



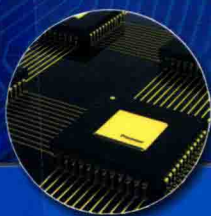
普通高等教育“十三五”规划教材

辽宁省“十二五”普通高等教育本科省级规划教材

# 电子技术

## Electronic Technology 第3版

主编 高有华 龚淑秋



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二”教材  
辽宁省“十二”级规划教材

# 电 工 技 术

第 3 版

主编 高有华 龚淑秋  
参编 申永山 李忠波 袁 宏



机械工业出版社

本书是根据教育部电工学课程教学指导小组拟订的非电类电工、电子技术系列课程教学基本要求和深化教学改革、培养素质型人才目标而编写的。主要内容包括：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、电力电子器件及基本电力变换电路、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和数-模与模-数转换等。书中内容注重学生学习能力的培养，具有基础性、应用性和先进性，书中带“\*”的内容可根据专业和学时情况取舍。

本书可供高等理工院校校本、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、管理类、计算机类等相关专业使用，也可作为夜大、函授、电大、职工大学及相关专业技术人员的培训教材和自修教材。

与本书配套将同时出版《电子技术试题题型精选汇编》（第3版），方便广大学生学习和教师使用。

## 图书在版编目（CIP）数据

电子技术 / 高有华, 龚淑秋主编. —3 版. —北京: 机械工业出版社, 2017.3

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-55980-1

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 023862 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 王 康

责任校对: 肖 琳 封面设计: 张 静

责任印制: 李 昂

三河市宏达印刷有限公司印刷

2017 年 3 月第 3 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 17.75 印张 · 429 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-55980-1

定价: 38.00 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

服务咨询热线: 010-88379833

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-88379649

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面无防伪标均为盗版

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

## 第3版前言

本书的第1版和第2版先后于2003年1月和2010年1月出版。本书自2003年出版发行以来,得到广大读者的支持与关爱,先后于2009年和2014年获辽宁省普通高等学校精品教材、辽宁省普通高等教育“十二五”省级规划教材。为了使本书更能适应高等教育迅速发展的需要以及高等理工科院校对电子技术基础课程深化教学改革的要求,编者在广泛吸取读者意见和建议的基础上进行修订再版。

考虑到电子技术基础课程是高等理工科院校非电类专业的学科基础课,因此本书的核心内容相对稳定,着重于电子技术的基本概念和基本理论,并兼顾非电类理工科不同专业的教学要求和人才培养需要。与第2版相比,在内容和结构上进行了一定的调整,以解决基础理论与新技术、传统教学模式与现代教学方法、课程内容多与讲授学时少等的矛盾。具体修改内容为:①将差动放大电路和功率放大电路的内容精简,作为两节并入第3章;②删除了晶闸管及其电路的相关内容;③增加了电力电子器件及基本电力变换电路;④增加了典型电路的EDA仿真实例;⑤对章后的习题进行了增删,使其更具有典型性。

本书是与《电工技术》(第3版)、《电工技术试题题型精选汇编》(第3版)、《电子技术试题题型精选汇编》(第3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。本书模拟电子技术部分(1~6章)参考学时24~32学时,数字电子技术部分(7~11章)参考学时20~30学时,书中带“\*”的内容可根据专业和学时情况取舍。

本书由沈阳工业大学高有华教授(编写第7、8、10章)和龚淑秋教授(编写第3、4章)担任主编。申永山老师编写第2、6、11章及附录,李忠波教授编写第9章,袁宏教授编写第1、5章。

本书可供高等理工科院校本、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、管理类、计算机类等相关专业使用,也可作为夜大、函授、电大、职工大学及相关专业技术人员的培训教材和自修教材。本书着重深化电子技术基础课程的教学体系、教学内容、教学方法及教学手段等方面的改革,将更加方便广大读者的学习和使用。

由于编者水平有限,本书难免有不妥和错误之处,恳请读者批评指正。

编者

## 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,我们广泛吸取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,内容精练,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了顺应潮流,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。本书模拟电子技术部分(1~8章)参考学时28~34学时,数字电子技术部分(9~13章)参考学时为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。

本书可供高等理工院校本科、专科机械类、化工类、建筑类、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。本书是根据教育部电工学课程教学指导小组拟订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。本书可供高等理工科院校本科、专科机械类、材料类、化工类、建筑类、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的内容；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批评指正。

编者



# 目 录

第3版前言	
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	习题	78
1.1 半导体的导电特性	1	第4章 负反馈放大电路	83
1.2 PN结	3	4.1 反馈的基本概念	83
1.3 半导体二极管及其仿真分析	4	4.2 负反馈放大电路的一般表达式	90
1.4 半导体晶体管	10	4.3 负反馈对放大电路性能的影响	92
小结	13	4.4 负反馈放大电路的近似估算	97
习题	14	*4.5 负反馈放大电路的自激振荡及消除方法简介	99
第2章 放大电路基础	16	*4.6 正弦波振荡电路	101
2.1 基本共射极放大电路	16	小结	102
2.2 工作点稳定的共射极放大电路	23	习题	103
2.3 共集电极放大电路	27	第5章 直流稳压电源	106
2.4 多级放大电路	30	5.1 单相桥式整流电路	106
*2.5 绝缘栅场效应晶体管及其放大电路	33	5.2 滤波电路	109
小结	36	5.3 稳压电路	113
习题	37	5.4 集成稳压电路	118
第3章 集成运算放大电路	40	小结	122
3.1 集成运算放大器简介	40	习题	122
3.2 集成运算放大器的输入级——差动放大电路	45	第6章 电力电子器件及基本电力变换电路	125
3.3 集成运算放大器的输出级——功率放大电路	53	6.1 常用电力电子器件	125
3.4 集成运算放大器的线性应用	58	6.2 可控整流电路	130
3.5 集成运算放大器的非线性应用	66	6.3 基本斩波电路	132
3.6 集成运算放大器应用实例	74	6.4 基本逆变电路	136
3.7 使用集成运算放大器应注意的问题	75	小结	141
小结	77	习题	141

## 第2篇 数字电子技术

第7章 逻辑代数及逻辑门电路	142	7.2 逻辑函数的化简	144
7.1 逻辑代数基础知识	142	7.3 逻辑门电路	150

7.4 典型集成门电路的结构与特性 .....	155	10.2 单稳态触发器 .....	231
7.5 集成逻辑门电路使用中的几个实际问题 .....	160	10.3 施密特触发器 .....	234
7.6 逻辑门电路仿真实例 .....	161	10.4 多谐振荡器 .....	235
小结 .....	164	10.5 555 定时器应用的仿真分析 .....	239
习题 .....	165	小结 .....	242
<b>第 8 章 组合逻辑电路</b> .....	169	习题 .....	243
8.1 组合电路的分析和设计 .....	169	<b>* 第 11 章 数 - 模与模 - 数转换</b> .....	246
8.2 常用集成组合逻辑电路 .....	173	11.1 数 - 模转换器 .....	246
8.3 组合电路的仿真分析 .....	183	11.2 模 - 数转换器 .....	251
小结 .....	186	小结 .....	258
习题 .....	186	习题 .....	259
<b>第 9 章 触发器及时序逻辑电路</b> .....	190	<b>附录</b> .....	260
9.1 RS 触发器 .....	190	附录 A 半导体分立器件型号命名方法 .....	260
9.2 JK 触发器 .....	195	附录 B 常用半导体器件的参数 .....	261
9.3 D 触发器 .....	197	附录 C 集成电路型号命名方法 .....	265
9.4 触发器功能的转换 .....	198	附录 D 国内外部分集成运算放大器同类产品型号对照表 .....	267
9.5 寄存器 .....	200	附录 E 三端式集成稳压器性能参数 .....	268
9.6 计数器 .....	207	附录 F 逻辑门电路新、旧图形符号对照表 .....	268
9.7 脉冲分配器 .....	218	附录 G 555 定时器的主要性能参数 .....	269
9.8 集成计数器的仿真分析 .....	220	附录 H 常用电子元件与 EDA 中图形符号对照表 .....	271
小结 .....	222	<b>参考文献</b> .....	273
习题 .....	223		
<b>第 10 章 脉冲信号的产生与整形</b> .....	229		
10.1 555 定时器 .....	229		



# 第1篇 模拟电子技术

## 第1章 双极型半导体器件

半导体器件是组成电子电路的核心器件，其基本结构、工作原理、特性及参数是学习电子技术和分析电子电路的基础，而PN结又是构成各种半导体器件的基本单元。半导体器件按参与导电粒子的不同可分为两大类：一类是自由电子和空穴同时参与导电，称为双极型半导体器件；另一类是只有一种粒子参与导电，称为单极型半导体器件。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——半导体二极管和半导体三极管。

### 1.1 半导体的导电特性

#### 1.1.1 半导体

物质按导电能力的不同可分为导体、绝缘体和半导体，导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体。常用的半导体材料有硅、锗、硒以及大多数金属氧化物和硫化物等。

在不同的条件下，半导体的导电能力将会变化很大。主要表现在：

**1. 掺杂性** 在纯净的半导体中掺入微量的杂质，其导电能力可增加几十万乃至几百万倍。利用这种特性可以制成各种类型的半导体器件，如半导体二极管（简称二极管）、半导体三极管（简称晶体管）、场效应晶体管和晶闸管。

**2. 热敏性** 半导体的电阻率对温度的变化非常灵敏，环境温度升高时，其电阻率明显降低，利用这种特性可以制成各种热敏器件，如热敏电阻。

**3. 光敏性** 受到光照时，半导体的导电能力明显增强，利用这种特性可以制成各种光敏器件，如光敏电阻。

半导体的导电能力变化的根本原因在于半导体物质的内部结构和导电机理。

#### 1.1.2 本征半导体

本征半导体或称纯净半导体，就是完全纯净的、具有晶体结构的半导体。目前，最常用的半导体是硅和锗，它们的共同特点是原子结构最外层电子都是4个，称为四价原素。

**1. 共价键结构** 在本征半导体的晶体结构中，每个原子的4个价电子分别与相邻的4个原子的价电子组成4个电子对，即为共价键结构，如图1-1所示，图中的原子结构图只画出最外层的价电子。在共价键结构中，每个原子的最外层都具有8个价电子而处于稳定状态。在热力学温度0K时，价电子很难挣脱共价键束缚成为自由电子，因此，本征半导体中几乎没有自由电子，呈绝缘状态。

**2. 半导体的导电机理** 当温度升高或受到光照时, 共价键内的价电子获得足够的能量, 挣脱共价键与原子核的束缚, 成为自由电子, 同时在共价键内留下一个空位, 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。

热激发使原子失去一个价电子而带正电, 可以认为空穴是带一个电子当量的正电荷。在外电场的作用下, 空穴很容易被相邻原子的价电子填补, 使空穴移动到相邻原子的共价键内, 如图 1-1 中虚线箭头所示, 由此形成空穴运动, 而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反。

因此在外施电压作用下, 半导体中将出现两部分电流: 一部分是自由电子的定向运动所形成的电子电流; 另一部分是仍被束缚的价电子递补空穴所形成的空穴电流。自由电子导电和空穴导电并存是半导体导电方式的最大特点, 也是半导体和导体在导电机理上的本质区别。自由电子和空穴都是参与导电的粒子又称为载流子。

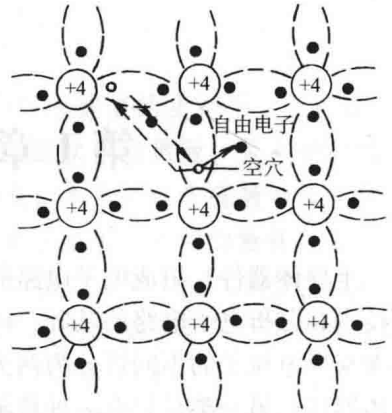


图 1-1 本征半导体的晶体结构

**3. 自由电子和空穴的产生与复合** 热激发的过程中, 自由电子和空穴总是成对出现的, 当自由电子填补空穴时, 它们又成对地消失, 称为复合。当温度一定时, 自由电子和空穴的产生与复合达到动态平衡, 载流子数目维持一定。温度越高, 载流子数目越多, 其导电性能也就越好。

### 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, 就可以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) 中掺入五价元素磷 (或其他五价元素) 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。每个磷原子失去一个自由电子, 这就使得半导体中的自由电子数目大大地增加。磷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** 在本征半导体硅 (或锗) 中掺入三价元素硼 (或其他三价元素), 就形成了 P 型半导体, 如图 1-3 所示。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。硼原子在晶体中接受了一个电子后电离为负离子。每个硼原子都能提供一个空穴, 这就使得半导体中的空穴数目大大地增加。硼原子提供的空穴数将远远超过由热激发产生的自由电子数。这种杂质半导体以空穴导电为主, 故称其为空穴型半导体或 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。

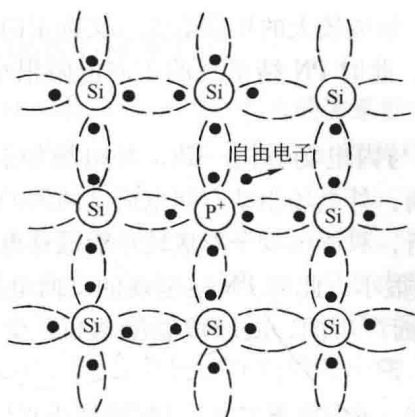


图 1-2 N 型半导体

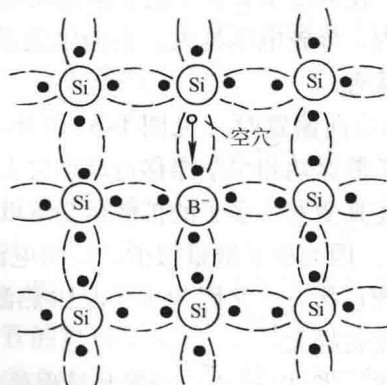


图 1-3 P 型半导体

## 1.2 PN 结

**1. PN 结的形成** P 型或 N 型半导体的导电能力虽然大大增强, 但并不能直接用来制作半导体器件。通常是在一块 N 型 (或 P 型) 半导体基片的局部再掺入浓度较大的三价元素 (或五价元素) 杂质, 使其变成 P 型 (N 型) 半导体, 在 P 型半导体和 N 型半导体的界面就会形成 PN 结。PN 结是构成各种半导体器件的基本单元, 它的形成过程如下:

由于 P 型半导体和 N 型半导体界面两侧多子浓度差异很大, 因此空穴要从浓度大的 P 区向浓度小的 N 区扩散, 同时, 自由电子也要从浓度大的 N 区向浓度小的 P 区扩散, 如图 1-4 所示。由 P 区扩散到 N 区的空穴与界面附近的自由电子复合, 在界面附近的 P 区形成负空间电荷区。同样, 由 N 区扩散到 P 区的自由电子与界面附近的空穴复合, 在界面附近的 N 区形成正空间电荷区。多子扩散的结果是在交界面的两侧形成一个空间电荷区, 这个空间电荷区就是 PN 结。

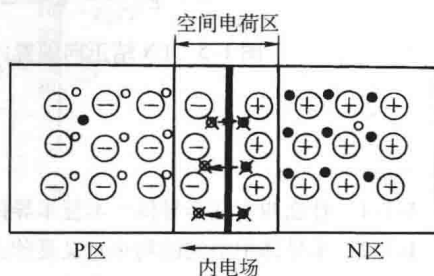


图 1-4 PN 结的形成

空间电荷区在界面两侧形成内电场, 其方向由正电荷区指向负电荷区, 如图 1-4 所示。内电场对两区多子的扩散起阻挡作用, 所以通常又称空间电荷区为阻挡层。

内电场阻挡两区多子扩散的同时, 却推动两区少子越过空间电荷区, 进入对方区。由浓度差产生的多子运动称为扩散运动, 少子在内电场作用下有规则地运动称为漂移运动。扩散运动使空间电荷区变宽, 漂移运动使空间电荷区变窄, 这两个相反运动最终达到动态平衡, 空间电荷区宽度基本稳定, PN 结也就处于相对稳定的状态。

**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 区电位高于 N 区电位, 称为正向偏置 (简称正偏), 反之称为反向偏置 (简称反偏)。

当 PN 结正向偏置时 (见图 1-5), 外电场与内电场方向相反, 外电场削弱了内电场, 原来的多子扩散运动和少子漂移运动失去平衡, 外电场驱动 P 区空穴和 N 区自由电子进入

空间电荷区,使其变窄,多子的扩散运动增强,形成较大的扩散电流,又称正向电流( $I_F$ )。在一定范围内,外施电压越大,正向电流越大,此时PN结呈现的正向电阻很小,PN结处于正向导通状态。

当PN结反向偏置时(见图1-6),外电场与内电场方向一致,外电场加强了内电场,原来的多子扩散运动和少子漂移运动也失去平衡,外电场驱动空间电荷区两侧的空穴和自由电子移走,使其变宽,多子的扩散运动难以进行,只能由少子形成较小的漂移电流,又称反向电流( $I_R$ )。因为少子数量很少,反向电流也很小,此时PN结呈现的反向电阻很大,PN结处于反向截止状态。又因为少子是由热激发而产生的,故环境温度越高,少子的数量越多,反向电流就越大。

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

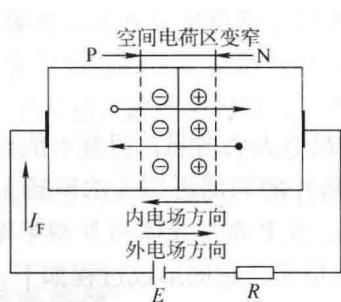


图 1-5 PN 结正向偏置

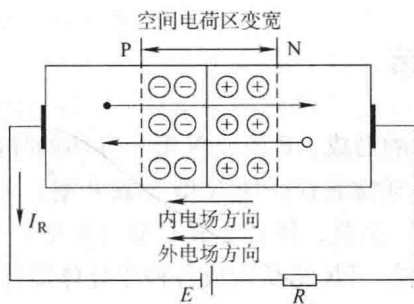


图 1-6 PN 结反向偏置

### 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。

## 1.3 半导体二极管及其仿真分析

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,由P区引出的电极为阳极,由N区引出的电极为阴极。二极管的符号及外形如图1-7所示。

二极管按结构可分为点接触型和面接触型两类。点接触型二极管(通常为锗管)的PN结面积小,高频性能好,允许通过的电流较小,适用于高频和小功率的场合。面接触二极管(通常为硅管)的PN结面积大,低频性能好,允许通过的电流较大,适用于低频和大功率的场合,多用于整流电路。

### 1.3.1 二极管的伏安特性

二极管两端电压  $U$  与其中电流的关系曲线称为二极管的伏安特性，该曲线可通过实验和图示仪测得，如图 1-8 所示。

在二极管正向偏置且电压很低的区域，外电场不足以克服内电场对多子扩散所形成的阻力，呈现电阻较大，正向电流很小，几乎为零，因此该区域为二极管的死区。图 1-8 中 a 点的电压则称为死区电压，其数值大小随二极管的材料不同而异，且与环境温度有关。通常硅二极管的死区电压约为 0.5V，锗二极管约为 0.1V。当正向电压超过死区电压后，随着正向电压的增加，内电场被大大削弱，正向电压迅速增长。由图 1-8 可见，正向电压变化很小，正向电流变化很大。正向导通时，硅管压降为 0.6 ~ 0.8V，锗管为 0.2 ~ 0.3V。

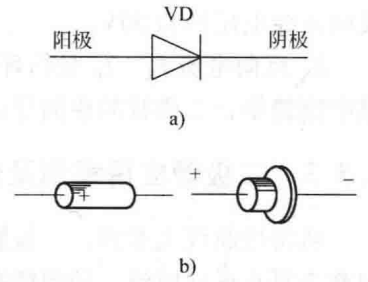


图 1-7 二极管符号及外形  
a) 二极管符号 b) 二极管外形

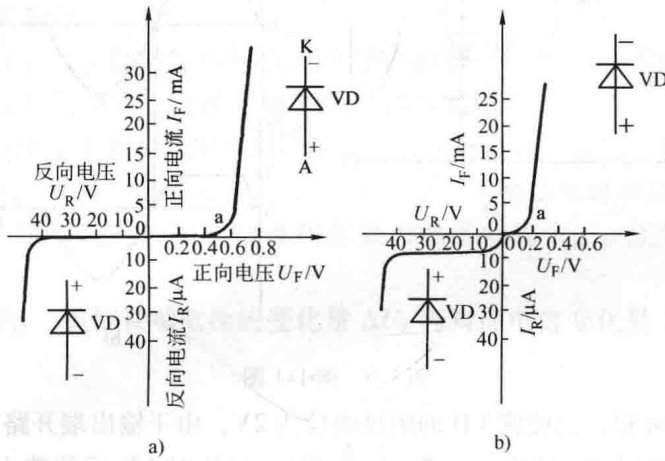


图 1-8 二极管伏安特性曲线

a) 硅二极管 2CP10 b) 锗二极管 2AP15

当二极管反向偏置时，外电场加强了内电场，由少子漂移形成很小的反向电流。当环境温度不变时，少子的数目一定，反向电压在一定范围内增加，反向电流几乎不变，故又称为反向饱和电流。

当反向偏置电压超过一定数后，反向电流急剧增大，二极管失去单向导电性，这种现象称为反向击穿。二极管击穿时所对应的电压称为反向击穿电压  $U_{RB}$ 。

### 1.3.2 二极管的主要参数

二极管的主要参数有：

1. **最大整流电流  $I_{FM}$**   $I_{FM}$ 是指二极管长期工作时，允许通过二极管的最大正向平均电流。当电流超过允许值时，PN 结过热而使二极管损坏。

2. **最高反向工作电压  $U_{RM}$**   $U_{RM}$ 是指二极管长期工作时，允许外加的最高反向电压。通常取反向击穿电压  $U_{RB}$ 的一半或 2/3。例如 2CP10 硅二极管的最高反向工作电压为 25V，而

反向击穿电压约为 50V。

**3. 反向电流  $I_R$**   $I_R$  是指环境温度一定时，二极管承受反向电压而未击穿时的反向电流，该电流越小，二极管的单向导电性越好。温度升高，反向电流增大。

### 1.3.3 二极管应用举例及仿真分析

从特性曲线上看到，二极管正向导通时的管压降，硅管约为 0.7V；锗管约为 0.3V。反向截止时有反向电流。理想情况下，视正向导通管压降为零，二极管用短路线代替；视反向电流为零，二极管处于断路状态。在二极管电路分析中通常认为二极管是理想二极管。

二极管的单向导电性，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  $E = 2V$ ， $R = 100\Omega$ ， $u_i = 5\sin\omega t V$ ，试画出输出电压  $u_o$  的波形。设 VD 是理想二极管。

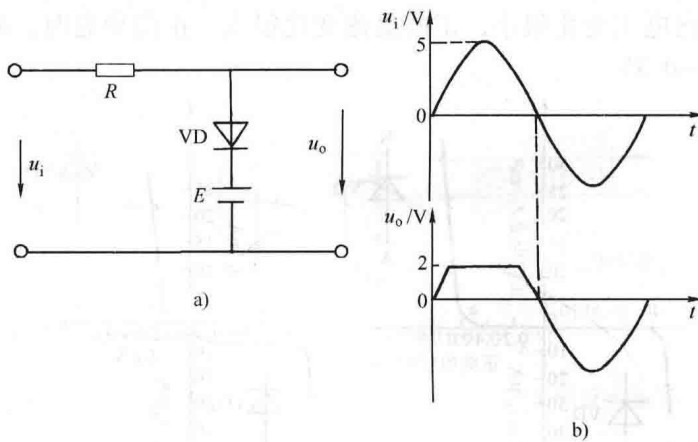


图 1-9 例 1-1 图

**解** 由图 1-9a 可知，二极管 VD 的阴极电位为 2V，由于输出端开路，所以当  $u_i > 2V$  时 VD 正偏导通，管压降为 0，输出  $u_o = E = 2V$ ；当  $u_i < 2V$  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。

显然，电路把输出电压的正峰值限制在 2V。这种电路叫作限幅电路。由于它起到修整波形的作用，故又称为整形电路。

**例 1-2** 仿真图 1-10a 所示电路，取  $E = 5V$ ， $R = 500\Omega$ ， $u_i = 10\sin\omega t V$ ，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。

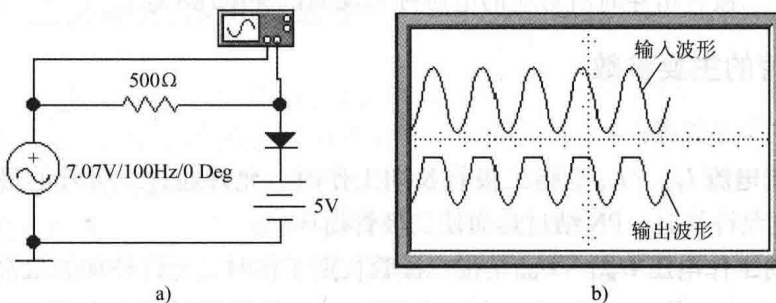


图 1-10 例 1-2 仿真电路及结果



### 1.3.4 稳压二极管

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，稳压管正向偏置时，其特性和二极管相同；反向偏置时，未击穿前的特性和二极管相同，当反向击穿后，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，稳压管两端电压变化很小，具有稳压特性。这种“反向击穿”是可恢复的，只要外电路限流电阻保证击穿电流在允许范围内，就不会引起热击穿而损坏稳压管。

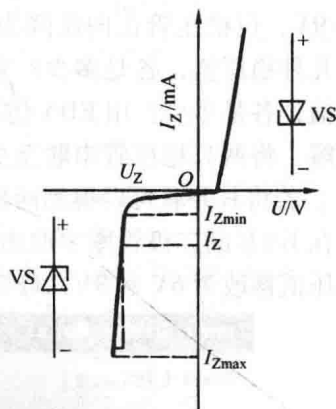


图 1-11 稳压管伏安特性曲线

#### 2. 稳压管的主要参数

(1) 稳定电压  $U_Z$   $U_Z$  是指稳压管在正常工作时管子两端的电压。一般为 3 ~ 25V，高的可达 200V。即使是同一型号的稳压管，由于工艺和其他方面原因，其稳压值也有一定的分散性。

(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作最小稳压电流  $I_{Zmin}$ ；对应额定功耗时的稳压电流叫作最大稳压电流  $I_{Zmax}$ 。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

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

其值在几欧至十几欧。

(4) 电压温度系数  $\alpha_U$   $\alpha_U$  是指稳压管的稳压值  $U_Z$  受温度变化影响的系数。稳压值低于 6V 的稳压管，电压温度系数为负值；高于 6V 的稳压管，电压温度系数为正值；6V 左右稳压管的电压温度系数近似为零，其温度稳定性最好。

(5) 最大允许耗散功率  $P_{ZM}$  保证稳压管不被热击穿的最大功率损耗

$$P_{ZM} = U_Z I_{Zmax} \quad (1-2)$$

**3. 稳压管的应用** 稳压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。更深入的内容将在第5章详细讨论。

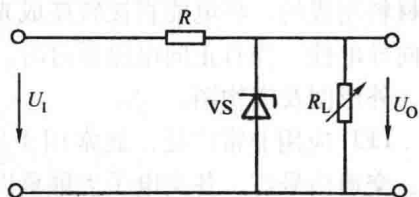


图 1-12 稳压管稳压电压

**例 1-3** 已知图 1-13 所示电路中稳压管  $VS_1$  和  $VS_2$  的稳压值均为 6.3V，正向电压均为 0.7V。试求  $U_1 = \pm 20V$ 、 $R = 1k\Omega$  时  $U_0$  的值。

解 当  $U_1 = +20\text{V}$  时,  $VS_1$  反向击穿,  $U_{Z1} = 6.3\text{V}$ ,  $VS_2$  正向导通,  $U_{Z2} = 0.7\text{V}$ , 则  $U_0 = +7\text{V}$ ; 同理  $U_1 = -20\text{V}$ ,  $U_0 = -7\text{V}$ 。

**例 1-4** 两只稳压管的稳压值分别为  $U_{Z1} = 6\text{V}$ ,  $U_{Z2} = 9\text{V}$ , 设稳压管正向压降为  $0.7\text{V}$ , 若将其串联可得到几种稳压值, 各是多少? 若将其并联可得到几种稳压值, 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  $15\text{V}$ 、 $9.7\text{V}$ 、 $6.7\text{V}$  和  $1.4\text{V}$ 。若将其并联可以得到两种稳压值, 理论上分别是  $6\text{V}$  和  $0.7\text{V}$ 。

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

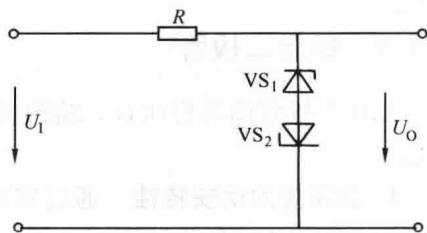


图 1-13 例 1-3 图

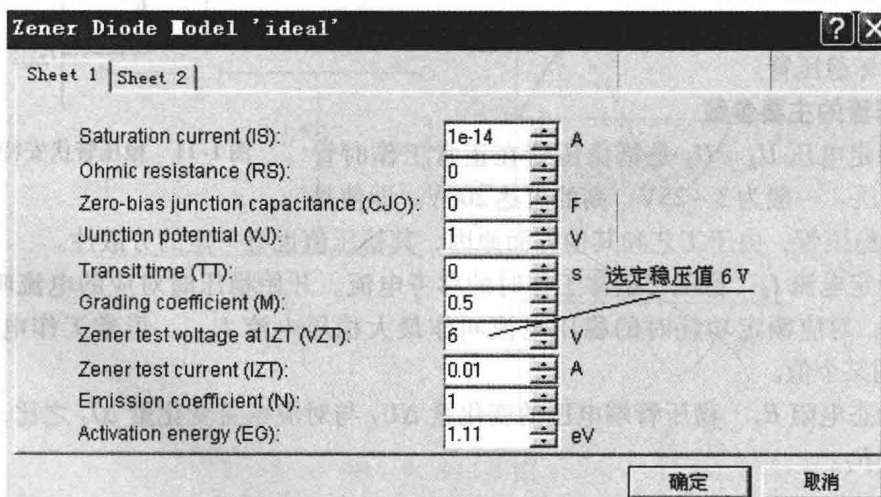


图 1-14 稳压管的稳压值选项框

在 EWB 中用  $VS_1$  和  $VS_2$  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  $14.79\text{V}$ 、 $9.544\text{V}$ 、 $5.991\text{V}$  和  $0.7137\text{V}$ 。

### 1.3.5 其他类型二极管

**1. 发光二极管** 发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 是由磷化镓 (GaP) 等半导体材料制成的, 将电能直接转换成光能的发光显示器件。其结构与普通二极管相同, 也具有单向导电性。当有正向电流通过时, LED 就会发光, 图 1-16 所示分别为 LED 的电路图形符号、外形图及实物图。

LED 应用非常广泛, 通常用于显示各类信息, 例如电气设备、家用电器、计算机、手机、交通信号灯、各类电子大屏幕以及各类照明设备等。LED 组成的数码管显示器示意图如图 1-17 所示。同时, 作为新的光源, LED 以其环保、节能、寿命长、高亮度等优点, 将替代传统的白炽灯和荧光灯。

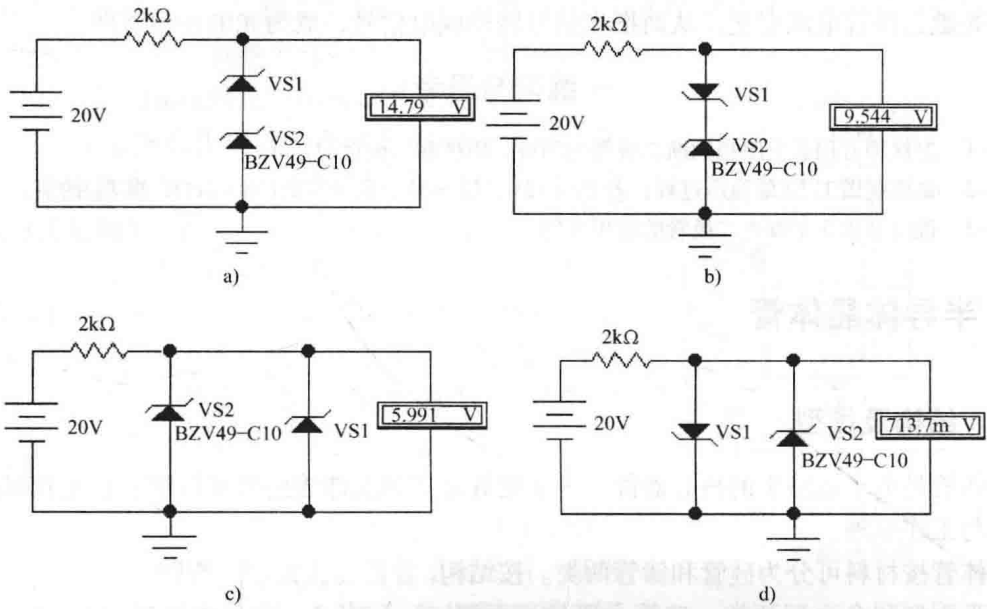


图 1-15 例 1-4 仿真电路图

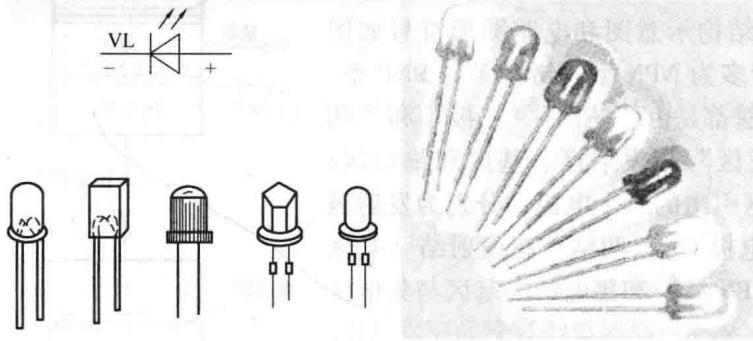


图 1-16 LED 的电路图形符号、外形图及实物图

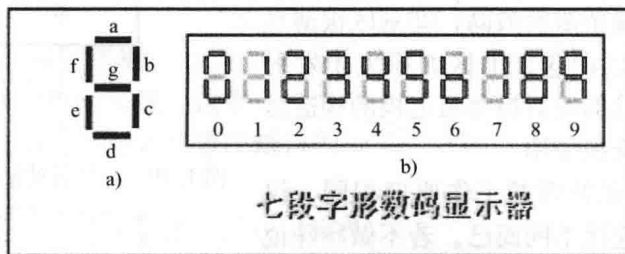


图 1-17 LED 组成的数码管显示器示意图

a) 分段示意图 b) 发光显示图

**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，具有单方向导电性，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

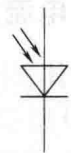


图 1-18 光敏二极管的电路图形符号