




普通高等教育“十二五”创新型规划教材

Dipin Dianzi
Xianlu Fenxi Jichu

低频电子线路
分析基础

■ 主编 何其贵

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TV



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

Dipin Dianzi Xianlu Fenxi Jichu

低频电子线路 分析基础

■ 主 编 何其贵
 ■ 副主编 钟美玲 余春平 姜余发
 ■ 主 审 廖 芳


北京理工大学出版社
 BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书从工程应用的实际出发,突出实用性及对学生基本能力的培养,系统地介绍了现代低频电子线路的基本概念、电子线路分析及工程计算的基本理论和方法。全书共十二章,主要内容包括电子技术的发展与应用、常用半导体器件基础、低频小信号放大电路、集成运算放大器、负反馈放大电路、正弦信号的产生和波形变换、低频功率放大器、直流稳压电源、可控硅电路及技能训练等。每章后配有本章小结和思考与练习题,便于读者巩固所学理论知识,有利于实践操作能力和创新能力的提高。

本书可作为高等院校电子、电气、自动化、计算机、防雷技术等有关专业的教材或参考书,也可作为自学者、科技人员参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

低频电子线路分析基础 / 何其贵主编. --北京:北京理工大学出版社, 2010.8

ISBN 978 - 7 - 5640 - 3621 - 8

I. ①低… II. ①何… III. ①低频—电子线路—电路分析—高等学校:技术学校—教材 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 156263 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京慧美印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 15.25

字 数 / 286 千字

责任编辑 / 胡 静

版 次 / 2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

王玲玲

印 数 / 1 ~ 2000 册

责任校对 / 王 丹

定 价 / 36.00 元

责任印制 / 边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前言

Preface

本教材是结合作者多年的教学改革和实践经验，以培养高素质、具备综合工作能力的人才为出发点编写而成的。

本书从工程应用的实际出发，突出实用性，围绕对学生基本能力和专业核心技能的培养，重点讲述低频电子线路的基本理论、电路分析及工程计算的基本方法；技能训练遵循从点到面，突出对学生创新能力的培养。

作为教材或教学参考书，既要符合科学技术发展的需要，又应满足培养学生分析问题和解决问题能力的需求。为达到上述要求，本教材主要有如下创新。

(1) 内容组织：重点讲述“方法”，而不是各种各样的复杂线路，更没有繁琐的数学推导，力求为学生提供独立分析和设计电子线路的“工具”。

(2) 讲述方法：对问题的解答，重在思路分析，使学生明白其来龙去脉，培养学生独立解决问题的能力。

(3) 文字叙述：力求做到言简意赅，便于读者自学。

(4) 实训安排：从单元电路到综合设计，有利于学生创新能力的提高。

当然，上述这些考虑是否能够真正实现，还有待于教学实践的检验。

本教材建议学时为 100 ~ 120 学时，其中理论教学为 60 ~ 70 学时，实践教学为 40 ~ 50 学时。

本教材由何其贵副教授担任主编，钟美铃、姜余发、余春平老师担任副主编，黄鹏飞、章立文、余丽萍、钟先芳、程越等老师参与了编写。其中第七、第八章由何其贵老师编写；第二章由钟美铃老师编写；第四、第五章由余春平老师编写；第六章由姜余发老师编写；第三章由黄鹏飞老师编写；第一、第九章由章立文老师编写；第十章由余丽萍老师编写；第十一章由钟先芳老师编写；第十二章由程越老师编写；廖芳教授担任了本书的主审工作。

在本书编写与整理过程中，得到了兄弟院校许多教授、专家及同事的大力支持和帮助，在此，向他们表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促、编者水平有限，书中难免会有错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编者

目 录

Contents

第一章 概述	1
1.1 电子技术发展简史	1
1.2 现代电子技术的应用	2
1.3 模拟信号与模拟电路	3
本章小结	4
思考与练习题	4
第二章 常用半导体器件基础	5
2.1 半导体基础知识	5
2.1.1 本征半导体	6
2.1.2 杂质半导体	7
2.1.3 PN结	8
2.2 晶体二极管	9
2.2.1 晶体二极管的结构和符号	9
2.2.2 晶体二极管的特性和主要参数	10
2.2.3 晶体二极管的等效电路	12
2.2.4 稳压二极管	13
2.2.5 其他常用二极管简介	14
2.3 双极型晶体三极管	16
2.3.1 晶体三极管的结构和符号	16
2.3.2 晶体三极管的主要参数	17
2.3.3 三极管的放大性能	19
2.3.4 常用三极管简介	22
2.4 单极型场效应管	24
2.4.1 场效应管的结构和符号	24

2.4.2	场效应管的主要参数	24
2.4.3	场效应管的放大性能	25
2.5	可控硅	30
	本章小结	32
	思考与练习题	33
第三章	低频小信号放大电路	35
3.1	放大的概念和放大电路的主要性能指标	35
3.1.1	放大的基本概念	35
3.1.2	放大电路的性能指标	36
3.2	晶体三极管放大电路的基本形式	39
3.3	基本放大电路的分析	42
3.3.1	静态分析	43
3.3.2	动态分析	45
3.4	基本放大电路的频率响应	52
3.4.1	共射放大电路的频率响应	52
3.4.2	放大电路频率响应的改善	54
3.5	放大电路静态工作点的稳定分析	54
3.5.1	静态工作点不稳定的原因	55
3.5.2	典型的静态工作点稳定电路	55
3.6	场效应管放大电路	59
3.6.1	场效应管放大电路的特点	59
3.6.2	场效应管放大电路的基本组态	60
3.6.3	场效应管放大电路分析	60
3.6.4	共漏极放大电路——源极输出器	62
3.7	多级放大电路	63
3.7.1	阻容耦合放大电路	64
3.7.2	直接耦合放大电路	66
3.7.3	差动放大电路	68
	本章小结	73
	思考与练习题	74
第四章	集成运算放大器	78
4.1	集成电路介绍	78

4.2	集成运算放大电路概述	79
4.2.1	理想集成运算放大电路	79
4.2.2	集成运算放大器的电压传输特性	80
4.2.3	集成运算放大器的工作状态	81
4.2.4	集成运算放大器的主要性能指标	82
4.3	集成运算放大器的基本应用	84
4.3.1	同相比例运算电路	84
4.3.2	反相输入放大电路	85
4.3.3	加法运算与减法运算	86
4.3.4	积分运算与微分运算	87
4.3.5	电压比较器	88
4.4	集成运算放大器的使用	91
4.4.1	使用时必做的工作	91
4.4.2	集成运算放大器的保护措施	93
4.4.3	输出电压与输出电流的扩展	94
	本章小结	96
	思考与练习题	97
第五章	负反馈放大电路	100
5.1	反馈放大电路的基本结构及类型	100
5.1.1	反馈放大电路的基本组成及基本关系式	100
5.1.2	负反馈放大电路的基本类型及判断	102
5.2	负反馈对放大器性能的影响	106
5.2.1	稳定放大倍数	106
5.2.2	减小非线性失真和扩展通频带	107
5.2.3	改变输入和输出电阻	109
5.3	负反馈的正确选用与稳定性	110
5.3.1	负反馈的正确选用	110
5.3.2	负反馈放大电路的稳定性	112
5.4	深度负反馈放大电路的特点及估算	113
	本章小结	115
	思考与练习题	116
第六章	正弦信号的产生和波形变换	120

6.1	正弦波振荡电路	120
6.1.1	概述	120
6.1.2	RC 正弦波振荡电路	123
6.1.3	LC 正弦波振荡电路	127
6.1.4	石英晶体正弦波振荡电路	131
6.2	波形变换电路	134
6.2.1	矩形波发生电路	134
6.2.2	三角波发生电路	136
6.2.3	锯齿波发生电路	137
	本章小结	138
	思考与练习题	138
第七章	低频功率放大器	141
7.1	低频功率放大器的概述	141
7.1.1	低频功率放大电路的基本要求	141
7.1.2	低频功率放大电路的分类	142
7.1.3	低频功率放大电路的分析方法	144
7.2	互补对称式功率放大器	145
7.2.1	OTL 互补对称电路	146
7.2.2	OCL 互补对称电路	149
7.3	集成功率放大电路	150
7.3.1	集成功率放大器 LM386 简介	150
7.3.2	集成功率放大器 LM386 的应用	151
	本章小结	152
	思考与练习题	153
第八章	直流稳压电源	154
8.1	直流稳压电源的基本组成	154
8.2	整流滤波电路	155
8.2.1	单相桥式整流电路	155
8.2.2	滤波电路	157
8.3	硅稳压管稳压电路	159
8.3.1	稳压电路的主要性能指标	159
8.3.2	硅稳压管的伏安特性	160

8.3.3	硅稳压管稳压电路	161
8.4	串联型直流稳压电路	162
8.4.1	电路组成与工作原理	163
8.4.2	输出电压的调节范围	164
8.4.3	调整管的选择	165
8.4.4	串联反馈型稳压电源保护电路	166
8.5	集成稳压电路	167
8.5.1	三端集成稳压器的组成	168
8.5.2	三端集成稳压器的主要参数	169
8.5.3	三端集成稳压器的应用	170
8.6	开关型稳压电路	172
8.6.1	开关型稳压电路的特点及分类	172
8.6.2	开关型稳压电路的组成和工作原理	173
	本章小结	174
	思考与练习题	175
第九章	可控硅电路	178
9.1	可控硅工作原理	178
9.1.1	单向可控硅工作原理	178
9.1.2	双向可控硅工作原理	180
9.1.3	可控硅的辨别与检测	181
9.2	可控硅的典型应用电路	182
9.2.1	可控硅整流电路	182
9.2.2	可控硅的保护电路	185
9.2.3	可控硅应用电路实例	187
	本章小结	189
	思考与练习题	189
第十章	基础技能训练	190
技能训练一	晶体管的测试	190
技能训练二	晶体管共射极单管放大器	194
技能训练三	场效应管放大器	197
技能训练四	差动放大器	199
技能训练五	集成运算放大器指标测试	202

技能训练六	集成运算放大电路的基本应用(一)	203
技能训练七	负反馈放大电路	206
技能训练八	RC 正弦波振荡器	209
技能训练九	集成运算放大电路的基本应用(二)	210
技能训练十	OTL 互补对称低频功率放大器	213
技能训练十一	串联型晶体管稳压电源	215
第十一章	创新技能实训	218
任务一	具有放大环节串联型稳压电源的制作与调试	218
任务二	充电器的设计、制作与调试	220
任务三	RC 正弦波振荡器的制作与调试	222
任务四	乙类互补对称式功率放大电路的制作与调试	223
第十二章	课程综合技能实训	226
选题一	函数发生器设计	226
选题二	串联型直流稳压电源设计	227
选题三	小功率开关直流稳压电源设计	227
选题四	音响放大器设计	229
参考文献		231

第一章 概述



内容提要 ○○○

内容提要:本章简要介绍了电子技术发展的历史,现代电子技术的广泛应用,详细叙述了模拟信号与模拟电路的概念,初步了解电子技术。

电子技术是从19世纪末开始发展起来的一门与电子器件有关的理论与技术,经过一个多世纪的发展,人们已经掌握了大量的相关理论知识。电子类产品已经逐渐融入了人们的生活,为人类社会的发展起到了巨大的推动作用。

1.1 电子技术发展简史

1883年,美国著名发明家爱迪生发现了热电子效应,又称为爱迪生效应。这个效应虽然没有得到爱迪生本人的重视,但是英国电器工程师弗莱明根据这一现象研制出了世界上第一只电子管,也就是人们后来所说的真空二极电子管。1906年美国发明家弗雷斯特的真空二极管的基础上,通过在阴极和阳极之间添加第三个电极——栅极,制作出了具有放大作用的真空三极电子管,该电子管的出现在电子技术上具有划时代的意义,为后来的电子通信、广播、电视、计算机等技术的发展铺平了道路。

电子管的出现无疑对电子技术的发展起到了巨大的推动作用,但是电子管本身有许多无法改进的缺点,如体积大、能耗大、寿命短以及制造工艺复杂等。于是在1947年,人们研制出了第一只晶体管,晶体管是由硅和锗等半导体材料制成的,它的出现在电子技术的发展史上具有划时代的意义,奠定了现代电子技术的基础,使人们走进了硅文明时代。相对于电子管,晶体管具有可靠性高、寿命长、体积小、功耗低、适合批量生产等许多优点。

目前晶体管已经在电子产品当中得到了广泛的应用,而人们经常说的二极管、



三极管等,一般都是由半导体材料制成的,属于晶体管的范畴。

晶体管的出现使得电子设备的功耗和体积极大地减小,并极大地提高了它们的可靠性,但是随着时代的发展,晶体管依然满足不了人们的需要。于是,科学家们经过不断的努力,于1958年成功地将晶体管和与之配套的电子元件集成到一块半导体晶片上,一小块晶片成为能完成一定功能的单元电路,这就是最早的集成电路。它的出现使电子设备变得更小,功耗更低,速度更快。20世纪60年代初,集成电路处于“小规模集成”阶段,每个半导体芯片上有不到100个元器件。从1966年开始,进入“中规模集成”阶段,每个芯片上有100~1000个元器件。1969年进入“大规模集成”阶段,每个芯片上的元器件达到10000个左右。到了20世纪80年代以后,集成电路更进一步跨入“超大规模集成”阶段,每个芯片上的元器件多达几十万甚至上百万个。1960—1980年的20年间,芯片上元器件的“集成度”增加了10万倍,每年递增率约为200%。目前的超大规模集成电路,由于新的制作工艺的引入,可以在几十平方毫米的芯片上集成几百万个元器件。至此,电子技术已经进入“微电子”时代,极大地促进了先进科学技术的发展。集成电路的发明对人类社会的贡献是极其巨大的,为现代信息技术奠定了基础。

为了进一步减小器件体积、提高器件性能,人们不断寻找先进电子材料。现在已经发现的先进的电子材料有仿生智能材料、纳米材料、先进复合材料、高温超导材料和生物电子材料等,先进的电子材料正应用于新型电子器件的制造之中。

新型电子材料的问世,将使电子技术向更高层次发展,这些材料将使今后的电子器件更加功能化、智能化、结构功能一体化,使电子器件尺寸进一步缩小,功能更全,运算速度更快,为分子器件、单电子器件、分子计算机和生物计算机打下基础。

1.2 现代电子技术的应用

随着生产和科学技术发展的需要,目前电子技术已经应用于人类生产和生活的各个方面,大到大型机械设备的控制及人造卫星的发射,小到人们身边的手机和音乐播放器,都和电子技术紧密相关。而这其中最具有代表性的产品就是电子计算机。从1946年第一台电子计算机诞生以来,已经经历了电子管、晶体管、集成电路及超大规模集成电路四代,每秒运算速度已达10亿次。特别是20世纪70年代微型计算机问世以来,由于它价廉、方便、可靠、小巧,极大地加快了电子计算机的普及速度。现在正在研究开发的第五代人工智能计算机和第六代生物计算机,它们不依靠程序工作,而依靠人工智能工作。如果能够研制成功,将可能对人类的历史产生极为重要的影响。

同时,电子技术当中的数字控制和数字测量也在不断发展,应用日益广泛。数字控制机床和“自适应”数字控制机床相继出现。目前利用电子计算机对几十台乃

至上百台数字控制机床进行集中控制也已经实现。在工业上晶体闸流管(即可控硅)也获得广泛应用,它主要应用于大电流场合下的开关控制,是实现无触点弱电控制强电的首选器件,这一应用使半导体电子技术的触角延伸到了强电领域。

随着生产和科学技术发展的需要,电子技术得到了高度发展和广泛应用,如空间电子技术、生物医学电子技术、信息处理和遥感技术、微波应用等。它对于社会生产力的发展,也起着变革性的推动作用。

一个国家的电子技术水准是体现该国现代化水平的一个重要标志,同时,电子工业也是实现现代化的重要物质技术基础。

1.3 模拟信号与模拟电路

1. 模拟信号

模拟信号分布于自然界的各个角落,它是指用连续变化的物理量表示的信息,其信号的幅度,或频率,或相位随时间作连续变化。如每天的温度变化、广播电视的声音信号或图像信号等。电学上的模拟信号主要是指幅度和相位都连续电信号,此信号可以被模拟电路进行各种运算和处理,如放大、相加、滤波等。

当模拟信号采用连续变化的电磁波来表示时,电磁波本身既是信号载体,同时也是传输介质;而当模拟信号采用连续变化的信号电压来表示时,它一般通过传统的模拟信号传输线路(如电话网、有线电视网)来传输。

模拟信号的特点如下。

(1)函数的取值为无限多个。

(2)当图像信息和声音信息改变时,信号的波形也改变,即模拟信号待传播的信息包含在它的波形之中(信息变化规律直接反映在模拟信号的幅度、频率和相位的变化上)。

2. 模拟电路

模拟电路(Analog Circuit)是指处理模拟信号的电子电路。模拟信号是时间和幅度都连续的信号,也就是说模拟电路是处理线性变化信号的电路。

在集成电路出现以前,几乎所有的电路都属于模拟电路,比如由电子管、三极管、电阻和电容就可以组成一个模拟电路。

现代电子产品已经发展到以数字处理为主的电路控制方式了,但数字信号提供的只是一些参数值,具体的实现还需要模拟电路来实现。现在模拟电路应用得最多的是功率放大、信号采集等。



本章小结 <<<



(1) 电子元器件的发展经历了从电子管、晶体管、中小规模集成电路到超大规模的集成电路的过程。

(2) 电子技术不仅可以对模拟信号进行处理,还可以应用在大型设备的控制等场合。

(3) 在电学当中,模拟信号是指时间和幅度都连续变化的电信号。模拟电路是指由电容、电阻、晶体管等组成的模拟电路集成在一起,用来处理模拟信号的集成电路。

(4) 常见的模拟电路包括基本放大电路、集成运算放大电路以及振荡电路等。



思考与练习题 <<<



1. 简述电子技术的发展历程。
2. 什么是模拟信号? 什么是模拟电路?
3. 根据自己的实际生活经验,举例说明电子技术在生活当中的具体应用。

第二章 常用半导体器件基础



内容提要 ○○○

内容提要:本章主要介绍二极管、三极管、场效应管和可控硅等常用半导体器件的基本结构、性能参数及各自的工作特性,为进一步学习半导体器件的工程应用打下基础。

2.1 半导体基础知识

自然界中存在的各种物体对电流的传导有着不同的阻碍作用,物体对电流传导的能力叫做物体的导电性能。按物体导电性能的好坏可将它们划分为:导体、半导体和绝缘体。我们通常把电阻系数小、导电性能好的物体叫做导体,如银、铜、铝等;电阻系数大,导电性能很差的物体叫绝缘体,如陶瓷、橡胶、塑料等;导电性能介于导体和绝缘体之间的物体叫做半导体,如硅、锗、硒、氧化铜等。其中,硅和锗是用来制造半导体器件最多的材料。

半导体之所以能引起人们注意并广泛用来制造半导体器件,其主要原因并不在于其导电能力介于导体与绝缘体之间,而是其导电能力在不同条件下有很大的差异,主要表现在以下几个方面。

(1)热敏性:半导体的导电能力对温度非常敏感,当环境温度升高时,其导电能力极大地增强。利用光热敏性可制成热敏元件,例如自动控制电路中的热敏电阻。

(2)光敏性:半导体的导电能力随光照的不同而不同,当光照增强时,其导电能力极大地增强。利用光敏性可制成光敏元件,例如自动控制电路中用的光电二极管、光电三极管等。

(3)杂敏性:半导体导电能力受杂质影响极大,称为杂敏性。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。利用杂敏性,可以制造出各种不同性能、不同用途的半导体器件,如二极管、三极管、晶闸管等。



2.1.1 本征半导体

本征半导体是一种完全纯净的、不含杂质的半导体单晶,如图 2.1 所示,又称为纯净半导体,因为它的纯度可以达到 99.999 999 9%,常称为“九个 9”。它在物理结构上为共价键,每个原子通过共价键和相邻的 4 个原子紧密地联系着,即每个价电子为相邻的两个原子所共有,这样每个原子的最外层都具有 8 个电子,呈稳定结构,如图 2.2 所示。在热力学温度零度和没有外界激发时,本征半导体中虽然具有大量的价电子,但没有自由电子,此时半导体呈电中性。

当温度升高或受到光的照射时,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(也称热激发)。因热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,如图 2.3 所示。

游离的部分自由电子也可能回到空穴中去,称为复合。

在一定温度下本征激发和复合会达到动态平衡,此时,载流子浓度一定,且自由电子数和空穴数相等。

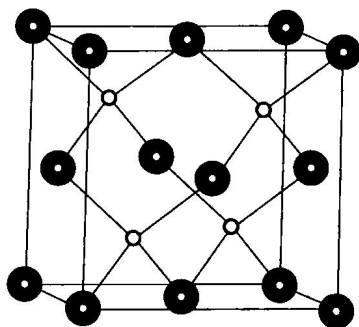


图 2.1 晶体结构图

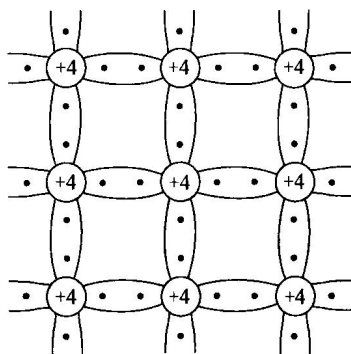


图 2.2 共价键结构

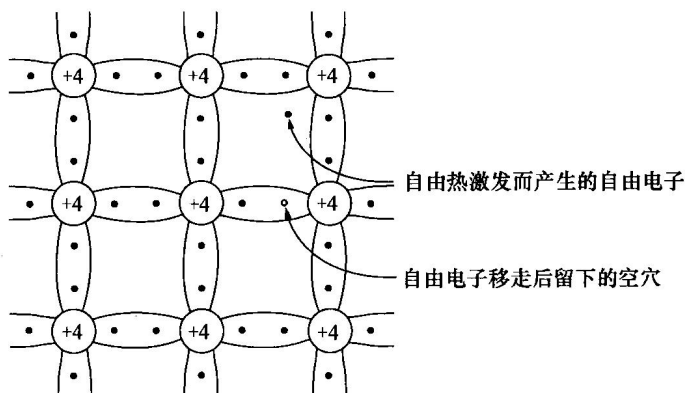


图 2.3 本征激发产生电子-空穴对示意图

2.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入微量的杂质,就形成了杂质半导体。杂质半导体是半导体器件的基本材料。杂质元素价电子的不同,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,半导体可以分 N 型半导体和 P 型半导体。

1. N 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量五价元素(如磷)后,就形成 N 型半导体,如图 2.4 所示。由于每掺入一个五价的磷原子,同相邻 4 个硅(或锗)原子组成共价键时,有一个多余的价电子不能构成共价键,这个价电子就变成了自由电子。因此在这种掺杂半导体中,自由电子的数量极大地增加,成为参与导电的主要载流子(简称多子),而空穴是少数载流子(简称少子),由于自由电子数远远大于空穴数,导电以电子导电为主,故此类半导体亦被称为电子型半导体,即 N 型半导体。

2. P 型半导体

在本征半导体硅(或锗)中掺入微量三价元素如硼(或镉)等,就形成 P 型半导体,如图 2.5 所示。由于每掺入一个三价的硼原子,同相邻 4 个硅(或锗)原子组成共价键时,就会因为缺少一个电子而提供一个空穴,因此在这种掺杂半导体中,空穴的数量极大地增加,成为参与导电的多子,而空穴是少子,由于空穴数远远大于自由电子数,导电以空穴导电为主,故此类半导体亦被称为空穴型半导体,即 P 型半导体。

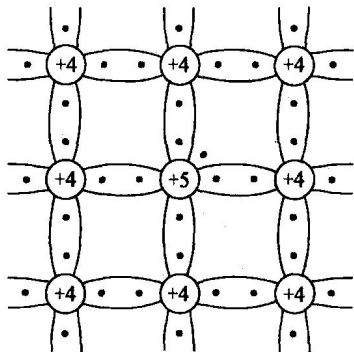


图 2.4 N 型半导体共价键结构

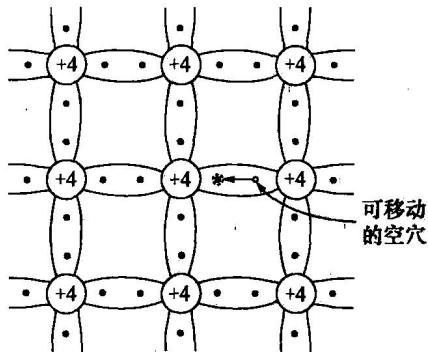


图 2.5 P 型半导体共价键结构

需要提醒的是:无论是本征半导体还是杂质半导体,它们参与导电的载流子均包括带正电的空穴和带负电的电子,杂质半导体的导电性能与其掺杂浓度和温度有关,掺杂浓度越大、温度越高,其多子载流子数目越多,因而导电能力越强。