



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术基础 (第2版)

■ 曾令琴 主编 ■ 徐力平 赵胜会 何红军 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

013064032

TN710.4
02-2

普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

模拟电子技术基础

(第2版)

曾令琴 主编

徐力平 赵胜会 何红军 副主编



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1671846

TN710.4

02-2

580480810

内 容 简 介

本教材以学习单元划分:第1单元主要介绍电子技术中常用的半导体器件及其应用;第2单元以三种基本放大电路为基础,先介绍了低频小信号放大电路的组成、工作原理、分析过程,后分析了放大电路的频率响应放大等知识及其应用;第3单元以集成运算放大电路的组成引入了差动放大电路、反馈电路及功放电路,着重介绍了集成运放的理想化条件、性能指标和传输特性等;第4单元以IC技术引入了集成运放线性应用的各种运算电路、信号处理电路和集成运放非线性应用的比较器、振荡器等;第5单元以稳压电路的基本环节引入各部分内容,突出介绍了三端集成稳压器的应用及其使用注意事项;第6单元是模拟电子技术的应用与实践篇,详细介绍了各种常用电子线路元器件的型号、作用、选择及检测,并给出三个课程设计题目,其涵盖了模拟电子技术综合应用的知识和能力,强调了应用型人才能力的培养,具有一定的应用性、实用性和创新性培养价值。

本教材实用性强,不仅可作为应用型人才的本科电类各专业教材,同时也适用于相关工程技术人员参阅和学习。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术基础 / 曾令琴主编. —2版. —北京:电子工业出版社, 2013.7
普通高等教育“十二五”规划教材. 电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-20698-6

I. ①模… II. ①曾… 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(2013)第130797号

策划编辑:陈晓莉

责任编辑:陈晓莉

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:北京市李史山胶印厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:13.5 字数:360千字

印 次:2013年7月第1次印刷

定 价:34.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前言

“模拟电子技术”是高等学校电类各专业的重要专业基础课和平台课程，其显著特点是强调“动手能力”和工程素质的培养。但长期以来，由于高等学校现有《模拟电子技术》教材理论性较强，工程实际应用内容匮乏，课程内容本身比较抽象，使很多学生初学时就感到不适应，戏称“模拟电子”为“魔又因电”。目前 IC 行业的发展，模拟电子技术教学方面的问题及人才缺乏的情况尤为凸显，企业也对“模拟电子技术”教学和教改呼声越来越高。这一方面反映了“模拟电子技术”的教学对动手能力和实践应用的要求比较高，另一方面也反映了高校“模拟电子技术”课程体系和教学改革以及人才培养的缺陷和不足，造成大学教育与社会需求严重脱节。

为使课程内容更加丰富、不断充实和更新，跟上日益发展的科学体系，作者根据教育部“高等学校教学质量与教学改革工程”的主要精神，结合目前“模拟电子技术”课程教学实际情况，及该课程在电子工程中的作用，编写了这本以任务导入式新型的《模拟电子技术》立体化教材。本次教材修订，吸收了几年来使用学校教师们的建议，立足于开辟一个教学新的切入点，以任务驱动方式引入课程教学的知识体系和实践教学环节，降低理论深度，以通俗易懂的语言让学生了解课程中的每一部分教学内容在实际应用中的“不可替代”性，从而引起学生学习模拟电子技术的兴趣，促进模拟电子技术课程体系的建设和教学改革。

我们编写的《模拟电子技术基础》按章节划分为 6 个模块：第 1 单元半导体器件，主要介绍电子技术中常用的半导体器件及其应用；第 2 单元放大电路，以 3 种基本组态的放大电路为基础，先后介绍低频小信号放大电路的组成、工作原理及其分析过程，放大电路的频率响应等知识及其应用；第 3 单元集成运算放大器，以其基本组成引入差动放大电路、反馈的概念及功放电路，介绍了集成运算放大器的性能指标、理想化条件及传输特性；第 4 单元集成运算放大器的应用，以 IC 技术引入教学内容，重点介绍线性应用的运算电路和信号处理电路以及非线性应用的比较器、振荡器等知识和应用；第 5 单元直流稳压电源，以稳压电路的基本环节引入各部分相关内容，突出介绍了三端集成稳压器的应用及其使用注意事项；第 6 单元模拟电子技术应用与实践，结合课程应用实际的需求，首先详细介绍了各种常用电子线路元器件的型号、作用、选择及检测，强调了培养学生的实际操作能力，充分考虑到培养学生应用能力的循序渐进过程，其次给出 3 个课程设计题目，这些题目均涵盖了模拟电子技术综合应用的知识和能力，具有一定的应用性、实用性和创新性培养价值。

本书配有教学多媒体课，需要的老师可登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>)

注册下载。

本书由河南理工大学万方科技学院曾令琴副教授担任主编，郑州大学徐力平副教授、三峡大学赵胜会副教授和温州大学城市学院何红军担任副主编，黄河水利职业技术学院丁燕、河南理工大学万方科技学院原立格参编。全书由曾令琴副教授统稿。

一本教材建设的标准和评价，如果能让使用过该教材并毕业数年后的学生依然感受到这门课的必要性和对工作有所帮助，这将对作者最大的褒奖！

作者

2013年5月

目 录

第1单元 常用半导体器件	1
任务导入	1
理论知识	1
1.1 半导体基础知识	1
1.1.1 半导体的独特性能	2
1.1.2 本征半导体	2
1.1.3 半导体的导电机理	4
1.1.4 杂质半导体	4
1.1.5 PN 结及其单向导电性	6
1.1.6 PN 结的反向击穿问题	8
思考与练习	8
1.2 半导体二极管	9
1.2.1 二极管的结构类型	9
1.2.2 二极管的伏安特性	10
1.2.3 二极管的主要技术参数	11
1.2.4 二极管的应用	11
1.2.5 特殊二极管	13
思考与练习	16
1.3 双极型半导体三极管 (BJT)	17
1.3.1 BJT 的结构组成	17
1.3.2 BJT 的电流放大作用	18
1.3.3 BJT 的外部特性	19
1.3.4 BJT 的主要技术参数	21
1.3.5 复合晶体管	21
思考与练习	22
1.4 单极型半导体三极管 (FET)	22
1.4.1 单极型三极管概述	22
1.4.2 场效应管的基本结构组成	23
1.4.3 场效应管的工作原理	24
1.4.4 场效应管的主要技术参数	25
1.4.5 场效应管的使用注意事项	25
思考与练习	26
1.5 晶闸管 (SCR)	26
1.5.1 晶闸管的结构组成	26
1.5.2 晶闸管的工作原理	27
1.5.3 晶闸管的伏安特性	28
1.5.4 晶闸管的主要技术参数	29

1.5.5 晶闸管的使用注意事项	31
思考与练习	31
能力训练	31
1.1 二极管、三极管及晶闸管的检测方法	31
1.2 电路仿真 EWB 应用训练	34
第1单元 习题	38
第2单元 低频小信号放大电路	41
任务导入	41
理论知识	42
2.1 小信号单级放大电路的基本组态	42
2.2 共射组态的单级放大电路	42
2.2.1 共射放大电路的组成原则	42
2.2.2 共射放大电路各部分的作用	43
2.2.3 共射放大电路的工作原理	44
2.2.4 共射放大电路的静态分析	44
2.2.5 分压式偏置的共发射放大电路	47
思考与练习	51
2.3 共集电极组态的单级放大电路	51
2.3.1 共集电极放大电路的组成	51
2.3.2 静态工作点	51
2.3.3 动态分析	52
2.3.4 电路特点及其应用实例	53
思考与练习	53
2.4 共基极组态的单级放大电路	54
2.4.1 共基极放大电路的组成	54
2.4.2 静态分析	54
2.4.3 动态分析	54
思考与练习	55
2.5 三种组态放大电路性能比较	55
思考与练习	55
2.6 单极型管的单级放大电路	56
2.6.1 自给偏压电路	56
2.6.2 场效应管的微变等效电路	57
2.6.3 共源极放大电路	58
2.6.4 共漏极放大电路	58
思考与练习	59
2.7 多级放大电路	59
2.7.1 多级放大电路的组成	59
2.7.2 多级放大电路的级间耦合方式	60
2.7.3 多级放大电路的性能指标估算	61
思考与练习	62

2.8 放大电路的频率响应	62
2.8.1 频率响应的基本概念	62
2.8.2 放大电路的频率特性	62
2.8.3 波特图	64
2.8.4 多级放大电路的频率响应	65
思考与练习	66
能力训练	66
2.1 常用电子仪器的使用	66
2.2 分压式偏置共射放大电路静态工作点的调试	69
2.3 电子电路识图、读图训练	71
一、电路图中元器件的识别	71
二、单元电路的认识和读图	73
第2单元 习题	74
第3单元 集成运算放大器	76
任务导入	76
理论知识	76
3.1 集成运算放大器概述	76
3.2 差动放大电路	78
3.2.1 直接耦合放大电路需要解决的问题	78
3.2.2 差动放大电路的组成	79
3.2.3 差动放大电路的工作原理	79
3.2.4 差动放大电路的类型	80
3.2.5 恒流源式差动放大电路	80
思考与练习	82
3.3 复合管放大电路	82
思考与练习	83
3.4 功率放大电路	83
3.4.1 功率放大器的分类	83
3.4.2 功率放大器的特点及主要技术要求	83
3.4.3 功率放大电路中的交越失真	84
3.4.4 甲乙类互补对称功率放大电路	85
3.4.5 采用复合管的互补对称功率放大电路	88
3.4.6 功放管的安全使用	89
思考与练习	91
3.5 放大电路的负反馈	91
3.5.1 反馈的基本概念	91
3.5.2 负反馈的基本类型及其判别	92
3.5.3 负反馈对放大电路性能的影响	93
思考与练习	94
3.6 集成运算放大器及其理想电路模型	94
3.6.1 集成运算放大器的分类	94

3.6.2 集成运放引脚功能及元器件特点	95
3.6.3 集成运算放大器选择及主要性能指标	96
3.6.4 集成运算放大器的理想化条件及传输特性	97
思考与练习	98
能力训练	98
3.1 电子电路识图、读图训练二	98
一、较为简单的电子电路识、读图	98
二、稍微复杂的电子电路识、读图	99
实践环节	102
3.2 六管超外差收音机的组装实训	102
一、实训内容	102
二、六管超外差式收音机的组成及电路原理	102
第3单元 习题	112
第4单元 集成运算放大器的应用	114
任务导入	114
理论知识	115
4.1 集成运放的运算应用电路	115
4.1.1 反相比例运算电路	115
4.1.2 同相比例运算电路	116
4.1.3 反相求和运算电路	116
4.1.4 同相求和运算电路	117
4.1.5 双端输入减法运算电路	117
4.1.6 微分运算电路	118
4.1.7 积分运算电路	118
4.1.8 集成运算放大器的应用举例	119
思考与练习	120
4.2 集成运算放大器在信号处理方面的应用	121
4.2.1 有源滤波器	121
4.2.2 仪用放大器	124
思考与练习	125
4.3 集成运算放大器的非线性应用	125
4.3.1 集成运放应用在非线性区的特点	125
4.3.2 电压比较器	125
4.3.3 文氏桥正弦波振荡器	128
4.3.4 石英晶体振荡器	131
思考与练习	134
4.4 集成运算放大器的选择、使用和保护	134
4.4.1 集成运算放大器的选择	134
4.4.2 集成运算放大器的使用要点	135
4.4.3 集成运算放大器的保护	136

思考与练习	137
能力训练	137
4.1 音频功率放大器 LM386 的应用	137
一、实验准备	138
二、测试步骤	138
三、实验报告	138
四、思考题	138
4.2 集成运放应用电路的识图、读图方法	139
第 4 单元 习题	142
第 5 单元 直流稳压电源	144
任务导入	144
理论知识	144
5.1 小功率整流滤波电路	144
5.1.1 整流电路	144
5.1.2 滤波电路	147
思考与练习	150
5.2 稳压电路	150
5.2.1 直流稳压电源的主要性能指标	150
5.2.2 串联型稳压电路	151
5.2.3 并联型稳压电路	152
5.2.4 开关稳压电路	152
5.2.5 调整管的选择	153
5.2.6 稳压电路的过载保护	154
思考与练习	155
5.3 集成稳压器	155
5.3.1 固定输出的三端集成稳压器	155
5.3.2 可调输出三端集成稳压器	158
5.3.3 使用三端集成稳压器时应注意的事项	160
思考与练习	161
能力训练	161
5.1 整流、滤波和稳压电路的实验	161
一、实验目的	161
二、实验原理	161
三、实验步骤	163
四、实验前的预习及实验要求	163
五、实验报告	163
六、实验思考题	163
5.2 实用电子电路的识图、读图练习	164
5.3 直流稳压电源印制电路板的自制、焊接与调试	165
一、实验目的	165
二、实验电路	165

三、实验电路的技术指标	166
四、实验内容	166
五、简易自制印制电路板技术	167
六、元器件	168
七、报告要求	168
八、思考题	168
第5单元 习题	168
第6单元 模拟电子技术应用与实践	170
任务导入	170
能力训练	170
6.1 电子技术基本技能综合训练	170
一、训练的目的	170
二、训练要求	170
三、训练步骤	171
四、电子元器件的基本知识和检测方法	171
6.2 水温控制系统设计	196
一、设计任务	196
二、设计要求	197
三、温度控制系统基本原理	197
四、温度控制系统设计指导	197
五、调试要点和注意事项	198
六、仪器设备及元器件	199
七、设计报告要求	199
6.3 函数信号发生器的设计	199
一、设计任务	199
二、设计要求	199
三、函数信号发生器的基本原理	200
四、函数信号发生器的设计指导	200
五、参数选择和注意事项	202
六、设计报告要求	203
七、思考题	203
6.4 简易电子琴的设计	203
一、设计任务	203
二、设计要求	203
三、预习要求	204
四、仪器设备与元器件	204
五、设计报告要求	204
六、注意事项	204
参考文献	205

第1单元 常用半导体器件



任务导入

半导体器件是在 20 世纪 50 年代初发展起来的电子器件, 由于具有体积小、重量轻、使用寿命长、输入功率小、功率转换效率高等突出优点, 已广泛应用于家电、汽车、计算机及工控技术等众多领域, 被人们视为现代电子技术的基础。

图 1.1 所示的实用电子线路板, 上面除了集成电路, 还包含大量的二极管、三极管和场效应管等半导体器件。为了正确和有效地运用这些常用半导体器件, 相关工程技术人员必须对这些器件的结构原理及其外引线表现出来的电压与电流关系及其性能等有一个起码的认识。只有认识和掌握了作为电子线路核心元件的各种半导体器件的结构、性能、工作原理和应用特点, 才能够深入分析电子电路的工作原理, 正确选择和合理使用各种半导体器件。

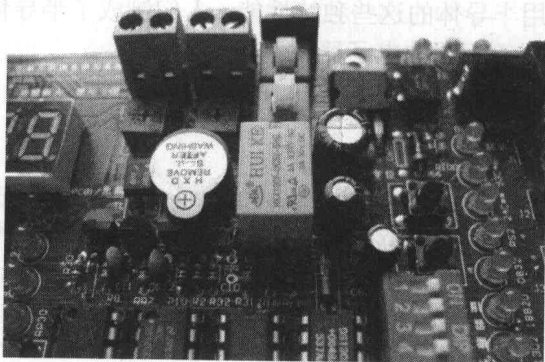


图 1.1 实用电子线路板

因此, 第一单元的任务就是让学习者在了解半导体的特殊性能、PN 结的形成及其单向导电性的基础上, 进一步认识晶体二极管、晶体三极管、晶闸管这些半导体器件。通过对这些半导体器件的结构、工作原理、特性曲线及特性参数等方面的剖析, 使学习者在知识能力上能够深刻理解 PN 结的形成及其单向导电性, 掌握二极管、三极管、晶闸管等半导体器件的结构特点和工作原理; 在技术能力上掌握正确检测半导体器件的好坏及极性的判别方法, 并能看懂由这些半导体器件作为核心元件构成的简单电子线路图, 初步掌握一些 EWB 电路仿真技能。



理论知识

1.1 半导体基础知识

半导体的导电性能虽然介于导体和绝缘体之间, 但是却能够引起人们的极大兴趣, 这与半导体材料自身存在的一些独特性能是分不开的。同一块半导体, 在不同外界情况下其导电能力会有非常大的差别, 有时像地地道道的导体, 有时又像典型的绝缘体。利用半导体的这种独特

性能，人们研制出各种类型的电子器件。

1.1.1 半导体的独特性能

例如，有些半导体对温度的反应特别灵敏：当周围环境温度增高时，其导电能力显著增加；当温度下降时，其导电能力随之明显下降。利用半导体的这种**热敏性**，人们可以把它制成自动控制用的热敏元件，如市场上销售的双金属片、铜热电阻、铂热电阻、热电偶及半导体热敏电阻等。其中以半导体热敏电阻为探测元件的温度传感器应用非常广泛。

还有一些半导体对光照敏感。当有光线照射在这些半导体上时，它们表现出像导体一样很强的导电能力，当无光照时，它们变得又像绝缘体那样不导电。利用半导体的这种**光敏性**，人们又研制出各种自动控制用的光电元器件，如基于半导体光电效应的光电转换传感器，广泛应用于精密测量、光通信、计算技术、摄像、夜视、遥感、制导、机器人、质量检查、安全报警，以及其他测量和控制装置中的半导体光敏元件等。

半导体材料除了上述的热敏性和光敏性，还有一个更显著的特点——**掺杂性**：在纯净的半导体中若掺入微量的某种杂质元素后，例如在单晶硅中掺入百万分之一的三价元素硼，单晶硅的电阻率可由大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{m}$ 减小到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{m}$ 左右，即导电能力增至未掺杂之前的几十万乃至几百万倍。正是利用半导体的这些独特性能，人们制成了半导体二极管、稳压管、晶体三极管、场效应管及晶闸管等不同的电子器件。

1.1.2 本征半导体

在半导体物质中，目前用得最多的材料是硅和锗。物质的化学性质通常是由原子结构中的最外层电子数目决定的，半导体的导电性质当然也取决于最外层电子数目。我们把物质结构中的最外层电子称为价电子。在硅和锗的原子结构中，最外层电子的数目都是 4 个，因此被称为四价元素，如图 1.2 所示。图中的“+4”表示原子核所带正电荷量与核外电子所带负电荷量相等，整个原子呈电中性。

天然的硅和锗材料是不能制成半导体器件的，必须经过高度提纯工艺将它们提炼成纯净的单晶体。单晶体的晶格结构完全对称，原子排列得非常整齐，故常称为晶体，就是我们所讲的**本征半导体**，其平面示意图如图 1.3 所示。图示单晶硅中每个原子的最外层价电子，都两两成为相邻两个原子所共有的价电子，每一对价电子同时受到两个相邻原子核的吸引而被紧紧地束缚在一起，组成了**共价键结构**。图中套住两两价电子的虚线环表示共价键，单晶体中的各原子靠共价键的作用紧密联系在一起。

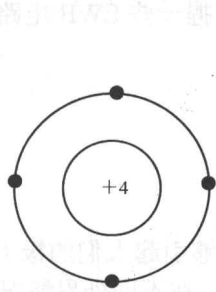


图 1.2 硅和锗原子的简化模型

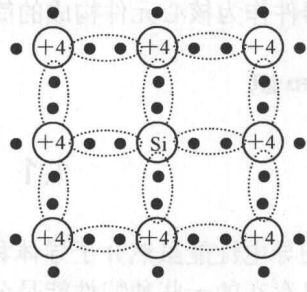


图 1.3 单晶硅共价键结构示意图

常温下单晶体中的束缚价电子很难脱离共价键成为自由电子,因此本征半导体中的自由电子数目很少,导电能力很弱。从共价键整体结构来看,每个单晶硅原子外面都有8个价电子,很像绝缘体的“稳定”结构。也正是由于这种结构,本征半导体中的价电子没有足够的能量是不易脱离共价键的。

实际上,共价键中的8个价电子并不像绝缘体中的价电子那样被原子核束缚得很紧。当温度升高或受到光照后,共价键中的一些价电子就会由热运动加剧而获得足够的能量,挣脱共价键的束缚游离到晶体中成为可移动的**自由电子**,价电子挣脱共价键束缚成为自由电子的同时,会在共价键上留下一个空位,这个空位称为**空穴**。我们把由于共价键的破裂而形成的自由电子和空穴称为电子—空穴对,并且把这种由于光照、辐射、温度的影响而产生电子—空穴对的现象称为**本征激发**,如图1.4所示。

本征激发下,产生的是自由电子载流子,如果有外电场作用,自由电子载流子就成为导电的因素。自由电子载流子带负电,逆电场方向定向移动形成电流。

本征激发下,失去价电子的定域原子则由于少电子而带正电,这些带正电的离子是定域的,不能参与导电。

在本征激发现象出现的同时,受温度的影响,共价键中的另外一些价电子在获得足够能量后也会挣脱原子核的束缚,但它们不是游离到晶体的空间成为自由电子,而是“跳进”相邻原子由本征激发而产生的空穴中,当这些价电子填补空穴的同时,它们也会留下一些新的空穴,这些新的空穴又会被邻近共价键中的另外一些价电子来填补上,这些价电子仍会留下新的空位让相邻价电子来填补……如此就会形成一个价电子定向连续的填补运动,如图1.5所示。

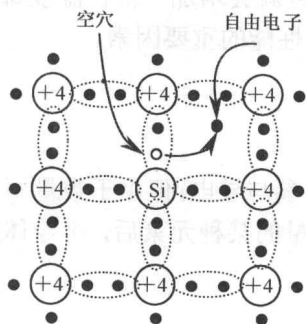


图1.4 本征激发现象

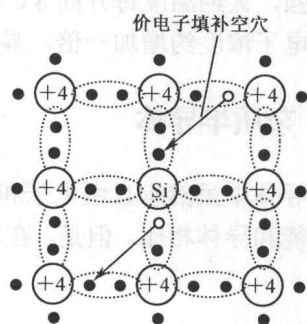


图1.5 复合现象

这种由价电子填补空穴的现象称为**复合**。复合不同于本征激发,本征激发的主要导电方式是完全脱离了共价键的自由电子载流子逆着电场方向而形成的定向迁移,而复合运动的导电方式是**空穴载流子**的定向迁移,空穴载流子带正电,顺电场方向定向运动形成电流。虽然填补空穴的价电子也是逆着电场力的方向作定向迁移,但它们填补空穴的运动始终在共价键中进行。为区别于本征激发下自由电子载流子的运动,我们把价电子填补空穴看成是空穴顺着电场方向而形成的定向迁移。注意:由于运动具有相对性,共价键中价电子依次“跳进”空穴进行填补,也可看作空穴依次反方向移动,所以人们虚拟出了顺电场方向定向迁移的空穴载流子运动,实际上空穴本身是不能移动的。这就好比电影院有位子的人依次向前挪动,但看起来就像空座位依次向后移动,实际上座位并没有挪动一样。

1.1.3 半导体的导电机理

在金属导体中存在大量的自由电子,这些自由电子是一种带电的微粒,在外电场作用下定向移动形成电流。即金属导体内部只有自由电子一种载流子参与导电。

半导体由于本征激发而产生自由电子载流子,由复合运动产生空穴载流子,因此,半导体中同时参与导电的通常有两种载流子,这一点正是半导体区别于金属导体在导电机理上的本质差别,同时也是半导体导电方式的独特之处。

“本征激发”和“复合”在一定温度下同时进行并维持动态平衡,因此电子和空穴两种载流子的浓度基本不变,当温度升高时,本征激发产生的电子—空穴对增多,同时“复合”的机会也增加了,当温度不再继续升高时,最后两种载流子的运动仍会达到一个新的平衡状态。温度越高,两种载流子的数目就会越多,半导体的导电性能也就越好。即半导体中载流子的数目与温度的高低、光照强弱等因素有关。在温度接近绝对零度(即 -273°C)时,共价键中的电子被束缚得很紧无法产生自由电子载流子和空穴载流子,相当于绝缘体;在 25°C 常温下,虽然少数价电子能够挣脱共价键的束缚而产生自由电子载流子和空穴载流子,但此时这两种载流子的数目仅为每立方米单晶硅总电子数的 10^{13} 分之一,显然,常温下半导体的导电能力仍然很低。

半导体具有光敏性和热敏性,当受到光照或外界温度显著升高的影响时,半导体中会有较多的价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子载流子和空穴载流子,从而使半导体的导电能力较为明显的增强,大约温度每升高 8°C ,单晶硅中的电子浓度就会增加一倍;温度每升高 12°C ,单晶锗中的电子浓度约增加一倍,显然温度是影响半导体性能的重要因素。

1.1.4 杂质半导体

本征半导体中虽然有自由电子和空穴两种载流子同时参与导电,但由于数量不多因而导电能力仍然不能和导体相比。但是,在本征半导体中掺入微量的某种元素后,半导体的导电能力将大大增强。

1. N型半导体

在硅(或锗)的晶体中掺入少量的五价元素磷(或砷、锑),本征半导体中的共价键结构基本不变,只是共价键结构中某些位置上的硅(或锗)原子被磷原子所取代。当这些掺杂磷原子与相邻的四个硅原子组成共价键时,多余的一个价电子就会挤出共价键结构,使得磷原子核对它的吸引束缚作用变得很弱,常温下这个多余的电子比其他共价键上的电子更容易挣脱共价键的束缚而成为自由电子,而失去一个电子的杂质原子则成为不能移动的带正电离子,因为这个杂质正电离子是定域的,因此不能参与导电。这种杂质半导体的结构如图 1.6 所示。

掺入五价元素的杂质半导体中,除了热运动使一些共价键破裂而产生自由电子载流子和空穴载流子外,一个杂质原子本身又多出一个自由电子,虽然还是存在两种载流子,但自由电子载流子的浓度远大于空穴载流子的浓度。室温情况下,当本征硅中的杂质数量等于硅原子数量的 10^{-6} 时,自由电子载流子的数目将增加几十万倍,使半导体的导电性能显著提高。值得注意的是,杂质元素中多余价电子挣脱原子核束缚成为自由电子后,在它们原来的位置上并不能

形成空穴,因此掺入五价元素的杂质半导体中,自由电子载流子的数量相对空穴载流子多得多,故把自由电子称为**多数载流子**,简称多子;而把空穴载流子称为**少数载流子**,简称少子。由于这种杂质半导体中的导电主流是带负电的自由电子载流子,因此我们把这种多电子的杂质半导体称为**电子型半导体**。习惯上又把电子型半导体常称为**N型半导体**。

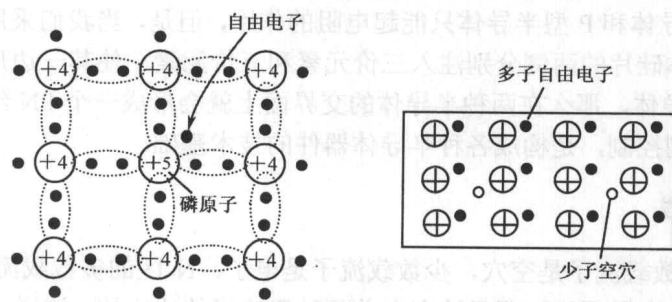


图 1.6 N 型半导体晶体结构

2. P 型半导体

在硅或锗的晶体内掺入少量三价杂质元素硼(或镓、铟),因硼原子只有三个价电子,它与周围四个硅(或锗)原子组成共价键时,因少一个电子而在共价键中形成一个空位。常温下,相邻硅(或锗)原子共价键中的价电子受到热振动或在其他激发条件下获得能量时,极易“跳入填补”这些空位,这样就在硅(或锗)原子的共价键中失去一个电子而产生一个空穴,硼原子则因接收这些价电子而成为不能移动的**带负电离子**。这种杂质半导体的结构如图 1.7 所示。

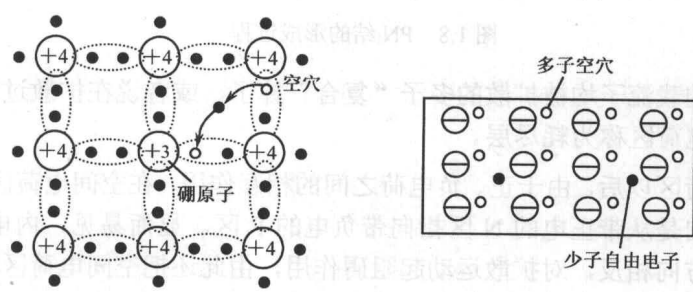


图 1.7 P 型半导体晶体结构

从上述结构图可看出,掺入三价元素硼的杂质半导体中,空穴载流子的数量大大于自由电子载流子,因此空穴载流子称为**多数载流子**,由本征激发而产生的自由电子载流子数量相对极少称为**少数载流子**。这种杂质半导体由于空穴数量大大于自由电子数量而被人们称为**空穴型半导体**,在电子技术中习惯称为**P型半导体**。一般情况下,杂质半导体中的多数载流子的数量可达到少数载流子数量的 10^{10} 倍或更多,因此,杂质半导体比本征半导体的导电能力将强上几十万倍。

需要指出的是:不论是 N 型半导体还是 P 型半导体,虽然都有一种载流子占多数,但多出的载流子数目与杂质离子所带电荷数目始终相平衡,即整块杂质半导体上既没有失电子,也没有得电子,整个晶体仍然呈电中性。

1.1.5 PN 结及其单向导电性

杂质半导体的导电能力虽然比本征半导体大大增强，但它们并不能称为半导体器件。在电子技术中，PN 结是一切半导体器件的“元概念”和技术起始点。

单一的 N 型半导体和 P 型半导体只能起电阻的作用，但是，当我们采用不同的掺杂工艺，在一块完整的半导体硅片的两侧分别注入三价元素和五价元素，使其一边形成 N 型半导体，另一边形成 P 型半导体，那么在两种半导体的交界面上就会形成一个 PN 结，PN 结能够使半导体的导电性能受到控制，是构成各种半导体器件的技术基础。

1. PN 结的形成

由于 P 区的多数载流子是空穴，少数载流子是电子；N 区的多数载流子是电子，少数载流子是空穴，因此在交界面两侧明显地存在着两种载流子的浓度差。这样，P 区的多子空穴载流子和 N 区的多子自由电子载流子都要从浓度高的区域向浓度低的区域扩散。扩散的结果使 N 区的多子复合掉了 P 区多子，在 P 区和 N 区的交界处只留下了干净的带电杂质离子区，这些带电离子不能任意移动，形成了**空间电荷区**，如图 1.8 所示。

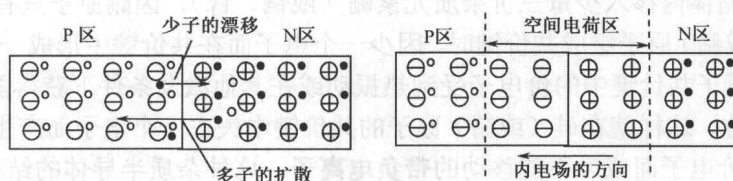


图 1.8 PN 结的形成过程

空间电荷区中的载流子均被扩散的多子“复合”掉了，或者说在扩散过程中被消耗尽了，因此有时又把空间电荷区称为**耗尽层**。

出现了空间电荷区以后，由于正、负电荷之间的相互作用，在空间电荷区内形成了一个内电场，内电场的方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区。显而易见，内电场的方向与多数载流子扩散运动的方向相反，对扩散运动起阻碍作用，由此还把空间电荷区称为**阻挡层**。

在 PN 结形成的过程中，扩散运动越强，复合掉的多子数量越多，空间电荷区也就越宽。另外，空间电荷区的内电场又对扩散运动起阻挡作用，而对 N 区和 P 区中的少子漂移起推动作用，少子的漂移运动方向正好与扩散运动的方向相反。从 N 区漂移到 P 区的空穴补充了原来交界面上 P 区所失去的空穴，从 P 区漂移到 N 区的电子补充了原来交界面上 N 区所失去的电子，即漂移运动的结果是使空间电荷区变窄。

在 PN 结形成的过程中，多子的扩散和少子的漂移既相互联系、又相互矛盾。初始阶段，扩散运动占优势，随着扩散运动的进行，空间电荷区不断加宽，内电场逐步加强；内电场的加强又阻碍了扩散运动，使得多子的扩散逐步减弱。扩散运动的减弱显然伴随着漂移运动的不断加强。最后，当扩散运动和漂移运动达到动态平衡时，将形成一个稳定的空间电荷区，这个相对稳定的空间电荷区就叫做**PN 结**。

空间电荷区内基本不存在导电的载流子，因此导电率很低而相当于介质。在 PN 结两侧的