



21世纪高等院校电气信息类系列教材

Electrical Information
Science and Technology

模拟电子技术基础

武小红 主编



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪高等院校电气信息类系列教材

模拟电子技术基础

武小红 主编

王振宇 刘贵栋 李彦旭 陈 勇 孙 俊 查根龙 参编



机械工业出版社

本书根据教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会 2009 年制定的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求, 结合编者多年的课程教学改革和精品课程建设经验, 在总结国内外经典教材的基础上, 比较全面地介绍了模拟电路最基本的理论知识。全书共分 11 章和附录 A, 分别为: 绪论, 半导体器件基础, 晶体管基本放大电路, 场效应晶体管及其基本放大电路, 多级放大电路和集成运算放大电路, 放大电路的频率响应, 放大电路中的反馈, 集成运算放大电路的线性应用, 功率放大电路, 信号产生和处理电路, 直流电源, EDA 软件工具应用。

本书可作为高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类各专业“模拟电子线路”或“模拟电子技术”课程的教材和教学参考书及相关技术人员的参考书。

本书配套授课电子课件, 需要的老师可登录 www.cmpedu.com 免费注册, 审核通过后下载, 或联系编辑索取 (QQ: 1157122010, 电话: 010 - 88379753)。

图书在版编目 (CIP) 数据

模拟电子技术基础/武小红主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 8

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-39020-6

I. ①模… II. ①武… III. ①模拟电路 - 电子技术 - 高等学校 - 教材
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 145551 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 时 静 责任编辑: 时 静

版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

责任印制: 乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2012 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18.75 印张 · 463 千字

0001—3500 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 39020 - 6

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

出版说明

随着科学技术的不断进步，整个国家自动化水平和信息化水平的长足发展，社会对电气信息类人才的需求日益迫切、要求也更加严格。在教育部颁布的“普通高等学校本科专业目录”中，电气信息类（Electrical and Information Science and Technology）包括电气工程及其自动化、自动化、电子信息工程、通信工程、计算机科学与技术、电子科学与技术、生物医学工程等子专业。这些子专业的人才培养对社会需求、经济发展都有着非常重要的意义。

在电气信息类专业及学科迅速发展的同时，也给高等教育工作带来了许多新课题和新任务。在此情况下，只有将新知识、新技术、新领域逐渐融合到教学、实践环节中去，才能培养出优秀的科技人才。为了配合高等院校教学的需要，机械工业出版社组织了这套“21世纪高等院校电气信息类系列教材”。

本套教材是在对电气信息类专业教育情况和教材情况调研与分析的基础上组织编写的，期间，与高等院校相关课程的主讲教师进行了广泛的交流和探讨，旨在构建体系完善、内容全面新颖、适合教学的专业教材。

本套教材涵盖多层面专业课程，定位准确，注重理论与实践、教学与教辅的结合，在语言描述上力求准确、清晰，适合各高等院校电气信息类专业学生使用。

机械工业出版社

前 言

本书是按照教育部高等学校电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会2009年制定的“模拟电子技术基础”课程教学基本要求，结合编者多年来的模拟电子技术课程教学改革的经验，在保证教材知识体系完整性和系统性的前提下，针对不同层次、不同专业的特点，充分考虑后续课程教学内容的需求，在本课程中适当引入新技术和新理论的应用，以满足电子、电气信息类专业人才培养方案和教学内容体系，本书的主要特色如下：

1. 适用对象为应用型为主的高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类相关专业的本科生。

2. 注重模拟电子技术传统理论与工程领域新技术内容的结合，突出培养学生的应用能力和创新能力。

3. 充分考虑当前电子、电气信息专业高级技术人才培养的客观需要，注重模拟电子技术的基本理论、基本分析方法，增强工程应用概念，注重典型实例和电路分析方法的学习。

4. 本书从分立元件到集成电路，从理论分析到仿真应用，从直流通路到交流通路和微变等效电路，由浅入深、循序渐进，注重教材内容的可读性，方便学生课后复习和自学。

5. 运用EDA软件进行模拟电路及其系统的分析、设计和仿真的学习，培养学生的电子电路的计算机仿真和设计能力。

参加本书编写工作的有江苏大学武小红（绪论、第1章、第4章、第6章、第7章）、王振宇（第9章、第10章）、李彦旭（第3章）、陈勇和孙俊（第5章）、哈尔滨工业大学刘贵栋（第2章、附录A）、宿迁学院查根龙（第8章）。武小红担任本书主编，负责全书的组织、修改和定稿。

由于编者的能力和水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不妥和错误之处，恳请使用本教材的广大师生和读者提出批评和宝贵意见。

编 者

目 录

出版说明

前言

第0章 绪论	1
0.1 电子技术发展简史	1
0.2 模拟电子电路	2
0.3 模拟信号和数字信号	2
0.4 模拟电子技术课程的学习	3
第1章 半导体器件基础	4
1.1 半导体的基础知识	4
1.1.1 本征半导体.....	4
1.1.2 杂质半导体.....	5
1.1.3 PN结	7
1.2 半导体二极管.....	10
1.2.1 二极管的结构和类型.....	10
1.2.2 二极管的伏安特性	11
1.2.3 二极管的主要参数	12
1.2.4 二极管的模型	13
1.2.5 二极管应用举例	14
1.2.6 稳压二极管	15
1.3 双极型晶体管.....	18
1.3.1 晶体管的结构和类型.....	18
1.3.2 晶体管的放大作用	19
1.3.3 晶体管的特性曲线	21
1.3.4 晶体管的主要参数	24
本章小结	26
习题	26
第2章 晶体管基本放大电路	32
2.1 晶体管放大电路及其工作原理.....	32
2.1.1 放大的概念	32
2.1.2 放大电路的主要技术指标	32
2.1.3 单管共射放大电路的组成	35
2.1.4 单管共射放大电路的工作原理	36
2.2 晶体管基本放大电路的分析.....	37
2.2.1 直流通路与交流通路.....	37

2.2.2	静态工作点的估算	38
2.2.3	静态工作点的稳定问题	38
2.2.4	图解法	39
2.2.5	微变等效电路法	43
2.2.6	几种放大电路分析方法的比较	48
2.3	其他基本放大电路	49
2.3.1	固定偏置共射基本放大电路	49
2.3.2	共集基本放大电路	51
2.3.3	共基基本放大电路	53
2.3.4	三种组态晶体管基本放大电路的性能比较	55
2.4	复合管放大电路	56
2.5	组合放大电路	57
2.5.1	共集—共射放大电路	57
2.5.2	共射—共基放大电路	57
	本章小结	58
	习题	59
第3章	场效应晶体管及其基本放大电路	67
3.1	场效应晶体管	67
3.1.1	结型场效应晶体管	67
3.1.2	绝缘栅型场效应晶体管	70
3.1.3	场效应晶体管的主要参数	73
3.1.4	场效应晶体管与晶体管的比较	74
3.2	场效应晶体管放大电路	75
3.2.1	场效应晶体管放大电路的静态分析	75
3.2.2	场效应晶体管放大电路的动态分析	76
3.2.3	结型场效应晶体管基本放大电路	79
	本章小结	80
	习题	80
第4章	多级放大电路和集成运算放大电路	83
4.1	多级放大电路	83
4.1.1	多级放大电路的耦合方式	83
4.1.2	多级放大电路的分析	85
4.2	差动放大电路	88
4.2.1	差动放大电路的工作原理	89
4.2.2	差动放大电路的分析	90
4.2.3	电流源电路	97
4.2.4	带射极恒流源的差动放大电路	101
4.2.5	MOSFET 差动放大电路	102
4.3	集成运算放大电路	103

4.3.1	集成运算放大电路的组成	103
4.3.2	集成运放的主要技术指标	103
4.3.3	集成运放的电压传输特性	105
4.3.4	理想的集成运放	106
4.4	通用型集成运放电路简介	107
4.4.1	BJT 集成运放电路	107
4.4.2	FET 集成运放电路	108
	本章小结	109
	习题	110
第5章	放大电路的频率响应	115
5.1	放大电路频率响应概述	115
5.1.1	频率响应的基本概念	115
5.1.2	RC 电路的频率响应	116
5.2	晶体管放大电路的频率响应	119
5.2.1	晶体管的高频等效模型	119
5.2.2	共射放大电路的频率响应	122
5.2.3	共基放大电路的高频响应	131
5.2.4	共集放大电路的高频响应	133
5.2.5	放大电路频率响应的改善和增益带宽积	135
5.3	场效应晶体管放大电路的高频响应	136
5.3.1	场效应晶体管的高频等效模型	136
5.3.2	场效应晶体管共源放大电路的高频响应	137
5.4	多级放大电路的频率响应	137
	本章小结	139
	习题	140
第6章	放大电路中的反馈	143
6.1	反馈的基本概念和类型	143
6.1.1	反馈的基本概念	143
6.1.2	反馈的类型及判断方法	143
6.1.3	负反馈放大电路的四种基本组态	148
6.1.4	反馈的框图表示法及一般表达式	149
6.2	负反馈对放大电路性能的影响	151
6.2.1	提高闭环增益的稳定性	152
6.2.2	展宽通频带	152
6.2.3	减小非线性失真	154
6.2.4	对输入电阻和输出电阻的影响	154
6.3	深度负反馈放大电路的分析计算	156
6.3.1	深度负反馈放大电路的特点	156
6.3.2	深度负反馈放大电路的近似计算	157

6.4	放大电路中负反馈的正确引入	160
6.5	负反馈放大电路中的自激振荡	162
6.5.1	产生自激振荡的原因和条件	163
6.5.2	负反馈放大电路的稳定性	163
6.5.3	自激振荡的消除	164
	本章小结	166
	习题	166
第7章	集成运算放大电路的线性应用	174
7.1	集成运放概述	174
7.1.1	集成运放的应用分类	174
7.1.2	集成运放应用电路的分析方法	175
7.2	基本运算电路	176
7.2.1	比例运算电路	176
7.2.2	加法和减法运算电路	180
7.2.3	积分和微分运算电路	182
7.2.4	对数和指数运算电路	185
7.2.5	运算电路分析举例	187
7.3	模拟乘法器	190
7.3.1	模拟乘法器的工作原理	190
7.3.2	模拟乘法器在运算电路中的应用	193
	本章小结	195
	习题	195
第8章	功率放大电路	202
8.1	功率放大电路概述	202
8.1.1	功率放大电路的特点	202
8.1.2	功率放大电路的分类	202
8.2	单管甲类功率放大电路	204
8.3	互补对称功率放大电路	205
8.3.1	乙类互补对称功率放大电路	205
8.3.2	甲乙类互补对称功率放大电路	209
8.4	集成功率放大器	214
8.4.1	LM386 集成功率放大器	214
8.4.2	TDA2006 集成功率放大器	216
	本章小结	217
	习题	217
第9章	信号产生和处理电路	222
9.1	正弦波振荡电路	222
9.1.1	正弦波振荡电路概述	222
9.1.2	RC 正弦波振荡电路	224

9.1.3	LC 正弦波振荡电路	227
9.1.4	石英晶体振荡电路	232
9.2	电压比较器	233
9.2.1	电压比较器概述	233
9.2.2	单限电压比较器	234
9.2.3	滞回电压比较器	235
9.2.4	双限电压比较器(窗口比较器)	237
9.2.5	集成电压比较器	237
9.3	非正弦波发生电路	238
9.3.1	矩形波发生电路	239
9.3.2	三角波发生电路	241
9.3.3	锯齿波发生电路	242
9.3.4	压控振荡电路	243
9.4	有源滤波电路	244
9.4.1	滤波电路概述	244
9.4.2	有源滤波电路的分析方法	246
9.4.3	常用的有源滤波电路	246
	本章小结	248
	习题	249
第 10 章	直流电源	256
10.1	直流电源概述	256
10.2	单相整流电路	256
10.2.1	单相半波整流电路	256
10.2.2	单相桥式整流电路	259
10.3	滤波电路	261
10.3.1	电容滤波电路	262
10.3.2	电感电容滤波电路	264
10.3.3	π 形滤波电路	264
10.4	稳压电路	265
10.4.1	稳压电路的性能指标	265
10.4.2	稳压管稳压电路	265
10.4.3	线性串联型稳压电路	267
10.4.4	开关稳压电路	269
10.4.5	稳压电路的保护措施	270
10.4.6	集成稳压器及其应用电路	271
	本章小结	273
	习题	273
附录 A	EDA 软件工具应用	277
A.1	EDA 软件	277

A. 1. 1 EDA 软件简介	277
A. 1. 2 Multisim 系统简介	278
A. 2 Multisim 仿真举例	279
A. 2. 1 晶体管放大电路的仿真	279
A. 2. 2 集成运放电路仿真	282
A. 2. 3 波形发生电路仿真	284
本章小结	285
习题	286
参考文献	288

第0章 绪 论

作为国民经济的战略性先导产业，电子信息产业在我国经济转方式、调结构的过程中发挥着重要的带头作用。“十二五”是我国全面建设小康社会的关键时期，大力发展电子信息产业，将进一步加快我国新型工业化进程和创新型国家的建设。为迎接“十二五”期间电子信息产业的机遇和挑战，高校应培养一大批具有创新能力的高素质电子信息专业高级技术人才，有效的实施电子技术的教学和实践是培养创新型人才的重要途径。

电子技术主要研究电荷粒子在空气、真空和半导体内运动的现象、机理和规律，在此基础上研究制造电子、光电子的各种材料及元器件，以及集成电路、集成电子系统和光电子系统，并研究开发相应的设计和制造技术。电子技术研究的内容一般包括晶体管和晶体管电路。

0.1 电子技术发展简史

电子技术经历了从电子管，晶体管到集成电路的发展过程。集成电路已经广泛应用于人类生产和生活的各个方面，人们所用的电脑、手机、互联网、电视、照相机、DVD 及所有电子产品内的核心部件都是集成电路。

1904 年英国约翰·安布罗斯·弗莱明 (John Ambrose Fleming) 发明了真空电子二极管。

1906 年美国李·德弗雷斯特 (Lee de Forest) 发明真空电子三极管 (电子管)。电子管的问世，推动了无线电电子学的蓬勃发展。

1947 年 12 月美国贝尔实验室威廉·肖克利 (William Shockly)，约翰·巴丁 (John Bardeen) 和沃尔特·布拉顿 (Walter H Bratlain) 发明了晶体管。晶体管的出现是电子技术发展史上的一座里程碑，尤其是 PN 结型晶体管的出现，开辟了电子器件的新纪元，引起了一场电子技术的革命。

1958 年 9 月，美国德州仪器 (Texas Instruments) 公司工程师杰克·基尔 (Jack Kilby) 比用锗半导体设计出了世界上第一个集成电路 (Integrated Circuit)。相隔数月，美国仙童半导体公司 (Fairchild Semiconductor) 罗伯特·诺伊斯 (Robert Noyce) 用硅半导体设计出了集成电路，开创了世界微电子学的历史。

1962 年，美国无线电公司 (RCA) 研制出 MOS 场效应晶体管。

1963 年，美国仙童半导体的弗兰克·威纳尔斯 (Frank Wanlass) 发明了 CMOS 电路。现在，95% 以上的集成电路芯片都是基于 CMOS 工艺。

1968 年，美国无线电公司一个由亚伯·梅德温 (Albert Medwin) 领导的研究团队成功研发出第一个 CMOS 集成电路。

1971 年，Intel 推出了第一片动态随机存储器 (DRAM)，标志着大规模集成电路的出现。同年，全球第一个微处理器 4004 由 Intel 公司推出，采用的是 MOS 工艺，这是一个里程碑式的发明。

1978年, 64KB 动态随机存储器诞生, 在不足 0.5cm^2 的硅片上集成了 14 万个晶体管, 这标志着超大规模集成电路 (VLSI) 时代的来临。

1979年, Intel 公司推出了主频为 5MHz 的 8088 微处理器, 之后, IBM 公司基于 8088 推出全球第一台 PC。

1985年, 80386 微处理器问世, 主频为 20MHz。

1989年, 486 微处理器推出, 主频为 25MHz, 采用 $1\mu\text{m}$ 工艺, 后来 50MHz 芯片采用 $0.8\mu\text{m}$ 工艺。

1993年, 66MHz 奔腾处理器推出, 采用 $0.6\mu\text{m}$ 工艺。

2000年, 奔腾 4 问世, 主频为 1.5GHz, 采用 $0.18\mu\text{m}$ 工艺。

2005年, Intel 酷睿 2 系列处理器上市, 采用 65nm 工艺。

2009年, Intel 全新推出酷睿 i 系列处理器, 创纪录采用了领先的 32nm 工艺。目前, 采用 22nm 工艺的下一代处理器芯片正在研发。

0.2 模拟电子电路

在图 0-1 所示的模拟电子电路示意图中, 有两种类型的输入信号: 一种是来自直流电源的直流信号, 用来给由晶体管组成的电子电路提供合适的直流电压和直流电流; 另一种是来自外界的交流信号, 该交流信号可被电子电路放大, 在输出端得到放大的输出信号。尽管输出信号的幅值比输入信号的幅值大, 但是电路的输出功率不会超过直流输入功率。所以电路的直流供电的幅值限制了输出相应信号的大小。

在分析模拟电子电路时, 按照两种类型的输入信号将电路分为两个模型进行分析: 一是分析电路只有直流信号输入而没有交流信号输入时, 分析电路的直流电流和直流电压, 即电路的直流通路模型; 二是分析电路只有交流信号输入而没有直流信号输入时, 分析电路的交流电流和交流电压, 即电路的交流通路模型。在分析电路直流通路模型时, 采用晶体管或场效应晶体管的工作原理结合电路理论的一些分析方法进行电路的直流电流和直流电压分析和估算; 在分析电路交流通路模型时, 用受控电压源和电流源来模型化晶体管和场效应晶体管, 得到晶体管和场效应晶体管线性等效电路, 并分析和估算电路的信号增益。

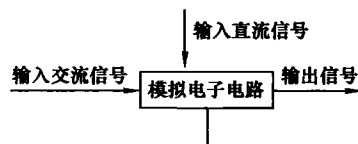


图 0-1 模拟电子电路示意图

0.3 模拟信号和数字信号

信号是信息的物理表现形式, 而信息则是信号的具体内容。根据载体的不同, 信号可以是电、磁、声、光、机械、热等各种信号。电子电路中处理的是随着时间变化的电压或电流信号, 即电信号。模拟信号是幅值随着时间连续变化的电信号, 其幅值是连续的, 时间也是连续的, 如图 0-2a 所示。产生和处理模拟信号的电路称为模拟电路。模拟电路是本教材主要的学习对象。

如图 0-2b 所示的信号只有高电平和低电平两种电平, 称为数字信号。处理数字信号的

电路称为数字电路。数字电路的内容在“数字电子技术”课程中学习。

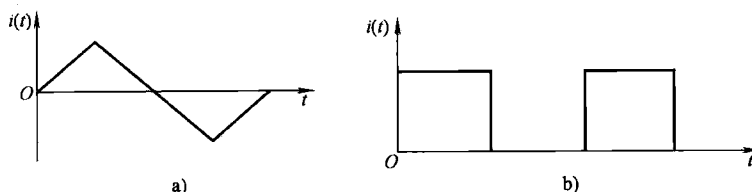


图 0-2 模拟信号与数字信号

0.4 模拟电子技术课程的学习

“模拟电子技术”是电气、电子信息类和部分非电类专业本科生在电子技术方面入门性质的技术基础课，具有自身的理论体系和很强的实践性。本课程通过对常用电子器件、模拟电路及其系统的分析和设计的学习，使学生获得模拟电子技术方面的基本知识、基本理论和基本技能，为深入学习电子技术及其在专业中的应用打好基础。

电路理论是模拟电子技术的学习基础。可以运用电路理论中的模型、定理和分析方法来分析和设计模拟电路，比如电压源和电流源模型，基尔霍夫电压定律和电流定律，戴维南定理等。电路理论围绕电阻 R ，电感 L 和电容 C 三大元器件构成的电路进行分析和计算；而模拟电子技术主要围绕晶体管和场效应晶体管构成的放大电路进行分析和估算。模拟电子技术课程的主要教学内容为半导体器件、基本放大电路、集成运放及其应用电路等，其中，基本放大电路是本课程的基础，也是重点和难点。

学习模拟电子技术重点在于掌握模拟电路的基本理论、基本电路和基本分析方法。基本理论知识要清楚其概念，理解该理论的必要性和物理意义，为应用理论知识进行电路分析打下基础。要学习和掌握一些典型的基本电路，不需要死记硬背这些电路，在深入理解和掌握典型电路的工作原理和分析方法基础上进行记忆，电路是千变万化的，在掌握基本电路的前提下，有利于学习和掌握相似功能和结构的电路。基本分析方法是学习模拟电路的重要工具，比如放大电路静态工作点和动态参数的分析方法，差动放大电路静态和动态参数的分析方法和深度负反馈条件下放大电路的分析方法等。只有掌握了这些基本分析方法才能对不同类型的电路进行分析和估算。

学习模拟电子技术要循序渐进，一步一个台阶前进。模拟电子技术的内容是紧密相连，环环相扣的。从半导体元器件到基本放大电路到集成运放电路；从直流通路到交流通路到微变等效电路；从分立元件电路到集成电路；从开环放大电路到闭环放大电路。如果其中一个环节内容没掌握好，必然会影响到后面内容的学习。

学习模拟电子技术要理论联系实际。模拟电子技术的特点是工程性强，除了学习教材上的理论知识，还要进行实验教学、课程设计和电子工艺实习等实践教学环节。通过实践教学，掌握常用电子仪器的使用方法，模拟电子电路的调试和故障排除方法，运用仿真软件进行电路分析和设计等实践技能。

第 1 章 半导体器件基础

本章介绍本征半导体，杂质半导体和 PN 结等半导体基础知识，介绍二极管，稳压管和晶体管三种电子元器件。重点阐述二极管、稳压管和晶体管的工作原理、特性和主要参数，以及它们在模拟电路中的应用。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 本征半导体

1. 半导体特性

根据物体导电能力的强弱可分为导体、半导体和绝缘体三大类。导体是容易导电的物质，比如：金、银、铜、铝、铁等金属物质；绝缘体是难于导电的物质，比如：玻璃、橡胶、塑料、陶瓷等绝缘物质；半导体是一种导电能力介于导体和绝缘体之间的物质。常用的半导体材料有硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等。

半导体之所以被用来制造电子元器件主要还在于它的导电性有其独特之处。主要表现在以下三个方面。

1) 热敏性：有些半导体的导电能力对温度反应灵敏，受温度影响大。当环境温度变化时，其导电能力产生变化。利用这种特性，半导体可被做成各种热敏元件。

2) 光敏性：光照可以增强半导体的导电能力。利用这种特性，半导体可被制成各种光敏器件。

3) 掺杂性：在纯净半导体中，只要掺入极微量的杂质，导电能力就急剧增加。利用这种特性，半导体可被制成各种性能的半导体器件。

2. 本征半导体的晶体结构

原子是由原子核和核外电子构成的，原子核含有带正电的质子和中性的中子。带负电的电子在核外按电子云的形态分布，处于不同层中的电子能量随着层半径的增加而增强，处于最外层的电子称为价电子。物质的化学性质由价电子数决定。

本征半导体是一种纯净的具有晶体结构的半导体。在温度 $T = 0\text{K}$ 时，价电子被束缚在所属的原子上而不能自由移动。所以， $T = 0\text{K}$ 时，本征半导体是绝缘体，内部没有自由电子。

本征硅（锗）的原子按一定规律排列成紧密、整齐的晶体点阵结构。每个硅（锗）原子最外层的四个价电子与相邻的四个硅（锗）原子的各一个价电子形成四对“共价键”结构。从而使每个硅（锗）原子最外层形成了拥有八个共有电子的相对稳定的结构。由于每对价电子是每两个相邻原子共有的，因而将这种结构称为“共价键”结构，如图 1-1 所示。

3. 本征激发

当温度升高或受到外部激发能量时，价电子能量增高，有的价电子可以挣脱原子核的束

缚而参与导电，成为自由电子，这一现象称为本征激发。在自由电子产生的同时，在其原来的共价键中就出现了一个空位，原子的电中性被破坏，呈现出正电性，其正电量与电子的负电量相等，常称呈现正电性的这个空位为空穴。可见，因激发而出现的自由电子和空穴是同时成对出现的，称为电子空穴对。

当某个共价键中出现一个空穴后，邻近的共价键内的价电子被吸引到这个空穴。当一个价电子填补空穴时，它原来的位置上又出现了新的空穴。如图 1-2 所示，如果在 a 处出现一个空穴，则 b 处的电子填补 a 处的空穴，从而使空穴由 a→b。如果 c 处的电子再填补 b 处的空穴，则空位又由 b→c。这种价电子依次填补空穴的运动，相当于空穴在晶体中运动。一般把空穴看作带正电的粒子。在外电场的作用下，自由电子作定向运动形成电子流，带正电的空穴作定向运动形成空穴流，所以自由电子和空穴都是能参与导电的粒子，称为载流子。

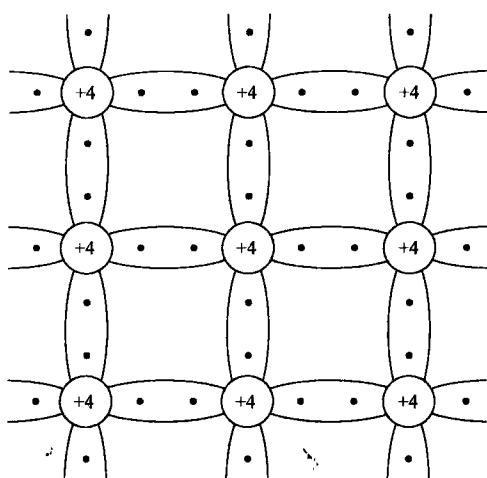


图 1-1 共价键结构

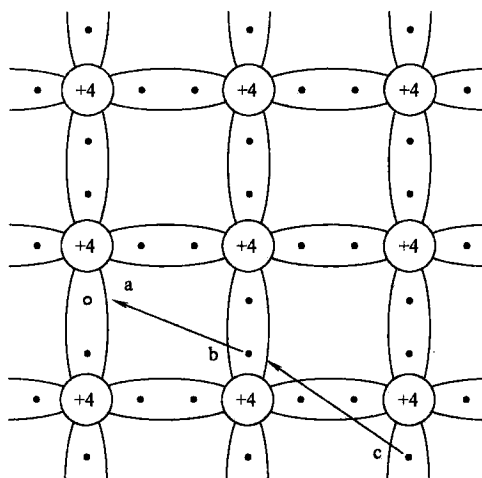


图 1-2 电子和空穴的移动

4. 本征半导体中载流子浓度

一方面本征半导体受外界能量的激发而不断产生自由电子空穴对；另一方面，自由电子在无规则的热运动中与空穴相遇就会填补空穴，这样自由电子空穴对又会消失，这种现象称为复合。当温度一定时，由本征激发产生的自由电子空穴对与复合的自由电子空穴对数目相等，激发和复合达到动态平衡。此时，本征半导体中自由电子的浓度和空穴的浓度是相等的。

本征半导体的载流子浓度随着温度的升高按指数规律增加。理论分析和实验表明：对于硅材料的本征半导体，温度每升高 8°C ，硅的载流子浓度约增加 1 倍；对于锗材料的本征半导体，温度每升高 12°C ，锗的载流子浓度约增加 1 倍。所以，温度是影响半导体导电性能的主要因素。用 n_i 和 p_i 分别表示自由电子和空穴的浓度。在 $T=0\text{K}$ 时，自由电子和空穴的浓度均为零；在 $T=300\text{K}$ 时，硅材料的本征半导体载流子浓度 $n_i = p_i = 1.43 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，锗材料的本征半导体载流子浓度 $n_i = p_i = 2.38 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。

1.1.2 杂质半导体

由于本征半导体的载流子自由电子和空穴浓度太低，因而其导电能力很差，不宜在半导体

体器件制造中直接使用。为了提高本征半导体的导电能力，需要在本征半导体中掺入某些微量的杂质。掺入杂质的本征半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同，杂质半导体分为 P 型半导体和 N 型半导体。

1. P 型半导体

在硅或锗本征半导体中掺入微量的三价元素（如硼或镓等）得到的杂质半导体称为 P 型半导体。

如图 1-3 所示，在 P 型半导体中，由于三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一个空位，当相邻共价键的电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时，就有可能填补这个空位而在该相邻原子中便出现一个空穴。空穴的浓度远远大于电子的浓度，所以称空穴为多数载流子（简称多子），主要由掺杂形成，多子浓度取决于杂质浓度，掺入杂质越多，多子浓度越大；电子为少数载流子（简称少子），由本征激发形成，其浓度主要取决于温度，温度越高，少子浓度越大。P 型半导体中载流子浓度大大增加，导电能力显著增强。

在 P 型半导体中，因杂质原子中的空位可以吸收电子，故称之为受主原子。杂质原子吸收电子后成为带负电荷的负离子，不能自由移动，因此，负离子不是载流子。P 型半导体中的正电荷量（硅原子失去电子而形成的空穴和本征激发的空穴的电荷量）和负电荷量（负离子和本征激发的电子的电荷量）相等，故 P 型半导体呈电中性。

2. N 型半导体

在硅或锗本征半导体中掺入微量的五价元素（如磷或锑等）得到的杂质半导体称为 N 型半导体。

如图 1-4 所示，在 N 型半导体中，由于五价杂质原子中只有四个价电子能与周围四个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的一个价电子因无共价键束缚而很容易形成自由电子，因此自由电子数远远大于空穴数。所以，在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子（简称多子），它主要由杂质原子提供，多子浓度取决于杂质浓度；空穴是少数载流子（简称少子），由本征激发形成，其浓度主要取决于温度。N 型半导体中载流子浓度大大增加，导电能力显著增强。

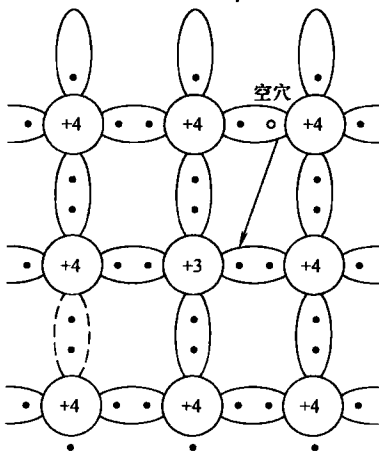


图 1-3 P 型半导体

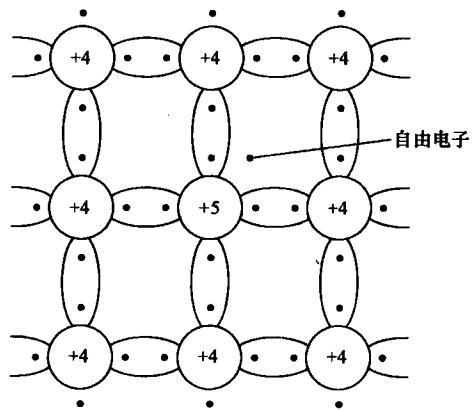


图 1-4 N 型半导体