



21世纪高职高专规划教材·机电系列

# 模拟电子技术基础

(第2版)

李建民 董红生 主编



清华大学出版社  
<http://www.tup.com.cn>



北京交通大学出版社  
<http://press.bjtu.edu.cn>

21 世纪高职高专规划教材·机电系列

# 模拟电子技术基础

(第 2 版)

李建民 董红生 主 编

清华大学出版社  
北京交通大学出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是为适应我国高职高专教育发展的需要,参照教育部制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》,按“必需、够用”的原则进行编写的。

本书注重基本理论与元器件测试、电路调试方法和故障检测等基本技能的结合,体现了高职高专教育“淡化理论、注重应用”的特点,符合当前教学的需要。全书共10章,包括电子线路元器件、基本放大电路、放大电路的频率特性、集成运算放大器、放大电路中的反馈、模拟信号运算电路、信号处理电路、波形发生电路、功率放大电路及直流电源等。

本书可作为高等专科学校、高等职业技术学院、成人高校和民办高校的自动化类、电力技术类、电子信息类和通信类等相关专业的教材,也可供从事电子技术的工程技术人员学习与参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础/李建民,董红生主编. —2版. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社,2012.12

(21世纪高职高专规划教材·机电系列)

ISBN 978-7-5121-1265-0

I. ①模… II. ①李… ②董… III. ①模拟电路-电子技术-高等职业教育-教材  
IV. ①TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第274162号

责任编辑:吴嫦娥 特邀编辑:林夕莲

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:20.25 字数:506千字

版 次:2006年1月第1版 2012年12月第2版 2012年12月第5次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-1265-0/TN·83

印 数:12 001~16 000册 定价:32.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

## 21 世纪高职高专规划教材·机电系列 编审委员会成员名单

主任委员 李兰友 边奠英

副主任委员 周学毛 崔世钢 王学彬 丁桂芝 赵 伟

韩瑞功 汪志达

委 员 (按姓名笔画排序)

马 辉 万志平 万振凯 王永平 王建明

尤晓晔 丰继林 左文忠 叶 华 叶 伟

付晓光 付慧生 冯平安 江 中 佟立本

刘 炜 刘建民 刘 晶 曲建民 孙培民

邢素萍 华铨平 吕新平 陈小东 陈月波

李长明 李 可 李志奎 李 琳 李源生

李群明 李静东 邱希春 沈才梁 宋维堂

汪 繁 张文明 张权范 张宝忠 张家超

张 琦 金忠伟 林长春 林文信 罗春红

苗长云 竺士蒙 周智仁 孟德欣 柏万里

宫国顺 柳 炜 钮 静 胡敬佩 姚 策

赵英杰 高福成 贾建军 徐建俊 殷兆麟

唐 健 黄 斌 章春军 曹豫莪 程 琪

韩广峰 韩其睿 韩 劼 裘旭光 童爱红

谢 婷 曾瑶辉 管致锦 熊锡义 潘玫玫

薛永三 操静涛 鞠洪尧

## 出版说明

高职高专教育是我国高等教育的重要组成部分，它的根本任务是培养生产、建设、管理和服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型专门人才，所培养的学生在掌握必要的基础理论和专业知识的基础上，应重点掌握从事本专业领域实际工作的基本知识和职业技能，因而与其对应的教材也必须有自己的体系和特色。

为了适应我国高职高专教育发展及其对教学改革和教材建设的需要，在教育部的指导下，我们在全国范围内组织并成立了“21世纪高职高专教育教材研究与编审委员会”（以下简称“教材研究与编审委员会”）。“教材研究与编审委员会”的成员单位皆为教学改革成效较大、办学特色鲜明、办学实力强的高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院，其中一些学校是国家重点建设的示范性职业技术学院。

为了保证规划教材的出版质量，“教材研究与编审委员会”在全国范围内选聘“21世纪高职高专规划教材编审委员会”（以下简称“教材编审委员会”）成员和征集教材，并要求“教材编审委员会”成员和规划教材的编著者必须是从事高职高专教学第一线的优秀教师或生产第一线的专家。“教材编审委员会”组织各专业的专家、教授对所征集的教材进行评选，对列选教材进行审定。

目前，“教材研究与编审委员会”计划用2~3年的时间出版各类高职高专教材200种，范围覆盖计算机应用、电子电气、财会与管理、商务英语等专业的主要课程。此次规划教材全部按教育部制定的“高职高专教育基础课程教学基本要求”编写，其中部分教材是教育部《新世纪高职高专教育人才培养模式和教学内容体系改革与建设项目计划》的研究成果。此次规划教材编写按照突出应用性、实践性和针对性的原则编写并重组系列课程教材结构，力求反映高职高专课程和教学内容体系改革方向；反映当前教学的新内容，突出基础理论知识的应用和实践技能的培养；适应“实践的要求和岗位的需要”，不依照“学科”体系，即贴近岗位，淡化学科；在兼顾理论和实践内容的同时，避免“全”而“深”的面面俱到，基础理论以应用为目的，以必需、够用为度；尽量体现新知识、新技术、新工艺、新方法，以利于学生综合素质的形成和科学思维方式与创新能力的培养。

此外，为了使规划教材更具广泛性、科学性、先进性和代表性，我们希望全国从事高职高专教育的院校能够积极加入到“教材研究与编审委员会”中来，推荐“教材编审委员会”成员和有特色、有创新的教材。同时，希望将教学实践中的意见与建议及时反馈给我们，以便对已出版的教材不断修订、完善，不断提高教材质量，完善教材体系，为社会奉献更多更新的与高职高专教育配套的高质量教材。

此次所有规划教材由全国重点大学出版社——清华大学出版社与北京交通大学出版社联合出版，适用于各类高等专科学校、高等职业学校、成人高等学校及高等院校主办的二级职业技术学院使用。

21世纪高职高专教育教材研究与编审委员会

2012年12月

## 第2版前言

“模拟电子技术基础”属于专业技术基础课程，虽然电子技术的发展十分迅速，但模拟电子技术的入门知识包括基本电子元器件、基本电子电路、基本电子电路的应用以及元器件测试、电路故障分析方法等内容没有大的变化，因此本次修订未对教材基本体系结构和内容进行大幅度的更新，只对原书中叙述不够准确以及出现错误的地方进行了修改；保持了原书对模拟电子技术基本概念、基本理论和基本分析方法循序渐进的叙述，在保证“必需、够用”的前提下，减小理论推导，兼顾理论与实践的相结合，注重分析问题解决问题能力的培养等特点。

本次修订李建民负责第1、3、10章，董红生负责第4、6、9章，秦文负责第2、5章，蔡卓恩负责第7、8章，全书由李建民、董红生统稿。

由于作者学识有限，书中一定有很多疏漏及错误，殷切希望采用本教材的教师和同学批评指正。

编者

2012年12月

# 前言

本书参照教育部制定的《高职高专教育模拟电子技术基础课程教学基本要求》，在“必需、够用”的原则下，总结多年的教学实践经验编写而成。突出实用性是编写本教材的指导思想，按照高职高专培养目标的要求，书中一方面对模拟电子技术的基础概念、基本理论和基本分析方法都作了必要和适当的阐述，另一方面也充分考虑到器件辨识、电路调试方法和故障诊断等技能训练方面的内容，在有些章节中加入了器件测试使用的常识、电路调试方法和查找故障的方法，总结出一些行之有效的经验和技巧，便于读者掌握要领，达到培养学生能力的目的。

在体现高职高专特色方面，书中主要以文字叙述为主，尽可能地减少了烦琐的理论推导，并对电路的基本分析方法总结了分析步骤，使学生容易掌握；凡是可以文字、图表等说明的理论问题均不进行数学推导，同时通过例题、习题来加深对理论知识的理解。

为使本教材更切合高职高专相关专业教学的需求，便于教和学，在保证基础理论、基本知识够用的前提下，侧重于器件选择使用和电路分析方法的阐述，力求淡化理论，注重工程应用。为使学生能较好地掌握模拟电子技术的基础知识，提高应用能力，本教材在编写中突出了以下几点。

1. 编写的方法上，采用提出问题，分析问题，解决问题，总结并推广到一般的写作方法。
2. 教材中编入了实际工程中的一些经验、技巧、调试方法和检修要领，供学生学习和借鉴。
3. 对电路的分析方法总结出了分析步骤，便于教和学。
4. 各章教学目的明确，具有针对性，可组合和选择，便于不同专业选修。
5. 每章后配有一定数量的典型思考题与习题，帮助读者复习消化所学内容。
6. 内容叙述力求简明扼要，通俗易懂，深入浅出，富于启发性。
7. 本书配有教学使用的电子课件，可从北京交通大学出版社网站下载，或发邮件至 [cbswce@jg.bjtu.edu.cn](mailto:cbswce@jg.bjtu.edu.cn) 索取；章后练习题有答案，便于教师的教和学生的学。

本书由李建民任主编，夏建全任副主编，陈瑞和周征参加编写。编写分工为：李建民编写第1、3、8章，夏建全编写第4、6、9章，陈瑞编写第2、5章，周征编写第7、10章，全书由李建民负责统稿。

由于编者教学经验和学术水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请师生和读者批评指正。

编者

2006年1月

# 目 录

<b>第 1 章 电子线路元件</b> .....	(1)
1.1 半导体二极管 .....	(1)
1.1.1 半导体的特性 .....	(1)
1.1.2 PN 结及单向导电性 .....	(4)
1.1.3 半导体二极管 .....	(6)
1.1.4 特殊二极管 .....	(9)
1.1.5 二极管的检测和判断 .....	(12)
1.2 半导体三极管.....	(12)
1.2.1 三极管的结构 .....	(13)
1.2.2 三极管的放大作用 .....	(13)
1.2.3 三极管的特性曲线 .....	(16)
1.2.4 三极管的主要参数 .....	(18)
1.2.5 三极管的选用原则 .....	(21)
1.2.6 PNP 型三极管 .....	(21)
1.2.7 复合三极管 .....	(22)
1.2.8 三极管的检测 .....	(22)
1.3 场效应三极管.....	(24)
1.3.1 结型场效应管 .....	(24)
1.3.2 绝缘栅型场效应管 .....	(29)
1.3.3 场效应管的主要参数 .....	(34)
1.3.4 场效应管的特点及使用注意事项 .....	(35)
1.3.5 用万用表检测场效应管 .....	(36)
1.4 其他常用元件.....	(37)
1.4.1 电阻器 .....	(37)
1.4.2 电容器 .....	(39)
本章小结 .....	(40)
练习题 .....	(41)
<b>第 2 章 基本放大电路</b> .....	(44)
2.1 放大电路的概念.....	(44)
2.2 放大电路的主要技术指标.....	(44)



2.3	单管共发射极放大电路	(47)
2.3.1	电路的组成	(47)
2.3.2	放大电路的工作原理	(48)
2.4	放大电路的基本分析方法	(49)
2.4.1	直流通路与交流通路	(50)
2.4.2	静态工作点的近似估算	(50)
2.4.3	图解分析法	(51)
2.4.4	微变等效电路法	(58)
2.5	工作点的稳定问题	(63)
2.5.1	温度对静态工作点的影响	(63)
2.5.2	静态工作点稳定电路	(63)
2.6	放大电路的三种基本组态	(66)
2.6.1	共集电极放大电路	(67)
2.6.2	共基极放大电路	(69)
2.6.3	三种基本组态的比较	(71)
2.7	场效应管放大电路	(72)
2.7.1	场效应管放大电路的特点	(73)
2.7.2	共源极放大电路	(73)
2.7.3	分压-自偏压式共源极放大电路	(75)
2.7.4	共漏极放大电路	(76)
2.8	多级放大电路	(78)
2.8.1	多级放大电路的耦合方式	(78)
2.8.2	多级放大电路的电压放大倍数、输入和输出电阻	(80)
2.9	用万用表检测单元电路	(82)
2.9.1	偏置电路故障部位的判断	(82)
2.9.2	静态工作点的测量与调整	(86)
2.9.3	单元电路的检测	(87)
	本章小结	(89)
	练习题	(90)
<b>第3章</b>	<b>放大电路的频率特性</b>	<b>(95)</b>
3.1	频率特性的一般概念	(95)
3.1.1	幅频特性和相频特性	(95)
3.1.2	下限频率、上限频率和通频带	(96)
3.1.3	频率失真	(96)
3.1.4	波特图	(97)
3.2	三极管的频率参数	(100)
3.2.1	共射极截止频率	(101)
3.2.2	特征频率	(101)

3.2.3 共基极截止频率 .....	(101)
3.3 单管共射极放大电路的频率特性 .....	(101)
3.3.1 单管放大电路的频率特性分析 .....	(102)
3.3.2 直接耦合单管共射极放大电路的频率特性 .....	(108)
3.4 多级放大电路的频率特性 .....	(108)
3.4.1 多级放大电路的幅频特性和相频特性 .....	(108)
3.4.2 多级放大电路的上限频率和下限频率 .....	(109)
本章小结 .....	(110)
练习题 .....	(110)
<b>第4章 集成运算放大电路</b> .....	(112)
4.1 集成运算放大器的基础知识 .....	(112)
4.2 集成运算放大器 .....	(113)
4.2.1 偏置电路 .....	(114)
4.2.2 差分输入级 .....	(115)
4.2.3 中间级 .....	(119)
4.2.4 输出级 .....	(119)
4.3 集成运放的典型电路 .....	(120)
4.4 集成运放的主要技术指标 .....	(121)
4.5 理想运算放大器 .....	(125)
4.5.1 理想运放的技术指标 .....	(125)
4.5.2 理想运放工作在线性区的特点 .....	(125)
4.5.3 理想运放工作在非线性区的特点 .....	(126)
4.6 各类集成运放的性能特点 .....	(127)
4.7 集成运放使用中的几个实际问题 .....	(129)
本章小结 .....	(132)
练习题 .....	(133)
<b>第5章 放大电路中的反馈</b> .....	(134)
5.1 反馈的基本概念 .....	(134)
5.1.1 反馈概念的建立 .....	(134)
5.1.2 反馈的分类与判断 .....	(135)
5.1.3 交流负反馈的四种组态 .....	(138)
5.1.4 反馈的一般表达式 .....	(141)
5.2 负反馈对放大电路性能的影响 .....	(143)
5.2.1 提高放大倍数的稳定性 .....	(143)
5.2.2 减小非线性失真 .....	(144)
5.2.3 展宽通频带 .....	(144)
5.2.4 改变输入电阻和输出电阻 .....	(145)

5.3 负反馈放大电路的分析计算 .....	(148)
5.3.1 利用闭环放大倍数的表达式计算 .....	(148)
5.3.2 利用关系式 $\dot{X}_f \approx \dot{X}_i$ 进行估算 .....	(148)
5.3.3 深度负反馈放大电路计算举例 .....	(149)
5.4 负反馈放大电路的自激振荡 .....	(151)
5.4.1 产生自激振荡的原因 .....	(151)
5.4.2 自激振荡的判断方法 .....	(152)
5.4.3 消除自激振荡的常用方法 .....	(153)
本章小结 .....	(154)
练习题 .....	(155)
<b>第6章 模拟信号运算电路</b> .....	<b>(158)</b>
6.1 比例运算电路 .....	(158)
6.1.1 反相比例运算电路 .....	(158)
6.1.2 同相比例运算电路 .....	(159)
6.1.3 差分比例运算电路 .....	(161)
6.1.4 差分比例运算电路应用举例 .....	(163)
6.2 求和运算电路 .....	(165)
6.2.1 反相输入求和电路 .....	(165)
6.2.2 同相输入求和电路 .....	(166)
6.3 积分和微分电路 .....	(167)
6.3.1 积分电路 .....	(167)
6.3.2 微分电路 .....	(170)
6.4 模拟乘法器 .....	(171)
6.4.1 基本电路及工作原理 .....	(172)
6.4.2 模拟乘法器的应用 .....	(174)
6.5 集成运放应用举例 .....	(177)
6.5.1 信号放大 .....	(177)
6.5.2 信号转换 .....	(179)
本章小结 .....	(180)
练习题 .....	(180)
<b>第7章 信号处理电路</b> .....	<b>(184)</b>
7.1 有源滤波器 .....	(184)
7.1.1 滤波器的作用和分类 .....	(184)
7.1.2 理想滤波器 .....	(185)
7.1.3 低通滤波器 .....	(186)
7.1.4 高通滤波器 .....	(190)
7.1.5 带通滤波器 .....	(191)

7.1.6	带阻滤波器	(192)
7.2	电压比较器	(193)
7.2.1	过零比较器	(194)
7.2.2	单限比较器	(195)
7.2.3	滞回比较器	(195)
7.2.4	双限比较器	(198)
7.2.5	集成电压比较器	(199)
	本章小结	(200)
	练习题	(201)
<b>第 8 章</b>	<b>波形发生电路</b>	<b>(205)</b>
8.1	正弦波振荡电路的组成和分析方法	(205)
8.1.1	正弦波振荡电路的组成	(205)
8.1.2	产生正弦波振荡的条件	(205)
8.1.3	正弦波振荡电路的分析方法	(207)
8.2	RC 正弦波振荡电路	(207)
8.2.1	RC 串并网络振荡电路	(207)
8.2.2	其他形式的 RC 振荡电路	(211)
8.3	LC 正弦波振荡电路	(213)
8.3.1	LC 并联电路的特性	(213)
8.3.2	变压器反馈式振荡电路	(214)
8.3.3	电感三点式振荡电路	(215)
8.3.4	电容三点式振荡电路	(216)
8.3.5	正弦波振荡电路的检测	(218)
8.4	石英晶体振荡器	(219)
8.4.1	石英晶体的基本特性和等效电路	(219)
8.4.2	石英晶体振荡电路	(220)
8.5	非正弦波发生电路	(222)
8.5.1	矩形波发生电路	(222)
8.5.2	三角波发生电路	(225)
8.5.3	锯齿波发生电路	(227)
	本章小结	(228)
	练习题	(229)
<b>第 9 章</b>	<b>功率放大电路</b>	<b>(234)</b>
9.1	功率放大电路的特点	(234)
9.2	互补对称功率放大电路	(236)
9.2.1	OCL 互补对称功率放大电路	(236)
9.2.2	OTL 互补对称功率放大电路	(240)

9.3 实用的功率放大电路 .....	(242)
9.3.1 实际应用的功率放大电路 .....	(242)
9.3.2 功率放大电路的检测方法 .....	(244)
9.4 集成功率放大器 .....	(246)
9.4.1 SHM1150 II 型集成功率放大器 .....	(247)
9.4.2 单片集成音频功率放大器 5G37 .....	(247)
9.4.3 功率模块 IGBT 简介 .....	(249)
9.5 功放管的散热问题 .....	(249)
本章小结 .....	(250)
练习题 .....	(251)
<b>第 10 章 直流电源</b> .....	<b>(254)</b>
10.1 直流电源的组成 .....	(254)
10.2 单相整流电路 .....	(255)
10.2.1 单相半波整流电路 .....	(255)
10.2.2 单相全波整流电路 .....	(256)
10.2.3 单相桥式整流电路 .....	(257)
10.2.4 单相整流电路的主要参数 .....	(258)
10.2.5 倍压整流电路 .....	(260)
10.3 滤波电路 .....	(261)
10.3.1 电容滤波电路 .....	(262)
10.3.2 电感滤波电路 .....	(264)
10.3.3 复式滤波电路 .....	(265)
10.4 稳压电路 .....	(267)
10.4.1 稳压电路的主要指标 .....	(267)
10.4.2 并联型稳压电路 .....	(268)
10.4.3 串联型稳压电路 .....	(271)
10.5 集成稳压电路 .....	(277)
10.5.1 三端集成稳压器的组成 .....	(277)
10.5.2 三端集成稳压器的主要参数 .....	(278)
10.5.3 三端固定式集成稳压器的应用 .....	(280)
10.5.4 三端可调集成稳压器 .....	(281)
10.6 开关稳压电源 .....	(282)
10.6.1 开关稳压电源的特点 .....	(282)
10.6.2 开关稳压电路的工作原理 .....	(282)
10.7 稳压电源的检测 .....	(285)
10.7.1 稳压电源的检测方法 .....	(286)
10.7.2 稳压电源的调试 .....	(289)
10.8 可控整流电路 .....	(290)

10.8.1	晶闸管的基本特性 .....	(290)
10.8.2	晶闸管的伏安特性与主要参数 .....	(292)
10.8.3	单相桥式可控整流电路 .....	(294)
10.8.4	单结晶体管触发电路 .....	(295)
	本章小结 .....	(297)
	练习题 .....	(298)
附录 A	国内外半导体器件型号命名方法 .....	(301)
附录 B	国产半导体分立器件主要参数表 .....	(302)
	部分练习题参考答案 .....	(307)
	参考文献 .....	(310)

# 第 1 章 电子线路元件

## 内容提要

电子元器件是组成各种电子电路——包括模拟电路和数字电路，集成电路和分立元件电路的基础。本章首先介绍半导体的特性，半导体中载流子的运动，阐明 PN 结的单向导电性，然后介绍半导体二极管、稳压管、半导体三极管及场效应三极管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数，半导体元件的测试方法、选用原则等。最后介绍常用电阻、电容元件的标称值等有关知识。

## 1.1 半导体二极管

### 1.1.1 半导体的特性

自然界的各种物质，根据其导电能力的差别，可以分为导体、绝缘体和半导体三大类。例如铜、银和铝等金属材料都是良好的导体。如橡胶、塑料等称为绝缘体。导电性能介于导体和绝缘体之间的一大类物质统称为半导体。大多数半导体器件所用的主要材料是硅(Si)和锗(Ge)。

半导体的导电性能是由其原子结构决定的。如硅，它的原子序数是 14，在硅原子中共有 14 个电子围绕原子核旋转，最外层的轨道上有 4 个电子，原子外层轨道上的电子通常称为价电子。锗的原子序数是 32，但它与硅有一个共同点，即原子最外层的轨道上也有 4 个价电子，所以硅和锗都是 4 价元素。为了方便起见，常常用带有 +4 电荷的正离子和周围的 4 个价电子来表示一个 4 价元素的原子。

在硅(或锗)的晶体中，原子在空间排列成规则的晶格。其中每个原子最外层的价电子，不仅受到自身原子核的束缚，同时还受到相邻原子核的吸引。因此，价电子不仅围绕自身的原子核运动，同时也出现在围绕相邻原子核的轨道上。

于是，两个相邻的原子共用一对价电子，这一对价电子组成所谓的共价键，如图 1-1 所示。在硅晶体中，每个原子都和周围的 4 个原子用共价键的形式互相紧密地联系在一起。

#### 1. 本征半导体

纯净的、不含其他杂质的半导体称为本征半导体。对于本征半导体来说，由于晶体中共价键的结合力很强，在热力学温度零开(即  $T=0\text{ K}$ ，相当于  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

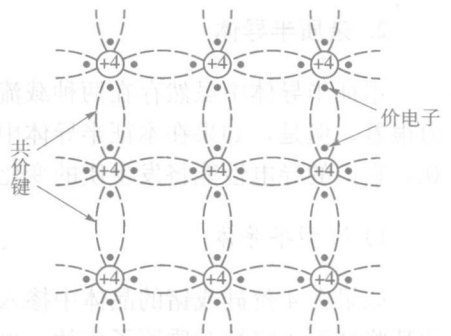


图 1-1 晶体中的共价键结构

时, 价电子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。所以, 在  $T=0\text{ K}$  时, 半导体不能导电, 如同绝缘体一样。

如果温度逐渐升高, 例如在室温条件下, 由于热激发, 就会使一些价电子获得足够的能量, 以克服共价键的束缚而成为自由电子。此时, 本征半导体具有一定的导电能力, 但因自由电子的数量很少, 因此它的导电能力比较微弱。

当一部分价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子时, 在原来的共价键中留下一个空位, 这种空位称之为空穴, 如图 1-2 所示。由于存在这样的空位, 附近共价键中的电子就比较容易进来填补, 而在附近的共价键中留下一个新的空位, 其他地方的电子又有可能来填补后一个空位。从效果上看, 这种共有电子的填补运动, 相当于带正电荷的空穴在运动一样。为了与自由电子的运动区别, 称之为空穴运动, 并将空穴看成为带正电的载流子。

由此可见, 半导体中存在着两种载流子: 带负电的自由电子和带正电的空穴。在本征半导体中, 自由电子和空穴总是成对地出现, 成为电子-空穴对, 因此两种载流子的浓度是相等的, 分别用  $n$  和  $p$  表示电子和空穴的浓度, 则  $n=p$ 。由于物质的运动, 半导体中的电子-空穴对不断地产生, 同时当电子与空穴相遇时又因为复合而使电子-空穴对消失。但电子与空穴复合时会释放出能量, 因此在一定温度下, 上述产生和复合两种运动达到了平衡, 使电子-空穴对的浓度一定。可以证明, 本征半导体中载流子的浓度, 除与半导体材料本身的性质有关以外, 还与温度密切相关, 而且随着温度的升高, 基本上按指数规律增加。因此, 本征半导体载流子的浓度与温度密切相关。

半导体的电阻率与载流子的浓度有关, 浓度愈大则电阻率愈小。半导体器件的性能随环境温度变化, 通常认为是一种缺点, 因为这将使电子电路的工作不恒定, 对应用不利, 需加以克服。但是, 利用半导体电阻率对温度变化的敏感性, 可以用来制成热敏电阻, 供温度的检测、控制和补偿之用。

同理, 半导体受到光能辐射时, 也可激发出自由电子和空穴, 使在动态平衡情况下的载流子密度增加, 从而降低它的电阻率。利用这种性能可以制成光敏电阻, 用来作为光的检测器件。

## 2. 杂质半导体

本征半导体中虽然存在两种载流子, 但因本征载流子的浓度很低, 所以总的来说导电能力很差。但是, 如果在本征半导体中掺入某种特定的杂质, 成为杂质半导体后, 情况就会改观, 它们的导电性能将发生质的变化。

### 1) N 型半导体

如果在 4 价硅或锗的晶体中掺入少量的 5 价杂质元素, 如磷、锑、砷等, 则原来晶格中的某些硅原子将被杂质原子代替。由于杂质原子的最外层有 5 个价电子, 因此它与周围 4 个硅(或锗)原子组成共价键时多余一个电子。这个电子不受共价键的束缚, 而只受自身原子核

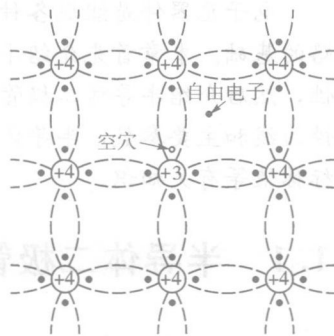


图 1-2 本征半导体中的自由电子和空穴



的吸引。这种束缚力比较微弱，在室温下很容易成为自由电子，如图 1-3 所示。在这种杂质半导体中，电子的浓度将大大高于空穴的浓度，即  $n \gg p$ 。因为主要依靠电子导电，故称为电子型半导体或 N 型半导体。N 型半导体中的电子称为多数载流子(简称多子)，而其中的空穴称为少数载流子(简称少子)。

## 2) P 型半导体

如在硅(或锗)的晶体中掺入少量的 3 价杂质元素，如硼、镓、铟等，此时杂质原子的最外层只有 3 个价电子，当它和周围的硅(或锗)原子组成共价键时，因缺少一个电子，在晶体中便产生一个空位，当相邻共价键上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，而原来原子的共价键则因缺少一个电子，形成了空穴，如图 1-4 所示。因此，在这种杂质半导体中，空穴的浓度将比电子的浓度高得多，即  $p \gg n$ ，因而主要依靠空穴导电，所以称为空穴型半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中，多数载流子是空穴，而少数载流子是电子。

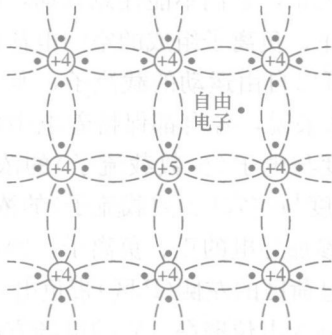


图 1-3 N 型半导体的结构

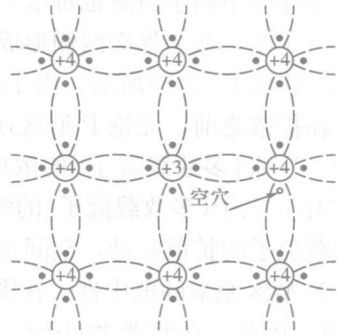


图 1-4 P 型半导体的结构

在杂质半导体中，多数载流子的浓度主要取决于掺入的杂质浓度；而少数载流子的浓度主要取决于温度。

对于杂质半导体来说，无论是 N 型或 P 型半导体，从总体上看，仍然保持着电中性。以后，为简单起见，通常只画出其中的正离子和等量的自由电子来表示 N 型半导体；同样，只画出负离子和等量的空穴来表示 P 型半导体，分别如图 1-5(a)和图 1-5(b)所示。

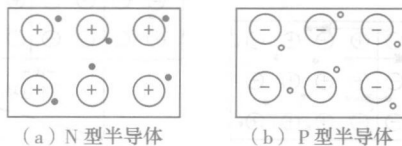


图 1-5 杂质半导体的简化表示法

总之，在本征半导体中掺入杂质以后，导电性能将大大改善。例如，在 4 价的硅中掺入 1/1 000 000 的 3 价杂质硼后，在室温时的电阻率与本征半导体相比，将下降到 1/500 000，可见导电能力大大提高了。当然，仅仅提高导电能力不是最终目的，因为导体的导电能力更强。杂质半导体的奇妙之处在于，掺入不同性质、不同浓度的杂质，并使 P 型半导体和 N