

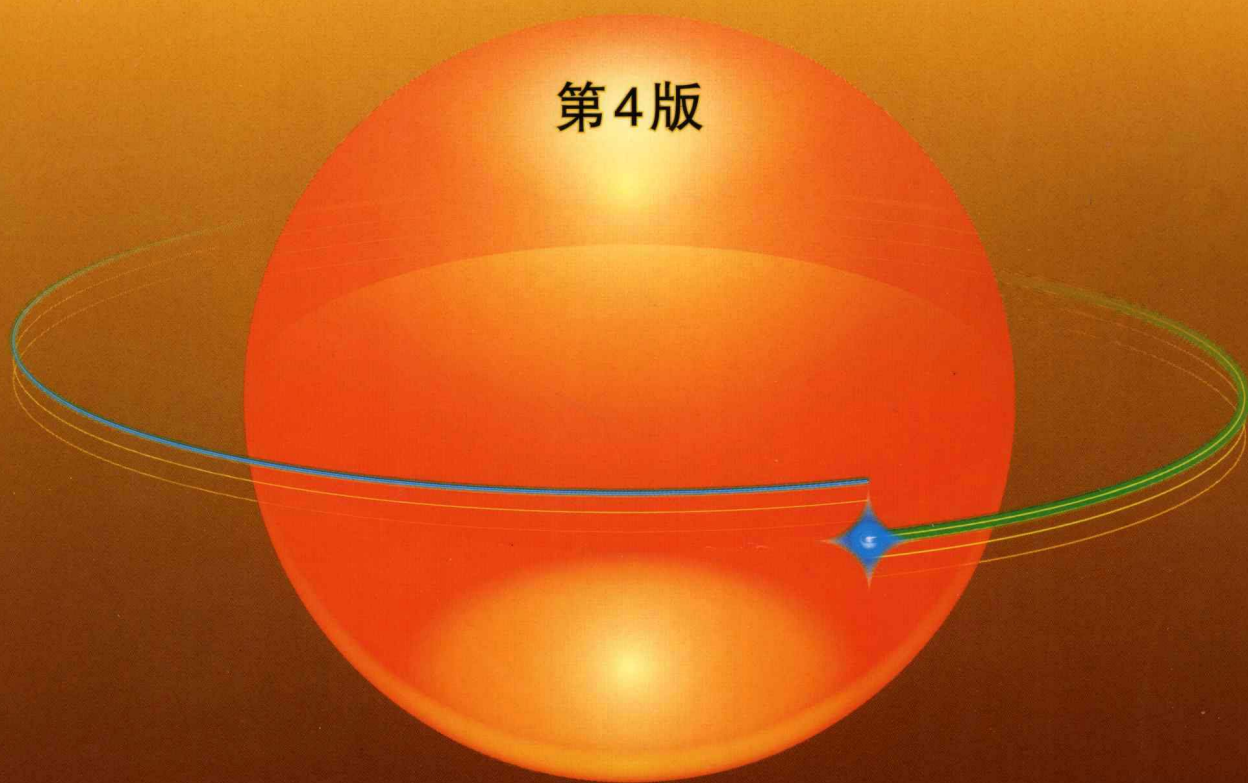
高等教育机电类规划教材

# 电子技术

## (电工学II)

罗会昌 周新云 主编

第4版



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

高等教育机电类规划教材

# 电 子 技 术

(电 工 学 Ⅱ)

第 4 版

罗会昌 周新云 主编



机械工业出版社

本套教材是为适应 21 世纪电工、电子技术课程教学改革的需要而编写的。分《电工技术》、《电子技术》两册出版。

《电子技术》共分七章，分别是：半导体器件及放大电路、集成运算放大器及其应用、直流稳压电源、电力电子器件及其应用、门电路和组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、仿真软件 Multisim9 简介及其应用。在大部分节后配有练习思考题，章后有小结和习题。书末附有部分常用电子元器件的主要参数和部分习题答案。

本书读者对象是机电类专业的大学生，亦可供其他非电专业的大学生使用，并可作为工程技术人员系统学习电子技术的参考书。

## 图书在版编目（CIP）数据

电子技术（电工学·Ⅱ）/罗会昌，周新云主编. —4 版.  
北京：机械工业出版社，2009.1  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 01702 - 8

I. 电… II. ①罗…②周… III. ①电子技术 - 高等学校  
- 教材②电工学 - 高等学校 - 教材 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 162913 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：曾 红 责任编辑：曾 红  
版式设计：霍永明 责任校对：姚培新  
封面设计：姚 毅 责任印制：邓 博  
北京京丰印刷厂印刷  
2009 年 1 月第 4 版 · 第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 16.25 印张 · 399 千字  
0 001 - 5 000 册  
ISBN 978 - 7 - 111 - 01702 - 8  
标准书号：ISBN 978 - 7 - 111 - 8  
定价：26.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换  
销售服务热线电话：（010）68326294  
购书热线电话（010）88379639 88379641 88379643  
编辑热线电话：（010）68351729  
封面无防伪标均为盗版

## 《电工技术》、《电子技术》教材编审组成员

|      |     |          |     |
|------|-----|----------|-----|
| 组 长： | 高福华 | 吉林大学     | 教授  |
| 副组长： | 罗会昌 | 合肥工业大学   | 教授  |
|      | 周新云 | 江苏大学     | 副教授 |
|      | 孙立功 | 河南科技大学   | 副教授 |
|      | 戴 燕 | 长春理工大学   | 副教授 |
| 组 员： | 范振铨 | 沈阳工业大学   | 教授  |
|      | 陈正传 | 江苏大学     | 教授  |
|      | 刘朝阳 | 华北工学院    | 教授  |
|      | 李秀芬 | 长春理工大学   | 教授  |
|      | 赵不赟 | 江苏大学     | 教授  |
|      | 邵敏权 | 长春工业大学   | 教授  |
|      | 陈万忠 | 吉林大学     | 教授  |
|      | 丛玉良 | 吉林大学     | 教授  |
|      | 蒋 中 | 安徽建筑工业学院 | 教授  |
|      | 闫保定 | 河南科技大学   | 教授  |
|      | 常通义 | 河南科技大学   | 副教授 |
|      | 杨晓萍 | 吉林大学     | 副教授 |
|      | 李炳彦 | 西安理工大学   | 副教授 |
|      | 马红杰 | 合肥工业大学   | 副教授 |
|      | 刘 春 | 合肥工业大学   | 副教授 |
|      | 江 萍 | 合肥工业大学   | 副教授 |
|      | 李玉长 | 合肥工业大学   | 副教授 |
|      | 黄知超 | 桂林电子工业学院 | 副教授 |
|      | 孙向文 | 河南科技大学   | 讲师  |
|      | 尹均萍 | 合肥工业大学   | 讲师  |
|      | 陈 山 | 江苏大学     | 讲师  |
|      | 罗 珣 | 合肥工业大学   | 讲师  |

# 前 言

《电工技术》和《电子技术》是一套两册教材。第1版都是1987年出版的，后来修订过两次，于2004年出了第3版，截至2007年共印刷过12次。这套教材编写的指导思想、内容取舍的原则以及完整体系的建立，都是由原机械电子工业部部属高等院校电工技术、电子技术课程协作组组织部内外各院校的教师，经过多次研讨和反复审校后确定的。所以该套教材实际上是多所高等院校电工、电子技术课程教师的集体成果。

电子技术是一门重要的技术基础课。本书的使用对象是机电类专业的大学生和其他非电类专业的大学生，亦可供工程技术人员学习使用。

当今电子技术发展迅速，新器件、新应用不断涌现，电子技术仿真软件的应用也很普遍。为了适应21世纪教学内容改革的需要，体现教材与时俱进的特点，现在修订出版此书第4版。在新版教材中，进一步削减了分立元件电路，增加了集成稳压器应用、电力电子器件和仿真软件Multisim9简介及其应用的内容。

本书是按照教育部（原国家教育委员会）1995年颁发的“电子技术（电工学Ⅱ）”教学基本要求〔60~70学时类型（含实验学时）〕编写的。教学中讲课与实验比例约为5:2。

本着“精选内容、打好基础、加强实验、培养能力”的宗旨，编者把教材的重点放在基本理论、方法、概念和电子元器件外部特性及应用知识等方面，并适当提高了起点，避免与物理学中有关内容出现不必要的重复。为了兼顾不同专业的需要和许多院校对电子技术仿真软件的需求，书中编写了一些选修内容（标题前注\*号），教学时可根据需要选用或供学生自学。

由于原来参加本书编写人员中，有的工作已经变动，经过协商，此次修订再版时，作了一些调整。本书共分七章。第一、二、三、四章分别由合肥工业大学江萍、刘春、李玉长、尹均萍编写；第五、六章分别由江苏大学周新云、赵不贿编写；第七章由尹均萍、李玉长编写；新旧符号对照表由西安理工大学李炳彦编写；附录由合肥工业大学罗珣编写。本书由合肥工业大学罗会昌担任第一主编，江苏大学周新云担任第二主编，罗会昌负责全书的修改和定稿。吉林大学高福华、长春理工大学戴燕担任主审。参加本书审稿的还有江苏大学陈正传、安徽建筑工业学院蒋中、桂林电子工业学院黄知超。主审和审稿者认真审阅了书稿，并提出许多宝贵建议，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

编者

# 目 录

## 前 言

## 第一章 半导体器件及放大电路 ..... 1

- 第一节 PN 结 ..... 1
- 第二节 半导体二极管 ..... 3
- 第三节 特殊二极管 ..... 7
- 第四节 半导体三极管 ..... 10
- 第五节 基本放大电路 ..... 14
- 第六节 微变等效电路分析法 ..... 21
- 第七节 多级放大器及频率特性 ..... 25
- 第八节 共集电极放大电路  
(射极输出器) ..... 29
- 第九节 光耦合器 ..... 31
- 第十节 互补对称功率放大电路 ..... 32
- 第十一节 场效应晶体管放大电路 ..... 36
- 小结 ..... 40
- 习题 ..... 41

## 第二章 集成运算放大器及其应用 ..... 46

- 第一节 直接耦合放大器 ..... 46
- 第二节 差动放大器 ..... 47
- 第三节 集成运算放大器简介 ..... 51
- 第四节 集成运放电路中的负反馈 ..... 54
- 第五节 集成运放在信号运算  
电路中的应用 ..... 62
- 第六节 集成运放在信号处理  
电路中的应用 ..... 70
- 第七节 集成运放在信号发生  
电路中的应用 ..... 73
- 第八节 集成运放的选择与使用 ..... 78
- 第九节 集成运放应用实例 ..... 80
- 小结 ..... 82
- 习题 ..... 82

## 第三章 直流稳压电源 ..... 88

- 第一节 整流电路 ..... 88
- 第二节 滤波电路 ..... 95

## 第三节 集成稳压电路 ..... 99

- \* 第四节 三端集成稳压电路设计举例 ... 105
- \* 第五节 开关型直流稳压电源 ..... 106
- 小结 ..... 107
- 习题 ..... 108

## 第四章 电力电子器件及其应用 ..... 112

- 第一节 晶闸管 ..... 112
- 第二节 可控整流电路 ..... 116
- 第三节 晶闸管的触发电路 ..... 123
- \* 第四节 晶闸管的保护 ..... 128
- \* 第五节 常用的晶闸管电路举例 ..... 130
- 第六节 新型电力电子器件 ..... 134
- 小结 ..... 137
- 习题 ..... 137

## 第五章 门电路和组合逻辑电路 ..... 139

- 第一节 概述 ..... 139
- 第二节 分立元件门电路 ..... 140
- 第三节 TTL 集成门电路 ..... 143
- 第四节 MOS 集成门电路 ..... 146
- 第五节 逻辑门电路使用中  
的实际问题 ..... 149
- 第六节 逻辑代数 ..... 152
- 第七节 组合逻辑电路的  
分析和设计 ..... 154
- 第八节 组合逻辑电路的应用 ..... 158
- \* 第九节 只读存储器和可编程  
逻辑器件 ..... 164
- 小结 ..... 174
- 习题 ..... 175

## 第六章 触发器和时序逻辑电路 ..... 179

- 第一节 双稳态触发器 ..... 179
- 第二节 寄存器 ..... 184
- 第三节 计数器 ..... 187
- 第四节 555 定时器及其应用 ..... 192

|                                               |            |                                            |            |
|-----------------------------------------------|------------|--------------------------------------------|------------|
| 第五节 模拟量和数字量的转换 .....                          | 196        | 附录 .....                                   | 242        |
| 第六节 数字电路应用实例 .....                            | 200        | 附录一 半导体器件型号命名方法 .....                      | 242        |
| 小结 .....                                      | 202        | 附录二 常用半导体器件的<br>主要参数 .....                 | 243        |
| 习题 .....                                      | 203        | 附录三 集成器件型号命名方法 .....                       | 248        |
| <b>* 第七章 仿真软件 Multisim9 简介<br/>及其应用 .....</b> | <b>208</b> | 附录四 几种集成运放的<br>主要参数表 .....                 | <b>248</b> |
| 第一节 Multisim9 的窗口 .....                       | 208        | 附录五 常用集成稳压器 W7800 和<br>W7900 系列的主要参数 ..... | <b>249</b> |
| 第二节 Multisim9 的元件工具栏 .....                    | 212        | <b>部分习题答案 .....</b>                        | <b>250</b> |
| 第三节 Multisim9 中仪器仪表的使用 .....                  | 218        | <b>参考文献 .....</b>                          | <b>252</b> |
| 第四节 Multisim9 的基本操作 .....                     | 228        |                                            |            |
| 第五节 几个仿真实例 .....                              | 232        |                                            |            |
| <b>新旧符号对照表 .....</b>                          | <b>240</b> |                                            |            |

# 第一章 半导体器件及放大电路

本章首先介绍半导体和 PN 结的单向导电性。接着讨论半导体二极管、三极管的特性和参数。然后介绍放大电路的组成原则、工作原理、性能指标及分析计算方法。

## 第一节 PN 结

### 一、半导体

有关半导体的基本知识在物理学中已有介绍，这里只作简要概述。

#### 1. 半导体中的载流子

在半导体器件中，使用最多的半导体材料是锗和硅，它们都是四价元素，在其原子最外层轨道上有 4 个价电子。纯净的单晶半导体最外层价电子形成共价键结构，如图 1-1 所示。在受到热（或光照等）的作用时，少数的价电子获得足够能量，可挣脱原子核的束缚（电子受到激发）而逸出，成为自由电子，同时在原来共价键中留下一个空位子，称为空穴。在半导体中存在着两种导电粒子（载流子），一种是带负电荷的自由电子（简称电子）；另一种是带正电荷的空穴。在电场作用下，电子形成电子流，空穴形成空穴流，二者之和即为半导体中的电流。

在纯净的半导体中，电子与空穴是成对出现的。在运动过程中，如果自由电子填补了空穴，则电子和空穴就成对消失，这种现象称为复合。在一定的温度下，电子、空穴对的产生与复合在不停地进行，但最终处于一种平衡状态，使半导体中载流子的浓度保持一定。随温度升高，载流子浓度增加，温度每升高  $10^{\circ}\text{C}$  左右，载流子浓度约增加一倍。

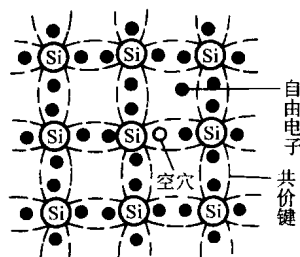


图 1-1 共价键示意图

#### 2. 杂质半导体

在纯净半导体中掺入相关的微量杂质元素，就会使半导体导电性能发生显著改变。因掺入杂质的不同，杂质半导体可分为两大类。

(1) N 型半导体 在硅（或锗）晶体中掺入五价元素（如磷、砷等），就成为 N 型半导体。五价元素替代了晶体中某些硅原子的位置，它的 5 个价电子中有 4 个与周围的 4 个硅原子形成共价键，多余一个电子处于共价键之外，在室温下很容易被激发成为自由电子，同时五价原子变成带正电的离子，如图 1-2a 所示。可以看出，每掺入一个五价原子，半导体中就多出一个自由电子。由于电子的增加，与空穴复合的机会增多，N 型半导体中的空穴就大大减少，因此在 N 型半导体中电子数远远大于空穴数，故 N

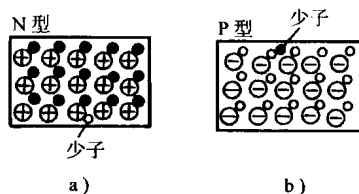


图 1-2 杂质半导体示意图

型半导体中多数载流子（简称多子）是电子，其数量主要取决于掺杂浓度；少数载流子（简称少子）是空穴，其数量主要取决于温度。

(2) P 型半导体 在硅（或锗）的晶体中掺入三价元素（如硼、镓等）就成为 P 型半导体。三价元素的三个价电子与周围硅原子形成共价键时，出现了一个空穴。在室温下，这些空穴能吸引临近的价电子来补充，使三价原子变成带负电的离子，如图 1-2b 所示。因此 P 型半导体的多子是空穴，其数量主要取决于掺杂浓度；少子是电子，其数量主要取决于温度。

## 二、PN 结及其单向导电性

在一块半导体中，通过不同的掺杂工艺，使其一边成为 N 型半导体，另一边成为 P 型半导体，在这两种半导体界面附近便形成了 PN 结，用这种 PN 结可以构成各种半导体器件。

### 1. PN 结的形成

由于 P 型半导体中多子是空穴，N 型半导体中多子是电子，在它们的交界处就出现了电子和空穴的浓度差别。电子和空穴总是从高浓度的地方向低浓度的地方扩散，于是在两种半导体界面附近，P 区的空穴必然向 N 区扩散，且与 N 区的电子复合而消失，在 P 区一侧留下不能移动的负离子空间电荷区。同样，N 区的电子也要扩散到 P 区，且与 P 区的空穴复合，在 N 区一侧留下不能移动的正离子空间电荷区，如图 1-3 所示。空间电荷区内形成了一个 N 区指向 P 区的内电场，随着扩散的不断进行，空间电荷区不断加宽，内电场不断加强。内电场的作用阻碍多子扩散，故也称空间电荷区为阻挡层。因此由浓度差而产生的多子扩散作用和由扩散而产生的内电场，对扩散的阻碍作用必然会达到动态平衡，使空间电荷区的宽度不再变化。另外，在内电场的作用下，少子产生运动，这种运动称为漂移，即 N 区的空穴向 P 区漂移，P 区的电子向 N 区漂移，其结果会使空间电荷区变窄，内电场被削弱，这又将引起多子扩散，加强内电场，最终仍会达到动态平衡。由此可见，在动态平衡状态下，扩散电流必然等于漂移电流，这时空间电荷区相对稳定，于是 PN 结形成。由于总的多子扩散电流等于少子漂移电流，且两者方向相反，故 PN 结中电流为零。

综上所述，在无外电场或其他因素激发时，PN 结处于相对稳定状态，没有电流通过，PN 结宽度一定。由于空间电荷区内没有载流子，所以又叫耗尽层，其宽度一般为数微米。

### 2. PN 结的单向导电性

(1) 外加正向电压 在图 1-4 中，P 区接电源正极，N 区接电源负极，这种接法称为正向偏置，简称正偏。此时在外电源的作用下，内电场被削弱，多子被推向耗尽层，结果使空间电荷区变窄，有利于多子的扩散，而不利少子的漂移。多子扩散电流称为正向电流，这时称 PN 结导通。导通时 PN 结两端电压只有零点几伏，所以很小的正向电压就可产生很大的正向电流  $I_F$ ，通常在回路中串入一个电阻  $R$  来限制电流。

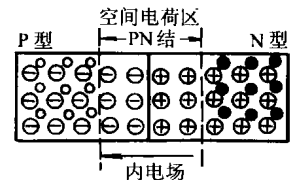


图 1-3 PN 结

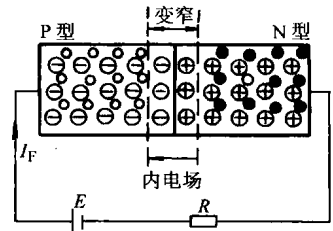


图 1-4 外加正向电压时的 PN 结

(2) 外加反向电压 在图 1-5 中, P 区接电源负极, N 区接电源正极, 这种接法称为反向偏置, 简称反偏。此时外电场使空间电荷区变宽, 加强了内电场, 阻止多子的扩散, 但有利于少子漂移, 在回路中产生了由少子漂移所形成的反向电流  $I_R$ 。因少子的浓度很低, 并在温度一定时浓度不变, 所以反向电流很小。由于少子数量有限, 当外加电压超过零点几伏后, 反向电流基本上不随外加电压的增加而增加, 故称之为反向饱和电流。

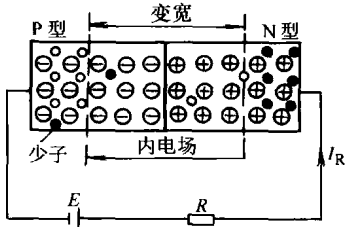


图 1-5 外加反向电压时的 PN 结

由以上分析可知: PN 结具有单向导电性, 即在 PN 结上加正向电压时, 正向电流较大 (PN 结电阻很小, 处于导通状态); 加反向电压时, 反向电流很小 (PN 结电阻很大, 处于截止状态)。

【练习与思考】

- 1-1-1 PN 结两端存在着内电场, 即有内电位差, 若将二极管短路是否有电流通过?
- 1-1-2 空间电荷区既然是由带电的正负离子形成的, 为什么它的电阻率很高?

第二节 半导体二极管

一、二极管的结构

半导体二极管也叫晶体二极管, 简称二极管。它是由一个 PN 结加上引线和管壳构成的。按 PN 结的面积大小可分为点接触型和面接触型两类。

点接触型二极管结构见图 1-6a。它的特点是结面积小, 因而结电容小, 适用于高频工作, 但不能通过很大的电流, 主要用作高频检波和脉冲电路里的开关器件。例如, 2AP1 是点接触型锗二极管, 最大整流电流是 16mA, 最高工作频率是 150MHz。

面接触型二极管结构见图 1-6b, 它的特点是结面积大, 因而能通过较大的电流, 但其结电容也大, 只能工作在较低频率下。例如, 2CZ56 是面接触型硅二极管, 最大整流电流 3A, 最高工作频率只有 3kHz。

二极管的符号如图 1-6c 所示。

二、二极管的伏安特性

二极管的导电性能常用伏安特性来表示。它是指二极管两端的电压  $U$  和流经二极管的电流  $I$  之间的关系, 图 1-7 示出了一只实际二极管的伏安特性曲线。

1. 正向特性

图 1-7 的第①段为正向特性曲线。在正向电压较小时, 外电场还不足以克服 PN 结的内电场, 因此这时的正向电流几乎为零; 只有当外加电压超过一定数值后, 才有明显的正向电

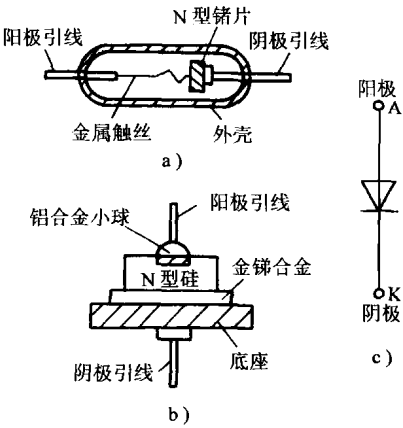


图 1-6 二极管的结构及符号  
a) 点接触型 b) 面接触型 c) 符号

流，该电压称为死区电压。在室温下，硅管死区电压约为 0.5V，锗管约为 0.1V。当正向电压大于死区电压时，内电场被大大削弱，电流随电压增加而增长很快。正向导通且电流不大时，硅管压降约为 0.6 ~ 0.8V，锗管压降约为 0.2 ~ 0.3V。

2. 反向特性

图 1-7 的第②段为反向特性曲线。在反向电压作用下，少数载流子通过 PN 结，形成反向饱和电流。但由于少子的数目很少，所以反向电流是很小的。小功率硅管的反向电流一般小于 1μA，而锗管通常为几十微安。

温度升高时由于少子的增加，反向电流将随之增加。

3. 反向击穿特性

图 1-7 的第③段为反向击穿特性曲线。当反向电压增加到一定数值时，反向电流剧增。这是由于外加电压在 PN 结中形成很强的电场，并产生大量的电子、空穴，引起反向电流急剧增加，这种现象叫做反向击穿。

二极管的伏安特性对温度很敏感，随着温度升高，正向特性曲线向左移，反向特性曲线向下移，如图 1-8 所示。变化规律是：在室温附近，温度每升高 1℃，在同样的正向电流下，正向压降减小 2 ~ 2.5mV；温度每升高 10℃，反向电流约增加一倍。硅二极管允许的最高工作温度为 150 ~ 200℃，锗二极管只允许工作在 100℃ 以下，因此大功率二极管几乎都用硅制造。

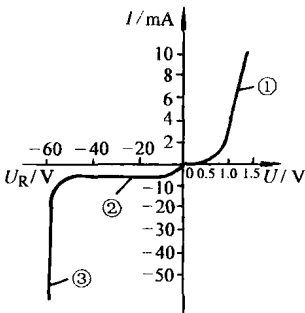


图 1-7 2CZ52A 的伏安特性曲线

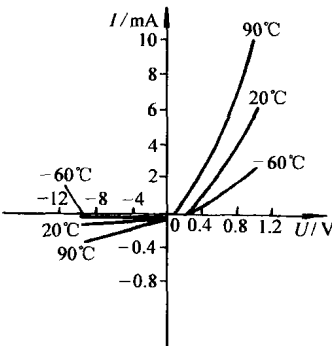


图 1-8 温度对二极管特性的影响

三、二极管的主要参数

二极管的导电特性还可用参数来定量描述，它是正确使用和合理选择二极管的依据。二极管的主要参数有下面几个。

1. 最大整流电流  $I_F$

这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 结的结面积和外界散热条件决定的。实际应用时，二极管的平均电流不允许超过此值，并要满足散热条件，否则会烧坏二极管。

2. 最高反向工作电压  $U_{RM}$

这是指二极管在使用时，允许施加的最高反向电压。超过此值二极管就有发生反向击穿的危险。通常取反向击穿电压的一半作为  $U_{RM}$ 。

### 3. 反向电流 $I_R$

这是指在室温条件下，二极管未击穿时的反向电流值。此值越小，二极管的单向导电性越好。反向电流与温度有密切关系，所以使用二极管时要注意温度的影响。

### 4. 最高工作频率 $f_M$

二极管具有一定的电容效应，在 PN 结内有不能移动的正负离子，各具有一定的电荷量。当外加电压使耗尽层变宽时，电荷量增加，相当于电容充电；当外加电压使耗尽层变窄时，电荷量减少，相当于电容放电，这种电容效应称为结电容。其大小与 PN 结的结面积成正比，与耗尽层的宽度成反比。当外加电压改变时，耗尽层宽度改变，结电容的大小也相应改变。

结电容的存在限制了二极管的工作频率，因为加高频电压时，结电容将通过高频电流，破坏了 PN 结的单向导电性。因此，不同型号的二极管都有最高工作频率  $f_M$  的限制，结电容大的允许工作频率低，结电容小的允许工作频率高。

值得注意的是，由于制造工艺的限制，即使是同一型号的管子，参数的分散性也很大。有关电子器件手册中给出的往往是参数的范围，而参数是在一定的测试条件下测得的，应用时要注意这些条件，若条件改变，相应的参数值也会发生变化。

【例 1-1】试判断图 1-9 中二极管是导通还是截止？为什么？

**解** 要判断二极管导通与截止，主要看二极管是处于正向偏置还是反向偏置。可先将二极管除去，分别计算管子两极 A 点与 B 点电位。如果  $V_A > V_B$ ，则二极管导通；如果  $V_A < V_B$ ，则二极管截止。

图 1-9 中除去二极管后

$$V_A = \frac{10\text{k}\Omega}{(140 + 10)\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 1\text{V}$$

$$V_B = -\frac{2\text{k}\Omega}{(18 + 2)\text{k}\Omega} \times 10\text{V} + \frac{5\text{k}\Omega}{(25 + 5)\text{k}\Omega} \times 15\text{V} = 1.5\text{V}$$

$$V_A < V_B$$

因此二极管 2AP1 截止。

## 四、二极管应用电路举例

二极管在电子电路中广泛应用。本书的第三章和第五章将分别介绍二极管在整流电路和逻辑门电路中的应用。这里举几个二极管在其他方面应用的例子。

### 1. 二极管限幅电路（削波电路）

利用二极管的截止与导通，可以起到限幅作用。图 1-10a 示出二极管限幅电路。在下面的分析中，忽略二极管的正向压降和反向电流。

当输入电压为正时，二极管截止，相当于开路，输出电压等于输入电压；当输入电压为负时，二极管导通，相当于短路，输出电压为零。因此输出和输入电压的关系式为

$$u_o = \begin{cases} u_i, & \text{当 } u_i \geq 0 \\ 0, & \text{当 } u_i < 0 \end{cases}$$

当输入电压为正弦电压时，其输出波形如图 1-10b 所示。可以看出，该电路把输入波形

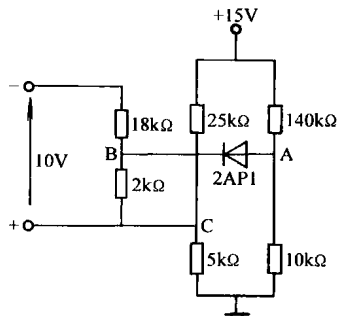


图 1-9 例 1-1 图

中低于零的部分限制在零,或者说,把输入电压的负半波削掉了。

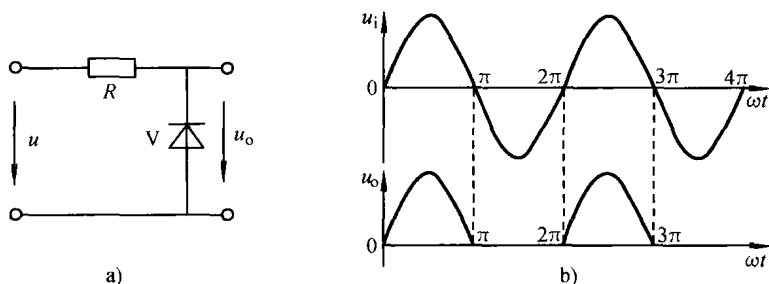


图 1-10 二极管限幅电路及波形

**【例 1-2】** 在图 1-11a 电路中, 已知  $u_i = 10\sin\omega t\text{V}$ ,  $E = 5\text{V}$ ,  $R = 1\text{k}\Omega$ , 二极管的正向压降和反向电流均忽略不计。试画出  $u_o$  的波形。

**解** 已知  $u_i$  是按正弦规律变化的, 当  $u_i < E$  时, 二极管反向截止, 相当于开路,  $u_o = u_i$ , 即  $u_o$  随  $u_i$  变化; 当  $u_i > E$  时, 二极管正向导通, 相当于短路,  $u_o = E$ 。 $u_o$  的波形如图 1-11b 所示, 作图时应注意  $u_o$  和  $u_i$  间的对应关系。

可以看出,  $u_i$  正峰值附近的波形被削掉了, 二极管起到了限幅作用。

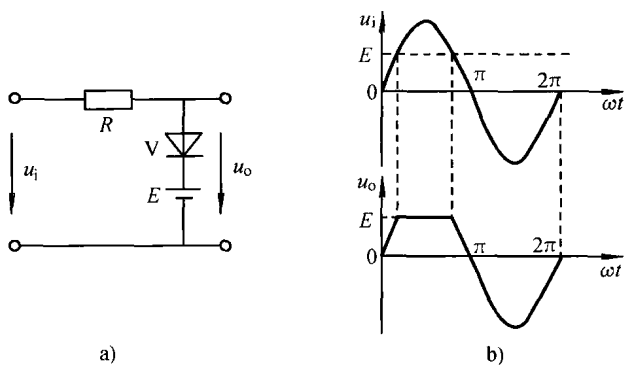


图 1-11 例 1-2 图

## 2. 二极管检波电路

在图 1-12a 中, 设  $C$  和  $R_1$  的数值都很小, 即电容器  $C$  经  $R_1$  的充、放电都很快。已知  $u_i$  为方波, 且电容器初始电压  $u_{C(0)} = 0$ , 现分析  $u_o$  的波形。

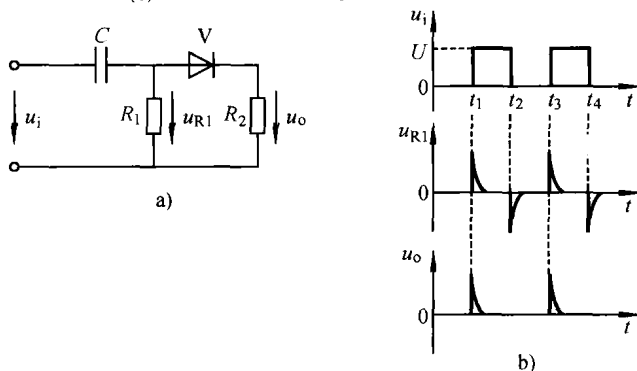


图 1-12 二极管检波电路及波形图

在  $0 \sim t_1$  期间, 电容器电压为零, 二极管截止,  $u_{R1}$  和  $u_o$  均为零; 在  $t_1$  瞬间,  $u_i$  由零上升到  $U$ , 电容器经  $R_1$  和  $R_2$  分两路迅速充电, 二极管导通,  $u_{R1}$  和  $u_o$  均为正尖脉冲; 在  $t_2$  瞬间,  $u_i$  由  $U$  下降到零, 电容器通过  $R_1$  迅速放电,  $u_{R1}$  为负尖脉冲, 此时二极管截止,  $u_o$  为零。同理可知, 在  $t_3$ 、 $t_4$  瞬间,  $u_{R1}$  和  $u_o$  的波形与  $t_1$ 、 $t_2$  瞬间相同。图 1-12b 示出了  $u_i$ 、 $u_{R1}$  和  $u_o$  的波形。

在这里, 二极管除去了负的尖脉冲, 起到对输入方波电压上升沿检波的作用。

### 3. 二极管钳位电路

在图 1-13 所示的电路中, 省去了参考点, 图中各电压的数值都是对参考点而言的。现分析二极管的钳位作用。

先把开关  $S$  断开。由于 A 点电位低于 B 点电位, 而  $V_1$ 、 $V_2$  管的阳极电位相同, 则  $V_1$  优先导通, 忽略二极管导通压降后, P 点电位为零,  $u_o = 0$ , 此时  $V_2$  因反向偏置而截止。再把开关  $S$  接通,  $V_1$  仍然导通, P 点电位不变。可见, 二极管  $V_1$  对 P 点电位有钳制到零电位的作用。

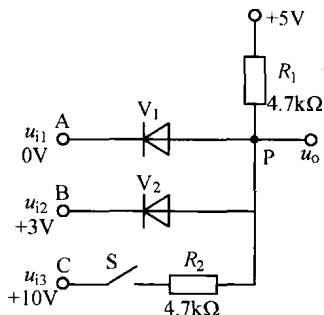


图 1-13 二极管钳位电路

### 【练习与思考】

1-2-1 怎样使用万用表来判断二极管的正负极与好坏?

## 第三节 特殊二极管

除了上述普通二极管外, 还有一些按专门用途制造的特殊二极管, 如稳压二极管、光敏二极管、发光二极管等, 现分别介绍如下。

### 一、稳压二极管

#### 1. 稳压二极管的稳压作用

稳压二极管 (简称稳压管) 是一种专门用来稳定电压的二极管, 它的符号、伏安特性曲线如图 1-14 所示。稳压二极管通常工作在反向击穿区, 且当外加反向电压撤除后, 管子还是正常的, 并未损坏, 这种性能称为可逆性击穿。当然, 如果反向电流太大, 超过允许的最大值, 则管子会因过热而烧坏, 为此稳压管必须串联一个合适的限流电阻后再接入电路。

稳压管的正向特性与普通二极管基本一样, 正向压降约为  $0.6V$ , 但它的反向击穿特性曲线更陡些。图 1-14 中的  $U_Z$  为反向击穿电压, 即稳压管的稳定电压。稳压管的稳压作用在于: 工作在稳压区时, 当流经管内的电流变化很大时, 它的端电压变化很小。特性曲线愈陡, 稳压管的稳压性能愈好。

#### 2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压  $U_Z$  这是指稳压管中电流为规定值时, 稳压管两端的电压值。由于工艺方面的原因, 即使同一型号的稳压管,  $U_Z$  的分散性也较大, 例

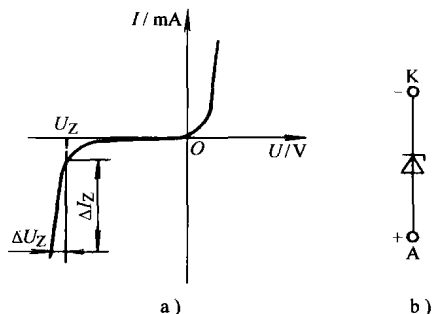


图 1-14 稳压管

a) 特性曲线 b) 符号

如：2CW55 型稳压管的  $U_Z$  为 6~7.5V（测试电流为 10mA）。

(2) 稳定电流  $I_Z$  这是指稳压管正常工作时的参考电流值。电流低于此值时，稳压效果变差；高于此值时，只要不超过额定功耗都可以正常工作，且电流愈大，稳压效果愈好，但管子的功耗要增加。

(3) 动态电阻  $R_Z$  这是指稳压管两端电压的变化量  $\Delta U_Z$  与相应的电流变化量  $\Delta I_Z$  之比， $R_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$ 。 $R_Z$  随工作电流不同而变化，电流越大， $R_Z$  越小，例如：2CW51 型稳压管的工作电流为 1mA 时， $R_Z = 400\Omega$ ；10mA 时为  $60\Omega$ 。

(4) 电压温度系数  $C_{TU}$  稳压管的稳定电压值随工作温度不同而有所变化，通常用温度系数来表示稳压管的温度稳定性。2CW58 型稳压管  $C_{TU} \leq 8 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ，表示温度每升高  $1^\circ\text{C}$ ，其稳压值将增加 0.08%。硅稳压管  $U_Z$  低于 4V 时，具有负温度系数；高于 7V 时，具有正温度系数；而在 4~7V 之间时，温度系数很小。

(5) 最大耗散功率  $P_{ZM}$  这是指管子不致于产生过热损坏时的最大功率损耗值， $P_{ZM} = I_{ZM} U_Z$ ，其中  $I_{ZM}$  是稳压管的最大稳定电流。

【例 1-3】在图 1-15 电路中，稳压管的参数为  $U_Z = 12\text{V}$ ， $I_{ZM} = 18\text{mA}$ 。为使管子不致烧坏，限流电阻取值应为多少？

解

$$R \geq \frac{U_S - U_Z}{I_{ZM}} = \frac{(20 - 12)\text{V}}{18\text{mA}} = 0.44\text{k}\Omega$$

几种常见稳压管的主要参数见附录二。

### 3. 稳压管稳压电路

图 1-16 是由稳压管 V 和限流电阻  $R$  组成的最简单的稳压电路。交流电压经整流滤波电路后得到的直流电压  $U_i$  作为稳压电路的输入，稳压电路的输出是负载  $R_L$  两端的电压  $U_o$ ，即稳压管两端的电压  $U_Z$ 。当电网电压波动引起  $U_i$  上升时，势必引起  $U_o$  增加，则流过稳压管的电流  $I_Z$  便大大增加，于是  $I = I_Z + I_o$  增加很多，电阻  $R$  上的压降相应增加，致使负载电压  $U_o$  下降，而其值基本保持不变。就是说， $U_i$  的增量绝大部分降在  $R$  上，从而保持了  $U_o$  的基本稳定。反之，当  $U_i$  下降时，同样可保证  $U_o$  的稳定，读者可自行分析。

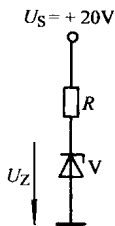


图 1-15 例 1-3 图

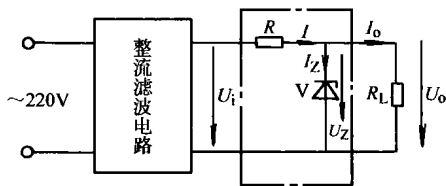


图 1-16 稳压管稳压电路

同理，当负载  $R_L$  变动时也能起到稳定输出电压的作用。例如，当  $R_L$  减小使  $I_o$  增加时， $U_o$  也将减小。但  $U_o$  的减小使稳压管的工作电流  $I_Z$  大大减小， $R$  上通过的电流也跟着减小， $R$  两端电压降减小，就使  $U_o$  回升而保持输出电压基本不变。实际上，负载电流的增加是由稳压管电流的减少来补偿的，使通过  $R$  的电流  $I$  基本不变，输出电压  $U_o$  也就稳定了。

综上所述，这种稳压电路的实质在于利用稳压管工作在反向击穿区时，其端电压略有变化而使电流变化很大的特性，配合电阻  $R$  的调整作用来实现稳压。

二、光敏二极管

光敏二极管的特点是，当光线照射在它的 PN 结时，会像热激发一样，可以成对地产生电子和空穴，使半导体中少子的浓度提高。这些载流子在反向偏置下可以产生漂移电流，使反向电流增加。因此，它的反向电流随光照强度的增加而增加，光敏二极管的管壳上备有一个玻璃窗口，以便于接受光照。图 1-17a 是光敏二极管的符号，图 1-17b 是它的特性曲线。灵敏度的典型值为  $0.1\mu\text{A}/\text{lx}^\ominus$  数量级。

光敏二极管可以用来作为光控元件，当制成大面积的光敏二极管时，可当作一种能源而称为光电池。此时它不需外加电源，能够直接把光能变成电能。

三、发光二极管

发光二极管的原理与光敏二极管相反。当这种管子正向偏置通过电流时会发出光来，这是由于电子与空穴直接复合时放出能量的结果。它的光谱范围是比较窄的，其波长由所使用的基本材料决定。发光二极管常用元素周期表Ⅲ<sub>A</sub>族及Ⅴ<sub>A</sub>族元素化合物，如砷化镓、磷化镓等制成。图 1-18 是发光二极管的符号。几种常见发光材料的主要参数见表 1-1。发光二极管常用来作为显示器件，工作电流一般为几毫安至几十毫安。

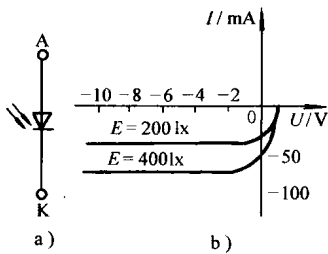


图 1-17 光敏二极管  
a) 符号 b) 特性曲线



图 1-18 发光二极管符号

表 1-1 发光二极管的主要特性

| 颜 色 | 波 长<br>/mm | 基本材料 | 正向电压/V<br>(10mA 时) | 光功率<br>/μW | 发光强度/mcd <sup>①</sup><br>(10mA 时, 张角 ±45°) |
|-----|------------|------|--------------------|------------|--------------------------------------------|
| 红外  | 900        | 砷化镓  | 1.3 ~ 1.5          | 100 ~ 500  |                                            |
| 红   | 655        | 磷砷化镓 | 1.6 ~ 1.8          | 1 ~ 2      | 0.4 ~ 1                                    |
| 鲜红  | 635        | 磷砷化镓 | 2.0 ~ 2.2          | 5 ~ 10     | 2 ~ 4                                      |
| 黄   | 583        | 磷砷化镓 | 2.0 ~ 2.2          | 3 ~ 8      | 1 ~ 3                                      |
| 绿   | 565        | 磷化镓  | 2.2 ~ 2.4          | 1.5 ~ 8    | 0.5 ~ 3                                    |

① cd (坎德拉) 为发光强度的单位。

【练习与思考】

1-3-1 在图 1-19 电路中，稳压管  $U_z = 14\text{V}$ ， $I_{zM} = 18\text{mA}$ 。求：

- ①当  $U_i = 30\text{V}$  时，开关 S 断开与闭合时的  $I$ 、 $I_z$  和  $I_L$ ；②当  $U_i = 32\text{V}$  时，开关 S 断开与闭合时的上述电流。[①16mA，16mA，0；16mA，9mA，7mA；②18mA，18mA，0；18mA，11mA，7mA]

1-3-2 利用稳压管或普通二极管的正向压降是否也可以稳压？

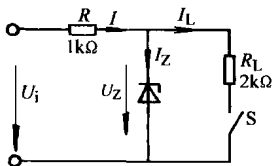


图 1-19

⊖ lx (勒克斯) 为光照度 E 的单位。

### 第四节 半导体三极管

半导体三极管又称晶体管，图 1-20a 为 NPN 型管的管芯结构图，图 1-20b 为 NPN 示意图。从图中可看出，它有三个区，分别称为发射区、基区和集电区，三个区分别引出三个电极，即发射极 E、基极 B 和集电极 C；有两个 PN 结，发射区和基区间的 PN 结称发射结，集电区和基区间的 PN 结称集电结。这种由两个 N 型区中间夹一个 P 型区的半导体三极管，称为 NPN 型管。还有一种由两个 P 型区中间夹一个 N 型区的半导体三极管，称为 PNP 型管。两种类型管子的符号见图 1-20c。使用时，两种晶体管的电源极性是相反的。

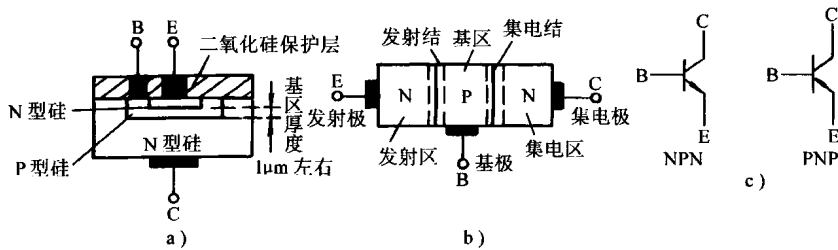


图 1-20 晶体管  
a) 管芯结构图 b) NPN 型管示意图 c) 符号

晶体管内部结构上的特点是：发射区掺杂浓度高，即多子浓度高；基区很薄且杂质浓度低；集电区体积大，掺杂浓度较低。这是晶体管具有电流放大作用的内因。

#### 一、晶体管的电流放大作用

晶体管内部结构上的特点是其具有电流放大作用的内部条件，而放大的外部条件是发射结要正向偏置，集电结要反向偏置，可由图 1-21 所示电路来实现。为了简要说明电流放大作用，忽略了一些次要因素。下面以 NPN 管为例进行介绍。

由于发射结正向偏置，发射区杂质浓度高，所以发射区的多子（电子）源源不断地越过发射结到达基区，形成发射极电流  $I_E$ 。由于浓度差，到达基区的电子要继续向集电结扩散，在扩散过程中有部分电子与基区的空穴复合，基极电源  $E_B$  给基区补充空穴，形成电流  $I_B$ 。但由于基区很薄，且空穴浓度很低，所以  $I_B$  很小，而绝大部分电子扩散到集电结的边沿。由于集电结是反向偏置，所以扩散到集电结边沿的电子在集电结电场作用下，很容易漂移到集电区，通过外电源  $E_C$  形成集电极电流  $I_C$ 。

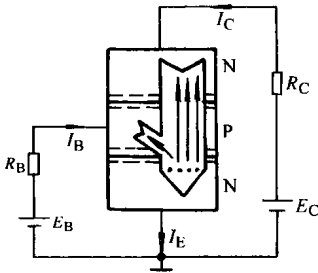


图 1-21 晶体管内部电流分配

从以上分析可看出： $I_E = I_B + I_C$ ，且  $I_C \gg I_B$ ，这就是晶体管的电流分配关系。当  $I_B$  有一增量  $\Delta I_B$  时， $I_C$  也有相应的增量  $\Delta I_C$ ，且  $\Delta I_C \gg \Delta I_B$ ，即一个较小的  $\Delta I_B$  可以引起一个较大的  $\Delta I_C$ ，这就是所谓的电流放大作用。集电极电流变化量与基极电流变化量之比，称为交流电流放大系数  $\beta$ ，即