



普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电子技术基础

■ 邓元庆 主编 ■ 关宇 孙峥 石会 丁伟 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[<http://www.phei.com.cn>]

014057387

TN01-43
40

普通高等教育“十二五”规划教材
电工电子基础课程规划教材

电子技术基础

邓元庆 主编

关 宇 孙 峥 石 会 丁 伟 编著



TN01-43
40

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING



北航

C1742852

内 容 简 介

本书主要针对电子技术课程改革需求而编写,分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。全书共8章,主要内容包括:半导体器件基础、单元电子电路、集成运算放大器、直流稳压电源、组合逻辑电路、时序逻辑电路、半导体存储器与可编程逻辑器件、模-数混合器件与电子系统等,每章后附题型丰富的思考题与习题,书后附电工电子仿真软件 Multisim 简介、部分习题参考答案和模拟试卷及参考答案,并提供电子课件。

本书可作为高等学校电子、计算机、信息、机电一体化等专业电子技术课程的教材,也可作为相关工程技术人员的学习与参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础 / 邓元庆主编. —北京:电子工业出版社, 2014.8

电工电子基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-23889-5

I. ①电… II. ①邓… 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(2014)第 169290 号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:周宏敏

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:17.25 字数:505 千字

版 次:2014 年 8 月第 1 版

印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:39.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

电子技术是一切电子信息设备的支撑技术,电子器件是所有电子信息系统的硬件基础。随着高校人才培养方案的不断升级,“电子技术基础”课程的地位已经被提升到了空前的高度。不仅传统的电子、计算机、自动化、通信、机电一体化和其他信息类专业普遍开设电子技术课程,甚至大量的非电类专业也开始将电子技术课程作为必修课程开设。

我校是最早在国内开设“电子技术基础”课程的高校之一,本书正是我校多年来“电子技术基础”课程建设和教学改革的结晶,希望本书的出版能够为我国高校电子技术课程改革提供一些有益的借鉴作用。

本书主要针对电子技术课程改革的需求而编写,兼顾非电专业的教学需求,介绍模拟与数字电子技术的基本概念、基本器件、基本理论、基本方法和基本应用,分为模拟电子技术和数字电子技术两部分。全书共 8 章,前 4 章是模拟电子技术部分,后 4 章是数字电子技术部分。第 1 章主要介绍半导体二极管、三极管和场效应管等半导体器件的基础知识;第 2 章主要介绍放大电路的基本理论和三极管共射放大电路、场效应管共源放大电路、差分放大电路、OCL 功率放大电路、数字逻辑门电路等单元电子电路的电路原理及分析方法;第 3 章主要介绍集成运放的基本知识、负反馈和集成运放的基本应用电路;第 4 章主要介绍直流稳压电源的结构与主要指标,以及整流电路、滤波电路、稳压电路的基本原理及性能指标计算;第 5 章主要介绍数字逻辑基础、组合逻辑电路分析与设计和常用组合逻辑功能器件及应用;第 6 章主要介绍时序逻辑基础知识,以及触发器、计数器、移位寄存器等时序逻辑器件的功能、电路原理和应用;第 7 章主要介绍半导体存储器与可编程逻辑器件的基本原理与应用;第 8 章主要介绍 DAC0832、ADC0809、555 定时器等模-数混合器件的电路原理、基本应用与电子系统的基本知识。为了方便课程教学和读者自学,每章后附题型丰富的思考题与习题,书后附电工电子仿真软件 Multisim 简介、部分习题参考答案、模拟试卷及参考答案等 3 个附录。

与同类教材相比,本书具有以下特色:

(1) 精选内容,突出重点。

为了适应短学时的需要,本书首先在内容选择上下功夫,做到精选内容,突出重点。例如,三极管放大电路有共射、共集和共基三种组态,场效应管放大电路有共源、共漏和共栅三种组态,一般教材都是各种组态面面俱到地介绍,不仅耗费学时,而且根本没有必要,因为仔细观察就会发现,各种组态电路的分析方法并无不同,因此,本书只深入、详细地介绍应用最广泛的三极管共射放大电路和场效应管共源放大电路,其他组态只列出特点和分析结论,而具体的分析过程则在习题中供读者自学,这不仅大大节省了学时,突出了教学重点,而且更有利于提高读者的自主学习能力。

(2) 更新结构,逻辑重组。

模拟电子技术与数字电子技术不仅内容多,而且分析方法不同。为了尽量压缩篇幅,必须更新教材结构,对相关内容进行逻辑重组。本书将数字逻辑门的电路原理纳入单元电子电路中,更加方便了逻辑门的电路原理分析;将负反馈与集成运放、数字逻辑基础知识与组合

逻辑电路、时序逻辑基础知识与常用时序逻辑器件及应用各自综合为一章，不仅可以因此压缩不少篇幅，更有利于节省宝贵的学时资源。

(3) 仿真手段，贯穿教学。

电工电子仿真软件 Multisim 不仅是信息时代兴起的一种现代化电子设计、分析工具，而且也是一种先进的教学与实验手段。本书不仅以附录形式简单介绍了 Multisim 软件的使用方法，而且在正文中将其用于电路工作波形的仿真，在习题中安排了大量仿真作业，这就要求教师在使用教材进行授课的过程中必须使用 Multisim 这一新型教学手段，提升课堂的生动性、形象性，把实验室搬进课堂，更好地理论联系实际教学；同时，在学生学习的过程中，也必须很好地掌握 Multisim 这一新工具，把实验室建到自己的计算机中，搬到教室、图书馆或宿舍，更多地拓展实验空间、时间和项目，最大限度地提升学习效果。

本书充分体现了电子技术课程的内涵和特点，具有逻辑性好、内容精炼、手段先进、便于教学和自学等优点，既可作为高等学校相关专业电子技术课程的教材，也可作为相关工程技术人员的学习与参考用书。本书建议学时为 60 学时，提供教学用电子课件，需要电子课件的读者可登录华信教育资源网 (<http://www.hxedu.com.cn>) 注册下载。

本书由解放军理工大学关宇、孙峥、石会、丁伟编著，邓元庆主编。教材编写工作得到了军队院校电工电子基础教学协作联席会和校院各级领导的大力支持，得到了电子工业出版社王羽佳和周宏敏编辑的鼎力帮助，闵锐、徐勇、贾鹏、龚晶等老师对书稿提出了许多宝贵的意见和建议，谨在此一并表示衷心的感谢。

由于水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编著者

2014 年 8 月于南京

目 录

第 1 章 半导体器件基础	1	2.2.2 三极管共射放大电路	33
1.1 半导体基础知识	1	2.2.3 三极管放大电路的三种基本组态	42
1.1.1 本征半导体	1	2.2.4 场效应管放大电路	43
1.1.2 杂质半导体	2	2.2.5 基本放大电路小结	48
1.1.3 PN 结	3	2.3 电流源电路	48
1.2 半导体二极管	4	2.3.1 三极管镜像电流源电路	48
1.2.1 二极管的伏安特性与主要参数 ..	4	2.3.2 场效应管镜像电流源电路	49
1.2.2 温度对二极管伏安特性的影响 ..	5	2.4 差分放大电路	50
1.2.3 二极管的基本应用与电路分析方法	5	2.4.1 共模信号与差模信号	50
1.2.4 特殊二极管	9	2.4.2 射极耦合差分放大电路	51
1.3 半导体三极管	10	2.4.3 源极耦合差分放大电路	54
1.3.1 三极管的结构与符号	10	2.4.4 差分放大电路的通用结构	55
1.3.2 三极管的 PN 结偏置	11	2.5 功率放大电路	55
1.3.3 三极管的放大原理	11	2.5.1 功率放大电路的主要性能指标	56
1.3.4 三极管的伏安特性与主要参数	12	2.5.2 功率放大电路的工作方式	56
1.3.5 温度对三极管伏安特性的影响	16	2.5.3 互补对称功率放大电路	57
1.4 场效应管	17	2.5.4 D 类功率放大电路	61
1.4.1 场效应管的种类与符号	17	2.6 数字逻辑门电路	61
1.4.2 场效应管的伏安特性与主要参数	19	2.6.1 CMOS 反相器电路	62
1.5 复合管	22	2.6.2 TTL 与非门电路	63
思考题与习题 1	23	思考题与习题 2	64
第 2 章 单元电子电路	27	第 3 章 集成运算放大器	68
2.1 放大电路概述	27	3.1 集成运算放大器	68
2.1.1 放大电路的基本概念	27	3.1.1 集成运放的电路结构	68
2.1.2 放大电路的主要性能指标	27	3.1.2 集成运放的电压传输特性与主要性能指标	69
2.1.3 放大电路的级联	29	3.1.3 理想集成运算放大器	71
2.1.4 放大电路的频率响应	30	3.1.4 集成运算放大器的分类	72
2.2 基本放大电路	32	3.2 反馈	76
2.2.1 直流通路与交流通路	32	3.2.1 反馈的基本概念	76
		3.2.2 反馈的类型及判别方法	78

3.2.3 负反馈电路的分析方法	81	5.5 常用组合逻辑功能器件及其 应用	151
3.2.4 负反馈对放大电路性能 的影响	83	5.5.1 加法器	151
3.3 集成运算放大器的应用电路	88	5.5.2 比较器	152
3.3.1 基本运算电路	88	5.5.3 编码器	154
3.3.2 有源滤波器电路	94	5.5.4 译码器	156
3.3.3 信号产生器电路	97	5.5.5 数据选择器与数据分配器	160
思考题与习题 3	99	思考题与习题 5	163
第 4 章 直流稳压电源	105	第 6 章 时序逻辑电路	170
4.1 直流稳压电源的结构与主要 指标	105	6.1 时序逻辑基础	170
4.1.1 直流稳压电源的结构	105	6.1.1 时序逻辑电路的一般结构、 特点与分类	170
4.1.2 直流稳压电源的主要指标	105	6.1.2 时序逻辑电路的描述方式	171
4.2 整流与滤波电路	107	6.2 触发器及其应用	172
4.2.1 整流电路	107	6.2.1 基本 RS 触发器	172
4.2.2 滤波电路	109	6.2.2 同步 RS 触发器	173
4.3 稳压电路	112	6.2.3 集成触发器	174
4.3.1 稳压二极管稳压电路	113	6.2.4 触发器的基本应用	178
4.3.2 三端集成稳压器	115	6.2.5 同步时序电路分析	182
思考题与习题 4	118	6.3 计数器芯片及其应用	183
第 5 章 组合逻辑电路	121	6.3.1 异步计数器芯片及使用	184
5.1 数字逻辑基础	121	6.3.2 同步计数器芯片及使用	185
5.1.1 数制与编码	121	6.3.3 计数器的应用	189
5.1.2 逻辑运算和逻辑门	127	6.4 移位寄存器芯片及其应用	190
5.1.3 逻辑代数的运算定律和运算 规则	131	6.4.1 移位寄存器芯片及使用	190
5.1.4 逻辑函数的表达式和真值表	133	6.4.2 移位寄存器的应用	192
5.1.5 逻辑函数的化简	135	思考题与习题 6	196
5.2 集成逻辑门	140	第 7 章 半导体存储器与可编程逻辑 器件	203
5.2.1 逻辑系列	141	7.1 半导体存储器	203
5.2.2 数字集成电路的主要电气 指标	142	7.1.1 半导体存储器的分类	203
5.2.3 逻辑器件的特殊输出结构	145	7.1.2 半导体存储器的电路原理	204
5.3 组合逻辑电路分析	147	7.1.3 半导体存储器的使用	205
5.3.1 分析步骤	147	7.2 简单可编程逻辑器件 (SPLD)	207
5.3.2 分析举例	147	7.2.1 可编程逻辑器件概述	207
5.4 组合逻辑电路设计	149	7.2.2 通用阵列逻辑器件 (GAL)	209
5.4.1 设计步骤	149		
5.4.2 设计举例	149		

7.3 复杂可编程逻辑器件 (CPLD)	212	8.3.2 用 555 定时器构成多谐 振荡器	237
7.3.1 阵列扩展型 CPLD	212	8.3.3 用 555 定时器构成单稳态 触发器	238
7.3.2 单元型 CPLD (FPGA)	213	8.3.4 用 555 定时器构成施密特 触发器	238
7.3.3 CPLD 与 FPGA 的比较	214	8.4 电子系统	239
7.4 PLD 的应用开发	215	8.4.1 电子系统概述	240
7.4.1 PLD 的开发过程	215	8.4.2 电子系统实例	241
7.4.2 PLD 的开发软件 QuartusII ..	216	思考题与习题 8	242
思考题与习题 7	222	附录 A 电工电子仿真软件 Multisim 简介	244
第 8 章 模-数混合器件与电子系统	224	附录 B 部分习题参考答案	253
8.1 集成数/模转换器	224	附录 C 模拟试卷及参考答案	260
8.1.1 数/模转换的基本原理	224	参考文献	266
8.1.2 DAC0832 及其使用	225		
8.2 集成模/数转换器	230		
8.2.1 模/数转换的一般过程	230		
8.2.2 ADC0809 及其使用	232		
8.3 555 定时器及其应用	235		
8.3.1 555 定时器的电路结构与 工作原理	235		

第1章 半导体器件基础

半导体器件是组成电子电路的核心元件，半导体二极管、三极管和场效应管是最基本的半导体器件。本章在简介半导体基础知识的基础上，着重介绍半导体二极管、三极管、场效应管的外部特性和半导体二极管的基本应用电路及分析方法。除了特别必要之处外，普遍淡化了器件内部物理机理的讲解。

1.1 半导体基础知识

半导体（Semiconductor）是制作半导体器件的主要材料，其导电能力介于导体和绝缘体之间。目前最常用的半导体材料是硅（Si）和锗（Ge），它们均为四价元素。

半导体具有热敏特性、光敏特性和掺杂特性三个重要特性，其导电能力会随着温度、光照的变化或掺入杂质浓度的多少而发生显著改变。

1.1.1 本征半导体

纯净的具有单晶体结构的半导体称为本征半导体，它不含任何杂质，且原子在内部按一定规律整齐地排列成晶体结构。以硅为例，将纯净的硅材料经过一定的工艺过程制成硅单晶后，即为本征半导体。硅原子在空间排列成整齐的点阵，称为晶格，位于晶格上的硅原子是不能移动的。每个硅原子的最外层都有四个价电子，与周围相邻的四个硅原子中的价电子共形成四个共用电子对，从而构成四个共价键。共价键具有很强的结合力，最终形成的晶体是一个四面体结构，如图 1-1(a)所示，其他诸如锗（Ge）、砷化镓（GaAs）等很多种半导体材料都具有与之相同的四面体结构。图 1-1(b)为五个硅原子形成的共价键的二维结构示意图。

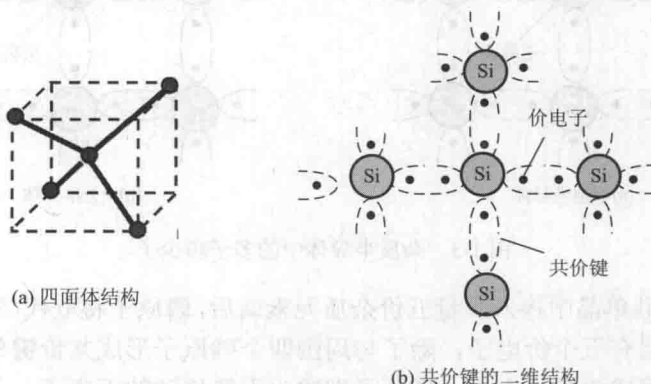


图 1-1 单晶硅中的硅原子

常温下，仅有极少数的价电子由于热运动（热激发）获得足够的能量而挣脱共价键的束缚变为自由电子，与此同时在失去电子的共价键中留下一个空位置，称为空穴。原子因失掉

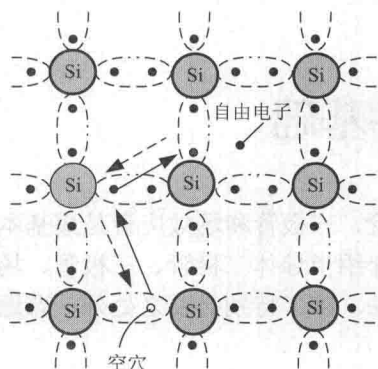


图 1-2 本征半导体中的两种载流子

一个价电子而带正电，也可以说空穴带正电。当一个具有一定热能的自由电子靠近某个空穴时，便会填补到该空穴中，如图 1-2 所示（实线箭头代表价电子的填补轨迹，虚线箭头代表空穴的运动轨迹），看起来就像是一个正电荷在半导体中随机移动一样。这样，若在本征半导体两端外加一电场，就有两种类型的电荷粒子能够产生电流，即带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴。

在电子学中，运载电荷的粒子称为载流子。因此，半导体中存在自由电子和空穴两种载流子，这是半导体导电的特殊性质。上述由热激发产生自由电子-空穴

对的过程称为本征激发，本征激发中自由电子和空穴成对产生，两者数目相等。而当自由电子和空穴在运动中相遇时，自由电子又会填补空穴，两者同时消失，这种现象称为复合。当温度一定时，本征半导体中的激发和复合达到动态平衡，于是载流子的浓度保持恒定，且自由电子的浓度与空穴的浓度相等。如果温度升高，则热激发加剧，使得载流子浓度升高，导电能力增强；如果温度降低，则热激发减弱，使得载流子浓度下降，导电能力变差。

1.1.2 杂质半导体

常温下，本征半导体中的自由电子和空穴的浓度非常低，导电能力很弱。若利用掺杂工艺在本征半导体中掺入少量杂质元素，就可以使一种载流子的浓度远大于另一种，此时的半导体称为杂质半导体，其导电性能远好于本征半导体，如图 1-3 所示。

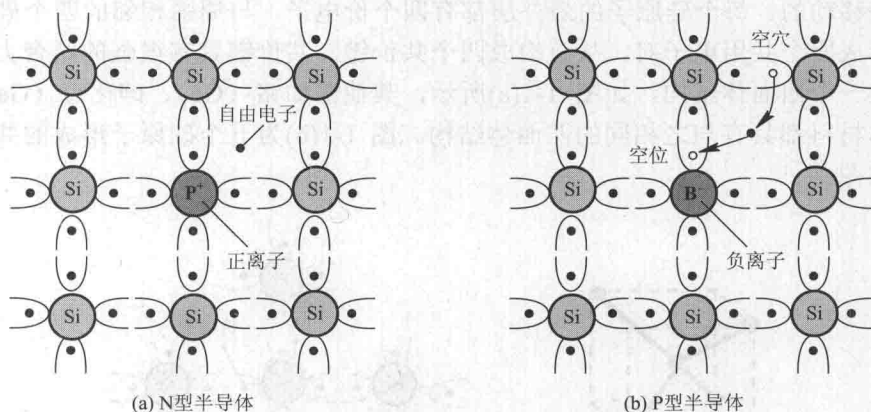


图 1-3 杂质半导体中的多子和少子

图 1-3(a)中，在硅单晶中掺入少量五价杂质元素磷后，磷原子将取代晶格中硅原子的位置。由于磷原子的最外层有五个价电子，除了与周围四个硅原子形成共价键外，多余的那个价电子很容易因热激发而成为自由电子，磷原子则成为不能移动的正离子，于是自由电子浓度远高于空穴，从而形成 N 型半导体。反之，若在硅单晶中掺入三价杂质元素（例如硼），则空穴浓度将远高于自由电子，从而形成 P 型半导体，如图 1-3(b)所示。通常浓度高的载流子称为多数载流子，简称多子；浓度低的载流子称为少数载流子，简称少子。因此 N 型半导体中的多

子是自由电子，少子是空穴；而 P 型半导体中的多子是空穴，少子是自由电子。应当指出，无论 P 型半导体还是 N 型半导体，其对外总是呈电中性的。

杂质半导体主要靠多子导电，多子浓度约等于所掺入的杂质原子的浓度，掺杂浓度越高，意味着多子浓度越高，导电能力越强。而少子是热激发产生的，所以尽管少子浓度很低，却对温度非常敏感，这将影响半导体器件的性能。

1.1.3 PN 结

将 P 型半导体和 N 型半导体制作在同一块硅片上，在它们的交界面将形成 PN 结。PN 结是半导体器件的核心，是各种电子电路的功能得以实现的基础。

如图 1-4(a)所示，在 P 型半导体和 N 型半导体的交界面，P 型半导体中的多子空穴和 N 型半导体中的多子自由电子都会因浓度差而向对方区域扩散，并在交界面附近因相遇而复合，于是在交界面两侧就出现了由不能移动的正、负杂质离子构成的空间电荷区，也就是 PN 结。空间电荷区会产生一个由 N 区指向 P 区的内电场，随着多子扩散运动的进行，空间电荷区逐渐变宽，内电场逐渐增强，这将削弱多子的扩散运动，同时增强少子在内电场作用下的定向移动即漂移运动。当多子的扩散运动和少子的漂移运动达到动态平衡时，空间电荷区的宽度便稳定下来，PN 结上的结电流为零。

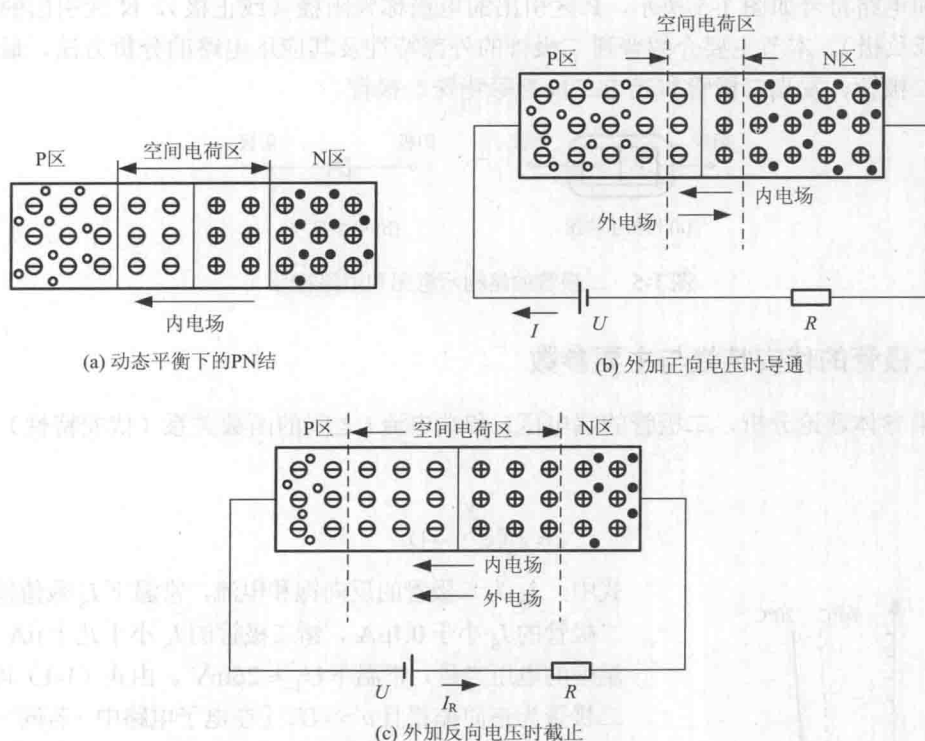


图 1-4 PN 结的单向导电性

如果在 PN 结两端外加电压，则上述平衡状态被打破，且当外加电压极性不同时，PN 结呈现出截然不同的导电特性，即单向导电性。单向导电性是 PN 结最重要的特性，正是因为这一特性，才使 PN 结成为半导体器件最基本的组成部分。

1. 外加正向电压时导通

如图 1-4(b)所示, 当 P 区接高电位、N 区接低电位时, 称 PN 结外加正向电压或 PN 结正向偏置。由于外电场方向与内电场方向相反, 使得内电场被大大削弱, 空间电荷区变得极窄, 于是多子的扩散运动占优, 从宏观上看, 就是回路中形成较大的正向电流, PN 结导通。注意, 由于 PN 结导通时的结压降只有零点几伏, 因此必须在回路中串接限流电阻 R , 以限制回路电流, 防止 PN 结因正向电流过大而损坏。

2. 外加反向电压时截止

如图 1-4(c)所示, 当 P 区接低电位、N 区接高电位时, 称 PN 结外加反向电压或 PN 结反向偏置。此时外电场方向与内电场方向相同, 使得内电场增强, 空间电荷区变宽, 因而少子的漂移运动占优, 但由于少子的数目极少, 形成的反向电流非常小且数值几乎恒定, 故又称反向饱和电流。近似分析时, 反向饱和电流的数值可忽略不计, 因此认为 PN 结截止。

1.2 半导体二极管

将 PN 结封装起来并加上电极引线, 就可构成半导体二极管, 简称二极管 (Diode)。二极管的结构和电路符号如图 1-5 所示, P 区引出的电极称为阳极 (或正极), N 区引出的电极称为阴极 (或负极)。本节主要介绍普通二极管的外部特性及其应用电路的分析方法, 最后简单介绍稳压二极管、发光二极管和光电二极管等特殊二极管。

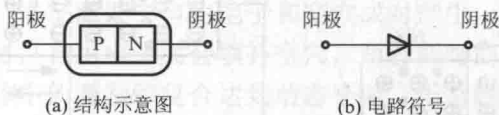


图 1-5 二极管的结构示意图和电路符号

1.2.1 二极管的伏安特性与主要参数

根据半导体理论分析, 二极管的端电压 u 和端电流 i 之间的函数关系 (伏安特性) 可近似描述为

$$i = I_S (e^{\frac{u}{U_T}} - 1) \quad (1-1)$$

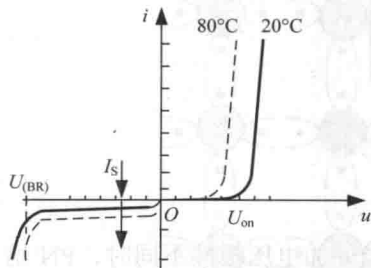


图 1-6 二极管的伏安特性

式中, I_S 为二极管的反向饱和电流, 常温下 I_S 数值很小, 硅二极管的 I_S 小于 $0.1\mu\text{A}$, 锗二极管的 I_S 小于几十 μA ; U_T 为温度的电压当量, 常温下 $U_T \approx 26\text{mV}$ 。由式 (1-1) 可知, 当二极管为正向偏置且 $u \gg U_T$ [在电子电路中, 若同一量纲的两个物理量 A_1 、 A_2 满足 $A_1 > (5 \sim 10) A_2$, 则认为 $A_1 \gg A_2$]

时, $i \approx I_S e^{\frac{u}{U_T}}$, 即 i 随 u 按指数规律变化; 当二极管为反向偏置且 $|u| \gg U_T$ 时, $i \approx -I_S$, 即 i 的大小与 u 几乎无关。

二极管的伏安特性曲线如图 1-6 所示。

由图 1-6 可见, 与 PN 结一样, 二极管具有单向导电性, 且 $i \sim u$ 关系是非线性的。在正向特性部分, 只有当 $u > U_{on}$ 后, i 才开始急剧增大, 二极管真正导通, 故将 U_{on} 称为导通电压; 近似分析时通常认为导通后的管压降基本保持在 U_{on} , 硅二极管约 0.7V, 锗二极管约 0.3V。在反向特性部分, 当反向电压未达到 $U_{(BR)}$ 时, $i \approx I_S \approx 0$, 二极管截止; 一旦反向电压达到或超过 $U_{(BR)}$, 反向电流将急剧增大, 二极管反向击穿, 故称 $U_{(BR)}$ 为反向击穿电压。

除 U_{on} 、 I_S 和 $U_{(BR)}$ 外, 二极管的其他参数还包括最大整流电流 I_F 和最大反向工作电压 U_R 。 I_F 是指二极管长期工作时允许通过的最大正向平均电流, 实际工作时二极管的正向平均电流不应超过此值, 否则将导致管子因过热而损坏; U_R 是指二极管正常工作时允许外加的最大反向电压, 一般规定为击穿电压 $U_{(BR)}$ 的一半, 超过此值则二极管有可能反向击穿甚至损坏。

1.2.2 温度对二极管伏安特性的影响

作为半导体器件, 二极管对温度非常敏感。当温度升高时, 正向特性曲线将左移, 反向特性曲线将下移 (如图 1-6 中虚线所示)。在室温附近, 温度每升高 1°C , 正向压降 U_{on} 约减小 $2 \sim 2.5\text{mV}$; 温度每升高 10°C , 反向饱和电流 I_S 约增大 1 倍。

1.2.3 二极管的基本应用与电路分析方法

二极管的应用大多数基于其单向导电性即直流特性, 所以这里首先讨论限幅电路和逻辑门电路, 并由此得到二极管电路的一般分析方法, 最后讨论二极管的交流特性应用。

1. 基于单向导电性的二极管电路应用实例

二极管限幅电路如图 1-7(a) 所示。假设二极管的导通电压为 0.7V, 输入电压 u_i 为正弦波, 且 $u_i = 5\sin\omega t$ (V)。当 $u_i > 2.7\text{V}$ 时, D_1 导通, D_2 截止, 输出电压 $u_o = 2.7\text{V}$; 当 $u_i < -0.7\text{V}$ 时, 情况正好相反, D_2 导通, D_1 截止, 输出电压 $u_o = -0.7\text{V}$; 而当 $-0.7\text{V} < u_i < 2.7\text{V}$ 时, D_1 、 D_2 均截止, 因此输出电压 $u_o = u_i$ 。输入、输出波形如图 1-7(b) 所示, 利用 Multisim 软件进行仿真, 可以方便地观察到这些波形。由图 1-7(b) 可见, 输出电压的幅值始终被限制在 $-0.7 \sim +2.7\text{V}$ 之间, 故称限幅电路。形象地看, 限幅相当于把 u_i 超出 $+2.7\text{V}$ 或 -0.7V 的部分削去, 所以限幅电路又称削波电路。图 1-7(b) 所示为双向限幅, 此外还有上限幅或下限幅等单向限幅。

二极管限幅电路常用作输入、输出保护电路。

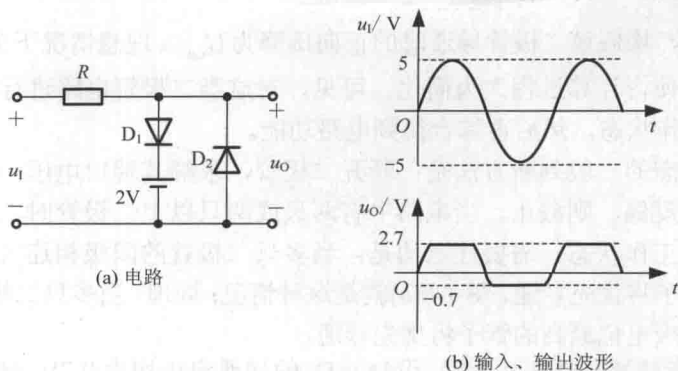


图 1-7 二极管限幅电路

二极管逻辑门电路如图 1-8(a)所示,这类电路常用于数字电路。假设 D_1 、 D_2 为理想二极管,即导通时的正向压降为零,截止时的反向电流为零;输入电压 u_{i1} 、 u_{i2} 只有两种可能,不是 0V 就是 5V。当 u_{i1} 、 u_{i2} 均为 0V 时, D_1 、 D_2 同时导通,输出电压 $u_o = 0V$; 当 u_{i1} 、 u_{i2} 中有一个为 5V、另一个为 0V 时,输入端和 0V 相连的二极管优先导通,将 u_o 钳制在 0V,从而使得输入端与 5V 相连的二极管因反向偏置而截止;当 u_{i1} 、 u_{i2} 均为 5V 时, D_1 、 D_2 同时导通, $u_o = 5V$ 。将上述分析结果列于表 1-1 可见,若规定 0V 为低电平(电位也称电平),5V 为高电平,则只有当全部输入为高电平时,输出才是高电平;而只要至少有一个输入为低电平,输出就是低电平。这种逻辑关系在数字电路中称为“与逻辑”,图 1-8(a)所示电路称为与门电路。图 1-8(b)给出了与门电路一种可能的输入、输出波形关系,利用 Multisim 软件可以进行仿真验证。

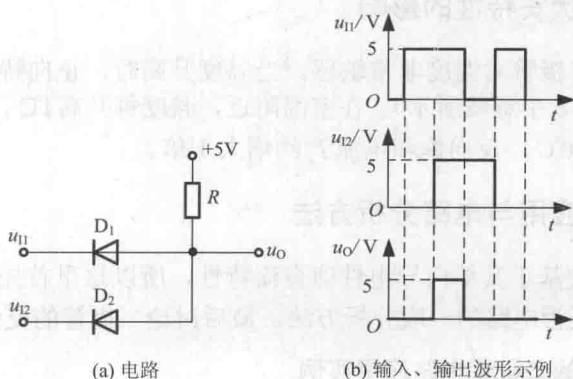


图 1-8 二极管与门电路

表 1-1 输入、输出对应关系及二极管的工作状态

u_{i1}	u_{i2}	u_o	D_1 状态	D_2 状态
0V	0V	0V	导通	导通
0V	5V	0V	导通	截止
5V	0V	0V	截止	导通
5V	5V	5V	导通	导通

2. 二极管电路的一般分析方法

在上述两例中,均假设二极管导通时的正向压降为 U_{on} (理想情况下为零),截止时的反向电流为零,从而使得计算过程大为简化。可见,对这类二极管电路进行分析时,首先应正确判断二极管的工作状态,然后再综合得到电路功能。

二极管工作状态的一般判断方法是:断开二极管,求解其端口电压;若该电压使二极管正偏,则导通;若反偏,则截止。当电路中有两只或两只以上二极管时,可分别应用该方法判断每只二极管的工作状态。需要注意的是,当多只二极管的阳极相连(共阳极接法)时,阴极电位最低的管子将优先导通,图 1-8(a)就是这种情况;同理,当多只二极管的阴极相连(共阴极接法)时,阳极电位最高的管子将优先导通。

例 1-1 二极管电路如图 1-9 所示,设 D_1 、 D_2 的导通电压均为 0.7V,试求当 u_i 分别为 0V、4V 和 8V 时 u_o 的值。

解 当 u_i 为 0V 时, 断开 D_1 、 D_2 , 两管的阴极电位均为 -6V, 阳极电位分别为 0V 和 6V, 故 D_2 优先导通, 使得 A 点电位为

$$u_A = 6 - \frac{6 - (-6) - 0.7}{R_1 + R_2} \times R_2 - 0.7 = 6 - \frac{12 - 0.7}{5 + 5} \times 5 - 0.7 = -0.35V$$

由于 D_1 的导通电压为 0.7V, 故 D_1 截止, 输出电压为

$$u_O = u_A + 0.7 = -0.35 + 0.7 = 0.35V$$

当 u_i 为 4V 时, 断开 D_1 、 D_2 , 同理可知 D_2 仍将优先导通, $u_A = -0.35V$ 。但因为此时 $u_i = 4V$, 使得 D_1 正向导通, 所以 u_A 的实际数值为 3.3V, 输出电压为

$$u_O = 4 - 0.7 + 0.7 = 4V$$

当 u_i 为 8V 时, 断开 D_1 、 D_2 , 则 D_1 优先导通, 并将 A 点电位钳制在 7.3V, 于是 D_2 反向截止, 输出电压 $u_O = 6V$ 。

3. 二极管的交流特性应用

到目前为止, 只考虑了二极管 (PN 结) 的直流特性, 也可称之为大信号分析。当带有 PN 结的半导体器件应用于线性放大电路时, PN 结交流特性的重要性就凸显出来。在这种情况下, 交流小信号 (与直流信号相比非常小) 将叠加在直流电流和直流电压之上, 故称之为小信号分析。

以图 1-10(a) 所示电路为例, 假设输入的正弦交流信号源 u_i 的幅值与直流电源 E 相比非常小。由于该电路为交直流混合电路, 因此对它的分析相应地分为直流分析和交流分析。为了便于区分, 此处特别说明本书所采用的符号规则: 若某变量为直流量, 则该变量及其下标均用大写字母表示; 若为交流量, 则该变量及其下标均用小写字母表示, 若需要表示该交流量的有效值, 则变量本身为大写字母, 下标为小写字母; 若某变量为直流量和交流量的叠加即瞬时量, 则该变量本身为小写字母, 下标为大写字母。以输出电压为例, U_O 表示输出直流电压, u_o 表示输出交流电压, U_o 表示输出交流电压 u_o 的有效值, u_O 表示输出瞬时电压即直流电压和交流电压的叠加值。

下面首先对图 1-10(a) 进行直流分析, 仅考虑直流电源 E 的作用 (令 $u_i = 0$), 此时二极管上的端电压和端电流均为直流量, 分别表示为 U_D 和 I_D , 合称二极管的静态工作点 Q (Quiescent), 两者的比值定义为直流电阻 R_D , 即

$$R_D = \frac{U_D}{I_D} \quad (1-2)$$

再进行交流分析, 直流电源 E 和交流信号源 u_i 共同作用。此时, 二极管的端电压和端电流将在静态值 U_D 、 I_D 的基础上随输入信号 u_i 做相应变化, 二极管的工作范围就由 Q 点扩展到了 $Q' \sim Q''$ 之间的一小段曲线, 如图 1-10(b) 所示。图中由 u_i 引起的二极管端电压的变化部分即二极管上的交流电压为 u_d , 交流电流为 i_d 。显然, 二极管上总的端电压和端电流应为相应直流量和交流量的叠加, 即 $u_D = U_D + u_d$, $i_D = I_D + i_d$ 。由图可见, 只要 u_i 足够小, $Q' \sim Q''$ 之间的一小段曲线就可以用 Q 点处的切线来近似, 换言之 u_d 与 i_d 之间为线性关系, 两者的比值定义为交流电阻 r_d 。可以证明, 交流电阻为

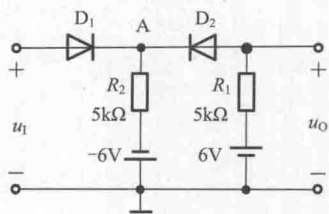


图 1-9 例 1-1 图

$$r_d = \frac{u_d}{i_d} \approx \frac{U_T}{I_D} \quad (1-3)$$

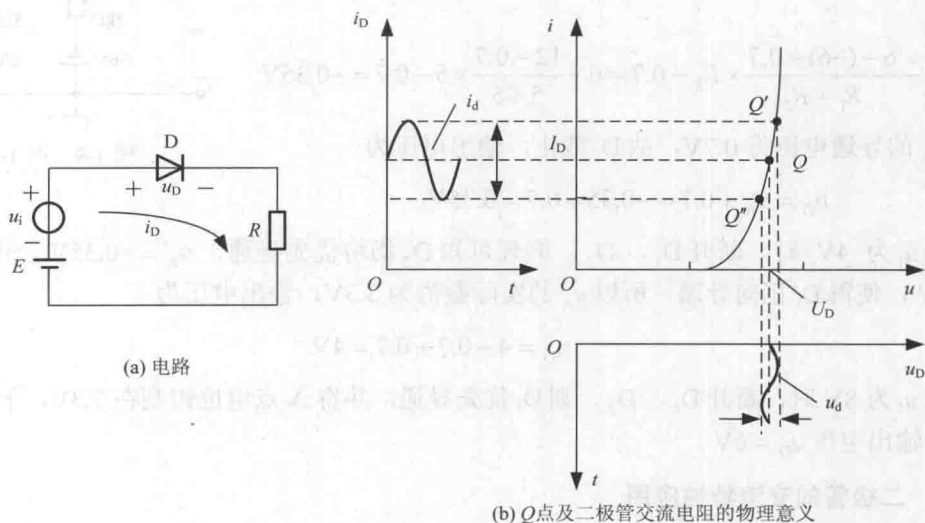


图 1-10 二极管的交流特性

例 1-2 二极管电路如图 1-10(a)所示。设 $E=10\text{V}$ ， $u_i=0.1\sin\omega t$ (V)， $R=5\text{k}\Omega$ ，二极管的导通电压为 0.7V ，试求二极管的直流电流和交流小信号电流。

解 令 $u_i=0$ ，得到直流电流所流经的路径（称为直流通路）如图 1-11(a)所示，故二极管上流过的直流电流为

$$I_D = \frac{E - 0.7}{R} = \frac{10 - 0.7}{5} = 1.86\text{mA}$$

再令 $E=0$ ，得到交流电流所流经的路径（称为交流通路）如图 1-11(b)所示，图中的交流电阻 r_d 可据式 (1-3) 求出，即

$$r_d \approx \frac{U_T}{I_D} = \frac{26\text{mV}}{1.86\text{mA}} \approx 14\Omega$$

故二极管上的交流电流为

$$i_d = \frac{u_i}{R + r_d} = \frac{0.1\sin\omega t}{5 + 0.014} \approx 0.0199\sin\omega t (\text{mA}) = 19.9\sin\omega t (\mu\text{A})$$

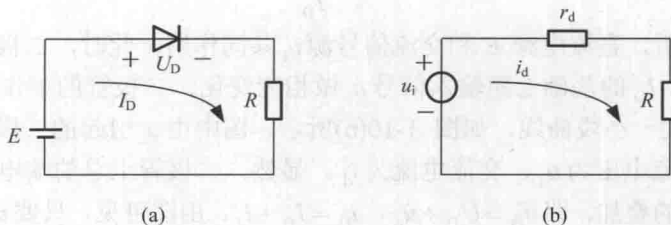


图 1-11 例 1-2 解图

例 1-2 表明, 二极管 (PN 结) 的交流电阻常用于求解二极管电路中叠加在 Q 点之上的交流响应。此外, PN 结的交流电阻也常用于构建三极管的小信号模型, 见第 2 章 2.2 节。

1.2.4 特殊二极管

根据用途和特点的不同, 二极管共分二十多个种类。这里仅介绍比较常见的稳压二极管、发光二极管和光电二极管等三种特殊二极管。

1. 稳压二极管

稳压二极管又称齐纳二极管, 是利用 PN 结反向击穿后所表现出来的稳压特性制作而成, 其电路符号与伏安特性如图 1-12 所示。当稳压管两端所加的反向电压值超过击穿电压 U_Z 时, 稳压管被击穿, 反向电流急剧增大, 但反向电压却基本保持恒定, 因此稳压管工作在反向击穿区时可以起到稳压作用, 稳定电压值就是稳压管的反向击穿电压值 U_Z 。需要注意的是, 为保证稳压管能够正常工作, 必须配以阻值合适的限流电阻, 以便将稳压管的反向击穿电流控制在 $I_{Zmin} \sim I_{Zmax}$ 之间。否则, 低于 I_{Zmin} 时管子的稳压效果变差, 高于 I_{Zmax} 时管子将因过热而损坏。稳压二极管的具体应用参见第 4 章 4.3 节。

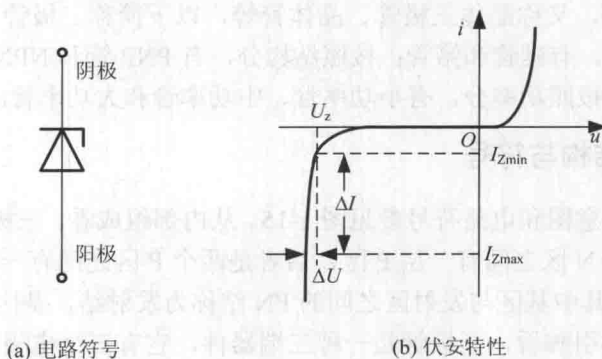


图 1-12 稳压二极管

2. 发光二极管

发光二极管 (LED) 是目前最为流行的显示器件, 常用作指示灯、照明灯、七段数码管、大屏幕矩阵式显示器等, 电路符号如图 1-13(a) 所示。发光二极管由砷化镓 (GaAs) 等化合物半导体材料制造而成, 与普通二极管一样具有单向导电性, 但导通电压比普通二极管大 (一般在 1.5V 以上), 当有足够的正向电流 (10~30mA) 通过时便会发光, 这是自由电子与空穴复合而放出能量的结果。发光二极管有多种外形、尺寸和颜色可供选择, 尽管其正向压降及工作电流不尽相同, 但绝大多数情况下都应串接一个限流电阻, 如图 1-13(b) 所示。只有限流电阻取值合适, 发光二极管才能正常发光且不损坏。

3. 光电二极管

光电二极管可接收可见光或不可见光, 电路符号和伏安特性如图 1-14 所示。由图 1-14(b) 可见, 光电二极管正常工作时应外加反向电压。无光照时, 只有很小的反向饱和电流, 称为暗电流; 有光照时, 光电二极管将因热激发而产生大量的自由电子-空穴对, 并通过外电路形