



普通高等教育“十一五”规划教材

# 电子技术

## (非电类专业)

第2版

龚淑秋 李忠波 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”规划教材

# 电 子 技 术

(非电类专业)

第 2 版

主编 龚淑秋 李忠波  
参编 袁 宏 申永山  
高有华  
主审 曹承志



机械工业出版社

本书主要包括：常用半导体器件、基本放大电路、功率放大电路、差动放大电路、集成运算放大电路、直流稳压电源、晶闸管及其电路、逻辑代数及逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器及时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形、数/模与模/数转换等。本书全方位渗透电子设计自动化技术，各章增加 EDA 仿真实例，突出了电路的实际应用方法。本书节后有练习与思考，章后有小结和习题。

本书可供高等理工院校本科、专科机械类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业及成人教育、函授、夜大学和职工大学的相关专业师生使用，也可供科技人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电子技术/龚淑秋, 李忠波主编. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2010. 1  
普通高等教育“十一五”规划教材  
ISBN 978 - 7 - 111 - 28514 - 4

I. 电… II. ①龚…②李… III. 电子技术 - 高等学校 - 教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 183402 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: 霍永明  
封面设计: 姚 毅 责任校对: 吴美英 责任印制: 乔 宇  
北京京丰印刷厂印刷  
2010 年 1 月第 2 版·第 1 次印刷  
184mm × 260mm · 19.75 印张 · 488 千字  
标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 28514 - 4  
定价: 35.00 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

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

## 第2版前言

《电子技术》一书自2003年出版以来,在各兄弟院校和广大读者的支持下,历时6年,发行量逾3万册。此间,我们广泛吸收了读者的建议和意见。这次修订再版,是在初版的基础上的总结提高,在内容处理上做了精选、改写、调整和补充。本书是辽宁省教学成果奖二等奖的成果之一,也是辽宁省精品课程电工学(电工技术、电子技术)选用的教材。

考虑到学时的限制,又要补充电子学科的新内容,所以对全书进行了结构调整,减小了分立元件电路的比例,重点突出常用、实用电路的分析。例如,将原第3章(场效应晶体管及其放大电路)内容精简为一小节,移入第2章作为选讲内容;删去原第15章半导体存储器与可编程逻辑阵列;删去原第8章第2节(三相桥式整流电路)和第3节的 $\pi$ 形滤波电路等;修订后的《电子技术》由原来的15章变为13章,内容精炼,结构紧凑。

电子科学技术在21世纪呈现高速发展态势,新知识、新技术、新方法不断涌现,本书修订再版,内容力求把握电子技术的发展动向,适时补充先进内容。例如,在第5章介绍了贴片式集成电路,增加了由运算放大器构成的电子式热继电器电路;增加了常用电子元器件与EDA中图形符号对照表;在第9章中增加了TTL集成门电路的介绍等。同时全方位渗透电子设计自动化技术,各章增加EDA仿真实例,突出了电路的实际应用方法,也与先进的电子电路分析方法接轨。这些内容的补充使电子技术做到顺应潮流,与时俱进。

修订后的《电子技术》,对全书每节后的练习与思考和章后的习题做了必要的增减,力图题型多样化,难度有层次,在提出问题的角度上更具启发性。积极倡导现代化教学手段的使用,还制作了与之配套的多媒体CAI课件光盘,与EDA软件配合很适合教学使用。

本书是与《电工技术》(第2版)、《电工技术试题题型精选汇编》(第2版)、《电子技术试题题型精选汇编》(第2版)、《电子设计与仿真技术》(第2版)配套的系列教材,也可作为电子技术教材单独使用。本教材参考学时为模拟电子技术部分(1~8章)为28~34学时,数字电子技术部分(9~13章)为20~30学时,对拓宽选学内容标注了\*号。

本书由沈阳工业大学龚淑秋副教授(编写第4、5、6、7章)和李忠波教授(编写第11章和附录)担任主编。沈阳工业大学袁宏教授编写第1、8、12章,申永山老师编写第2、3章,高有华教授编写9、10、13章。CAI课件由龚淑秋和李忠波制作。曹承志教授对本书原稿进行了仔细审阅,提出了许多宝贵意见,在此深表谢忱。

本教材可供高等理工科院校本科、专科机械类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业及成人教育、函授、夜大学和职工大学的相关专业教学使用。

由于编者能力和水平有限,书中内容若有疏漏、欠妥和错误之处恳请读者提出批评和改进意见,以便今后不断提高。

编者

# 第1版前言

《电子技术》是与《电工技术》、《电工技术试题题型精选汇编》、《电子技术试题题型精选汇编》配套的系列教材。本教材是根据国家教育部电工学课程教学指导小组拟定的电子技术课程教学基本要求和面向21世纪人才培养目标而编写的。本教材可供高等理工院校本科、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、经贸管理类、机电一体化类、计算机类等有关专业教学使用。

“电子技术”是非电类专业的技术基础教程。通过本课程的学习，应使学生得到电子技术必要的基础理论、基本知识和基本技能，了解电子技术发展的概况，为学习后续课程、从事有关的工程技术和科学研究工作打好理论和实践基础。

为适应科学技术新发展和教育教学改革的需要，本书加强了电子技术基础内容；加强了模拟集成电路和中大规模数字集成电路的介绍、分析和应用；在体系和内容的编排上力求适应多媒体教学的需要。

“电子技术”是编者在多年教学实践中，经过多个教学过程，对课程体系、内容及教学方法不断研究和总结，并广泛吸取兄弟院校有关教师的意见和建议的基础上编写的。第一篇模拟电子技术（第一~九章）可供48~64学时教学使用。第二篇数字电子技术（第十~十五章）可供32~48学时教学使用。书中带\*号内容属于加宽、加深内容，可由教师根据专业特点和学时多少决定取舍。为便于教学和学生自学，书中还编写了练习与思考、例题和习题。为使学生掌握先进的分析、设计工具，促进教学手段现代化，大部分章节后有利用电子设计自动化（EDA）软件对教学内容进行分析、研究和设计的习题。在《电子技术试题题型精选汇编》中有相关的引导性例题。

本书由沈阳工业大学李忠波（编写第七、八、九、十二、十三、十四、十五章和附录）担任主编。沈阳工业大学袁宏编写第一、二章，申永山编写第三、四章，龚淑秋编写第五、六章，高有华编写第十、十一章。范振铨教授对本书原稿进行了仔细审阅，提出许多修改意见，在此深表谢意。由于编者学识有限，本书难免有不妥和错误之处，恳请使用本书的读者提出批评指正。

编者

# 目 录

## 第2版前言

## 第1版前言

## 第1篇 模拟电子技术

|                         |    |                           |     |
|-------------------------|----|---------------------------|-----|
| 第1章 双极型半导体器件 .....      | 1  | 5.5 使用集成运算放大器应注意的问题 ..... | 84  |
| 1.1 半导体的基础知识 .....      | 1  | 小结 .....                  | 86  |
| 1.2 半导体二极管 .....        | 4  | 习题 .....                  | 87  |
| 1.3 半导体三极管 .....        | 11 | 第6章 反馈与振荡电路 .....         | 91  |
| 小结 .....                | 14 | 6.1 反馈的基本概念 .....         | 91  |
| 习题 .....                | 15 | 6.2 负反馈放大电路的一般表达式 .....   | 100 |
| 第2章 放大电路基础 .....        | 17 | 6.3 负反馈对放大电路性能的影响 .....   | 102 |
| 2.1 基本共射极放大电路 .....     | 17 | 6.4 负反馈放大电路的近似估算 .....    | 107 |
| 2.2 工作点稳定的共射极放大电路 ..... | 24 | *6.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除      |     |
| 2.3 共集电极放大电路 .....      | 28 | 方法简介 .....                | 110 |
| 2.4 多级放大电路 .....        | 31 | 6.6 正弦波振荡的基础知识 .....      | 112 |
| *2.5 绝缘栅场效应晶体管及其放大      |    | 6.7 RC正弦波振荡电路 .....       | 114 |
| 电路 .....                | 34 | 6.8 LC正弦波振荡电路 .....       | 116 |
| 小结 .....                | 37 | 6.9 石英晶体正弦波振荡电路 .....     | 119 |
| 习题 .....                | 37 | 小结 .....                  | 122 |
| 第3章 功率放大电路 .....        | 41 | 习题 .....                  | 123 |
| 3.1 概述 .....            | 41 | 第7章 直流稳压电源 .....          | 127 |
| 3.2 互补对称功率放大电路 .....    | 42 | 7.1 单相桥式整流电路 .....        | 127 |
| *3.3 集成功率放大器 .....      | 46 | 7.2 滤波电路 .....            | 131 |
| *3.4 晶体功率管的散热与保护 .....  | 47 | 7.3 硅稳压二极管稳压电路 .....      | 136 |
| 小结 .....                | 48 | 7.4 集成稳压电路 .....          | 138 |
| 习题 .....                | 49 | 小结 .....                  | 145 |
| 第4章 差动放大电路 .....        | 50 | 习题 .....                  | 145 |
| 4.1 典型差动放大电路 .....      | 50 | 第8章 晶闸管及其电路 .....         | 148 |
| 4.2 具有恒流源的差动放大电路 .....  | 56 | 8.1 晶闸管 .....             | 148 |
| 小结 .....                | 60 | 8.2 可控整流电路及仿真分析 .....     | 152 |
| 习题 .....                | 61 | *8.3 晶闸管的保护 .....         | 160 |
| 第5章 集成运算放大电路 .....      | 62 | 8.4 单结晶体管触发电路 .....       | 162 |
| 5.1 集成运算放大器简介 .....     | 62 | *8.5 晶闸管集成触发电路 .....      | 168 |
| 5.2 集成运算放大器的线性应用 .....  | 67 | *8.6 晶闸管电路应用举例 .....      | 171 |
| 5.3 集成运算放大器的非线性应用 ..... | 75 | 小结 .....                  | 174 |
| 5.4 集成运算放大器应用实例 .....   | 83 | 习题 .....                  | 175 |

## 第2篇 数字电子技术

|                                 |     |                                        |     |
|---------------------------------|-----|----------------------------------------|-----|
| <b>第9章 逻辑代数及逻辑门电路</b> .....     | 178 | 12.2 单稳态触发器 .....                      | 268 |
| 9.1 逻辑代数基础知识 .....              | 178 | 12.3 施密特触发器 .....                      | 271 |
| 9.2 逻辑函数的化简 .....               | 181 | 12.4 多谐振荡器 .....                       | 272 |
| 9.3 逻辑门电路 .....                 | 186 | 小结 .....                               | 276 |
| 9.4 典型集成门电路的结构与特性 .....         | 191 | 习题 .....                               | 276 |
| 9.5 集成逻辑门电路使用中的几个<br>实际问题 ..... | 197 | <b>*第13章 数/模与模/数转换</b> .....           | 279 |
| 9.6 EDA 应用举例 .....              | 198 | 13.1 数/模转换器 .....                      | 279 |
| 小结 .....                        | 201 | 13.2 模/数转换器 .....                      | 284 |
| 习题 .....                        | 201 | 小结 .....                               | 292 |
| <b>第10章 组合逻辑电路</b> .....        | 206 | 习题 .....                               | 293 |
| 10.1 组合电路的分析和设计 .....           | 206 | <b>附录</b> .....                        | 294 |
| 10.2 常用集成组合逻辑电路 .....           | 210 | 附录A 半导体分立器件型号命名<br>方法 .....            | 294 |
| *10.3 组合电路的竞争冒险 .....           | 220 | 附录B 常用半导体器件的参数 .....                   | 295 |
| 10.4 组合电路的仿真分析 .....            | 221 | 附录C 集成电路型号命名方法 .....                   | 299 |
| 小结 .....                        | 225 | 附录D 国内外部分集成运算放大器<br>同类产品型号对照表 .....    | 301 |
| 习题 .....                        | 225 | 附录E 几种国产集成运算放大器<br>参数规格表 .....         | 302 |
| <b>第11章 触发器及时序逻辑电路</b> .....    | 229 | 附录F 音频功率器件 D810 电路主要<br>技术指标的典型值 ..... | 303 |
| 11.1 RS 触发器 .....               | 229 | 附录G 三端式集成稳压器性能参数 .....                 | 304 |
| 11.2 JK 触发器 .....               | 234 | 附录H 功率场控器件的主要参数 .....                  | 304 |
| 11.3 D 触发器 .....                | 236 | 附录I 555 定时器的主要性能参数 .....               | 304 |
| 11.4 触发器功能的转换 .....             | 237 | 附录J 二进制逻辑单元新、旧图形<br>符号对照表 .....        | 306 |
| 11.5 寄存器 .....                  | 239 | 附录K 常用电子元器件与 EDA 中图形<br>符号对照表 .....    | 307 |
| 11.6 计数器 .....                  | 246 | <b>参考文献</b> .....                      | 309 |
| 11.7 脉冲分配器 .....                | 257 |                                        |     |
| 小结 .....                        | 259 |                                        |     |
| 习题 .....                        | 259 |                                        |     |
| <b>第12章 脉冲信号的产生与整形</b> .....    | 266 |                                        |     |
| 12.1 555 定时器 .....              | 266 |                                        |     |

# 第1篇 模拟电子技术

## 第1章 双极型半导体器件

半导体器件是组成半导体电路的核心元件，电路的性能除了决定其结构和类型之外，还与其所用器件的特性和参数有着密切的关系。因此，学习电子技术必须首先了解常用半导体器件的工作原理，掌握它们的特性和参数。半导体器件按导电类型分成两大类：一类是双极型半导体器件；一类是单极型半导体器件。

自由电子和空穴两种载流子参与导电的半导体器件称为双极型半导体器件，而只有一种载流子参与导电的称为单极型半导体器件。双极型半导体器件的基本单元是PN结，PN结是由半导体构成的。本章将介绍半导体的导电特性、PN结以及最基本的双极型半导体器件——半导体二极管、稳压管和晶体三极管。

### 1.1 半导体的基础知识

#### 1.1.1 半导体

在常温下，导电能力介于导体与绝缘体之间的物体称为半导体。常用的半导体材料有硅、锗以及砷化镓、碳化硅等。纯净的硅在常温时的电阻率约为  $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

半导体具有如下特殊性质：

(1) 掺杂性 在纯净的硅晶体中掺入百万分之一的硼，其电阻率将下降为原电阻率的50万分之一左右，利用这种导电性能的可控性，可以制成各种类型的半导体器件。

(2) 热敏性 半导体的电阻率随温度变化很敏感，一般情况下（非重掺杂），温度升高电阻率下降。可制成热敏器件。

(3) 光敏性 受光照后，半导体的电阻率大为降低。依此特性可制成各种光电器件和太阳能电池等。

半导体的这些特殊性质是由其内在的矛盾和运动规律所决定的。

#### 1.1.2 本征半导体

本征半导体或称纯净半导体，即无杂质、无位错、晶格完整、没有任何缺陷的单晶体结构的半导体。本征半导体的结构和导电性能如下：

**1. 共价键结构** 以半导体硅为例，组成晶体时，每个硅原子的4个价电子分别与相邻4个硅原子的价电子组成共价键结构，如图1-1所示。图中的硅原子只画出最外层的价电子，每个硅原子具有8个外层价电子的稳定状态。在热力学温度0K时，价电子被牢牢地束缚在

原子核周围，晶体中没有自由电子，呈现绝缘体状态。

**2. 两种导电粒子（载流子）——自由电子与空穴** 当温度升高到 300K 时，许多价电子得到足够的能量，摆脱原子核的束缚，成为自由电子，同时留下一个空位，称为空穴，这一过程称为热激发或本征激发，如图 1-1 中实线箭头所示。

空穴的属性如何？能否自由移动参与导电呢？热激发使硅原子失去一个价电子，硅原子不再保持电中性，可认为空穴带一个电子当量的正电荷。在纯硅晶体中，价电子所处的能级相同，运行轨道重叠，因此空穴很容易被相邻的硅原子的价电子填补，使空穴移到了相邻的硅原子处，如图 1-1 中虚线箭头所示。空穴的移动是价电子在相反方向移动的结果，价电子在晶体中的移动是自由的，因此空穴的移动也是自由的，当在晶体的两侧加上电场时，空穴就会顺着电场的方向定向运动，参与导电，形成电流。可见空穴相当于带有当量正电荷的导电粒子。在室温时，纯净的硅半导体中有两种导电粒子——自由电子和空穴。

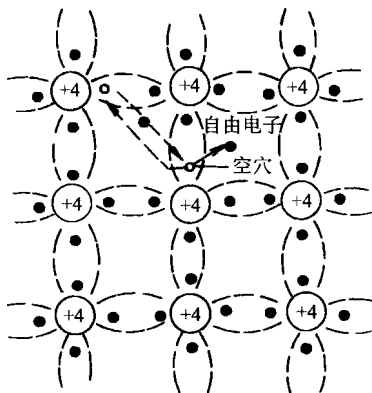


图 1-1 本征半导体的晶体结构

**3. 自由电子和空穴成对地产生成对地复合** 热激发的过程产生了自由电子和空穴对，当自由电子落回价键时，它们又成对地消失，称为复合，在一定的温度下产生与复合达到动态平衡，有一定的自由电子和空穴的浓度。当温度变化时，例如温度升高，产生将大于复合，载流子的浓度将增大，在新的温度下，产生与复合达到新的动态平衡，对应一个新的载流子浓度。

### 1.1.3 杂质半导体

通过扩散工艺，在本征半导体中掺入适量的杂质元素，便可得到杂质半导体。按掺入的杂质元素不同，可形成 N 型半导体和 P 型半导体，控制掺入杂质元素的浓度，就可控制杂质半导体的导电性能。

**1. N 型半导体** 在本征半导体硅（或锗）中掺入微量的五价元素磷（P）就形成了 N 型半导体，如图 1-2 所示，磷原子最外层有 5 个价电子，其中 4 个价电子与相邻的 4 个硅原子的价电子组成共价键，剩下一个价电子由于受原子核的束缚较弱，在室温下很容易成为自由电子。同时，磷原子因失去一个电子电离为正离子。每个杂质原子施舍一个自由电子，这就使得半导体中的自由电子数目大大地增加。杂质原子提供的自由电子数将远远超过由热激发产生的空穴数。这种杂质半导体以电子导电为主，故称其为电子型半导体或 N 型半导体。在 N 型半导体中，自由电子为多数载流子（简称多子），空穴为少数载流子（简称少子）。

**2. P 型半导体** 若在本征半导体硅中掺入微量的三价元素硼（B），就形成了 P 型半导体。硼原子最外层有 3 个价电子，这 3 个价电子在与相邻的 4 个硅原子组成共价键时还有一个空位未被填满，与其相邻的硅原子的价电子很容易填补这个空位，于是就产生了一个空穴，如图 1-3 所示。硼原子在晶体中接受了一个电子后电离为负离子。磷原子在硅晶体中给出一个多余的电子，故称磷为施主杂质。

由于掺杂，这种杂质半导体中的空穴数目增加了，空穴数目远远超过了自由电子数目，这种以空穴导电为主的半导体叫做空穴型半导体或 P 型半导体。在 P 型半导体中，空穴为

多数载流子，自由电子为少数载流子。由于硼原子在硅晶体中接受了电子，故称其为受主杂质。

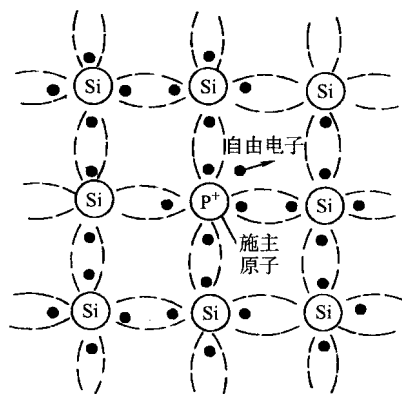


图 1-2 N 型半导体

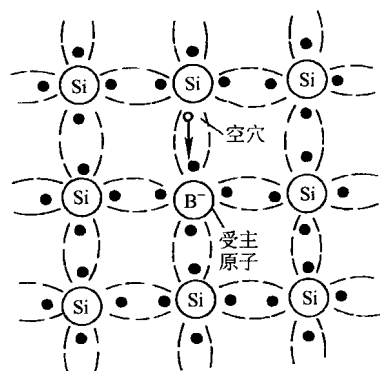


图 1-3 P 型半导体

### 1.1.4 PN 结

**1. PN 结的形成** 通过某种工艺过程使 P 型半导体和 N 型半导体结合在一起时，因界面两侧的多子存在浓度差，因此 P 区的空穴必然向 N 区扩散，与此同时，N 区的自由电子也必然向 P 区扩散，形成扩散电流  $I_F$ ，如图 1-4 所示。由 P 型区扩散到 N 型区的多子空穴与 N 型区界面附近的电子复合；由 N 型区扩散到 P 型区的多子电子与 P 型区界面附近的空穴复合。多子扩散的结果是在界面两侧分别暴露出很薄一层不能移动的正离子和负离子。这样在 P-N 交界面两侧就形成了一边带正电荷，而另一边带负电荷的“空间电荷区”。在空间电荷区内产生了方向由正电荷区指向负电荷区的内电场  $E_i$ 。内电场  $E_i$  出现后对两区多子的扩散起阻碍作用，正是由于这个原因也常把空间电荷区叫做阻挡层。

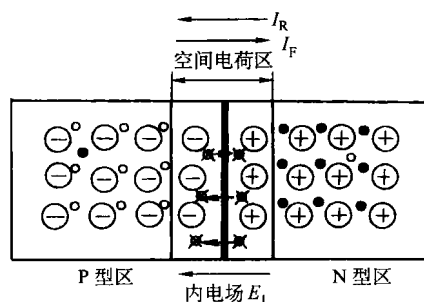


图 1-4 PN 结的形成

内电场阻止两区多子继续扩散的同时，却有利于两区的少子越过空间电荷区进入对方区内。少数载流子在内电场作用下有规则地运动形成漂移电流  $I_R$ 。

PN 结形成之初，多子扩散运动占绝对优势，随着内电场的形成、增强，多子扩散运动逐渐减弱，而少子漂移运动却逐渐增强。当扩散电流  $I_F$  和漂移电流  $I_R$  大小相等、方向相反、达到动平衡时，空间电荷区的宽度就确定下来，一个平衡的 PN 结也就形成了。由于 PN 结在形成过程中载流子已耗尽，所以 PN 结也称为耗尽层。

**2. PN 结的单向导电性** 在 PN 结两端施以外电压称为给 PN 结以偏置。如果所加的外电压是 P 端的电位高于 N 端的电位，称为正向偏置（简称正偏），反之称为反向偏置（简称反偏）。

**(1) PN 结的正向偏置** PN 结上加正向偏置电压（即外电源正极接 P 区，负极接 N 区），如图 1-5 所示。

此时外加电场  $E$  的方向与内电场的方向相反，外加电场削弱了内电场，空间电荷区变

窄。原来处于平衡状态的多子扩散运动和少子漂移运动失去了平衡,致使多子扩散运动的规模超过了少子漂移运动的规模。由于参与扩散的是多数载流子,所以形成了较大的扩散电流  $I_F$ ,这就是流过 PN 结的正向电流。PN 结正向偏置时呈现了很小的电阻,即 PN 结导通。

(2) PN 结的反向偏置 PN 结上加反偏电压(即外电源正极接 N 区,负极接 P 区),如图 1-6 所示。

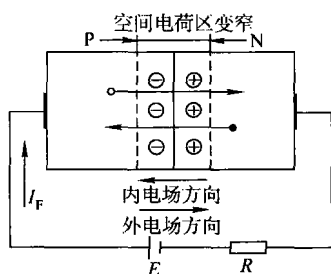


图 1-5 PN 结正向偏置

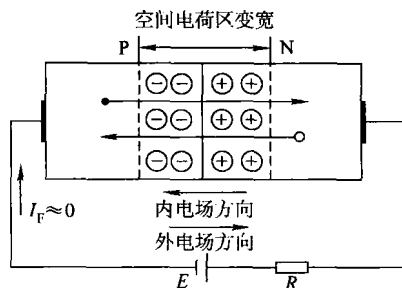


图 1-6 PN 结反向偏置

此时外加电场的方向与内电场的方向一致,外电场使 PN 交界面两侧的空穴和自由电子移走,从而使空间电荷区变宽,内电场增强。增强了的内电场阻止两区多子的扩散运动,致使扩散电流几乎为零。由于漂移电流是少数载流子定向运动形成的,而少数载流子的数量又很少,因此反向电流很小,这时 PN 结呈现很高的电阻,即 PN 结截止。

少数载流子是热激发产生的,随着环境温度的升高,少数载流子的数量增多。即使是在相同的反向电压作用下,反向电流也会因温度升高而增大,也就是说温度对反向电流的影响很大。

综上所述,PN 结正向偏置时呈现低阻性,正向电流较大,此时 PN 结处于正向导通状态;当 PN 结反向偏置时呈高阻性,反向电流很小,此时 PN 结处于反向截止状态。可见 PN 结具有单向导电性。

## 练习与思考

- 1-1-1 什么叫本征半导体?本征半导体的载流子浓度是由什么决定的?
- 1-1-2 半导体中空穴的物理意义是什么?
- 1-1-3 什么叫 P 型半导体?什么叫 N 型半导体?P 型半导体和 N 型半导体的多子和少子各是什么?
- 1-1-4 什么是载流子的扩散和漂移?
- 1-1-5 内电场形成后使得空间电荷区内存在电势差。将 PN 结两端用导线连接起来,导线中是否有电流产生?
- 1-1-6 反向电流为什么会随环境温度而变化?

## 1.2 半导体二极管

将 PN 结用外壳封装起来,并加上电极引线就构成了半导体二极管,简称二极管。由 P 区引出的电极为阳极,由 N 区引出的电极为阴极。二极管的符号及常见外形如图 1-7 所示。

二极管通常有点接触型二极管、面接触型二极管、硅平面开关管等几种类型。

### 1.2.1 二极管的伏安特性

二极管的管压降  $U_D$  与其电流  $I_D$  的关系曲线, 叫做二极管的伏安特性曲线, 可用实验方法测得, 或用图示仪测之。在直角坐标系中横坐标轴表示二极管两端压降  $U$ , 纵坐标轴表示其电流  $I$ , 如图 1-8 所示。图 1-8a 为硅二极管 2CP10 的伏安特性, 图 1-8b 为锗二极管 2AP15 的伏安特性。

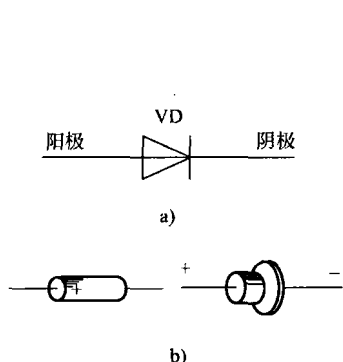


图 1-7 二极管符号及常见外形

a) 二极管符号 b) 二极管常见外形

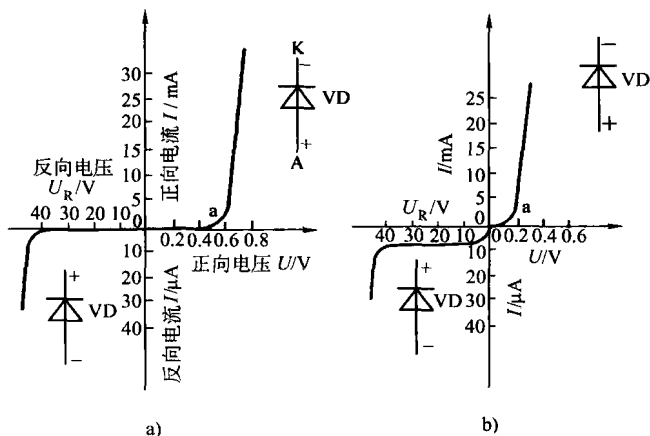


图 1-8 二极管的伏安特性

从伏安特性曲线上可得出如下规律:

**1. 正向特性** 二极管正向偏置, 在坐标的第一象限。它又可分为两段: 从坐标原点 0 到 a 点为第一段, 二极管外加正向电压较小, 外电场不足以克服内电场对载流子扩散运动造成的阻力, 此时正向电流很小, 呈现电阻较大。这段区域称为“死区”。对应 a 点的门坎电压  $U_m$  叫“死区电压”, 其数值大小随二极管的结构材料不同而异, 并受环境温度影响。一般来说, 硅二极管“死区电压”约为 0.5V, 锗二极管为 0.1V。

正向电压超过门坎电压  $U_m$  后, 随着正向电压的增加, 内电场大大削弱, 有利于扩散, 电流按指数曲线规律迅速增长。但正向电压在小范围内变化时其电流变化却很大。通常电流适中时硅管压降约为 0.7V, 锗管约为 0.3V。当环境温度变化时, 在室温附近, 温度每升高  $1^\circ\text{C}$ , 二极管的正向降压减小  $2 \sim 2.5\text{mV}$ 。

**2. 反向特性** 二极管反向偏置, 在坐标第三象限。因为加的反向电压, 故漂移运动起主要作用, 反向电流几乎不变, 叫反向饱和电流。其值对于硅管是纳安级的, 锗管为十几微安, 并且随着温度升高, 反向饱和电流明显增加。

当反向电压超过一定数值后, 反向电流急剧增大, 这时二极管被“反向击穿”, 对应的电压叫做“反向击穿电压”  $U_{RB}$ 。使用二极管时, 应避免反向电压超过击穿电压, 防止损坏二极管。

**3. 二极管的伏安方程** 二极管特性实际上是 PN 结特性, 按照载流子运动统计规律, 其伏安方程有

$$I = I_{\text{SR}} [\exp(U/U_T) - 1] \quad (1-1)$$

式中,  $U_T$  为温度电压当量, 在常温 (300K) 情况下,  $U_T = 26\text{mV}$ ;  $I_{\text{SR}}$  为反向饱和电流;  $I$  为二极管电流;  $U$  为二极管两端电压降。

### 1.2.2 二极管的主要参数

结合二极管的伏安特性曲线, 不难引出如下主要参数。

#### 1. 直流参数

(1) 最大整流电流  $I_{\text{FM}}$  指管子长期工作时, 允许通过的最大正向平均电流。因为流过电流太大时, PN 结的管压降要引起发热, 超过一定限值要烧坏 PN 结。

(2) 反向电流  $I_{\text{R}}$  指在一定环境温度条件下, 二极管承受反向工作电压、又没有反向击穿时, 其反向电流的值。它的值愈小, 表明管子的单向导电特性愈好。温度对反向电流影响较大, 经验值是: 温度每升高  $10^\circ\text{C}$ , 反向电流约增大一倍。使用时应加注意。

(3) 最大反向工作电压  $U_{\text{RM}}$  指管子运行时允许承受的最大反向电压。通常取反向击穿电压  $U_{\text{BR}}$  的一半。

(4) 直流电阻  $R_{\text{D}}$  指二极管两端所加的直流电压与流过它的直流电流之比。阻值与工作点有关。良好的二极管正向电阻等于几十欧至几千欧; 反向电阻大于几十千欧至几百千欧。

#### 2. 二极管的动态微变参数

(1) 二极管的动态微变电阻  $R_{\text{d}}$  二极管在小信号工作情况下, 用微变电阻  $R_{\text{d}}$  描述。它是在二极管伏安特性曲线上的工作点处切线斜率的倒数。

从特性方程可求出:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R_{\text{d}}} &= \frac{dI}{dU} = \frac{d}{dU} \{ I_{\text{SR}} [\exp(U/U_T) - 1] \} \\ &= I_{\text{SR}} \exp(U/U_T) / U_T = \frac{I_{\text{Q}}}{U_T} \end{aligned}$$

则

$$R_{\text{d}} = \frac{U_T}{I_{\text{Q}}} = \frac{26\text{mV}}{I_{\text{Q}}} \quad (1-2)$$

例如, 工作点电流  $I_{\text{Q}} = 2\text{mA}$  时,  $R_{\text{d}} = \frac{26}{2} \Omega = 13\Omega$ 。可见微变电阻  $R_{\text{d}}$  与工作点有关。

(2) 二极管的极间电容 二极管实际是个 PN 结, 空间电荷区相当于电介质, P 区和 N 区相当金属极板, 因此类似平行板电容器。PN 结空间电荷改变, 存在一个结势垒电容, 它与 PN 结面积成正比, 与空间电荷区厚度成反比, 其值为  $0.5 \sim 100\text{pF}$ 。反向偏置时, 因为二极管反向电阻较大, 故结势垒电容作用显得突出。

二极管正向偏置时, 由于多数载流子扩散到对侧形成电荷堆积而构成扩散电容, 其值在  $0.1\text{pF}$  至几十皮法。结势垒电容与扩散电容之和称为极间电容。由于极间电容值较小, 在低频工作时可略去, 但在高频工作时, 必须考虑其影响。

### 1.2.3 二极管应用举例及仿真分析

从特性曲线上看到, 二极管正向导通时存在管压降, 硅管约为  $0.7\text{V}$ ; 锗管约为  $0.3\text{V}$ 。

反向偏置时有漏电流。在理想情况下,取正向导通管压降为零,二极管用短路线代替;取反向漏电流为零,二极管处于断路状态。在二极管电路分析中常常认为二极管是理想的。

二极管的单向导电特性,可用来进行整流、检波、限幅和钳位等。

**例 1-1** 电路如图 1-9a 所示,已知  $E=2\text{V}$ ,  $R=100\Omega$ ,  $u_i=5\sin\omega t\text{ V}$ , 试画出输出电压  $u_o$  的波形。设二极管 VD 是理想的。

**解** 由图 1-9a 可知,二极管 VD 的阴极电位为  $2\text{V}$ , 由于输出端开路, 所以当  $u_i > 2\text{V}$  时 VD 正偏导通, 管压降为  $0$ , 输出  $u_o = E = 2\text{V}$ ; 当  $u_i < 2\text{V}$  时 VD 反偏截止, 相当于开路, 电阻  $R$  中无电流, 故  $u_o = u_i$ 。输出波形如图 1-9b 所示。

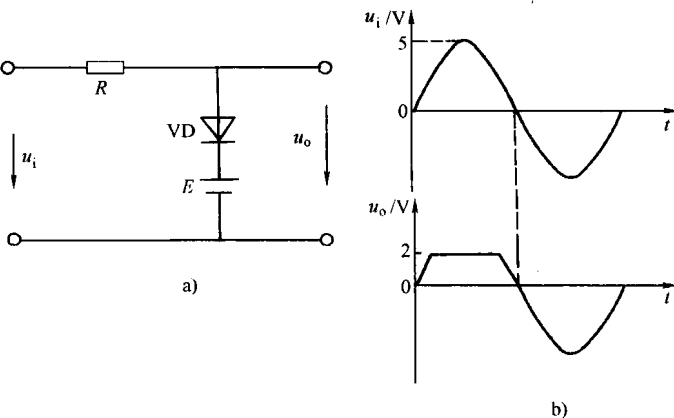


图 1-9 例 1-1 图

显然, 电路把输出电压的正峰值限制在  $2\text{V}$ 。这种电路叫限幅电路。由于它起到修整波形的作用, 又称整形电路。

**例 1-2** 仿真图 1-9a 所示电路, 取  $E=5\text{V}$ ,  $R=500\Omega$ ,  $u_i=10\sin\omega t\text{ V}$ , 仿真观测电路的输入输出波形。

**解** 在 EWB 中创建图 1-10a 所示仿真电路, 利用示波器观测输入、输出波形, 如图 1-10b 所示。

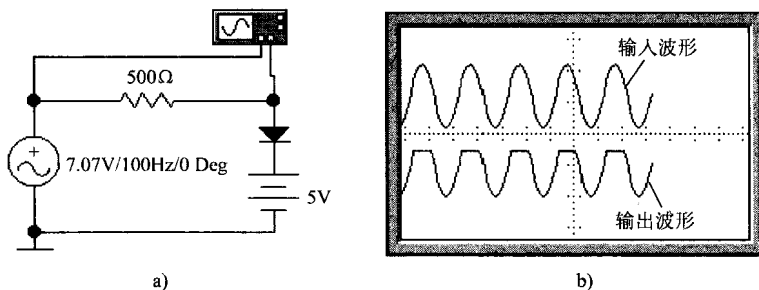


图 1-10 例 1-2 仿真电路及结果

#### 1.2.4 硅稳压二极管

硅稳压二极管简称稳压管, 结构与二极管相同, 一般工作在反向击穿状态, 符号如图 1-11 所示。

**1. 稳压管的伏安特性** 通过实验测得稳压管伏安特性曲线如图 1-11 所示。

从特性曲线看到, 稳压管正向偏压时, 其特性和普通二极管一样; 反向偏压时, 开始一段和二极管一样, 当反向电压大到一定数值以后, 反向电流突然上升, 而且电流在一定范围 ( $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ ) 内增长时, 管两端电压只有少许增加, 变化很小, 具有稳压性能。这种“反向击穿”是可恢复的, 只要外电路限流电阻保证电流在限制范围内, 不致引起热击穿损坏稳压管。

## 2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压  $U_Z$  指稳压管在正常工作时管子的端电压, 一般  $3 \sim 25V$ , 高的可达  $200V$ 。

(2) 稳定电流  $I_Z$  稳压管正常工作时的参考电流。开始稳压时对应的电流叫最小稳压电流  $I_{Zmin}$ ; 对应额定功耗时的稳压电流叫最大稳压电流  $I_{Zmax}$ 。正常工作电流  $I_Z$  取其  $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$  间某个值。

(3) 动态电阻  $R_Z$  稳压管端电压的变化量  $\Delta U_Z$  与对应电流变化量  $\Delta I_Z$  之比, 叫稳压管的动态电阻  $R_Z$ 。

即

$$R_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} \quad (1-3)$$

其值在几欧至十几欧。

(4) 稳定电压的温度系数 指稳压管的稳压值  $U_Z$  随工作温度变化影响的系数。稳压值低于  $4V$  的稳压管, 电压温度系数为负 (表现齐纳击穿); 高于  $7V$  的稳压管, 系数为正 (表现雪崩击穿); 而  $6V$  左右的管子 (呈现两种击穿), 稳压值受温度影响较小。

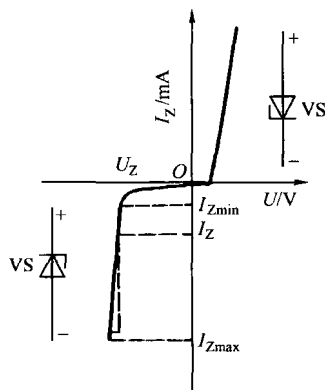


图 1-11 稳压管伏安特性

(5) 稳压管额定功耗  $P_{ZM}$  保证稳压管安全工作所允许的最大功率损耗

$$P_{ZM} = U_Z I_{Zmax} \quad (1-4)$$

**3. 稳压二极管的应用** 稳压二极管主要用来构成稳压电路, 如图 1-12 所示。

$U_1$  是不稳定的可变直流电压, 需要得到稳定的电压  $U_0$ , 在二者之间加稳压电路。它由限流电阻  $R$  和稳压管  $VS$  构成,  $R_L$  是负载电阻。更深入的内容在第 7 章将详细讨论。

**例 1-3** 在图 1-13 中, 已知稳压二极管  $VS$  的  $U_Z = 6.3V$ , 当  $U_1 = \pm 20V$ 、 $R = 1k\Omega$  时, 求  $U_0$ ? 已知稳压二极管的正向压降  $U_0 = 0.7V$ 。

**解** 当  $U_1 = +20V$ ,  $VS$  反向击穿稳压  $U_{Z1} = 6.3V$ ,  $VS_2$  正向导通,  $U_{Z2} = 0.7V$ , 则  $U_0 = +7V$ ; 同理  $U_1 = -20V$ ,  $U_0 = -7V$ 。

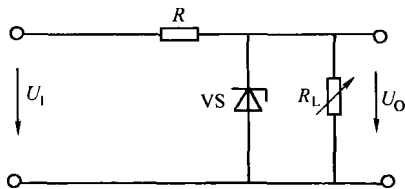


图 1-12 稳压管稳压电路

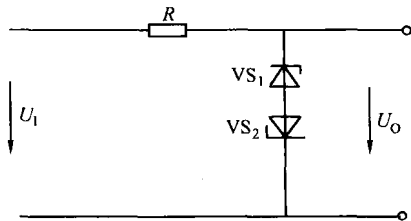


图 1-13 例 1-3 图

**例 1-4** 两只硅稳压管的稳压值分别为  $U_{Z1} = 6V$ ,  $U_{Z2} = 9V$ , 设稳压管正向管压降为  $0.7V$ , 把它们串联相接可得到几种稳压值, 各是多少? 如果把它们并联相接可得到几种稳压值, 各是多少? 用 EDA 仿真求出各稳压值。

**解** 将两只稳压管串联至少可以得到 4 种稳压值, 理论上分别是  $15V$ 、 $9.7V$ 、 $6.7V$ 、 $1.4V$ 。而把它们并联也可以得到两种电压, 理论上分别是  $6V$  和  $0.7V$ 。

在 EWB 的二极管库中拿出两只稳压管  $VS_1$  和  $VS_2$ ，双击稳压管图标，进入编辑状态，将稳压值修改为 6V 和 9V，修改方法如图 1-14 所示，注意两只稳压管不能选同型号。

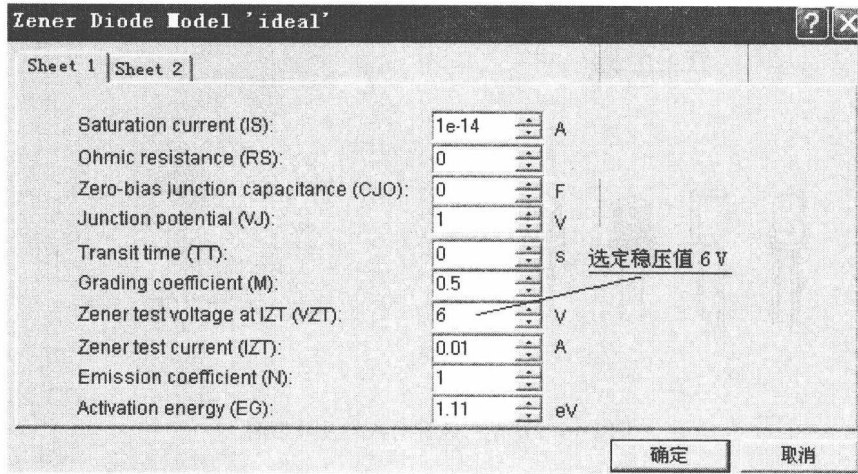


图 1-14 稳压管的稳压值选项框

在 EWB 中用两只稳压管分别创建 4 个电路，如图 1-15 所示，用直流电压表可直接仿真求解输出电压值。图 1-15a、b 为两个稳压管串联电路；图 1-15c、d 为两个稳压管并联电路，所得输出值与理论值略有差异，分别为 14.79V、9.544V、5.991V、0.7137V。

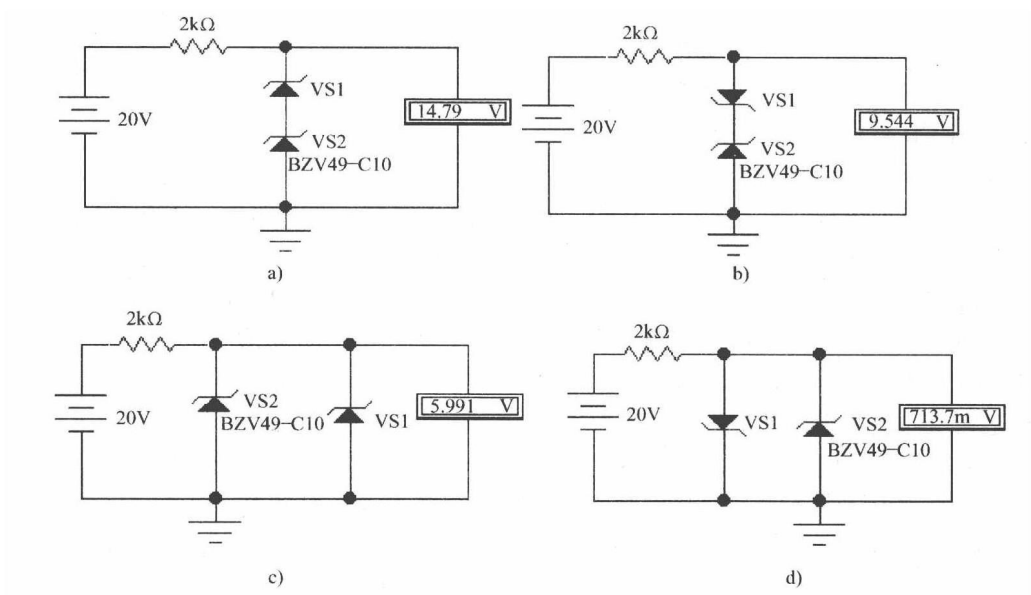


图 1-15 例 1-4 仿真图

1.2.5 其他类型二极管

1. 发光二极管 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 也与普通二极管一样由 PN 结构成，也具有单向导电性，是一种由磷化镓 (GaP) 等半导体材料制成的、能直接将电能

转变成光能的发光显示器件。当其内部有一定电流通过时，它就会发光。图 1-16a 是电路图形符号，图 1-16b 是二极管的外形图，图 1-16c 是二极管实物图片。

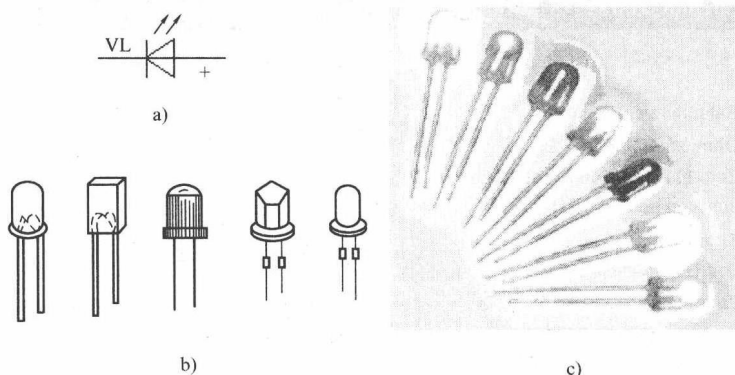


图 1-16 发光二极管的符号及外形图

LED 应用在电子通信和家用电器的各种电子电路中，通常用于显示各种信息，如家用音响、计算机、手机、交通信号灯及商场、火车站售票处的大屏幕显示看板等。图 1-17 为 LED 作为数码显示器的图例。无论在显示方面还是在电子通信以及照明领域，LED 的应用正在迅速增长。LED 是一种低电压、低电流光源，其发光效率 ( $\text{lm/W}$ ) 远大于传统的钨丝灯泡和荧光灯泡。此外 LED 发热量低，在正常使用的情况下，LED 寿命可长达 10 万小时，无毒，可循环利用，不易破碎，不产生紫外线，只有极少热量，具有环保、节能、便于应用的特点。高亮度的二极管可替代白炽灯等照明器具，具有很大开发潜力，可用于改进各种照明设备。

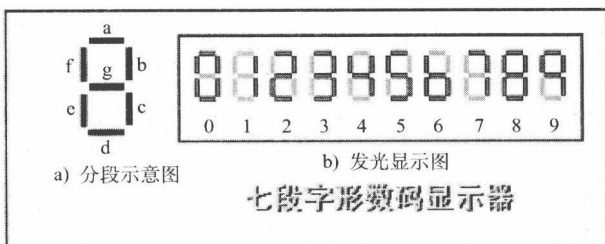


图 1-17 LED 用作七段数码显示器

**2. 光敏二极管** 光敏二极管和普通二极管一样，也是由一个 PN 结组成的半导体器件，具有单向导电性，不同之处是光敏二极管的外壳上有一个透明的窗口以便接收光线照射，实现光电转换，图形符号如图 1-18 所示。光敏二极管是在反向电压作用下工作的，没有光照时，反向电流极其微弱，称为暗电流；有光照时，反向电流迅速增大，称为光电流。光的强度越大，反向电流也越大。光的变化引起光敏二极管电流变化，从而把光信号转换成电信号，成为光电传感器件。在电路中通过它把光信号转换成电信号。

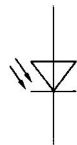


图 1-18 光敏二极管的图形符号

## 练习与思考

- 1-2-1 怎样用万用表电阻挡判断二极管的阳极、阴极和二极管的好坏？
- 1-2-2 试说明图 1-12 的稳压过程，若  $U_1 = 12\text{V}$ ， $U_Z = 6\text{V}$ ， $R_L = 3\text{k}\Omega$ ， $R = 2\text{k}\Omega$ ，求  $U_O$  的值。
- 1-2-3 说出至少 5 个发光二极管的应用实例。