	放大电路的静态分析	44
2.3.1	放大电路的解析法分析	44
2.3.2	图解分析法确定静态工作点	45
2.4	放大电路的动态性能分析	47
2.4.1	三极管微变等效模型(小信号模型)的建立	47
2.4.2	放大电路的微变等效电路分析	49
2.4.3	图解法分析动态特性	52
2.4.4	放大电路的非线性失真	53
2.5	电压放大器静态工作点的稳定及其偏置电路	55
2.5.1	稳定静态工作点的必要性	55
2.5.2	工作点稳定的典型电路	56
* 2.5.3	复合管放大电路	61
2.6	放大电路的频率响应	62
2.7	射极输出器	64
2.8	多级放大器	67
2.8.1	阻容耦合电压放大器	68
2.8.2	直接耦合电压放大器	70
2.8.3	零点漂移问题	71
2.9	差分放大器	72
2.9.1	差分放大电路工作原理	72
2.9.2	典型的差动放大器电路	73
2.9.3	差分放大电路对差模信号的放大	74
2.9.4	共模抑制比	77
* 2.10	场效应管电压放大器	78
* 2.11	功率放大器	80
2.11.1	功率放大器的特点及分类	80
2.11.2	乙类互补对称功率放大器	81
2.11.3	集成功率放大电路	85
习 题		86
第3章	集成运算放大器及反馈	92
3.1	集成运算放大器概述	92
3.1.1	集成运放的特点	92
3.1.2	集成电路运算放大器的主要参数	94
* 3.1.3	集成运算放大器中的电流源	95
3.1.4	运算放大器及工作特性	96

3.2 运算放大器电路中的反馈	98
3.2.1 反馈的概念与类型	98
3.2.2 负反馈组态判断及分析举例	101
3.2.3 负反馈放大电路增益的一般表达式	106
3.2.4 负反馈对放大电路的影响	107
3.3 自激振荡及分析	109
3.3.1 自激振荡	109
* 3.3.2 负反馈放大电路自激振荡的消除方法	111
习 题	112
单元概念测试题	115
第4章 集成运算放大器应用电路	116
4.1 基本运算电路	116
4.1.1 比例运算电路	116
4.1.2 加法运算电路	119
4.1.3 减法运算电路	120
4.1.4 微分运算电路	121
4.1.5 积分运算电路	121
4.2 信号处理电路	123
4.2.1 电压比较器	123
* 4.2.2 有源滤波器	126
4.3 由运放组成的波形产生电路	129
4.3.1 正弦波发生器	129
* 4.3.2 方波发生器	131
* 4.3.3 三角波发生器	132
* 4.3.4 锯齿波发生器	132
4.4 集成运放使用常识	133
习 题	135
第5章 直流稳压电源	141
5.1 整流电路	142
5.1.1 单相半波整流电路	142
5.1.2 单相全波整流电路	144
5.1.3 单相桥式整流电路	145
* 5.1.4 三相桥式整流电路	147
5.2 滤波电路	149
5.2.1 电容滤波电路	149
5.2.2 电感滤波电路	151
5.2.3 复式滤波电路	152

5.3 直流稳压电路	153
5.3.1 直流稳压电源的技术指标及其要求	153
5.3.2 稳压管稳压电路	154
5.3.3 具有放大器件的负反馈稳压电路	155
5.3.4 集成稳压电源	157
习 题	161
* 第6章 晶闸管及其可控电路	167
6.1 晶闸管	167
6.1.1 晶闸管的结构和工作原理	167
6.1.2 晶闸管的伏安特性	169
6.1.3 晶闸管的主要参数	170
6.1.4 型号命名	170
6.2 单相可控整流电路	171
6.2.1 电阻性负载单相可控半波整流电路	171
6.2.2 单相可控桥式整流电路	172
6.3 晶闸管触发电路	175
6.3.1 单结晶体管	176
6.3.2 单结晶体管触发电路	177
习 题	178
第7章 门电路和组合逻辑电路	181
7.1 逻辑代数基础	181
7.1.1 数 制	181
7.1.2 基本概念、公式和定理	183
7.1.3 逻辑函数的化简	190
7.2 基本门电路	195
7.2.1 半导体器件的开关特性	195
7.2.2 TTL 门电路	198
* 7.2.3 CMOS 门电路	203
7.2.4 集成逻辑门电路应用时的几个问题	207
7.3 组合逻辑电路的分析与设计	209
7.3.1 组合逻辑电路的概念	209
7.3.2 组合逻辑电路的一般分析方法	210
7.3.3 组合逻辑电路的一般设计方法	211
7.4 常用组合逻辑电路	213
7.4.1 加法器	213
7.4.2 编码器	214
7.4.3 译码器和数字显示	217

* 7.4.4 数据分配器和数据选择器	222
* 7.4.5 数值比较器	223
7.5 应用举例	224
习 题	226
第 8 章 时序逻辑电路	231
8.1 触发器	231
8.1.1 RS 触发器	231
8.1.2 同步 RS 触发器	234
8.1.3 JK 触发器	235
8.1.4 D 触发器	237
8.1.5 触发器逻辑功能的转换	238
8.2 寄存器	239
8.2.1 数码寄存器	239
8.2.2 移位寄存器	240
8.3 计数器	242
8.3.1 二进制计数器	242
8.3.2 十进制计数器	246
8.3.3 任意进制计数器	249
* 8.3.4 环形计数器	252
8.4 时序逻辑电路的分析	252
* 8.5 由 555 定时器组成的单稳态触发器和多谐振荡器	255
8.5.1 555 定时器	256
8.5.2 由 555 定时器组成单稳态触发器	257
8.5.3 由 555 定时器组成多谐振荡器	259
习 题	261
附录 A 半导体分立器件型号命名方法	266
附录 B 常用半导体分立器件的参数	267
附录 C 常用半导体集成电路的参数与符号	272
附录 D 数字集成电路各系列型号分类表	273
附录 E TTL 门电路、触发器和计数器的部分品种型号	274
附录 F 中英名词对照	275
部分习题答案	281
参考文献	287

第0章 绪论

1. 电子技术课程的意义及研究的问题

电子技术是19世纪末发展起来的一门新兴学科,在20世纪取得了惊人的进步。电子技术的发展,带动了其他高新技术的飞速发展,致使工业、农业、科技和国防等领域以及人们的社会生活都发生了令人瞩目的变革。正是由于电子技术的发展推动社会步入信息时代。进入21世纪以来,作为信息时代发展支撑的电子技术必将得到进一步的发展,也必定在各行业更加广泛深入地渗透应用,各行各业的发展已和电工、电子技术密不可分。处在信息时代的我们、当代大学生们尤其是理工科学生更要深入学习掌握电工、电子技术,成为适应当前社会发展需求的复合型工程技术人才。

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。所研究的问题是:处理各类信号的电子系统的基本组成和工作原理。信号是信息的载体,电子技术中承载信息的信号分为两大类:模拟信号,数值随时间作连续变化的,即在时间上、数值上均连续的信号,典型代表是温度、速度和压力等物理量通过传感器变成的连续电信号;数字信号,在时间上和数值上均离散的信号,即在时间上是断续的,在数值上也是不连续的,典型代表是方波。

用于传递、处理模拟信号的电子线路称为模拟电路。模拟电路已经渗透到各个领域,如无线电通信、工业自动控制、电子仪器仪表以及文化生活中的电视、录音、录像等家用电器中(也有采用数字电路的)。模拟电子技术研究的问题是处理模拟信号的电路。用于传递、处理数字信号的电子线路称为数字电路,即能够实现对数字信号的传输、逻辑运算、控制、计数、寄存、显示及脉冲信号的产生和转换。数字电路被广泛地应用于数字电子计算机、数字通信系统、数字式仪表、数字控制装置及工业逻辑系统等领域。数字电子技术研究的问题是处理数字信号的电路。所以电子技术可分为“模拟”和“数字”两大部分。“模拟”部分重点讲述各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、集成运算放大器及其应用等几个方面。“数字”部分主要是讲解组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法。

2. 课程学习的基本要求及课程的任务

本课程是一门重要的承上启下的专业基础课,理论性强且与专业课有密切关系,学生应对本课程予以足够的重视。学生在进入本课程学习之前,应学过下列课程:“高等数学”、“线性代数”、“积分变换”、“大学物理”和“电工技术”等,这些课程的学习,为本课程奠定了必需的基础知识。本课程结束后,学生才能进入后续专业课程的学习阶段,如“机电传动控制”、“机械系统控制”、“设备控制”、“可编程控制器”、“机器人”、“数控机床”和“单片机”等。因为电子技术课程的分析和计算是建立在电路分析课程的基础之上的,所以在介绍电子技术课程的具体内容之前,必须具备电工技术课程的主要知识。

本课程的任务是:使学生掌握电子器件的基本知识、各种形式的基本电子电路及其分析方法,并配以实践性教学,学生应该有能力去分析和设计具体的基本电子电路,为使用、分析和改进各行业所用各类电子仪器设备打下良好的专业技能基础。至于结合实际工程分析和设计综

合自动化系统,则不是本课程的主要任务,而由其他后续课程完成。本书编写中考虑到与后续专业课的分工,书中不注重综合性的用电系统和专用设备,而只研究用电技术的一般规律和常用的电器设备、元件及基本电路。

电子技术部分以掌握或了解电子器件和集成电路的外部特性和基本应用电路为主,对内部激励或内部电路一般不作深入分析。电子电路的分析以定性为主,辅以必要的计算。通过对本课程的学习,要求熟练掌握各种放大电路与逻辑电路的分析和设计方法。

3. 教学安排及计划学时分配

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术,“模拟”部分着重各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、集成运算放大器及其应用等几个方面。“数字”部分主要掌握组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法。应针对教学对象适当精选授课内容,选用适当的教学方法。

由于本课程涉及内容广泛、线路众多、入门难,教学上应注重各种基本电子电路的分析方法,突出其规律,使学生能够“举一反三”,灵活应用。各章节之间的内容衔接应注意循序渐进,由浅入深,突出重点。配合理论教学需要,加强实践性环节,开设适当实验课,使学生通过实验,既加强了对理论教学的理解,又增强了动手能力,提高独立分析电子电路的技能。本课程共60学时,理论教学50学时,实验10学时。理论教学学时大致分配如下:第1章4学时,第2章16学时,第3章6学时,第4章4学时,第5章4学时,第7章8学时,第8章8学时。为配合理论教学需要,加强实践性教学环节,重要章节内容开设实验项目,在相应理论教学后进行。实验的意义、目的、内容及方法、要求和步骤等详见本课程实验教材。实验学时及内容也可视专业情况灵活选定。

4. 教材使用注意事项及主要参考书

由于非电类专业较多,对教学内容的要求不一,学时也有所差异,为了使教材具有灵活性,本教材对课程内容划分了计划讲解内容及扩展了解内容两个部分,书中无特殊标示部分表示为必修内容,以基本原理、基本概念、基本方法和基本问题为出发点,课堂讲授、作业习题和实验等各教学环节应协调配合,反复强调,使学生概念清晰,牢固掌握。标示“*”的为选学拓宽内容,学生可结合学习兴趣了解相关内容或结合相关书籍扩展学习。

同学们在课程学习过程中,要广泛浏览相关书籍,关注结合本专业实际生产过程中相关的技术应用,多思考,应具备查阅文献解决问题的能力。推荐如下书目仅供参考:《电工学》下册;《电子技术》(第五版),秦曾煌主编,高等教育出版社;《电子技术基础》,康华光主编;《模拟电子技术基础》,童诗白主编;《数字电子技术基础》,阎石主编;《电子技术全程辅导》,尹宝岩主编等。

第1章 半导体二极管及三极管

【引言】

半导体器件是近代电子学的重要组成部分。由于半导体器件具有体积小、质量轻、使用寿命长、输入功率小和功率转换效率高等优点而得到广泛的应用。二极管和晶体管是最常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、特性曲线和参数是分析电子电路的基础。本章内容为后续各章的讨论提供必要的基础知识。

【学习目标和要求】

- ① 了解半导体基础知识,了解PN结内部载流子的运动规律。
- ② 重点理解二极管的单向导电性,会分析含有二极管的电路,掌握二极管应用技术。
- ③ 了解双极性三极管的基本结构、工作原理,掌握三极管的电流放大作用。
- ④ 掌握二极管、稳压管和三极管的工作特性曲线,理解主要参数的意义。
- ⑤ 场效应管(FET)的工作原理和特性曲线及FET的压控特性作为扩展内容对比学习了。解。“管为路用”重点要抓住各类器件在电路中的应用特点。

1.1 半导体的导电特性

半导体器件是近代电子学的重要组成部分,它是构成电子电路的基本元件,半导体器件是由经过特殊加工且性能可控的半导体材料制成的。

1.1.1 导体、半导体和绝缘体

自然界中存在着各种各样的物质,早期,人们按物质导电能力的强弱将它们分成导体和绝缘体两大类。随着科学技术的进步,人们发现自然界中还有一类物质,如硅、锗、硒、硼及其一部分化合物等,它们的导电能力介于导体和绝缘体之间,故称为半导体。导体具有良好的导电性,如金、银、铜、铝和铁等金属材料很容易导电,称为导体。绝缘体就是不能导电的物体,如陶瓷、云母、塑料、橡胶等物质很难导电,称为绝缘体。绝缘体具有良好的绝缘性。导体和绝缘体都是很好的电工材料。用导体制成电线,用绝缘体来防止电的浪费和保障安全。

半导体在很长时间不被人们重视,因为它的导电性能不好,绝缘性能又差。然而随着科学实践的深入,人们对它产生了越来越浓厚的兴趣。这是因为它具有一些可以被人们所利用的奇妙特性。它的导电能力在不同的条件下有显著的差异。例如,当有些半导体受到热或光的激发时,导电能力将明显增强。又如,在纯净的半导体中掺以微量“杂质”元素,半导体的导电能力将猛增到几千、几万乃至上百万倍。人们就是利用半导体的热敏、光敏特性制作成半导体热敏元件和光敏元件。人们利用半导体的掺杂特性制造了种类繁多,具有不同用途的半导体器件,如晶体二极管、晶体三极管和场效应管等。目前,制作半导体器件的主要材料是硅(Si)和锗(Ge)。总之,半导体在不同情况下,导电能力会有很大差别。其特性总结如下:① 掺杂:在纯净的半导体中适当地掺入极微量(百万分之一)的杂质,就可以引起其导电能力成百万倍

的增加。② 温度:当温度稍有变化时,半导体的导电能力就会有显著变化。如温度稍有增高,半导体的电阻率就会显著减小。同理,光照也会影响半导体的导电能力。

半导体材料导电能力变化的性质,取决于半导体材料的内部结构和导电机理。由化学知识可知,物质的导电能力主要是由原子结构来决定。导体一般为低价的元素,这些元素的最外层电子很容易挣脱原子核的束缚而成为游离的自由电子,这些自由电子在外电场的作用下,将作定向移动形成电流。绝缘体是高价元素或由高分子材料组成的,这些物质共同的特点是:最外层电子处于稳定结构,受原子核的束缚力很强,很难成为自由电子,所以自由电子的数目非常少,导电能力极差。

常用的半导体材料硅(Si)和锗(Ge)均是四价元素,硅原子核外有 14 个带负电的电子围绕带正电的原子核运动,并按一定的规律分布在三层电子轨道上。锗原子核外 32 个带负电的电子围绕带正电的原子核运动,并按一定的规律分布在四层电子轨道上。由于原子核带正电,与电子电量相等,故正常情况下原子呈中性。由于内层电子受核的束缚较大,很少有离开运动轨道的可能,故结构稳定;而外层电子受原子核的束缚较小,叫做价电子。硅、锗都有四个价电子,故都是四价元素,处于半稳结构,硅原子结构简化图如图 1-1 所示,它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧,动弹不得,没有自由电子,所以半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

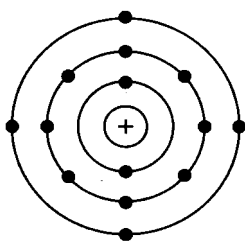


图 1-1 硅原子结构简化图

由于原子核带正电,与电子电量相等,故正常情况下原子呈中性。由于内层电子受核的束缚较大,很少有离开运动轨道的可能,故结构稳定;而外层电子受原子核的束缚较小,叫做价电子。硅、锗都有四个价电子,故都是四价元素,处于半稳结构,硅原子结构简化图如图 1-1 所示,它们的最外层电子既不像导体那样容易挣脱原子核的束缚成为自由电子,也不像绝缘体那样被原子核束缚得那么紧,动弹不得,没有自由电子,所以半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。

1.1.2 本征半导体

本征半导体是非常纯净且原子排列整齐的半导体。纯净的半导体称为本征半导体,在本征半导体中的四价元素是靠共价键结合成分子的,图 1-2 为本征半导体硅和锗晶体的原子结构示意图。

当硅、锗等半导体材料提纯被制成单晶时,其原子排列非常整齐。这种状态下原子距离相等,原子靠得非常紧密,形成晶体结构,晶体管由此得名。原子的每一个价电子与另一相邻原子的价电子组成一个电子对,为两者共有,形成共价键结构。价电子在受自身原子核束缚的同时,还受相邻四个原子的影响,形成共价键结构。使得每个原子都与相邻 4 个原子相结合,这种共价键结构使原子最外层电子拥有 8 个电子而处于较为稳定的状态,共有价电子被束缚在其中,若没有额外的能量,它们是跳不出去的。但这种共价键中的价电子没有绝缘体中的价电子束缚得那样紧,当获得能量时即可挣脱原子核束缚成为自由电子。

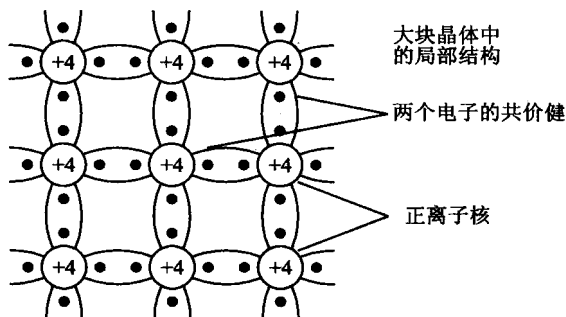


图 1-2 硅晶体共价键结构

在绝对零度 $0\text{ K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,本征半导体中没有可移动的带电粒子,相当于绝缘体。在室温下, $300\text{ K} = 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,束缚电子受热激发获得能量,少数价电子挣脱束缚,成为自由电子。

价电子挣脱束缚后在原价电子的位置上便留下了一个空位,将这个空位称为“空穴”。由于晶体的共价键具有较强的结合力,常温下,本征半导体内部仅有极少数的价电子可以在热运动的激发下,挣脱原子核的束缚而成为晶格中的自由电子。温度越高,产生的自由电子越多。如图1-3所示,热运动激发所产生的电子和空穴总是成对出现的,称为电子-空穴对。自由电子的数量和空穴的数量相等。本征半导体因热运动而产生电子-空穴对的现象称为本征激发。

本征激发所产生的电子-空穴对在外电场的作用下都会作定向移动而形成电流。自由电子的移动将形成一个与自由电子移动方向相反的电流;空穴的移动可以看成是价电子定向依次填充空穴而形成的,这种填充作用相当于教室的第一排有一个空位,后排的同学依次往前挪来填充空位,以人为参照系,人填充空位的作用等效于人不动,空位往后走。因空穴带正电,空穴的这种定向移动会形成与空穴运动方向相同的空穴电流,如图1-4所示。半导体内部同时存在着自由电子和空穴移动所形成的电流,是半导体导电方式的最大特点,也是半导体与金属导体在导电机理上本质的差别。

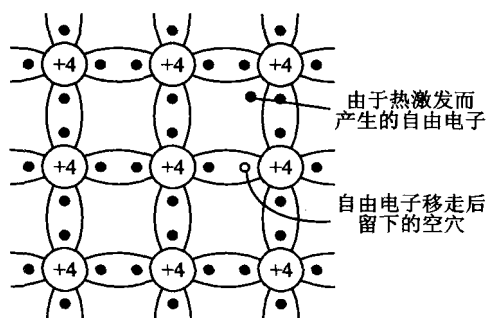


图1-3 电子-空穴对的形成

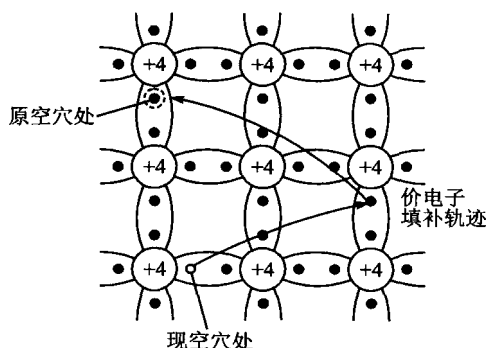


图1-4 价电子递补空穴移动形成空穴电流

把参与导电的物质称为载流子。本征半导体内部参与导电的物质有自由电子和空穴,所以本征半导体中有两种载流子,一种是带负电的自由电子,另一种是带正电的空穴。

温度越高,由本征激发所产生的电子-空穴对越多,本征半导体内部载流子的数目也越多,本征半导体的导电能力就越强,这就是半导体导电能力受温度影响的直接原因。

可以看到,在本征激发下,半导体中的电子和空穴是一一对应,成对产生,又成对复合的。在一定温度条件下,电子-空穴对的产生和消失是一动态的平衡,温度条件改变后,电子-空穴对的产生和消失又会出现新的动态平衡,载流子数量将发生变化。这就是半导体随温度变化而改变导电能力的根本原因。本征半导体本征激发的现象还与原子的结构有关,硅的最外层电子离原子核比锗的最外层电子近,所以硅最外层电子受原子核的束缚力比锗强,本征激发现象比较弱,热稳定性比锗好。

1.1.3 N型半导体和P型半导体

本征半导体虽然有自由电子和空穴两种载流子,但数量少,导电能力仍然很弱。如果在本征半导体中掺入微量的杂质元素,可以使杂质半导体的导电能力得到改善,导电性能将会大大提高,并受所掺杂质的类型和浓度控制,使半导体获得重要的用途。由于掺入半导体中的杂质不同,杂质半导体可分为N型半导体和P型半导体两大类。

1. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中,掺入微量的五价元素,如磷(P)。掺入的杂质并不改变本征半导体硅(或锗)的晶体结构,只是半导体晶格点阵中的某些硅(或锗)原子被磷原子所取代。五价元素的 4 个价电子与硅(或锗)原子组成共价键后,将多余一个价电子,如图 1-5 所示。这

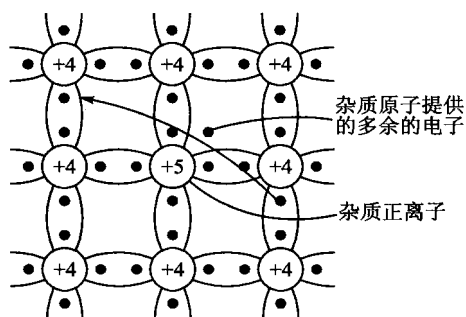


图 1-5 硅晶体中掺磷产生自由电子

一多余的电子不受共价键的束缚,只需获得较小的能量,就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子。于是,半导体中自由电子的数量剧增。五价元素的原子因失去一个外层电子而成为正离子(注意此时它不产生空穴,不能像空穴那样能被电子填充而移动参与导电,所以它不是载流子)。

杂质半导体中,除了杂质元素释放出的自由电子外,半导体本身还存在本征激发所产生的电子-空穴对。由于增加了杂质元素所释放出的自由电子数,导致这类杂质半导体中的自由电子数远大于空穴数。自由电子导电成为此类杂质半导体的主要导电方式,故称它为电子型半导体,简称 N 型半导体。在 N 型半导体中,电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。由于杂质原子可以提供自由电子,故又称为施主原子。N 型半导体主要靠自由电子导电,在本征半导体中掺入的杂质越多,所产生的自由电子数也越多,杂质半导体的导电能力就越强。

2. P 型半导体

在本征半导体中掺入微量的三价杂质元素,如硼(B)。杂质原子取代晶体中某些晶格上的硅(或锗)原子,三价元素的 3 个价电子与周围 4 个原子组成共价键时,缺少一个电子而产生了空位,如图 1-6 所示。此空位不是空穴,所以不是载流子,但是邻近的硅(或锗)原子的价电子很容易来填补这个空位,于是在该价电子的原位上就产生了一个空穴,而三价元素却因多得了一个电子而成了负离子。

在室温下,价电子几乎能填满杂质元素上的全部空位,而使其成为负离子,与此同时,半导体中产生了与杂质元素原子数相同的空穴,除此之外,半导体中还有因本征激发所产生的电子-空穴对。因此,在这类半导体中,空穴的数目远大于自由电子的数目,导电是以空穴载流子为主,故称空穴型半导体,简称 P 型半导体。P 型半导体中的多子是空穴,少子为自由电子,主要靠空穴导电。与 N 型半导体相同,掺入的杂质越多,空穴的密度越高,导电能力就越强。因杂质原子中的空位吸收电子,故又称为受主原子。

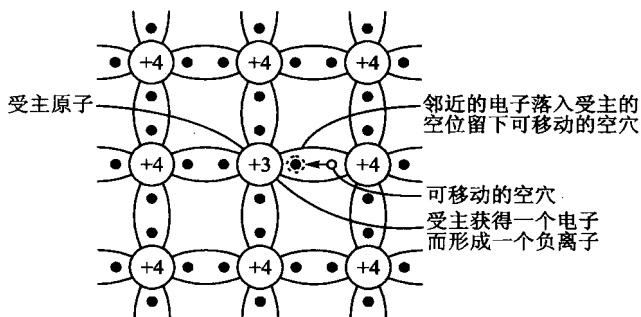


图 1-6 硅晶体中掺硼产生空穴

1.2 PN 结

杂质半导体增强了半导体的导电能力,利用特殊的掺杂工艺,可以在一块晶片的两边分别生成N型和P型半导体,在两者的交界处将形成PN结。PN结具有单一型的半导体所没有的特性,利用该特性可以制造出各种半导体器件。下面来介绍PN结的特性。

1.2.1 PN 结的形成

单纯的P型半导体或N型半导体内部虽然有空穴或自由电子,但整体是电中性的,不带电。现利用特殊的掺杂工艺,在一块晶片的两边分别生成N型和P型半导体。因为P区的多子是空穴,N区的多子是电子,在两块半导体交界处同类载流子的浓度差别极大,这种差别将产生P区浓度高的空穴向N区扩散,与此同时,N区浓度高的电子也会向P区扩散。扩散运动的结果使P型半导体的原子在交界处得到电子,成为带负电的离子;N型半导体的原子在交界处失去电子,成为带正电的离子,形成空间电荷区。空间电荷区随着电荷的积累将建立起一个内电场 E ,该电场对半导体内多数载流子的扩散运动起阻碍的作用,但对少数载流子的运动却起到促进的作用。少数载流子在内电场作用下的运动称为漂移运动。在无外电场和其他因素的激励下,当参与扩散的多数载流子和参与漂移的少数载流子在数目上相等时,空间电荷区电荷的积累效应将停止,空间电荷区内电荷的数目将达到一个动态的平衡,并形成PN结。如图1-7所示,此时,空间电荷区具有一定的宽度,内电场也具有一定的强度,PN结内部的电流为零。

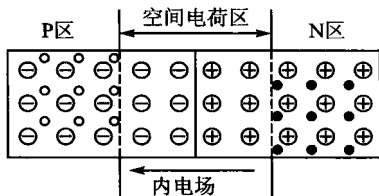


图1-7 PN结形成

由于空间电荷区在形成的过程中,移走的是载流子,留下的是不能移动的正、负离子,这种作用与电容器存储电荷的作用等效,因此,PN结也具有电容的效应,该电容称为PN结的结电容。PN结的结电容有势垒电容和扩散电容两种。

1.2.2 PN 结的单向导电性

处于平衡状态下的PN结没有实用的价值,PN结的实用价值只有在PN结上外加电压时才能显示出来。

1. 外加正向偏置电压

电路如图1-8所示,P型半导体接高电位,N型半导体接低电位,这种连接方式下的PN结称为正向偏置(简称正偏)。当PN结处在正向偏置时,外电场和内电场的方向相反。在外电场的作用下,P区的空穴和N区的电子都要向空间电荷区移动,进入空间电荷区的电子和空穴分别和原有的一部分正、负离子中和,打破了空间电荷区的平衡状态,使空间电荷区的电荷量减少,空间电荷区变窄,内电场相应的被削弱。此时有利于P区多子空穴和N区的多子电子向相邻的区域扩散,并形成扩散电流,即PN结的正向电流。在一定范围内,正向电流随着外电场的增强而增大,此时的PN结呈现出低电阻值,PN结处于导通状态。PN结正向导通时的压降很小,理想情况下,可认为PN结正向导通时的电阻为 $0\ \Omega$,所以导通时的压降也为 0 V 。