

XIANDAI  
DIANZI XIANLU JICHU  
XUEXI ZHIDAO

# 现代 电子线路基础 学习指导

陆利忠 奚玲 万方杰 胡泽明 李建军 编著



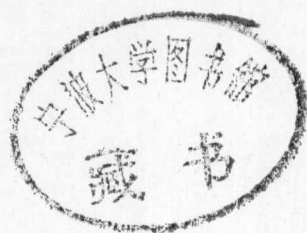
国防工业出版社

National Defense Industry Press

内容简介

# 现代电子线路基础学习指导

陆利忠 奚玲 万方杰 胡泽明 李建军 编著



宁波大学00720170

国防工业出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

本书是为适应电子线路课程教学并结合《现代电子线路基础》教材而编写的辅导材料,目的是帮助读者更好地理解 and 掌握电子线路的基本概念和分析方法,并扩充知识面。

本书各章内容与《现代电子线路基础》教材相对应。包含“内容特点和学习指导”、“内容要点”、“内容扩展”、“解题示例和仿真”和“自检练习”等内容。知识点覆盖比较全面,解题示例类型丰富,各例均有知识要点点评。自检练习分 A、B 两卷并有答案,难易程度适中,便于自学。

本书既可与《现代电子线路基础》教材配套使用,也可作为高等学校通信、电子信息工程等专业电子线路课程的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电子线路基础学习指导/陆利忠等编著. —北京:国防工业出版社,2011.5

ISBN 978-7-118-07345-4

I. ①现... II. ①陆... III. ①电子线路—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 060941 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 416 千字

2011 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

## 前 言

本书是为适应电子线路课程教学并结合《现代电子线路基础》教材而编写的学习指导书。编写本书的指导思想是引导学生运用电路基本理论,由浅入深、循序渐进地理解和掌握电子线路的基本概念和分析方法,初步建立电子系统和工程应用概念,提高分析问题、解决问题的能力,培养创新意识。

本书内容与《现代电子线路基础》教材相对应,各章包含如下5个部分:

(1)内容特点和学习指导 指出本章总体内容结构、重点难点,提出学习方法和建议。

(2)内容要点 对主要内容进行归纳提炼,帮助读者理清思路、抓好重点。

(3)内容扩展 是为因受教材篇幅限制或有些工程性过强不宜写入教材的内容而编写的,可以作为教材内容的补充,拓展知识面。

(4)解题示例和仿真 根据主要知识点精选示例,各例均有解题分析、解答过程和知识要点点评。可助读者加深内容理解和更好地掌握电子线路分析方法。

(5)自检练习 提供两份内容比较全面、题型多样、难易程度适中的试卷并附有答案。可助读者自行检验所学知识的掌握情况。

本书力求结合工程实践,强调应用性。示例和练习中的电路元件参数取值均为实际标称系列值,数值范围源于工程实践应用,没有为方便计算而虚拟的元件数值。

本书第1章和第2章由陆利忠编写,第3章和第4章由万方杰编写,第5章由李建军编写,第6章由奚玲编写,第7章和第8章由胡泽明编写。全书统稿和最终定稿工作由陆利忠负责。因第9章内容涉及许多工程实际问题,学习时需要一定的工程实践背景知识或经验知识,故未将该章内容编入本书。

由于编者水平有限,书中一定存在不少问题,敬请读者批评指正。

编 者

2010年12月

# 目 录

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| 第1章 半导体器件和组件 .....                                     | 1  |
| 1.1 内容特点和学习指导 .....                                    | 1  |
| 1.1.1 内容结构 .....                                       | 1  |
| 1.1.2 重点难点 .....                                       | 2  |
| 1.1.3 学习指导 .....                                       | 2  |
| 1.2 内容要点 .....                                         | 2  |
| 1.2.1 半导体基础知识 .....                                    | 2  |
| 1.2.2 PN结和二极管 .....                                    | 4  |
| 1.2.3 双极型晶体管 .....                                     | 8  |
| 1.2.4 场效应晶体管 .....                                     | 11 |
| 1.2.5 集成运算放大器组件 .....                                  | 13 |
| 1.3 内容扩展 .....                                         | 14 |
| 1.3.1 晶体管中的 $I_{\text{CBO}}$ 和 $I_{\text{CEO}}$ .....  | 14 |
| 1.3.2 工程上饱和压降 $V_{\text{CES}} = 0.3\text{V}$ 的来历 ..... | 14 |
| 1.3.3 硅光电池 .....                                       | 15 |
| 1.3.4 单结晶体管 .....                                      | 15 |
| 1.3.5 晶闸管(可控硅) .....                                   | 17 |
| 1.3.6 功率 MOS 管 .....                                   | 19 |
| 1.4 解题示例和仿真 .....                                      | 19 |
| 1.4.1 二极管及其应用 .....                                    | 19 |
| 1.4.2 双极型晶体管 .....                                     | 23 |
| 1.4.3 场效应晶体管 .....                                     | 26 |
| 1.4.4 运算放大器组件 .....                                    | 29 |
| 1.5 自检练习 .....                                         | 30 |
| 1.5.1 A 卷和答案 .....                                     | 30 |
| 1.5.2 B 卷和答案 .....                                     | 34 |
| 第2章 信号放大器基础 .....                                      | 38 |
| 2.1 内容特点和学习指导 .....                                    | 38 |
| 2.1.1 内容结构 .....                                       | 38 |
| 2.1.2 重点难点 .....                                       | 38 |
| 2.1.3 学习指导 .....                                       | 39 |
| 2.2 内容要点 .....                                         | 39 |

|       |                    |     |
|-------|--------------------|-----|
| 2.2.1 | 放大器的概念和主要性能指标      | 39  |
| 2.2.2 | 晶体管放大器             | 46  |
| 2.2.3 | 差分放大器              | 49  |
| 2.2.4 | 放大器的频率特性           | 51  |
| 2.2.5 | 负反馈放大器             | 54  |
| 2.3   | 内容扩展               | 57  |
| 2.3.1 | 放大器的功率关系           | 57  |
| 2.3.2 | 多级放大器及其通频带计算       | 58  |
| 2.3.3 | 放大器的瞬态响应           | 59  |
| 2.3.4 | 负反馈放大器的稳定性         | 61  |
| 2.3.5 | 有内部反馈时放大器的输入/输出电阻  | 62  |
| 2.4   | 解题示例和仿真            | 63  |
| 2.4.1 | 放大器的正确组成           | 63  |
| 2.4.2 | 放大器的静态工作点计算        | 67  |
| 2.4.3 | 放大器的指标计算           | 71  |
| 2.4.4 | 放大器的频率特性           | 76  |
| 2.4.5 | 负反馈放大器             | 78  |
| 2.5   | 自检练习               | 81  |
| 2.5.1 | A 卷和答案             | 81  |
| 2.5.2 | B 卷和答案             | 84  |
| 第3章   | 模拟集成电路基础           | 89  |
| 3.1   | 内容特点和学习指导          | 89  |
| 3.1.1 | 内容结构               | 89  |
| 3.1.2 | 重点难点               | 89  |
| 3.1.3 | 学习指导               | 90  |
| 3.2   | 内容要点               | 90  |
| 3.2.1 | 双极型晶体管集成运放         | 90  |
| 3.2.2 | MOS 电流镜            | 93  |
| 3.2.3 | 现代模拟集成电路技术和新型运算放大器 | 94  |
| 3.2.4 | 运放的频率特性及大信号运用      | 97  |
| 3.2.5 | 集成运算放大器的主要特性参数     | 98  |
| 3.2.6 | 集成模拟乘法器            | 99  |
| 3.3   | 内容扩展               | 100 |
| 3.3.1 | 集成电路的工艺知识          | 100 |
| 3.3.2 | 集成电路中的元件           | 102 |
| 3.4   | 解题示例和仿真            | 104 |
| 3.4.1 | 双极型晶体管集成运放         | 104 |
| 3.4.2 | CMOS 集成运算放大器       | 108 |
| 3.4.3 | 现代模拟集成电路技术和新型运算放大器 | 108 |

|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 3.4.4      | 运放的频率特性及大信号运用 .....    | 109        |
| 3.4.5      | 集成模拟乘法器 .....          | 111        |
| 3.5        | 自检练习 .....             | 112        |
| 3.5.1      | A卷和答案 .....            | 112        |
| 3.5.2      | B卷和答案 .....            | 115        |
| <b>第4章</b> | <b>集成运算放大器应用 .....</b> | <b>119</b> |
| 4.1        | 内容特点和学习指导 .....        | 119        |
| 4.1.1      | 内容结构 .....             | 119        |
| 4.1.2      | 重点难点 .....             | 119        |
| 4.1.3      | 学习指导 .....             | 120        |
| 4.2        | 内容要点 .....             | 120        |
| 4.2.1      | 特殊用途集成放大器 .....        | 120        |
| 4.2.2      | 信号处理和控制电路 .....        | 122        |
| 4.2.3      | 比较器及其应用 .....          | 124        |
| 4.3        | 内容扩展 .....             | 127        |
| 4.3.1      | 采样保持器 .....            | 127        |
| 4.3.2      | 比较器的其他应用 .....         | 129        |
| 4.4        | 解题示例和仿真 .....          | 131        |
| 4.4.1      | 信号处理和控制电路 .....        | 131        |
| 4.4.2      | 比较器及其应用电路 .....        | 135        |
| 4.5        | 自检练习 .....             | 139        |
| 4.5.1      | A卷和答案 .....            | 139        |
| 4.5.2      | B卷和答案 .....            | 142        |
| <b>第5章</b> | <b>功率电子电路 .....</b>    | <b>146</b> |
| 5.1        | 内容特点和学习指导 .....        | 146        |
| 5.1.1      | 内容结构 .....             | 146        |
| 5.1.2      | 重点难点 .....             | 146        |
| 5.1.3      | 学习指导 .....             | 146        |
| 5.2        | 内容要点 .....             | 147        |
| 5.2.1      | 功率放大器 .....            | 147        |
| 5.2.2      | 电源电路 .....             | 151        |
| 5.3        | 内容扩展 .....             | 158        |
| 5.3.1      | 甲乙类双电源互补对称功放 .....     | 158        |
| 5.3.2      | 桥式推挽功放电路(BTL) .....    | 159        |
| 5.3.3      | 有温度补偿的齐纳基准电源 .....     | 159        |
| 5.3.4      | 低压差高效率线性集成稳压器 .....    | 160        |
| 5.4        | 解题示例 .....             | 161        |
| 5.4.1      | 功率放大电路 .....           | 161        |
| 5.4.2      | 小功率整流电路 .....          | 164        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.4.3 稳压电路 .....              | 166        |
| 5.4.4 开关电源和变换器 .....          | 169        |
| 5.5 自检练习 .....                | 171        |
| 5.5.1 A 卷和答案 .....            | 171        |
| 5.5.2 B 卷和答案 .....            | 175        |
| <b>第 6 章 通信电子电路</b> .....     | <b>181</b> |
| 6.1 内容特点和学习指导 .....           | 181        |
| 6.1.1 内容结构 .....              | 181        |
| 6.1.2 重点难点 .....              | 182        |
| 6.1.3 学习指导 .....              | 183        |
| 6.2 内容要点 .....                | 183        |
| 6.2.1 通信系统的组成 .....           | 183        |
| 6.2.2 选频放大器 .....             | 183        |
| 6.2.3 宽带功率放大器 .....           | 189        |
| 6.2.4 振荡电路 .....              | 190        |
| 6.2.5 频率变换电路 .....            | 193        |
| 6.2.6 混频电路 .....              | 199        |
| 6.2.7 反馈控制电路 .....            | 202        |
| 6.3 内容扩展 .....                | 205        |
| 6.3.1 基极调幅和集电极调幅电路 .....      | 205        |
| 6.3.2 脉冲计数式鉴频器 .....          | 206        |
| 6.3.3 倍频器 .....               | 206        |
| 6.4 解题示例和仿真 .....             | 208        |
| 6.4.1 选频放大器 .....             | 208        |
| 6.4.2 传输线变压器和振荡器 .....        | 210        |
| 6.4.3 高频功率放大器 .....           | 211        |
| 6.4.4 频率变换电路 .....            | 212        |
| 6.5 自检练习 .....                | 220        |
| 6.5.1 A 卷和答案 .....            | 220        |
| 6.5.2 B 卷和答案 .....            | 223        |
| <b>第 7 章 传感器与信号处理电路</b> ..... | <b>227</b> |
| 7.1 内容特点和学习指导 .....           | 227        |
| 7.1.1 内容结构 .....              | 227        |
| 7.1.2 重点难点 .....              | 227        |
| 7.1.3 学习指导 .....              | 227        |
| 7.2 内容要点 .....                | 228        |
| 7.2.1 传感器概述 .....             | 228        |
| 7.2.2 典型传感器原理 .....           | 229        |
| 7.2.3 传感器接口电路 .....           | 231        |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 7.2.4 | 传感器信号调理专用电路技术 .....         | 235 |
| 7.3   | 内容扩展 .....                  | 238 |
| 7.3.1 | AD590 实现绝对温度和相对温度转换电路 ..... | 238 |
| 7.3.2 | 增益递增式非线性校正电路 .....          | 238 |
| 7.3.3 | 红外线传感器 .....                | 240 |
| 7.4   | 解题示例 .....                  | 241 |
| 7.4.1 | 基本传感器应用 .....               | 241 |
| 7.4.2 | 传感器信号转换及放大电路 .....          | 243 |
| 7.4.3 | 传感器信号传输 .....               | 245 |
| 7.4.4 | 非线性校正和补偿 .....              | 245 |
| 7.5   | 自检练习 .....                  | 247 |
| 7.5.1 | A 卷和答案 .....                | 247 |
| 7.5.2 | B 卷和答案 .....                | 250 |
| 第 8 章 | 数字和模拟混合电路 .....             | 254 |
| 8.1   | 内容特点和学习指导 .....             | 254 |
| 8.1.1 | 内容结构 .....                  | 254 |
| 8.1.2 | 重点难点 .....                  | 254 |
| 8.1.3 | 学习指导 .....                  | 254 |
| 8.2   | 内容要点 .....                  | 255 |
| 8.2.1 | DAC 和 ADC 概述 .....          | 255 |
| 8.2.2 | 数模转换器 DAC .....             | 256 |
| 8.2.3 | 模数转换器 ADC .....             | 257 |
| 8.3   | 内容扩展 .....                  | 260 |
| 8.3.1 | DAC 电路 .....                | 260 |
| 8.3.2 | ADC 电路 .....                | 261 |
| 8.4   | 解题示例 .....                  | 263 |
| 8.4.1 | DAC 电路及其应用 .....            | 263 |
| 8.4.2 | ADC 电路及其应用 .....            | 267 |
| 8.5   | 自检练习 .....                  | 272 |
| 8.5.1 | A 卷和答案 .....                | 272 |
| 8.5.2 | B 卷和答案 .....                | 275 |
| 参考文献  | .....                       | 279 |

# 第 1 章 半导体器件和组件

## 1.1 内容特点和学习指导

本章内容主要是学习半导体材料的基本特性,研究晶体二极管、三极管和场效应管等常用电子器件的基本结构和工作原理,以及它们在小信号放大时的应用基础。讨论理想运算放大器的理想化条件以及由它组成的基本运算电路。这些内容是以后分析复杂电子电路的基础,在后续各章节的学习中将经常用到。因此,学好本章内容可为学习本课程其他章节内容打下良好基础。

### 1.1.1 内容结构

本章总体内容结构如图 1.1.1 所示。首先介绍本征半导体和两种杂质半导体的物质结构,分析了它们的导电特性。指出半导体中载流子的扩散运动和漂移运动将形成扩散电流和漂移电流,前者正比于浓度梯度,后者正比于电场强度。半导体内有两种载流子——电子和空穴,因它们所占的比例相差较大,故分为 N 型和 P 型两种杂质半导体。当将这两种半导体结合在一起就形成了半导体器件的核心——PN 结。从物理概念上定性分析了 PN 结阻挡层宽度随外加电压变化的关系以及单向导电特性的形成,为分析晶体三极管及场效应管做好铺垫。随后介绍了以 PN 为核心的电子器件——二极管、双极型晶体管(BJT)和场效应晶体管(FET)的基本结构和工作原理、特性曲线以及它们在小信号放大应用时的基本原理。最后将运算放大器作为一个电路组件介绍它的基本外部特性和线性运用。

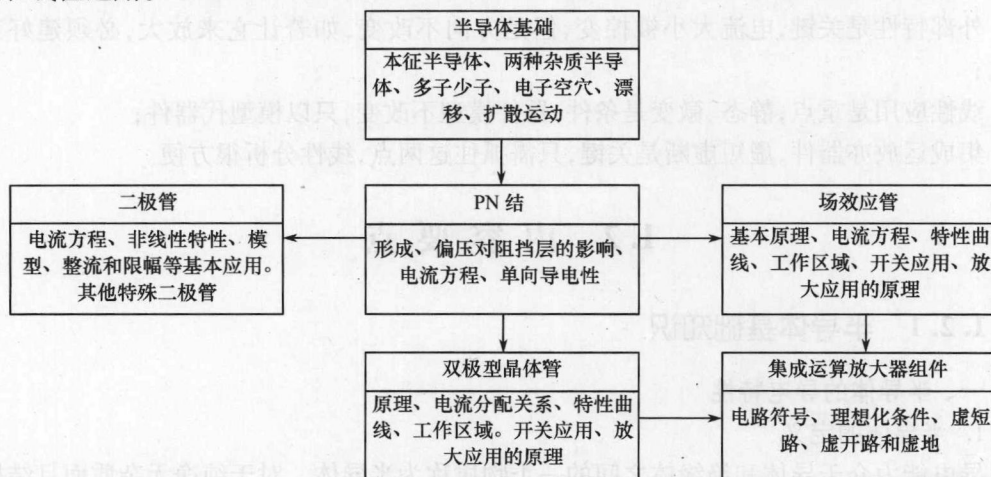


图 1.1.1 第 1 章内容结构

### 1.1.2 重点难点

本章内容较多,既有较为抽象的内容,也有较为具体的内容。在分析载流子的激发与复合的动态平衡、PN 结的形成过程和晶体管内部载流子的传输和分配等抽象内容时,应多动脑勤思考,充分发挥想象力。在分析二极管、三极管和场效应管的基本应用等具体内容时,应注意器件的外部特性,并灵活运用以前所学的电路分析知识。本章知识点多、新概念多,对于初学者来说属于新知识,这就给学习增加了一定的难度。

本章的重点内容主要有 PN 结的单向导电性、二极管的伏安特性曲线、模型和应用;BJT 和 FET 的电压电流关系、特性曲线、工作区域与外加电压的关系及小信号等效电路;理想运算放大器的“虚短路”、“虚断路”和“虚地”概念。

本章的难点内容主要有两个:一是晶体管和场效应管的特性曲线形状与内部载流子运动机理的关系;二是直流工作点和交流小信号概念的建立以及小信号等效电路中的参数意义。尤其是直流(静态工作点)和交流(信号)两者之间的关系,初学者往往容易混淆。

### 1.1.3 学习指导

学习本章内容总体上可以遵循如下原则:了解内部机理,掌握外部特性,内部为外部服务,外部为应用服务。具体应注意如下两个方面:一是注意加强对新概念的理解,在理解的基础上增进记忆,不要死记公式,但要记住一些必要的数据和常用公式;二是在学习中注意把每个概念有机地联系起来,进行综合分析,这样容易加深对问题的理解,建立起局部与宏观的知识联系。

本章主要内容主线和结论可以总结为以下几点:

电子器件 PN 结,结宽随着电压变,扩散漂移有区别,因此单向来导电;  
双极型晶体管,电流控制电流源,基极—射极是控制端,集电极是被控端;  
场效应晶体管,电压控制电流源,栅极—源极是控制端,漏极定是被控端;  
外部特性是关键,电流大小被控变,但是方向不改变,如若让它来放大,必须建好工作点;  
线性应用是重点,静态、微变是条件,器件模型不改变,只以模型代器件;  
集成运放亦器件,虚短虚断是关键,只需抓住这两点,线性分析很方便。

## 1.2 内 容 要 点

### 1.2.1 半导体基础知识

#### 一、半导体的导电特性

##### 1. 半导体的定义

导电能力介于导体和绝缘体之间的一类物质称为半导体。对于纯净无杂质而且结构非常完整的单晶半导体称为本征半导体,它是制造电子器件的基本材料。实际中不存在理想的本征半导体材料,故工程上常将杂质浓度很低的单晶半导体称为本征半导体。

## 2. 半导体的导电性能

半导体材料可以用来制作电子器件是因为其导电特性可以人为控制,即它具有热敏特性、光敏特性和掺杂特性“三性”。

**热敏特性:**半导体受热后,其导电性能将急剧增强(电阻率 $\rho$ 下降)。例如,硅材料温度每升高 $8^{\circ}\text{C}$ 、锗材料温度每升高 $12^{\circ}\text{C}$ , $\rho$ 将下降1倍,温度与 $\rho$ 大体成指数关系。而温度对金属材料电阻率的影响则刚好与半导体材料相反,温度增加时 $\rho$ 也增加。

**光敏特性:**当半导体材料受到光照后,一是使导电能力急剧增强;二是产生电动势。对于金属而言无论光照与否,对导电能力的影响几乎为零,也不会产生电动势。

**掺杂特性:**在本征半导体中,掺入微量有用杂质元素,将大大增强导电能力。如在硅或锗中掺入百万分之一的磷或硼,其电阻率将下降几十至几百万倍。而在金属或绝缘体中,掺杂对电阻率的影响几乎为零。

## 3. 本征激发和复合

**本征激发**是指价电子受热作用(温度、光照和电场等)使价电子得到一定能量,挣脱共价键束缚,形成自由电子的过程。其特点是产生电子—空穴对。

**复合**是指电子和空穴在运动过程中相遇而结合,从而消失电子—空穴对的过程。

本征激发和复合是相互伴随存在的,它存在于本征激发的全过程,形成本征激发过程中的一对矛盾。

在环境温度一定时,本征半导体内载流子的浓度维持在一个数值上,且电子浓度和空穴浓度相等,可表示为

$$n_i = p_i = A_0 T^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E_{\text{co}}}{2kT}\right) \quad (1.2.1)$$

式中: $A_0$ 为一个与半导体材料有关的常数,硅材料的 $A_0 = 3.88 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ,锗材料的 $A_0 = 1.76 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \text{K}^{-3/2}$ ;  $k$ 为波耳兹曼常数, $k = 8.63 \times 10^{-5} \text{eV/K} = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ;  $T$ 为热力学温度; $E_{\text{co}}$ 是 $T=0\text{K}$ 时的禁带宽度,硅的 $E_{\text{co}}$ 为 $1.21\text{eV}$ ,锗为 $0.785\text{eV}$ 。

这里有两个数据经常用到,即常温下( $T=300\text{K}$ )本征硅和锗的热平衡载流子浓度分别为 $1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 和 $2.4 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$ 。

本征激发产生的载流子是半导体中少数载流子的主要来源,在一定条件下它将影响电子器件的温度性能。通常认为,对于硅半导体,温度每升高 $8^{\circ}\text{C}$ ,对于锗半导体,温度每升高 $12^{\circ}\text{C}$ ,本征载流子浓度将增加1倍。

## 4. 杂质半导体

掺杂的目的是为了提高半导体的导电能力。本征半导体经掺杂后形成的半导体称为杂质半导体,它分为N型和P型两类。

**N型半导体**是在本征硅或锗中掺入5价元素(磷、砷等)形成的。由于其在常温下每个杂质原子均可电离施放1个电子,故称其为施主杂质。故N型半导体中自由电子占多数(多子),空穴占少数(少子)。

**P型半导体**是在本征硅或锗中掺入3价元素(铝、硼等)形成的。由于其在常温下每个杂质原子均可电离产生1个空穴,故称其为受主杂质。故P型半导体中空穴占多数(多子),电子占少数(少子)。

在半导体中,两种载流子浓度的乘积等于本征载流子浓度的乘积,即有

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2 = p_i^2 \quad (1.2.2)$$

由此可估算 N 型和 P 型两种杂质半导体的载流子的浓度分别为

$$p_p \approx N_a, \quad n_p = \frac{n_i^2}{p_p} \approx \frac{n_i^2}{N_a} \quad (1.2.3)$$

$$n_n \approx N_d, \quad p_n = \frac{n_i^2}{n_n} \approx \frac{n_i^2}{N_d} \quad (1.2.4)$$

式中: $N_d$  为施主杂质浓度; $N_a$  为受主杂质浓度。

这里需要注意:在一定条件下杂质半导体可以转型。例如,在常温下的 P 型或 N 型半导体,在高温环境下可能呈现本征半导体性质;在 P 型半导体中掺入 5 价元素,且浓度高于原先掺入的 3 价元素,则 P 型半导体就转化成 N 型半导体。同理,也能将 N 型半导体转化成 P 型半导体。这一点也是制造半导体器件的工艺基础。

## 二、半导体中的电流

半导体中的载流子有漂移运动和扩散运动两种运动方式,它们分别形成漂移电流和扩散电流。

载流子在电场(内电场或外电场)作用下的定向移动称为漂移运动,漂移运动产生漂移电流。该电流的大小正比于电场的强弱和载流子浓度的高低。

载流子在浓度差作用下由浓度高的地方向浓度低的地方运动称为扩散运动,扩散运动产生扩散电流。该电流的大小取决于浓度差的大小。

### 1.2.2 PN 结和二极管

#### 一、PN 结的概念

##### 1. PN 结定义

将 P 型半导体和 N 型半导体结合为一体时,在两者交界面形成的特殊薄层称为 PN 结。PN 结也称为阻挡层、耗尽层、势垒区和空间电荷区。

实际器件中的 PN 结通常由掺杂浓度不相等的两种杂质半导体形成,称为不对称 PN 结。如果 P 区杂质浓度高于 N 区,则形成  $P^+N$  结,反之形成  $PN^+$  结。

##### 2. 结宽和势垒电压

PN 结的阻挡层宽度和势垒电压可分别表示为

$$x_m = x_n + x_p = x_n \left( 1 + \frac{N_d}{N_a} \right) \quad (1.2.5)$$

$$V_\phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2} \quad (1.2.6)$$

式中: $x_m$  为阻挡层宽度; $x_n$  和  $x_p$  分别为阻挡层宽度深入 N 区和 P 区的部分。

可见,结宽主要伸向杂质浓度低的一边。在常规杂质浓度下,PN 结宽度约为几微米,势垒电压  $V_\phi$  约为 0.5V ~ 0.7V(硅材料)和 0.2V ~ 0.3V(锗材料)。

势垒电压与温度有关,温度增加时导致本征载流子浓度  $n_i$  增加,故  $V_\phi$  减小,其温度系数约为  $-2.4\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。

## 二、PN 结的单向导电性

PN 结的正向电流大、反向电流小的特性称为单向导电性,它是 PN 结最基本的特性。

当给 PN 结外加正向电压时,外电场方向与内电场方向相反,外电场削弱了内电场,使阻挡层变窄。这就打破了 PN 结的动态平衡,使多子的扩散更加容易进行。因此 P 区中有大量空穴、N 区有大量电子越过耗尽层,从而形成较大的正向电流(扩散电流)。

当给 PN 结外加反向电压时,情况与上述相反,此时仅有浓度很低的少数载流子做漂移运动,故形成的反向电流很小(漂移电流)。

PN 结在外部正、反向电压的作用下,内部载流子的运动结果在外部的体现可用伏安特性表示,即

$$I_D = I_S(e^{V_D/V_T} - 1) \quad (1.2.7)$$

式中:  $V_D$  为外加电压;  $I_D$  为流过 PN 结的电流;  $I_S$  为反向饱和电流,在室温下其值很小,硅 PN 结的  $I_S < 1\text{nA}$ ,锗 PN 结的  $I_S < 1\mu\text{A}$ ;  $V_T$  称为热电压或温度电压当量,室温(300K)下为 26mV。

## 三、PN 结的电容

PN 结电容有势垒电容  $C_T$  和扩散电容  $C_D$  两种。

从 PN 结结构上看类似于平板电容器,这个电容器就是势垒电容  $C_T$ 。P 区和 N 区相当于电容器的两个极板,阻挡层相当于绝缘介质。

PN 结在外加正向电压作用下,P 区空穴向 N 区扩散,N 区存在非平衡空穴,相当于 N 区储存正电荷。同理, N 区电子向 P 区扩散,P 区存在非平衡电子,相当于 P 区储存负电荷。当正向电压变化时,储存在 P 区和 N 区的正负电荷也发生变化,相当于电容器充放电。扩散电容  $C_D$  就是表示这种充放电效应的一种等效电容。

$C_T$  和  $C_D$  是并联关系,PN 结总电容为  $C_J = C_T + C_D$ 。但在正向应用时结电容以  $C_D$  为主,反向应用时结电容以  $C_T$  为主。例如,变容二极管就是利用了 PN 结的势垒电容,其在使用时必须加反向电压。

应当注意,  $C_T$  和  $C_D$  都是非线性电容。

## 四、二极管及其应用

二极管是由 PN 结加上封装和引线后构成的,所以,二极管本质上还是一个 PN 结。因此,二极管具有与 PN 结相同的特性。

### 1. 二极管的特性

#### 1) 伏安特性

二极管的电流方程与 PN 结电流方程式(1.2.7)相同。图 1.2.1 是二极管的伏安特性曲线,显然它不是线性的,故二极管是非线性器件。

二极管伏安特性的特点是当二极管外加正向电压不大于  $V_{DT}$  时,外电场尚未克服内电场,扩散运动难以进行,故  $I_D$  极小,把  $V_{DT}$  称为门槛电压。外加正向电压大于  $V_{DT}$  后,  $I_D$  随  $V_D$  的增加而快速增加。由于在二极管正常工作电流范围内,相应的正向电压变化范围不大,因此,工程上并不计算二极管的正向电压,常用估算法。通常,锗二极管  $V_{Don} = 0.3\text{V}$ ,硅二极管  $V_{Don} = 0.7\text{V}$ 。

二极管加反向电压时,反向电流  $I_S$  随反向电压的增加而略有增加,这是二极管表面

漏电流的影响。反向电压达到  $V_R$  时,  $I_s$  突然增加,这时二极管发生了击穿,  $V_R$  称为二极管的反向击穿电压。

## 2) 交/直流电阻

二极管反向运用时近似开路,讨论其电阻值意义不大。如图 1.2.2 所示,正向运用时直流电阻  $R_D$  和交流电阻  $r_d$  分别定义为

$$R_D = \frac{V_{DQ}}{I_{DQ}}, \quad r_d = \left. \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \right|_Q$$

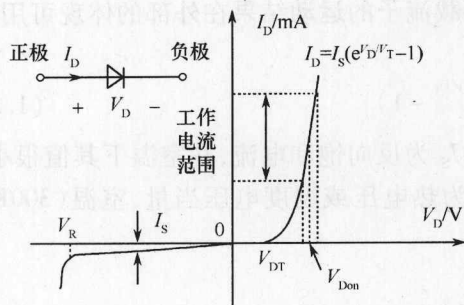


图 1.2.1 二极管的伏安特性

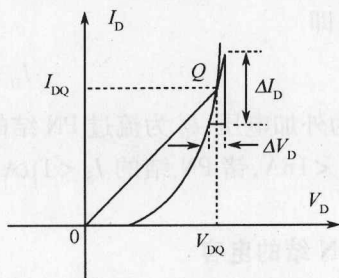


图 1.2.2 交/直流电阻的几何意义

由二极管的电流方程容易得到常温下的  $r_d$  为

$$r_d = \frac{V_T}{I_{DQ}} = \frac{26\text{mV}}{I_{DQ}(\text{mA})} \quad (1.2.8)$$

由于二极管是非线性器件,  $R_D$  和  $r_d$  均与  $Q$  点的位置有关,它们不是常数,但在数值上一般满足  $R_D > r_d$  的条件。  $R_D$  的数值常在几十欧 ~ 几千欧之间,而  $r_d$  通常在几欧 ~ 几十欧之间。

## 3) 二极管的等效电路

综合考虑二极管的各种因素,可以得到二极管的微变等效电路如图 1.2.3 所示。图中  $r_j$  是结电阻,  $r_s$  为体电阻和引线电阻之和,  $C_T$  和  $C_D$  为势垒电容和扩散电容。  $r_F$  为正向应用时的交流电阻,正向应用时以扩散电容  $C_D$  为主。  $r_R$  为反向应用时的交流电阻,因其值很大,故  $r_s$  可忽略。

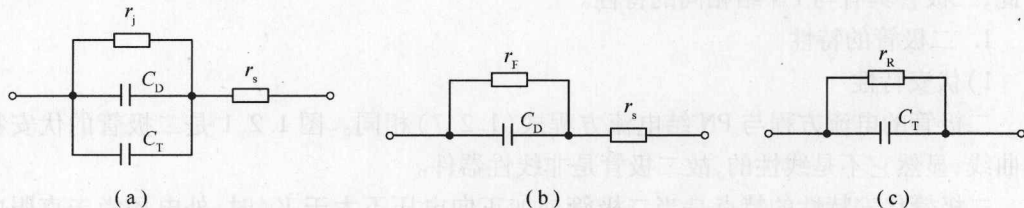


图 1.2.3 二极管的等效电路

(a) 二极管等效电路; (b) 正向应用等效电路; (c) 反向应用等效电路。

## 2. 二极管的模型

为了使电路分析简单,工程上常根据实际器件特性和不同应用场合将二极管特性简化。大信号运用时主要用二极管的单向导电性,故常把二极管伏安特性用折线近似。图

1.2.4 是二极管大信号运用时常用的 3 种电路模型,实际中可根据需要选用。

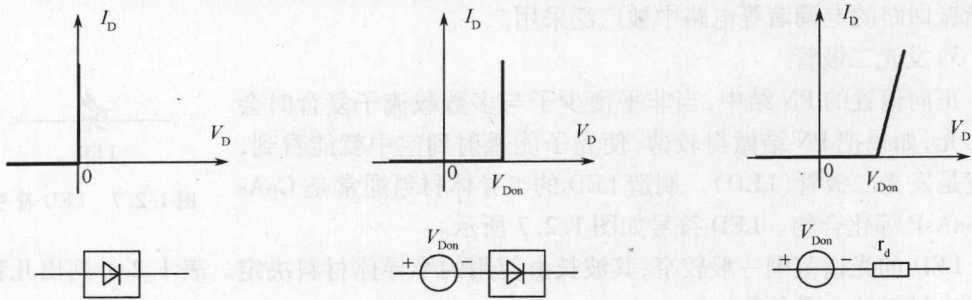


图 1.2.4 二极管的大信号模型

3. 特殊二极管

1) 肖特基势垒二极管

肖特基势垒二极管(SBD)由金属与低掺杂的 N 型半导体接触形成,得到的金属 - 半导体结类似于 PN 结,也具有单向导电性(从金属到半导体,金属为正极,半导体为负极),如图 1.2.5 所示。肖特基二极管与普通 PN 结二极管相比有如下两点不同:

(1)SBD 中为多子导电,没有 PN 结正偏时的少数电荷存储效应,故 SBD 从导通到截止或从截止到导通的转换速度要比 PN 结高得多。它被广泛应用于高速高频电子电路中。

(2)SBD 的正向导通压降比 PN 结低。例如,硅材料制成的 PN 结正向导通电压  $V_{Don}$  为 0.6V ~ 0.8V,而锗材料制成的 SBD 的  $V_{Don}$  为 0.3V ~ 0.5V。SBD 也可用 GaAs(砷化镓)材料制作,但其  $V_{Don}$  要比硅材料的大,大约为 0.7V。

2) 变容二极管

变容二极管呈现的电容是 PN 结的势垒电容,其电容量随外加反向电压的变化而变化。变容二极管在使用时必须外加反向偏压,因其反向电流很小,因此,是一个较为理想的电容器件,如图 1.2.6 所示。

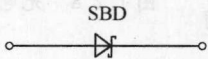


图 1.2.5 肖特基势垒二极管

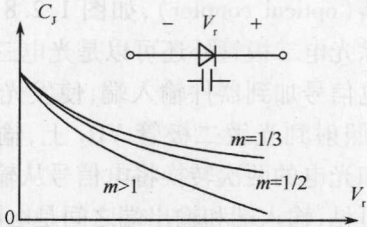


图 1.2.6 变容二极管

变容二极管的电容量与外加电压的关系为

$$C_j = C_{j0} / (1 + V_r / V_j)^m \tag{1.2.9}$$

式中:  $C_{j0}$  为  $V_r = 0$  时的结电容;  $V_j$  为 PN 结的势垒电压;  $m$  为电容变化指数,其值与 PN 结的结构和杂质浓度分布有关,缓变结约为 1/3,突变结约为 1/2,超突变结大于 1,在实际应用中,常通过  $m$  来进行优化使与电容与电压密切相关,例如,在直接调频电路中常选用  $m = 2$  的变容二极管。

变容二极管的电容变化范围在几皮法~几百皮法之间,它在压控振荡器、频率调制器和谐振回路的电调谐等电路中被广泛采用。

### 3) 发光二极管

正向偏置的PN结中,当非平衡少子与多数载流子复合时会发出光,如果把PN结做得较薄,使光子能透射到空中就能看到,这就是发光二极管(LED)。制造LED的半导体材料通常是GaAs和GaAsP等化合物。LED符号如图1.2.7所示。

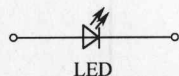


图 1.2.7 LED 符号

LED的光谱范围一般较窄,其波长由使用的半导体材料决定。表1.2.1列出几种常见发光材料的主要参数。

表 1.2.1 几种常见发光材料的主要参数

| 颜色 | 波长/nm | 基本材料        | 10mA 时正向压降/V |
|----|-------|-------------|--------------|
| 红外 | 900   | 砷化镓(GaAs)   | 1.3~1.5      |
| 红  | 655   | 磷砷化镓(GaAsP) | 1.6~1.8      |
| 鲜红 | 635   | 磷砷化镓(GaAsP) | 2.0~2.2      |
| 黄  | 583   | 磷砷化镓(GaAsP) | 2.0~2.2      |
| 绿  | 565   | 磷化镓(GaP)    | 2.2~2.4      |

LED的工作电流为几毫安至几十毫安之间,正向压降比普通二极管大。LED既可单个使用,也可做成7段式或点阵式使用,它们被广泛应用于电平指示、显示器、交通信号灯和照明等领域。

### 4) 光电二极管和光电耦合器

使反偏的PN结被光照,则当光子能量足够大时,阻挡层内将激发产生大量电子一空穴对,则在反偏电压作用下在外电路形成反向电流。这就是光电二极管(photodiode)。光电二极管是一种简单的光电传感器。

把发光二极管和光电二极管做在一起,就构成光电耦合器(optical coupler),如图1.2.8所示。其中光电器件除光电二极管外还可以是光电三极管或光敏电阻等。电信号加到器件输入端,使发光二极管 $VD_1$ 发光,光线照射到光敏二极管 $VD_2$ 上,输出光电流。通过电光和光电的两次转换将电信号从输入端传送到输出端。可见,输入端和输出端之间是电隔离的。

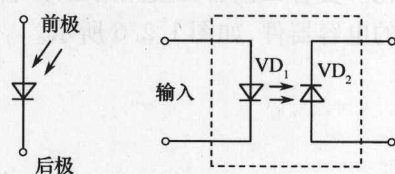


图 1.2.8 光电管和光电耦合器

光电耦合器中发光管和光电管并非一定需要封装在一起,它也可以利用光纤远距离实现,这在光纤通信连接中已经做到。

光电耦合器的应用十分广泛。例如,在数据采集系统中用高速光电耦合器隔离数据线和地址线,可以防止计算机系统对高灵敏度模拟电路产生干扰。用它组成隔离放大器可以有效减少放大器中通过公共地线或公共电源引入的各种干扰,提高电路的抗干扰性。

## 1.2.3 双极型晶体管

为了保证晶体管具有良好的电流放大能力,在内部结构上,基区要做得很薄(几微