



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电子技术基础 (电工学II)



第2版

李春茂 主编

Education



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 电子技术基础

(电工学Ⅱ)

第2版

主编 李春茂

参编 龙绪明 曹保江 李冀昆



机械工业出版社

本书分两篇共 14 章,前 8 章为模拟电子技术部分,后 6 章是数字电子技术部分。模拟电子技术部分的主要内容有:双极型半导体器件、基本放大电路、场效应晶体管放大电路、多级放大电路、集成运放电路、信号产生电路、直流稳压电源和电力电子学基础;数字电子技术部分的主要内容有:数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、数-模与模-数转换器、可编程逻辑器件。各章后有相应的本章小结和习题。书后附有部分习题参考答案。

本书适用面广,可作为高等工科院校非电类各专业本科生“电子技术基础”课程的教材,也可作为职业大学、成人教育大学、电视大学和网络教育等各专业的教材或辅助教材,还可供相关专业的工程技术人员学习和参考。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作为教材的老师登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 注册后下载。

## 图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础. 电工学. II/李春茂主编. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2015. 11

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-51834-1

I. ①电… II. ①李… III. ①电子技术-高等学校-教材②电工技术-高等学校-教材 IV. ①TN②TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 245761 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 版式设计:赵颖喆

责任校对:佟瑞鑫 封面设计:张静 责任印制:李洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 1 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.5 印张·526 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51834-1

定价:45.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833 机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线:010-88379649 机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

# 前 言

本书系《电子技术基础（电工学Ⅱ）》的修订版，是在第1版基础上修订编写的一部“十二五”国家级规划教材，其内容满足教育部2005年颁布的“高等学校电工学基础课程教学基本要求”。

本版教材的结构次序和原来版本基本相同，只是在内容上有所增删和调整。主要内容仍然分为“模拟电子技术”和“数字电子技术”两篇。第1篇“模拟电子技术”包括8章：双极型半导体器件、基本放大电路、场效应晶体管放大电路、多级放大电路、集成运放电路、信号产生电路、直流稳压电源、电力电子学基础。第2篇“数字电子技术”包括6章：数字电路基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、数-模与模-数转换器、可编程逻辑器件。

本书可作为高等学校本科非电类（机械类、材料类、工程力学类、测量类、机电一体化类、经贸管理类、运输类、建筑类、土木类等）各专业的“电子技术基础”课程教材，也可作为高等职业教育、成人高等教育和网络教育等同类专业的教材，还可以作为工程技术人员的学习和参考资料。由于各专业的要求不同，各院校可根据具体的授课学时对教材中的内容作适当的调整 and 选择。

本书也可与王英老师主编的《电工技术基础（电工学Ⅰ）》配套使用，作为高等学校非电类专业电工学课程的教材，可供51~68学时教学使用。书中带“\*”的内容可选讲。

参加本版修订工作的有李春茂（第1~12章）、龙绪明（第13~14章）、曹保江（第9~14章部分习题和附录）、李冀昆（第1~8章习题和第9~14章部分习题）等。本书由西南交通大学李春茂主编，负责确定编写体系，并对全书进行统稿和定稿；另有陈玲在书稿录入、排版及图稿绘制等方面做了很多工作。

在本书修订过程中，参考了国内外众多优秀教材，受益匪浅；同时，很多“电工学”课程的前辈、同行和使用本书的学生也提出了许多宝贵的修改建议。在此，谨表示衷心的感谢！

由于编者水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

## 第 1 篇 模拟电子技术

### 第 1 章 双极型半导体器件 ..... 3

#### 1.1 半导体的基本知识 ..... 3

##### 1.1.1 本征半导体及其导电性 ..... 3

##### 1.1.2 杂质半导体 ..... 4

##### 1.1.3 PN 结 ..... 6

#### 1.2 二极管 ..... 7

##### 1.2.1 二极管的结构和伏安特性曲线 ..... 7

##### 1.2.2 二极管的参数和模型 ..... 9

##### 1.2.3 二极管的应用 ..... 10

#### 1.3 各类二极管及其应用 ..... 12

##### 1.3.1 稳压二极管 ..... 12

##### 1.3.2 光敏二极管和发光二极管 ..... 14

#### 1.4 双极型晶体管 ..... 14

##### 1.4.1 晶体管的结构和电流放大原理 ..... 15

##### 1.4.2 晶体管的特性曲线 ..... 17

##### 1.4.3 晶体管的参数和型号 ..... 19

##### 1.4.4 复合晶体管 ..... 23

#### 小结 ..... 23

#### 习题 ..... 24

### 第 2 章 基本放大电路 ..... 26

#### 2.1 放大电路的基本概念和工作原理 ..... 26

##### 2.1.1 放大的概念和主要技术指标 ..... 26

##### 2.1.2 基本放大电路的组成及 工作原理 ..... 28

#### 2.2 基本放大电路的分析方法 ..... 31

##### 2.2.1 放大电路的静态分析法 (静态工作点的估算) ..... 31

##### 2.2.2 微变等效电路 ..... 32

##### 2.2.3 动态分析 ..... 35

#### 2.3 图解分析法 ..... 36

#### 2.4 放大电路静态工作点的稳定 ..... 38

##### 2.4.1 静态工作点对放大性能的影响 ..... 38

##### 2.4.2 分压式偏置电路 ..... 40

#### 2.5 电压放大电路 ..... 40

##### 2.5.1 共发射极分压偏置电压

##### 放大电路 ..... 40

##### 2.5.2 共集电极电压放大电路

##### (射极输出器) ..... 44

##### 2.5.3 共基极电压放大电路 ..... 46

#### 小结 ..... 47

#### 思考题 ..... 47

#### 习题 ..... 48

### 第 3 章 场效应晶体管放大电路 ..... 51

#### 3.1 结型场效应晶体管 ..... 51

##### 3.1.1 结型场效应晶体管的结构和 工作原理 ..... 51

##### 3.1.2 结型场效应晶体管的特性曲线 ..... 53

#### 3.2 绝缘栅场效应晶体管 ..... 54

##### 3.2.1 N 沟道增强型绝缘栅场 效应晶体管 ..... 55

##### 3.2.2 N 沟道耗尽型绝缘栅场 效应晶体管 ..... 57

##### 3.2.3 VMOS 场效应晶体管 ..... 58

#### 3.3 场效应晶体管的主要参数和 使用注意事项 ..... 59

#### 3.4 场效应晶体管放大电路 ..... 61

##### 3.4.1 共源组态基本放大电路 ..... 61

##### 3.4.2 共漏组态基本放大电路 ..... 66

##### 3.4.3 共栅组态基本放大电路 ..... 68

#### 小结 ..... 68

#### 习题 ..... 69

### 第 4 章 多级放大电路 ..... 71

#### 4.1 多级放大电路的耦合方式 ..... 71

#### 4.2 阻容耦合放大电路 ..... 71

#### 4.3 功率放大电路 ..... 74

##### 4.3.1 功率放大电路的一般问题 ..... 74

##### 4.3.2 互补对称功率放大电路 ..... 76

##### 4.3.3 单电源互补对称功率放大电路 ..... 80

|                                   |     |                           |     |
|-----------------------------------|-----|---------------------------|-----|
| * 4.3.4 变压器耦合功率放大电路 .....         | 83  | 6.3.2 三角波发生器和锯齿波发生器 ...   | 140 |
| * 4.3.5 集成功率放大器 .....             | 84  | 6.4 波形变换电路 .....          | 141 |
| 4.4 直接耦合放大电路 .....                | 85  | 小结 .....                  | 141 |
| 4.5 差分式放大电路 .....                 | 87  | 习题 .....                  | 141 |
| 4.5.1 基本差分放大电路 .....              | 87  | <b>第7章 直流稳压电源</b> .....   | 144 |
| 4.5.2 典型差分放大电路 .....              | 90  | 7.1 桥式整流电路 .....          | 144 |
| 4.5.3 晶体管恒流源差分放大电路 .....          | 93  | 7.1.1 单相桥式整流电路 .....      | 144 |
| 小结 .....                          | 94  | 7.1.2 三相桥式整流电路 .....      | 146 |
| 习题 .....                          | 94  | 7.2 滤波电路 .....            | 147 |
| <b>第5章 集成运放电路</b> .....           | 98  | 7.3 稳压管稳压电路 .....         | 149 |
| 5.1 集成运算放大器 .....                 | 98  | 7.3.1 并联型稳压电路 .....       | 149 |
| 5.1.1 集成运算放大器概述 .....             | 98  | 7.3.2 串联反馈式稳压电路 .....     | 150 |
| 5.1.2 集成运放电压传输特性和线性区的等效电路模型 ..... | 101 | 7.4 集成稳压电源和开关直流稳压电源 ..... | 151 |
| 5.1.3 集成运放电路的基本分析方法 ...           | 102 | 小结 .....                  | 154 |
| 5.1.4 集成电路封装和应用知识 .....           | 104 | 习题 .....                  | 155 |
| 5.2 反馈放大电路 .....                  | 105 | <b>第8章 电力电子学基础</b> .....  | 157 |
| 5.2.1 反馈的基本概念 .....               | 105 | 8.1 晶闸管 .....             | 157 |
| 5.2.2 反馈的类型和判断 .....              | 106 | 8.1.1 晶闸管的基本结构和工作原理 ..... | 157 |
| 5.2.3 负反馈对放大电路性能的影响 ...           | 112 | 8.1.2 晶闸管的伏安特性和主要参数 ..... | 158 |
| 5.3 信号的运算与处理电路 .....              | 114 | 8.2 可控整流电路 .....          | 160 |
| 5.3.1 运算电路 .....                  | 114 | 8.2.1 单相半波可控整流电路 .....    | 160 |
| 5.3.2 有源滤波器 .....                 | 122 | 8.2.2 单相半桥式整流电路 .....     | 161 |
| 5.3.3 电流-电压变换器 .....              | 123 | 8.3 晶闸管的触发电路 .....        | 163 |
| 5.3.4 电压比较器 .....                 | 124 | 8.3.1 单结晶体管触发电路 .....     | 163 |
| 小结 .....                          | 127 | 8.3.2 其他常见的晶闸管的触发电路 ...   | 166 |
| 习题 .....                          | 127 | 8.3.3 晶闸管电路的应用 .....      | 167 |
| <b>第6章 信号产生电路</b> .....           | 132 | 8.4 晶闸管逆变电路 .....         | 168 |
| 6.1 自激振荡 .....                    | 132 | 8.5 电力电子器件 .....          | 169 |
| 6.2 正弦波振荡电路 .....                 | 134 | 小结 .....                  | 173 |
| 6.2.1 RC 正弦波振荡电路 .....            | 134 | 习题 .....                  | 173 |
| 6.2.2 LC 正弦波振荡电路 .....            | 136 |                           |     |
| 6.3 非正弦波信号产生电路 .....              | 139 |                           |     |
| 6.3.1 方波发生器 .....                 | 139 |                           |     |

## 第2篇 数字电子技术

|                           |     |                             |     |
|---------------------------|-----|-----------------------------|-----|
| <b>第9章 数字电路基础知识</b> ..... | 177 | 9.2.2 逻辑函数几种表示方法的相互转换 ..... | 185 |
| 9.1 逻辑代数基础 .....          | 177 | 9.2.3 逻辑函数的化简 .....         | 186 |
| 9.1.1 基本逻辑运算 .....        | 177 | 9.3 集成 TTL 逻辑门电路 .....      | 195 |
| 9.1.2 基本逻辑恒等式和运算规则 .....  | 180 | 9.3.1 TTL 与非门电路 .....       | 195 |
| 9.2 逻辑函数及其化简 .....        | 182 | 9.3.2 TTL 三态与非门电路 .....     | 197 |
| 9.2.1 逻辑函数的表示方法 .....     | 182 |                             |     |

|                                |     |                                |     |
|--------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 9.4 CMOS 门电路 .....             | 198 | 12.1 555 定时器电路结构和功能 .....      | 265 |
| 9.4.1 CMOS 反相器 .....           | 198 | 12.1.1 电路结构 .....              | 265 |
| 9.4.2 CMOS 或非门 .....           | 199 | 12.1.2 引脚和功能 .....             | 265 |
| 9.4.3 HCMOS 门电路 .....          | 199 | 12.2 555 定时器构成的施密特触发器 .....    | 267 |
| 小结 .....                       | 199 | 12.2.1 电路结构 .....              | 267 |
| 习题 .....                       | 200 | 12.2.2 工作原理 .....              | 267 |
| <b>第 10 章 组合逻辑电路</b> .....     | 203 | 12.2.3 典型应用 .....              | 268 |
| 10.1 组合逻辑电路的特点 .....           | 203 | 12.3 555 定时器构成的单稳态触发器 .....    | 269 |
| 10.2 组合逻辑电路的分析和设计 .....        | 203 | 12.3.1 电路结构 .....              | 270 |
| 10.2.1 组合逻辑电路的分析 .....         | 203 | 12.3.2 工作原理 .....              | 270 |
| 10.2.2 组合逻辑电路的设计 .....         | 204 | 12.3.3 典型应用 .....              | 271 |
| 10.3 常用组合逻辑电路 .....            | 206 | 12.4 555 定时器构成的多谐振荡器 .....     | 272 |
| 10.3.1 编码器 .....               | 206 | 12.4.1 电路结构 .....              | 272 |
| 10.3.2 译码器 .....               | 211 | 12.4.2 工作原理 .....              | 273 |
| 10.3.3 加法器 .....               | 219 | 12.4.3 典型应用 .....              | 274 |
| 10.3.4 数值比较器 .....             | 222 | 小结 .....                       | 274 |
| 10.3.5 数据选择器 (多路转换器) .....     | 224 | 习题 .....                       | 274 |
| 小结 .....                       | 227 | <b>第 13 章 数-模与模-数转换器</b> ..... | 277 |
| 习题 .....                       | 228 | 13.1 数-模 (D-A) 转换器 .....       | 277 |
| <b>第 11 章 时序逻辑电路</b> .....     | 230 | 13.1.1 权电阻网络 D-A 转换器 .....     | 277 |
| 11.1 触发器 .....                 | 230 | 13.1.2 T 形电阻网络 D-A 转换器 .....   | 279 |
| 11.1.1 基本 RS 触发器 .....         | 230 | 13.1.3 D-A 转换器主要技术指标 .....     | 280 |
| 11.1.2 同步 RS 触发器 .....         | 232 | 13.1.4 集成 D-A 转换器举例 .....      | 281 |
| 11.1.3 主从型 JK 触发器 .....        | 233 | 13.2 模-数 (A-D) 转换器 .....       | 282 |
| 11.1.4 边沿触发型 JK 触发器 .....      | 235 | 13.2.1 A-D 转换器概述 .....         | 282 |
| 11.1.5 维持阻塞型 D 触发器 .....       | 236 | 13.2.2 并联比较型 A-D 转换器 .....     | 283 |
| 11.1.6 触发器的触发方式 .....          | 237 | 13.2.3 逐次逼近型 A-D 转换器 .....     | 284 |
| 11.2 时序逻辑电路分析 .....            | 238 | 13.2.4 A-D 转换器的主要技术指标 .....    | 287 |
| 11.2.1 时序逻辑电路的基本<br>分析方法 ..... | 238 | 小结 .....                       | 287 |
| 11.2.2 时序逻辑电路分析举例 .....        | 239 | 习题 .....                       | 288 |
| 11.3 常用时序逻辑电路组件 .....          | 240 | <b>第 14 章 可编程逻辑器件</b> .....    | 290 |
| 11.3.1 寄存器 .....               | 240 | 14.1 概述 .....                  | 290 |
| 11.3.2 计数器 .....               | 242 | 14.1.1 PLD 的发展历程 .....         | 290 |
| 11.4 时序逻辑电路设计 .....            | 250 | 14.1.2 PLD 的分类 .....           | 290 |
| 11.4.1 时序逻辑电路设计的几种<br>方法 ..... | 250 | 14.1.3 PLD 的基本结构 .....         | 293 |
| 11.4.2 时序逻辑电路设计的一般<br>步骤 ..... | 250 | 14.2 PAL 和 GAL .....           | 293 |
| 11.4.3 时序逻辑电路设计举例 .....        | 251 | 14.2.1 PAL 的应用与原理 .....        | 294 |
| 小结 .....                       | 258 | 14.2.2 GAL 的原理与应用 .....        | 298 |
| 习题 .....                       | 259 | 14.3 CPLD 和 FPGA .....         | 303 |
| <b>第 12 章 脉冲波形的产生和整形</b> ..... | 265 | 14.3.1 CPLD 的结构和工作原理 .....     | 303 |
|                                |     | 14.3.2 FPGA 结构与工作原理 .....      | 305 |
|                                |     | 14.4 ISP 技术与 ISP 器件 .....      | 307 |
|                                |     | 14.4.1 ISP 技术的特点 .....         | 307 |

|        |                    |     |                          |     |
|--------|--------------------|-----|--------------------------|-----|
| 14.4.2 | ispLSI100 系列 ..... | 308 | 型号命名方法 .....             | 312 |
| 14.4.3 | ISP 器件的编程 .....    | 309 | 附录 B 数的进制及其转换 .....      | 314 |
| 小结     | .....              | 310 | 附录 C 二进制数在机器中的表示方法 ..... | 318 |
| 习题     | .....              | 311 | 部分习题参考答案 .....           | 321 |
| 附录     | .....              | 312 | 参考文献 .....               | 334 |
| 附录 A   | 国产半导体器件和半导体集成电路    |     |                          |     |

# 第 1 篇

模 拟 电 子 技 术



# 第1章 双极型半导体器件

用半导体材料制成的电子器件统称为半导体器件。半导体器件是20世纪50年代发展起来的,特别是1948年晶体管(Transistor)的发明,对电子技术的发展起到了决定性的作用。半导体器件根据参与导电的载流子种数分为双极型和单极型半导体器件两大类型。双极型半导体器件是有两种载流子参与导电的半导体器件,单极型半导体器件是仅有一种载流子参与导电的半导体器件。

本章主要介绍半导体材料的基本性质,PN结及其导电性,半导体二极管(以下简称二极管)和双极型半导体晶体管(下面介绍均称晶体管)的工作原理、特性曲线和主要参数,而对半导体器件内部的详细的物理过程则只作一般的讨论。

## 1.1 半导体的基本知识

按导电能力的不同,物体有导体、半导体和绝缘体之分。

导体——容易传导电流的材料称为导体。

绝缘体——几乎不传导电流的材料称为绝缘体。

半导体——导电能力介于导体和绝缘体之间的材料称为半导体。

本征半导体——化学成分纯净的半导体。典型的本征半导体有硅(Si)和锗(Ge)以及砷化镓(GaAs)等。硅和锗在元素周期表上是四价元素,砷化镓则属于半导体化合物。由于绝大多数半导体的原子排列呈晶体结构,所以由半导体构成的元件也称晶体管。

### 1.1.1 本征半导体及其导电性

本征半导体是化学成分纯净的半导体,它在物理结构上有多晶体和单晶体两种形态,制造半导体器件必须使用单晶体。对制造半导体器件的材料纯度要求很高,要达到99.999999%,常称为“九个9”。在制造单晶体的过程中会进一步提高材料的纯度,单晶体不但纯度高,在晶格结构上也应该是没有缺陷的。用这样的单晶体制造的器件才能保证质量。

#### 1. 电子空穴对

硅和锗是四价元素,在原子最外层轨道上的4个电子称为价电子。它们分别与周围的4个原子的价电子形成共价键。共价键中的价电子为这些原子所共有,并为这些原子所束缚,在空间形成排列有序的晶格。硅原子空间排列及共价键结构平面示意图见图1-1。

当导体处于热力学温度零度时,导体中没有自由电子。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,成为自由电子。这种现象称为本征激发(也称热激发)。

自由电子产生的同时,在其原来的共价键中就出现了一个空位,原子的电中性被破坏,呈现出正电性,其正电量与电子的电量相等,通常称呈现正电性的这个空位为空穴。

因热激发而出现的自由电子和空穴是成对出现的，称为**电子空穴对**。一部分游离的自由电子在经过空穴附近时，也可能被空穴所俘获，称为**复合**，见图 1-2。本征激发和复合在一定温度下会达到动态平衡。此时，半导体中载流子的浓度不变。

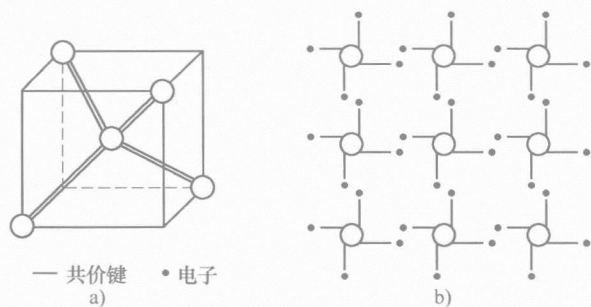


图 1-1 硅原子空间排列及共价键结构平面示意图

a) 硅晶体的空间排列    b) 共价键结构平面示意图

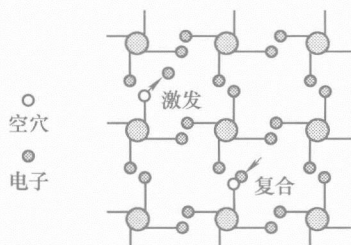


图 1-2 本征激发和复合的过程

## 2. 空穴的移动

自由电子的定向运动就形成了电子电流，空穴的定向运动也可形成空穴电流，空穴的运动是靠相邻共价键中的价电子依次充填空穴来实现的。空穴在晶格中的移动见图 1-3。例如 A 处的空穴被 B 处的电子所充填，B 处产生一个新的空穴，同时 A 处产生复合，接下来，B 处的空穴被 C 处的电子所充填，同时 C 处产生一个空穴，B 处产生复合，如此不断进行，空穴于是靠着相邻共价键中的价电子依次充填而产生运动。

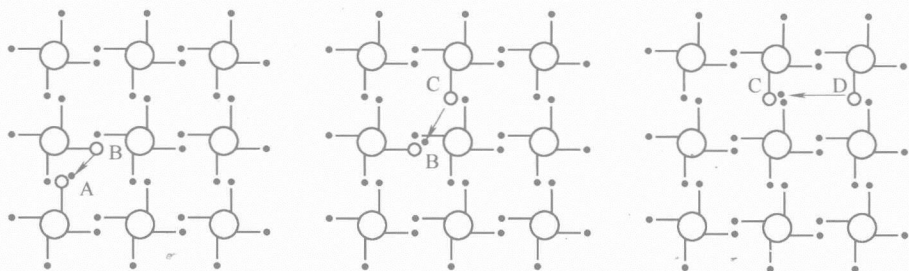


图 1-3 空穴在晶格中的移动

### 1.1.2 杂质半导体

在本征半导体中掺入某种元素作为杂质，可使半导体的导电性发生显著变化。掺入的杂质主要是三价或五价元素，掺入杂质的本征半导体称为**杂质半导体**。要注意，这里的杂质半导体是在提纯的本征半导体中掺入微量的三价或五价元素而得到的，不是普通意义上的含有多种任意杂质的半导体。可以认为掺入杂质后，半导体的晶格结构不变。

#### 1. N 型半导体

在本征半导体中掺入五价杂质元素，例如磷，可形成**N 型半导体**，也称**电子型半导体**。因五价杂质原子中只有 4 个价电子能与周围 4 个半导体原子中的价电子形成共价键，而多余的 1 个价电子因无共价键束缚而很容易成为自由电子。N 型半导体的结构示意图见图 1-4。

在 N 型半导体中自由电子是**多数载流子**，它主要由杂质原子提供；空穴是**少数载流子**，由热激发形成。

因热激发形成的是电子空穴对，电子空穴对中的空穴是少数载流子，电子空穴对中的电子是多数载流子，它与掺杂形成的多数载流子混在一起。但由热激发形成的自由电子虽然是多数载流子，但其数量远远少于由掺入五价杂质而产生的多数载流子，这个差别要在一百万倍以上。提供自由电子的五价杂质原子因失去了这个价电子而带正电荷，成为正离子，因此五价杂质原子也称为施主杂质。

## 2. P 型半导体

在本征半导体中掺入三价杂质元素，如硼、镓、铟等就形成了 **P 型半导体**，也称为**空穴型半导体**。因三价杂质原子在与硅原子形成共价键时，缺少一个价电子而在共价键中留下一个空穴，所以 P 型半导体中空穴是多数载流子，其数量主要由掺入杂质的浓度确定；电子是少数载流子，由热激发形成。

空穴很容易俘获电子，使杂质原子成为负离子。三价杂质因而也称为**受主杂质**。P 型半导体的结构示意图见图 1-5。

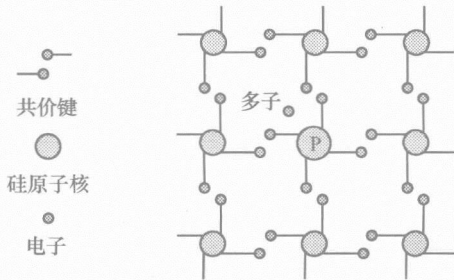


图 1-4 N 型半导体的结构示意图

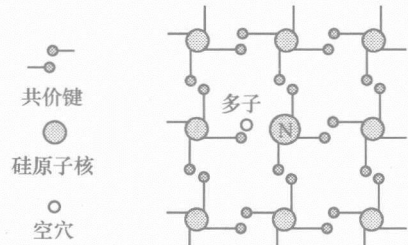


图 1-5 P 型半导体的结构示意图

制作 N 型半导体和 P 型半导体不一定非要在本征半导体中去制作。例如在 N 型半导体中的某个区域掺入三价元素，可以使这个区域形成 P 型半导体。但是要掺入多一点的杂质，其中的一部分用于抵消五价杂质的影响，剩余的三价元素用于形成 P 型半导体。

## 3. 杂质和温度对半导体导电性的影响

掺入杂质对本征半导体的导电性有很大的影响，因为多数载流子是由掺入的杂质的浓度决定的。一些典型的数据如下：

$T = 300\text{K}$  室温下，本征硅的原子浓度为  $4.96 \times 10^{22}/\text{cm}^3$ 。

本征硅的电子和空穴浓度为  $n = p = 1.4 \times 10^{10}/\text{cm}^3$ 。

掺杂后，N 型半导体中的自由电子浓度为  $n = 5 \times 10^{16}/\text{cm}^3$ 。

这 3 个数据为便于记忆，基本上各相差 6 个数量级（一百万倍）。由这些数据可以看出，本征硅的电子和空穴浓度相当于少数载流子的浓度，掺杂后，N 型半导体中的自由电子浓度相当多数载流子的浓度，同时可以看出掺杂对半导体的导电性影响是多么大。

温度对半导体的导电性能也有很大的影响，以上给出的本征硅原子浓度等 3 个数据都是在一定温度条件下（ $T = 30^\circ\text{C}$ ）给出的。即半导体受到光照或热的辐射时，其电阻率会发生很大的变化，导电能力将有明显的改善，利用这一特性可制造光敏元件和热敏元件。

### 1.1.3 PN 结

#### 1. PN 结的形成

##### (1) 基本概念

扩散运动：多子从浓度大向浓度小的区域运动，扩散运动产生扩散电流。

漂移运动：少子向对方运动，漂移运动产生漂移电流。

动态平衡：扩散电流 $\rightleftharpoons$ 漂移电流，PN 结内总电流为 0。

PN 结：稳定的空间电荷区。

(2) PN 结的形成 将一块 P 型半导体和 N 型半导体紧密连接在一起，这种紧密连接不能有缝隙，是一种原子半径尺度上的紧密连接。或者在一块 N 型半导体中制作出 P 型半导体，由此来形成 PN 结。此时将在 N 型半导体和 P 型半导体的结合面上形成如下物理过程：

N 型半导体中的电子的浓度远大于 P 型半导体中电子的浓度；P 型半导体中空穴的浓度远大于 N 型半导体中空穴的浓度。于是在两种半导体的界面上会因浓度差发生载流子的扩散运动，见图 1-6。随着扩散运动的进行，在界面 N 区的一侧，随着电子向 P 区的扩散，只剩正离子；在界面 P 区的一侧，随着空穴向 N 区的扩散，只剩负离子。离子在晶格中是不能移动的，所以在 N 型半导体和 P 型半导体的界面出现空间电荷区。空间电荷区形成的电场，方向是从 N 区指向 P 区，称为内电场。

内电场的出现对多数载流子的扩散运动产生阻碍作用，限制了扩散运动的进一步发展。另一方面，在半导体中还存在少数载流子，内电场的出现，电场力会对少数载流子产生作用，促使少数载流子产生漂移运动。漂移电流的方向正好与扩散电流的方向相反。

扩散运动越强，内电场越强，对扩散运动的阻碍就越强，却对漂移电流越有利。最终，两种运动达到动态平衡，即扩散电流等于漂移电流。此时空间电荷区的宽度不变，这空间电荷区称为 PN 结。因为空间电荷区的载流子已经扩散尽了，故也称之为耗尽层。从其他角度也将 PN 结称为离子薄层、势垒区等。

上述过程可简单表示如下：

浓度差 $\rightarrow$ 多子扩散 $\rightarrow$ 杂质离子形成空间电荷区

$\rightarrow$ 空间电荷区形成内电场  $\left\{ \begin{array}{l} \text{内电场促使少子漂移} \\ \text{内电场阻止多子扩散} \end{array} \right. \rightarrow \text{达到动态平衡}$

(3) PN 结的接触电位 内电场的建立，使 PN 结中产生电位差，从而形成接触电位  $V_f$ ，接触电位  $V_f$  决定于材料及掺杂浓度。

锗： $V_f = 0.2 \sim 0.3 \text{V}$ ，硅： $V_f = 0.6 \sim 0.7 \text{V}$ 。

#### 2. PN 结的单向导电性

PN 结具有单向导电性，若 P 区的电位高于 N 区，PN 结呈低阻性，所以电流大；若 P 区的电位低于 N 区，PN 结呈高阻性，所以电流小。

(1) PN 结加正向电压时的导电情况 见图 1-7，外加的正向电压有一部分降落在 PN 结

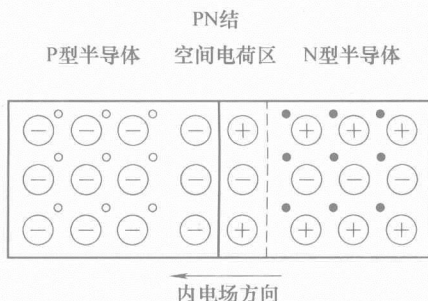


图 1-6 PN 结的形成过程

上，方向与 PN 结内电场方向相反，削弱了内电场。于是，内电场对多子扩散运动的阻碍减弱，扩散电流加大。扩散电流由多数载流子的运动产生，电流较大，PN 结呈低阻。

(2) PN 结加反向电压时的导电情况 见图 1-8，外加的反向电压有一部分降落在 PN 结区，方向与 PN 结内电场方向相同，加强了内电场。内电场对多子扩散运动的阻碍增强，扩散电流大大减小。此时 PN 结区的少子在内电场作用下形成的漂移电流大于扩散电流，但漂移电流是少子的运动形成的，电流很小。PN 结呈高阻。

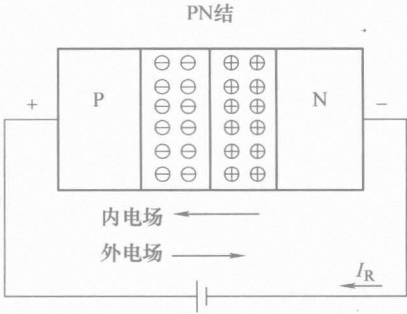


图 1-7 PN 结正偏时的导电情况

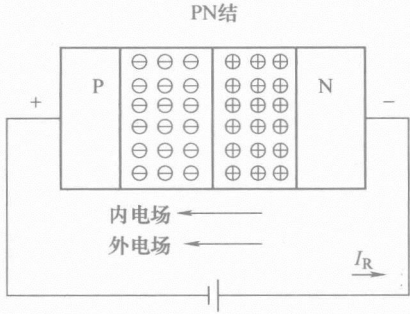


图 1-8 PN 结反偏时的导电情况

在一定的温度条件下，由本征激发决定的少子浓度是一定的，故少子形成的漂移电流是恒定的，基本上与所加反向电压的大小无关，这个电流也称为反向饱和电流。

PN 结加正向电压时，呈现低电阻，具有较大的正向扩散电流；PN 结加反向电压时，呈现高电阻，具有很小的反向漂移电流。由此可以得出结论：PN 结具有单向导电性。

## 1.2 二极管

### 1.2.1 二极管的结构和伏安特性曲线

#### 1. 二极管的结构

在 PN 结上加上引线和封装，就成为一个二极管。二极管按结构分有点接触型、面接触型和平面型三大类。二极管的结构示意图见图 1-9。

- 1) 点接触型二极管 PN 结面积小，结电容小，用于检波和变频等高频电路。
- 2) 面接触型二极管 PN 结面积大，用于工频大电流整流电路。
- 3) 平面型二极管 往往用于集成电路制造工艺中。PN 结面积可大可小，用于高频整流

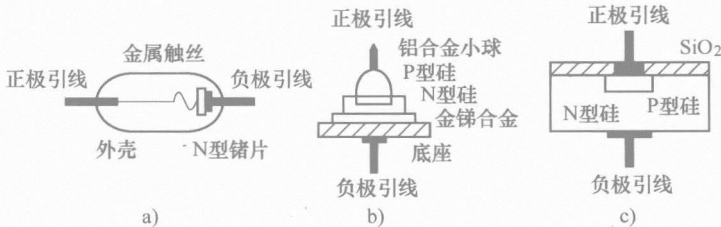


图 1-9 二极管的结构示意图

a) 点接触型 b) 面接触型 c) 平面型

和开关电路中。

## 2. 二极管的伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线见图 1-10。处于第一象限的是正向伏安特性曲线，处于第三象限的是反向伏安特性曲线。根据理论推导，二极管的伏安特性曲线可用下式表示：

$$I_D = I_S (e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

式中， $I_S$  为反向饱和电流； $U_D$  为二极管两端的电压降； $U_T = kT/q$  称温度的电压当量； $K$  为玻尔兹曼常数； $q$  为电子电荷量； $T$  为热力学温度，对于室温（相当  $T = 30^\circ\text{C}$ ），则有  $U_T = 26\text{mV}$ 。

(1) 正向特性 当  $U_D > 0$ ，即处于正向特性区域。正向区又分为 3 段：

第一段，当  $0 < u_D < U_{TH}$  时，正向电流为零， $U_{TH}$  称为开启电压，硅二极管的开启电压  $U_{TH} \approx 0.5\text{V}$ ，锗二极管的开启电压  $U_{TH} \approx 0.1\text{V}$ 。（见图 1-10 中的①段）。

第二段，当  $u_D > U_{TH}$ ，且  $u_D$  较小时，开始出现正向电流，并按指数规律增长，见图 1-10 中的曲线的②段。

第三段，当  $u_D > U_{TH}$ ，且  $u_D$  较大时，正向电流增长很快，且正向电压随正向电流增长而增长很小。在图 1-10 中，对应正向曲线很陡的③段。

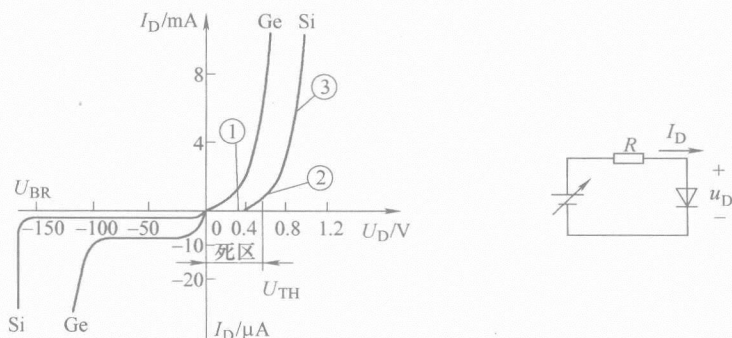


图 1-10 二极管的伏安特性曲线

正向特性曲线③段对应的正向电压可以认为基本不变，一般认为硅二极管的正向电压  $U_D \approx 0.7\text{V}$ ，锗二极管的正向电压  $U_D \approx 0.3\text{V}$ 。

### (2) 反向特性

1) 当  $u_D < 0$  时，即处于反向特性区域。反向区分为两个区域。

2) 当  $U_{BR} < u_D < 0$  时，反向电流很小，且基本不随反向电压的变化而变化，此时的反向电流也称反向饱和电流  $I_S$ 。

3) 当  $u_D \leq U_{BR}$  时，反向电流急剧增加，发生反向击穿， $U_{BR}$  称为反向击穿电压。反向击穿按机理分为齐纳击穿和雪崩击穿两种情况。

① 在高掺杂的情况下，因耗尽层薄，不需很大的反向电压就可在耗尽层建立很强的电场，场强达到一定程度会直接破坏共价键，使价电子脱离共价键的束缚，产生电子—空穴对，致使反向电流急剧增大，这种击穿称为齐纳击穿。

② 如果掺杂浓度较低，耗尽层较宽，当反向电压增加到较大数值时，耗尽层的电场使

电子的漂移速度加快,与共价键中的价电子相碰撞时,把价电子撞出共价键,产生电子—空穴对。新产生的电子被电场加速后,又撞出其他价电子,载流子雪崩式增加,致使反向电流急剧增加,这种击穿称为雪崩击穿。

在反向区,硅二极管和锗二极管的特性有所不同。硅二极管的反向击穿特性比较硬、比较陡,反向饱和电流也很小;锗二极管的反击穿特性比较软,过渡比较平滑,反向饱和电流较大。从击穿的机理上看,硅二极管,当 $|U_{BR}| \geq 7V$ 时,主要是雪崩击穿;当 $|U_{BR}| \leq 4V$ 时,主要是齐纳击穿;当 $|U_{BR}|$ 在 $4 \sim 7V$ 之间时,两种击穿都有。由于硅二极管雪崩击穿电压 $U_{BR}$ 具有正温度系数,齐纳击穿电压 $U_{BR}$ 具有负温度系数,当击穿电压介于雪崩击穿电压和齐纳击穿之间时,击穿电压有可能获得零温度系数点,所以标准稳压二极管的击穿电压一般都在 $6V$ 左右。

## 1.2.2 二极管的参数和模型

### 1. 二极管的参数

二极管的参数包括最大整流电流 $I_F$ 、反向击穿电压 $U_{BR}$ 、最大反向工作电压 $U_{RM}$ 、反向电流 $I_R$ 、最高工作频率 $f_{max}$ 和结电容 $C_j$ 等。几个主要的参数介绍如下:

(1) 最大整流电流 $I_F$  二极管长期连续工作时,允许通过二极管的最大整流电流的平均值。

(2) 反向击穿电压 $U_{BR}$ 和最大反向工作电压 $U_{RM}$  二极管反向电流急剧增加时对应的反向电压值称为反向击穿电压 $U_{BR}$ 。为安全计,实际工作中,最大反向工作电压 $U_{RM}$ 一般只按反向击穿电压 $U_{BR}$ 的一半计算(注:不同的厂家对该参数的规定有所不同)。

(3) 反向电流 $I_R$  在室温下,在规定的反向电压下,一般是最大反向工作电压下的反向电流值。硅二极管的反向电流一般在纳安(nA)级;锗二极管在微安( $\mu A$ )级。

(4) 正向压降 $U_D$  在规定的正向电流下,二极管的正向电压降。小电流硅二极管的正向压降为 $0.6 \sim 0.8V$ ,计算时可取 $0.7V$ ;锗二极管为 $0.2 \sim 0.3V$ ,计算时可取 $0.3V$ 。大功率的硅二极管的正向压降随着工作电流的增加而增加。

(5) 动态电阻 $r_d$  为二极管正向特性曲线斜率的倒数。显然, $r_d$ 与正向电流的大小有关。所以动态电阻是一个交流参数,前几个是直流参数,或称为静态参数。动态电阻的定义如下:

$$r_d = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} \Big|_Q \quad (1-2)$$

(6) 正向压降温度系数 $\alpha_{U_D}$  反映了二极管正向压降随温度变化的规律,具有负温度系数。不论是锗管还是硅管基本上都是一个常数

$$\alpha_{U_D} \approx -(1.9 \sim 2.5) \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

所以,二极管的正向特性曲线,当温度升高时,会向 $Y$ 轴移动,若正向特性曲线画在第一象限,曲线向左移动。

(7) 反向饱和电流的温度系数 反映了二极管反向饱和电流随温度变化的规律,不论锗管还是硅管都具有正温度系数,在数量上基本遵循温度每升高 $10^\circ\text{C}$ ,反向饱和电流增加一倍的规律。所以,当温度升高时,二极管的反向特性曲线会向偏离 $X$ 轴的方向移动,若反向特性曲线画在第三象限,曲线向下方移动。温度对硅二极管伏安特性曲线的影响见图1-11。