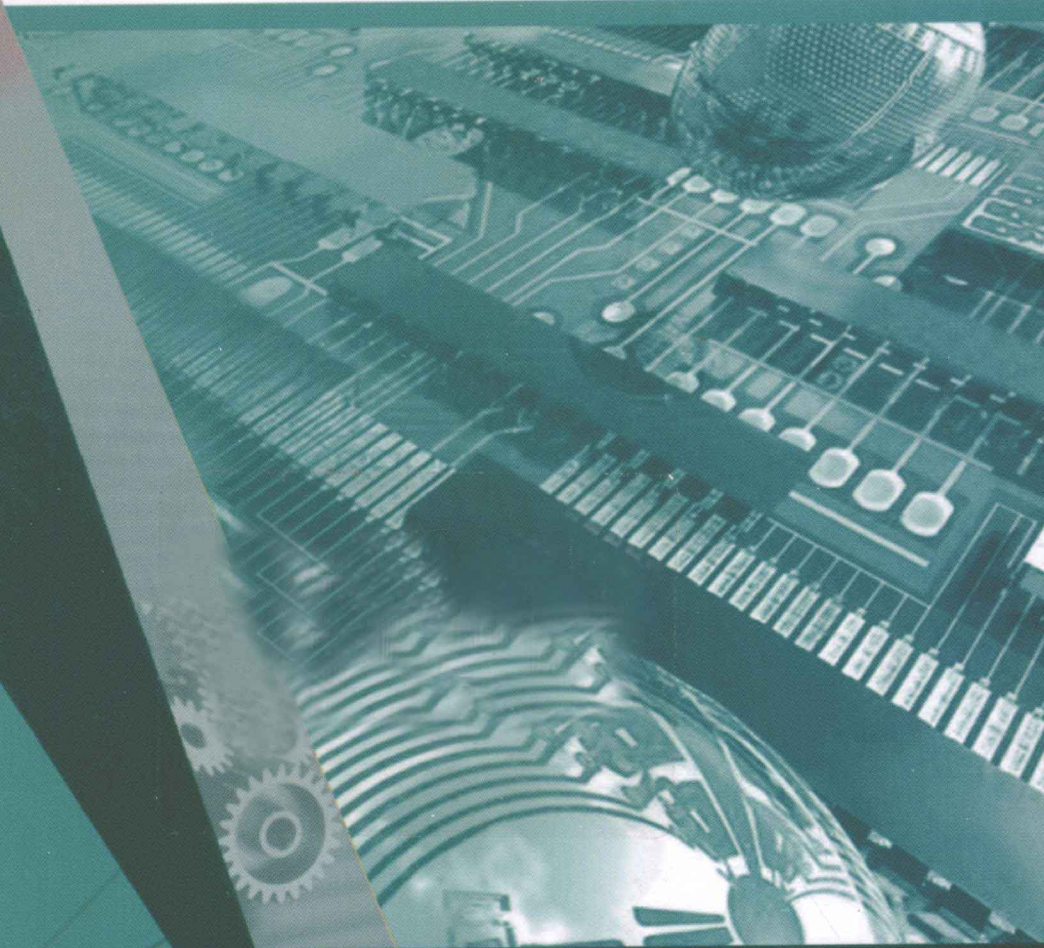


高职高专机电一体化专业规划教材

# 电子技术

## *DIANZI JISHU*

杨国荣 主 编  
靳丽君 赵 娟 梁亚宁 贾宇向 副主编



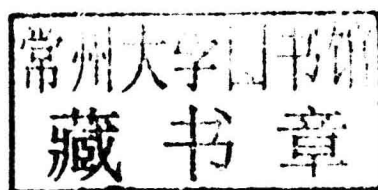
重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

# 电子技术

杨国荣 主 编

靳丽君 赵 娟 梁亚宁 贾宇向 副主编



重庆大学出版社

## 内容简介

本书以“任务驱动”的模式进行编写,便于实现“项目化”教学。在内容上注重“以应用为目的,理论作铺垫”,注重集成电路的分析及应用。

全书将电子技术的应用分为 10 个项目。其中,模拟电子技术应用分为直流稳压电源的制作、简单助听器的制作、数学运算放大器应用、三角波发生器的制作、正弦波振荡器的制作 5 个项目;数字电子技术应用分为组合逻辑电路分析与设计、八位双向移位寄存器设计、集成计数器应用、555 定时器应用、数/模转换器分析 5 个项目。

本书内容由浅入深,图文并茂,理论联系实际,每个项目都安排了实训环节,可根据实际情况进一步加强实践能力的培养。另外,每个项目还编写了相应的思考和练习题,以提高学生分析和设计电路的能力,达到理论和实践的统一。本书可作为高职院校机电一体化、电气化、机车、机械、通信、自动控制、电子等专业教材,也可以作为专业培训教材以及相关专业技术人员自学用书和参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

电子技术/杨国荣主编. —重庆:重庆大学出版社,2013.5

高职高专机电一体化专业规划教材

ISBN 978-7-5624-7378-7

I. ①电… II. ①杨… III. ①电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 096565 号

## 电子技术

杨国荣 主 编

靳丽君 赵 娟 梁亚宁 贾宇向 副主编

策划编辑:周 立

责任编辑:文 鹏 版式设计:周 立

责任校对:刘 真 责任印制:赵 晟

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023)88617183 88617185(中小学)

传真:(023)88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

万州日报印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:21 字数:511千

2013 年 5 月第 1 版 2013 年 5 月第 1 次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-7378-7 定价:39.50 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 前 言

为了适应高等职业教育改革的发展需求,本书在编写的过程中注重强化学生的实践能力,通过一个个项目的任务完成,帮助学生由浅入深地掌握电子技术的应用和发展。

电子技术是机电一体化、应用电子技术、电气自动化技术、通信技术等专业的基础课,是一门理论性和实践性较强的课程。随着我国教育的不断深入和高等职业教育的迅速发展,尤其是目前采用的基于工作过程的教学方式,对高等职业教育的教材建设提出了更高的要求。为了适应这一要求和教学需要,我们编写了本教材。在教材编写过程中,为了使教材内容符合“简单、实用、够用”的原则,力求做到从学生的实际出发,降低难度,减少定量计算,由浅入深,环环相扣。

本教材的主要特色:体现了目前我国高职教育的主流思想,基于工作过程的教学理念,采用项目式教学法,由工作任务驱动,引出学习内容,使学生在“教”中“学”、“做”中“学”,真正做到学以致用。本教材由10个项目构成,在给定任务的前提下,引出相应的理论知识,并以理论知识为铺垫,指导学生理解每个学习任务的意义;通过工作过程的引导,使理论知识和实际操作融合,最终完成一个独立项目的设计。在内容的安排上,本节突出基本理论、基本概念和基本分析方法,删掉了复杂的公式推导过程,回避了集成电路内部电路的分析,以器件的外特性及应用为主,并遵循人的认知规律和职业成长规律,做到深入浅出、循序渐进、由易到难,便于学生自主学习。每个项目后均有小结、习题。本书备有电子课件,更有利于组织教学和学生自学。本书在内容的选取及组织方面,也完全适用于以往的教学形式,可作为相关专业电子技术的教学及参考用书。

本书由西安铁路职业技术学院杨国荣任主编,负责全书的组织、统稿工作,并编写了项目7、项目8;西安铁路职业技术学院的靳丽君(编写项目3、项目4)、赵娟(编写项目2)、梁亚宁(编写项目6)以及河南广播电视大学的贾宇向(编写项目1、项目5、项目9、项目10)任副主编,他们对教材的编写提出了很多建议。

由于编者水平有限,书中难免存在一些错误和不妥之处,敬请读者批评指正以便再版修订时改正。

编 者

2013年1月29日

# 目 录

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 项目 1 直流稳压电源的制作          | 1   |
| 任务 1.1 二极管的认识与检测        | 2   |
| 任务 1.2 二极管整流电路          | 14  |
| 任务 1.3 三端式集成稳压器的应用      | 19  |
| 实训环节                    | 26  |
| 实训 1.1 二极管的识别与检测        | 26  |
| 实训 1.2 桥式整流电容滤波电路的仿真及调试 | 29  |
| 实训 1.3 三端集成直流稳压电源的组装与调试 | 32  |
| 项目小结                    | 35  |
| 思考与练习                   | 36  |
| 项目 2 简单助听器的制作           | 40  |
| 任务 2.1 三极管的认识与选择        | 41  |
| 任务 2.2 三极管放大电路分析与应用     | 52  |
| 任务 2.3 简单助听器放大电路原理与组装   | 82  |
| 实训环节                    | 88  |
| 实训 2.1 三极管的识别与检测        | 88  |
| 实训 2.2 单管共射放大电路         | 90  |
| 项目小结                    | 91  |
| 思考与练习                   | 92  |
| 项目 3 数学运算放大器应用          | 98  |
| 任务 3.1 集成运算放大器认知        | 99  |
| 任务 3.2 负反馈放大器分析         | 105 |
| 任务 3.3 数学运算放大器应用        | 111 |
| 实训环节                    | 116 |
| 实训 3.1 集成运放的检测与识别       | 116 |
| 实训 3.2 比例运算电路的仿真测试      | 116 |
| 实训 3.3 加减法运算电路的仿真测试     | 119 |
| 实训 3.4 微积分电路的仿真测试       | 121 |
| 项目小结                    | 124 |
| 思考与练习                   | 124 |
| 项目 4 三角波发生器的制作          | 129 |
| 任务 4.1 信号放大与检测电路分析      | 130 |



|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 任务 4.2 信号处理电路应用 .....         | 132 |
| 实训环节 .....                    | 138 |
| 实训 4.1 比较器电路的仿真测试 .....       | 138 |
| 实训 4.2 方波发生器的仿真测试 .....       | 144 |
| 实训 4.3 三角波发生器的仿真测试 .....      | 146 |
| 实训 4.4 锯齿波发生器的仿真测试 .....      | 147 |
| 【项目制作】 三角波、方波发生器的组装与调试 .....  | 147 |
| 项目小结 .....                    | 151 |
| 思考与练习 .....                   | 151 |
| <b>项目 5 正弦波振荡器的制作</b> .....   | 154 |
| 任务 5.1 正弦波振荡电路 .....          | 155 |
| 任务 5.2 常见的正弦波振荡电路 .....       | 158 |
| 实训环节 .....                    | 163 |
| 实训 LC 振荡电路 .....              | 163 |
| 项目小结 .....                    | 166 |
| 思考与练习 .....                   | 167 |
| <b>项目 6 组合逻辑电路分析与设计</b> ..... | 168 |
| 任务 6.1 数字电路基础学习 .....         | 169 |
| 任务 6.2 集成逻辑门电路应用 .....        | 186 |
| 任务 6.3 组合逻辑电路分析与设计 .....      | 195 |
| 实训环节 .....                    | 217 |
| 实训 6.1 组合逻辑电路分析与测试 .....      | 217 |
| 实训 6.2 组合逻辑电路的设计与测试 .....     | 219 |
| 项目小结 .....                    | 221 |
| 思考与练习 .....                   | 222 |
| <b>项目 7 八位双向移位寄存器设计</b> ..... | 228 |
| 任务 7.1 触发器功能分析 .....          | 229 |
| 任务 7.2 时序逻辑电路设计 .....         | 239 |
| 任务 7.3 八位移位寄存器实现 .....        | 247 |
| 实训环节 .....                    | 253 |
| 实训 7.1 触发器及其应用 .....          | 253 |
| 实训 7.2 移位寄存器及其应用 .....        | 256 |
| 项目小结 .....                    | 260 |
| 思考与练习 .....                   | 260 |
| <b>项目 8 集成计数器应用</b> .....     | 264 |
| 任务 8.1 计数器类型分析 .....          | 265 |
| 任务 8.2 典型计数器集成芯片介绍 .....      | 270 |
| 任务 8.3 集成计数器应用 .....          | 277 |
| 实训环节 .....                    | 281 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 实训 8.1 集成计数器测试与应用·····         | 282 |
| 实训 8.2 计数显示器设计与测试·····         | 283 |
| 项目小结 ·····                     | 284 |
| 思考与练习 ·····                    | 285 |
| <b>项目 9 555 定时器应用</b> ·····    | 288 |
| 任务 9.1 单稳态触发器·····             | 289 |
| 任务 9.2 施密特触发器电路·····           | 297 |
| 任务 9.3 多谐振荡器·····              | 302 |
| 实训环节 ·····                     | 304 |
| 实训 “叮咚”门铃电路 ·····              | 304 |
| 项目小结 ·····                     | 305 |
| 思考与练习 ·····                    | 305 |
| <b>项目 10 数/模转换器分析</b> ·····    | 307 |
| 任务 10.1 数/模转换器(D/A 转换器) ·····  | 308 |
| 任务 10.2 模 /数转换器(A/D 转换器) ····· | 315 |
| 实训环节 ·····                     | 322 |
| 实训 加法计数器数/模转换显示器 ·····         | 322 |
| 项目小结 ·····                     | 324 |
| 思考与练习 ·····                    | 324 |
| <b>参考文献</b> ·····              | 325 |

# 项目 1

## 直流稳压电源的制作

### 【项目剖析】

直流稳压电源实质上是一种电能转换设备,能将来自电网等的交流电转化为稳定的直流电,一般由交流电源变压器、整流、滤波和稳压电路等几部分组成,如图 1.1 所示。直流稳压电源在国防、科研、教学、工矿企业、电解电镀以及充电设备等方面有广泛应用。

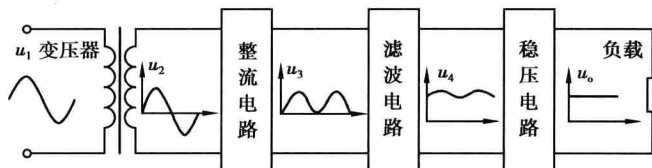


图 1.1 直流稳压电源的组成

那么,集成稳压电源是如何工作的?什么样的元件可以构成这样的电路?相信通过本项目的学习,这样的问题就会迎刃而解。

本项目由以下三个任务组成:

任务 1.1 二极管的认识与检测;

任务 1.2 单相整流滤波电路的分析与应用;

任务 1.3 三端式集成稳压器的应用。

### 【项目目标】

根据直流稳压电源的组成,学习本项目的主要目标为:

1. 掌握半导体特性,PN 结的形成及导电特性,二极管的应用,以及如何用万用表测出二极管的极性及其质量好坏。
2. 掌握半波整流电路、单相桥式整流电路、滤波电路的电路图及工作原理。
3. 掌握三端式集成稳压器的类型及应用电路。



## 任务 1.1 二极管的认识与检测

### 【任务目标】

1. 了解半导体的基本知识,掌握 PN 结的形成及特性。
2. 掌握二极管结构和符号、伏安特性、主要参数、理想等效电路。
3. 掌握二极管的应用电路。
4. 掌握用万用表检测二极管的极性及质量好坏的方法。

半导体器件具有体积小、质量轻、能量转换率高和使用寿命长等优点,是现代电子技术广泛使用的器件之一。本任务在阐述半导体基本知识的基础上,主要介绍半导体二极管的结构、主要参数、伏安特性以及特殊二极管在电子技术中的应用。

### 1.1.1 半导体的基本知识

#### (1) 半导体材料的基本特性

自然界的物体按其导电能力的强弱可分为导体、半导体和绝缘体三大类。导体内部存在大量摆脱了原子核束缚的自由电子,在外电场的作用下,这些自由电子将作定向运动而形成较大的电流,因此导电能力很强,其电阻率小于  $10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}$ ,如金、银、铜、铝等金属都属于导体。绝缘体其原子核对最外层电子的束缚力很大,常温下自由电子很少,很难导电,电阻率大于  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$ ,如塑料、云母、工业橡胶等属于绝缘体。而半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,电阻率在  $10^{-4} \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$  范围内,如锗、硅、硒、砷化镓及许多金属氧化物和金属硫化物等都属于半导体材料。

半导体一般呈晶体结构,其原子核对价电子的束缚较弱,其特殊的原子结构和导电机理决定了半导体具有以下特性。

#### 1) 热敏性

随着温度的升高,半导体导电能力会变强。利用这一特性,可以制成热敏电阻和热敏元件。如纯净的锗从  $20^\circ\text{C}$  升高到  $30^\circ\text{C}$  时,它的电阻率几乎减小为原来的  $1/2$ 。

#### 2) 光敏性

半导体受到光的照射,会显著改变其导电性,光照越强,导电能力越强。如一种硫化镉薄膜,在暗处其电阻为几十兆欧姆,光照后,其电阻可以下降到几十千欧姆。利用这一特性,可以制成光敏传感器、光电控制开关及火灾报警装置。

#### 3) 掺杂特性

掺杂特性是指半导体的导电能力因掺入适量杂质而发生很大的变化。如在半导体硅中,只要掺入亿分之一的硼,电阻率就会下降到原来的几万分之一。利用这一特性,可以制造出不同性能、不同用途的半导体器件。

**【思考】**半导体材料区别于一般导体的特性有哪些?

#### (2) 本征半导体

按其是否掺入杂质,半导体可分为本征半导体和杂质半导体两类。

本征半导体是一种完全纯净的、结构完整的半导体晶体。

例如,硅和锗最外层都是 4 个价电子,原子的价电子不仅受到自身原子核的束缚,还受到

相邻原子核的吸引,即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这种按四角形组成的晶体点阵称为“共价键”,原子结构模型如图 1.2 所示。

本征半导体在热力学温度  $T=0\text{ K}$  ( $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) 下、无外部激发能量时,每个电子都处于最低能量状态,所有的电子都被束缚在共价键中,整个晶体中没有可以导电的自由电子,所以,绝对零度时的本征半导体是“绝缘体”。

共价键中的电子虽然受到共价键的束缚,但是在一定的温度下,其中一部分电子会因为受热而得到足够的能量以摆脱共价键的束缚成为自由电子,结果在原来的共价键处留下了空位,这个空位称为空穴。这种现象称为热激发,也称为本征激发。在本征半导体中,由于热激发作用,每出来一个自由电子,就会留下一个空穴。在外电场或其他能源的作用下,相邻的价电子可以填补到这个空穴中,而在这个电子的位置上又留下了新的空穴,新的空穴又被其相邻的其他价电子填补。可见,自由电子和空穴总是成对地产生或消失,因此在半导体中存在两个载流子:带负电的自由电子和带正电的空穴,自由电子和空穴运动的方向正好相反,这也是半导体导电方式的最大特点,也是半导体与金属在导电机理上的本质差别。本征激发产生的自由电子—空穴对如图 1.3 所示。

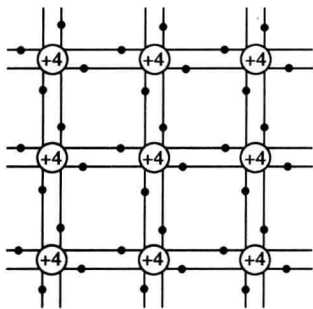


图 1.2 共价键结构图

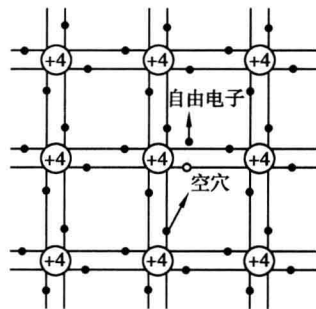


图 1.3 本征激发

### (3) 杂质半导体

**【问题的提出】**为什么对半导体进行掺杂?

在本征半导体中掺入某种微量杂质后,其导电能力可增加几十万倍甚至几百万倍。根据掺入杂质不同,半导体可分为电子型半导体(N 型半导体)和空穴型半导体(P 型半导体)。

#### 1) P 型半导体

在纯净的硅(或锗)中掺入微量的 3 价元素硼(或铝、镓等)后,由于硼原子数量少,不能改变硅的共价键结构,掺入的硼原子占据了一个硅原子原来的位置,并与邻近硅原子形成共价键,硼因为少一个电子而成为不稳定结构,它很容易捕获一个电子而成为具有稳定结构的负离子。当硼原子捕获的这个电子是相邻某个硅原子的价电子时,必然产生一个空穴。这样,每掺入一个三价元素,在杂质半导体中便产生一个空穴和一个杂质负离子,如图 1.4(a) 所示。杂质负离子不能移动,所以不能参与导电,空穴导电为这种杂质半导体主要的导电方式,故称为空穴型半导体,即 P 型半导体。在这种杂质半导体中,空穴为多数载流子,由掺杂和热激发产生。自由电子为少数载流子,仅由热激发产生。

#### 2) N 型半导体

在 4 价元素的硅(或锗)晶体中掺入微量的 5 价元素磷(或砷、锑等)后,磷原子将散布于硅原子中,且替代了晶体点阵中某些位置上的硅原子。掺杂的结果是每掺入一个 5 价的元

素,就会产生一个不导电的杂质正离子和一个自由电子,如图 1.4(b)所示。

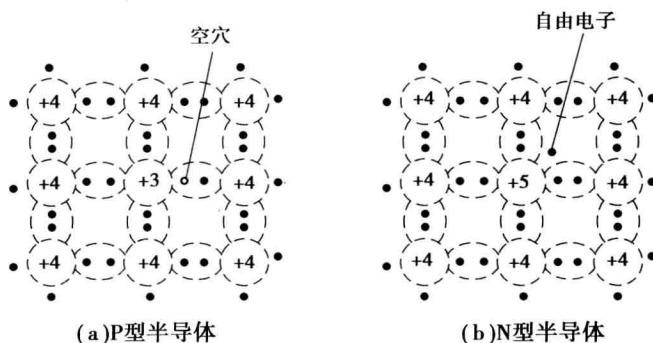


图 1.4 两种杂质半导体

无论是 P 型半导体还是 N 型半导体,它们都有一种载流子占多数,但是总体上仍然保持电中性。在外电场的作用下,杂质半导体的导电能力有较大的增强,但是只有将两种杂质半导体做成 PN 结之后才能成为半导体器件。

### 1.1.2 PN 结的形成

如果将一块半导体的一侧掺杂成为 P 型半导体,而另一侧掺杂成为 N 型半导体,则在二者的交界处就会形成一个 PN 结。

#### (1) PN 结的形成

在 P 型和 N 型半导体结合后,由于其界面两侧自由电子和空穴的浓度相差悬殊,N 区的多数载流子自由电子向 P 区扩散,P 区多数载流子空穴向 N 区扩散,当电子和空穴相遇时,将发生复合而消失。它们扩散的结果就使 P 区一侧失去空穴,留下了带负电的杂质离子;N 区一侧失去自由电子,留下了带正电的杂质离子。于是,在界面两侧将分别形成不能移动的正、负离子区(半导体中的正、负离子处于晶格位置而不能移动,因此不参与导电)。这些不能移动的带电粒子在 P 和 N 区界面附近,形成了一个很薄的空间电荷区,这就是所谓的 PN 结,如图 1.5 所示。显然,PN 结内存在一个由 N 区指向 P 区的内电场。内电场的形成将阻止多数载流子的继续扩散,另一方面又会促进少数载流子的漂移,即 N 区的少数载流子空穴向 P 区移动,P 区的少数载流子电子向 N 区移动。因此,在界面两侧存在两种对立的运动,漂移运动使 PN 结变窄,扩散运动使 PN 结变宽。当扩散运动产生的扩散电流和漂移运动产生的漂移电流大小相等,两种运动达到动态平衡时,PN 结宽度不再变化。由于内电场的存在,使载流子几乎不能在 PN 结内部停留,所以 PN 结也称为耗尽层。

综上所述,PN 结形成原因主要有三个:载流子的浓度差引起多子的扩散,复合使界面形成空间电荷区(耗尽层),扩散和漂移达到动态平衡。

**【思考】**PN 结是如何形成的? 形成过程中存在哪两种运动?

#### (2) PN 结的单向导电性

无外加电压时,PN 结处于平衡状态,流过 PN 结的总电流为零。在 PN 结的两端外加不同极性的电压时,PN 结呈现出不同的导电性能,这称为 PN 结的单向导电性。

##### 1) 在外加正向电压时,PN 结处于导通状态

PN 结的 P 区接高电位,N 区接低电位,称 PN 结外加正向电压或 PN 结正向偏置(简称正

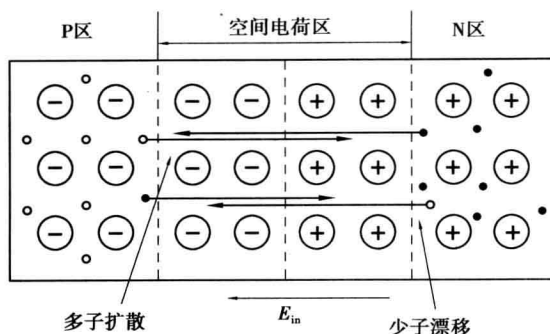


图 1.5 PN 结的形成

偏),如图 1.6 所示。正偏时,外电场与内电场相反,因此削弱了内电场,PN 结原有平衡状态被打破,空间电荷区变窄,有利于多数载流子的扩散,而不利于少数载流子的漂移。PN 结多数载流子的扩散电流通过回路形成正向电流  $I$ ,其方向是从 P 区到 N 区。当外加电压增加到一定数值之后,正向电流将呈指数式上升,此时 PN 结对外电路呈现很小的电阻,称为正向导通。图 1.6 中实心点代表电子,空心圈代表空穴。此时,外加电场  $E_{out}$  与内电场  $E_{in}$  的方向相反,其作用是增强扩散运动而削弱漂移运动。

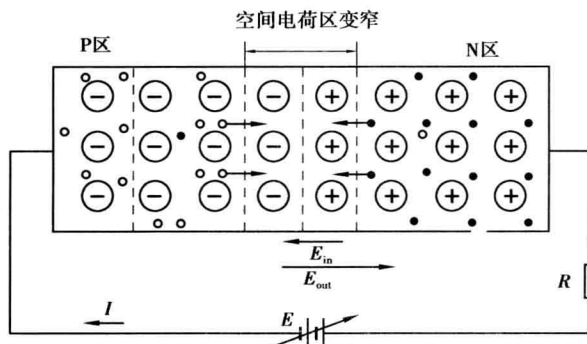


图 1.6 PN 结加正向偏置导通时的情况

## 2) 在外加反向电压时,PN 结处于截止状态

当外加电压使 PN 结的阳极电位低于阴极时,称 PN 结外加反向电压或 PN 结反向偏置(简称反偏),如图 1.7 所示。此时,外加电场  $E_{out}$  与内电场  $E_{in}$  的方向一致,并与内电场一起阻止扩散运动而促进漂移运动。其结果是使空间电荷区变宽,PN 结呈现高电阻(一般为几千欧姆至几百千欧姆)。同时,由于漂移运动占主导,而少子由本征激发产生,数量极少,因而由少子形成的反向电流很小( $\mu A$  级),近似分析时可忽略不计。此时 PN 结截止,相当于开关的断开状态。在一定温度下,当外加反向电压超过某个值(大约零点几伏)后,反向电流将不再随外加反向电压的增加而增大,所以又称其为反向饱和电流  $I_s$ 。

由上可知,PN 结正偏时,正向电阻很小,正向电流较大,呈导通状态;PN 结反偏时,反向电阻很大,反向电流非常小,呈截止状态。这就是 PN 结的单向导电性。

**【重要结论】**PN 结的单向导电性即:正向导通,反向截止。

## 3) PN 结的反向击穿

当 PN 结的反向电压增加到一定数值时,反向电流突然快速增加,此现象称为 PN 结的反

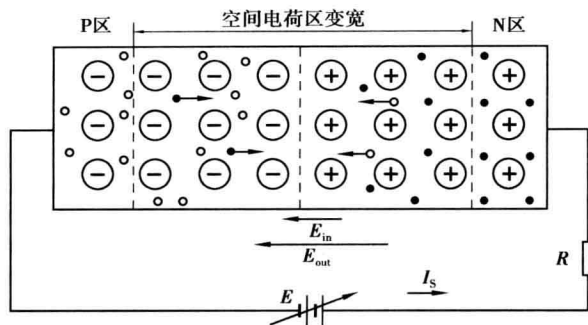


图 1.7 PN 结加反向偏置时截止

向击穿。此时,PN 结的单向导电性被破坏。反向击穿分为电击穿和热击穿,电击穿包括雪崩击穿和齐纳击穿。PN 结热击穿后,电流很大,电压又很高,消耗在 PN 结上的功率很大,容易使 PN 结发热,把 PN 结烧毁。

当 PN 结的反向电压增加时,空间电荷区中的电场随之增强。这样,通过空间电荷区的电子和空穴就会在电场作用下获得逐渐增大的能量,在晶体中运动的电子和空穴将不断地与晶体原子发生碰撞。当电子和空穴的能量足够大时,通过这样的碰撞可使共价键中的电子激发形成自由电子—空穴对。新产生的电子和空穴也向相反的方向运动,重新获得能量,又可通过碰撞,再产生电子—空穴对,这就是载流子的倍增效应。当反向电压增大到某一数值后,载流子的倍增情况就像在陡峻的积雪山坡上发生雪崩一样,载流子增加得多而快,这样,反向电流剧增,PN 结就发生雪崩击穿。

PN 结在较高的反向电压下,空间电荷区中存在一个强电场,它能够破坏共价键,将束缚电子分离出来造成自由电子—空穴对,形成较大的反向电流,此种击穿称为齐纳击穿。

电击穿可被利用(如稳压管),而热击穿须尽量避免。

### 1.1.3 二极管的认识

#### (1) 半导体二极管的结构及符号

**【思考】**二极管是如何制成的呢? 二极管和 PN 结有何联系?

在一个 PN 结的两端加上电极引线并用外壳封装起来,就构成了半导体二极管。由 P 型半导体引出的电极,叫做正极(或阳极);由 N 型半导体引出的电极,叫做负极(或阴极)。

二极管的结构外形及在电路中的符号如图 1.8 所示。在图 1.8(b)所示电路符号中,箭头指向为正向导通电流方向,二极管(Diode)的文字符号在国际标准中用 VD 表示。

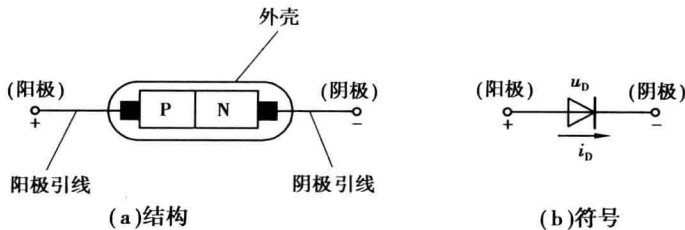


图 1.8 二极管的符号和结构

按照结构工艺的不同,二极管有点接触型和面接触型两类。它们的管芯结构如图 1.9 所示。

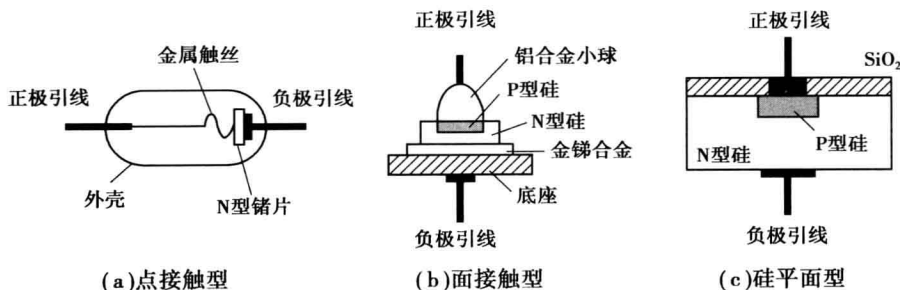


图 1.9 二极管的结构示意图

点接触型二极管如图 1.9(a) 所示,PN 结的结面积很小,所以不能承受高的反向电压和通过较大的电流,一般在几十毫安以下。但是点接触型二极管高频特性好,适用于高频电路,可用作数字电路中的开关元件,也可用来作小电流整流。如 2AP1 是点接触型锗二极管,最大整流电流为 16 mA,最高工作频率为 150 MHz。

面接触型或称面结型二极管如图 1.9(b) 所示,其 PN 结是用合金法或扩散法做成的,PN 结面积大,可承受较大的电流,可达几百毫安至 1 kA,适用于整流,而不宜用于高频电路中。如 2CP1 为面接触型硅二极管,最大整流电流为 400 mA,最高工作频率只有 3 kHz。图 1.9(c) 中的硅工艺平面型二极管结构,是集成电路中常见的一种形式。

## (2) 半导体二极管的伏安特性

二极管由一个 PN 结构成,因此它同样具有单向导电性,常用伏安特性曲线来形象地描述二极管的单向导电性。所谓伏安特性,是指二极管两端电压和流过二极管电流的关系。二极管的伏安特性曲线如图 1.10 所示(图中虚线为锗管的伏安特性,实线为硅管的伏安特性)。二极管的伏安特性曲线可分为正向特性和反向特性两部分,下面以二极管的伏安特性曲线加以说明。

### 1) 正向特性

当外加正向电压很低时,由于外电场不足以克服 PN 结内电场对多数载流子扩散运动的阻力,故正向电流几乎为零,这一段对应着的曲线的起始部分为 OA 或 OA'。在二极管正向伏安特性曲线上,电流基本上为零的区域叫做“死区”,对应的电压叫做“死区电压” $U_{th}$ ,此时二极管表现为一个大电阻,好像有个门槛,因此  $U_{th}$  又称为门槛电压。硅管的死区电压一般为 0~5 V,锗管则为 0~1 V。

正向电压超过死区电压后,内电场被大大削弱,电流增长很快,二极管电阻变得很小。二极管正向导通时,硅管的压降一般为 0~8 V,锗管则为 0~3 V。上述经验数据常作为小功率二极管正向工作时两端压降的估算值,用  $U_{D(ON)}$  表示。由于二极管的正向压降只有零点几伏,相对来说流过管子的电流却很大,因此管子的正向电阻很小,处于导通状态。

**【注意】**二极管正向导通时,正向电流不能超过最大值,否则将烧坏 PN 结。

### 2) 反向特性

二极管加上反向电压时,由于少数载流子的漂移运动,因而形成很小的反向电流,如图 1.10 中 OC(或 O'C') 段所示。反向电流有两个特性:一是它随温度的上升增长很快;二极管



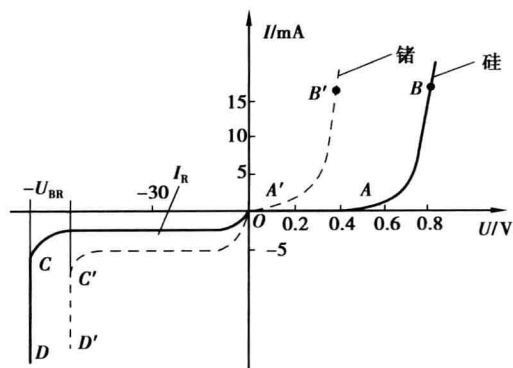


图 1.10 二极管的伏安特性曲线

的特性与其工作环境的温度有很大关系,在室温附近,温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,反向电流约增加一倍;二是在反向电压不超过某一数值时,反向电流不随反向电压改变而改变,故这个电流称为反向饱和电流。

### 3) 反向击穿特性

当外加反向电压过高时,反向电流将突然增大,二极管失去单向导电性,这种现象称为电击穿。二极管被击穿后,一般不能恢复原来的性能。产生击穿时加在二极管上的反向电压称为反向击穿电压  $U_{BR}$ ,如图 1.10 中  $CD$ (或  $C'D'$ ) 段所示。

## (3) 理想二极管

**【问题的提出】**为什么要对二极管进行理想化处理?

为了讨论方便,在一定条件下,可以把二极管的伏安特性理想化,忽略二极管的死区电压和导通电压,这样的二极管称为理想二极管。

二极管是一种非线性元器件,因此二极管电路一般要采用非线性电路的分析方法。这里主要介绍理想模型分析法。

将二极管的单向导电性理想化,忽略其导通电压,认为正偏二极管的管压降为  $0\text{ V}$ ,视导通的二极管为闭合的开关;而当二极管处于反偏状态时,忽略其反向电流,认为二极管的等效电阻为无穷大,反向电流为  $0\text{ V}$ ,视截止的二极管为断开的开关,如图 1.11 所示。其中,图 1.11(a) 中的虚线表示实际二极管的伏安特性曲线。

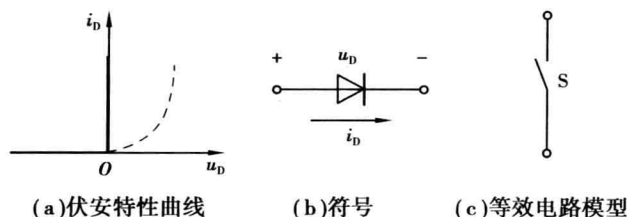


图 1.11 理想二极管模型

在分析电路时,理想二极管可用开关  $S$  来等效。正偏时  $S$  闭合,反偏时  $S$  断开,这一特性称为理想二极管的开关特性。一般在电源电压远大于二极管的导通压降时,利用理想模型来分析不会产生较大的误差。

## (4) 二极管的主要参数

**【问题的提出】**如果使二极管在电路中能安全可靠地工作,在选择二极管的时候,应需要注意它的哪些参数呢?

二极管的特性除用伏安特性曲线表示外,还可用一些参数来说明。各种参数都可从半导体器件手册中查出,下面介绍几个常用的主要参数。

### 1) 最大整流电流 $I_F$

最大整流电流是指管子长期运行时,允许通过的最大正向平均电流。电流通过  $\text{PN}$  结要

引起管子发热,电流如果太大,发热量超过限度,就会使PN结烧坏。

#### 2) 反向击穿电压 $U_{BR}$

反向击穿电压指管子反向击穿时的电压值。击穿时,反向电流剧增,二极管的单向导电性被破坏,甚至因过热而烧坏。一般手册上给出的最高反向工作电压约为击穿电压的一半,以确保管子安全运行。

#### 3) 反向电流(反向饱和电流) $I_R$

反向电流指管子未击穿时的反向电流,其值越小,管子的单向导电性越好。由于温度增加,反向电流会急剧增加,所以在使用二极管时要注意温度的影响。

#### 4) 反向峰值电流 $I_{RM}$

它是指在二极管上加反向峰值电压时的反向电流值。反向电流大,说明二极管单向导电性能差,并且受温度的影响大。

#### 5) 二极管的直流电阻

二极管的直流电阻指加在二极管两端的直流电压与流过二极管的直流电流的比值。二极管的正向电阻较小,约为几欧到几千欧;反向电阻很大,一般可达零点几兆欧以上。

#### 6) 最高工作频率 $f_M$

最高工作频率  $f_M$  是指保证二极管具有单向导电性作用时运行的最高工作频率。当工作频率超过  $f_M$  时,二极管的单向导电性就会变差,甚至失去单向导电性。这时由于PN结具有电容效应的原因,  $f_M$  主要决定于PN结电容的大小,结电容越小,  $f_M$  越大。点接触型锗管PN结面积比较小,其最高工作频率可达数百兆赫兹,而面接触型硅管整流二极管的PN结等效电容大,其最高工作频率只有3 kHz。

#### 7) 反向恢复时间 $t_{re}$

反向恢复时间是二极管作开关应用时,由导通状态变为截止状态所经历的时间。 $t_{re}$  一般约几纳秒,二极管由截止状态变为导通状态经历的时间比  $t_{re}$  小。虽然反向恢复时间直接影响二极管的开关速度,但这个值不一定小就好。

#### 8) 最大功率 $P$

只要二极管中有电流流过,就会吸热,而使自身温度升高。最大功率  $P$  为功率的最大值。具体讲就是加在二极管两端的电压乘以流过的电流。在反向击穿时,要求反向电流和反向电压的乘积不能超过PN结允许的耗散功率,即最大功率。

综上所述,二极管的参数是正确使用二极管的依据,一般半导体器件手册中都给出不同型号管子参数。使用时,应特别注意不要超过最大整流电流和最高反向工作电压,否则将容易损坏管子。

### 1.1.4 二极管的应用

#### (1) 二极管的限幅、整流与钳位

二极管在电子技术中广泛应用于整流、限幅、钳位、开关、稳压、检波等方面,主要是利用它的单向导电性。

##### 1) 整流应用

整流电路是将交流变换成直流的电路,其基本工作原理是利用二极管的单向导电性把大小和方向都变化的正弦交流电变化成脉动的直流电。为简化分析过程,假定负载为纯电阻

性,整流二极管为理想二极管,即正偏导通,电阻为零;反偏截止,电流为零,电阻为无穷大。

如图 1.12(a) 所示为一个简单的单相半波整流电路。其中 VD 为整流二极管,  $R_L$  为负载电阻,电路利用 VD 的单相导电性完成整流任务。

工作过程如下:假设输入电压  $u_i = \sqrt{2}U \sin \omega t$ , 当  $u_i > 0$  处于正半周时,二极管 VD 正向导通,电流通过二极管流向负载,在  $R_L$  上得到一个极性为上正下负的电压  $u_o$ , 此时  $u_o = u_i$ ,  $u_D = 0$ ; 当  $u_i < 0$  处于负半周时,二极管 VD 反向截止,通过  $R_L$  的电流为零,此时  $u_o = 0$ ,  $u_D = u_i$ 。负载  $R_L$  上输出电压为单向半波脉动电压,如图 1.12(b) 所示。

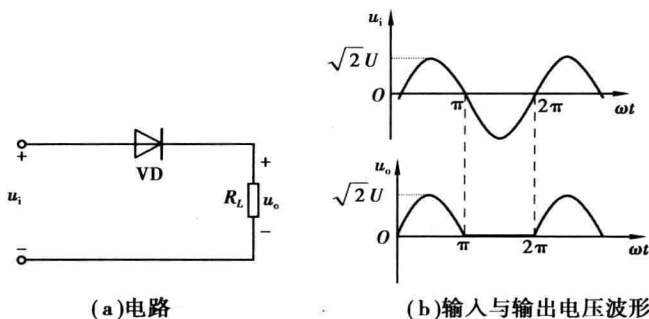


图 1.12 二极管整流电路

## 2) 限幅应用

利用二极管的单向导电性,将输入电压限定在要求的范围之内,叫做限幅。

【例 1.1】在如图 1.13(a) 所示的电路中,已知输入电压  $u_i = 10 \sin \omega t$  V, 电源电动势  $E = 5$  V, 二极管为理想元件,试画出输出电压  $u_o$  的波形。

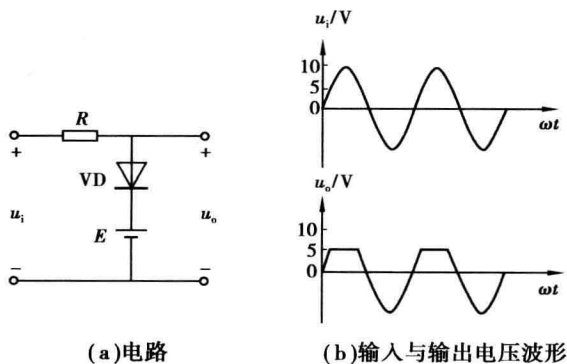


图 1.13 限幅电路

**解** 根据二极管的单向导电特性可知:

当  $u_i \leq 5$  V 时,二极管 VD 截止,相当于开路,因电阻  $R$  中无电流流过,故输出电压与输入电压相等,即  $u_i = u_o$ ;

当  $u_i > 5$  V 时,二极管 VD 导通,相当于短路,故输出电压等于电源电动势,即  $u_o = E = 5$  V。所以,在输出电压  $u_o$  的波形中,5 V 以上的波形均被削去,输出电压被限制在 5 V 以内,波形如图 1.13(b) 所示。在这里,二极管起限幅作用。

## 3) 钳位应用

钳位是指将某点电位钳制在一个固定电压值上,利用二极管的单向导电性在电路中可