

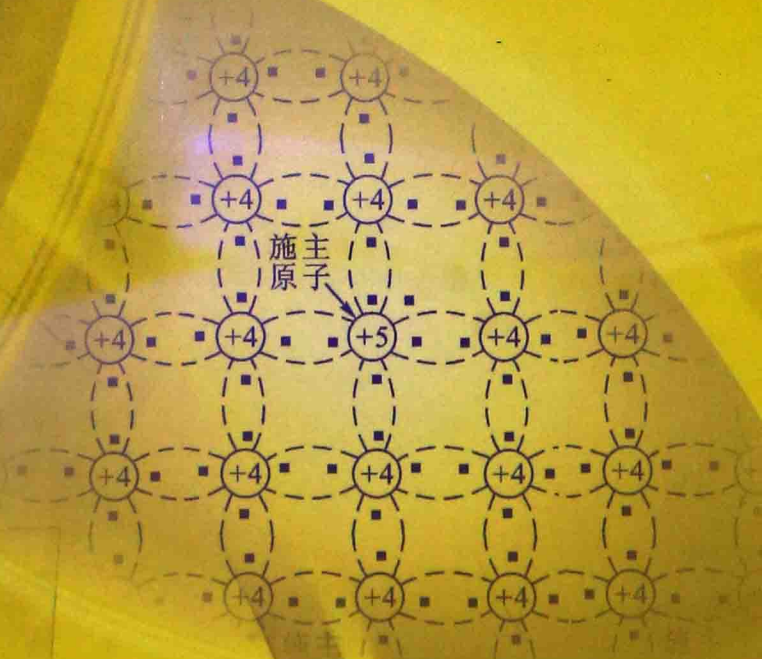


工业和信息化部“十二五”规划教材

现代电子技术基础 (模拟部分)(第2版)

XIANDAI DIANZI JISHU JICHU

王成华 王友仁 胡志忠 邵杰 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

现代电子技术基础(模拟部分)

(第2版)

王成华 王友仁 胡志忠 邵杰 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是工业和信息化部“十二五”规划教材。

本书为适应现代电子技术的飞速发展,在第1版的基础上,对教材内容进行了较大幅度的修订,引入了逻辑门电路、数/模和模/数转换电路模拟电子系统设计的内容。全书共分11章,内容包括电子线路元器件、放大器基础、放大器的频率响应、集成运算放大器与模拟乘法器、模拟信号运算与处理电路、反馈放大器、功率电路、逻辑门电路、波形产生电路、数/模和模/数转换电路、模拟电子系统的分析设计和测试概述等。

本书可作为高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类各专业本科生的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子技术基础. 模拟部分 / 王成华等编著. —
2版. — 北京:北京航空航天大学出版社,2015.2
ISBN 978-7-5124-1690-1

I. ①现… II. ①王… III. ①模拟电路—电子技术
IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第030067号

版权所有,侵权必究。

现代电子技术基础(模拟部分)(第2版)

王成华 王友仁 胡志忠 邵杰 编著
责任编辑 梅栾芳

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路37号(邮编100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1092 1/16 印张:32.25 字数:826千字

2015年2月第2版 2015年2月第1次印刷 印数:3000册

ISBN 978-7-5124-1690-1 定价:68.00元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

我们生活在信息时代,电子信息技术是发展最为迅速的领域之一,这主要得益于集成电路和计算机的发明。这两项技术既是电子技术发展的产物,又是电子技术持续发展的推动力。在这样的时代背景下,掌握模拟和数字电子技术是对所有电类专业学生的基本要求。

正因为模拟电子技术是电类专业极其重要的专业基础课和技术基础课,本书在2002年作为原国防科工委重点建设教材立项,2005年1月由北京航空航天大学出版社出版。

经过近10年的使用,本书在2013年被工业和信息化部作为“十二五”规划教材立项。

在编写《现代电子技术基础(模拟部分)》(第2版)时,与南航承担的国家教育体制改革项目“人才培养模式改革”相结合,与南航国家电工电子实验教学示范中心建设相结合,与南航新一轮人才培养方案的修订相结合,力求站在教学内容和课程体系改革与整体优化的高度来组织内容,并力求教材具有科学性、可读性和前瞻性。

我们的编写原则是:强化基础,精选内容,强调集成,注重特色。在内容上具有如下特点:

(1) 在讲述半导体器件工作原理、特性曲线、性能参数的基础上,引出半导体器件的模型,为电路分析和电路CAD打下基础。

(2) 在分析由三极管、场效应管构成的放大电路时,强调基本概念、基本工作原理和基本分析方法,为集成电路的学习打下坚实的理论基础。

(3) 在讲清集成运放基本单元电路和主要性能参数的基础上,强调集成运放的线性与非线性应用。

(4) 在分析负反馈放大器时,强调反馈的基本概念与深度负反馈放大器性能指标的估算。

(5) 正确处理与数字电路部分内容的衔接,将逻辑门电路、数/模和模/数转换电路等电路级内容归入模拟电路部分,数字电路部分从布尔代数、逻辑关系开始讨论。

(6) 为了培养学生的模拟系统分析、设计与测试的能力,新编写了模拟电子系统的分析、设计和测试概述一章。引入重要的模拟电子系统的概念,并以多个典型的模拟电子系统为例,阐述模拟电子系统的设计方法。

本书主要讨论模拟电路的基本概念、基本原理、基本电路和基本分析方法。



全书共分11章。

第1章讨论二极管、三极管、场效应管等半导体器件的工作原理、特性曲线、特性参数和等效电路。第2章讨论由三极管和场效应管构成的单级或多级放大器的工作原理和分析方法。第3章讨论放大器的频率响应。第4章讨论集成运算放大器的内部典型电路和模拟乘法器的原理。第5章讨论集成运放在运算、滤波、比较等方面的应用。第6章讨论负反馈放大器的判断、负反馈对放大器性能的影响以及深度负反馈放大器的计算。第7章包括功率放大电路、整流滤波与稳压电路,以及开关型稳压电源。第8章讨论CMOS和TTL逻辑门。第9章介绍正弦波振荡电路、非正弦波振荡电路和集成多功能信号发生器。第10章讨论数/模和模/数转换电路。第11章阐述模拟电子系统的分析、设计和测试。

本书由王成华主编。第1、2章由王成华执笔,第4、5、6章由王友仁执笔,第3、7、9章由胡志忠执笔,第8、10、11章由邵杰执笔,王成华统稿。

本书承蒙东南大学冯军教授、解放军理工大学徐志军教授审阅,并提出了宝贵的修改意见,在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年8月于南京航空航天大学

常用符号

一、电压和电流符号的规定

U_C, I_C	大写字母, 大写下标, 表示直流量
u_c, i_c	小写字母, 小写下标, 表示交流量瞬时值
u_C, i_C	小写字母, 大写下标, 表示总瞬时值
U_c, I_c	大写字母, 小写下标, 表示交流量有效值
\dot{U}_c, \dot{I}_c	大写字母上面加点, 小写下标, 表示正弦相量
$\Delta U_C, \Delta I_C$	表示直流电压和电流的变化量
$\Delta u_C, \Delta i_C$	表示总瞬时值电压和电流的变化量

二、基本符号

1. A_i, A_u	电流、电压放大倍数
A_{us}	源电压放大倍数
\dot{A}_{usl}	低频电压放大倍数的复数量
\dot{A}_{usm}	中频电压放大倍数的复数量
\dot{A}_{ush}	高频电压放大倍数的复数量
A_r, A_g	互阻、互导增益
$A_{if}, A_{uf}, A_{rf}, A_{gf}$	分别表示反馈放大器的电流、电压、互阻、互导增益
A_{ud}	差模电压增益
A_{uc}	共模电压增益
2. $BW_{0.7}$	3 dB 带宽
3. C_B, C_D, C_J	分别表示势垒电容、扩散电容和结电容
C_π, C_μ	分别表示 BJT 的发射结和集电结电容
C_{dg}, C_{gs}, C_{ds}	分别表示 FET 的分布电容
C_φ	相位补偿电容
4. D	非线性失真系数
5. E, ϵ	分别表示能量和电场强度
E_{go}	半导体的禁带宽度
6. F	反馈系数
f	频率
f_0	分别表示振荡频率、谐振频率
f_L	下限(-3 dB)频率, $\omega_L = 2\pi f_L$
f_H	上限(-3 dB)频率, $\omega_H = 2\pi f_H$
f_σ, f_β	分别表示共基 BJT 和共射 BJT 的截止频率

f_T	特征频率
7. g_m	低频跨导
8. I, i	电流通用符号
$I_{EQ}, I_{BQ}, I_{CQ}, I_{DQ}$	分别表示射、基、集、漏极直流工作点电流
i_C, i_B, i_E, i_D	分别表示集、基、射、漏极总瞬时值电流
i_s	信号源电流
I_{IO}	输入失调电流
I_{IB}	输入偏置电流
I_S	PN 结反向饱和电流
I_{DSS}	结型、耗尽型 FET 在 $u_{GS}=0$ 时的 I_D 值
I_D	二极管电流, FET 的漏极电流
I_F, I_R	分别表示正向电流和反向电流
I_{ES}	晶体管发射结反向饱和电流
I_{CBO}	发射极开路时的集电结反向饱和电流
I_{CEO}	基极开路时的穿透电流
I_{CM}	集电极最大允许电流
I_{SE}	门电路输入短路电流
I_{RE}	门电路反向漏电流
9. k	玻尔兹曼常数
K_{CMR}	共模抑制比
10. n_i	本征半导体中的电子浓度
n	杂质半导体中的电子浓度
11. P_C	集电极耗散功率
P_V	直流电源供给功率
P_T	BJT 的管耗
P_{CM}	集电极最大允许功耗
p_i	本征半导体中的空穴浓度
p	杂质半导体中的空穴浓度
12. Q	品质因数
13. R_B	基极直流偏置电阻
R_E	发射极直流偏置电阻
R_C	集电极直流偏置电阻
R_G	栅极直流偏置电阻
R_D	漏极直流偏置电阻
R_s	信号源内阻
$R_F (R_f)$	反馈电阻
R_L	负载电阻
R_{IC}, R_{ID}	差模输入电阻、共模输入电阻
R_{OC}, R_{OD}	差模输出电阻、共模输出电阻



R_{off}	关门电阻
R_{on}	开门电阻
R_i, R_o	放大器的交流输入和输出电阻
$R_{\text{if}}, R_{\text{of}}$	反馈放大器的交流输入和输出电阻
$r_{\text{bb1}'}$	基区体电阻
$r_{\text{b'e}}$	发射结微变等效电阻
$r_{\text{b'c}}$	集电结电阻
r_{ce}	集电结输出电阻
r_e	发射结电阻
$r_{\text{gs}}, r_{\text{ds}}$	FET 的动态电阻
r_z	稳压管的动态电阻
14. S_R	运算放大器的转换速率
S_r	稳压系数
S_u	电压调整率
S_i	电流调整率
S_{rin}	纹波抑制比
S_T	输出电压的温度系数
15. T	温度, 周期
t	时间
t_{pd}	门电路平均延迟时间
16. $U_{\text{BQ}}, U_{\text{CQ}}, U_{\text{EQ}}, U_{\text{GQ}}, U_{\text{DQ}}, U_{\text{SQ}}$	分别表示相应电极的直流工作点电位
$U_{\text{BEQ}}, U_{\text{CEQ}}, U_{\text{DSQ}}, U_{\text{GSQ}}$	分别表示相应电极间的直流工作点电压
$u_{\text{BE}}, u_{\text{CE}}, u_{\text{DS}}, u_{\text{GS}}$	分别表示相应电极间的总瞬时值电压
$u_i, u_o, u_{\text{be}}, u_{\text{ce}}, u_{\text{ds}}, u_{\text{gs}}$	分别表示输入、输出和相应电极间的交流电压分量
u_s, U_s	分别表示信号源电压及其有效值
$\dot{U}_s, \dot{U}_i, \dot{U}_o, \dot{U}_{\text{be}}, \dot{U}_{\text{ce}}, \dot{U}_{\text{ds}}, \dot{U}_{\text{gs}}$	分别表示对应交流分量的复数值
u_{id}	差模输入电压
u_{ic}	共模输入电压
U_T	温度电压当量(热力学电压), 门电路的阈值电压
$U_{\text{GS(th)}}$	增强型 MOSFET 开启(阈值)电压
$U_{\text{GS(off)}}$	结型 FET 的夹断电压, 耗尽型 MOSFET 的阈值(或夹断)电压
U_L	低电平
U_H	高电平
U_{on}	开门电平
U_{off}	关门电平
U_{NL}	低电平噪声容限
U_{NH}	高电平噪声容限
U_{IO}	输入失调电压



U_{OO}	输出失调电压
U_{REF}	参考(基准)电压
$U_{(BR)}$	晶体管的击穿电压
$U_{CE(sat)}$	BJT 的饱和电压
U_{φ}	接触电位差
17. $V_{CC}, V_{DD}, +V_S$	正电源电压
$V_{EE}, V_{SS}, -V_S$	负电源电压
18. X, x	电抗
Y, y	导纳
Z, z	阻抗

三、元器件及引脚名称

E、e	双极型三极管的发射极
B、b	双极型三极管的基极
C、c	双极型三极管的集电极
S、s	场效应管的源极
G、g	场效应管的栅极
D、d	场效应管的漏极
D	二极管
T	双极型三极管,场效应管
D_z	稳压管
P	空穴型半导体
N	电子型半导体
T_r	变压器

四、其他符号

$\alpha, \bar{\alpha}$	共基极交、直流电流传输系数(增益)
$\beta, \bar{\beta}$	共射极交、直流电流放大系数(增益)
W/L	MOS 管的宽长比
C_{ox}	MOS 管单位面积的栅极电容
u_n	电子运动的迁移率
η	效率
φ	相位角
φ_m	相位裕量
G_m	增益裕量
ω, Ω	角频率
Q	静态工作点

目 录

第 1 章 电子线路元器件	1
1.1 半导体的基础知识	1
1.1.1 导体、绝缘体和半导体	1
1.1.2 本征半导体	1
1.1.3 杂质半导体	3
1.2 PN 结与半导体二极管	4
1.2.1 PN 结的形成	4
1.2.2 PN 结的单向导电性	6
1.2.3 PN 结的电容特性	8
1.2.4 半导体二极管及其参数	9
1.2.5 二极管的电路模型	11
1.2.6 二极管应用电路	14
1.2.7 特殊二极管	17
1.3 半导体三极管	19
1.3.1 三极管的结构	19
1.3.2 三极管的工作原理	20
1.3.3 三极管的特性曲线	22
1.3.4 三极管的主要参数	24
1.3.5 三极管的小信号模型	26
1.3.6 三极管其他工作模式的等效电路	29
1.4 场效应晶体管	30
1.4.1 结型场效应管	30
1.4.2 绝缘栅型场效应管	33
1.4.3 场效应管的小信号模型	37
1.4.4 场效应管的主要参数	38
1.4.5 场效应管与晶体三极管的比较	39
本章小结	39
思考题	40
习 题	40
第 2 章 放大器基础	47
2.1 放大器的基本概念与技术指标	47
2.1.1 放大器的基本概念	47



2.1.2	放大器的主要技术指标	48
2.2	共射放大器的工作原理与分析方法	51
2.2.1	共射放大器的工作原理	51
2.2.2	分析方法	51
2.2.3	温度对工作点的影响与分压式偏置电路	55
2.3	三种组态三极管放大器的分析与比较	58
2.3.1	共基放大器	58
2.3.2	共集放大器	59
2.3.3	三种组态三极管放大器的比较	60
2.4	场效应管放大器	61
2.4.1	场效应管放大器偏置电路与直流分析	61
2.4.2	场效应管共源放大器交流分析	63
2.4.3	三种组态场效应管放大器的比较	63
2.4.4	场效应管放大器的设计	66
2.5	多级放大器	67
2.5.1	级间耦合方式	67
2.5.2	多级放大器的分析	70
2.6	用 PSPICE 分析放大器	72
	本章小结	75
	思考题	76
	习题	76
第3章	放大器的频率响应	85
3.1	频率响应概述	85
3.1.1	研究放大器频率响应的必要性	85
3.1.2	波特图及简单 RC 电路的频率响应	87
3.2	单级共射放大器的频率响应	89
3.2.1	三极管的频率参数	90
3.2.2	共射基本放大器频率响应分析	92
3.3	共基和共集放大器的频率响应及组合宽带放大器	100
3.3.1	共集放大器的高频响应	100
3.3.2	共基放大器的高频响应	101
3.3.3	组合电路宽带放大器	101
3.4	多级放大器的频率特性	103
3.5	频率响应与阶跃响应	105
3.5.1	阶跃信号与阶跃响应	105
3.5.2	频率响应与阶跃响应的关系	106
3.6	用 PSPICE 分析放大器频率响应实例	107
	本章小结	111



思考题	112
习 题	112
第 4 章 集成运算放大器与模拟乘法器	117
4.1 电流源电路	117
4.2 差分放大电路	123
4.2.1 双极型三极管差分放大电路	123
4.2.2 场效应管差分放大电路	131
4.2.3 差分放大电路的传输特性	133
4.3 双极型集成运算放大器	136
4.3.1 集成运算放大器的基本组成	136
4.3.2 典型集成运算放大器电路分析	137
4.4 场效应管集成运算放大器	138
4.4.1 JFET 输入的集成运算放大器	138
4.4.2 CMOS 集成运算放大器	140
4.5 集成运算放大器的主要技术参数	140
4.6 模拟乘法器	144
本章小结	148
思考题	149
习 题	149
第 5 章 模拟信号运算与处理电路	156
5.1 理想集成运算放大器	156
5.2 基本运算电路	158
5.2.1 比例运算电路	158
5.2.2 求和运算电路	161
5.2.3 积分和微分运算电路	165
5.2.4 对数和反对数运算电路	167
5.2.5 模拟乘法器的应用电路	169
5.2.6 非理想集成运放运算电路的误差分析	173
5.3 有源滤波器	176
5.3.1 滤波电路的作用与分类	176
5.3.2 一阶有源滤波器	177
5.3.3 二阶有源滤波器	178
5.3.4 状态变量滤波器	185
5.3.5 开关电容滤波器	187
5.4 电压比较器	189
5.4.1 单门限比较器	190
5.4.2 迟滞比较器	191



5.4.3 窗口比较器	194
5.4.4 集成电压比较器	195
5.5 用 PSPICE 分析集成运算放大器应用电路	197
本章小结	198
思考题	199
习 题	200
第 6 章 反馈放大器	211
6.1 反馈的基本概念与分类	211
6.1.1 反馈的基本概念	211
6.1.2 反馈的分类与判断	211
6.1.3 反馈放大电路的方框图表示及其一般表达式	219
6.2 负反馈对放大电路性能的影响	221
6.2.1 提高放大倍数的稳定性	221
6.2.2 减小非线性失真	222
6.2.3 扩展通频带	223
6.2.4 抑制内部噪声与干扰	224
6.2.5 对输入电阻和输出电阻的影响	225
6.2.6 负反馈的正确引入原则	228
6.3 深度负反馈放大电路的分析计算	228
6.3.1 深度负反馈的特点	229
6.3.2 深度负反馈放大电路的计算	229
6.4 负反馈放大电路的稳定性分析	234
6.4.1 负反馈放大电路的自激振荡与稳定工作条件分析	234
6.4.2 常用的频率补偿方法	236
6.5 用 PSPICE 分析反馈放大器	240
本章小结	241
思考题	242
习 题	243
第 7 章 功率电路	252
7.1 功率电路与功率器件概述	252
7.1.1 功率放大电路	252
7.1.2 电源变换电路	254
7.1.3 功率器件	254
7.2 互补推挽功率放大电路	259
7.2.1 乙类互补推挽放大电路	259
7.2.2 甲乙类互补推挽电路	263
7.2.3 单电源互补推挽电路	265



7.2.4 采用复合管的功率输出级	266
7.3 丁类功率放大电路简介	267
7.4 集成功率放大器	270
7.5 线性直流稳压电源	273
7.5.1 整流电路	274
7.5.2 滤波电路	276
7.5.3 串联型线性直流稳压电路	279
7.6 开关型直流稳压电源	292
7.6.1 串联开关型直流稳压电路	293
7.6.2 并联开关型直流稳压电路	295
7.6.3 开关型集成稳压器	296
7.7 用 PSPICE 分析功率电路的实例	299
本章小结	304
思考题	305
习 题	306
第 8 章 逻辑门电路	315
8.1 CMOS 逻辑门电路	315
8.1.1 场效应管的开关特性	315
8.1.2 CMOS 反相器	316
8.1.3 CMOS 与非门	317
8.1.4 CMOS 或非门	319
8.1.5 其他类型的 CMOS 门电路	320
8.1.6 高速 CMOS 门电路	326
8.1.7 低电压 CMOS 门电路	327
8.1.8 CMOS 门电路的技术参数	328
8.2 TTL 逻辑门电路	335
8.2.1 三极管的开关特性	335
8.2.2 TTL 与非门	337
8.2.3 TTL 与非门的电压传输特性及噪声容限	338
8.2.4 TTL 与非门的静态输入、输出特性	339
8.2.5 其他类型的 TTL 门电路	343
8.2.6 各种系列 TTL 数字电路	346
8.3 CMOS 电路和 TTL 电路的接口	348
8.3.1 用 CMOS 电路驱动 TTL 电路	348
8.3.2 用 TTL 电路驱动 CMOS 电路	349
本章小结	350
思考题	351
习 题	352



第9章 波形产生电路	361
9.1 正弦波振荡电路	361
9.1.1 正弦波振荡电路的基本工作原理	361
9.1.2 RC正弦波振荡电路	364
9.1.3 LC正弦波振荡电路	368
9.1.4 石英晶体振荡器	375
9.2 非正弦波信号发生器	378
9.2.1 矩形波信号发生器	378
9.2.2 三角波信号发生器	385
9.2.3 锯齿波信号发生器	386
9.2.4 压控振荡器	387
9.3 集成多功能信号发生器	389
9.3.1 5G8038的基本工作原理	389
9.3.2 5G8038的应用电路	390
9.4 用PSPICE分析振荡电路实例	391
本章小结	398
思考题	399
习题	400
第10章 数/模和模/数转换电路	407
10.1 数/模转换器	407
10.1.1 权电阻网络D/A转换器	407
10.1.2 倒T形电阻网络D/A转换器	409
10.1.3 开关树形D/A转换器	411
10.1.4 D/A转换器的主要技术指标	412
10.1.5 集成D/A转换器	416
10.1.6 D/A转换器应用	418
10.2 模/数转换器	420
10.2.1 模/数转换的基本原理	420
10.2.2 并联比较型A/D转换器	424
10.2.3 反馈比较型A/D转换器	425
10.2.4 双积分型A/D转换器	427
10.2.5 $\Sigma-\Delta$ 型A/D转换器	429
10.2.6 A/D转换器的主要技术指标	432
10.2.7 集成A/D转换器	433
10.2.8 A/D转换器的典型应用	434
本章小结	438
思考题	439



习 题	439
第 11 章 模拟电子系统设计	441
11.1 电子系统概述	441
11.1.1 电子系统的定义与组成	441
11.1.2 电子系统设计的方法	441
11.1.3 电子系统设计的步骤	442
11.1.4 电子系统设计的原则	443
11.2 模拟电子系统	444
11.2.1 模拟电子系统的特点	444
11.2.2 模拟电子系统的设计流程	444
11.2.3 模拟电子电路的概念和指标	447
11.3 电路中的干扰及消除方法	451
11.3.1 电磁干扰源及其耦合途径	452
11.3.2 接地技术	454
11.3.3 屏蔽技术	457
11.3.4 滤波技术	458
11.3.5 提高 EMC 的措施	459
11.4 模拟滤波器设计及实例	461
11.4.1 模拟有源滤波器类型	461
11.4.2 常见模拟滤波器电路结构	464
11.4.3 设计实例——心电信号放大器设计	467
11.5 低频功率放大器设计	469
11.6 多路数据采集系统设计	477
11.7 数字化语音存储与回放系统设计	486
本章小结	492
思考题	492
设计训练题	493
参考文献	498

第 1 章 电子线路元器件

本章主要介绍半导体器件,包括二极管、三极管、场效应管等,为后续各章讨论由半导体器件构成的电子线路打下基础。在介绍半导体基础知识的基础上,介绍半导体器件。在介绍半导体器件时,围绕每种器件的工作原理、特性曲线、性能参数和等效电路四方面展开。

1.1 半导体的基础知识

1.1.1 导体、绝缘体和半导体

在自然界中,有的物质很容易导电,如铜、铝、铁、银等,称之为导体;有的物质不导电,如塑料、陶瓷、石英、橡胶等,称之为绝缘体;此外,还有另一类物质,其导电性能介于导体和绝缘体之间,称之为**半导体 (semiconductor)**。常用的半导体材料有硅(Si)、锗(Ge)、砷化镓(GaAs)等,其中硅应用最广。

1.1.2 本征半导体

本征半导体 (intrinsic semiconductor)就是纯净且晶格方向一致的半导体晶体。常用的半导体材料硅和锗的原子序数分别为 14 和 32,相应的结构如图 1.1(a)所示。它们的最外层电子都是 4 个,所以都是 4 价元素。外层的电子受原子核的束缚力最小,决定着物质的化学性质和导电能力,称之为**价电子**。研究半导体导电性能时,常用价电子与惯性核组成的简化模型,惯性核由原子核和内层电子组成,带有四个正的电子电荷量,如图 1.1(b)所示。

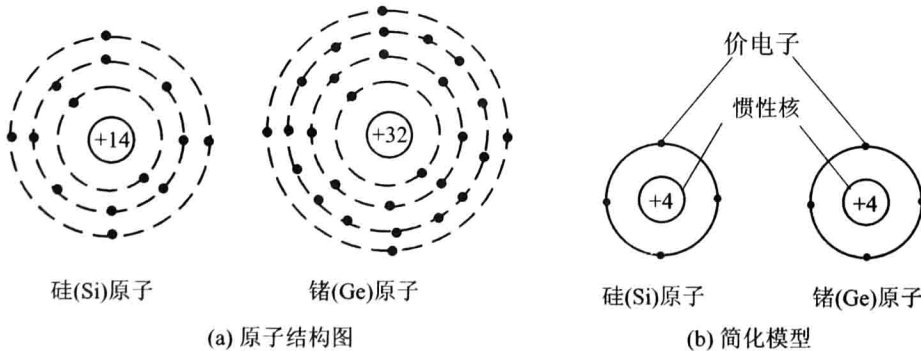


图 1.1 硅和锗原子结构模型

硅或锗制成晶体后,原子之间靠得很近,价电子不仅受到自身原子核的约束,还受到相邻原子核的吸引,使得每两个相邻原子之间共有一对价电子,从而形成了晶体中的**共价键结构 (covalent bond structure)**,如图 1.2 所示。

共价键中的电子,由于受到其原子核的吸引,是不能在晶体中自由移动的,只有获得足够的能量后才能挣脱共价键的束缚,成为**自由电子**。在绝对零度 ($T = 0 \text{ K}$) 和无外界激发时,硅或锗晶体中没有自由电子存在。在有外界激发的情况下,例如常温下 ($T = 300 \text{ K}$),少数