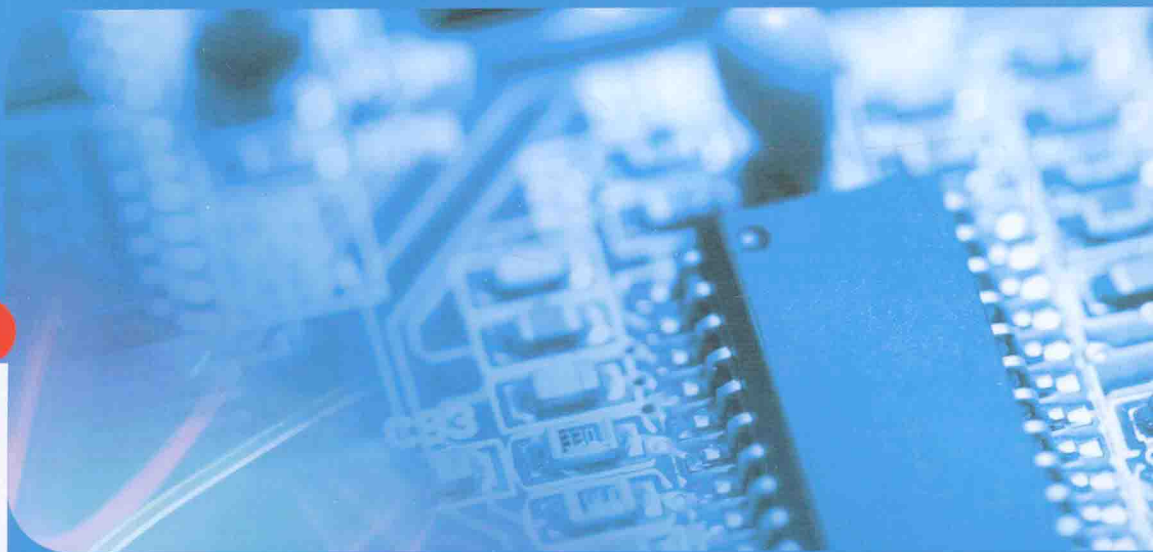




普通高等教育“十二五”规划教材  
(电工电子课程群改革创新系列)

# 模拟电子技术

主 编 罗桂娥  
副主编 李力争 张静秋 宋学瑞  
主 审 邹逢兴



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

普通高等教育“十二五”规划教材

# 模拟电子技术

主 编 罗桂娥

副主编 李力争 张静秋 宋学瑞

主 审 邹逢兴



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书以“讲清基本原理,打好电路基础,兼顾分立与集成电路,好教好学”为宗旨,强调物理概念的描述,避免复杂的数学推导。在若干知识点的阐述上,具有一定的个性特色,并期望从内容取舍、编排以及文字表达等方面解决初学者的入门难问题;为了解决各专业的基本内容要求与不同专业的特殊专业内容要求的矛盾,每一章的最后一节均为辅修内容,供各位教师自行取舍;每章均以“内容提要”方式作为一章内容的引导,对难点问题及容易混淆的内容均以“问题引导”做牵引,并对重要知识点进行小结的基础上,在一章结束时,以“本章要点、本章主要概念与术语、本章基本要求”的方式进行小结,纲目较为清晰。

本书主要内容包括:常用半导体二极管及其应用电路,双极型三极管及其基本放大电路,场效应管及其基本放大电路,模拟集成电路基础,负反馈放大电路,信号的运算与处理电路,波形产生与信号转换电路,直流稳压电源等。

本书适合作为高等院校电气电子信息类及机电类各专业的教材用书,也可以供相关工科专业选用和工程技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 罗桂娥主编. — 北京: 中国水利  
水电出版社, 2014. 8  
普通高等教育“十二五”规划教材  
ISBN 978-7-5170-2123-0

I. ①模… II. ①罗… 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(2014)第123237号

策划编辑: 雷顺加 责任编辑: 宋俊娥 加工编辑: 鲁林林 封面设计: 李 佳

书 名	普通高等教育“十二五”规划教材 模拟电子技术
作 者	主 编 罗桂娥 副主编 李力争 张静秋 宋学瑞 主 审 邹逢兴
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京正合鼎业印刷技术有限公司
规 格	170mm×227mm 16开本 30.5印张 572千字
版 次	2014年8月第1版 2014年8月第1次印刷
印 数	0001—4000册
定 价	39.80元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

普通高等教育“十二五”规划教材

(电工电子课程群改革创新系列)

## 编审委员会名单

主任：施荣华 罗桂娥

副主任：张静秋 宋学瑞

成员：(按姓氏笔画排序)

王力为 刘子建 刘曼玲 吕向阳 寻小惠

吴显金 宋学瑞 张亚鸣 张晓丽 张静秋

李 飞 李力争 李中华 陈 宁 陈明义

陈革辉 罗 群 罗桂娥 罗瑞琼 姜 霞

胡燕瑜 彭卫韶 覃爱娜 谢平凡 赖旭芝

秘书：雷 皓

主 审：邹逢兴

# 序

电能的开发及其广泛应用成为继蒸汽机的发明之后，近代史上第二次技术革命的核心内容。20 世纪出现的大电力系统构成工业社会传输能量的大动脉，以电、磁、光为载体的信息与控制系统则组成了现代社会的神经网络。各种新兴电工电子材料的开发和应用丰富了现代材料科学的内容，它们既得益于电工电子技术的发展，又为电工电子技术的进步提供物质条件。

电工电子技术的迅猛发展和广泛应用，可以说“无所不用，无处不在”，日益渗透到其他科学领域，促进其发展，在我国现代化建设中具有重要的作用。电工电子技术成为每一名工科学生的必修课程。

为了满足高校不同专业的学生对电工电子技术知识和技能的不同要求，在共性和差异之间找到平衡点，经过多年的探索，中南大学电工电子教学与实验中心构建了一套“多类别模块化组合式”的电工电子系列课程体系。根据中南大学课程群建设的总体规划，并结合现代电工电子技术发展的趋势与当今电工电子的应用环境，我们与中国水利水电出版社合作出版电工电子系列教材。计划首次出版 10 本，包括理论教材和实践教材两类。

理论教材按照不同专业分 4 个层次共 7 本：

电气信息类：电路理论，模拟电子技术，数字电子技术；

机制能动类：电工技术，电子技术；

材料化工类：电工学（多学时）；

工程管理类：电工学（少学时）。

实践教材按照不同教学环节共 3 本：

电路与电子技术实验教程；

电子技术课程设计教程；

电工电子实习教程。

本系列教材的特色可以归纳为以下几点：

1. 对于相同的教学内容，不同层次的理论教材中，教学深度、广度和表述方法不同，以期符合不同的教学要求，满足对不同专业学生的教学需要。

2. 注重基础知识的提炼与更新，注重工程性内容的引入，让学生既有扎实的理论基础，又能联系实际，培养学生的工程概念和能力。

3. 紧跟科技发展的步伐，注重教学内容的关联性和完整性。具体体现在降

低教学难度，注重介绍基本内容、基本方法和典型应用电路，尤其是集成电路的应用。

4. 引入仿真工具，对常用基本电路进行仿真分析，建立理论与实践沟通的桥梁。减少重要结论的推导和证明，将学生的注意力吸引到对电路结构的认识、元件参数的选择、性能指标的测试和实际制作上来。

目前我国高校的教育和教学模式还有赖于改革和完善，各专业的培养方案和课程建设也还在不断地探索中。本系列教材在满足本校教学要求的同时，也希望得到广大师生的批评、建议和鼓励。

中南大学电工电子课程群改革创新系列教材编委会

2013年12月18日

# 前 言

“模拟电子技术”是工科院校电气电子信息类专业的一门重要的技术基础课，是研究各种电子器件、模拟电路及其应用的课程。本教材是该课程使用的配套教材，适用学时数为 48~64 学时。本教材是根据中南大学面向 21 世纪课程教材建设的总体规划，在《模拟电子技术基础》（第 2 版，中南大学出版社）的基础上，进一步结合现代科学技术发展的形势、目前教学内容改革的要求及多年的教学经验进行编写的。本教材具有以下特点：

(1) 力求少而精，在“精练”上取胜。精选内容，优选讲法，以符合教学基本要求为准。

(2) 在保证电子技术传统内容的基础上，适当引入新概念、新器件、新技术，如：电流模电路及电流反馈型运放，开关电容滤波，集成电压比较器、集成功放、集成锁相环，集成开关稳压器等等，便于学生了解电子技术的新发展。

(3) 重视电子器件的外特性以及各种集成电路的输入、输出特性，对于电路问题的分析，力求简化推导过程，突出物理概念的讲述，为培养学生分析问题和解决问题的能力创造条件。使读者不但能够学会定量计算的方法，而且能够掌握定性分析的技巧，为以后学习专业课程打下基础。

(4) 以集成电路为主，适当保留作为电子电路基础的部分分立元件的重要内容。对于集成电路的介绍，简化其内部结构及工作原理的分析，着重介绍集成电路的应用方法以及和应用有关的内部电路问题。重点放在讨论各种基本放大电路及其分析方法、放大电路中的反馈、模拟集成电路及其应用等方面。

(5) 为解决各专业的基本要求与不同专业的特殊专业内容要求的矛盾，本书每一章的最后一节均为辅修内容，供各位教师自行取舍。

(6) 本教材每章均以“内容提要”方式作为一章内容的引导，对难点问题及容易混淆的内容均以“问题引导”做牵引，并在对重要知识点进行小结的基础上，在一章结束时，以“本章要点、本章主要概念与术语、本章基本要求”的方式进行小结，纲目较为清晰。

编写一本既能在有限的学时内较好地达到本门课程的基本要求，又具有一定特色的教材是我们长期以来的愿望。我们在反复讨论基本要求的基础上，对教材内容作了精选安排，突出基本概念、基本原理和基本分析方法，并注重从教材体系上进行探索，正确处理传统和先进内容、理论与实际、深度与广度、分立元件

与集成电路之间的关系。本书以“讲清基本原理，打好电路基础，兼顾分立与集成电路，好教好学”为宗旨，强调物理概念的描述，避免复杂的数学推导。在若干知识点的阐述上，具有一定的个性特色，并期望从内容取舍、编排以及文字表达等方面解决初学者的入门难问题。

本书主要内容包括常用半导体二极管及其应用电路，双极型三极管及其基本放大电路，场效应管及其基本放大电路，模拟集成电路基础，负反馈放大电路，信号的运算与处理电路，波形产生与信号转换电路，直流稳压电源等。书中通过对半导体器件及电路的分析，阐述了模拟电子技术中的基本概念、基本原理和基本分析方法。书中各章所设置的习题，可使学生巩固所学的知识，检验应用知识的能力。

本书是在总结中南大学信息科学与工程学院电工电子教学与实验中心多年教学经验的基础上完成的。罗桂娥教授任主编，李力争教授、张静秋副教授、宋学瑞副教授任副主编。其中，罗桂娥负责第3章、第4章、第5章的编写；李力争负责第7章、第8章的编写；张静秋负责第1章、第2章及附录的编写；宋学瑞负责第6章的编写。最后，全书由罗桂娥统稿定稿。本书在编写过程中，得到了中南大学电工电子教学与实验中心许多教师的支持与帮助，特别是陈明义、赖旭芝、李飞、覃爱娜、陈革辉、刘曼玲、张亚鸣、刘子建、彭卫韶、吴显金、罗瑞琼、张晓丽、寻小惠、姜霞和罗群等教师审阅了本书的编写提纲和书稿内容，提出了很多改进意见和建议，对我们启发和帮助很大，在此表示衷心的感谢。并对本教材选用参考文献的著作者致以诚挚的谢意。

国防科技大学邹逢兴教授担任本书的主审，邹教授在百忙之中精心审阅了全部书稿，提出了许多宝贵意见，对完善和提高教材质量起到了重要的作用，在此向邹教授表示深深的谢意。

编者深知，模拟电子电路范围广，新知识多，尽管在编写过程中做了很大努力，但由于水平和视野的限制，加之时间仓促，书中难免存在许多缺点错误，恳请广大读者批评指正。

编者

2014年7月于中南大学



# 目 录

序

前言

第 1 章 半导体二极管及其应用电路	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体材料及其特性	1
1.1.2 杂质半导体	4
1.1.3 PN 结	5
1.2 半导体二极管	8
1.2.1 二极管的结构与类型	8
1.2.2 二极管的伏安特性	9
1.2.3 二极管的势垒电容和扩散电容	13
1.2.4 二极管的主要参数	14
1.2.5 二极管等效电路	16
1.3 稳压二极管	19
1.3.1 稳压二极管的工作原理	19
1.3.2 稳压二极管的主要参数	20
1.4 二极管典型应用电路	21
1.5 辅修内容	28
1.5.1 发光二极管	28
1.5.2 光电二极管	29
1.5.3 变容二极管	30
1.5.4 肖特基二极管	31
本章小结	31
习题一	33
第 2 章 双极型三极管及其基本放大电路	38
2.1 双极型三极管	38
2.1.1 BJT 的类型与结构	39
2.1.2 BJT 的工作原理	40
2.1.3 BJT 的特性曲线	43

2.1.4	BJT 的主要参数 .....	47
2.1.5	BJT 的电路模型 .....	50
2.1.6	BJT 分析举例 .....	53
2.2	放大电路的基本概念及性能指标 .....	56
2.2.1	放大的概念 .....	57
2.2.2	放大电路的性能指标 .....	57
2.3	单管共射放大电路 .....	62
2.3.1	共射放大电路的组成和工作状态 .....	62
2.3.2	共射放大电路的图解分析法 .....	64
2.3.3	共射放大电路的等效电路分析法 .....	71
2.4	静态工作点稳定的放大电路 .....	76
2.4.1	影响静态工作点稳定的因素 .....	76
2.4.2	稳定静态工作点的措施 .....	77
2.4.3	分压式偏置共射放大电路的分析 .....	79
2.5	共集放大电路和共基放大电路 .....	82
2.5.1	共集基本放大电路分析 .....	82
2.5.2	共基基本放大电路分析 .....	84
2.6	放大电路的频率响应 .....	86
2.6.1	RC 网络的频率响应 .....	87
2.6.2	BJT 的高频等效模型 .....	92
2.6.3	阻容耦合共射放大电路的频率响应 .....	95
2.7	辅修内容 .....	101
2.7.1	晶体管的频率参数 .....	101
2.7.2	光电器件 .....	103
	本章小结 .....	105
	习题二 .....	107
<b>第 3 章</b>	<b>场效应管及其基本放大电路</b> .....	<b>114</b>
3.1	结型场效应管 .....	114
3.1.1	JFET 的结构与工作原理 .....	115
3.1.2	JFET 的特性曲线 .....	117
3.2	绝缘栅型场效应管 .....	119
3.2.1	N 沟道增强型 MOSFET .....	119
3.2.2	N 沟道耗尽型 MOSFET .....	123
3.3	场效应管的主要参数及交流小信号模型 .....	126

3.3.1	场效应管的主要参数	126
3.3.2	场效应管的交流小信号模型	127
3.4	场效应管放大电路	128
3.4.1	场效应管放大电路的静态偏置及静态分析	128
3.4.2	场效应管放大电路的动态分析	130
3.5	辅修内容	136
3.5.1	特殊场效应管	136
3.5.2	场效应管的其他应用	138
	本章小结	140
	习题三	141
<b>第 4 章</b>	<b>模拟集成电路基础</b>	<b>146</b>
4.1	模拟集成电路共性问题	146
4.1.1	模拟集成电路的工艺特点	147
4.1.2	集成运算放大电路的结构框图	149
4.2	晶体管电流源电路及其应用	149
4.2.1	晶体管电流源电路	150
4.2.2	有源负载放大电路	155
4.3	差动放大电路	156
4.3.1	差动放大电路结构与抑制零漂的原理	157
4.3.2	差动放大电路基本性能分析	161
4.3.3	差动放大电路的改进	167
4.4	功率放大电路	171
4.4.1	功率放大电路的特点及主要性能指标	171
4.4.2	功率放大电路的分类	172
4.4.3	乙类互补对称 OCL 功率放大电路	174
4.4.4	改进型 OCL 功率放大电路	183
4.5	多级放大电路	189
4.5.1	多级放大电路的耦合方式	189
4.5.2	多级放大电路分析	193
4.6	集成运算放大电路	195
4.6.1	F007 集成运放简介	195
4.6.2	集成运放的主要性能指标	199
4.6.3	集成运放的模型	201
4.6.4	集成运放的电压传输特性	202

4.6.5	集成运放的使用与注意事项	204
4.7	辅修内容	207
4.7.1	几种其他类型的功放	207
4.7.2	几种其他集成运放简介	211
4.7.3	多级放大电路的频率响应	213
	本章小结	216
	习题四	218
<b>第 5 章</b>	<b>负反馈放大电路</b>	<b>222</b>
5.1	反馈的基本概念与反馈的判别方法	222
5.1.1	反馈的基本概念	223
5.1.2	反馈的类型及其判别	223
5.2	负反馈放大电路的方框图	231
5.2.1	负反馈放大电路的方框图及一般表达式	232
5.2.2	负反馈放大电路四种组态的方框图	233
5.3	深度负反馈放大电路放大倍数的估算	235
5.3.1	深度负反馈的实质	236
5.3.2	四种组态负反馈电路放大倍数分析	238
5.4	负反馈对放大电路性能的影响	244
5.4.1	提高闭环放大倍数的稳定性	244
5.4.2	改善输入电阻与输出电阻	245
5.4.3	展宽放大电路的通频带	249
5.4.4	减小非线性失真与抑制环内干扰	251
5.4.5	放大电路中引入负反馈的一般原则	254
5.5	辅修内容	257
5.5.1	负反馈放大电路的稳定性	257
5.5.2	电流反馈型运算放大电路	262
	本章小结	265
	习题五	267
<b>第 6 章</b>	<b>信号的运算与处理电路</b>	<b>273</b>
6.1	集成运放的两个工作区域及其特点	273
6.2	基本运算电路	276
6.2.1	比例运算电路	276
6.2.2	求和运算电路	283
6.2.3	积分运算电路与微分运算电路	286

6.2.4	对数运算电路与指数运算电路	291
6.3	模拟乘法器及其应用	296
6.3.1	模拟乘法器简介	296
6.3.2	模拟乘法器的工作原理	297
6.3.3	模拟乘法器的应用	299
6.4	有源滤波电路	304
6.4.1	滤波电路的基础知识	305
6.4.2	低通滤波器	309
6.4.3	高通滤波器	316
6.4.4	带通滤波器	317
6.4.5	带阻滤波器	320
6.5	辅修内容	324
6.5.1	仪用放大器	324
6.5.2	开关电容滤波器	326
	本章小结	327
	习题六	328
<b>第7章</b>	<b>波形产生与信号转换电路</b>	<b>336</b>
7.1	正弦波产生电路	336
7.1.1	正弦波振荡电路的起振与平衡条件	336
7.1.2	RC 正弦波振荡电路	339
7.1.3	LC 正弦波振荡电路	345
7.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	356
7.2	电压比较器	361
7.2.1	单限比较器	361
7.2.2	滞回比较器	364
7.2.3	窗口比较器	370
7.3	非正弦波产生电路	372
7.3.1	矩形波产生电路	372
7.3.2	三角波产生电路	376
7.4	信号转换电路	380
7.4.1	电压—电流转换电路	380
7.4.2	电压—频率转换电路	382
7.4.3	精密整流电路	384
7.5	辅修内容	387

7.5.1 集成函数发生器 .....	387
7.5.2 集成锁相环 .....	390
7.5.3 集成电压比较器 .....	394
本章小结 .....	396
习题七 .....	398
<b>第 8 章 直流稳压电源</b> .....	<b>405</b>
8.1 直流稳压电源的基本组成 .....	405
8.2 单相整流电路 .....	406
8.2.1 单相半波整流电路 .....	406
8.2.2 单相桥式全波整流电路 .....	407
8.3 滤波电路 .....	410
8.3.1 电容滤波电路的工作原理 .....	410
8.3.2 电容滤波电路的输出特性及主要参数 .....	411
8.3.3 其他滤波电路 .....	413
8.4 稳压二极管稳压电路 .....	415
8.4.1 稳压原理 .....	415
8.4.2 电路参数选择 .....	416
8.5 串联型稳压电路 .....	418
8.6 集成三端稳压器的应用 .....	422
8.6.1 固定式集成三端稳压器 .....	423
8.6.2 可调式集成三端稳压器 .....	427
8.7 辅修内容 .....	431
8.7.1 倍压整流电路 .....	431
8.7.2 稳压电路的性能指标 .....	433
8.7.3 集成稳压器中的基准电压源与保护电路 .....	434
8.7.4 开关型稳压电路 .....	439
8.7.5 集成开关稳压器及其应用 .....	442
本章小结 .....	447
习题八 .....	448
<b>部分习题答案</b> .....	<b>455</b>
<b>附录 几个典型模拟电路的 Multisim 仿真研究</b> .....	<b>461</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>474</b>

# 第 1 章 半导体二极管及其应用电路



半导体器件是构成电子电路的基本元件。本章从制造电子元件的半导体材料入手,介绍常用半导体材料及其特性,PN 结的结构及其单向导电性。重点介绍二极管的结构原理、伏安特性、主要参数、电路模型以及二极管几种常用的应用电路及其分析方法。

电路是由电气元件和导线构成,电路种类很多,有一类叫电子电路,如收音机、电视机、计算机等内部的电路。拆解这些电路,观察其电路板上的元件,可以看到,电子电路通常包含一些大小和形状各异的半导体元件。PN 结是半导体元件内部的一个基本结构,二极管是应用广泛的半导体元件之一。那么,什么是半导体?PN 结是怎么形成的?二极管具有什么样的结构和特性?有何用途?

## 1.1 半导体基础知识

本节从本征半导体的共价键结构出发,介绍半导体中参与导电的两种载流子,当本征半导体中掺入不同类型的杂质元素后可以形成 P 型和 N 型半导体,将 P 型和 N 型半导体按照一定的加工工艺结合在一起就可以构成 PN 结,而 PN 结是构成二极管、三极管等半导体电子器件的基础。

### 1.1.1 半导体材料及其特性

在电工材料中,电阻率范围在 $10^4 \sim 10^6 \Omega \cdot \text{m}$ 的称为半导体(Semiconductor),其导电能力介于导体(如金属铝、铜和银等)和绝缘体(如陶瓷、玻璃、橡胶和塑料等)之间。构成半导体器件的半导体材料主要有两大类:单晶体半导体和复合晶体半导体。单晶体半导体有重复的晶体结构,如硅(Si)和锗(Ge)。而复合晶体半导体是由不同原子结构的两种或更多种半导体材料构成,如砷化镓(GaAs)、硫化镉(CdS)、氮化镓(GaN)和磷砷化镓(GaAsP)等。常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)和砷化镓(GaAs)等。其中硅和锗是目前制作集

成器件的主要材料，而砷化镓主要用于制作高频高速器件。

### 1. 半导体的特殊性质

半导体在电子技术中获得了广泛的应用，是因为它的特殊结构以及由此带来的许多特殊性质，例如：

#### (1) 热敏性。

某些半导体材料的导电能力随着温度的变化而明显变化，称为热敏性。半导体的电阻率对温度十分敏感，具有负温度特性。以锗为例，当温度从 20℃ 升高到 30℃ 时，其电阻率几乎减小一半。利用热敏性可制成热敏电阻。

#### (2) 光敏性。

某些半导体材料的导电能力随着光照的变化而显著变化，称为光敏性。例如硫化镉，在暗处时其电阻值为几十兆欧姆；受光照后，其电阻值可以降低到几千欧姆，只有原来的 1%。利用光敏性可制作光敏电阻和光电池。

#### (3) 掺杂性。

掺杂性也称为杂敏性，是指半导体的导电能力因掺入特殊的杂质而发生显著的变化。在本征硅中，只要掺入亿分之一的三价元素硼，其电阻率将下降到原来的几万分之。利用掺杂特性可制作具有不同用途的半导体器件，如二极管、晶体管 and 场效应晶体管等。

除了以上广泛应用的三个特性之外，半导体材料还有压敏、气敏、湿敏、磁敏、射线敏等特性，利用这些特性，可以制作敏感电阻或传感器等。

### 2. 本征半导体的共价键结构

本征半导体 (Intrinsic Semiconductor) 是一种纯净的、具有完整晶体结构的半导体，是制作半导体器件的基础材料。半导体通常为四价元素 (如硅或锗)，其原子结构的最外层有 4 个价电子。如图 1-1 所示，中心标有 +4 的圆圈代表原子核及内层电子，周围的 4 个圆点代表最外层的 4 个价电子。每个原子都与周围的 4 个原子通过共价键 (Covalent Bond) 形式紧密地连接在一起，并在空间排列成规则的晶格 (Crystal Lattice)。由于晶体中共价键的结合力很强，在热力学温度  $T=0\text{K}$  (相当于  $-273^\circ\text{C}$ ) 时，价电子 (Valence Electron) 的能量不足以挣脱共价键的束缚，因此晶体中没有自由电子 (Free Electron)，此时硅半导体近似为绝缘体。硅和锗晶体的共价键结构如图 1-1 所示。

### 3. 本征激发与复合

在常温下，极少数的价电子由于热运动获得足够的能量，从而挣脱共价键的束缚成为自由电子，这个过程称为本征激发 (Intrinsic Excitation) 或热激发，如图 1-2 所示。当某个价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时，就会在原来的共价键中留下一个空位，这种空位称为空穴 (Hole)。原子失去一个价电子后带



正电，因此可以认为空穴带正电。由于空穴的存在，自由电子有可能进来填补空穴，使得自由电子和空穴成对消失，这个过程称为复合（Recombination）。显然，在本征半导体中自由电子和空穴是成对出现的，通常认为本征激发将产生电子—空穴对。

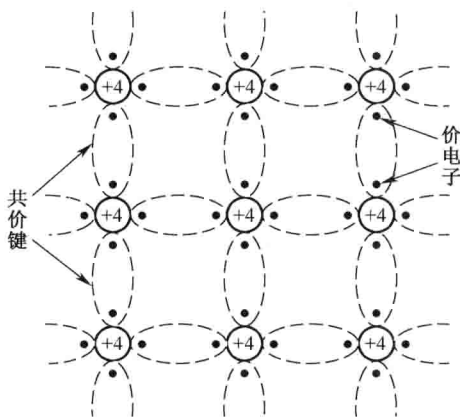


图 1-1 硅和锗晶体的共价键结构

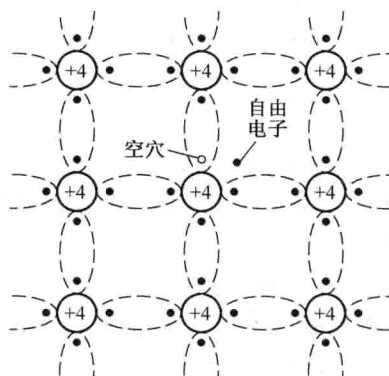


图 1-2 本征半导体中的电子—空穴对

在本征半导体两端外加一个电场时，则自由电子将逆着电场方向定向移动形成电子电流；另一方面由于空穴的存在，价电子也可能逆电场方向依次填补空穴，就好像空穴顺着电场方向移动，从而形成了空穴电流。可以认为，导体中只有自由电子参与导电，而半导体中自由电子和空穴都参与导电，有两种承载电荷的粒子，即两种载流子（Carrier），这是半导体导电的特殊之处。

#### 4. 温度对半导体和导体的不同影响

半导体与导体有一个重要的区别就是两者受热后的反应不同。对于导体，其电阻会随着温度升高而增大，这是因为导体中的载流子数量不会随着温度的升高而发生明显的变化，并且导体相对位置的振动模式使得通过导体的载流子流动更加困难。如果某种材料的电阻随着温度升高而增大，通常认为这种热效应材料具有“正温度系数”。

而半导体在受热后具有良好的导电性能，因为当温度升高时，更多的价电子吸收到足够的热能来挣脱共价键，从而增加了载流子数量。因此，半导体材料具有“负温度系数”。

温度对本征半导体中载流子浓度的影响很大。在一定温度下，热激发和复合过程将不断地进行下去并达到动态平衡，使电子—空穴对的浓度一定。本征半导体中载流子的浓度是环境温度的函数，而且随着环境温度的升高近似按指数规律