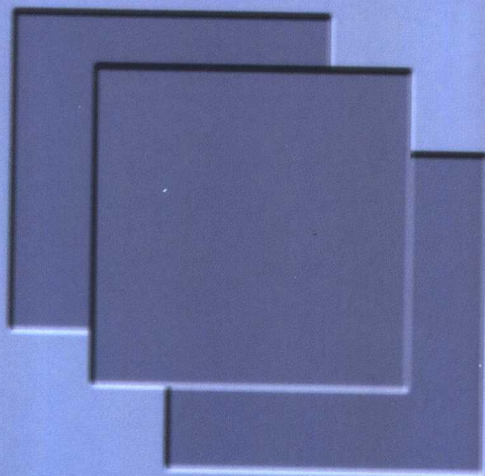




全国高职高专电气类精品规划教材

模拟电子技术

主编 伍学珍 刘光明



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

全国高职高专电气类精品规划教材

模拟电子技术

主 编 伍学珍 刘光明
副主编 吴正茂 马文华
主 审 赵演泽



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本教材是根据高职高专电子技术基础课程教学大纲的要求,以及2003年12月全国高职高专电气类精品规划教材编审会会议精神编写的。

本教材每一章采用管(块、念)一路一用的架构。管即是半导体器件,包括块(集成块)和念(基本概念)两部分,概念的阐述注重简明扼要;路就是基本原理电路,重点说明、图文并茂,原理的分析以定性为主、定量为辅;用即是应用,要求应用方面关注实用,提高技能。

本教材共10章,内容包括:半导体二极管及其应用电路;半导体三极管及其放大电路;集成运算放大器;负反馈放大电路;集成运算放大器的应用;功率放大电路;信号产生电路;直流电源电路;晶闸管及其应用;场效应管及其基本放大电路。各章均配有练习题,仿真实验电路、简单的实用电路,供读者练习、仿真及制作。

本教材适用于普通高职、普通高校的大专班,职工大学电气、电子类专业的模拟电子技术基础课程教材,也可供中等专业学校、普通高校本科与电气相关专业的师生及从事电子技术的工程人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

模拟电子技术/伍学珍,刘光明主编. —北京:中国
水利水电出版社,2004.8
全国高职高专电气类精品规划教材
ISBN 7-5084-2242-2

I. 模... II. ①伍... ②刘... III. 模拟电路—电子
技术—高等学校:技术学校—教材 IV. TN710

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第068682号

书 名	全国高职高专电气类精品规划教材 模拟电子技术
作 者	主编 伍学珍 刘光明
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×960mm 16开本 15.25印张 298千字
版 次	2004年8月第1版 2004年8月第1次印刷
印 数	0001—5100册
定 价	23.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

序

教育部在《2003-2007 年教育振兴行动计划》中提出要实施“职业教育与创新工程”，大力发展职业教育，大量培养高素质的技能型特别是高技能人才，并强调要以就业为导向，转变办学模式，大力推动职业教育。因此，高职高专教育的人才培养模式应体现以培养技术应用能力为主线和全面推进素质教育的要求。教材是体现教学内容和教学方法的知识载体，进行教学活动的基本工具；是深化教育教学改革，保障和提高教学质量的重要支柱和基础。因此，教材建设是高职高专教育的一项基础性工程，必须适应高职高专教育改革与发展的需要。

为贯彻这一思想，2003 年 12 月，在福建厦门，中国水利水电出版社组织全国 14 家高职高专学校共同研讨高职高专教学的目前状况、特色及发展趋势，并决定编写一批符合当前高职高专教学特色的教材，于是就有了《全国高职高专电气类精品规划教材》。

《全国高职高专电气类精品规划教材》是为适应高职高专教育改革与发展的需要，以培养技术应用为主线的技能型特别是高技能人才的系列教材。为了确保教材的编写质量，参与编写人员都是经过院校推荐、编委会答辩并聘任的，有着丰富的教学和实践经验，其中主编都有编写教材的经历。教材较好地反映了当前电气技术的先进水平和最新岗位要求，体现了培养学生的技术应用能力和推进素质教育的要求，具有创新特色。同时，结合教育部两年制高职教育的试点推行，编委会也对各门教材提出了

满足这一发展需要的内容编写要求，可以说，这套教材既能适应三年制高职高专教育的要求，也适应两年制高职高专教育的要求。

《全国高职高专电气类精品规划教材》的出版，是对高职高专教材建设的一次有益探讨，因为时间仓促，教材可能存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

《全国高职高专电气类精品规划教材》编委会

2004年8月

前

言

《模拟电子技术》是全国高职高专电气类精品规划教材之一，是根据教育部关于高职高专课程内容体系改革的原则，本着基础理论以应用必须、够用为度，突出应用性和实践能力的精神编写的。

本教材是一门电气类的专业基础课程，它主要是为后续专业课程提供必须的基础知识。而课程中的许多理论和知识又可以直接运用到生产实践中，使本课程又具有实用性。

本教材每一章采用管（块、念）一路—用结构。管即是半导体器件、块就是集成块、念就是基本的概念；路就是基本原理电路；用即是应用。整个结构的概念阐述注重简明扼要，图文并茂；原理分析以定性为主、定量为辅。应用方面关注实用，提高技能。

为了尽可能地体现出高职高专为培养基层应用型人才的服务理念，本教材着重注意对学生的技能训练和培养，在每章后都附有一节实训与应用内容，这是本教材的特点。每一章的计算机仿真实验，帮助学生验证所学的基本理论知识；精选的电路小制作，为学生提供实习的内容，丰富课余科技活动；每一章的小知识、小资料、小经验以及与教学内容相关的应用电路，给学生打开一个电子技术应用的小窗口。

本教材共分10章，第1、2、10章由广西水利电力职业技术学院伍学珍老师编写；第3、6、8章由长江工程职业技术学院吴正茂老师编写；第4、9章由南昌工程学院刘光明老师编写，第5、7章由河北工程技术高等专科学校马文华老师编写；广西水利电力职业技术学院赵演泽老师审阅了全部稿件并提出了宝贵的修改意见。

由于时间和编者水平所限，本教材难免存在问题和遗憾之处，望广大读者批评指正。

编 者

2004年8月

常用符号说明

一、基本符号

I, i	电流
C	电容
U, u	电压
M	互感
P	功率
Z	阻抗
W	能量
X	电抗
R, r	电阻
Y	导纳
G, g	电导
A	放大倍数
L	电感
$\dot{U}, \dot{I}$	正弦电压, 正弦电流相量 (复数量)
U, I	正弦电压, 正弦电流有效值
U_q, I_q	电压电流的直流幅值
U_f, I_f	反馈电压、反馈电流有效值
U_{BB}, U_{CC}, U_{EE}	基极、集电极、发射极直流电源电压
U_{DD}, U_{SS}	漏极、源极直流电压

U_s, I_s	正弦电压源、电流源电压电流有效值
u_s, i_s	正弦电压源电压、正弦电流源电流瞬时值
U_i	输入电压有效值
u_i	含有直流成分的输入电压瞬时值
U_o, I_o	输出交流电压、电流有效值
u_o	含有直流成分输出电压的瞬时值
U_R	基准电压、参考电压
I_R	参考电流, 二极管反向电流
U_+, I_+	运放同相端输入电压、电流
U_-, I_-	运放反相端输入电压、电流
U_{id}	差模输入电压信号
U_{ic}	共模输入电压信号
U_{CEQ}	集电极发射极间静态压降
I_{BQ}	基极静态电流
I_{CQ}	集电极静态电流
ΔU_{CE}	直流电压变化量

ΔI_B 基极直流电流成分的变化量

二、电阻

R_s 信号源内（外）阻
 R_i 输入电阻
 R_o 输出电阻
 R_{if} 具有反馈时的输入电阻
 R_{of} 具有反馈时的输出电阻
 R_{id} 差模输入电阻
 R_p 电位器（可变电阻器）
 R_C 集电极外接电阻
 R_B 基极偏置电阻
 R_E 发射极外接电阻
 R_L 负载电阻

三、放大倍数、增益

A_u 电压放大倍数, $A = U_o/U_i$
 A_{us} 考虑信号源内阻时的电压放大倍数, $A_{us} = U_o/U_s$ 即源电压放大倍数
 A_{uc} 共模电压放大倍数
 A_{od} 开环差模电压放大倍数
 A_{usm} 中频电压放大倍数
 A_{usl} 低频电压放大倍数
 A_{ush} 高频电压放大倍数
 A_f 闭环放大倍数
 A_{uf} 具有负反馈的电压放大倍数, 即闭环电压放大倍数

A_i 开环电流放大倍数
 A_{if} 闭环电流放大倍数
 A_r 开环电阻传输系数
 A_{rf} 闭环电阻传输系数
 A_g 开环电导传输系数
 A_{gf} 闭环电导传输系数
 F 反馈系数
 K_{CMR} 共模抑制比— A_d/A_c

四、功率

P 平均功率（有功功率）
 P_o 输出信号功率
 P_C 集电极损耗功率
 P_E 直流电源供给功率

五、频率

f 频率通用符号
 ω 角频率通用符号
 f_H 放大电路的上限截止频率。此时, 放大电路的放大倍数为 $A_{ush} = 0.707A_{usm}$
 f_L 放大电路的下限截止频率。此时, 放大电路的放大倍数 $A_{ush} = 0.707A_{usm}$
 BW 通频带（带宽）, $BW = f_H - f_L$
 f_{Hf} 具有负反馈时放大电路的上限截止频率
 f_{Lf} 具有负反馈时的通频带

BW_f	具有负反馈时有通频带	R_e	发射区电阻
ω_0	谐振角频率	R_{be}	发射结的微变等效电阻
f_0	振荡频率	R_{bc}	集电结的微变等效电阻
六、器件参数		R_{be}	共射接法, 基射极间的微变电阻
V_D	二极管	α	共基接法下, $\alpha = I_C / I_E$
U_D	二极管工作电压		
U_F	二极管正向导通压降	β	共射接法, 集电极电流的变化量与基极电流表的变化量之比, 即 $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$
U_T	温度电压当量, $U_T = kT/q$		
I_{VD}	二极管工作电流	$\bar{\beta}$	共射接法时, I_C 与 I_B 的比值
I_D	漏极电流	g_m	跨导
I_S	源极电流, 二极管反向饱和电流	I_{CM}	集电极最大允许电流
I_{FM}	最大整流电流	P_{CM}	集电极最大损耗功率
U_B	基极直流电压	$U_{(BR)EBO}$	集电极开路时, eb 间的击穿电压
V_{DZ}	稳压二极管	$U_{(BR)CEO}$	基极开路时, ce 间的击穿电压
U_{VDZ}	稳压管稳定电压值	U_{OS}, I_{OS}	集成运放输入失调电压、失调电流
I_Z	稳压管工作电流	I_B	集成运放输入偏置电流
I_{Zmax}	稳压管最大稳定电流	V	三极管, 晶闸管
R_Z	稳压管动态电阻	D	场效应管漏极
b	基极	G	场效应管栅极, 晶闸管控制极
c	集电极	S	场效应管源极, 开关
e	发射极	A	晶闸管阳极
I_{CBO}	射极开路时的集—基间反向饱和电流	K	晶闸管阴极
I_{CEO}	基极开路时的集—射间穿透电流	$U_{GS(th)}$	场效应管开启电压
P	空穴型半导体		
N	电子型半导体		
$R_{bb'}$	基区体电阻		

$U_{GS(off)}$	场效应管栅源截止电压 (夹断电压)	τ	时间常数
I_{DSS}	结型、耗尽型场效应管 $U_{GS}=0$ 时的 I_D 值	η	效率
		φ, φ	相角
		φ_i	反馈网络的相移
Q	静态工作点, LC 回路 的品质因数	T	变压器

目 录

序

前言

常用符号说明

第1章 半导体二极管及其应用电路	1
1.1 半导体基本知识	1
1.2 半导体二极管	2
1.3 单相整流电路	6
1.4 技能实训与应用电路	11
小结	15
练习题	15
第2章 半导体三极管及其放大电路	19
2.1 半导体三极管	19
2.2 共射极基本放大电路	26
2.3 静态工作点的稳定与分压式偏置电路	33
2.4 其他组态放大电路	35
2.5 多级放大电路	40
2.6 放大电路的频率响应	44
2.7 技能实训和应用电路	45
小结	50
练习题	50
第3章 集成运算放大器	56
3.1 差动放大电路	56
3.2 集成运算放大器	64
3.3 技能实训与应用电路	68
小结	71
练习题	72

第4章 负反馈放大电路	75
4.1 反馈的概念	75
4.2 反馈的分类与判别	77
4.3 负反馈对放大电路性能的影响	85
4.4 深度负反馈对放大倍数的影响	89
4.5 技能实训与应用电路	91
小结	95
练习题	95
第5章 集成运算放大器的应用	98
5.1 理想运算放大器的条件及特点	98
5.2 线性运算放大电路	99
5.3 运放非线性电路	110
5.4 技能实训与应用电路	113
小结	116
练习题	117
第6章 功率放大电路	120
6.1 功率放大器的特点及分类	120
6.2 双电源互补对称功率放大电路 (OCL)	122
6.3 单电源互补功率放大电路 (OTL)	126
6.4 集成功率放大器	129
6.5 技能实训与应用电路	131
小结	133
练习题	134
第7章 信号产生电路	137
7.1 振荡电路基本概念	137
7.2 正弦波振荡电路	139
7.3 5G8038 多功能信号发生器	147
7.4 技能实训与应用电路	150
小结	153
练习题	153

第 8 章 直流电源电路	156
8.1 直流稳压电源的组成及性能指标	156
8.2 滤波电路	157
8.3 稳压电路	162
8.4 技能实训与应用电路	175
小结	179
练习题	179
第 9 章 晶闸管及其应用电路	183
9.1 晶闸管结构及工作原理	183
9.2 单相可控整流电路	187
9.3 晶闸管触发电路	191
9.4 单相交流调压	196
9.5 技能实训与应用电路	198
小结	203
练习题	203
第 10 章 场效应晶体管及放大电路	207
10.1 场效应晶体管	207
10.2 场效应晶体管偏置电路及其放大电路	214
10.3 技能实训和应用电路	218
小结	220
练习题	221
附录 电子工作台使用简介	224
参考文献	229

半导体二极管及其应用电路

PN 结 (PN junction) 是构成各种半导体器件的重要基础, 本章首先讨论半导体的导电性和 PN 结形成, 二极管的结构及其特点, 其次分析二极管整流电路, 最后介绍二极管应用电路。

1.1 半导体基本知识

导电能力介于导体和绝缘体之间的物质称为半导体, 如硅、锗、硒、砷化镓等。半导体的导电特性 (电阻率) 受到各种因素的影响:

1. 热敏特性

温度升高, 大多数半导体的电阻率下降。例如, 纯锗温度每升高 10°C , 它的电阻率就会减少到原来的一半左右。由于半导体的电阻率对温度特别灵敏, 利用这种特性就可以做成各种热敏元件。

2. 光敏特性

许多半导体受到光照辐射, 电阻率下降。如硫化镉在没有光照时, 电阻高达几千欧, 受到阳光照射时, 电阻可降到几十欧。利用这种特性可制成各种光电元件。

3. 掺杂特性

在纯净的半导体中掺入微量的某种杂质 (impurity) 后, 它的导电能力就可增加 10^4 甚至 10^6 倍。例如, 在纯硅中掺入百万分之一的硼后, 硅的电阻率就从大约 $2 \times 10^3 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 减少到 $4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 左右。利用这种特性制成两种类型的掺杂半导体, 以这两种半导体为基础的 PN 结, 构成了系列的半导体器件, 如半导体二极管、三极管、场效应晶体管等。

纯净的半导体 (本征半导体, intrinsic semiconductor) 掺入微量元素后就成为杂质半导体。杂质半导体内有两种运载电荷的粒子, 电子 (带负电) 和空穴 (带正电)。



电子和空穴如果相碰，电子和空穴都会消失，称为复合。掺入少量的硼元素的半导体可以形成P型半导体。P型半导体（P-type semiconductor）空穴是多数载流子，电子少数载流子。掺入少量的磷元素的半导体可以形成N型半导体。N型半导体（N-type semiconductor）空穴是少数载流子，电子多数载流子。P型或N型半导体的导电能力增强，但与金属导电能力相比仍有很大差距。

PN结是构成各种半导体的基础。PN结采用特定的制造工艺，使一块半导体的两边分别形成P型半导体和N型半导体，它们交界面可以形成一个空间电荷区称PN结。该空间电荷区的内部电场方向是N区指向P区，会阻止P区的空穴向N区扩散，N区电子向P区扩散。PN结具有单向导电性（unilateral conductivity）。如图1-1即在PN结上加正向电压时，该电压和该空间电荷区的内部电场方向相反，抵消空间电荷区的内部电场作用，P区的空穴就会从交界处向N区扩散，N区的电子也向P区扩散，此时PN结处于导通状态（turn-on state），正向电流（forward current）较大，PN结电阻很小。加反向电压时，该电压与空间电荷区的内部电场方向相同，在交界面阻碍空穴或电子越过界面扩散的空间电荷区内部电场得到加强，反向电流很小，PN结电阻很大，PN结处于截止状态（cut-off state）。

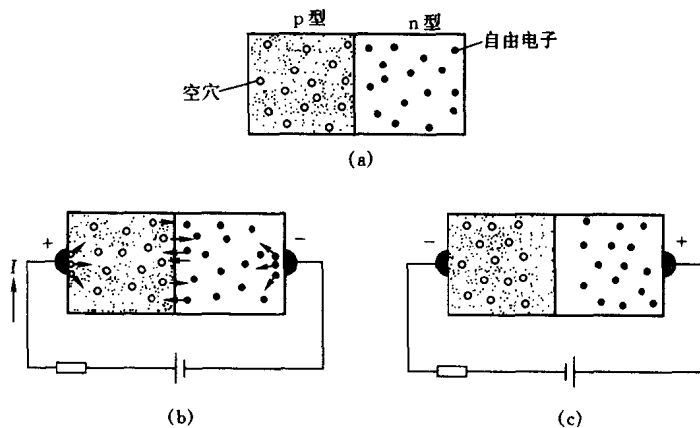


图 1-1 PN结单向导电性
(a) PN结；(b) 施加正向电压；(c) 施加反向电压

1.2 半导体二极管

1.2.1 二极管的结构及符号

半导体二极管，是由一个PN结组成的器件。图1-2是二极管的符号及结构，

由 P 区引出的电极称为阳极 (anode) (正极), 由 N 区引出的电极称为阴极 (cathode) (负极)。按结构不同, 二极管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 结面积小 (结电容小), 不能通过较大电流, 其高频性能好, 一般适用于高频和小功率的电路中, 或在数字电路中作开关元件。面接触型二极管 (一般为硅管) 的特点是 PN 结面积大, 故可通过较大电流 (可达上千安培), 但其结电容大、工作频率低, 一般用作整流。根据半导体二极管材料的不同, 可分为硅二极管和锗二极管。

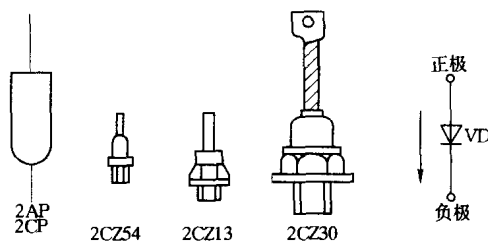


图 1-2 二极管的结构与符号

1.2.2 二极管的伏安特性 (volt - ampere characteristics)

二极管最基本的特性就是单向导电性, 用伏安特性曲线描述。伏安特性曲线就是器件所承受的电压与流过的电流之间的函数关系, 图 1-3 所示。

正向特性曲线分为两个区 (forward characteristics), 当二极管的正向电压很小时, 几乎没有电流通过二极管。这一电压称为死区电压。硅管的死区电压一般约为 0.5V, 锗管则约为 0.1V。二极管的正向电压大于死区电压后, 有较大的正向电流通过二极管, 二极管处于正向导通区, 正向电流随着电压的增加而迅速增大, 硅二极管电流上升曲线比锗二极管更陡。

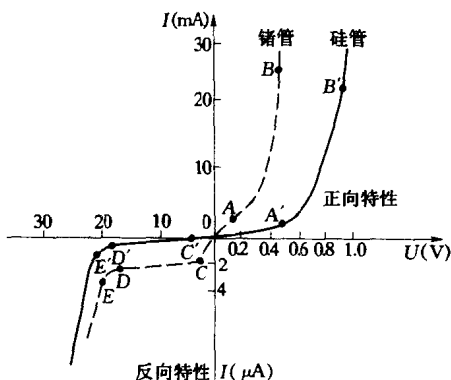


图 1-3 二极管伏安特性

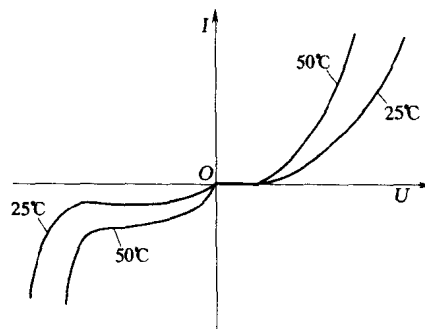


图 1-4 温度对二极管特性影响

反向特性曲线分为两个区 (reverse characteristics)。反向截止区, 当二极管加上

反向电压时,只有极小的反向电流流过二极管。在同样的温度下,硅管的反向电流比锗管小得多,锗管是微安级(μA),硅管是纳安级(nA)。二极管的反向电流具有两个特点:一是随温度上升而增长很快;二是只要外加的反向电压在一定范围之内,反向电流基本不随反向电压变化。

反向击穿区(reverse breakdown),当增大反向电压到一定数值时,反向电流如图1-3所示急速增加,反向电压值几乎不变,二极管失去单向导电性,这种现象称为电击穿, U_{BR} 称为反向击穿电压(breakdown voltage)。工作在击穿区的二极管,没有适当的限流措施,会因流过管子的电流大、加的反向电压高,管子过热而造成永久性的损坏,这叫做热击穿。

温度对特性的影响:由于半导体的导电性能与温度有关,所以二极管的特性对温度很敏感,温度升高时二极管正向特性曲线向左移动,反向特性曲线向下移动,如图1-4所示。变化的规律:在室温附近,温度每升高 1°C ,正向电压减小 $2\sim 2.5\text{mV}$,而反向电流在温度每升高 10°C ,反向电流约增大一倍,击穿电压也下降较多。

1.2.3 二极管的主要技术参数(main parameter)

器件的参数是定量描述器件性能质量和安全工作范围的重要数据,是合理选择和正确使用的器件依据。半导体二极管的主要参数及意义:

1. 最大整流电流 I_{F}

I_{F} 指二极管长期工作时所允许加的最大正向平均电流,由PN结的面积和散热条件所决定。实际应用时,流过二极管的平均电流不能超过这个数值,否则,将导致二极管因过热而损坏。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

U_{RM} 指二极管工作时所允许加的最大反向电压,超过此值二极管就容易发生反向击穿。通常取 U_{BR} 一半作为 U_{RM} 。

3. 反向电流 I_{R}

I_{R} 指二极管未被击穿时的反向电流。 I_{R} 越小,二极管的单向导电性能越好。 I_{R} 对温度很敏感,使用时要注意环境温度条件。

4. 最高工作频率 f_{M}

f_{M} 与PN结电容有关,工作的频率超过 f_{M} 时,反向电流很大,二极管的单向导电性变坏。

1.2.4 硅稳压二极管

硅稳压管又简称稳压管(zener diode),是一种用特殊工艺制造的面接触型硅半

