

21 世纪高等职业教育精品规划教材

# 模拟电子技术

主审 ○ 宋一然

主编 ○ 余明辉

 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

21 世纪高等职业教育精品规划教材

# 模拟电子技术

主 审 宋一然  
主 编 余明辉  
副主编 蒋卫宏 邹清源

## 内容提要

本书内容共分7章,分别为半导体器件、基本放大电路、集成运算放大器、正弦波振荡电路、直流稳压电路、晶闸管应用、光电子器件及其运用,每章后有“本章小结”和“习题”。

本书可作为高等学校电子、计算机、通信及电气自动化类各专业“模拟电子技术”课程的教材,也可作为成人高校和民办高校学生的学习教材,同时还可供广播电视大学及函授大学有关专业使用,并作为从事电子技术方面的工程技术人员的参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/余明辉等主编. —哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.8

ISBN 978-7-81133-752-5

I. ①模… II. ①余… III. ①模拟电路-电子技术  
IV. ①TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 169544 号

---

出版发行: 哈尔滨工程大学出版社

社 址: 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号

邮 编: 150001

发行电话: 0451-82519328

传 真: 0451-82519699

经 销: 新华书店

印 刷: 北京市通州京华印刷制版厂

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 15.5

字 数: 338 千字

版 次: 2010 年 8 月第 1 版

印 次: 2010 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 30.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: [heupress@hrbeu.edu.cn](mailto:heupress@hrbeu.edu.cn)

网上书店: [www.kejibook.com](http://www.kejibook.com)

对本书内容有任何疑问及建议,请与本书责编联系。邮箱: [jixie\\_book@sina.com](mailto:jixie_book@sina.com)

---

# 出版说明

---

近年来,我国的高等职业教育事业实现了跨越式发展,为社会主义现代化建设事业培养了大批急需的各类人才,在提高劳动者的素质、建设社会主义精神文明、促进社会进步和经济发展方面发挥了重要的作用。

随着我国科技的发展和经济的腾飞,高技能人才的缺乏逐渐成为影响社会快速、健康发展的瓶颈。高等职业院校作为培养各类高素质人才的重要基地,必然要对教育教学制度进行改革,以转变教育思想和教育观念为先导,以促进就业为目标,实行多样、灵活、开放的人才培养模式,把教育教学与生产实践、社会服务、技术推广结合起来,逐步形成适应我国社会主义现代化建设需要的高等职业教育思想和教育理念。

要加快高等职业教育改革和发展的步伐,就必须对课程体系和教学模式等问题进行探索。在这个过程中,教材的建设与改革无疑起着至关重要的基础性作用,高质量的教材是培养高素质人才的保证。高等职业教育教材作为知识的载体和教学的基本工具,直接关系到高等职业教育能否为社会培养并输送符合要求的高技能人才。

为推动高等职业教育教材的建设,加快高等职业教育改革和发展的步伐,我们精心组织了一批具有丰富教学和科研经验的教师,针对高等职业院校的教学特点,编写了“21世纪高等职业教育精品规划教材”,旨在使学生在具有必备的基础理论知识和专业知识的基础上,重点掌握从事本专业领域实际工作的基本能力和基本技能,致力于培养基础理论知识适度、技术应用能力强、知识面宽、素质高的应用型人才。

本系列教材非常注重培养学生的实践技能,力避传统教材“全而深”的教学模式,将“教、学、做”有机地融为一体,在教给学生知识的同时,强化对学生实际操作能力的培养。在编写过程中,教材力求从实际应用的需要出发,尽量减少枯燥、实用性不强的理论灌输,充分体现出“以行业为导向,以能力为本位,以学生为中心”的特色,更具有实用性和前瞻性,与就业市场结合更为紧密。

本系列教材的编写力求突破陈旧的教育理念,采用了“以案例导入教学”的编写模式。在对某一理论进行讲解的同时,紧密结合实际,援引大量鲜明、实用的案例进行分析说明,以达到编写高质量教材的目标。这些精心设计的案例不但可以方便教师授课,同时还可以启发学生思考,加快对学生实践能力的培养,改革人才的培养模式。

本系列教材可供高等职业院校、成人高校及各类培训学校相关专业使用。在编写过程中,得到了许多教师的大力支持,在此特向他们致以衷心的感谢,同时也对所有参与本系列教材出版工作的人员表示感谢!

哈尔滨工程大学出版社

## 前 言

---

本书可作为高等学校电子、计算机、通信及电气自动化类各专业“模拟电子技术”课程的教学用书。

本书注意模拟电子技术综合应用能力的培养，对模拟电路内容的介绍力求清楚准确，以利于学用结合；重点介绍常用集成电路的功能及使用方法，以与实际应用紧密结合为出发点，注重实用性；强调循序渐进。

本书注意在论述上深入浅出，对模拟电子技术必要的基本概念、基本理论和基本方法不降低要求；对那些陈旧的、实际应用价值不大的问题予以忽略，从而做到结构合理、重点突出、实例丰富、例题简明、便于教学。

本书教学时数可在 60~72 学时的范围内灵活安排。

本书由余明辉副教授任主编，蒋卫宏、邹清源任副主编，全书由余明辉统稿。

本书由宋一然教授主审，对其在审阅中提出的许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中难免错误与疏漏之处，诚望使用本书的读者给予批评指正。

编 者

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| <b>第 1 章 半导体器件</b> .....  | 1  |
| 1.1 初识半导体 .....           | 1  |
| 1.1.1 本征半导体 .....         | 2  |
| 1.1.2 杂质半导体 .....         | 3  |
| 1.2 PN 结与晶体二极管 .....      | 4  |
| 1.2.1 PN 结的形成 .....       | 4  |
| 1.2.2 PN 结的单向导电性 .....    | 5  |
| 1.2.3 晶体二极管 .....         | 6  |
| 1.2.4 特殊二极管 .....         | 10 |
| 1.2.5 二极管的测试 .....        | 14 |
| 1.3 晶体三极管 .....           | 14 |
| 1.3.1 三极管的基本结构 .....      | 14 |
| 1.3.2 三极管的电流分配与放大原理 ..... | 15 |
| 1.3.3 三极管的特性曲线及主要参数 ..... | 17 |
| 1.3.4 三极管的简易测试 .....      | 22 |
| 1.4 场效应管 .....            | 24 |
| 1.4.1 结型场效应管 .....        | 24 |
| 1.4.2 绝缘栅场效应管 .....       | 26 |
| 1.5 晶 闸 管 .....           | 29 |
| 1.5.1 晶闸管的结构 .....        | 29 |
| 1.5.2 晶闸管的工作原理 .....      | 30 |
| 1.5.3 伏安特性和主要参数 .....     | 31 |
| 1.5.4 晶闸管的型号及简易检测 .....   | 33 |
| 本章小结 .....                | 33 |
| 习题 .....                  | 34 |
| <b>第 2 章 基本放大电路</b> ..... | 43 |
| 2.1 放大器的基本概念 .....        | 43 |
| 2.2 共发射极放大电路 .....        | 45 |
| 2.2.1 放大电路的静态分析 .....     | 47 |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 2.2.2 放大电路的动态分析 .....       | 48         |
| 2.2.3 放大电路的失真 .....         | 52         |
| 2.3 分压式偏置放大电路 .....         | 53         |
| 2.3.1 静态工作点的稳定 .....        | 53         |
| 2.3.2 分压式偏置放大电路分析 .....     | 54         |
| 2.4 射极输出器 .....             | 57         |
| 2.5 共基电路 .....              | 59         |
| 2.6 多级放大电路 .....            | 61         |
| 2.7 功率放大电路 .....            | 66         |
| 2.7.1 功率放大器的特殊要求 .....      | 66         |
| 2.7.2 变压器耦合推挽功率放大电路 .....   | 67         |
| 2.7.3 互补对称功率放大电路 .....      | 67         |
| 2.7.4 集成功率放大器 .....         | 69         |
| 本章小结 .....                  | 72         |
| 习题 .....                    | 74         |
| <b>第3章 集成运算放大器</b> .....    | <b>90</b>  |
| 3.1 直接耦合放大器 .....           | 90         |
| 3.1.1 直接耦合放大器的特殊问题 .....    | 91         |
| 3.1.2 差动放大器 .....           | 93         |
| 3.1.3 带射极公共电阻的差动放大器 .....   | 96         |
| 3.2 集成运算放大器 .....           | 98         |
| 3.3 放大器中的负反馈 .....          | 100        |
| 3.3.1 反馈的基本类型及分析方法 .....    | 100        |
| 3.3.2 四种基本负反馈 .....         | 102        |
| 3.3.3 负反馈对放大性能的影响 .....     | 106        |
| 3.3.4 深度负反馈对放大器性能的影响 .....  | 108        |
| 3.4 集成运算放大器的应用 .....        | 109        |
| 3.4.1 理想运算放大器的条件及特点 .....   | 109        |
| 3.4.2 基本运算放大器 .....         | 111        |
| 3.4.3 有源滤波器 .....           | 118        |
| 3.5 集成运算放大器的选择与使用注意事项 ..... | 123        |
| 本章小结 .....                  | 124        |
| 习题 .....                    | 125        |
| <b>第4章 正弦波振荡电路</b> .....    | <b>136</b> |
| 4.1 自激振荡 .....              | 136        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 4.1.1 自激振荡及条件 .....         | 137        |
| 4.1.2 起振和稳幅 .....           | 138        |
| 4.1.3 正弦波振荡电路的基本组成 .....    | 139        |
| 4.1.4 正弦波振荡分析 .....         | 139        |
| 4.2 LC 振荡电路 .....           | 139        |
| 4.2.1 LC 振荡电路的选频网络 .....    | 140        |
| 4.2.2 变压器反馈式振荡电路 .....      | 140        |
| 4.2.3 电感三点式振荡电路 .....       | 142        |
| 4.2.4 电容三点式振荡电路 .....       | 143        |
| 4.3 RC 振荡电路 .....           | 145        |
| 4.3.1 RC 振荡电路 .....         | 145        |
| 4.3.2 RC 串并网络的选频特性 .....    | 146        |
| 4.3.3 RC 电路的振荡频率及起振条件 ..... | 147        |
| 4.4 石英晶体振荡器 .....           | 150        |
| 本章小结 .....                  | 153        |
| 习题 .....                    | 153        |
| <b>第 5 章 直流稳压电路</b> .....   | <b>159</b> |
| 5.1 整流电路 .....              | 159        |
| 5.1.1 整流电路组成 .....          | 160        |
| 5.1.2 整流电路工作原理 .....        | 160        |
| 5.2 滤波电路 .....              | 164        |
| 5.2.1 电容滤波电路 .....          | 164        |
| 5.2.2 电感滤波电路 .....          | 167        |
| 5.2.3 复式滤波电路 .....          | 167        |
| 5.3 稳压电路 .....              | 170        |
| 5.3.1 硅稳压管稳压电路 .....        | 171        |
| 5.3.2 串联型稳压电路 .....         | 173        |
| 5.3.3 集成稳压电路 .....          | 176        |
| 5.3.4 开关型稳压电路 .....         | 182        |
| 本章小结 .....                  | 186        |
| 习题 .....                    | 187        |
| <b>第 6 章 晶闸管应用</b> .....    | <b>195</b> |
| 6.1 晶闸管可控整流电路 .....         | 195        |
| 6.1.1 单相半波可控整流电阻负载电路 .....  | 195        |
| 6.1.2 单相桥式全控整流电路 .....      | 198        |

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 6.1.3 三相半波可控整流电路 .....      | 201        |
| 6.2 单结管触发电路 .....           | 203        |
| 6.2.1 晶闸管对触发电路的要求 .....     | 203        |
| 6.2.2 单结晶体管触发电路 .....       | 204        |
| 本章小结 .....                  | 207        |
| 习题 .....                    | 207        |
| <b>第7章 光电子器件及其运用 .....</b>  | <b>209</b> |
| 7.1 电光器件及其运用 .....          | 209        |
| 7.1.1 发光二极管 .....           | 210        |
| 7.1.2 发光二极管的应用 .....        | 213        |
| 7.1.3 LED数码管及其运用 .....      | 214        |
| 7.1.4 LED点阵显示器 .....        | 215        |
| 7.2 光电器件及其运用 .....          | 216        |
| 7.2.1 光电二极管及其运用 .....       | 216        |
| 7.2.2 光电三极管及其应用 .....       | 220        |
| 7.3 光耦合器及其应用 .....          | 221        |
| 7.3.1 光耦合器 .....            | 221        |
| 7.3.2 光耦合器的应用 .....         | 222        |
| 本章小结 .....                  | 227        |
| 习题 .....                    | 227        |
| <b>附录 模拟电子报警器及其应用 .....</b> | <b>230</b> |
| 一、模拟电子报警器电路框图 .....         | 230        |
| 二、可燃气体报警器 .....             | 231        |
| 三、烟雾报警器 .....               | 235        |
| 四、红外报警器放大、比较电路简介 .....      | 235        |
| <b>参考文献 .....</b>           | <b>239</b> |

## 第 1 章

# 半导体器件

### 【本章要点】

本章主要介绍半导体材料的特征及导电特性、半导体二极管、特殊二极管、双极型晶体管、场效应管、晶闸管的结构及工作原理，着重讨论了常用半导体器件的特性曲线及主要参数。

### 【教学目标】

1. 了解半导体的导电特性，理解 PN 结及其单向导电性。
2. 理解二极管的伏安特性及主要参数，理解稳压管的工作原理、伏安特性及主要参数，理解晶体管的电流放大原理、输入和输出特性及主要参数。
3. 能够对二极管、三极管进行简易检测。
4. 了解场效应管的工作原理、转移特性、输出特性及主要参数。
5. 了解晶闸管的结构及工作原理。

半导体器件是近代电子学中的重要研究项目，由于具有体积小、重量轻、使用寿命长、反应迅速、灵敏度高、工作可靠等优点而得到广泛的应用。本章主要介绍二极管、三极管、场效应管及晶闸管的基本结构、工作原理、特征曲线和主要参数等。

## 1.1 初识半导体

自然界中容易导电的物质称为导体，金属一般都是导体。有的物质几乎不导电，称为绝缘体，如橡皮、陶瓷、塑料和石英。另有一类物质的导电特性处于导体和绝缘体之间，称为半导体，如锗、硅、砷化镓和一些硫化物、氧化物等。硅（Si）和锗（Ge）是目前制作半导体器件的主要材料。半导体既不能当导体用，也不能当绝缘体用，之所以越来越被人们重视，主要是因为它的导电能力在不同条件下有着显著的差异。它对温度和光的反应特别灵敏，例如当有些半导体受到热或光的激发时，导电率会明显增长。又如在纯净的半

导体中掺以微量“杂质”元素，此“杂质半导体”导电能力将猛增到原来的几千、几万乃至上百万倍。人们就利用半导体的热敏、光敏性制作成半导体热敏元件和光敏元件。利用半导体的掺杂性制造了种类繁多的具有不同用途的半导体器件，如二极管、稳压管、晶体三极管、场效应管、晶闸管等。

### 1.1.1 本征半导体

本征半导体是指完全纯净的具有晶体结构的半导体。半导体的导电性能取决于其内部的物质结构。比较典型的半导体材料有硅和锗，两者外层都有四个价电子，都是四价元素。价电子直接影响半导体的导电性能。

硅和锗材料提炼成纯净的单晶体后能制作成半导体器件。在单晶半导体中，所有原子排列非常整齐，按四角系统组成晶体点阵。每个原子间距离相等。每一个原子与相邻的四个原子结合，每一原子的价电子与另一原子的一个价电子组成一个电子对，这对价电子为两个相邻的原子所共有，组成了相邻原子间的共价键结构。在共价键结构中，原子中最外层的八个价电子虽被束缚在共价键中，但不像绝缘体中束缚的那样牢固。当本征半导体受到热或光的激发获得一定能量后，价电子即可摆脱电子核束缚成为自由电子，温度愈高、光照愈强，晶体中产生自由电子数便愈多，导电能力也就愈强。硅和锗的原子最外层只有4个价电子，图1-1所示为硅或锗简化后的原子结构。

硅和锗构成分子采用的是共价键结构（即每两个相邻的原子之间采用共有电子对的结构），如图1-2所示。由化学知识可知，每个硅或锗原子外层均达到八个电子，因此处于相对稳定的结构。

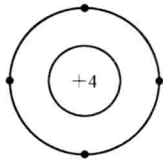


图 1-1 硅或锗简化原子结构示意图

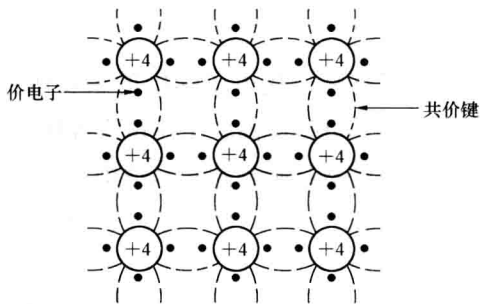


图 1-2 硅或锗晶体共价键结构示意图

在价电子挣脱共价键的束缚成为自由电子的同时，在共价键上留下了一个空位，称为空穴，可见本征半导体中的自由电子和空穴是成对出现的。具有空穴的原子因少了一个电子而带正电，可认为是空穴所带的正电。在外电场的作用下，邻近的价电子极易挣脱原子核的束缚来填补这个空穴。这时，原有的空穴消失而出现了新的空穴，如此循环下去，在半导体中就形成了与价电子的填补运动相反的空穴移动，而空穴的移动则可看作是正电荷的运动。当半导体两端加上外电压后，半导体中有两类相反运动的导电粒子形成的电流：

一是自由电子作定向运动形成的电流；一是被原子核束缚的价电子填补空穴而形成的空穴电流。自由电子和空穴在半导体中都是导电粒子，它们被称为载流子。

半导体导电方式的最大特点是同时存在着自由电子和空穴的导电，这也是半导体与金属导体在导电机理上的本质区别。

在常温下，本征半导体载流子数目很少，其导电能力很弱。当温度升高或光照时，有更多共价键中的价电子挣脱束缚，产生电子—空穴对的数目就增多，本征载流子浓度随温度升高按指数关系增加，半导体的导电性能显著增加，这就是半导体的导电性能受温度和光照影响很大的原因。这也是半导体的一个重要特性。利用这一特性，可做成各种热敏元件和光电元件。更为突出的是，在本征半导体中掺入杂质，半导体的导电性能会显著增加。下面对此加以介绍。

### 1.1.2 杂质半导体

本征半导体导电能力很差，但如果在本征半导体中掺入微量的其他元素原子，就会使其导电能力大大提高。这些微量的元素原子称为杂质。常用的杂质为三价和五价元素，如硼、磷等。掺入杂质后形成的半导体称为杂质半导体。根据掺入杂质的不同，可分为N型和P型两种。

#### 1. N型半导体

在本征半导体硅（或锗）中，掺入五价（原子核外层有五个价电子）元素，如图1-3所示。如磷（P），杂质原子取代晶体中某些晶格上的硅（或锗）原子，硅（或锗）的晶体结构并未改变。五价元素的四个价电子与硅原子组成共价键后，多余了一个价电子，这一多余电子虽不受共价键的束缚，但仍受杂质原子核正电荷的吸引，在其原子周围运动。不过其吸引力远比共价键的束缚力微弱，只需在较小的能量激发下就能挣脱原子核的束缚而成为自由电子，即掺入五价元素后，与本征半导体相比，自由电子数大大增加，形成多数载流子。由于自由电子增多，增加了自由电子填补空穴的机会，使空穴数目反而减少，故空穴被称为少数载流子。在外电场的作用下，自由电子导电占主导地位，故称为电子型半导体，又称N型半导体。

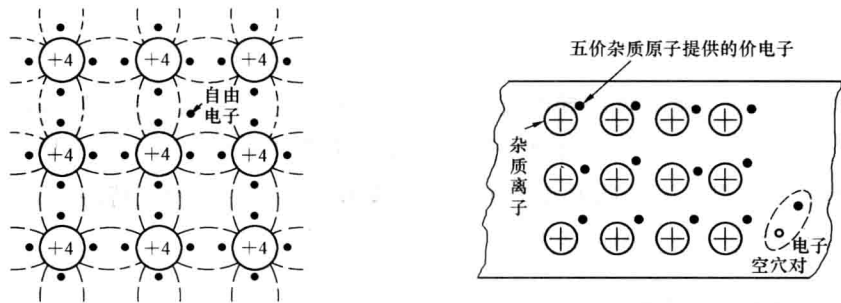


图 1-3 N 型半导体结构和载流子示意图

## 2. P 型半导体

仿效 N 型半导体, 在本征半导体中掺入微量的三价杂质元素。如硼 (B), 杂质原子取代晶体中某些晶格上的硅 (或锗) 原子, 三价元素三个价电子与周围四个原子组成共价键时, 缺少一个电子而产生了空位, 如图 1-4 所示。此空位不是空穴, 所以不是载流子, 但是邻近的硅 (或锗) 原子的价电子很容易来填补这个空位, 于是在该价电子的原位上产生一个空穴, 而三价元素却因多得了个电子而成为负离子。在室温下, 价电子几乎能填满杂质元素上的全部空位, 而使其成为负离子, 与此同时, 半导体中产生了与杂质元素原子数相同的空穴, 除此之外, 还有少量的本征激发产生的电子—空穴对。显然, 在这类半导体中, 空穴数远大于电子数, 在外电场的作用下, 空穴导电占主导地位, 故称空穴型半导体, 即 P 型半导体。P 型半导体中的多子是空穴, 少子为电子。

由此可见, 在本征半导体中掺入杂质形成杂质半导体后, 其导电性能显著增加。无论是 N 型或 P 型杂质半导体, 都有一种载流子占多数, 另一种载流子占少数, 因此杂质半导体被称为双极型 (两种极性) 半导体。

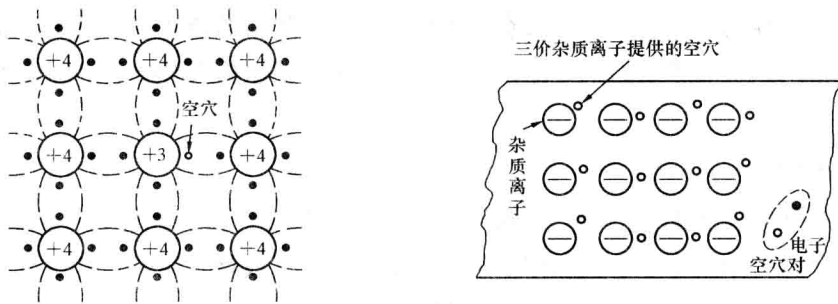


图 1-4 P 型半导体结构和载流子示意图

必须指出的是, 不论是 N 型还是 P 型半导体, 虽然都是一种载流子占多数, 但整个晶体中正负电荷数量相等, 呈现电中性。

## 1.2 PN 结与晶体二极管

杂质半导体增强了半导体的导电能力, 但是其意义远非仅此。利用特殊的掺杂工艺, 在一块晶片 (硅片或锗片) 的两边分别生成 N 型和 P 型半导体, 两者的交界面处即称 PN 结。PN 结具有单一型 (N 型或 P 型) 半导体所没有的特性, 利用此特性可以制造出各种半导体器件, 推动电子技术的迅猛发展。

### 1.2.1 PN 结的形成

在一块晶片上, 用半导体特殊掺杂工艺, 分别在两边生成 P 型和 N 型半导体 (P 区和

N区)，两者的交界面处就会自动形成PN结。

P区的多子是空穴，N区的多子是电子，由于PN结交界面处两侧同类载流子的浓度（单位体积内载流子数目）差异很大，因此形成了高浓度的多子向低浓度少子一侧的扩散运动，如图1-5（a）所示，P区的多子空穴向N区扩散，而N区的多子电子则向P区扩散。电子和空穴都是载流子，扩散的结果就是在交界面P区一侧因失去了空穴而出现了负离子区，而N区一侧因失去电子在交界处出现了正离子区。正负离子都束缚在晶格内不能移动，于是在交界面两侧形成了正、负空间电荷区，这就是所谓的PN结。在这个区域内可以认为载流子已被“耗尽”，故又称耗尽区或耗尽层，如图1-5（b）所示。

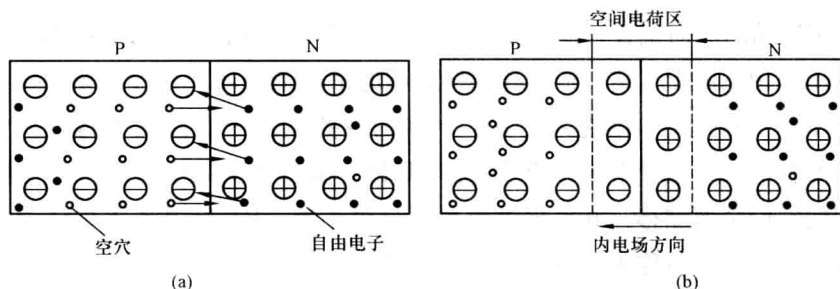


图 1-5 PN 结的形成

空间电荷区形成以后，电荷区产生了一个由PN结自身建立的电场，称内电场。内电场的方向由N区指向P区。因为内电场阻碍了多子的继续扩散，所以空间电荷区又称阻挡层。内电场虽阻挡多子的扩散，却有利于少数载流子的运动。P区的少子电子和N区的少子空穴循着内电场方向的运动称为少子的漂移。可见，多子的扩散和少子的漂移是两类方向相反的运动。

在PN结的形成过程中，刚开始以扩散运动为主。随着空间电荷区的加宽和内电场的加强，多数载流子运动逐渐减弱，漂移运动逐渐加强，使空间电荷区变窄。而空间电荷区变窄，又会对扩散运动产生抑制作用。最终，扩散运动与漂移运动会达到动态平衡。此时，空间电荷区的宽度基本稳定下来，扩散电流等于漂移电流，通过PN结的电流为零，PN结处于动态的稳定状态。

### 1.2.2 PN结的单向导电性

PN结中扩散运动与漂移运动达到动态平衡时，扩散电流等于漂移电流，通过PN结的电流为零，发生在PN结没有外加电压的情况下。如果在PN结上加电压，必然会破坏原有的动态平衡，使电流通过PN结。

#### 1. 外加正向电压

图1-6所示为PN结加上正向电压时的电路图。P区接电源正极，N区接负极，这样

的连接又称 PN 结的正向偏置, 简称正偏。由此可见, 外加电场与内电场的方向相反。这时外加电压在耗尽层中建立的外电场与内电场方向相反, 削弱了内电场, 使空间电荷区变窄, 使多数载流子的扩散运动大于少数载流子漂移的运动。在电源的作用下, 多数载流子就能越过空间电荷区形成较大的扩散电流。这个电流从电源的正极流入 P 区, 经过 PN 结由 N 区流回电源的负极, 称为正向电流。PN 结处于导通 (导电) 状态, 此时呈现的电阻称为正向电阻。由于多数载流子浓度较大, 当外加电压不太高时就可以形成很大的正向电流, 所以 PN 结的正向电阻较小。

## 2. 外加反向电压

图 1-7 所示为 PN 结加上反向电压时的电路图。P 区接电源负极, N 区接正极, 这样的连接又称 PN 结的反向偏置, 简称反偏。由此可见, 外加电场与内电场的方向一致。在外加反向电压作用下的 PN 结, 扩散和漂移运动的平衡被破坏。在外电场的作用下, N 区的少数载流子空穴越过 PN 结进入 P 区, P 区的少数载流子自由电子越过 PN 结进入 N 区, 形成了漂移电流, 这个电流由 N 区流向 P 区, 故称为反向电流。由于少数载流子浓度很小, 即使它们全部漂移, 其反向电流也还是很小的, PN 结基本上可认为不导电, 处于截止状态。此时的电阻称为反向电阻, 数值很大。

由上述分析可知, PN 结加正向电压时处于导通状态, PN 结加反向电压时处于截止状态, 这就是 PN 结的单向导电性。

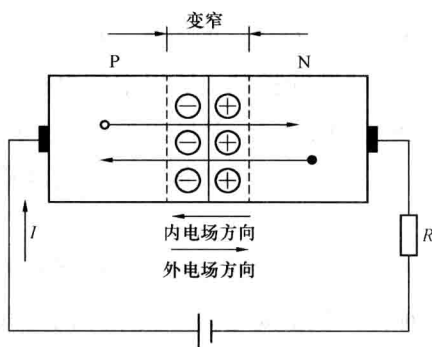


图 1-6 PN 结加正向电压

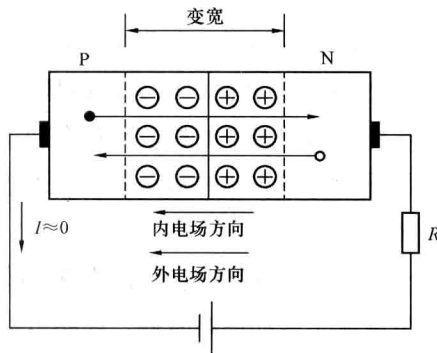


图 1-7 PN 结加反向电压

### 1.2.3 晶体二极管

#### 1. 晶体二极管的结构

晶体二极管又称半导体二极管, 简称二极管。一个二极管是在 PN 结的两端引出金属电极、外加管壳或用塑料封装而成的, 是一种最简单的半导体器件。图 1-8 (a) 所示是常见半导体二极管的外形图, 图 1-8 (b) 所示是其图形符号。二极管的文字符号国际标通用 V 表示, 有的文

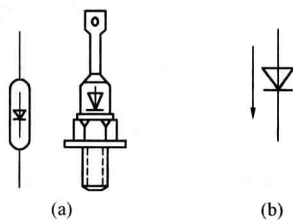


图 1-8 晶体二极管的外形及符号

献用 VD 表示, 通常习惯用 D。

由 P 区引出的电极称为阳极, N 区引出的为阴极。因为 PN 结的单向导电性, 二极管导通时的电流方向是由阳极通过管子内部流向阴极, 即图形符号中箭头所示的方向。

根据内部结构的不同, 晶体二极管可分为面接触型和点接触型两类; 根据所用半导体材料的不同, 二极管又可分为硅二极管或锗二极管; 按用途的不同, 二极管可分为检波二极管、整流二极管、稳压二极管、变容二极管和开关二极管等。目前大容量的整流元件一般都采用硅材料。

图 1-9 所示为两种结构类型的二极管。

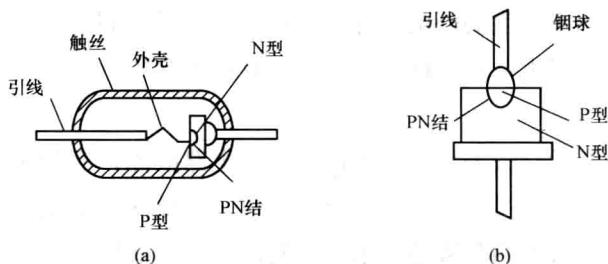


图 1-9 二极管两种结构类型

(a) 点接触型; (b) 面接触型

(1) 点接触型 特点是 PN 结面积很小, 因而结电容很小; 高频性能好, 但不能通过大电流, 主要用于高频检波和小电流的整流等。

(2) 面接触型 特点是 PN 结面积大, 因而结电容大; 不适于在高频工作, 只能在低频工作, 但允许通过较大电流, 主要用于整流电路。

## 2. 晶体二极管的伏安特性曲线及主要参数

### (1) 伏安特性曲线

二极管的伏安特性曲线是指加到二极管两端的电压  $U$  与流过管子的电流  $I$  间的关系曲线, 通常用实验方法或专用仪器测得。在二极管的阳极和阴极两端加上不同极性和不同数值的电压, 同时测量流过二极管的电流值, 就能得到二极管的伏安特性。曲线为非线性, 形状如图 1-10 所示, 正向特性和反向特性各有特点。

1) 正向特性 当正向电压很低时, 正向电流几乎为零, 这是因为外加电压的电场还不能克服 PN 结的自建电场阻挡多数载流子扩散运动的缘故, 二极管呈现高电阻值, 基本上还处在截止状态。当正向电压超过某一值 (称此电压为“死区”电压, 随管子材料及环境温度而变), 此时的二极管才呈现低电阻值, 处于正向导通状态。硅管的死区电压约为 0.5V, 锗管约为 0.1V。正向导通后的二极管管压降变化较小, 硅管为 0.6~0.8V, 锗管为 0.2~

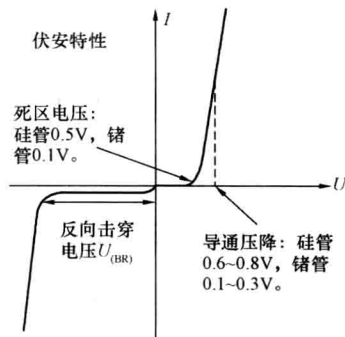


图 1-10 的伏安特性曲线的二极管

0.3V。理想二极管可近似认为正向电阻为零。

二极管的正向特性曲线随温度升高而向纵轴移动,死区电压及导通压降都有所减小。实验表明,温度每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,二极管导通压降下降 $2.5\text{mV}$ 。

2) 反向特性 在分析PN结加上反向电压时,已知反向电流是由少数载流子的漂移运动形成的。少数载流子数量少,且在一定温度下它们的数量基本维持不变。因此,当反向电压在一定范围内增大时,反向电流极微小且基本不变(理想情况下认为反向电流为零),所以称反向饱和电流。理想二极管可认为反向电阻为无穷大。温度上升 $10^{\circ}\text{C}$ ,反向饱和电流增加一倍,这一点应格外注意。

当反向电压增加到所产生的外电场能把原子外层电子强制拉出、而使载流子数目急剧增加时,反向电流突然增大,对应此时的电压称反向击穿电压。二极管承受反向击穿电压时,管子被击穿。

二极管被反向击穿后会失去单向导电性,引起电路故障,而管子在正、反向电压下都导通,通过较大电流时会因过热而损坏,故使用时一定要注意避免发生反向击穿现象。

(2) 主要参数 二极管的参数是表示二极管的性能及适用范围的数据,是正确选择和使用二极管的重要依据。二极管的主要参数有:

1) 最大整流电流  $I_{\text{FM}}$   $I_{\text{FM}}$ 是指二极管长期运行时允许通过的最大正向平均电流。它是由PN结的面积和外界散热条件决定的。当电流超过允许值时,容易造成PN结过热而烧坏管子。

2) 最大反向工作电压  $U_{\text{RM}}$   $U_{\text{RM}}$ 是指二极管在使用时所允许加的最大反向电压。超过此值二极管就有可能发生反向击穿。通常取反向击穿电压的一半值作为  $U_{\text{RM}}$ 。

3) 最大反向电流  $I_{\text{RM}}$   $I_{\text{RM}}$ 是指在给二极管加最大反向工作电压时的反向电流值。 $I_{\text{RM}}$ 越小说明二极管的单向导电性越好,此值受温度的影响较大。

二极管的单向导电性可用于很多方面,如整流、检波、限幅、元件的保护以及在脉冲数字电路中用作开关元件等。

**例 1-1** 设二极管为理想状态,试分析并画出负载  $R_L$  两端的电压波形  $U_o$ 。

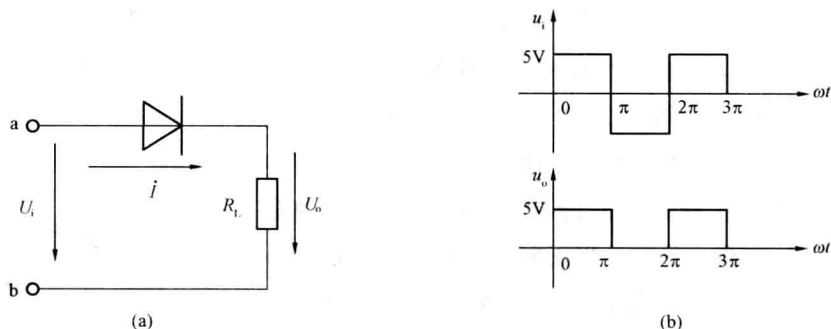


图 1-11 例 1-1 的图

(a) 电路; (b) 工作波形