

模拟电路基础

刘光祜 饶妮妮

电子科技大学出版社

内 容 简 介

本教材是为了适应当前模拟电子电路课的教学形势而编写。教材内容包括:半导体二极管及应用、双极型晶体管和场效应管原理、晶体管放大器基础、模拟集成电路基础、放大器频率响应、集成运算放大器及应用、负反馈技术等。

本书以“讲透基本原理,打好电路基础”为宗旨,强调物理概念的描述,避免复杂的数学推导。在若干知识点的阐述上,教材有自己的个性特色,并在内容取舍、编排以及文字表达等方面都期望解决初学者的入门难问题。

本书可作为高等院校工科学生的一门电子技术基础课教材,也适用于广大电路工作者参考学习。

模拟电路基础

刘光祜 饶妮妮

出 版:电子科技大学出版社 (成都建设北路二段四号,邮编:610054)

责任编辑:张俊 朱丹 徐守铭

发 行:新华书店经销

印 刷:四川导向印务有限公司

开 本:787×1092 1/16 印张 18.125 字数 431 千字

版 次:2001年1月第一版

印 次:2001年1月第一次印刷

书 号:ISBN 7-81065-616-3/TN·28

印 数:1-4000册

定 价:23.00元

前 言

电子电路是指含有电子器件且能够完成某种电路功能的实用电路。半导体二极管、三极管和半导体集成电路是最常使用的电子器件。模拟电子电路(简称模拟电路)所处理的信号是一种时间连续信号即所谓模拟信号。例如:用麦克风将声音转化成的电信号或用摄像头将一幅图片转化成的电信号都是模拟信号。模拟电路按其所处理的信号的频率可分为低频电路、高频电路和微波电路,也可以按电路中电子器件的工作状态分为线性电子电路和非线性电子电路。本教材《模拟电路基础》基本上是低频和线性模拟电路的内容,而高频和非线性模拟电路的内容一般放在另一门模拟电路课中讲授。与模拟电路相对应的另一类电子电路是数字电路,它所处理的信号是只含有高低两个电平的数字信号。

随着半导体技术的发展,模拟电路所涵盖的内容越来越多,但受限于新的教学大纲和学生知识结构的变化,该门课所允许的授课学时却越来越少,该教材就是为了适应这种形势的需要而编写的。编者在分析了1990年以来出版或再版的若干美国同类教材和国内重点大学的改革教材的基础上,结合他们多年来在该门课上的教学体会及在该领域的科研实践体会,力求在教材编写中体现出以下的思路和特色。

1. 新教材最大限度地删除了对半导体器件(晶体二极管、双极型晶体管和场效应晶体管)内部物理过程的数学分析,把注意力放在器件的外部伏安特性、模型和参数上面。这是解决模拟电路内容多、学时数少的必要措施,这一作法也被各种新教材所共同采用。

2. 新品种、新电路不断涌现,但基本概念、基本原理是不会变化的。教材始终以“讲透概念原理,打好电路基础”为宗旨,并在“怎么讲”上溶入编者多年的教学经验。例如:用环路自动调节作用解释负反馈对放大器性能的改善;分析反馈放大器的“串联开路、并联短路”口诀;差动放大器的单边等效电路法等。使教材个性特色突出且行之有效。

3. 教材服务的对象是初学者,因此在章节次序的安排上应符合由浅入深,由个别到一般的认识规律。例如:不要为了“先器件后电路”的系统性,而把器件在前面的章节里就和盘托出,使得学习难度增加。代之以“边器件边电路”的方法,讲完一种器件,接着就讲它的基本应用电路。放大电路的分析也按照先基础电路后实用变形电路来编排的。

4. 学生普遍反映模拟电路入门难。一个原因是该门课的新概念多。一些电路工作者认为很简单的概念,如耦合旁路电容、交流通路等,对学生而言并不一定简单。因此在基本概念的讲述上不能压缩篇幅,这是使教材易读的重要措施。另外,过多的数学分析推导既占用了已经很少的学时,还可能分散学生的注意力甚至掩盖物理概念。在这方面,新教材借鉴国外教材的写法:文字阐述详尽,公式简明易记,鲜有数学推导。一些需要讲清来源的公式的推导过程放在附录供学生课后阅读,较简单的推导甚至可以让学生在作业中完成。总之,教材力求做到减少学生阅读的困难。

5. 模拟电路是学生第一次接触到的一门工程型、技术型、实用型而非理论型的课程,它

与先修课程“电路分析基础”和“信号与系统”有很大的差别。后者是讲述模型化电路和信号的分析方法,而电路的结构、元件的取值和信号的性质的不同并不影响分析方法的学习。但模拟电路却是具有一定功能的实用电路,因此,教材中应注意强调电路结构和元件取值的合理性。电路的计算则用工程近似方法:抓主要矛盾,简化模型和计算,结果合理有效。

6. 教材也注意加强与两门前修课程的联系。实际上,从分析电子电路的观点而言,电路中的电子器件或单元电路模型化以后,剩下的工作就是依靠这两门先修课程的知识来完成的。因此,新教材有意识地加强了电路模型的概念,例如:讲述了实用恒压源和恒流源模型、放大器通用模型等。放大器频率特性分析也从系统极点与开路和短路时间常数关系出发来研究。总之,先修课程应作为模拟电路课的有力工具,使学生掌握研究电路的统一方法,所学的知识得到从具体到抽象的升华。

7. 几乎所有的新编教材都认为应该摒弃以分立元件电路为主干的旧模式,代之以放眼模拟芯片中常用的电路单元。本教材第五章“模拟集成单元电路”在编排上体现了这一观点。但编者认为,学习模拟电路首先要打好基础,这样才能有效提高学生“读电路”的能力。学习分立元件电路的目的正在于此。

8. 随着半导体技术的发展,模拟电路领域里的新器件不断涌现,模拟电路应用范围极为广阔。教材在适当的地方将会涉及这些知识,以增加学习兴趣,开拓视野和思路。通用模拟集成电路早已有完整的系列产品,除了在第八章对它的最重要的品种——集成运算放大器重点分析外,在再版的教材中将增加一章对其总体和重点品种的分析介绍。并且对模拟集成电路的新技术——电流模技术也作适当地介绍。

9. 电子器件的模型越准确,电路分析的可信度越高,但“手算”的难度也越大。先进的电路分析应用软件已经为我们基本解决了这一矛盾。现在新版的国外同类教材每章都有利用著名的通用电路模拟软件 PSpice 程序作电路分析计算的例子,国内 1998 年最新出版的南开大学教材《模拟电路基础》也首次将该程序的应用编入。但是,基于以下两个原因,第一版教材几乎没有编入相关的内容。第一,学时数太少,无法系统讲解。即使各章编入一些有关 PSpice 分析的例题,由于学生没有掌握必要的知识,收益也不大。第二,利用正课时间学习这类应用软件太不合算。学生完全可以通过自学和上机来掌握。教材仅在第六章给出了一个用 PSpice 对多级负反馈放大器的幅频特性作电路分析仿真的例子作为示范。

10. 新教材对放在各章之后的习题和复习题给予足够的重视。复习题是对学生是否掌握本章的基本知识的全面检查,习题可留作课后的作业。习题和复习题应该起到两方面的作用:(1)纠正模糊认识,巩固基础知识。(2)提高分析实用电路的能力。编者根据多年的教学实践,精选题目,使之对学生帮助最大。

11. 为了帮助学生归纳重要结论,对每个重要知识点,教材中总结性的文字均用楷体字印出。并且重要的名词、概念、重要的公式的编号采用黑体和加粗字体。这种编排有利于学生抓住要点,把一本书“读薄”。另外,也利于复习。

教材的试用版(讲义)已供作者所在校 98 级本科学生试用。同行教师对教材提出了大量的修改意见,这些意见对提高教材的质量帮助很大,编者在此表示感谢。

《模拟电路基础》是电子科技大学“九五”系列特色教材之一。它应该是一本在内容取舍,

理论水平,个性特色,文字表达,易读易学以及编排质量等多方面都令人满意的教材。编者虽经努力,但很难尽如人意。另外,由张玉兴教授编写的新教材《射频模拟电路》是《模拟电路基础》的姊妹篇。该书也是电子科技大学“九五”系列特色教材。

本书由刘光祜担任主编。刘光祜编写了第一、二、三、五、七章,饶妮妮编写了第四、六、八章。限于作者水平,对书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者

2000年11月

于电子科技大学成都

本书使用符号的说明

一、电压和电流符号的规定(以发射结电压和基极电流为例)

V_{BE}, I_B : 大写字母和大写下标表示直流电压、直流电流。

v_{be}, i_b : 小写字母和小写下标表示交流分量、信号分量。

v_{BE}, i_B : 小写字母和大写下标表示电压电流的总瞬时值。

V_{be}, I_b : 大写字母和小写下标表示交流分量的有效值。下标有 m 时表示交流分量振幅, 如 V_{cm}, I_{bm} 。

\dot{V}_{be}, \dot{I}_b : 正弦电压、电流的复数表示法。

$V(s), I(s)$: 电压、电流的拉氏变换量。

$\Delta V_{BE}, \Delta v_{BE}, \Delta I_B, \Delta i_B$: 表示对应电压、电流的变化量。

二、书中使用的英文符号的含义(按字母顺序列表)

符 号	含 义	符 号	含 义
A	增益、开环增益	A_v, A_{vs}	电压增益, 源电压增益
A_i, A_{is}	电流增益, 源电流增益	A_{vo}, A_p	负载开路电压增益(内电压增益), 功率增益
A_L, A_H	低频段增益, 高频段增益	A_f	闭环增益
A_{vd}, A_{vc}	差模电压增益, 共模电压增益	$A(j\omega), A(S)$	增益的频率特性函数, 增益函数
amp.	放大器	B, B_0	反馈系数
BJT	双极结型晶体三极管	BW, BW_G	通频带(-3dB 带宽), 单位增益带宽
BV_{CEO}	BJT 基极开路时的集电结反向击穿电压	C_B, C_b	基极旁路电容
BV_{CBO}	BJT 射极开路时的集电结反向击穿电压	BV_{EBO}	BJT 发射结反向击穿电压
C_E, C_e	发射极旁路电容	C_T, C_D, C_j	势垒电容, 扩散电容, PN 结电容
C_{V_e}, C_{V_c}	BJT 的发射结和集电结电容	C_{dg}, C_{gs}, C_{ds}	FET 的极间电容
C_{ob}, C_c	共基输出电容	C, C	电容, 集电极
CE, CC	共射和共集组态	CS, CD, CG	共源, 共漏和共栅组态
CB	共基组态、互补双极工艺	CMOS	互补 MOS 管、互补 MOS 工艺
D	二极管、FET 的漏极、非线性失真系数	$D_z, dec.$	稳压管, 十倍频程
E	BJT 的发射极、电场强度	dB, f_m	分贝, 二极管最高工作频率

续表

符 号	含 义	符 号	含 义
F, f	反馈深度, 频率	FET	场效应晶体管
$\Delta f_{0.7}$	通频带(与 BW 含义相同)	f_L, f_H	低频截止频率, 高频截止频率
f_T, f_β, f_α	特征频率, β 的截止频率, α 的截止频率	f_P, f_g	相位交叉频率, 增益交叉频率
G, g	FET 的栅极	G_m, GB	增益裕量, 增益带宽积
g_i, g_o, g_t, g_r	双口网络 G 参数	h_i, h_o, h_t, h_r	双口网络 H 参数
g_m	BJT 和 FET 的小信号跨导	Hz	赫兹(频率的单位)
I_{CN}	i_C 中由 i_E 转化而来的分量	I_{CS}	集电极饱和电流
I_e, I_E, i_E, i_e	发射极电流	I_c, I_C, i_C, i_c	集电极电流
I_b, I_B, i_B, i_b	基极电流	I_D, i_D	二极管电流或 FET 漏极电流
i_i, i_o	输入电流, 输出电流	i_s, i_t	信号源电流, 测试信号电流
I_{IB}, I_{IO}	集成运放输入偏流和输入失调电流	I_S, I_{ES}	PN 结反向饱和电流, 发射结反向饱和电流
I_{DSS}	耗尽型 FET 的零偏($V_{GS}=0$)饱和漏电流	I_F, I_R	二极管最大整流电流和反向电流, I_R 又指恒流源参考电流
I_{ZMIN}, I_{ZMAX}	稳压管最小和最大稳定电流	I_{CBO}, I_{CEO}	集电极反向饱和电流, 穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流	IC	集成电路
IGFET, JFET	绝缘栅 FET, 结型 FET	k	玻尔兹曼常数, 增强型 MOS 管平方律公式中的系数
K	热力学温度单位(开尔文)	LSI	大规模集成
L, l	环路增益, 长度	M, m	兆(10^6), 米(或毫 10^{-3})
N_D, N_A	施主浓度, 受主浓度	N_{Si}, N_{Ge}	Si 原子密度, Ge 原子密度
n	自由电子浓度	n_i	本征浓度
n_0, p_0, p	自由电子和空穴的平衡浓度, 空穴浓度	n_b	基区自由电子浓度
MOSFET	金属氧化物半导体	OA	运算放大器(也可用 A)
P_i, P_o	输入功率, 输出功率	P_o, P_{CC}	平均输出功率, 平均电源功率
P_{TI}, p_C	平均管耗, 瞬时管耗	OCL, OTL	双电源互补功放, 单电源互补功放
$P_D, PSSR$	集成运放静态功耗, 电源电压抑制比	pF, pA	皮法, 微微法, 皮安培
P_j, P_{if}	增益函数的极点	P_{CM}	集电极最大允许功耗
Q	工作点、电荷量、二阶滤波器 Q 值	q	电子电荷量

续表

符 号	含 义	符 号	含 义
$R_B(R_b), R_C$	基极电阻, 集电极电阻	R_E, R_e	发射极电阻
R_S, R_D, R_G	源极电阻, 漏极电阻, 栅极电阻	R_i, R_o	放大器输入和输出电阻
R_{if}, R_{of}	反馈放大器的输入和输出电阻	R_L, R_L'	负载电阻, 等效交流负载电阻
R_F, R_{cm}	反馈电阻, 共模负反馈电阻	R_{id}, R_{ic}	差模输入电阻, 共模输入电阻
R_s, R_g	信号源内阻	R_i', R_o', R_p	管端输入和输出电阻 集成运放电路中的平衡电阻
$R_{\beta}, R_{\beta 0}$	短路和开路时间常数中的等效电阻	R_O, r'	直流电源中的内阻
r_z	稳压管交流电阻(内阻)	r_{bb}, r_{bc}	基区体电阻, 基区复合电阻
r_{ce}, r_{bc}	反映基区宽调效应的电阻	r_{be}	从基极视入的 EB 结交流电阻
R_D, r_d	二极管直流电阻和交流电阻	r_o	恒流源内阻
r_e	发射结正向交流电阻	r_{ds}	漏极内阻
s, S	秒, 西门子, 源极, 面积	s, SR	复频率, 集成运放的转换速率
T	晶体三极管、绝对温度、环路增益、周期	t	时间, 摄氏温度
t_s	集成运放的建立时间	T_r	变压器
V, v	电压, 双下标时为前下标电位减后下标电位	V	伏特
v_i, v_o, v_s	输入电压, 输出电压, 信号源源电压	V_{ON}	导通电压
$V_{CC}, V_{EE}, V_{DD}, V_{SS}$	电源电压	v_{id}, v_{ic}	差模输入电压, 共模输入电压
V_P, V_T	FET 的夹断电压和开启电压	V_A	BJT 的厄利电压
V_{IO}	集成运放的输入失调电压	V_R	参考电压, 二极管最大反压
V_{IDM}, V_{ICM}	集成运放最大差模和共模输入电压	VLSI	超大规模集成
VCO	电压控制振荡器	V_T, v_t	热(力学)电压, 测试信号电压
v_{od}, v_{oc}	差模输出电压, 共模输出电压	W	瓦特, 距离宽度
x	距离	x_s, x_f, x_i, x_o	理想反馈模型中的瞬时信号
$\dot{X}_s, \dot{X}_f, \dot{X}_i, \dot{X}_o$	理想反馈模型中的复数信号	$Y, y; Z, z$	导纳和阻抗
y_i, y_o, y_t, y_r	双口网络 Y 参数	z_i, z_o, z_t, z_r	双口网络 Z 参数
Z_j, Z_{if}	增益函数的零点	V_{CES}	BJT 的饱和电压降

三、书中使用的希腊字母和其他符号的含义

符 号	含 义	符 号	含 义
$\bar{\alpha}, \alpha$	BJT 共基直流和交流电流放大倍数	$\bar{\beta}, \beta$	BJT 共射直流和交流电流放大倍数
$\dot{\beta}, \dot{\alpha}$	高频 β 和 高频 α	α	稳压管交流电阻的温度系数
η, τ	功放的效率, 时间常数	φ_0, ϕ_0	放大器中频段固定相移, 变容二极管内建电压
$\Delta\varphi$	放大器附加相移	$\omega, \Delta\omega_{0.7}$	角频率, -3dB 带宽
Ω, σ	欧姆, 复频率的实部	ω_L, ω_H	低频和高频截止角频率
ω_g, ω_p	增益叉角频率, 相位交叉角频率	μF	微法拉, 1×10^{-6} 法拉
γ	变容二极管的变容指数	τ_s, τ_o	短路时间常数, 开路时间常数
*	选学内容、注释		

目 录

第一章 晶体二极管及应用电路

§ 1.1 半导体材料及导电特性	1
1.1.1 本征半导体	1
1.1.2 杂质半导体	3
1.1.3 漂移电流与扩散电流	6
§ 1.2 PN 结原理	6
1.2.1 PN 结的形成及特点	6
1.2.2 PN 结的单向导电特性	8
§ 1.3 晶体二极管及应用	10
1.3.1 晶体二极管的伏安特性	10
1.3.2 二极管的直流电阻和交流电阻	11
1.3.3 二极管模型	13
1.3.4 二极管应用电路举例	16
§ 1.4 PN 结的反向击穿及应用	20
1.4.1 反向击穿现象及原因	20
1.4.2 稳压管	20
§ 1.5 PN 结电容效应及应用	24
1.5.1 势垒电容	24
1.5.2 扩散电容	25
1.5.3 变容二极管	25
习题	26
复习题	29

第二章 双极型晶体三极管(BJT)

§ 2.1 BJT 原理	32
2.1.1 BJT 结构	32
2.1.2 BJT 放大偏置及电流分配关系	33
2.1.3 放大偏置 BJT 偏压与电流的关系	36
2.1.4 BJT 的截止与饱和和工作状态	37

§ 2.2 BJT 静态特性曲线	38
2.2.1 晶体三极管伏安特性曲线的画法	39
2.2.2 共射输入特性曲线	39
2.2.3 共射输出特性曲线	40
2.2.4 温度对BJT的特性曲线的影响	41
§ 2.3 BJT 主要参数	41
2.3.1 电流放大系数	41
2.3.2 极间反向电流	42
2.3.3 极限参数	43
2.3.4 特征频率 f_T	44
§ 2.4 BJT 小信号模型	45
2.4.1 小信号放大原理	45
2.4.2 BJT 小信号模型	46
习题	52
复习题	55

第三章 晶体管放大器基础

§ 3.1 实用放大电路工作原理	57
3.1.1 对实用放大电路的一般要求	57
3.1.2 双电源共射放大器原理	57
3.1.3 放大器的直流通路和交流通路	59
3.1.4 单电源共射放大器	60
§ 3.2 BJT 偏置电路	61
3.2.1 最简单的偏置电路——固定基流电路	61
3.2.2 基极分压射极偏置电路	63
§ 3.3 BJT 基本放大组态技术指标分析	67
3.3.1 放大器技术指标及小信号分析方法概述	67
3.3.2 共射放大器	67
3.3.3 共基放大器	73
3.3.4 共集放大器	75
3.3.5 BJT 三种基本组态放大器比较	76
3.3.6 放大器通用小信号模型和其他增益	77
§ 3.4 多级放大电路	80
3.4.1 耦合方式	80
3.4.2 多级放大器指标的计算	83

3.4.3 BJT 组合放大器	84
习题	86
复习题	89

第四章 场效应管及基本放大电路

§ 4.1 结型场效应管(JFET)	92
4.1.1 JFET 的结构和工作原理	92
4.1.2 JFET 特性曲线及参数	96
§ 4.2 金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET).....	99
4.2.1 N 沟道增强型 MOSFET	99
4.2.2 N 沟道耗尽型 MOSFET	104
§ 4.3 FET 偏置电路	106
4.3.1 自给偏压电路	107
4.3.2 混合偏压电路	109
§ 4.4 FET 的交流参数和小信号模型	110
4.4.1 交流参数	110
4.4.2 FET 的小信号模型	111
§ 4.5 FET 基本放大器分析	111
4.5.1 共源放大器	112
4.5.2 共漏放大器——源极输出器	117
§ 4.6 场效应晶体管与双极型晶体管的比较	121
习题	122
复习题	126

第五章 模拟集成单元电路

§ 5.1 半导体集成电路概述	130
§ 5.2 恒流源	131
5.2.1 恒流源模型和恒流源电路原理	131
5.2.2 模拟 IC 中的恒流源	134
5.2.3 有源负载放大器	137
§ 5.3 差动放大器	138
5.3.1 差动放大器的电路特点和性能指标	138
5.3.2 差动放大器的分析方法和工作特点	140
5.3.3 恒流源差动放大器	144
5.3.4 差动放大器的差模传输特性	146

§ 5.4 功率输出级	147
5.4.1 功率放大器的特点、指标和分类	147
5.4.2 双电源互补推挽乙类功率放大器	149
5.4.3 实用互补推挽功放电路	153
习题	157
复习题	160

第六章 放大器的频率响应

§ 6.1 频率响应的基本概念	164
§ 6.2 频率响应指标和频率失真	165
6.2.1 放大器频率特性的数学描述	165
6.2.2 频率响应特性指标	166
6.2.3 放大器的频率失真	166
§ 6.3 放大器增益函数	167
6.3.1 线性时不变系统传输函数的一般表达式	167
6.3.2 放大器增益函数的特点	168
§ 6.4 放大器频率特性曲线的绘制——波特图	170
6.4.1 低频波特图	171
6.4.2 高频波特图	175
6.4.3 全频段波特图的绘制	178
§ 6.5 基本放大器高、低截止频率的估算	179
6.5.1 主极点的概念	179
6.5.2 极点、时间常数和低、高截止频率的关系	180
6.5.3 短路时间常数法估算低频截止频率实例	181
6.5.4 开路时间常数法估算高频截止频率实例	183
§ 6.6* 多级放大器高、低截止频率的估算方法	186
§ 6.7* 放大器频率响应的计算机辅助分析方法	187
习题	190
复习题	192

第七章 负反馈技术

§ 7.1 概述	196
§ 7.2 反馈放大器的单环理想模型分析	197
7.2.1 单环放大器的理想模型	197
7.2.2 基本反馈方程	198

7.2.3	基本反馈方程成立的条件	199
7.2.4	四种反馈类型	199
§ 7.3	反馈在实际放大器中的实现方法及反馈极性的判断	201
7.3.1	电压取样的实现	201
7.3.2	电流取样的实现	201
7.3.3	电流求和的实现	203
7.3.4	电压求和的实现	203
7.3.5	反馈极性的判断	203
§ 7.4	负反馈对放大器性能的影响	205
7.4.1	负反馈可以提高闭环增益的稳定性	205
7.4.2	负反馈可以扩展闭环增益的通频带	206
7.4.3	负反馈可以减小非线性失真	207
7.4.4	直流负反馈可以稳定放大器的工作点	208
7.4.5	负反馈可以改变放大器的输入电阻	209
7.4.6	负反馈可以改变放大器的输出电阻	211
§ 7.5	反馈放大电路的分析方法	215
7.5.1	线性双口网络理论简述	215
7.5.2	电压取样电流求和(电压并联)负反馈放大器分析	217
7.5.3	电流取样电压求和(电流串联)负反馈放大器分析	218
7.5.4	电压串联和电流并联负反馈放大器分析	219
7.5.5	反馈放大器 AB 网络分析法小结	219
§ 7.6	反馈放大器分析计算实例	220
§ 7.7	负反馈放大器的频率响应	226
7.7.1	纯电阻负反馈放大器的增益函数的特点	226
7.7.2	负反馈放大器的稳定性	226
习题	231
复习题	236

第八章 集成运算放大器及应用

§ 8.1	通用集成运算放大器的原理	239
8.1.1	集成运放的特点及组成方框图	239
8.1.2	典型通用型集成运放 741 内部电路分析	240
§ 8.2	集成运放的特性参数	242
8.2.1	输入特性参数	242
8.2.2	增益特性参数	244

8.2.3	输出特性参数	244
8.2.4	电源特性参数	244
8.2.5	频率特性参数	245
§ 8.3	理想运算放大器	247
8.3.1	理想运放的概念	247
8.3.2	理想运放的等效模型和分析方法	248
8.3.3	运放构成的两种基本负反馈电路	249
§ 8.4	集成运算放大器的线性应用	253
8.4.1	加法运算电路	253
8.4.2	差动放大器	255
8.4.3	积分器	256
8.4.4	微分器	259
§ 8.5	集成运放的其他应用简介	261
8.5.1	电压比较器	261
8.5.2	有源滤波器	264
8.5.3	波形发生器	266
8.5.4	数控增益放大器	269
	习题	270
	复习题	274
	附录	279
	部分习题参考答案	287
	主要参考书目	290

第一章 晶体二极管及应用电路

30年前,我国一台用电子管装成的运算速度很低的简单电子计算机要用一间屋子才能装下,而现在已经可以使用功能强大的笔记本电脑。对这一几乎令人不可思议的变化,我们要感谢大自然为人类提供的一种“神秘”物质——半导体。甚至可以这样认为:人类的进步文明,在很大程度上得益于半导体技术的发展。为了探索半导体器件和半导体电路的秘密,让我们先从半导体的基本知识开始。

§ 1.1 半导体材料及导电特性

用于制造半导体器件的半导体材料主要是IV族元素硅(Si)和锗(Ge)以及III-V族元素的化合物砷化镓(GaAs)。硅材料比锗材料重要得多,因为它是制造半导体集成电路(英文缩写IC)的材料。在美国加州洛杉矶附近有一大片地方是美国半导体器件公司云集的地方,故有“硅谷”之称。本教材只讨论硅和锗材料,它们都具有晶体结构,故制成的半导体管又称晶体管。砷化镓是制造微波、毫米波半导体器件以及超高速半导体器件的重要材料。半导体顾名思义其导电性能介于导体和绝缘体之间,但这并不是它获得重要应用的原因。本节将要讨论有别于金属的半导体的导电方式和特点。

1.1.1 本征半导体

纯净的且具有完整晶体结构的半导体称为本征半导体。天然的硅和锗需要经过提纯(纯度高达99.9999%以上),且形成没有晶格缺陷的单晶体以后才能用来制造晶体管和集成电路。

1. 共价键晶体结构

硅原子的原子序数为14,锗原子的原子序数为32。它们的单个原子结构模型示意图如图1-1(a)和(b)所示。硅和锗都是IV族元素,因此最外壳层上都有四个价电子。由于物质的

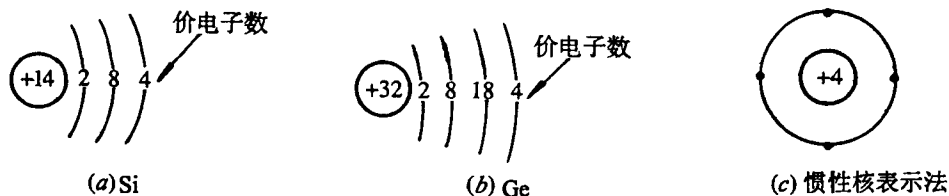


图 1-1 硅和锗的原子模型示意图

导电机理主要由价电子决定,故可用图1-1(c)所示的简化模型来表示它们的原子结构。图1-1(c)中,除了价电子外的内层稳定结构称为惰性核,惰性核带 $+4q$ 净电荷, q 为电子电荷