

面向 **21** 世纪

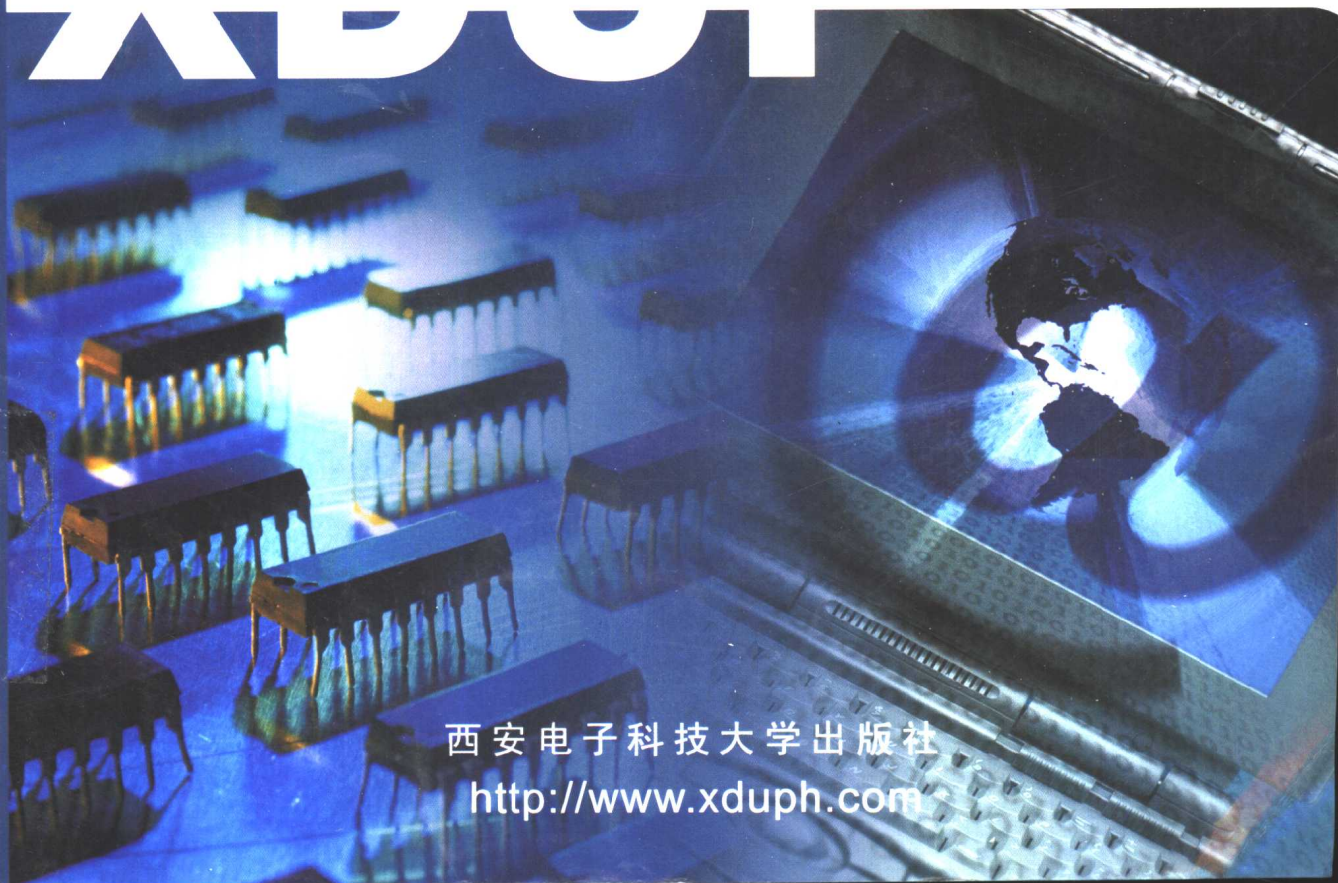
高等学校信息工程专业系列教材

# 模拟电子电路基础

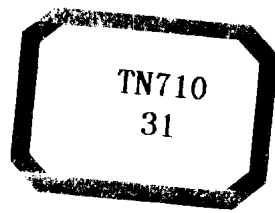
*Fundamentals of Analog Electronic Circuits*

王卫东 编著

江晓安 主审



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>



面向 21 世纪高等学校信息工程专业系列教材

# 模拟电子电路基础

Fundamentals of Analog Electronic Circuits

王卫东 编著

西安电子科技大学出版社

2003

## 内 容 简 介

本书是为了适应当前模拟电子电路基础课程的教学改革而编写的。内容包括：半导体基本器件及应用、晶体三极管(BJT)放大电路基础、模拟集成基本单元电路、场效应管及MOS模拟集成电路基础、放大电路的频率特性、负反馈技术、集成运算放大器及其应用、电流模式电路基础、EDA技术基础。

本书以“讲透基本原理，打好电路基础，面向集成电路”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，并在内容取舍、编排以及文字表达等方面都期望解决初学者的入门难问题。另外，为了帮助初学者更好地学习本书，对所述的基本电路利用EWB的电路设计软件进行了电路仿真，并配有CAI教学软件。

本书可作为高等院校工科类学生的电子技术基础课教材，也适用于广大科技工作者参考学习。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子电路基础/王卫东编著.

—西安：西安电子科技大学出版社，2003.2

(面向21世纪高等学校信息工程类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1197-4

I. 模… II. 王… III. 模拟电路—高等学校—教材 IV. TN710

### 中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第107217号

策 划 马晓娟

责任编辑 杨宗周

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)8227828 邮 编 710071

http://www.xduph.com E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西光大印务有限责任公司

版 次 2003年2月第1版 2003年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21.25

字 数 502千字

印 数 1~4 000册

定 价 23.00元

ISBN 7-5606-1197-4/TN·0211

**XDUP 1468001-1**

\*\*\* 如有印装问题可调换 \*\*\*

# 序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应地教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入21世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等10余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类的教学计划和课程大纲,目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人,这套教材预计在2004年全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、优中选优、以质取胜。教材内容要反映21世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用。体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

2002年8月

# 高等学校计算机、信息工程类专业

## 系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

### 计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

### 信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

# 前 言

随着半导体技术的发展,模拟电路所涵盖的内容越来越多,但受限于新的教学大纲和学生知识结构的变化,所允许的授课学时却越来越少,本书就是为了适应这种形势的需要而编写的。编者在分析了1990年以来出版或再版的若干国内外重点大学教材的基础上,结合多年来的教学体会及在本校所编讲义的基础上,力求在本书编写中体现出以下的思路和特色。

1. 由于该门课程的新概念多,知识点多,服务的对象又是初学者,加之所涉及的基本理论、基础知识和基本方法对本科生的培养起着重要的作用;而且课程的内容体系与其它相关的专业课程之间保持着紧密的衔接和交融,因此,在基本概念的讲述上不能压缩篇幅,这是使本书易读的重要措施。另外,过多的数学分析推导既占用了大量的教学学时,还可能分散学生的注意力甚至掩盖物理概念。在这方面,本书借鉴国外教材的写法:文字阐述详尽,公式简明易记,鲜有数学推导,不仅易教更要易读、易学。总之,本书力求做到增加可读性,减少学生阅读和学习的困难。

2. 在加强基本概念的基础上,最大限度地删除了对半导体器件(晶体二极管、双极型晶体管 and 场效应晶体管)内部物理过程的数学分析,把注意力放在器件的模型、参数和伏安特性上面。本书始终以“讲透基本原理,打好电路基础,面向集成电路”为宗旨,在章节次序的安排上尽量符合由浅入深,由个别到一般的认识规律。以“边器件边电路”的方法,讲完一种器件,接着就讲它的基本应用电路。放大电路的分析也按照先基础电路后实用变形电路来编排。

3. 模拟电子电路是学生第一次接触到的一门工程型、技术型、实用型而非理论型的课程,它与先修课程“电路分析基础”和“信号与系统”有很大的差别。模拟电子电路是具有一定功能的实用电路,学生在学习电子电路课程时,由于受习惯思维的影响,碰到的第一个疑点和难点是不理解电子电路课程的工程性特点,因此,本书注意强调电路结构和元件取值的合理性。电路的计算则用工程近似方法:抓住主要矛盾来进行工程估算,使之既不失设计计算的正确性和可靠性,又能使分析和设计计算简单化。

4. 注意加强与两门先修课程的联系。实际上,从分析电子电路的观点而言,电路中的电子器件或单元电路模型化以后,剩下的工作就是依靠这两门先修课程的知识来完成的,因此,教材有意识地加强了电路模型的概念,例如放大器通用模型等。第五章(放大电路的频率特性)也从系统极点与开路和短路时间常数关系出发来研究。总之,先修课程应作为模拟电子电路课程的有力工具,使学生所学的知识得到从具体到抽象的升华。

5. 随着科技的发展,与分立元件电路相比,集成电路的优点十分突出。用集成电路组成系统,省时、省力、省钱,性能好、可靠性高,所以必须充分重视集成电路的教学,但重点应放在与集成电路引出端有关的内部单元电路上,应该摒弃以分立元件电路为主干的旧教学模式,代之以集成电路芯片中常用的“基本单元电路”。教材在第三章和第四章充分体现了这一观点。编者认为,学习模拟电路首先要打好基础,这样才能有效地提高学生“读电

路”的能力，做到灵活应用集成电路，发挥好集成电路的作用。学习分立元件电路的目的正在于此。

6. 随着半导体技术的发展，模拟集成电路领域里的新器件、新技术不断涌现，面对 21 世纪新的人才培养要求，基础课程的教学应该与科技发展同步。教材除了在第七章对通用模拟集成电路最重要的品种——集成运算放大器重点分析外，在第八章对模拟集成电路的新技术——电流模式技术也作了适当的介绍，以增加学习兴趣，开拓视野和思路，适应现代科技对人才的需求。

7. 为了把 EDA 技术引入“模拟电子电路基础”课程的教学中，尽早使学生对当代电子电路的设计及制作有一定程度的了解，初步学习和掌握 EDA 技术的使用软件，并通过 EDA 软件的仿真技术，提高学生理论与实践相结合的能力，编者在“模拟电子电路基础”课程的教学中对教材所涉及的所有实用电路及部分习题进行了 EWB 的仿真，并制作了 CAI 课件。编者认为，在课程的教学中适时引入 EWB 对电路的仿真，指导学生初步学习和掌握 EDA 技术的使用软件，通过 EDA 软件的仿真技术，可以大大提高学生理论与实践相结合的能力，从而解决传统教学中课堂与实验室、理论与实践严重脱节的问题。

本书的原形——讲义已供编者所在学校三届本科学生试用，反映很好，在使用过程中，同行教师对讲义提出了大量的修改意见，这些意见对本书的编写帮助很大。

本书第一、二、三、四、五、八章由王卫东编写，第六、七、九章由王卫东、廖欣共同编写，全书由王卫东定稿。西安电子科技大学江晓安教授审阅了全稿。在本书的编写过程中，编者从书末所列参考文献中吸取了宝贵的成果和资料，在此谨向各参考文献的著、编、译者表示感谢。还要感谢西安电子科技大学出版社对本书出版所给予的支持和帮助。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，书中一定有不少错误和不妥之处，希望读者给予批评指正。

编者  
2002 年 10 月

# 目 录

<b>第一章 半导体基本器件及应用</b> .....	1
1.1 半导体基础知识 .....	1
1.1.1 本征半导体 .....	1
1.1.2 杂质半导体 .....	4
1.1.3 漂移电流与扩散电流 .....	7
1.2 PN 结原理 .....	8
1.2.1 PN 结的形成及特点 .....	8
1.2.2 PN 结的单向导电特性 .....	10
1.3 晶体二极管及其应用 .....	11
1.3.1 晶体二极管的伏安特性 .....	12
1.3.2 二极管的直流电阻和交流电阻 .....	14
1.3.3 二极管模型 .....	15
1.3.4 二极管应用电路举例 .....	17
1.3.5 稳压管及其应用 .....	19
1.3.6 PN 结电容效应及应用 .....	22
*1.3.7 特殊二极管 .....	24
1.4 双极型晶体三极管(BJT) .....	26
1.4.1 BJT 的工作原理 .....	26
1.4.2 BJT 的静态特性曲线 .....	33
1.4.3 BJT 主要参数 .....	34
1.4.4 BJT 小信号模型 .....	38
思考题与习题一 .....	44
<b>第二章 晶体三极管(BJT)放大电路基础</b> .....	50
2.1 放大电路的基本组成和工作原理 .....	50
2.1.1 基本放大器及其模型 .....	50
2.1.2 共射放大电路的组成及其直流、交流通道 .....	53
2.1.3 共射放大电路的图解法 .....	58
2.2 三种基本组态放大电路的特性与分析 .....	65
2.2.1 共射放大电路 .....	65
2.2.2 共集放大电路 .....	73
2.2.3 共基放大电路 .....	75
2.2.4 三种基本组态放大电路的比较 .....	78
2.3 多级放大电路 .....	79
2.3.1 耦合方式 .....	79
2.3.2 多级放大器性能指标的计算 .....	82
2.3.3 BJT 组合放大器 .....	83



思考题与习题二 .....	86
<b>第三章 模拟集成基本单元电路 .....</b>	<b>91</b>
3.1 半导体集成电路概述 .....	91
3.2 恒流源和稳定偏置电路 .....	92
3.2.1 BJT 参数的温度特性 .....	92
3.2.2 模拟 IC 中的恒流源 .....	94
3.2.3 带恒流源负载的放大电路 .....	101
3.3 差动放大器 .....	102
3.3.1 差放的偏置、输入和输出信号及连接方式 .....	102
3.3.2 差动放大器的大信号传输特性 .....	107
3.3.3 差动放大器的微变等效分析 .....	108
3.3.4 有源负载差动放大器 .....	114
3.4 功率输出级电路 .....	115
3.4.1 功率放大器的特点、指标和分类 .....	115
3.4.2 互补推挽乙类功率放大器 .....	119
3.4.3 其它乙类推挽功率放大器 .....	124
3.4.4 达林顿组态 .....	126
思考题与习题三 .....	128
<b>第四章 场效应管及 MOS 模拟集成电路基础 .....</b>	<b>134</b>
4.1 结型场效应管(JFET) .....	134
4.1.1 JFET 的结构和工作原理 .....	134
4.1.2 JFET 的特性曲线及参数 .....	137
4.2 金属—氧化物—半导体场效应管 .....	140
4.2.1 N 沟道增强型 MOSFET .....	141
4.2.2 N 沟道耗尽型 MOSFET .....	145
4.3 场效应管放大电路 .....	148
4.3.1 共源放大器 .....	148
4.3.2 共漏放大器—源极输出器 .....	153
4.3.3 各种放大电路性能比较 .....	154
4.4 MOS 模拟集成电路基础 .....	156
4.4.1 MOS 模拟集成基本单元电路 .....	156
4.4.2 简单的 CMOS 集成运算放大器 .....	164
思考题与习题四 .....	165
<b>第五章 放大电路的频率特性 .....</b>	<b>169</b>
5.1 放大电路频率特性的基本概念 .....	169
5.1.1 频率特性和通频带 .....	169
5.1.2 频率失真和增益带宽积 .....	171
5.2 放大电路的复频域分析法 .....	171
5.2.1 复频域中放大电路的传输函数 .....	171

5.2.2	放大电路传输函数的特点	174
5.2.3	放大电路波特图的近似画法	176
5.3	基本放大器高、低截止频率的估算	182
5.3.1	主极点的概念	182
5.3.2	开路时间常数分析法	184
5.3.3	开路时间常数分析法的应用	186
5.3.4	短路时间常数分析法及其应用	191
*5.4	多级放大器高、低截止频率的估算方法	194
	思考题与习题五	195
<b>第六章 负反馈技术</b>		<b>198</b>
6.1	概述	198
6.1.1	反馈的概念	198
6.1.2	反馈的几种基本类型	198
6.2	反馈放大器的单环理想模型	200
6.2.1	单环放大器的理想模型	200
6.2.2	基本反馈方程	200
6.2.3	四种反馈类型	201
6.3	负反馈对放大器性能的影响	207
6.3.1	提高闭环增益的稳定性	207
6.3.2	扩展闭环增益的通频带	207
6.3.3	减小非线性失真	209
6.3.4	改变放大器的输入电阻	210
6.3.5	改变放大器的输出电阻	212
6.3.6	为改善性能而引入负反馈的一般原则	213
6.4	负反馈放大电路的分析与计算方法	213
6.4.1	具有深度负反馈放大电路的参数估算	214
6.4.2	利用方框图法进行分析计算	214
6.4.3	利用方框图法进行分析计算实例	216
6.4.4	反馈放大器 AB 网络分析法小结	221
*6.5	负反馈放大器的频率响应	221
6.5.1	负反馈对放大器频率的影响	221
6.5.2	负反馈放大器的稳定性	224
6.5.3	相位补偿原理与技术	229
	思考题与习题六	232
<b>第七章 集成运算放大器及其应用</b>		<b>238</b>
7.1	通用集成运算放大器的原理	238
7.1.1	集成电路及其特点	238
7.1.2	集成运放的特点及组成方框图	240
7.1.3	典型通用型集成运放 741 内部电路分析	241
7.2	集成运放的特性参数	243
7.2.1	输入特性参数	243

7.2.2	增益特性参数	245
7.2.3	输出特性参数	245
7.2.4	电源特性参数	245
7.2.5	频率特性参数	246
7.3	理想运算放大器	246
7.3.1	理想运放的概念	246
7.3.2	理想运放的等效模型和分析方法	247
7.3.3	运放构成的两种基本负反馈电路	248
7.3.4	运算的误差分析	250
7.4	集成运算放大器的线性应用	251
7.4.1	加法运算电路	251
7.4.2	差动放大器	252
7.4.3	积分器	253
7.4.4	微分器	254
7.4.5	对数和指数运算电路	255
7.5	集成运放的其它应用简介	256
7.5.1	电压比较器	257
*7.5.2	有源滤波器	260
*7.5.3	波形发生器	263
	思考题与习题七	268
<b>第八章 电流模式电路基础</b>		<b>273</b>
8.1	电流模式电路的一般概念	273
8.1.1	概述	273
8.1.2	电流模式电路的特点	274
8.2	跨导线性的基本概念	275
8.2.1	跨导线性环	276
8.2.2	由 TL 环路构成的电流模式电路	278
*8.3	电流传输器	283
8.3.1	引言	283
8.3.2	电流传输器端口特性	284
8.3.3	电流传输器基本应用原理	286
*8.4	跨导运算放大器	290
8.4.1	引言	290
8.4.2	OTA 的基本概念	291
8.4.3	双极型集成 OTA	292
8.4.4	OTA 电路的应用原理	294
8.4.5	OTA 跨导控制电路	301
	思考题与习题八	303
<b>*第九章 EDA 技术基础</b>		<b>307</b>
9.1	概述	307
9.1.1	EDA 技术简介	307

9.1.2 EDA 的电路级设计方法 .....	309
9.1.3 EDA 的主要作用 .....	309
9.1.4 常用的 EDA 软件简介 .....	310
9.2 Electronics Workbench(EWB)基本操作与入门 .....	311
9.2.1 系统的安装要求 .....	312
9.2.2 EWB 的基本界面和菜单简介 .....	312
9.3 EWB 电路图的绘制 .....	319
<b>部分习题参考答案</b> .....	<b>324</b>
<b>附录</b> .....	<b>328</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>330</b>

# 第一章 半导体基本器件及应用

本章首先介绍半导体的基础知识，PN 结的单向导电原理，结的击穿和结的电容效应，二极管的伏安特性，主要参数和等效电路。然后讨论以 PN 结为基本结构的双极型晶体管(BJT)的工作原理、特性、主要参数和等效电路。

## 1.1 半导体基础知识

我们知道，固体材料可分为三类。第一类是导体，它们具有良好的导电性，如铜、铝、铁、银等等。这类材料在室温条件下，导体内部有大量电子处于可以“自由”运动的状态，这些电子可以在外电场的作用下，产生定向运动，形成电流。第二类是绝缘体，它们是不能够导电的材料，如橡胶、塑料等等。在这类材料中，几乎没有“自由”电子，因此，即使有了外电场的作用，也不会形成电流。第三类是所谓的半导体，它们的电阻率介于导体与绝缘体之间，如硅、锗、砷化镓、锗化铟等等。

半导体之所以受到人们的高度重视，并获得广泛的应用，是因为它具有不同于导体和绝缘体的独特性质。这些独特的性质集中体现在它的电阻率可以因某些外界因素的改变而明显地变化，具体表现在以下 3 个方面。

(1) 掺杂性：半导体的电阻率受掺入的“杂质”影响极大。在半导体中即使掺入的杂质十分微量，也能使其电阻率大大地下降。利用这种独特的性质，可以制成各种各样的晶体管器件。

(2) 热敏性：一些半导体对温度的反应很灵敏，其电阻率随着温度的上升而明显地下降。利用这种特性很容易制成各种热敏元件，如热敏电阻、温度传感器等。

(3) 光敏性：有些半导体的电阻率随着光照的增强而明显地下降。利用这种特性可以做成各种光敏元件，如光敏电阻和光电管等。

半导体为什么会具有上述特性呢？为了对半导体器件有较深的认识，能够正确地使用各种半导体器件和迅速地掌握不断出现的各种新型器件，有必要熟悉一些半导体物理的基本知识，掌握半导体内部结构的电压电流关系及等效的物理模型，这些就是我们学习本章的目的和要求。

### 1.1.1 本征半导体

本征半导体是指纯净的，不含杂质的半导体。在近代电子学中，最常用的半导体是硅(Si)和锗(Ge)，它们的原子结构示意图如图 1.1(a)、(b)所示。由图可知，硅和锗的外层电子都是 4 个。外层电子受原子核的束缚力最小，称为价电子，有几个价电子就称为几价元素。硅和锗都是四价元素。

物质的许多物理现象(如导电性)与外层价电子数有很大的关系。为了方便地研究价电子的作用,常把原子核和内层电子看作一个整体,称为惯性核。由于原子呈中性,惯性核带+4单位正电荷,这样惯性核与外层价电子就构成了一个简化的原子结构模型,如图1.1(c)所示。显然,硅和锗元素的简化原子结构模型是相同的,今后,我们将以这样的简化原子结构模型来研究硅或锗内部的物理结构。

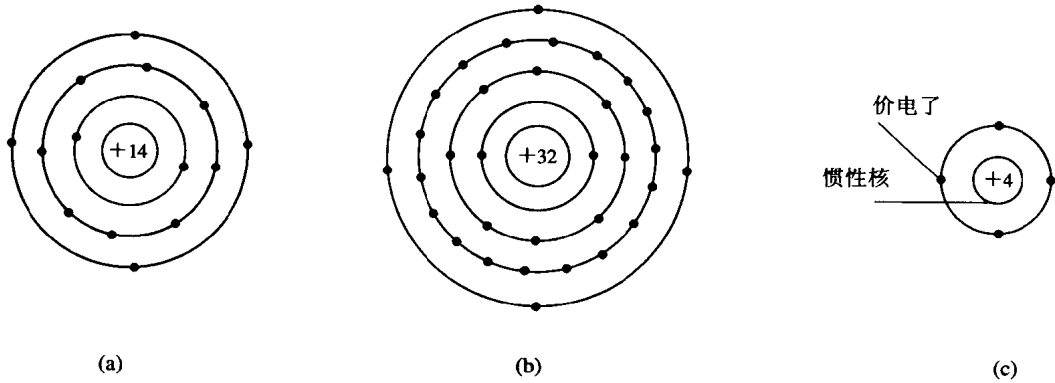


图 1.1 硅和锗原子结构模型  
(a) Si; (b) Ge; (c) 惯性核简化模型

### 1. 共价键结构

当硅(或锗)原子组成单晶体后,各原子之间有序、整齐的排列在一起,原子之间靠得很近,价电子不仅受本原子的作用,还要受相邻原子的作用。根据原子的理论,原子外层电子有8个才能处于稳定状态。因此,在硅(或锗)的单晶体中,每个原子都从四周相邻原子得到4个价电子,才能组成稳定状态。即每一个价电子为相邻原子核所共有,每相邻两个原子都共用一对价电子,形成共价键结构,如图1.2所示。

量子力学证明,原子中电子具有的能量状态是离散的、量子化的,每一个能量状态对应于一个能级。一系列能级形成能带。

在硅(或锗)单晶体中,价电子处于束缚状态,其能量状态较低,每一个能量状态占有一个能级,能级是量子化的,价电子占有的能级位于较低的有限能带内,该能带称为价带。而自由电子处于自由状态,其能量状态较高,能级也是量子化的,位于较高的能带内,该能带称为导带。图1.3示出了电子的能级分布图,图中一系列的水平线表示不同的能级,其高度代表能量的高

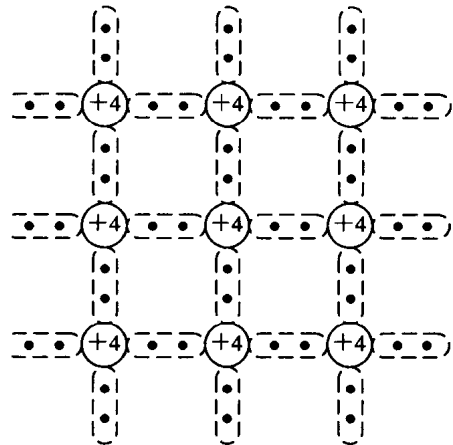


图 1.2 共价键结构示意图

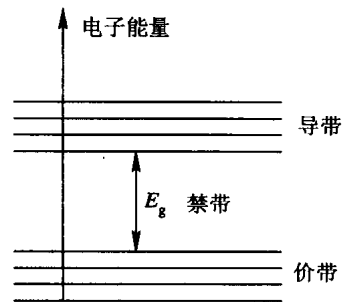


图 1.3 价电子能带图

低。由于价电子至少要获得  $E_g$  的能量才能挣脱共价键的束缚而成为自由电子，因此，自由电子所占有的最低能级要比价电子可能占有的最高能级高出  $E_g$ 。于是，硅(或锗)晶体的能量分布中有一段间隙不可能被电子所占有，其宽度为  $E_g$ ，称为禁带宽度(用  $E_{g0}$  表示)。一般  $E_g$  与半导体材料和温度  $T$  有关。在室温时，Si 的  $E_g=1.12\text{ eV}$ ，Ge 的  $E_g=0.72\text{ eV}$ 。

## 2. 本征激发和两种载流子

当温度在绝对零度，且无外界其它能量激发时，价电子全部束缚在共价键中，位于价带，导带中无自由电子是空的，因此没有能自由运动的带电粒子——载流子，此时的本征半导体相当于绝缘体。当本征半导体受热或光照等其它能量激发时，某些共价键中的价电子因从外界获得足够的能量，受激发挣脱共价键的束缚，离开原子，跃迁到导带而成为参与导电的自由电子，同时在共价键中留下相同数量的空位。上述现象称为本征激发，如图 1.4 所示。图 1.5 用能带图示意了本征激发过程。

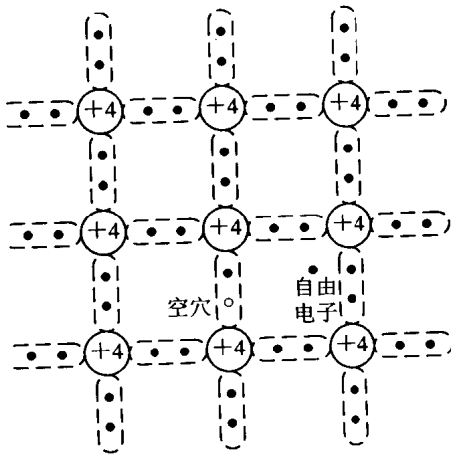


图 1.4 本征激发中的自由电子和空穴对

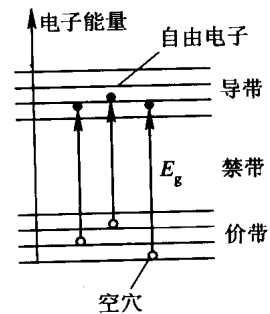


图 1.5 用能带图示意本征激发

当共价键中留下空位时，在外加电场或其它能源作用下，邻近共价键中的价电子就可能来补充这个空位，这个空位会消失(复合)。同时在邻近的共价键中产生新的空位，而新空位周围的其它价电子都有可能填充到这个空位上。这样继续下去，就相当于空位在硅或锗单晶体中随机运动。由于带负电荷的价电子依次填补空位的运动效果与带正电荷的粒子作反向运动的效果是相同的，因此把这种空位看作带正电荷的粒子，并称作空穴。

载流子是物体内运载电荷的粒子，决定于物体的导电能力。在常温下，本征半导体内有两种载流子：自由电子载流子和空穴载流子。自由电子，带单位负电荷；空穴是半导体中所特有的带单位正电荷的粒子，与自由电子电量相等，符号相反，带单位正电荷。在外电场作用下，电子、空穴的运动方向相反，但对电流的贡献是叠加的。

本征激发的重要特征是，自由电子和空穴两种载流子总是成对产生。可见，常温下本征半导体中存在电子和空穴两种载流子，不再是绝缘体。但是，本征激发产生的电子一空穴对很少，本征半导体的导电能力较差。

### 3. 本征载流子浓度

本征激发在本征半导体中产生自由电子—空穴对的同时，还会出现另一种现象：自由电子和空穴在运动过程中的随机相遇，使自由电子释放原来获取的激发能量，从导带跌入价带，填充共价键中的空穴，电子—空穴对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，自由电子和空穴的成对产生和复合的运动都在不停地进行，最终要达到一种热平衡状态，使本征半导体中的载流子浓度处于某一热平衡值。

本征激发和复合是本征半导体中电子—空穴对的两种矛盾运动形式，在本征半导体中，电子和空穴的浓度总是相等的。若设  $n_i$  为本征半导体热平衡状态时的电子浓度， $p_i$  为空穴浓度，则本征载流子的浓度可用下式表示：

$$n_i = p_i = A_0 T^{3/2} \exp\left(\frac{-E_{g0}}{2kT}\right) \quad (1-1)$$

式中， $A_0$  为常数，与半导体材料有关，Si 的  $A_0 = 3.88 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3} \text{K}^{-2/3})$ ，Ge 的  $A_0 = 1.76 \times 10^{16} (\text{cm}^{-3} \text{K}^{-2/3})$ ； $k$  为玻耳兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} (\text{JK}^{-1})$ 。

在室温时，由式(1-1)可推算出

$$\text{Si: } n_i = p_i \approx 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$$

$$\text{Ge: } n_i = p_i \approx 2.4 \times 10^{13} / \text{cm}^3$$

式(1-1)表明：①  $T \uparrow \rightarrow n_i$  (或  $p_i$ )  $\uparrow \rightarrow$  半导体导电能力  $\uparrow$ 。由此特性可制作半导体热敏元件；但  $n_i$  (或  $p_i$ ) 随  $T$  的变化会影响半导体器件的稳定性，因而在电子电路的设计和集成电路的制造工艺中，经常要采用很多措施来克服或减少这种热敏效应。② 光照  $\rightarrow n_i$  (或  $p_i$ )  $\uparrow \rightarrow$  导电能力  $\uparrow$ 。由此特性可制作出半导体的各类光电器件。

## 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中人为地掺入一定量杂质成分的半导体称为杂质半导体。实际上，制造半导体器件的材料并不是本征半导体，而是掺入一定杂质成分的半导体。这是由于在室温下，本征半导体(Si)的载流子浓度  $n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} / \text{cm}^3$ ，与其原子密度  $4.96 \times 10^{22} / \text{cm}^3$  相比，仅为原子密度的  $1/(3.3 \times 10^{12})$ ，故本征半导体的导电能力很弱。为了提高半导体材料的导电能力，可在本征半导体中掺入少量其它元素(称为杂质)，这样会使半导体材料的导电能力显著改善。

在本征半导体中掺入不同种类的杂质，可以改变半导体中两种载流子的浓度。根据掺入杂质种类的不同，半导体可分为 N 型半导体(掺入五价元素杂质)和 P 型半导体(掺入三价元素杂质)。

### 1. N 型半导体

在本征半导体中掺入微量的五价元素的杂质(如砷、磷、锑等)，能使杂质半导体中的自由电子浓度大大增加，因此称这种杂质半导体为电子型半导体或 N 型半导体。掺入的五价元素有 5 个价电子，杂质原子替代了晶格中某些硅的位置。它的 5 个价电子中有 4 个与周围的硅原子构成共价键，多余 1 个电子不受共价键的束缚，杂质原子核对此多余价电子的束缚力也较弱。在适当温度下，它就可能被激发成为自由电子，同时杂质原子变成带正电荷的不能运动的离子，如图 1.6 所示。因杂质原子可提供电子，故称施主原子，五价元



素称为施主杂质。根据理论计算和实验结果，掺入五价元素产生的多余价电子所占有的能级较高，称为施主能级，靠近导带底部，它与导带底的差值要比禁带宽度小得多(在硅中掺入五价砷，差值为 0.049 eV，掺入锑；差值为 0.039 eV；锗中掺入磷，差值为 0.012 eV)，故在一定温度(例如室温)时，每个掺入的五价元素原子的多余价电子都有足够能量进入导带而成为自由电子。所以，导带中自由电子的数量要比本征半导体显著增多。

如图 1.7 所示，由于施主原子释放出的自由电子不是共价键内的价电子，所以不会在价带中产生空穴，这是与本征激发不同之处。另外，施主原子释放多余价电子成为正离子，并被束缚在晶格中，也不能像空穴那样起导电作用。还需说明，在该杂质半导体中同时存在本征激发。

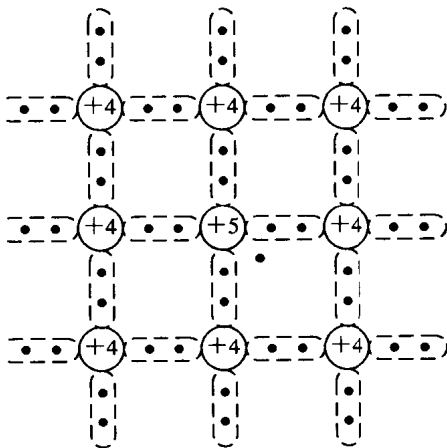


图 1.6 N 型半导体示意图

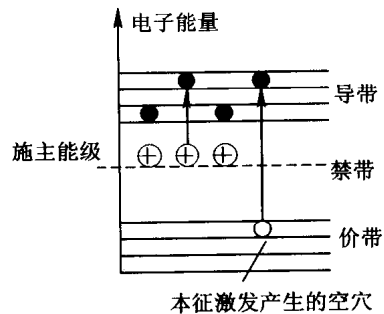


图 1.7 N 型半导体能带图

掺入的五价元素越多，增加的自由电子数越多，自由电子浓度越大；由本征激发产生的空穴与它们相遇的机会就增多，复合掉的空穴数量也就增多，因而该杂质半导体中的空穴浓度反倒比同温度下的本征空穴浓度小，自由电子浓度比同温度下的本征电子浓度大很多倍。因此，称掺入五价元素后的杂质半导体为电子型或 N 型半导体。N 型半导体中的自由电子称多数载流子，简称多子；空穴称为少数载流子，简称少子。

## 2. P 型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素(如硼、镓、铝等)，能使杂质半导体中的空穴浓度大大增加，因而称为空穴型半导体或 P 型半导体。如图 1.8 所示，三价杂质原子的 3 个价电子与周围的硅或锗原子构成 4 个共价键时，由于缺少 1 个价电子，产生 1 个空位。在一定温度下，此空位极易接受来自相邻硅或锗原子共价键中的价电子，从而产生 1 个空穴。三价杂质原子因接受价电子，通常被称为受主原子。一般从价带中移出一个价电子去填充受主原子共价键中的空位只需要很小的能量。根据理论计算和实验结果，掺入三价元素形成的受主能级很靠近价带顶部，它与价带顶的差值很小(在硅中掺入三价的镓，差值为 0.065 eV；掺入镓，差值为 0.16 eV；锗中掺入硼和铝，差值为 0.01 eV)，故在常温下，处于价带中的价电子都具有大于上述差值的能量，而到达受主能级，如图 1.9 所示。每 1 个掺入三价元素的原子都能接受 1 个价电子，而在价带中留下 1 个空穴。受主原子接受 1 个价电子后，其本身便成为带 1 个电子电荷量的负离子，但不会在导带中产生自由电子。负