

电工电子技术系列教材

模拟电子技术

殷瑞祥 朱宇西 丘晓华 编

MoNi DianZi JiShu

华南理工大学出版社

电工电子技术系列教材

模拟电子技术

殷瑞祥 朱宁西 丘晓华 编

华南理工大学出版社

·广州·

内 容 简 介

电工电子技术是非电子、电气类专业的理论性、实践性都比较强的技术基础课程。本书为“电工电子技术系列教材”之三,主要介绍模拟电子技术的基本知识和应用电路。全书共5章,主要内容包括直流电源电路、放大电路、集成运算放大器及其应用、信号产生电路和可控整流电路等。

书中着重阐述基本概念、基本原理和实际应用。例题和习题除围绕上述重点外,还注意思考性、启发性,使读者能增强分析问题和解决问题的能力。

本书兼顾深度和广度,适合作为非电子、电气类各专业本专科、各种成人教育的教材,对于相关工程技术人员也是一本实用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/殷瑞祥,朱宁西,丘晓华编. —广州:华南理工大学出版社, 2004.3

(电工电子技术系列教材)

ISBN 7-5623-2063-2

I. 模… II. ①殷…②朱…③丘… III. 模拟电路-电子技术-高等学校-教材 IV. TN710

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 127172 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学 17 号楼,邮编 510640)

发行部电话:020-87113487 87111048(传真)

E-mail: scut202@scut.edu.cn http://www.scutpress.com

责任编辑:胡 元

印刷者:南海市彩印制本厂

开 本:787×960 1/16 印张:13.25 字数:283 千

版 次:2004 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

印 数:1~5 000 册

定 价:22.00 元

版权所有 盗版必究

“电工电子技术系列教材”编委会

主任：殷瑞祥

编委（以姓氏拼音为序）：

樊利民 罗昭智

丘晓华 张琳

朱宁西

前 言

随着科学技术的发展,电工电子技术在各行各业中的应用越来越广泛,电工电子技术基础已经成为大学生不可缺少的基本知识构架之一。在我国高等学校专业培养方案中,非电子、电气类专业传统上以开设电工学课程实现电工电子技术基础教学,但是,电工电子技术的发展使课程内容越来越庞杂,不利于教和学。

根据电工电子技术基础的学科涵盖范畴,我们在教学改革的基础上,采用模块化教学的思想,将电工学课程从单一课程扩展为电工电子技术系列课程:电路基础、电气控制、模拟电子技术和数字电子技术。本系列教材正是针对非电子、电气类专业电工电子技术基础系列课程而编写的。与传统电工学教材相比,该系列教材删减了陈旧繁杂的内容,补充了反映科学技术发展的新内容,《电路基础》把重点放在分析方法的阐述,《电气控制》增加了可编程控制器的应用,《模拟电子技术》、《数字电子技术》突出了集成电路的应用。

电工电子技术系列教材共分4册,本书为第3册,主要介绍模拟电子技术的基本知识和应用电路。全书共5章,第1章直流电源电路,介绍半导体二极管的基本知识、直流稳压电源的基本原理与分析;第2章放大电路,介绍半导体三极管、场效应晶体管的原理,基本放大电路的原理、分析和常用电路;第3章集成运算放大器及其应用,介绍集成运算放大器的原理及各种应用电路;第4章信号产生电路,介绍正弦波振荡电路、非正弦振荡电路的原理与实用电路;第5章可控整流电路,介绍晶闸管原理、可控整流电路的原理与实用电路。

在编写过程中,我们认真总结了多年的教学经验,学习参考了国内外同类、相关教材和著作,以培养学生分析问题和解决问题能力,提高学生素质为目标,注重基本概念、基本原理、基本方法的论述,既能使学生掌握好基础,又能启发学生思考,开阔视野。书中文字叙述力求简明扼要,便于自学。

本系列教材的编写大纲是在华南理工大学电工教研室全体教师集体讨论的基础上制定的。参加本册编写的有朱宁西(第1、3、4、5章)、丘晓华(第

2 章),殷瑞祥教授负责修改、统稿。

华南理工大学电工教研室张琳副教授对本书的编写提出了许多建设性意见,并审阅了部分初稿。

由于我们水平有限,书中难免存在缺点和不足,恳请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 10 月于广州

目 录

1 直流电源电路	1
1.1 半导体二极管	1
1.1.1 PN 结及其单向导电性	2
1.1.2 半导体二极管的基本结构	5
1.1.3 半导体二极管的伏安特性及主要参数	6
1.2 整流电路	10
1.2.1 单相半波整流电路	10
1.2.2 单相桥式整流电路	11
1.2.3 三相桥式整流电路	14
1.3 电源滤波电路	15
1.3.1 电容滤波电路	16
1.3.2 电感滤波电路	18
1.3.3 电感电容(LC)和电阻电容(RC)滤波电路	19
1.3.4 π 形滤波电路	21
1.4 稳压二极管	21
1.5 稳压电路	24
1.5.1 稳压管稳压电路	25
1.5.2 串联型稳压电路	27
1.5.3 集成稳压电路	28
1.5.4 开关型稳压电路	30
习题 1	32
2 放大电路	37
2.1 双极型晶体三极管	37
2.1.1 双极型晶体三极管的基本结构	37
2.1.2 晶体管电流分配及放大原理	38
2.1.3 晶体管的特性曲线	40
2.1.4 晶体管的主要参数	42
2.2 晶体管放大电路	44
2.2.1 晶体管放大电路的组成和工作原理	45
2.2.2 放大电路的基本分析方法	49

2.2.3 静态工作点稳定电路·····	61
2.2.4 射极输出器·····	68
2.3 多级放大电路·····	71
2.3.1 阻容耦合放大电路·····	72
2.3.2 直接耦合放大电路·····	78
2.3.3 差动放大电路·····	81
2.4 放大电路中的负反馈·····	93
2.4.1 放大电路中的负反馈的概念·····	93
2.4.2 负反馈的类型及判别·····	95
2.4.3 负反馈对放大电路工作性能的影响·····	103
2.5 功率放大电路·····	106
2.5.1 功率放大电路的特点·····	107
2.5.2 互补对称功率放大电路·····	108
2.6 场效应晶体管·····	113
2.6.1 绝缘栅场效应管·····	113
2.6.2 结型场效应管(JFET)·····	118
2.6.3 场效应管的主要参数·····	120
2.7 场效应管放大电路·····	122
2.7.1 场效应管放大电路静态工作点的设置及分析·····	122
2.7.2 场效应管放大电路的动态分析·····	125
2.7.3 场效应管放大与双极型晶体管放大的比较·····	129
习题2·····	130
3 集成运算放大器及其应用·····	137
3.1 集成运算放大器简介·····	137
3.1.1 集成运算放大器的组成、特点及图形符号·····	138
3.1.2 集成运算放大器的电压传输特性和等效电路模型·····	139
3.1.3 运算放大器的电路分析方法·····	140
3.1.4 常用的集成运算放大器及其主要参数·····	141
3.2 模拟信号的运算电路·····	143
3.2.1 比例运算电路·····	143
3.2.2 加法、减法运算电路·····	146
3.2.3 微分、积分运算电路·····	149
3.3 信号处理电路·····	152
3.3.1 比较器·····	153
3.3.2 采样保持电路·····	156

习题 3	156
4 信号产生电路	162
4.1 正弦波振荡电路	163
4.1.1 正弦波振荡电路的基本原理	163
4.1.2 LC 振荡电路	165
4.1.3 RC 振荡电路	170
4.2 矩形波(方波)发生器	173
4.3 三角波和锯齿波发生器	174
习题 4	176
5 可控整流电路	179
5.1 晶闸管	179
5.1.1 基本结构	179
5.1.2 工作原理	181
5.1.3 晶闸管的伏安特性及其主要参数	182
5.2 可控整流电路	184
5.2.1 单相半波可控整流电路	184
5.2.2 单相半控桥式整流电路	186
5.3 单结晶体管触发电路	188
5.3.1 单结晶体管	188
5.3.2 单结晶体管的自振荡电路	190
5.3.3 单结晶体管触发的可控整流	191
5.4 晶闸管的保护	194
5.4.1 过电流保护	194
5.4.2 过电压保护	195
5.5 应用举例	196
5.5.1 无级(连续)调光灯	196
5.5.2 拨盘式密码锁控制电路	197
5.5.3 录音机记录来客留言电路	198
习题 5	198
参考文献	201

1 直流电源电路

在生产建设和科学实验中,主要采用交流电,它由电力系统的供电电网提供。但在某些场合,特别是电子线路和自动控制装置中,常常需要采用电压非常稳定的直流电。由于直接采用直流发电效率不高,因此,除了低功率的场合使用电池外,大部分直流电是由直流电源电路将交流电转变而成的。图 1-1-1 是直流电源电路的原理框图,它表示了直流电源如何把交流电转换成直流电的过程,图中各环节的作用是:

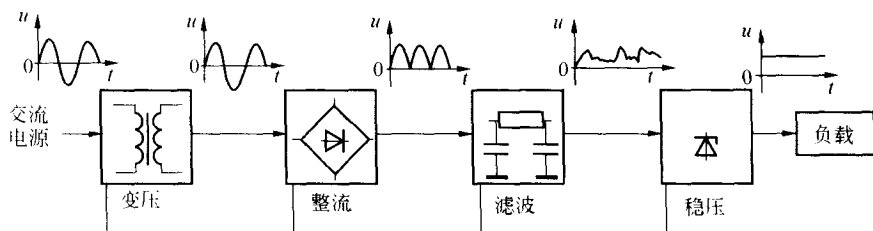


图 1-1-1 直流电源的原理框图

1. 整流变压器

根据所需直流电压的大小,将交流电源电压变换成符合整流需要的交流电压。

2. 整流电路

利用半导体二极管的单向导电性,将交流电变成脉动直流电。

3. 滤波电路

利用电感、电容等电子元件的频率特性,将脉动直流变成较稳定的直流电压。

4. 稳压电路

在交流电源电压波动和负载变动时,滤波电路输出电压的大小会发生波动。稳压电路的作用就是使输出的直流电压不受上述因素影响,保持稳定。

由此可见,半导体二极管是把交流电变成直流电的核心元件。本章先介绍半导体二极管,再讨论由半导体二极管组成的整流电路,以及滤波电路、稳压电路等。

1.1 半导体二极管

半导体器件具有重量轻、体积小、耗电少、寿命长、工作可靠等优点,在现代科学技术中,特别是信息、通信、计算机、互联网等方面,以及国民经济各个领域都得到广泛的应用。半导体的 PN 结是构成各种半导体器件的基础。我们先讨论 PN 结及其单向导

电性,然后介绍半导体二极管的伏安特性和主要参数。

1.1.1 PN 结及其单向导电性

1.1.1.1 半导体的导电特性

我们知道,金属导体原子外层电子极易挣脱原子核的束缚成为自由电子,构成导电载流子。绝缘体原子的最外层的价电子被原子核束缚得很紧,极难成为自由电子,所以不易导电。而半导体原子的最外层的价电子处于半自由状态,因而它的导电性能介于导体和绝缘体之间。半导体的导电性能具有两个特点:

1. 导电能力受环境因素影响大

与金属导体不同,半导体中存在两种导电的载流粒子(简称载流子),即自由电子和空穴,而一般金属导体只有自由电子载流子。半导体中两种载流子的浓度直接控制着其导电能力,但是,半导体中载流子浓度受外界因素影响很大。在纯净半导体的晶体结构中,最外层的价电子处于较为稳定状态的原因,是它具有共价键结构,即由每一原子的一个价电子与另一原子的一个价电子所组成的电子对,这对价电子是每两个相邻原子共有的,它们把相邻的原子结合在一起,如图 1-1-2 所示。但在共价键中的价电子并不像在绝缘体中的价电子被束缚得那样紧,在获得一定能量(如温度增高或受到光照)后,即可挣脱原子核的束缚(电子受到激发),成为自由电子。同时,在共价键中留下一个电子的空位,称为空穴。有空穴的原子是带正电的,它能吸引邻近原子共价键中的价电子来填补这个空穴。这时,空穴就从一个原子内移到另一个原子内,这个过程继续下去,就像带正电的粒子在运动,所以空穴也是一种载流子,如图 1-1-3 所示。半导体晶体中的自由电子和空穴是成对出现的,也称电子-空穴对。自由电子在运动中,如果同空穴相遇,可能返回共价键,与空穴重新结合(又称复合)。它们在既产生又复合的过程中维持一定的浓度。温度越高,价电子获得的能量越大,越容易产生电子-空穴对,载流子数量就越多,导电性能会越好。所以,外界因素特别是温度,对半导体的导电能力(半导体器件的性能)影响很大。利用这些特性可以做成各种热敏元件和光电元件。

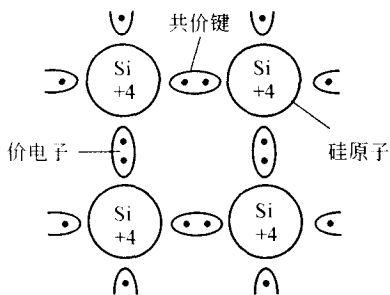


图 1-1-2 硅元之间共价键结构

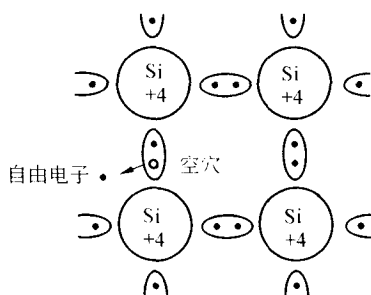


图 1-1-3 空穴与自由电子的形成

2. 导电能力可控

在纯净的半导体中,掺入极微量的有用杂质后(简称掺杂),其导电能力可以增加几十万乃至几百万倍。如室温下,在纯硅中掺入百万分之一的硼后,可以使硅的导电能力提高 50 万倍。可见,控制掺杂的多少就可以控制半导体导电能力的强弱,其原因是掺杂后能改变半导体内载流子的浓度。如在四价元素硅(或锗)中掺入三价元素硼,硼原子只有三个价电子,在硼原子(B)与周围四个硅原子(Si)组成的共价键结构中,因缺少一个价电子而出现一个空穴(图 1-1-4),从而使空穴载流子的数目随着硼元素的掺入大大增加;若在硅(或锗)中,掺入五价元素磷,同样,在与硅原子组成共价键结构时,就会产生多余的价电子,极易成为自由电子(图 1-1-5),自由电子载流子的数目随着磷元素的掺入大大增加。无论是空穴还是自由电子载流子浓度的增加,都使半导体的导电能力增加。

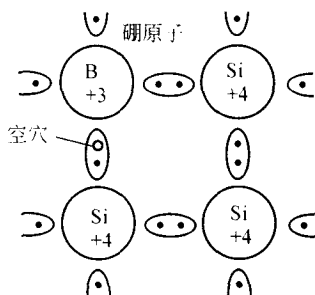


图 1-1-4 硅晶体中掺硼出现空穴

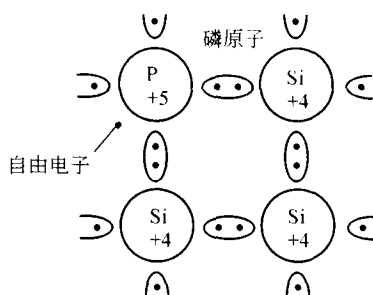


图 1-1-5 硅晶体中掺磷出现自由电子

当半导体随着三价杂质的掺入,使空穴载流子成为多数载流子,空穴导电成为这种半导体导电的主要方式时,我们就称它为空穴半导体,又称 P 型半导体。在 P 型半导体中,多数载流子是空穴,自由电子是少数载流子。若半导体掺入五价杂质,则自由电子成为多数载流子,这种半导体就称为电子半导体,又称 N 型半导体。在 N 型半导体中,空穴是少数载流子。不论是 P 型还是 N 型半导体,虽然它们都有一种载流子占多数,但整个半导体仍然是电中性的。

在掺杂半导体中,多数载流子的浓度主要取决于掺杂浓度,而少数载流子的浓度则随着温度的升高和光照的增强而增大。这样,可以通过掺杂控制半导体的导电能力。各种不同用途的半导体器件均是利用这一特性做成的。

1.1.1.2 PN 结的形成及其单向导电性

P 型或 N 型半导体的导电能力虽然有很大提高,但并不能直接用来制造半导体器件。如果在一块晶片上采用一定的掺杂工艺措施,在两边分别形成 P 型和 N 型半导体,它们的交界面就形成 PN 结。利用这个 PN 结就可以构成各种半导体器件了。PN 结能够成为构成各种半导体器件的基础,是因为它具有单向导电性。

1. PN 结的形成

图 1-1-6 是在同一片半导体基片上分别制造 P 型半导体和 N 型半导体。在 P 型半导体一侧,空穴浓度较高;而在 N 型半导体一侧,自由电子浓度较高。因此,界面处存在载流子浓度梯度,产生多数载流子向对侧的扩散运动,界面附近载流子不断复合,在 P 区靠近界面处,由于多数载流子空穴的扩散和复合,留下带负电的三价杂质离子,形成空间负电荷区;同样,在 N 区靠近界面处,也由于多数载流子自由电子的扩散和复合,留下带正电的五价杂质离子,形成空间正电荷区,建立起由 N 区→P 区的内电场。这个内电场阻止多数载流子扩散的进一步进行。另一方面,对进入空间电荷区的少数载流子,内电场又将其驱动到对侧(漂移运动),在一定温度下,如果无外界电场的作用,达到动态平衡,空间电荷区的宽度基本稳定,形成空间电荷区,即 PN 结。这时的扩散电流等于漂移电流,PN 结中没有净电流流动。空间电荷区的叫法很多,有叫耗尽区(把载流子消耗尽)的,也有叫阻挡层(阻挡多数载流子向对侧扩散)的。

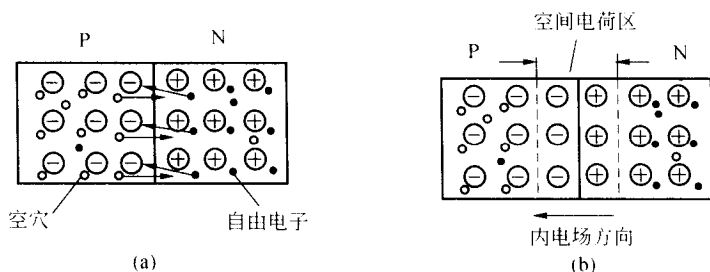


图 1-1-6 PN 结的形成

2. PN 结的单向导电性

没有外界电场作用时,PN 结处于动态平衡状态,载流子的扩散与漂移相当于宏观上无净电流流过。

如果给 PN 结外加正向电压,即外加电压正端接 P 区,负端接 N 区,这时外加电场方向与内电场方向相反,内电场受到削弱。如图 1-1-7 所示,由于外加电压的正端接 P 区,将驱使 P 区的空穴进入空间电荷区,抵消部分负空间电荷区。同时,这种现象也发生在 N 区,N 区的自由电子受外加电压负端的驱使进入空间电荷区,也抵消了部分正空间电荷区,使整个空间电荷区变窄,多数载流子易于通过,形成了较大的扩散电流。由于外加电源不断地向 PN 结提供电荷,扩散电流(又称正向电流)得以继续,因而产生导电现象。这时 PN 结处于低阻状态,又称导通状态。

如果 PN 结外加反向电压,即外加电压正端接 N 区,负端接 P 区,这时外加电场方向与内电场方向相同,内电场得到增强。如图 1-1-8 所示,这时外加电压对空间电荷区两侧,即 N 区的自由电子和 P 区的空穴均有吸引力,自由电子和空穴的移走使整个空间电荷区加宽,多数载流子更难通过,因而不能导电。另一方面,内电场的增强加强

了少数载流子的漂移运动, N区的空穴和P区的自由电子越过PN结, 在电路中形成漂移电流(又称反向电流)。由于少数载流子的数量很少, 因而反向电流不大, 此时PN结呈现高阻状态, 又称截止状态。少数载流子的多少影响着反向电流的大小, 而温度又影响着少数载流子的多少, 因而温度越高, 反向电流越大。

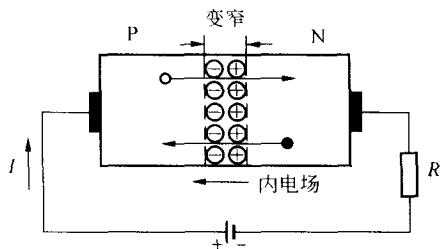


图 1-1-7 PN 结外加正向电压

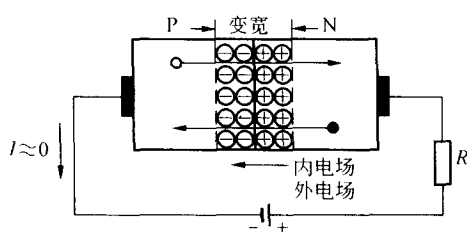


图 1-1-8 PN 结外加反向电压

可见, PN结外加正向电压时PN结导通, 电流从P→N; 外加反向电压时PN结截止。这种只有一种方向导电的现象称为PN结的单向导电性。

1.1.2 半导体二极管的基本结构

将PN结封装并接出两个引出端, 就是一个半导体二极管。从P区引出的端称为阳极(正极), 从N区引出的端称为阴极(负极), 电路符号如图1-1-9所示。符号中的箭头方向是二极管导通时电流的流动方向。根据PN结的单向导电性, 二极管只有当阳极电位高于阴极电位时, 才能按电气图形符号中的箭头方向导电。为防止使用时极性接错, 管壳上标有电路符号或色点, 有色点端为正极。如果二极管极性接错, 不仅造成电路无法正常工作, 还会烧坏二极管及电路中其他元件。常常把PN结在锗半导体上形成的二极管称锗二极管, 统称锗管; 在硅半导体上形成的二极管称硅二极管, 统称硅管。

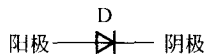


图 1-1-9 半导体二极管电气图形符号

按结构的不同, 半导体二极管分为点接触型和面接触型两类, 如图1-1-10所示。点接触型多为锗管, 其PN结面积小, 不能通过大电流, 但高频性能好; 面接触型多为硅管, 其PN结面积大, 能通过大电流, 一般用作整流。

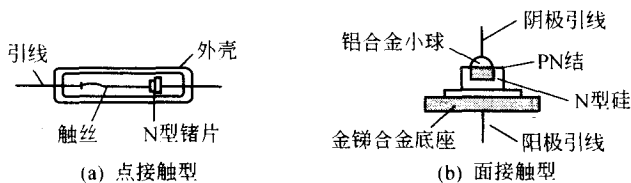


图 1-1-10 二极管结构

1.1.3 半导体二极管的伏安特性及主要参数

1.1.3.1 半导体二极管的伏安特性曲线

半导体二极管的伏安特性曲线如图 1-1-11 所示。其主要特点有：

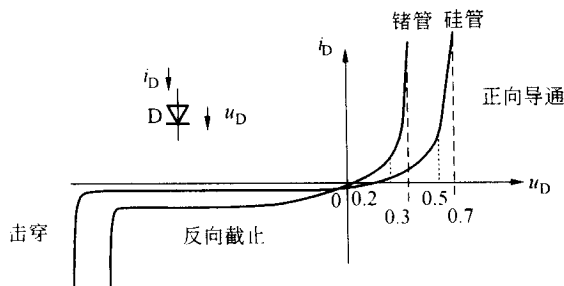


图 1-1-11 半导体二极管的伏安特性

1. 正向特性

外加正向电压时,在正向特性的起始部分正向电压很小,不足以克服 PN 结内电场的阻挡作用,正向电流几乎为零,这一段称为“死区”。这个不能使二极管导通的正向电压称为死区电压。锗管的死区电压约为 0.2V,硅管约为 0.5V。当正向电压大于死区电压时,PN 结内电场被克服,二极管导通,电流随电压增大而迅速上升。在正常使用的电流范围内,导通时二极管的端电压几乎维持不变,这个电压称为二极管的正向电压。锗管的正向电压约为 0.3V,硅管约为 0.7V。

2. 反向特性

外加反向电压不超过一定范围时,通过二极管的电流是少数载流子漂移运动所形成的反向电流。由于反向电流很小,二极管处于截止状态。这个反向电流又称为反向饱和电流或漏电流,由上面介绍可知,该电流受温度影响很大。

3. 击穿特性

外加反向电压超过某一数值时,反向电流会突然增大,这种现象称为电击穿。引起电击穿的临界点电压称为反向击穿电压。电击穿时,二极管失去单向导电性。如果二极管没有因电击穿而引起过热,则单向导电性不一定会被永久破坏,在撤除外加电压后,其性能仍可恢复。但如果电击穿后,由于电流过大引起热击穿,原来的性能便不能再恢复,二极管就损坏了。因而,使用时应避免二极管外加的反向电压过高。

1.1.3.2 二极管的电路模型

从二极管的特性可以看出,二极管是一个非线性器件,为了分析方便,常将二极管伏安特性逐段线性化(近似),得到表达二极管主要特性的电路模型。

1. 理想二极管电路模型

把二极管看成是一个由其端电压 u_D 控制的自动开关,并忽略二极管的死区电压、正向电压、反向电流等,把它们零值处理。即当 $u_D \geq 0$ 时,二极管导通,相当于开关闭合,并且开关电压为零;当 $u_D < 0$ 时,二极管截止,相当于开关断开,并且漏电流为零。理想二极管伏安特性及电路模型见图 1-1-12a。

2. 考虑正向电压的二极管电路模型

仍把二极管看成是一个由其端电压 u_D 控制的自动开关,但不忽略其死区电压和正向电压,并把死区电压看成等于正向电压 U_D ,仍忽略反向电流,把它看成零值。这时,二极管的电路模型相当于一个理想开关串上一个电压源 U_D 。即当 $u_D \geq U_D$ 时,二极管导通,相当于开关闭合,二极管的端电压恒等于正向电压 U_D ;当 $u_D < U_D$ 时,二极管截止,相当于开关断开。其伏安特性及电路模型见图 1-1-12b。

3. 考虑正向伏安特性曲线斜率的电路模型

以动态电阻 $r_D = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D}$ 表示曲线的斜率(r_D 的值随二极管工作点 Q 的变化而变化),其伏安特性及电路模型见图 1-1-12c。

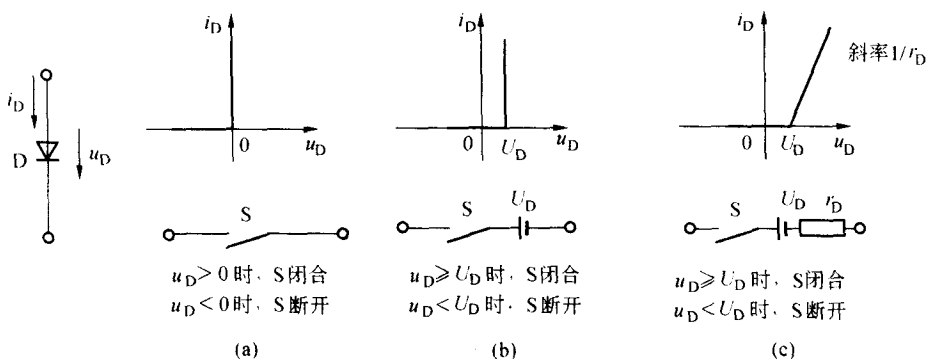


图 1-1-12 二极管逐段线性特性及电路模型

本章的讨论中,无特别说明时对二极管的分析均采用其理想电路模型,即把二极管看成理想二极管来处理。

下面用理想模型分析二极管应用实例。

4. 限幅电路

限幅电路用来限制输出电压幅度。图 1-1-13a 是限幅电路的一种。输入电压是一正弦电压 $u_i = 8\sin\omega t$ V, 电池电压 $E = 4$ V。当输入电压小于电池电压时,二极管加反向电压(称为反向偏置),二极管截止,没有电流流过,输出电压跟随输入电压变化。

输入电压大于电池电压时,二极管加正向电压(称为正向偏置),二极管导通,其两端电压为 0,所以输出电压与电池电压相同,为 4 V(如果考虑二极管正向电压,则此时

输出电压应为 4.7V)。

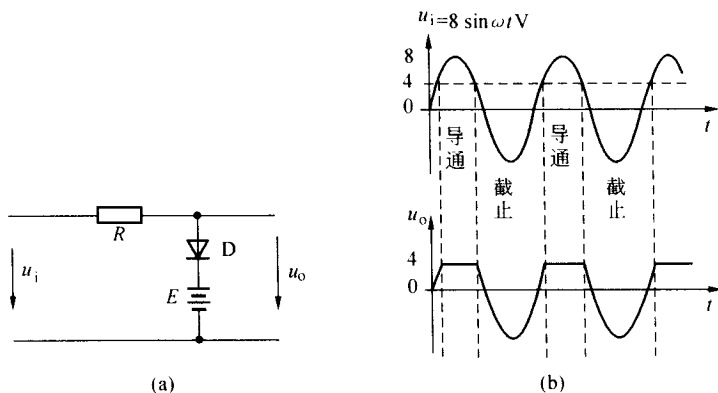


图 1-1-13 限幅电路及其输出波形

5. 或门电路

或门电路是数字逻辑门电路的一种,实现逻辑“或”功能。用二极管组成的或门电路见图 1-1-14。我们用列表的方法来分析输入信号 V_A 、 V_B 和输出信号 V_F 的关系,见表 1-1-1。电路中二极管 D_1 、 D_2 的阴极是接在一起的,叫共阴极接法。在这种接法中,阳极电位最高的二极管优先导通,因为其所受的正向电压最大。它导通后其阴极电位即等于其阳极电位(理想电路模型),因为是共阴极接法,其余各管的阴极电位均被钳制为该导通管的阳极电位。

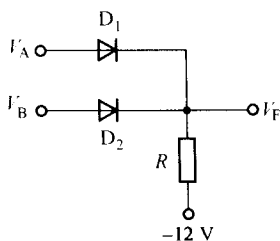


图 1-1-14 或门电路

表 1-1-1 输入信号与输出信号的关系

V_A/V	V_B/V	D_1	D_2	V_F/V
0	0	导通	导通	0
3	0	导通	截止	3
0	3	截止	导通	3
3	3	导通	导通	3

同理,二极管的阳极接在一起的接法叫共阳极接法,此时阴极电位最低的二极管优先导通,导通后其余各管的阳极电位均被强制为导通管的阴极电位。在图 1-1-14 电路中,如果定义 3V 电平为逻辑“1”,0V 电平为逻辑“0”,则该电路实现逻辑“或”的功能: $F = A + B$ 。

1.1.3.3 半导体二极管的主要参数

为了正确、安全使用二极管,我们必须知道二极管的技术参数。描述二极管工作的