



21世纪 21世纪高职高专系列教材

# 模拟电子技术

中国机械工业教育协会 组编



机械工业出版社  
China Machine Press

TN 710/7  
21世纪高职高专系列教材

# 模拟电子技术

中国机械工业教育协会 组编

|     |          |     |     |
|-----|----------|-----|-----|
| 主 编 | 甘肃工业大学   | 何如聪 |     |
| 副主编 | 大连理工大学   | 周日强 |     |
| 参 编 | 甘肃工业大学   | 何如聪 | 刘 梅 |
|     | 大连理工大学   | 周日强 |     |
|     | 南昌大学     | 沈志勤 |     |
|     | 洛阳工学院    | 孙立功 |     |
|     | 日照职业技术学院 | 牟盛勇 |     |
| 主 审 | 山东工程学院   | 房华玲 |     |



机械工业出版社

本书是根据高等职业技术教学要求编写的,系 21 世纪高职高专系列教材之一。编写原则以应用为目的,以必需、够用为度;取材突出了基本概念、基本原理和基本分析方法,以讲清概念、强化应用为重点。

全书共 6 章,内容包括半导体二极管及其电路分析,基本放大电路,集成运算放大器及其线性应用,信号发生电路,直流稳压电源。每章附有思考题和习题,以便于教学实践。

本书可作为高等职业技术学院,高等学校专科,职工大学,业余大学,夜大学,成教学院等大专层次电气信息类专业《模拟电子技术》课程的教材,亦可作为工程技术人员的自学用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/中国机械工业教育协会组编. —北京:机械工业出版社, 2001.6

21 世纪高职高专系列教材

ISBN 7-111-08402-0

I. 模... II. 中... III. 模拟电路-高等学校:技术学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 035934 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:郑文斌 版式设计:张世琴 责任校对:张媛

封面设计:姚毅 责任印制:路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 8 月第 1 版·第 2 次印刷

890mm×1240mm A5·7.25 印张·212 千字

4 001—7 000 册

定价:14.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

## 21 世纪高职高专系列教材编委会名单

**编委会主任** 中国机械工业教育协会 郝广发

**编委会副主任** (单位按笔画排)

山东工程学院 仪垂杰

大连理工大学 唐志宏

天津大学 周志刚

甘肃工业大学 路文江

江苏理工大学 杨继昌

成都航空职业技术学院 陈玉华

机械工业出版社 陈瑞藻 (常务)

沈阳工业大学 李荣德

河北工业大学 檀润华

武汉船舶职业技术学院 郭江平

金华职业技术学院 余党军

**编委会委员** (单位按笔画排)

广东白云职业技术学院 谢瀚华

山东省职业技术教育师资培训中心

邹培明

上海电机技术高等专科学校 徐余法

天津中德职业技术学院 李大卫

天津理工学院职业技术学院 沙洪均

日照职业技术学院 李连业

北方交通大学职业技术学院 佟立本

辽宁工学院职业技术学院 李居参

包头职业技术学院 郑刚

北京科技大学职业技术学院 马德青

北京建设职工大学 常莲

北京海淀走读大学 成运花

江苏理工大学 吴向阳

合肥联合大学 杨久志

同济大学 孙章

机械工业出版社 李超群

余茂祚 (常务)

沈阳建筑工程学院 王宝金

佳木斯大学职业技术学院 王跃国

河北工业大学 范顺成

哈尔滨理工大学工业技术学院 线恒录

洛阳大学 吴锐

洛阳工学院职业技术学院 李德顺

南昌大学 肖玉梅

厦门大学 朱立秒

湖北工学院高等职业技术学院 吴振彪

彭城职业大学 陈嘉莉

燕山大学 刘德有

# 序

1999年6月中共中央国务院召开第三次全国教育工作会议,作出了“关于深化教育改革,全面推进素质教育的决定”的重大决策,强调教育在综合国力的形成中处于基础地位,坚持实施科教兴国的战略。决定中明确提出要大力发展高等职业教育,培养一大批具有必备的理论知识和较强的实践能力,适应生产、建设、管理、服务第一线急需的高等技术应用性专门人才。为此,教育部召开了关于加强高职高专教学工作会议,进一步明确了高职高专是以培养技术应用性专门人才为根本任务;以适应社会需要为目标;以培养技术应用能力为主线设计学生的知识、能力、素质结构和培养方案;以“应用”为主旨和特征来构建课程和教学内容体系;高职高专的专业设置要体现地区、行业经济和社会发展的需要,即用人的需求;教材可以“一纲多本”,形成有特色的高职高专教材系列。

“教书育人,教材先行”,教育离不开教材。为了贯彻中共中央国务院以及教育部关于高职高专人才培养目标及教材建设的总体要求,中国机械工业教育协会、机械工业出版社组织全国部分有高职高专教学经验的职业技术学院、普通高等学校编写了这套《21世纪高职高专系列教材》。教材首批80余本(书目附书后)已陆续出版发行。

本套教材是根据高中毕业3年制(总学时1600~1800)、兼顾2年制(总学时1100~1200)的高职高专教学计划需要编写的。在内容上突出了基础理论知识的应用和实践能力的培养。基础理论课以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点;专业课加强了针对性和实用性,强化了实践教学。为了扩大使用面,在内容的取舍上也考虑到电大、职大、业大、函大等教育的教学、自学需要。

每类专业的教材在内容安排和体系上是有机联系、相互衔接的,但每本教材又有各自的独立性。因此各地区院校可根据自己的教学特点进行选择使用。

为了提高质量,真正编写出有显著特色的21世纪高职高专系列教

材，组织编写队伍时，采取专门办高职的院校与办高职的普通高等院校相互协作编写并交叉审稿，以便实践教学和理论教学能相互渗透。

机械工业出版社是我国成立最早、规模最大的科技出版社之一，在教材编辑出版方面有雄厚的实力和丰富的经验，出版了一大批适用于全国研究生、大学本科、专科、中专、职工培训等各种层次的成套系列教材，在国内享有很高的声誉。我们相信这套教材也一定能成为具有我国特色的、适合 21 世纪高职高专教育特点的系列教材。

中国机械工业教育协会

# 前 言

由于本课程是电子技术方面的入门性的技术基础课,所以编写者在从事多年高专、高职和成人教育教学实践及经验的基础上,紧扣编者以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点指导思想,取材强化了基本概念、基本原理和基本分析方法。在教材内容的处理上:

(1) 在编写元器件的工作原理的基础上,立足于应用。

(2) 掌握基本概念、基本原理和基本分析方法内容的编写。以讲清概念为主,没有过多的理论推导。

(3) 以集成电路为主线,但保留了分立电路和集成电路共同基础的重要内容。在第1章、第2章讲完基本电路后,即进入模拟集成电路,结合集成运放的构成、工作原理及应用,讲解差动放大电路、多级放大电路、负反馈电路、电流源电路及功放电路,使读者对集成运放有一个较完整的概念,而且掌握了其他基本单元电路的分析和应用,可使读者建立一个初步的电子系统概念,体现了少而精。

全书共6章,总课时为50学时。除可作为高职教学用书外,也可作为成人高校、高专、业大、职大、函大等大专层次电气信息类专业的教学用书和自学者及工程技术人员的自学用书。

参加编写的院校及人员有:

第1章 甘肃工业大学 何如聪;第2章 甘肃工业大学 刘梅;第3章 大连理工大学 周日强;第4章 南昌大学 沈志勤;第5章 洛阳工学院 孙立功;第6章 日照职业技术学院 牟盛勇。

本书由甘肃工业大学何如聪教授任主编,由他提出编写大纲;大连理工大学周日强副教授任副主编,和主编共同负责全书的组织、修改和统稿工作。山东工程学院房华玲副教授任主审,她认真、仔细地审阅了全稿,并提出了许多宝贵的修改意见,对此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中得到了参编院校的配合。甘肃工业大学教务处

高教研究室、甘肃工业大学电气工程与信息工程学院为本书的编写提供了人力、物力的大力支持；甘肃工业大学曾玲春副教授、张和良副教授对本书编写的指导思想和大纲也提供了许多建议；在此一并表示感谢和敬意。

由于编写者的水平有限，加之时间紧迫，书中难免有错误和不妥之处，敬请专家和同行、使用本教材的师生及其他读者给予批评指正。

编 者



# 目 录

## 序 前言

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 第 1 章 半导体二极管及其电路分析 .....       | 1  |
| 1.1 半导体的基本知识 .....             | 1  |
| 1.1.1 本征半导体 .....              | 1  |
| 1.1.2 杂质半导体 .....              | 4  |
| 1.1.3 PN 结及其单向导电性 .....        | 5  |
| 1.1.4 PN 结的电容效应 .....          | 8  |
| 1.2 半导体二极管 .....               | 9  |
| 1.2.1 半导体二极管的结构 .....          | 9  |
| 1.2.2 半导体二极管的伏安特性及二极管方程 .....  | 10 |
| 1.2.3 半导体二极管的主要参数 .....        | 12 |
| 1.2.4 特殊二极管 .....              | 13 |
| 1.3 半导体二极管电路的模型（等效电路）分析法 ..... | 17 |
| 1.3.1 理想二极管模型 .....            | 18 |
| 1.3.2 二极管的恒压源模型 .....          | 18 |
| 1.3.3 二极管的微变信号（交流小信号）模型 .....  | 19 |
| 1.4 半导体二极管的应用 .....            | 21 |
| 1.4.1 半导体二极管小功率整流电路 .....      | 21 |
| 1.4.2 二极管限幅电路 .....            | 27 |
| 1.4.3 直流低电压稳压电路 .....          | 28 |
| 复习思考题与习题 .....                 | 29 |
| 第 2 章 基本放大电路 .....             | 32 |
| 2.1 半导体三极管 .....               | 32 |
| 2.1.1 半导体三极管的基本结构 .....        | 32 |
| 2.1.2 半导体三极管中的电流控制作用 .....     | 33 |

|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 2.1.3 半导体三极管的特性曲线 .....               | 37         |
| 2.1.4 半导体三极管的主要参数 .....               | 40         |
| 2.1.5 半导体三极管的型号及选用原则 .....            | 42         |
| <b>2.2 半导体三极管放大电路的组成和工作原理 .....</b>   | <b>44</b>  |
| 2.2.1 放大电路的基本概念 .....                 | 44         |
| 2.2.2 基本放大电路的组成原则和工作原理 .....          | 44         |
| 2.2.3 放大电路的主要性能指标 .....               | 47         |
| <b>2.3 半导体放大电路的分析方法 .....</b>         | <b>49</b>  |
| 2.3.1 放大电路的特点 .....                   | 49         |
| 2.3.2 放大电路的分析方法 .....                 | 50         |
| 2.3.3 图解分析法 .....                     | 50         |
| 2.3.4 等效电路分析法 .....                   | 57         |
| <b>2.4 其他基本放大电路 .....</b>             | <b>65</b>  |
| 2.4.1 放大电路静态工作点的稳定问题 .....            | 65         |
| 2.4.2 分压式工作点稳定的共射放大电路（射极耦合偏置电路） ..... | 65         |
| 2.4.3 共集放大电路（射极输出器） .....             | 67         |
| 2.4.4 共基放大电路 .....                    | 69         |
| 2.4.5 三种半导体基本放大电路的比较 .....            | 70         |
| <b>2.5 场效应管及其放大电路 .....</b>           | <b>73</b>  |
| 2.5.1 结型场效应管（JFET） .....              | 73         |
| 2.5.2 绝缘栅型场效应管 .....                  | 77         |
| 2.5.3 场效应管的主要参数及其与双极型三极管的比较 .....     | 82         |
| 2.5.4 场效应管基本放大电路 .....                | 84         |
| <b>2.6 阻容耦合多级放大电路 .....</b>           | <b>87</b>  |
| 2.6.1 多级放大电路的耦合方式 .....               | 87         |
| 2.6.2 $RC$ 多级放大电路的分析 .....            | 89         |
| <b>2.7 放大电路的频率特性 .....</b>            | <b>91</b>  |
| 复习思考题与习题 .....                        | 93         |
| <b>第3章 集成运算放大器 .....</b>              | <b>100</b> |
| <b>3.1 集成运放的组成，封装形式和图形符号 .....</b>    | <b>100</b> |
| 3.1.1 集成运放的组成 .....                   | 100        |
| 3.1.2 集成运放的封装形式和图形符号 .....            | 101        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>3.2 集成运放的输入级——差动放大电路</b>     | 101 |
| 3.2.1 射极耦合差动放大电路                | 101 |
| 3.2.2 射极带恒流源的差动放大电路             | 108 |
| <b>3.3 集成运放偏置电路中的电流源电路</b>      | 109 |
| 3.3.1 镜像电流源                     | 109 |
| 3.3.2 微电流源                      | 110 |
| 3.3.3 多路电流源                     | 112 |
| 3.3.4 电流源用作有源负载                 | 112 |
| <b>3.4 集成运放的输出级——互补对称功率放大电路</b> | 113 |
| 3.4.1 功率放大电路的一般问题               | 113 |
| 3.4.2 乙类互补对称功率放大电路              | 114 |
| 3.4.3 甲乙类互补对称功率放大电路             | 117 |
| 3.4.4 采用复合管的互补对称功率放大电路          | 119 |
| <b>3.5 典型集成运放 F007 简介</b>       | 120 |
| 3.5.1 F007 的偏置电路                | 120 |
| 3.5.2 F007 的输入级                 | 122 |
| 3.5.3 F007 的中间级                 | 123 |
| 3.5.4 F007 的输出级                 | 123 |
| <b>3.6 集成运放的主要参数及使用注意问题</b>     | 124 |
| 3.6.1 集成运放的主要参数                 | 124 |
| 3.6.2 集成运放的选择及使用时的注意问题          | 127 |
| 复习思考题与习题                        | 128 |
| <b>第4章 集成运放的线性应用</b>            | 134 |
| <b>4.1 放大电路中的反馈</b>             | 134 |
| 4.1.1 反馈的基本概念                   | 134 |
| 4.1.2 负反馈放大电路的组态                | 138 |
| 4.1.3 负反馈放大电路闭环增益的一般表达式         | 140 |
| 4.1.4 深度负反馈条件下闭环电压增益的近似计算       | 142 |
| 4.1.5 负反馈对放大电路性能的影响             | 146 |
| <b>4.2 集成运放的线性应用</b>            | 149 |
| 4.2.1 应用的分类和应用电路的分析方法           | 149 |
| 4.2.2 运算电路                      | 151 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>4.3 有源滤波电路</b> .....       | 163 |
| 4.3.1 滤波电路的功能 .....           | 163 |
| 4.3.2 滤波电路的分类 .....           | 163 |
| 4.3.3 有源滤波器——一阶低通滤波器 .....    | 165 |
| 复习思考题与习题 .....                | 165 |
| <b>第5章 信号发生电路</b> .....       | 172 |
| <b>5.1 正弦波振荡器</b> .....       | 172 |
| 5.1.1 自激振荡的条件及电路的组成 .....     | 172 |
| 5.1.2 正弦波振荡器的常见典型电路 .....     | 174 |
| <b>5.2 非正弦波振荡器</b> .....      | 184 |
| 5.2.1 集成运放的非线性应用——电压比较器 ..... | 184 |
| 5.2.2 用电压比较器组成的非正弦波振荡器 .....  | 189 |
| 复习思考题与习题 .....                | 195 |
| <b>第6章 直流稳压电源</b> .....       | 201 |
| <b>6.1 稳压电路的工作原理</b> .....    | 201 |
| 6.1.1 组成环节 .....              | 201 |
| 6.1.2 稳压电路的工作原理 .....         | 203 |
| 6.1.3 串联型三极管稳压电路的改进 .....     | 208 |
| <b>6.2 稳压电路的性能指标</b> .....    | 209 |
| <b>6.3 稳压电路中的保护措施</b> .....   | 210 |
| <b>6.4 集成稳压电路</b> .....       | 212 |
| 复习思考题与习题 .....                | 216 |
| <b>参考文献</b> .....             | 219 |

# 第 1 章 半导体二极管及其电路分析

## 1.1 半导体的基本知识

半导体器件是由导电性能介于导体与绝缘体之间的半导体材料制造而成的。为了从电路的观点理解由半导体材料制成的半导体器件的性能，首先从物理的角度认识半导体是如何导电的。

用于制造半导体器件的半导体还具有一些特殊性质，如光敏特性、热敏特性及掺杂特性等。即当半导体受到光照或热辐射时，或在纯净半导体中掺入微量其他有用元素（称“杂质”）后，它的导电能力将有明显改善。科学家正是利用半导体的这些特性，制造出了各种各样的半导体器件和集成电路。当前硅和锗是应用最为广泛的半导体材料。

### 1.1.1 本征半导体

半导体是一种晶体结构。完全纯净、晶体结构完整的半导体叫做“本征半导体”。用于制造半导体器件的半导体都要经过半导体工艺处理制成本征半导体，如本征硅、本征锗。

硅和锗都是四价元素。它们的简化原子模型如图 1-1a 所示，最外层原子轨道上具有四个价电子。物质的化学性能是由它的价电子决定的，半导体的导电能力也与它的价电子有关。因此，价电子是我们讨论的主要对象。

在本征硅（锗）的晶体结构中，硅（锗）原子按一定规律排列，构成一定形式的空间点阵，相邻原子外层的价电子形成“共价键”结构，如图 1-1b 所示晶体结构示意图，结果使每个硅（锗）原子最外层形成拥有八个共有电子的稳定结构。处在共价键中的电子称为“束缚电子”。

1. 本征导电——电子、空穴及其导电作用 我们知道，金属导体导电是由于它的体内大量的“自由电子”在电场力作用下的定向移动

而形成电流的。因此，自由电子是金属导体中“运载电荷的载流子”（载有负电荷），而且是惟一的一种电荷载流子（简称“载流子”）。物质导电性能的好坏，决定于它内部单位体积所含载流子的数目。载流子的浓度越高，其导电率也越高。那么，本征半导体的导电机理和金属导体有何不同呢？

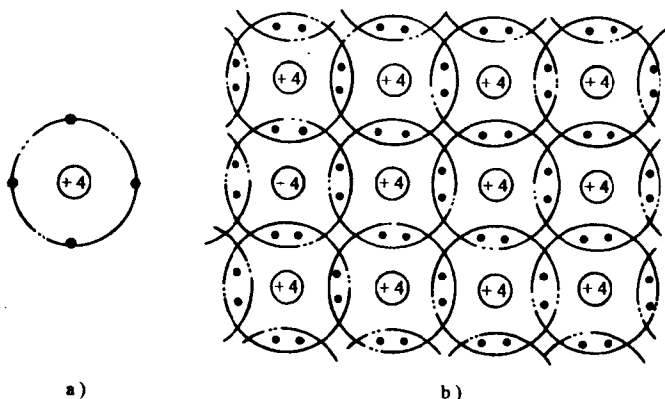


图 1-1 硅（锗）的原子结构简化模型及  
晶体结构示意图

a) 简化模型 b) 二维晶体结构

(1) 在热力学温度  $T=0\text{K}$  时，本征半导体中无载流子。由于处在共价键中的束缚电子被共价键束缚，在  $T=0\text{K}$  且无外部激发能量时，这些束缚电子不能挣脱共价键而成为自由电子，此时在本征半导体中无运载电荷的载流子，即使有外电场作用，也不会产生电流。在这种条件下，本征半导体表现为良好的绝缘体。

(2) 本征半导体受激发后产生电子、空穴对。当束缚电子在外部能量作用下获得激活能后会挣脱共价键而成为自由电子，这一现象称为“本征激发”。温度、光照和热辐射都是激活能的来源。如图 1-2 所示，显然可以发现，当某一个束缚电子被激发成为自由电子后，共价键中就会留下一个没有电子的空位，这个空位叫“空穴”，在图中用“○”表示。本征激发时，电子、空穴是成对出现的。空穴的出现是半导体

区别于导体的一个重要特性。

(3) 本征半导体中的空穴也是一种运载电荷的载流子。由于共价键中出现了空穴，使失去一个价电子的原子成为带正电荷（与电子电荷相等）不能移动的离子。在外电场作用下，邻近共价键中的价电子就会逆着电场方向填补到这个空位上，而必然在这个电子原来的位置上留下了新的空位，出现了空穴的定向迁移，即宏观上相当于一个带正电荷空穴的定向迁移，形成了“空穴电流”。因此，空穴和自由电子一样可以参与导电，也是一种载流子。不过要说明的是，空穴这种载流子的运动，实质上是共价键中束缚电子移动填补空穴的结果，如图 1-3 所示。

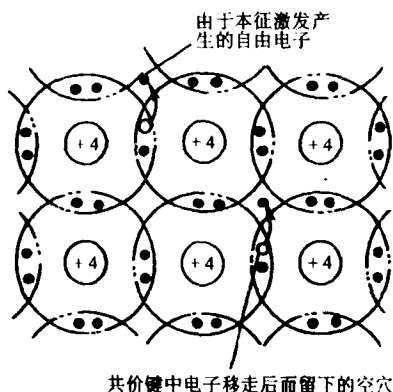


图 1-2 本征激发产生电子、空穴对

综上所述，本征半导体中存在两种运载电荷的载流子——电子和空穴。当有外加电场作用时，半导体中的电流为电子电流和空穴电流之和。在电场力作用下载流子的运动称为“漂移”，所形成的电流叫“漂移电流”。

2. 本征浓度——载流子的产生与复合 本征半导体受激发后可产生电子空穴对，叫载流子的“产生”。但电子在无规则热运动中也会与空穴相遇而填补空穴，使电子空穴对消失，这一过程叫载流子的“复合”。事实上，“产生”与“复合”是在

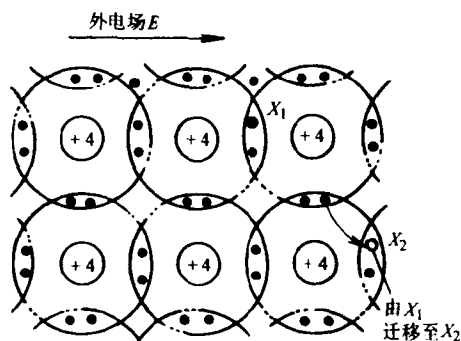


图 1-3 空穴导电

不断进行，最终产生与复合达到相对的动态平衡。在宏观上本征半导体内自由电子和空穴的浓度保持定值并且相等。但是，这个定值与温

度有关，当温度发生变化时，即在新的动态平衡状态下，保持新的定值。例如，在室温（27℃）时，硅的本征载流子浓度为  $n_i = p_i = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ ，锗的本征载流子浓度为  $n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。硅和锗的本征载流子浓度的差异是因为激活能不同所致，但都随温度的升高而迅速增加（正比于  $T^{3/2}$ ， $T$  为热力学温度）。这是半导体的另一个重要特性。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体虽然同时存在自由电子和空穴两种载流子，但数量少，导电能力差，导电率也难以按需要人为控制。如果在本征半导体中掺入微量的其他有用元素（杂质），即可使掺杂后的半导体的导电能力大大加强；并且随着杂质元素掺入量的不同，导电能力也能够加以控制。这种半导体称为“杂质半导体”。

根据掺入杂质的不同，杂质半导体分为 N 型半导体（电子型）和 P 型半导体（空穴型）两大类。

**1. N 型半导体** 在硅或锗晶体中掺入微量的五价元素，如磷（或砷、锑），则晶体点阵中某些位置上的硅原子被磷原子所取代。由于磷原子有五个价电子，它只能以其中四个价电子与相邻的硅原子组成共价键，而多余出一个价电子，如图 1-4a 所示。这个多余的价电子虽不受共价键束缚，但仍受到磷原子核的吸引而只能在磷原子的周围游弋，不过它所受到的吸引力比起共价键的束缚力要微弱得多，只要较小的激发能量就会变为自由电子。因此，半导体中的自由电子数大量增加，自由电子导电成为主流，故称 N（电子）型半导体。另一方面，由于自由电子数目的增加而导致了电子与空穴复合机会的增多，空穴浓度反而会进一步减少。所以，在 N 型半导体中，自由电子是多数载流子，空穴是少数载流子，且电子浓度近似与杂质浓度相等。

**2. P 型半导体** 在硅或锗晶体中掺入微量三价元素，如硼（或镓）。由于硼原子只有三个价电子，它与相邻硅原子构成共价键时，因缺少一个价电子而在晶体的共价键中产生了一个空穴，如图 1-4b 所示。半导体中的空穴数大量增加，空穴导电成为主流，故称 P（空穴）型半导体。因此，在 P 型半导体中，空穴是多数载流子，电子是少数载流子。



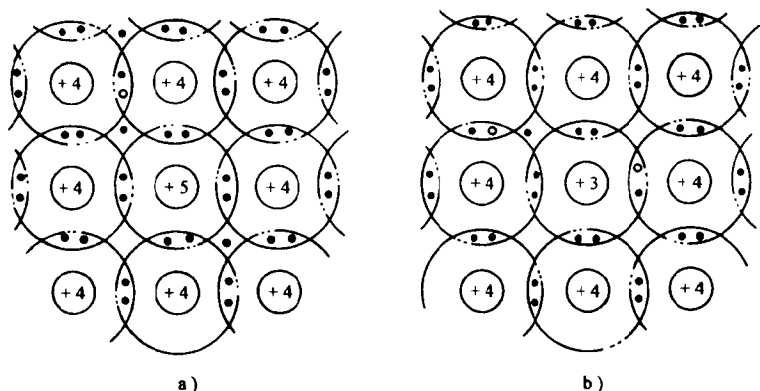


图 1-4 杂质半导体

a) N 型半导体 b) P 型半导体

应该注意到，在杂质半导体中正负电荷数是相等的，因此，杂质半导体仍然保持电中性。

### 1.1.3 PN 结及其单向导电性

1. PN 结的形成 P 型半导体和 N 型半导体紧密结合后（通过半导体工艺形成），如图 1-5 所示（图中 $\ominus$ 代表得到了一个电子的三价杂质离子， $\oplus$ 代表失去了一个电子的五价杂质离子）。在它们的交界面出现了电子和空穴的浓度差别，即 N 区内电子很多而空穴很少，P 区内空穴很多而电子很少，由于多数载流子浓度的不同，从而首先在交界处引起了电子和空穴多数载流子的扩散运动<sup>①</sup>，如图 1-5a 所示。电子和空穴都是带电的，它们扩散的结果就使 P 区和 N 区交界面附近原来保持的电中性被破坏了：P 区一边失去空穴留下不能移动的带负电荷的杂质离子 $\ominus$ ；N 区一边失去电子留下不能移动的带正电荷的杂质离子 $\oplus$ 。这些不能移动也不参与导电的带电离子称为“空间电荷”。因此，在 P 区和 N 区交界面附近形成了一个很薄的空间电荷区，如图 1-5b

① 由于浓度的不同，物质总是自然地由浓度高的地方向浓度低的地方运动的物理现象。