

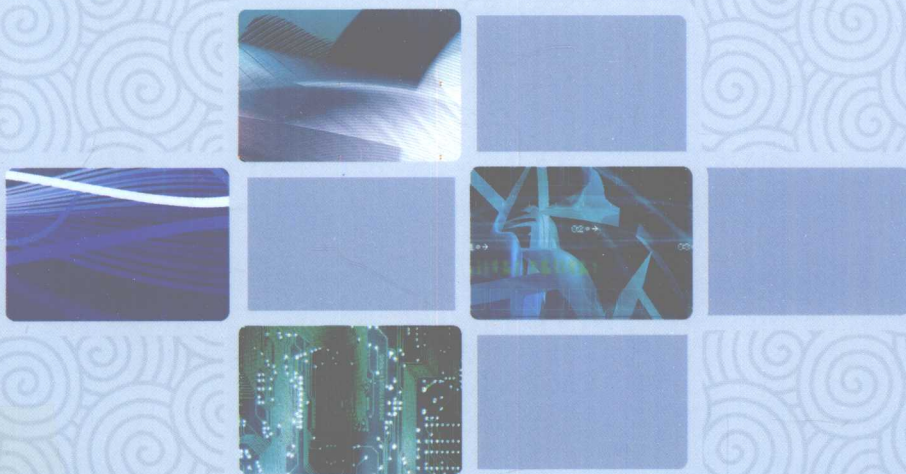


普通高等教育“十二五”创新型规划教材  
高等教育课程改革项目研究成果

Moni Dianzi  
Jishu

# 模拟电子技术

◆ 主编 彭克发 蔺玉珂



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

TN710.4  
P501



郑州大学\*04010747244X\*

# 模拟电子技术

彭克发 蔺玉珂 主编



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

TN710.4  
P501

## 内 容 简 介

本书是根据国家教育部2010年颁布的高等院校电子类专业的《电子技术基础教学基本要求》，按照国家对电子类专业高、中级人才的要求和市场对电子类专业人才需求为依据编写的《模拟电子技术》基础理论课“十二五”规划教材。本书内容包括半导体二极管及其应用、双极型半导体三极管及分析方法、三极管放大电路基础、放大器中的反馈、集成运算放大器及其应用、放大电路的频率响应、功率放大电路、直流稳压电源、调谐放大器与正弦波振荡器、无线电广播基本知识、实验与实训等。本书从最基础的角度出发，内容丰富，深入浅出，实用性强，注重了最基本的基础知识介绍。为了便于深入学习和理解书中内容，书中按各章顺序列举了难度不同、规格不同的实验与实训课题，供学生巩固理论知识、训练专业技能练习，可为学习电子类专业的各门专业课程打下良好的基础。

本书既是高等院校电子类专业的基础理论课教材，也可作为职业上岗培训教材及无线电爱好者自学使用。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术 / 彭克发, 蔺玉珂主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2011. 12

ISBN 978 - 7 - 5640 - 5451 - 9

I. ①模… II. ①彭… ②蔺… 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 (2011) 第 275496 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 / 北京市通州富达印刷厂

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 19.5

字 数 / 366 千字

版 次 / 2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 1500 册

定 价 / 42.00 元

责任编辑 / 胡 静

王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 本社负责调换

# 前 言

本书是根据国家教育部 2010 年颁布的高等院校电子类专业的《电子技术基础教学基本要求》，按照国家对电子类专业高、中级人才的要求和市场对电子类专业人才需求为依据编写的《模拟电子技术》基础理论课“十二五”规划教材。

电子技术是高新技术，它已广泛应用于信息技术的各个领域，并已扩展到国民经济的各个部门，而且进入了家庭。本书是电子技术应用的基础，也是电子技术应用专业的一门重要的基础理论课。本书在编写中力求突出以下特点。

一、重点突出了教材的实用性。

面向现代化，根据 21 世纪各行业对电子类专业人才的要求，在保证基础知识的传授和基本技能训练的基础上，力求选择实用内容，不过分强调学科知识的系统性和严密性。

二、内容丰富、全面、翔实，涵盖电子信息类学生必须掌握的各种基本知识和基本技能。如从电路原理的分析、电子产品的设计、元器件的作用及选择、印制电路板制作到电路调试一应俱全。

三、增加了教材使用的弹性。

本教材分为两部分：一部分是必修内容，是各地、各校必须完成的教学任务；另一部分为选修内容，是提供给条件较好的地区或学校选用，在书中用“※”注明。

四、深入浅出，易学易懂。

根据当前及今后较长时间学生情况及国外教材编写经验，本教材删去了较深的理论推导和繁难的数学运算，内容变得浅显，叙述深入浅出，使学生易于接受，便于实施教学。

为了便于深入学习和理解书中内容，各章节后都附有思考与练习和训练内容，可方便教师及读者自学。

本课程教学时数为 96 学时左右，各章课时安排建议如下。

教学课时分配建议表

| 章 序 | 课时数 | 章 序 | 课时数 |
|-----|-----|-----|-----|
| 1   | 14  | 7   | 6   |
| 2   | 10  | 8   | 8   |
| 3   | 14  | 9   | 10  |
| 4   | 6   | 10  | 8   |
| 5   | 10  | 机动  | 4   |
| 6   | 6   | 总课时 | 96  |

本教材由彭克发教授和蔺玉珂老师任主编，并由彭克发教授和蔺玉珂老师共同编写。其中本书的第1章、第3章、第4章、第5章、第9章、第10章由彭克发教授编写，第2章、第6章、第7章、第8章由蔺玉珂老师编写。全书由彭克发教授制订编写大纲和负责编写的组织及统稿和编审工作。

本书在送审以前，中国高等学校电子教育学会会长黄庆元教授对本书进行了认真细致审阅，并提出了许多修改意见。本书在编写过程中，参考了市面上已成熟的很多文献资料，这里未一一列出，还得到了不少同志的帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，对新大纲领会不够深入，在编写本书中难免存在错误缺点，恳请读者多提宝贵意见，以便进一步修改。

编 者

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 半导体二极管及其应用 .....      | 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 .....         | 3  |
| 1.1.3 PN结的形成 .....        | 5  |
| 1.1.4 PN结的特性 .....        | 6  |
| 1.2 半导体二极管的结构与符号 .....    | 7  |
| 1.2.1 半导体二极管的结构和符号 .....  | 7  |
| 1.2.2 二极管的特性 .....        | 8  |
| 1.2.3 二极管主要参数与选用依据 .....  | 10 |
| 1.2.4 特殊二极管简介 .....       | 11 |
| 1.3 二极管的基本应用 .....        | 15 |
| 1.3.1 单相整流电路概念 .....      | 16 |
| 1.3.2 单相半波整流电路 .....      | 17 |
| 1.3.3 单相全波整流电路 .....      | 18 |
| 1.3.4 单相桥式整流电路 .....      | 19 |
| 1.4 滤波电路 .....            | 22 |
| 1.4.1 电容滤波电路 .....        | 23 |
| 1.4.2 电感滤波电路 .....        | 25 |
| 1.4.3 复式滤波电路 .....        | 26 |
| 实训1 二极管的识别与检测 .....       | 26 |
| 实训2 二极管伏安特性曲线的测试 .....    | 29 |
| 本章小结 .....                | 30 |
| 思考与练习 .....               | 32 |
| 第2章 双极型半导体三极管及分析方法 .....  | 36 |
| 2.1 双极型三极管 .....          | 36 |
| 2.1.1 三极管的结构 .....        | 36 |
| 2.1.2 三极管的工作原理 .....      | 37 |
| 2.1.3 三极管的特性 .....        | 40 |
| 2.1.4 三极管的主要参数 .....      | 43 |
| 2.2 三极管基本应用电路及其分析方法 ..... | 47 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 2.2.1 直流通路和交流通路 .....        | 47  |
| 2.2.2 静态工作点的近似估算 .....       | 49  |
| 2.2.3 图解分析法 .....            | 50  |
| 2.2.4 微变等效电路法 .....          | 57  |
| 2.3 三极管开关电路 .....            | 62  |
| 实训3 三极管的识别与检测 .....          | 63  |
| 本章小结 .....                   | 68  |
| 思考与练习 .....                  | 68  |
| 第3章 三极管放大电路基础 .....          | 72  |
| 3.1 放大电路的基本组成 .....          | 72  |
| 3.1.1 放大电路的组成 .....          | 72  |
| 3.1.2 放大电路的主要性能指标 .....      | 73  |
| 3.2 静态工作点的稳定问题 .....         | 77  |
| 3.2.1 温度对静态工作点的影响 .....      | 77  |
| 3.2.2 分压式静态工作点稳定电路 .....     | 78  |
| 3.3 放大电路的三种组态分析 .....        | 81  |
| 3.3.1 共发射极放大电路 .....         | 82  |
| 3.3.2 共集电极放大电路 .....         | 87  |
| 3.3.3 共基极放大电路 .....          | 89  |
| 3.3.4 三种基本组态的比较 .....        | 91  |
| 3.4 多级放大电路 .....             | 92  |
| 3.4.1 耦合方式 .....             | 92  |
| 3.4.2 多级放大电路性能指标的估算 .....    | 95  |
| 3.5 差分放大电路 .....             | 97  |
| 3.5.1 差分放大电路的工作原理 .....      | 97  |
| 3.5.2 电流源和具有电流源的差分放大电路 ..... | 101 |
| 3.5.3 差分放大电路的输入、输出方式 .....   | 105 |
| 3.6 集成运算放大器简介 .....          | 108 |
| 3.6.1 集成电路的分类 .....          | 108 |
| 3.6.2 模拟集成电路的结构特点 .....      | 109 |
| 3.6.3 集成运算放大器的基本组成 .....     | 111 |
| 3.6.4 集成运算放大器电路符号 .....      | 112 |
| 3.7 场效应管及其放大电路简介 .....       | 113 |
| 3.7.1 结构与符号 .....            | 113 |
| 3.7.2 主要参数 .....             | 115 |
| 3.7.3 各种场效应管的比较 .....        | 115 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 3.7.4 场效应管使用注意事项 .....        | 116 |
| 3.7.5 场效应管放大电路 .....          | 117 |
| 实训4 分压式偏置共发射极放大电路 .....       | 117 |
| 实训5 多级放大电路 .....              | 121 |
| 本章小结 .....                    | 123 |
| 思考与练习 .....                   | 124 |
| 第4章 放大器中的反馈 .....             | 128 |
| 4.1 反馈放大电路的组成与类型 .....        | 128 |
| 4.1.1 反馈放大电路的组成及基本关系式 .....   | 128 |
| 4.1.2 反馈分类与判别 .....           | 130 |
| 4.1.3 基本类型负反馈放大电路 .....       | 131 |
| 4.2 负反馈对放大器性能的影响 .....        | 138 |
| 4.2.1 提高放大倍数的稳定性 .....        | 138 |
| 4.2.2 扩展通频带 .....             | 140 |
| 4.2.3 减小非线性失真 .....           | 140 |
| 4.2.4 改变输入电阻和输出电阻 .....       | 141 |
| 4.2.5 减小噪声 .....              | 142 |
| 4.3 深度负反馈放大电路的分析 .....        | 143 |
| 4.3.1 放大电路引入负反馈的一般原则 .....    | 144 |
| 4.3.2 深度负反馈放大电路的特点及性能估算 ..... | 144 |
| 4.4 负反馈放大电路的稳定性 .....         | 147 |
| 4.4.1 负反馈放大电路的自激振荡 .....      | 148 |
| 4.4.2 消除自激振荡的措施 .....         | 149 |
| 实训6 负反馈对放大器性能的影响 .....        | 150 |
| 实训7 负反馈放大电路的调整与测试 .....       | 152 |
| 本章小结 .....                    | 155 |
| 思考与练习 .....                   | 156 |
| 第5章 集成运算放大器及其应用 .....         | 158 |
| 5.1 集成运算放大器的组成和符号及特点 .....    | 158 |
| 5.1.1 集成运算放大器的组成 .....        | 158 |
| 5.1.2 集成运算放大器电路符号 .....       | 159 |
| 5.1.3 集成运放的传输特性 .....         | 160 |
| 5.1.4 集成运算放大器的主要特点 .....      | 161 |
| 5.2 基本集成运算放大电路 .....          | 163 |
| 5.2.1 反相比例运算放大器 .....         | 163 |
| 5.2.2 同相比例运算放大器 .....         | 164 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 5.3 集成运算放大器的典型运用 .....            | 165 |
| 5.3.1 运算电路 .....                  | 166 |
| 5.3.2 信号转换电路 .....                | 170 |
| 5.3.3 集成运算放大器的其他应用电路 .....        | 171 |
| 5.4 使用集成运放的注意事项 .....             | 172 |
| 实训8 集成运算的线性应用 .....               | 174 |
| 实训9 集成运放的非线性应用 .....              | 176 |
| 本章小结 .....                        | 179 |
| 思考与练习 .....                       | 179 |
| 第6章 放大电路的频率响应 .....               | 183 |
| 6.1 频率响应的一般概念 .....               | 183 |
| 6.1.1 幅频特性和相频特性 .....             | 183 |
| 6.1.2 下限频率、上限频率和通频带 .....         | 185 |
| 6.1.3 频率失真 .....                  | 185 |
| ※6.1.4 波特图 .....                  | 186 |
| 6.2 简单RC低通和高通电路的频率响应 .....        | 187 |
| 6.2.1 RC低通电路的频率响应 .....           | 187 |
| 6.2.2 RC高通电路的频率响应 .....           | 190 |
| 6.3 三极管放大电路的频率响应 .....            | 191 |
| 6.3.1 半导体三极管的高频特性 .....           | 191 |
| 6.3.2 单管共发射极放大电路的频率响应 .....       | 192 |
| 6.3.3 多级放大电路的频率响应 .....           | 198 |
| 实训10 单调谐放大电路 .....                | 199 |
| 本章小结 .....                        | 202 |
| 思考与练习 .....                       | 203 |
| 第7章 功率放大电路 .....                  | 206 |
| 7.1 功率放大电路的基本概念 .....             | 206 |
| 7.1.1 对功率放大器的要求 .....             | 206 |
| 7.1.2 功放的分类 .....                 | 207 |
| 7.1.3 功率放大器的电路形式 .....            | 208 |
| 7.2 功率放大电路 .....                  | 208 |
| 7.2.1 单电源互补对称功放电路(OTL电路) .....    | 209 |
| 7.2.2 双电源互补对称功放电路(OCL电路) .....    | 209 |
| 7.2.3 乙类双电源互补对称功率放大电路的功率和效率 ..... | 210 |
| 7.2.4 实际应用的OTL功放电路 .....          | 213 |
| 7.3 甲乙类互补对称功率放大电路 .....           | 214 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 7.3.1 甲乙类双电源互补对称放大电路 .....        | 214 |
| 7.3.2 复合管互补对称放大电路 .....           | 215 |
| 7.4 单电源互补对称功率放大电路 .....           | 218 |
| 7.5 功放管的使用常识 .....                | 219 |
| 7.5.1 功放管的二次击穿及其保护 .....          | 219 |
| 7.5.2 功放管的散热 .....                | 220 |
| 7.6 集成功率放大器 .....                 | 222 |
| 7.6.1 4100 系列集成功率放大器 .....        | 222 |
| 7.6.2 TA7240P/AP 双声道音频功率放大器 ..... | 223 |
| 实训 11 OTL 功率放大电路 .....            | 224 |
| 本章小结 .....                        | 227 |
| 思考与练习 .....                       | 228 |
| 第 8 章 直流稳压电源 .....                | 231 |
| 8.1 直流稳压电源的组成 .....               | 231 |
| 8.2 稳压电路 .....                    | 232 |
| 8.2.1 稳压电路的各种指标 .....             | 232 |
| 8.2.2 并联稳压电路的电路组成和工作原理 .....      | 233 |
| 8.2.3 晶体管串联稳压电源 .....             | 235 |
| 8.3 集成稳压器 .....                   | 238 |
| 8.3.1 三端集成稳压器 .....               | 238 |
| 8.3.2 固定式三端集成稳压器 .....            | 239 |
| 8.3.3 可调式三端集成稳压器 .....            | 243 |
| 8.4 开关型稳压电源简介 .....               | 245 |
| 实训 12 直流稳压电源的调整与测试 .....          | 247 |
| 实训 13 分离元件的串联型稳压电源的指标测试 .....     | 250 |
| 本章小结 .....                        | 252 |
| 思考与练习 .....                       | 252 |
| 第 9 章 调谐放大器与正弦波振荡器 .....          | 256 |
| 9.1 调谐放大器 .....                   | 256 |
| 9.1.1 单调谐放大器 .....                | 256 |
| 9.1.2 双调谐放大器 .....                | 259 |
| 9.1.3 调谐放大器的中和与稳定 .....           | 261 |
| 9.2 振荡的概念与原理 .....                | 262 |
| 9.2.1 LC 回路中的自由振荡 .....           | 262 |
| 9.2.2 自激振荡的条件 .....               | 263 |
| 9.3 LC 振荡器 .....                  | 265 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 9.3.1 变压器反馈式 $LC$ 振荡器 .....        | 265 |
| 9.3.2 电感三点式振荡器 .....               | 267 |
| 9.3.3 电容反馈式 $LC$ 振荡器 .....         | 268 |
| 9.3.4 改进型电容反馈式振荡器 (也叫克拉波振荡器) ..... | 270 |
| 9.4 $RC$ 振荡器 .....                 | 271 |
| 9.4.1 $RC$ 选频振荡器 .....             | 271 |
| 9.4.2 $RC$ 移相式振荡器 .....            | 274 |
| 9.5 石英晶体振荡器 .....                  | 275 |
| 9.5.1 石英晶体的电压特性与等效电路 .....         | 276 |
| 9.5.2 石英晶体振荡电路 .....               | 277 |
| 实训 14 $LC$ 调谐放大器的调试 .....          | 279 |
| 实训 15 $LC$ 正弦波振荡器的调试 .....         | 281 |
| 实训 16 正弦波振荡器 .....                 | 282 |
| 本章小结 .....                         | 284 |
| 思考与练习 .....                        | 284 |
| ※第 10 章 无线电广播基本知识 .....            | 288 |
| 10.1 无线电波及其传播 .....                | 288 |
| 10.1.1 无线电波的基本概念 .....             | 288 |
| 10.1.2 无线电波的传播 .....               | 288 |
| 10.1.3 无线电波波段的划分 .....             | 289 |
| 10.2 调幅与检波 .....                   | 290 |
| 10.2.1 无线电广播的发射与接收 .....           | 290 |
| 10.2.2 调幅原理 .....                  | 291 |
| 10.2.3 检波 .....                    | 291 |
| 10.3 调频与鉴频简介 .....                 | 292 |
| 10.3.1 调频 .....                    | 292 |
| 10.3.2 鉴频 .....                    | 292 |
| 10.3.3 对称比例鉴频器 .....               | 293 |
| 10.4 晶体管超外差式收音机 .....              | 294 |
| 10.4.1 超外差式收音机的基本组成 .....          | 294 |
| 10.4.2 超外差式收音机工作过程 .....           | 294 |
| 10.4.3 超外差式收音机的主要优点 .....          | 295 |
| 10.4.4 晶体管超外差式收音机的电路 .....         | 295 |
| 本章小结 .....                         | 297 |
| 思考与练习 .....                        | 297 |
| 参考文献 .....                         | 299 |

## 教学目标

1. 了解本征半导体、杂质半导体。
2. 了解 PN 结的形成及其单向导电性。
3. 掌握半导体二极管的结构及伏安特性。
4. 掌握半导体二极管的应用。

## 1.1 半导体基础知识

半导体器件是 20 世纪中叶才发展起来的新型电子器件，包括半导体二极管、半导体三极管、场效应管、集成电路等。

自然界中的物质根据导电能力的不同分为导体、绝缘体和半导体。常用的导体一般为银、铜、铝等物体，电阻率低于  $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  的物质；绝缘体为橡胶、塑料、胶木等，电阻率高于  $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$  的物质；导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。在自然界中属于半导体的物质很多，用来制造半导体器件的材料主要是硅（Si）、锗（Ge）和砷化镓（GaAs）等，由于硅的温度特性较好，因而应用最为广泛。

将上述的半导体材料进行特殊加工，使其性能可控，即可用来制造构成电子电路的基本元件——半导体器件。半导体是制作半导体器件的关键材料。

## 1.1.1 本征半导体

不含杂质的纯净半导体（纯净的具有单晶结构的半导体）称为本征半导体。所谓单晶就是在一块半导体内原子按晶格排列得非常整齐。用于制造半导体器件的纯净的四价元素硅和锗，其最外层原子轨道上有 4 个电子（称为价电子），因此可以用图 1.1.1（a）所示的简化模型表示其原子结构，图中的“+4”代表四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷，外圈上的 4 个黑点表示 4 个价电子。经过单晶化后，由于原子排列的有序性，价电子为相邻的原子所共有，形成图 1.1.1（b）所示的共价键结构，图中“+4”代表四价元素原子核和内层电子所具有的净电荷。当温度为绝对零度时，每个原子都以共价键的形式和它周围的原子结合并相互作用，而且共价键中的价电子将受共价键的束缚。当温度升高时，有些原子中的少数价电子获得足够的能量可以摆脱共价键的束缚，从而成为自由运动的自由电子（可简称电子），同时在共价键中留下一个空位置，称为空穴。因此，只要产生一个自由电子，必然对应着一个空穴，即电子和空穴成对出现，

称为电子—空穴对。

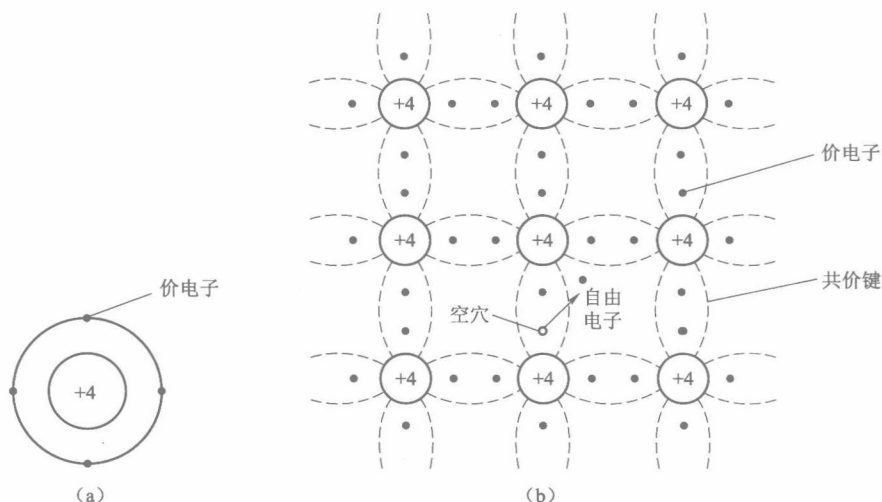


图 1.1.1 硅（或锗）的原子结构模型和晶格结构示意图

(a) 原子结构模型；(b) 晶格结构示意图

在室温或光照下，少数价电子能够获得足够的能量摆脱共价键的束缚成为自由电子，同时在共价键中留下一个空位，如图 1.1.1 (b) 所示。这种产生电子—空穴对的过程，称为本征激发。当温度高于绝对零度时，本征半导体中存在着由本征激发而产生的自由电子和空穴。自由电子可以在晶格中运动，它是带负电的粒子，因此它的运动可以产生电流。原子失去价电子后将带正电，可等效地看成是因为有了带正电的空穴。空穴很容易吸引邻近共价键中的价电子去填补，使空位发生转移，这种价电子填补空位的运动可以看成空穴在运动，但其运动方向与价电子运动方向相反，因此，空穴是带正电的运动粒子。空穴的运动也可以产生电流，电流的方向和空穴的运动方向相同。因此可以把自由电子和空穴都称为载流子。

在本征半导体中，与本征激发同时存在的一种现象称为复合。自由电子和空穴在运动中相遇时会重新结合而成对消失，这种现象称为复合。温度一定时，自由电子和空穴的产生与复合将达到动态平衡，这时本征半导体内自由电子浓度和空穴浓度相等，而且是一个定值。当有电场作用时，自由电子和空穴将作定向运动形成电流，这种运动称为漂移，所形成的电流叫做漂移电流。在常温下，本征半导体的载流子浓度很低，因此导电能力很弱，随着温度的升高，半导体材料中的载流子浓度升高，导电能力增强。因此，本征半导体的导电能力与环境温度、光照强度密切相关，可以利用它来制作热敏和光敏器件，同时此特性又是半导体器件温度稳定性差的原因。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体的导电能力不能人为地控制。温度一定，给定的本征半导体材料的载流子浓度就是一个定值，它的导电能力也就不能被改变了。为了提高半导体材料的导电能力，并且实现人为控制半导体材料的导电性，可以采用掺杂技术。所谓掺杂，就是在本征半导体中掺入微量杂质元素，这样的半导体称为杂质半导体。一般掺入杂质元素的浓度要远大于本征载流子的浓度，又要远小于材料的原子密度，使杂质原子零星地分布于半导体材料的晶格中。按掺入杂质的不同，可分为P型半导体和N型半导体。

#### 1. N型半导体

在本征半导体的硅（或锗）中掺入微量五价元素（如磷、砷、锑等）杂质后，杂质原子替代了晶格中某些四价元素原子的位置，就形成了N型半导体，N型半导体主要是靠电子导电，所以又称为电子型半导体。这类半导体中，电子是多数载流子，空穴是少数载流子，如图1.1.2（a）所示。

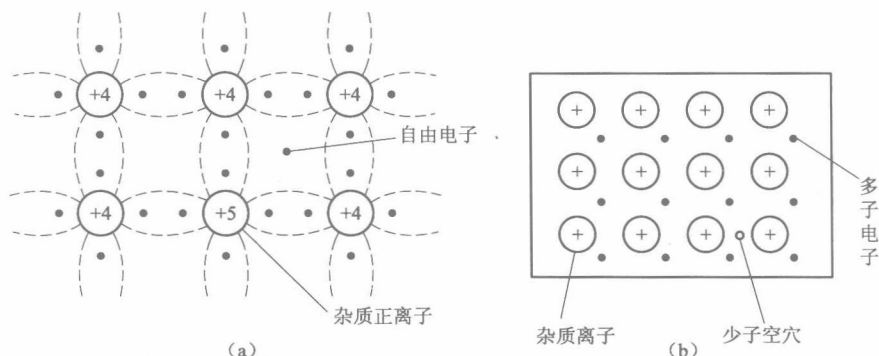


图 1.1.2 N 型半导体结构示意图

(a) 晶格结构示意图；(b) 载流子和离子结构示意图

由于杂质原子最外层有五个电子，杂质原子与周围的四价元素原子相结合组成共价键时多余一个价电子，这个多余的价电子在室温下很容易挣脱原子核的束缚成为自由电子，掺入多少杂质原子就能电离产生多少个自由电子，因而自由电子的浓度大大升高。杂质原子在电离产生自由电子的同时，并不产生空穴，而是因此释放出一个价电子而变成杂质正离子，而这个正离子是束缚在晶格中的，不能像载流子那样运动，称之为施主离子，所掺入的杂质称为施主杂质。杂质离子带正电而自由电子带负电，所以整块半导体还是电中性的。

在这种杂质半导体中，既存在因杂质原子电离而成对产生的自由电子和杂质正离子，也存在由本征激发所产生的自由电子—空穴对，如图1.1.2（b）所示。

与本征半导体相比,这种半导体中的自由电子浓度大大升高,而空穴由于被复合的机会增多,其浓度反而降低,所以这种杂质半导体中自由电子为多数载流子(简称多子),空穴为少数载流子(简称少子)。这是以自由电子导电为主的半导体,称为N型(或电子型)半导体。

## 2. P型半导体

在本征半导体的硅(或锗)中掺入三价微量元素(如硼、铝等)杂质后就形成了P型半导体,如图1.1.3(a)所示。P型半导体主要是靠空穴导电的半导体,所以又称为空穴半导体。这类半导体中,空穴是多数载流子,电子是少数载流子。由图1.1.3(a)可见,杂质原子与周围的四价元素原子形成共价键时因缺少一个价电子而产生一个空位,常温下这个空位极容易被邻近共价键中的价电子所填补,使杂质原子变成不能够移动的负离子,称这类杂质原子为受主原子。因此掺入多少个杂质原子就能产生多少个空穴。这种掺杂使空穴的浓度大大升高,而自由电子的浓度反而比本征半导体中低。这是以空穴导电为主的半导体,称为P型(或空穴型)半导体,其中空穴为多子,自由电子为少子。杂质原子在接受价电子填补后将变成杂质负离子,称之为受主离子,相应的杂质称为受主杂质。P型半导体中的载流子和离子结构示意图如图1.1.3(b)所示。

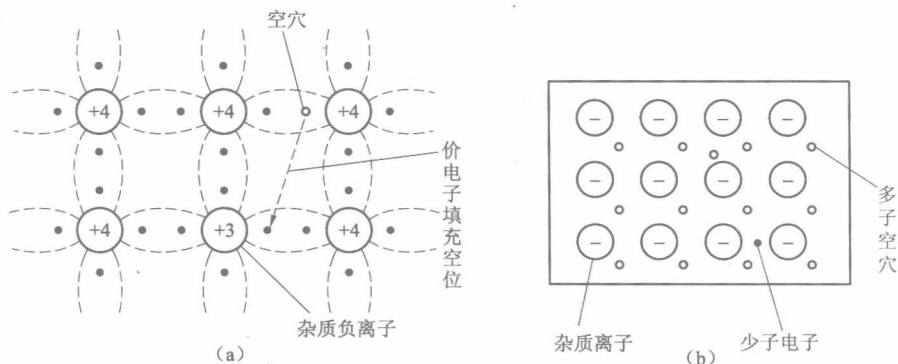


图 1.1.3 P型半导体结构示意图

(a) 晶格结构示意图; (b) 载流子和离子结构示意图

综上所述,杂质半导体中存在自由电子、空穴和杂质离子3种带电粒子,其中自由电子和空穴是载流子,杂质离子不能移动,因而不是载流子。由于多子浓度远高于少子浓度,故杂质半导体的导电性能主要取决于多子浓度。多子浓度主要由掺杂浓度决定,其值较大且稳定,故杂质半导体的导电性能得到显著改善。少子对杂质半导体的导电性能也有影响,由于少子是由本征激发产生的,其大小随温度的升高而增大,故半导体器件的性能对温度敏感,在应用中要注意温度对半导体器件及其电路性能的影响。

另外要注意：由于本征载流子浓度和温度有关，因此少数浓度随温度升高而升高，当温度高到一定程度时，少数浓度有可能比掺杂浓度还要高。这时，杂质半导体的特点就不存在了，两种载流子浓度近似相等，因此又可以将这种半导体看成本征半导体了。

必须指出：杂质半导体中载流子（电子和空穴）虽有多少之分，但除此之外，还有不能移动的杂质离子，因而整个半导体仍呈电中性。

### 1.1.3 PN 结的形成

经过特殊的工艺加工，将 P 型半导体和 N 型半导体紧密地结合在一起，则在两种半导体的交界处就会出现一个特殊的接触面即空间电荷区或耗尽层，该耗尽层称为 PN 结，如图 1.1.4 所示。当在同一块半导体基片的两边分别形成 N 型和 P 型半导体时，N 型和 P 型半导体交界面两侧的两种载流子浓度存在很大的差异。由于在 P 型半导体和 N 型半导体交界面两侧存在着空穴和自由电子两种载流子浓度差，即 P 区的空穴浓度远大于 N 区空穴浓度，N 区的电子浓度远大于 P 区的电子浓度，因此会产生载流子从高浓度区向低浓度区的运动，这种运动称为扩散，如图 1.1.4 (a) 所示。P 区中的多子空穴扩散到 N 区，与 N 区中的自由电子复合而消失；N 区中的多子电子向 P 区扩散并与 P 区的空穴复合而消失。结果交界面附近的 P 区因失去空穴而留下不能移动的负离子，同样 N 区因失去电子而留下不能移动的正离子，这样在交界面两侧就出现了数量相等的正、负离子组成的空间电荷区。在这个区域内载流子被扩散了，因而也称此区为耗尽层。

在空间电荷区内带正电的 N 区和带负电 P 区产生了一个由 N 区指向 P 区的内建电场，如图 1.1.4 (b) 所示。该电场将产生两个作用：阻碍多子的扩散运动，使空间电荷区变宽，从这个角度上又可称 PN 结为阻挡层；促使两个区靠近交界面处的少数产生漂移运动，又使空间电荷区变窄。起始时内电场较小，扩散运动较强，漂移运动较弱，随着扩散的进行，空间电荷区增宽，内电场增大，扩散运动逐渐困难，漂移运动逐渐加强。当外部条件一定时，扩散运动和漂移运动最终达到动态平衡，即扩散过去多少载流子必然漂移过来同样多的同类载流子，这时扩散电流等于漂移电流，如图 1.1.4 (c) 所示，这时空间电荷区的宽度一定，内电场一定，形成了所谓的 PN 结。

另外，从 PN 结内电场阻止多子扩散这个角度来说，空间电荷区也称为阻挡层或势垒区。PN 结两侧的电位差称为内建电位差，又叫接触电位差，用  $U_B$  表示，其大小与半导体材料、掺杂浓度和温度有关。室温时，硅材料 PN 结的内建电位差为 0.5 ~ 0.7 V，锗材料 PN 结的内建电位差为 0.2 ~ 0.3 V。当温度升高时， $U_B$  将减小。PN 结的宽度与 N 区和 P 区的掺杂浓度有关，当 N 区和 P 区的掺杂浓度相同时，交界面两侧的空间电荷区宽度相等，这种 PN 结称为对称 PN 结。当 N 区和 P 区的掺杂浓度不相同，由于 PN 结两侧的正负离子数相等，因

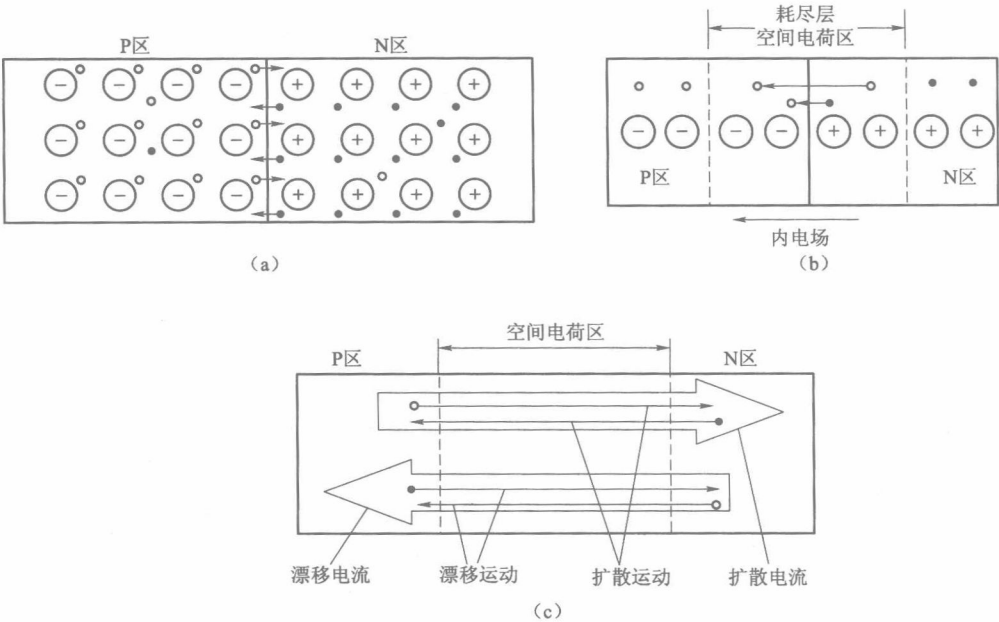


图 1.1.4 PN 结的形成

(a) 载流子的扩散运动；(b) 动态平衡时的 PN 结及其内电场；  
(c) 动态平衡时 PN 结中的载流子运动及电流

此掺杂浓度高的一侧的空间电荷区宽度小于掺杂浓度低的一侧的空间电荷区宽度，这种 PN 结称为不对称 PN 结。

1.1.4 PN 结的特性

PN 结有什么特性呢？看下面的一个实验，如图 1.1.5 所示。

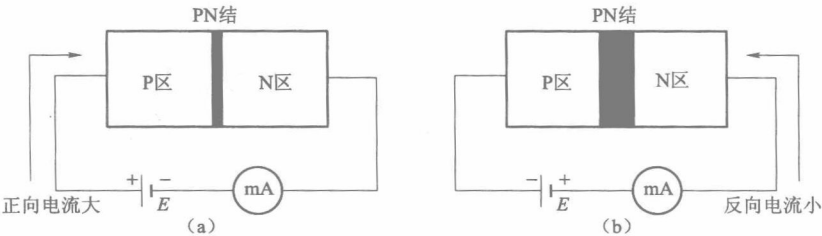


图 1.1.5 PN 结的单向导电性  
(a) 正偏时导通；(b) 反偏时截止

在 PN 结两侧外加一个电源，正极接 P 型半导体，负极接 N 型半导体。此时电流表指针偏转较大，说明 PN 结内外电路形成正向电流。这种现象称为 PN 结的正向导通。如将电源分正负极反过来，即电源正极接 N 区，负极接 P 区，此时