

WUTP

普通高等学校
自动化类专业新编系列教材

Fundamentals of Analog Electronic Techniques

模拟电子技术基础

主 编 陈大钦
副主编 彭容修 赵曾贻



武汉理工大学出版社

WITP

中国信息通信出版社
CHINA INFORMATION COMMUNICATIONS PRESS

模拟电子技术基础

主编 阎石
副主编 张毅刚 蔡国良



103

JL01
C44b2

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

模拟电子技术基础

主 编 陈大钦

副主编 彭容修 赵曾贻

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

内 容 提 要

全书共分十章,内容是:导论、理想运算放大器及其基本电路、反馈放大电路、模拟信号的乘除运算和处理电路、信号产生电路、分立元件放大电路基础、功率放大电路、集成运算放大器、直流稳压电源和电子电路的计算机辅助分析与设计。

本书可作为高等学校电气信息类有关专业本、专科“模拟电子技术基础”课程的教材和教学参考书,也可作为电子技术工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/陈大钦主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2001.10

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

ISBN 7-5629-1758-2

I. 模…

II. 陈…

III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材

IV. TN710

出版发行:武汉理工大学出版社

武汉市武昌珞狮路122号 邮编:430070

HTTP://www.whut.edu.cn/chubanl

E-mail:wutp@public.wh.hb.cn

经 销 者:各地新华书店

印 刷 者:武汉市科普教育印刷厂

开 本:787×1092 1/16

印 张:19.25

字 数:482千字

版 次:2001年10月第1版

印 次:2001年10月第1次印刷

印 数:1—5000册

定 价:26.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换

本社购书热线电话:(027)87397097 87394412

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

出版说明

世纪之交,我国高等学校的人才培养工作正处在一个关键的历史时期。为了适应我国改革开放和社会主义现代化建设特别是社会主义市场经济体制对高等教育人才培养工作的新要求,为了适应世界科学技术发展的新趋势和新特点,原国家教育委员会组织对普通高等学校本科专业目录进行了第四次全面修订,并于1998年7月由教育部正式颁布实施。修订后的专业目录中,自动化类专业的专业面大大拓宽,相应的专业培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。要适应新的专业培养目标和教学要求,组织一套新的自动化类专业系列教材就成了当务之急。为此,武汉理工大学出版社在广泛调研的基础上,组织国内近30所大学的近100位教授共同编写了这套系列教材。

本套教材定位于普通高等学校自动化类专业本科层次,遵照教育部颁发的《普通高等学校本科专业介绍》中所提出的培养目标和培养要求,依据2000年5月全国23所高等院校的70多位专家教授在武汉共同确定的指导思想和编写大纲进行编写,具有如下特点:

观念新——主动适应教学改革的需要和市场经济对人才培养的要求;

内容新——自动化技术在近20年来进展巨大,并与计算机技术、航空航天技术、建筑工程、生物工程、社会科学(社会系统与经济系统)联系越来越紧密,这套教材尽可能反映了这些内容,以适应21世纪自动化与控制工程人才的培养要求;

体系新——在以前的基础上重构和重组,而非重建。各门课程及内容的组成、顺序、比例更加优化,避免遗漏和不必要的重复;

与国际接轨——自动化类专业教育要面向世界,面向未来,面向区域经济。在借鉴发达国家高等教育的专业模式和课程设置的同时,适当兼顾当前各地区经济文化发展不平衡的现状;

教学手段现代化——本套教材力求具有网络化、电子化、数字化的特色,大力推进电子讲稿和多媒体课件的出版工作。

本系列教材是在21世纪初推出的目前系统优化、品种较全、作者阵容最强的一套普通高等学校自动化类(本科)系列教材。我们将高度重视,兢兢业业,保证质量,恳请选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提意见和建议,以便我们不断修订、补充、完善全套教材。

21世纪已经到来,知识经济的曙光已经初现。面向新世纪的中国高等教育正在经历前所未有的变革和发展,人文与理工相通,科学与技术相融,教学与研究并重,知识与智慧同尊,以培养社会经济文化发展所需要的复合型人才,这是我国建立知识创新体系的重大挑战和空前机遇。我社愿与各位专家、读者真诚合作,共同努力,为新世纪的中国高等教育事业做出更大的贡献。

武汉理工大学出版社

2001年8月

普通高等学校自动化类专业新编系列教材

编审委员会

顾问:

郑大钟 熊有伦 戴冠中 萧德云 陈伯时 周祖德
项国波 席裕庚 褚 健

主任委员:

萧蕴诗 张崇巍 陈大钦 吴 坚 陈福祥 高鸣涵

委员(按姓氏笔画顺序):

马建国 王 辉 王孝武 王明阳 王建华 王俊杰
文 方 方康玲 卢京潮 龙 伟 申功璋 叶春生
全书海 吕 锋 刘 泉 刘涤尘 刘京南 李汉强
李磊民 宋靖雁 林 都 林 辉 林锦国 杨 波
杨天怡 杨家本 周泽义 胡 超 赵英凯 赵曾贻
侯朝楨 钟 珞 须文波 翁维勤 夏承铨 郭圣权
徐科军 黄席樾 章卫国 彭容修 程耕国 温阳东
曾庆军 谢克明 熊前兴 黎明森 戴文进

编委会秘书:

黄 春

总责任编辑:

杨学忠 徐秋林

前 言

本书是参照原国家教委 1993 年颁布的《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》，并考虑到面向 21 世纪教学改革的需要和电子技术的迅速发展进行编写的，完全可以满足高等学校自动化类、电子类及其它相关专业对模拟电子技术基础的教学要求，可作为这些专业本科和专科教材。

面向 21 世纪的模拟电子技术基础课程如何进行改革？我们认为首先应明确本课程在加强素质教育中的地位和作用：

1. 模拟电子技术基础课程的主要任务是为学生打好两方面的基础：其一是正确使用模拟电子电路特别是集成电路的基础，其二是为学生将来进一步学习、设计集成电路芯片（如专用芯片）打好初步基础。

2. 本课程在加强素质教育中的作用是十分重要的，在教学中除了抓住传统的“三基”（基本概念、基本知识和基本技能）外，应突出综合应用能力、创新能力、计算机应用能力的培养。

根据以上要求，编写本书的指导思想是：

（1）将集成运算放大器及其运用提前到第 2 章至第 5 章（含主要用理想运算放大器讲反馈放大电路），使模拟电子技术基础形成了以集成运算放大器为主干的体系。

（2）对于电子器件（含集成器件）着重介绍工作原理、外特性和主要参数。为了适应不同的教学要求，对通用型运算放大器除介绍简化原理电路，又对 741 详细电路进行了分析，后者可作为选讲内容。

（3）近年来模拟集成电路理论与设计、集成工艺技术、电子应用技术都有很大的发展和突破，因此，在教材中增加了 BiCMOS 等一类新型集成电路基础知识。

（4）增加了电子电路计算机辅助分析与设计一章，目的是为电子电路的计算机仿真与设计自动化打下初步基础。

（5）编写本书时，考虑到各校教学计划和课程内容要求的不同，内容安排上要有部分选讲内容，为使本书具有通用性，所有带有“*”的内容，均保持相对的独立性，删去这部分内容，不会对教学产生多大影响。

（6）为便于读者加深理解教材内容，本教材中重点、难点内容都有相应例题，力求做到通俗易懂，便于教学。

（7）为进一步加强培养学生分析问题和解决问题的能力，书中附有具有启发意义的综合应用思考题和习题。习题量、内容和难易程度覆盖了不同层次的教学要求（有“*”者为提高题）。书末附有自我检验题和部分习题的答案，以供教学参考。

参加本书编写工作的有陈大钦（第 1、2 章），赵曾贻（第 3、4、5 章），范勤儒（第 6、9 章），彭容修（第 7、8 章），张林（第 10 章、附录）等。由陈大钦主编，彭容修、赵曾贻副主编，负责全书的组织和定稿。

电子技术日新月异，教学改革任重道远，书中难免有不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

编 者

2001 年 5 月

目 录

1 导论	(1)
1.1 信号与电子系统.....	(1)
1.1.1 信号及其分类	(1)
1.1.2 电子系统举例	(2)
1.2 半导体二极管.....	(3)
1.2.1 本征半导体及杂质半导体.....	(3)
1.2.2 PN 结	(6)
1.2.3 半导体二极管	(8)
1.2.4 稳压二极管	(14)
1.3 半导体三极管.....	(16)
1.3.1 半导体三极管结构	(16)
1.3.2 三极管内部载流子的传输过程	(18)
1.3.3 三极管的电流分配关系	(19)
1.3.4 三极管的特性曲线	(20)
1.3.5 三极管的主要参数	(22)
1.4 单管放大电路及放大电路的主要性能指标.....	(24)
1.4.1 单管放大电路简介	(24)
1.4.2 放大电路的主要性能指标.....	(30)
自我检验题	(36)
思考题和习题	(37)
2 理想运算放大器及其基本运算电路	(42)
2.1 理想运算放大器.....	(42)
2.1.1 运算放大器的端子	(42)
2.1.2 理想运算放大器及虚短、虚断概念.....	(43)
2.2 基本运算电路的三种输入方式.....	(45)
2.2.1 反相输入.....	(45)
2.2.2 同相输入.....	(46)
2.2.3 差分输入.....	(46)
2.3 加减运算电路.....	(48)
2.3.1 加法电路.....	(48)
2.3.2 减法电路.....	(49)
2.4 积分电路和微分电路.....	(50)
2.4.1 积分电路.....	(50)

2.4.2 微分电路	(52)
自我检验题	(54)
思考题和习题	(55)
3 反馈放大电路	(60)
3.1 反馈的基本概念	(60)
3.1.1 什么是反馈	(60)
3.1.2 反馈的分类	(60)
3.2 负反馈放大电路的方框图及一般表达式	(62)
3.2.1 负反馈放大电路的方框图	(62)
3.2.2 负反馈放大电路的一般表达式	(62)
3.3 电子电路中反馈类型的判别法	(64)
3.3.1 判别正、负反馈的瞬时极性法	(64)
3.3.2 判别串联反馈和并联反馈	(65)
3.3.3 判别电压反馈和电流反馈	(65)
3.3.4 反馈电路类型判别举例	(65)
3.4 负反馈对放大电路性能的影响	(66)
3.4.1 提高增益的稳定性	(66)
3.4.2 减小非线性失真	(68)
3.4.3 抑制干扰和噪声	(68)
3.4.4 扩展频带	(69)
3.4.5 改变输入电阻、输出电阻	(69)
3.5 负反馈电路的分析方法	(71)
3.5.1 深度负反馈条件下的近似估算法	(71)
3.5.2 方框图计算法	(72)
3.5.3 电网络分析法	(75)
自我检验题	(77)
思考题和习题	(77)
4 模拟信号的乘除运算和处理电路	(82)
4.1 乘除运算电路	(82)
4.1.1 对数和反对数运算电路	(82)
4.1.2 用对数和反对数网络构成的乘法电路	(83)
4.1.3 模拟乘法器的应用	(84)
4.2 有源滤波器	(87)
4.2.1 基本概念	(87)
4.2.2 有源滤波电路的分类	(88)
4.2.3 一阶有源滤波电路	(88)
4.2.4 二阶有源滤波电路	(90)

4.3 电压比较器	(96)
4.3.1 过零比较器	(96)
4.3.2 电压比较器	(98)
* 4.3.3 集成电压比较器	(99)
4.3.4 迟滞比较器	(100)
自我检验题	(104)
思考题和习题	(104)
5 信号产生电路	(108)
5.1 正弦信号产生电路	(108)
5.1.1 产生正弦振荡的条件	(108)
5.1.2 RC 正弦信号产生电路	(109)
5.1.3 LC 选频网络	(113)
5.1.4 LC 正弦信号产生电路	(115)
5.1.5 LC 正弦波振荡电路	(116)
5.1.6 石英晶体振荡电路	(118)
5.2 非正弦信号产生电路	(121)
5.2.1 常用的非正弦周期信号	(122)
5.2.2 非正弦信号产生电路的构成和分类	(122)
5.2.3 非正弦信号产生电路的分析方法	(122)
5.2.4 方波三角波产生电路	(123)
* 5.2.5 压控振荡电路	(126)
* 5.3 集成函数发生器 8038 简介	(127)
自我检验题	(129)
思考题和习题	(129)
6 分立元件放大电路基础	(133)
6.1 放大电路的基本分析方法	(133)
6.1.1 直流通路和交流通路	(133)
6.1.2 静态工作点的估算	(133)
6.1.3 图解法	(135)
6.1.4 小信号模型分析法	(139)
6.1.5 放大电路几种分析方法的比较	(143)
6.2 放大电路工作点的稳定问题	(144)
6.2.1 温度对工作点的影响	(144)
6.2.2 基极分压式射极偏置电路	(144)
6.3 共集电极电路和共基极电路	(147)
6.3.1 共集电极基本放大电路	(147)
6.3.2 共基极基本放大电路	(150)

6.3.3	三种基本组态比较	(151)
6.4	放大电路的频率响应及负反馈放大电路的自激问题	(153)
6.4.1	单时间常数 RC 电路的频率响应	(153)
6.4.2	共射基本放大电路的频率响应	(156)
6.4.3	多级放大电路的频率响应	(163)
6.4.4	负反馈放大电路的自激问题	(164)
6.5	场效应管放大电路	(169)
6.5.1	结型场效应管	(169)
* 6.5.2	砷化镓金属-半导体场效应管	(173)
6.5.3	金属-氧化物-半导体场效应管	(174)
6.5.4	各种 FET 的特性比较	(177)
6.5.5	场效应管放大电路	(179)
	自我检验题	(184)
	思考题和习题	(185)
7	功率放大电路	(190)
7.1	功率放大电路的一般问题	(190)
7.1.1	功率放大电路的特殊问题	(190)
7.1.2	提高功率放大电路效率的主要途径	(191)
7.2	乙类互补对称功率放大电路	(192)
7.2.1	电路组成及工作原理	(192)
7.2.2	输出功率及效率	(192)
7.2.3	半导体三极管的选择	(194)
7.3	甲乙类互补对称功率放大电路	(196)
7.3.1	甲乙类双电源互补对称电路	(196)
7.3.2	甲乙类单电源互补对称电路	(197)
* 7.4	集成功率放大器	(198)
* 7.5	功率器件	(199)
7.5.1	功率三极管	(199)
7.5.2	功率 MOSFET	(201)
* 7.5.3	功率模块	(202)
	自我检验题	(203)
	思考题和习题	(204)
8	集成运算放大器	(206)
8.1	集成电路的特点	(206)
8.2	集成运算放大器的基本单元电路	(207)
8.2.1	差动放大电路	(207)
8.2.2	电流源电路	(215)

8.3	集成运算放大器简介	(217)
8.3.1	通用型集成运算放大器的简化原理电路	(218)
8.3.2	通用型集成运算放大器 741	(218)
8.4	集成运算放大器的主要性能指标	(220)
8.5	专用型集成电路运算放大器	(223)
	自我检验题	(225)
	思考题和习题	(226)
9	直流稳压电源	(229)
9.1	单相桥式整流电容滤波电路	(229)
9.1.1	单相桥式整流电路	(229)
9.1.2	电容滤波电路	(231)
9.2	串联反馈式稳压电路	(233)
9.2.1	稳压电路的质量指标	(233)
9.2.2	串联反馈式稳压电路的工作原理	(233)
9.3	集成稳压器	(235)
9.3.1	集成稳压器电路组成及工作原理	(235)
9.3.2	集成稳压器的应用电路	(238)
9.4	开关型稳压电路	(240)
* 9.5	直流变换型电源	(242)
	自我检验题	(245)
	思考题和习题	(245)
10	电子电路的计算机辅助分析与设计	(249)
10.1	电子电路 OrCAD 软件辅助分析	(249)
10.2	电子电路 OrCAD 软件辅助设计	(253)
	思考题和习题	(258)
11	附录:OrCAD 软件使用简介	(264)
11.1	OrCAD/Capture 简介	(264)
11.1.1	Capture 集成环境	(264)
11.1.2	Capture 中的电路描述	(267)
11.2	OrCAD/PSpice A/D 简介	(270)
11.2.1	PSpice A/D 仿真功能简介	(270)
11.2.2	PSpice A/D 集成环境	(271)
11.2.3	PSpice A/D 中的有关规定	(273)
11.2.4	简化版 9.2 Lite Edition 中的主要元器件	(276)
11.3	电路 OrCAD 仿真的一般步骤	(276)
11.3.1	新建仿真设计项目	(277)

11.3.2	绘制电路图	(279)
11.3.3	编辑修改元器件标号和参数	(280)
11.3.4	创建仿真分析要求简要表,设置分析功能	(282)
11.3.5	仿真	(284)
11.3.6	在 PSpice A/D 窗口中观测仿真结果	(285)
参考答案		(290)
参考文献		(295)

1 导 论

本章提要

由于物理学的重大突破,在 20 世纪下半叶以微电子技术为标志的现代电子技术取得了空前的进步,推动了自动控制、计算机、通信和全球网络等技术的发展。随着 21 世纪的到来,世界已进入信息时代。作为发展基础之一的电子技术必将以更快的速度前进。

电子技术的基本任务可称之为“信号的产生、信号的传输、信号的处理”,任务的完成取决于对电子器件、电子电路、电子系统的性能的研究。按照功能和构成原理的不同,电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类。本书着重讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本分析方法和基本应用。

作为导论,本章首先简要地介绍信号与电子系统的基本概念,接着讨论半导体器件基础(二极管和三极管)、单管放大电路和放大电路的主要性能指标。这样安排的意图:一是使初学者对本课程的概貌有一初步了解,二是为后续各章的讨论(特别是本课程建立以集成运算放大器为主干的新体系)提供必要的基础知识。

1.1 信号与电子系统

1.1.1 信号及其分类

在现代科学技术中,常用电信号来传送各种信息,即利用一种变换设备,把语言、文字、图像等各种不便于直接传输的信息转换为随时间作相应变化的电压或电流进行传输。这种随信息作相应变化的电压或电流就是电信号。当电信号传送到目的地后,再利用一种与上述相反的变换设备,把电信号还原成原来的信息。例如,在电视广播系统中,传输配有声音的景物时,先利用电视摄像机把景物的光线、色彩转变成图像信号(电压或电流),并利用话筒把声音转变成伴音信号(电压或电流),这些就是电视要传输的带有信息的电信号。然后把这些信号送入电视发射机进行处理,产生一种反映信息变化的便于传输的高频信号,再由天线将这高频电信号转换为电磁波发射出去,在空间传播。电视观众用接收天线截获了电磁波很小一部分能量送入电视接收机,接收机的作用与发射机相反,它能将接收到的电磁波转换成高频电信号进行处理,从而恢复出原来的图像和伴音信号,并分别送入显像管和喇叭,供观众欣赏。这个过程可用一个简明的方框图表示,如图 1.1.1 所示。其中,变换器指的是把表达信息的景物和声音转换为电信号的装置(如摄像管和话筒),或者反过来,把电信号转换为景物和声音的装置(如显像管和喇叭等)。

综上所述,在电子技术中谈到“信号”时,指的就是变化的电压或电流——电信号。电信号可分为两大类,一类是信号的幅值随时间呈连续变化,称为模拟信号。图 1.1.2 所示的电

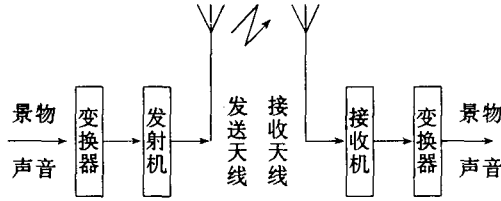


图 1.1.1 电视系统方框图

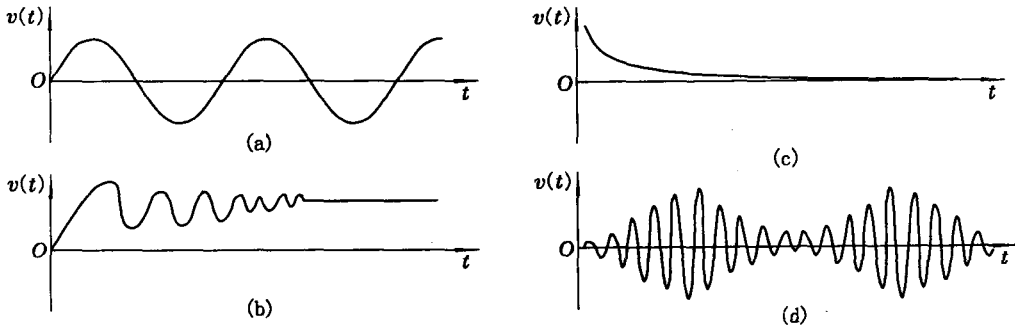


图 1.1.2 模拟信号波形举例

(a)正弦波; (b)阻尼振荡波; (c)指数衰减波形; (d)振幅调制波形

压波形就是模拟信号。模拟语音的音频信号,模拟图像的视频信号,模拟温度、压力这些物理量变化的信号都是模拟信号。与模拟信号相对应的是数字信号,它只在某些不连续的瞬时给出函数值,如图 1.1.3 所示。像电灯的“亮”和“灭”,工厂产品数量的统计等都是数字信号。产生和处理模拟信号的电路称为模拟电子电路,如交、直流放大电路,音频信号产生电路等等。产生和处理数字信号的电路称为数字电路,如各种门电路、触发器、计数器等等。

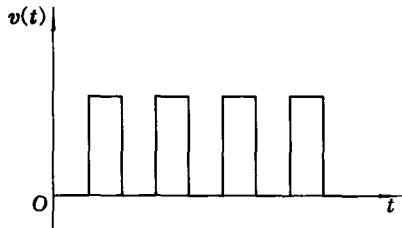


图 1.1.3 数字信号波形举例

1.1.2 电子系统举例

从前面所举电视广播系统一例可以看出,电子系统由若干相互关联的单元电子电路组成,用来实现信号的传输或信号的处理。电子系统的种类很多,下面再举例说明。

1. 热电偶温度计

图 1.1.4 所示的热电偶温度计是电子测量系统的一个例子。一对热电偶的两个结,一个

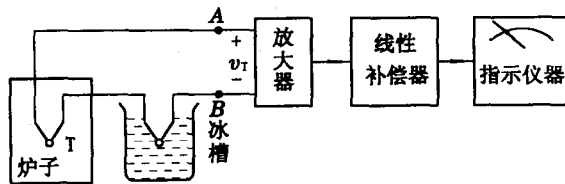


图 1.1.4 热电偶温度计的方框图

与待测温度的物体接触,另一个浸于冰槽的冰水中,以产生稳定的参考温度。当热电偶的两个结点间存在温差时,两端就会产生相应的模拟电压 v_T ,将此电压送往放大器进行放大。因为热电偶的电压不可能很准确地正比于温差,所以放大器的输出电压要通过线性补偿器加一个小的校正电压进行补偿,以使热电偶电压正比于温差。最后,把信号送往显示器(如指针式仪表或数字仪表)显示出来。

2. 炉温自动控制系统

图 1.1.5 所示电路是一个炉温自动控制系统。炉温的希望值转换为用“温度给定电压 v_1 ”表示,热电偶两端的电压 v_T 可近似认为与炉温成正比。当炉温低于希望值时, v_T 小于 v_1 , v_T 与 v_1 比较后产生一偏差电压 $v_D (=v_1 - v_T)$,经放大电路放大后驱动功率调节器,调整电阻丝功率,使炉温上升到希望值。

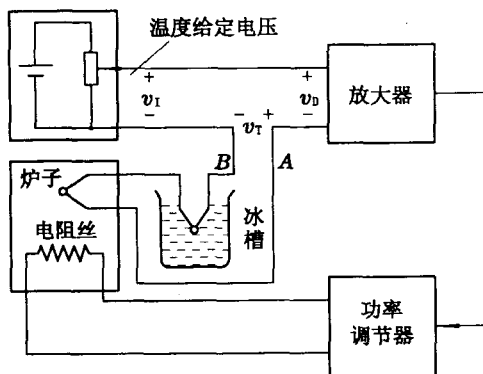


图 1.1.5 炉温自动控制系统

1.2 半导体二极管

电子系统和设备由各种电子器件组成,如半导体二极管、三极管、场效应管、半导体光电子器件及各种半导体集成电路等,它们统称为半导体器件。PN 结是各种半导体器件的基本组成部分,掌握 PN 结的原理、特性是学习各种半导体器件的基础。本节先讨论 PN 结的形成及特性,然后介绍半导体二极管及稳压管。

1.2.1 本征半导体及杂质半导体

1. 本征半导体的共价键结构及本征激发

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间。完全纯净的半导体称为本征半导体。理想的硅(Si)或锗(Ge)单晶属于本征半导体。硅和锗都是四价元素,其原子核最外层有四个价电子。在纯净的硅晶体中,各原子之间靠得很近,每个硅原子最外层的四个价电子分别与邻近四个硅原子的价电子形成完整的共价键结构,如图 1.2.1 所示。纯净的半导体硅在热力学温度 0K (-273°C) 时相当于绝缘体。当温度升高或受到外界激发(如光照)时,某些共价键中的价电子获得了足够的能量,足以挣脱共价键的束缚时,这些价电子被激发成为参与导电的自由电子(见图 1.2.2),这个过程称为本征激发。

在本征激发过程中,一个价电子脱离共价键成为自由电子后,在原来的共价键中留下了一个空位,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,这些空穴再被别处共价键中的电子来填补。这一过程持续下去就出现了价电子填补空穴的运动。带负电荷的价电子依次填补空穴的运动无论在形式上还是在效果上,都与带正电荷的空穴作反方向运动相同。为了区别于自由电子的运动,就把价电子在共价键中填补空穴的运动视为空穴运动(方向相反),认为空穴是一种带正电荷的载流子。由此可见,半导体中有两种载流子,即带负电荷的自由电子(简称为电子)和带正电荷的空穴。

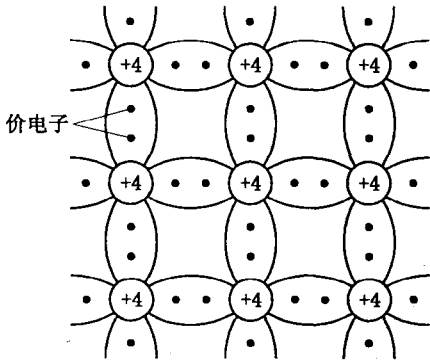


图 1.2.1 硅本征半导体共价键示意图

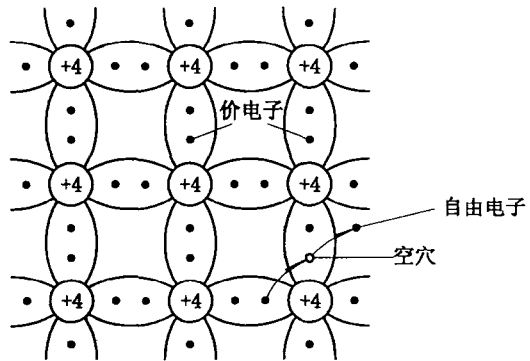


图 1.2.2 本征激发及电子和空穴的移动

值得指出的是,在外界能量的激发下,本征半导体将对地产生自由电子和空穴。在外电场作用下,这两种载流子都参与导电,二者形成的电流相加。此外,本征激发的同时,自由电子在运动过程中有可能“跌入”共价键,与空穴重新结合,使自由电子和空穴成对消失,同时释放出一定能量,这个过程称为复合。在一定温度下,自由电子和空穴的产生和复合都在不停地进行着,最后达到一个动态平衡,使自由电子和空穴浓度达到稳定。温度升高,载流子浓度增加。温度是影响半导体导电性能的重要因素。

2. 杂质半导体中的电子和空穴

在本征半导体中,人为地掺入微量的其它元素(常称为杂质)而形成杂质半导体。杂质半导体不仅大大增加了载流子浓度,而且由于掺入的杂质不同,可形成 N 型半导体和 P 型半导体。人们正是利用了 N 型和 P 型半导体,才制成了二极管及具有放大等控制作用的各种半导体器件。

(1)N 型半导体

如果在本征半导体中掺入微量五价元素磷 P(或锑 Sb、砷 As 等),由于磷原子比硅原子多一个价电子,因而当一个磷原子与相邻的四个硅原子组成共价键后,便余一个不受共价键束缚的价电子,由于磷原子对它的束缚比共价键的束缚作用小得多,因此,只需得到很少的能量,这个电子就可以挣脱原子的吸引而成为自由电子,而磷原子因失去一个电子而成为正离子(它在晶体中不能移动,不参与导电),如图 1.2.3(a)所示。在室温下,几乎全部磷原子都能提供一个自由电子和一个正离子,故称磷为施主杂质。施主杂质的浓度常用 N_D 表示。

虽然掺入的杂质磷浓度很低,例如,设 $N_D = 5 \times 10^{16} / \text{cm}^3$,它只有硅原子密度的百万分之一,如果在室温下每个磷原子都能产生一个自由电子(即杂质产生的自由电子浓度为 N_D),那么,它比室温下硅的本征浓度 $n_i (1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3)$ 要高 10^6 倍以上。因此,N 型半导体虽然也存在本征激发产生的电子空穴对,但在 N 型半导体中,自由电子是多数载流子(简称多子),空穴是少数载流子(简称少子)。自由电子浓度主要由掺入的杂质浓度 N_D 来控制,空穴浓度则由于复合机会的增加,反而低于本征半导体中空穴的浓度。图 1.2.3(b)为 N 型半导体示意图。

(2)P 型半导体

若在本征半导体中掺入微量的硼 B(或铝 Al、镓 In 等)三价元素,由于硼原子比硅原子少一个价电子,当它与相邻的硅原子组成共价键时,缺少一个电子,出现一个空位,这个空位