

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

电子技术

(电工学 II)

清华大学电工学教研室编

刘全忠 主编



清华大学出版社
TSINGHUA UNIVERSITY PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

ND40/19

电子技术

(电工学 II)

天津大学电工学教研室编

刘全忠 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

(京)112号

内容简介

本书是在高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革研究的基础上编写的,是面向 21 世纪课程教材和教育部电工电子学科“九五”规划教材。本书是一本突出集成电路、突出应用、突出新科技的全新教材。全书分模拟电子技术和数字电子技术两大部分,包括半导体器件、基本放大电路、负反馈放大器、集成运算放大器的应用、电力电子技术、逻辑门电路和组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、模拟量与数字量的转换、存储器,共 10 章。本书内容简明,概念清楚,文图并茂,例题、习题丰富,各章节均有概述、思考题和小结,书后有附录和习题答案。

本书可作为高等学校工科非电类各专业本科生、大专生的教材或参考书,也可供工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术:电工学 II /刘全忠主编. —北京:高等教育出版社,1999.9

ISBN 7-04-007684-5

I. 电… II. 刘… III. ①电工学②电子技术 IV. TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 30616 号

电子技术(电工学 II)

天津大学电工学教研室 编

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 中国科学院印刷厂

纸张供应 山东高唐纸业集团总公司

开 本 787×960 1/16

版 次 1999 年 9 月第 1 版

印 张 21

印 次 1999 年 9 月第 1 次印刷

字 数 380 000

定 价 22.10 元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

本教材是天津大学电工学教研室在近几年开展的高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革研究的基础上,以教育部(原国家教委)1995 年颁发的《高等学校工科本科电子技术(电工学 II)课程教学基本要求》为依据编写的,参考学时为 55~70 学时。

本教材的内容除覆盖全部教学基本要求外,还充分考虑培养面向 21 世纪人才所必须具备的基础扎实、知识面宽、能力强和素质高的特点。为此,我们注意下列几点:

1. 重点保证“三基”即基本理论、基本知识和基本技能方面的内容,从分立元件入手,建立概念,而重点放在集成电路。加强分析方法(如模拟电路的动态分析、反馈分析、数字电路逻辑功能的分析等)和集成电路芯片的使用(如集成运放、各种组合逻辑部件和时序逻辑部件等),注重“三基”的培养和训练。

2. 尽可能反映现代电子技术的新成果、新技术,本教材增加“电力电子技术”一章,系统介绍整流(AC-DC 转换)、稳压(DC-DC 转换)和逆变(DC-AC 转换)电路。在“时序逻辑电路”一章增加了可编程逻辑器件(PLD)。在“存储器”一章中增加了磁盘存储器和光盘存储器等内容,使教材的内容尽可能跟上时代发展的步伐。

3. 突出电子技术的应用知识,主要体现在三个方面:(1)从应用角度出发,重点介绍各种常用集成电路芯片的功能和使用方法;(2)与计算机应用相适应,加强接口电路的内容,如电压比较器,数/模、模/数转换器等;(3)联系实际,加强综合训练,引入必要的应用实例,如混合冗余系统、转速测量、计时显示、波形发生器以及温度控制和多点数据采集系统等。

4. 便于教与学,主要体现在三个方面:(1)配有多种类型的例题、思考题和习题,例题一般是用来巩固基本知识和联系实际,扩展基本内容,多数不必讲述,学生可自学理解。思考题是供学生学完本节内容后复习和加深理解而用。各章的习题大致可分为三种类型:一是在“基本要求”范围内的习题,用于加强概念,理解、掌握“基本要求”的内容;二是较难题,用于加深理解,起到举一反三之功用;三是接近实际的应用题,用于开拓学生视野,掌握实际应用知识。为便于教与学,大部分习题都配有答案。(2)每章配有概述和小结,便于学生加强理解和熟练掌握本章的主要内容和重要概念。(3)全书最后编有附录、汉英名词对照及部分习题答案,便于读者查阅。

由于有上述特点,本教材具有足够大的信息量,我们希望能 为教师提供丰富的教学内容和各类不同学时对内容取舍的选择余地,也有利于开拓学生眼界和思路,便于学生自学。

本教材与姚海彬教授主编的《电工技术》(电工学 I)均由天津大学电 工学教研室编写,作为电工学的一套教材,在章节安排和内容取舍上都作了仔细的协调。本教材由刘全忠主编,刘文豪副主编,参加编写的有贾贵玺(1、5 章),刘文豪(2、3、4 章),刘曼华(6、8 章),刘全忠(7、9、10 章),徐芳兰(附录),刘全忠对全书作了仔细的修改,并最后定稿。

本教材由清华大学电机系王鸿明教授、北京理工大学刘蕴陶教授主审,两位教授对书稿进行了详细的审阅,并提出许多宝贵的意见和修改的建议。在此,谨向他们致以衷心的感谢,我们根据提出的意见和建议进行了认真的修改。高等教育出版社电工电子室的同志们对本书的编写给予了极大的支持和关心,在此对他们表示衷心的感谢。本教材在编写过程中,参考了许多现有的电工学教材,我们对这些教材的所有作者表示衷心的感谢。

本教材在编写和试用过程中,得到天津大学电工学教研室全体教师的关心和帮助,全体教师认真试用,提出许多中肯的修改建议,在此向教研室全体教师表示衷心的感谢。

由于我们水平和认识上的局限,书中必定存在不少问题或错误,我们期盼使用本书的教师和读者提出宝贵意见,指正不当或错误之处,为提高电工学教材的质量共同努力。

编 者

1999 年 6 月于天津大学

主要符号

A_c	共模电压放大倍数	I_e	发射极电流的有效值
A_d	差模电压放大倍数	I_f	反馈电流
A_u	电压放大倍数	I_g	栅极电流
A_f	有反馈的闭环放大倍数	I_o	交流输出电流有效值, 整流电流
A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数	i	电流的瞬时值
A_{um}	通频带增益	i_B	基极瞬时电流总值
A_{us}	考虑信号源内阻时的电压放大倍数 (源电压放大倍数)	i_b	基极交流电流值
BW	通频带宽	i_C	集电极瞬时电流总值
C	电容	i_D	漏极瞬时电流总值, 二极管瞬时电流值
C_E	射极旁路电容	i_d	漏极交流电流值
C_s	源极旁路电容	i_o	输出电流瞬时值
F	反馈系数	K_{CMR}	共模抑制比
f	频率	N_o	扇出系数
f_c	截止频率	P	功率, 平均功率
g_m	跨导	P_{CM}	集电极最大允许耗散功率
I	电流的通用符号, 恒定电流, 交流电流有效值	P_{DM}	漏极最大耗散功率
I	正弦交流电流的相量符号	P_Z	额定功率
I_B	基极直流电流	R	电阻
I_b	基极电流有效值	R_B	基极电阻
ΔI_B	基极直流变化量	R_C	集电极电阻
I_{BS}	临界饱和基极电流	R_D	漏极电阻
I_C	集电极直流电流	R_E	发射极电阻
I_{CEO}	集电极-发射极的穿透电流	R_F	反馈电阻
I_{CBO}	集电极-基极间反向饱和电流	R_G	栅极电阻
I_{CM}	集电极最大允许电流	R_L	负载电阻
I_{CS}	临界饱和集电极电流	R_P	可调电阻
ΔI_C	集电极直流变化量	R_S	源极电阻, 信号源内阻
I_D	漏极直流电流, 二极管直流电流	R_t	热电阻
I_E	发射极直流电流	r	转移电阻, 动态电阻
		r_{be}	共发射极接法下基-射极间微变电阻
		r_i	输入电阻

r_o 输出电阻	U_{OPP} 交流放大器输出电压峰-峰值
r_z 稳压管动态电阻	U_R 基准电压
S 反馈深度	U_S 直流电压源电压, 交流电压源电压有效值
T 周期	U_T 阈值电压
t 时间, 温度	U_Z 稳压管稳定电压
t_{pd} 平均传输延迟时间	u 电压通用符号, 交流电压瞬时值
t_w 脉冲宽度	u_{BE} 基极-发射极瞬时总电压
U 电压通用符号, 恒定电压、交流电压有效值	u_{be} 基极-发射极瞬时电压交流分量
\dot{U} 交流电压的复数符号	u_{CE} 集电极-发射极瞬时总电压
U_{BE} 基极-发射极直流电压	u_{ce} 集电极-发射极瞬时电压交流分量
U_{CE} 集电极-发射极直流电压	u_f 反馈电压
U_D 二极管的正向导通电压	u_i 输入电压瞬时值
U_{DS} 漏极-源极电压	u_o 输出电压瞬时值
U_{DRM} 二极管的最大反向电压	u_s 交流电压源电压瞬时值
U_{GS} 栅极-源极电压	V 电位
$U_{GS(off)}$ 夹断电压	V_{CC} 集电极回路电源对地电位
$U_{GS(th)}$ 开启电压	V_{DD} 漏极回路电源对地电位
U_i 输入电压有效值	V_+ 运放同相输入端电位
U_{ic} 共模输入电压	V_- 运放反相输入端电位
U_{id} 差模输入电压	β 电流放大系数
U_o 输出电压有效值	δ 占空比
U_{OH} TTL 门输出高电平电压	ω 角频率
U_{OL} TTL 门输出低电平电压	ω_c 截止角频率
U_{ON} 开门电平	ω_H 上限角频率
U_{OFF} 关门电平	ω_L 下限角频率

参考书目

1. 秦曾煌主编. 电子技术(电工学下册). 第四版. 北京:高等教育出版社,1993
2. 王鸿明. 电工技术与电子技术下册. 第一版. 北京:清华大学出版社,1995
3. 杨福生主编. 电子技术(电工学Ⅱ). 第一版. 北京:高等教育出版社,1989
4. 吕砚山主编. 常用电工电子技术手册. 第一版. 北京:化学工业出版社,1995
5. 李守成. 电子技术. 第一版. 北京:高等教育出版社,1992
6. 唐泽荷等. 数字逻辑电路基础. 第一版. 西安:西安交通大学出版社,1994
7. 赵良炳. 现代电力电子技术基础. 第一版. 北京:清华大学出版社,1995
8. 郁汉琪主编. 数字电子技术实验及课题设计. 第一版. 北京:高等教育出版社,1995
9. 杨兆选等. 555 定时器原理及实用电路集锦. 第一版. 天津:天津大学出版社,1989

责任编辑	金春英
封面设计	张楠
责任绘图	李维平
版式设计	周顺银
责任校对	胡晓琪
责任印制	宋克学

目 录

主要符号	1
第 1 章 半导体器件	1
§ 1.1 半导体的基本知识与 PN 结	1
§ 1.2 半导体二极管	3
§ 1.3 稳压管	7
§ 1.4 晶体三极管	9
§ 1.5 场效应晶体管	17
§ 1.6 光电器件	21
本章小结	23
习题	25
第 2 章 基本放大电路	28
§ 2.1 放大器概述	28
§ 2.2 晶体管放大电路	30
§ 2.3 工作点稳定的放大电路	38
§ 2.4 射极跟随器	40
§ 2.5 场效应晶体管放大电路	43
§ 2.6 多级放大电路	45
§ 2.7 差分放大器	48
§ 2.8 功率放大器	53
§ 2.9 集成运算放大器	56
本章小结	59
习题	60
第 3 章 负反馈放大器	64
§ 3.1 反馈的基本概念	64
§ 3.2 负反馈对放大器性能的影响	70
§ 3.3 负反馈放大器的分析	73
本章小结	76
习题	76
第 4 章 集成运算放大器的应用	79
§ 4.1 模拟运算电路	79
§ 4.2 测量放大器	86
§ 4.3 信号处理电路	88

§ 4.4 正弦波振荡器	96
本章小结	98
习题	99
第 5 章 电力电子技术	106
§ 5.1 电力电子器件	106
§ 5.2 整流电路(AC—DC)	111
§ 5.3 直流稳压电路(DC—DC)	122
§ 5.4 逆变电路(DC—AC)	130
本章小结	132
习题	133
第 6 章 逻辑门电路和组合逻辑电路	135
§ 6.1 基本逻辑关系和逻辑门电路	136
§ 6.2 集成门电路	141
§ 6.3 逻辑函数的表示和化简	150
§ 6.4 组合逻辑电路的分析和设计	157
§ 6.5 组合逻辑部件	162
本章小结	179
习题	180
第 7 章 时序逻辑电路	194
§ 7.1 双稳态触发器	194
§ 7.2 寄存器	206
§ 7.3 计数器	215
§ 7.4 可编程逻辑器件	235
本章小结	243
习题	244
第 8 章 脉冲波形的产生和整形	251
§ 8.1 无稳态触发器(多谐振荡器)	251
§ 8.2 单稳态触发器	255
§ 8.3 集成定时器 555 的原理和应用	258
本章小结	266
习题	267
第 9 章 模拟量与数字量的转换	272
§ 9.1 数/模转换器	272
§ 9.2 模/数转换器	277
§ 9.3 数据采集系统	281
本章小结	285
习题	285
第 10 章 存储器	287

§ 10.1 半导体存储器	287
§ 10.2 磁盘存储器	292
§ 10.3 光盘存储器	295
本章小结	296
习题	297
附录	298
附录 1 半导体器件型号命名方法	298
附录 2 国产半导体集成电路型号命名方法	300
附录 3 国标、部标和国外逻辑门符号对照表	304
附录 4 触发器新、旧符号对照表	305
部分习题答案	306
汉英名词对照	314
参考书目	322

第1章 半导体器件

半导体器件是用半导体材料制成的电子器件,常用的有二极管、三极管、场效应晶体管等,半导体器件是构成各种电子电路最基本的元器件。随着电子技术的飞速发展,各种新型半导体器件层出不穷。学习电子技术首先要了解和掌握各种半导体器件的结构、工作原理、特性和参数,为以后学习各种电子电路奠定基础。

§ 1.1 半导体的基本知识与PN结

一、半导体材料的导电性能

半导体的导电能力介于导体和绝缘体之间,主要有硅、锗、硒、砷化镓和一些氧化物、硫化物等。

常用的半导体材料是硅和锗,它们都是四价元素。纯净的半导体具有晶体结构,所以半导体又称为晶体。在这种晶体结构中,原子与原子之间构成所谓共价键结构。纯净半导体材料在热力学温度为零度的情况下,电子被共价键束缚得很紧,故没有导电能力。当温度升高时,由于热激发,一些电子获得一定能量后会挣脱束缚成为自由电子,使半导体材料具有了一定的导电能力,同时,在这些自由电子原有的位置上会留下相对应的空位置,称为“空穴”,空穴因失掉一个电子而带正电。由于正负电的相互吸引,空穴附近的电子会填补这个空位置,于是又会产生新的空穴,又会有相邻的电子来递补……,如此进行下去就形成所谓空穴运动。由热激发产生的自由电子和空穴是成对出现的。

自由电子和空穴都称为载流子。

因此,半导体材料在外加电压作用下出现的电流是由自由电子和空穴两种载流子的运动形成的。这是半导体导电与金属导体导电机理上的本质区别。

半导体材料的导电能力在不同的条件下差异很大,主要体现在:

(1) 热敏性

环境温度对半导体的导电能力影响很大。对纯净半导体来说,温度越高,产生的自由电子和空穴对就越多,导电能力就越强。基于半导体材料的这种热敏特性,可制成各种温度敏感元件,如热敏电阻等。

(2) 光敏性

一些半导体材料受到光照时,载流子数量会剧增,导电能力随之增强,这就是半导体的光敏特性。利用这种特性可以制成各种光敏器件,如光敏电阻、光敏二极管、光敏三极管、光控晶闸管和光电池等。

(3) 掺入微量杂质对半导体导电性能的影响

纯净半导体中的自由电子和空穴总是成对出现的,在常温下其数量有限,导电能力并不很强,如果在纯净半导体中掺入某些微量杂质,其导电能力将大大增加。

如在纯净半导体硅或锗中掺入硼、铝等三价元素,由于这类元素的原子最外层只有三个价电子,故在构成的共价键结构中由于缺少价电子而形成大量空穴,这类掺杂后的半导体其导电作用主要靠空穴运动,称为空穴半导体或 P 型半导体,其中空穴为多数载流子,而热激发形成的自由电子是少数载流子。

如在纯净半导体硅或锗中掺入磷、砷等五价元素,由于这类元素的原子最外层有五个价电子,故在构成的共价键结构中由于存在多余的价电子而产生大量自由电子,这种半导体主要靠自由电子导电,称为电子半导体或 N 型半导体,其中自由电子为多数载流子,热激发形成的空穴为少数载流子。

应该指出,无论是 P 型半导体还是 N 型半导体都是中性的,对外不显电性。

一些半导体材料还具有如压敏、磁敏、气敏等特性,利用半导体的各种特性可以制造出种类繁多的半导体器件,这些半导体器件被广泛应用在各种信号的检测、转换和自动控制系统中。

二、PN 结及其单向导电性

采用适当工艺把 P 型半导体和 N 型半导体做在同一基片上,使得 P 型半导体与 N 型半导体之间形成一个交界面,由于两种半导体中载流子种类和浓度的差异,将产生载流子的相对扩散运动,多数载流子在交界面处被中和而形成空间电荷区,这就是 PN 结。空间电荷区在 N 区一侧是正电荷区,在 P 区一侧是负电荷区,因此在 PN 结内存在一个内电场,其方向是从带正电的 N 区指向带负电的 P 区,如图 1.1.1 所示。内电场对多数载流子的进一步扩散起阻挡作用,但对少数载流子的漂移起到推动作用,在一定的条件下,漂移和扩散运动达到动态平衡,PN 结处于相对稳定的状态。

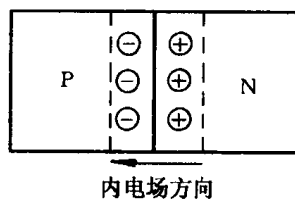


图 1.1.1

如果给 PN 结施加正向电压,如图 1.1.2(a)所示,外电场与内电场的方向相反,当外电场大于内电场时,内电场的作用被抵消,PN 结变薄,多数载流子的扩散运动增加,形成正向电流,外加电场越强,正向电流就越大,这意味着 PN 结的正向电阻变小。

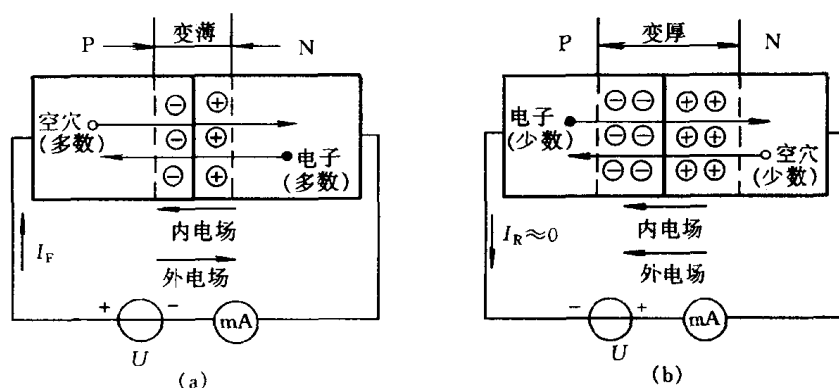


图 1.1.2

如果给 PN 结施加反向电压,如图 1.1.2(b)所示,则外电场与内电场的方向一致,使内电场的作用增强,PN 结变厚,多数载流子的扩散运动难于进行。但内电场的增强有助于少数载流子的漂移运动,形成反向电流 I_R ,由于常温下少数载流子数量很少,因此一般情况下反向电流很小,即 PN 结的反向电阻很大。

综上所述,PN 结具有单向导电性,即 PN 结加正向电压时,正向电阻很小,PN 结导通,可以形成较大正向电流;而 PN 结加反向电压时,反向电阻很大,PN 结截止,所以反向电流基本为零。二极管、三极管等半导体器件的工作特性都是以 PN 结的单向导电性为基础的。

〔思考题〕

1. 什么是 P 型半导体? 什么是 N 型半导体?
2. 什么是 PN 结? 其主要特性是什么?

§ 1.2 半导体二极管

一、基本结构

在 PN 结两端各接上一条引出线,再封装在管壳里就构成半导体二极管,也称晶体二极管。P 型材料一端称为阳极,N 型材料一端称为阴极,二极管的符号如图 1.2.1 所示。

二极管按其结构不同可分为点接触型和面接触型两类。点接触型二极管的特点是 PN 结的结面积较小,因而结电容很小,适用于小电流高频电路工作,也可用于数字电路中作开关元件。面接触型二极管的特点是结面积较大,允许通过较大电流,但结

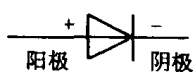


图 1.2.1

电容较大,工作频率较低,适用于整流电路。

二、伏安特性

既然二极管内部是一个PN结,因此它一定具有单向导电性,实际的二极管伏安特性如图1.2.2所示。

1. 正向特性

当二极管承受的正向电压(又称正向偏置)很低时,还不足以克服PN结内电场对多数载流子运动的阻挡作用,故这一区段二极管的正向电流 I_F 非常小,称为死区。通常,硅二极管的死区电压约为0.5V,锗二极管的死区电压约为0.2V。

当二极管的正向电压超过死区电压后,PN结内电场被抵消,正向电流明显增加,并且随着正向电压增大,电流迅速增长,二极管的正向电阻变得很小,当二极管充分导通后,二极管的正向压降基本维持不变,称为正向导通压降 U_F ,普通硅二极管的 U_F 约为

0.7V,锗二极管的 U_F 约为0.3V。这一区段,称为正向导通区。

2. 反向特性

二极管承受反向电压(又称反向偏置)时,由于只有少数载流子的漂移运动,因此,形成的反向漏电流 I_R 极小。正常情况下,硅二极管的 I_R 一般在几微安以下,锗二极管的 I_R 较大,一般在几十至几百微安。这一区段称为反向截止区。

当反向电压增加到某一数值时,在强大的外电场力作用下,获得足够能量的载流子高速运动将其他被束缚的电子撞击出来,这种撞击的连锁反应,使二极管中的电子与空穴数急剧上升,造成反向电流的突然增大,这种现象称为反向击穿,击穿时对应的电压称为反向击穿电压。这一区段称为反向击穿区。由于二极管发生反向击穿时,反向电流会急剧增大,如不加以限制,将造成二极管永久性损坏,失去单向导电性。

三、主要参数

在使用各种半导体器件时,要根据它们的实际工作条件确定它们的参数,然后从相应的半导体器件手册中查找出适合的半导体器件型号。

晶体二极管的主要参数有:

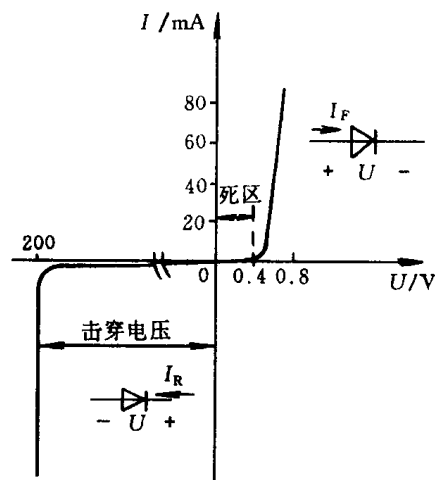


图 1.2.2

(1) 最大正向电流 I_{FM}

最大正向电流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,管子通过的电流不应超过这个数值,否则将导致管子过热而损坏。

(2) 最高反向工作电压 U_{DRM}

U_{DRM} 是指二极管不被击穿所容许的最高反向电压。为安全起见,一般 U_{DRM} 为反向击穿电压的 $1/2 \sim 2/3$ 。

(3) 最大反向电流 I_{RM}

I_{RM} 指二极管在常温下承受最高反向工作电压 U_{DRM} 时的反向漏电流,一般很小,但其受温度影响较大。当温度升高时, I_{RM} 显著增大。

四、二极管的应用

二极管的应用范围很广,利用它的单向导电性,可组成整流、检波、限幅、钳位等电路。还可用它构成其他元件或电路的保护电路,以及在脉冲与数字电路中作为开关元件等。在作电路分析时,一般可将二极管视为理想元件,即认为其正向电阻为零,正向导通时为短路特性,正向压降忽略不计。反向电阻为无穷大,反向截止时为开路特性,反向漏电流忽略不计。

[例 1.2.1] 图 1.2.3(a)为一正负对称限幅电路,已知 $u_i = 10\sin\omega t$ V, $U_{S1} = U_{S2} = 5$ V,试画出输出电压 u_o 的波形。

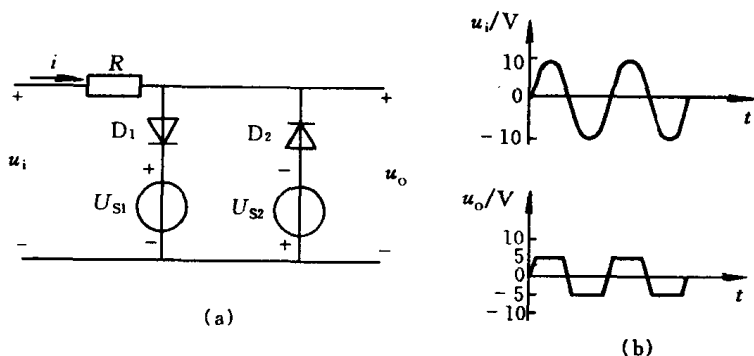


图 1.2.3

解:在 $-U_{S2} < u_i < U_{S1}$ 期间, D_1 、 D_2 都处于反向偏置而截止,因此 $i = 0$, $u_o = u_i$ 。当 $u_i > U_{S1}$ 时, D_1 处于正向偏置而导通,使输出电压保持(限制)在 U_{S1} 。当 $u_i < -U_{S2}$ 时, D_2 处于正向偏置而导通,输出电压保持在 $-U_{S2}$ 。由于输出电压 u_o 被限制在 $+U_{S1}$ 与 $-U_{S2}$ 之间,即 $|u_o| \leq 5$ V,好像将输入信号的高峰和低谷部分削掉一样,因此这种电路又称为削波电路。输出电压 u_o 的波形如图 1.2.3(b)所示。