



GH

中等专业学校 规划教材
工科电子类

郑应光 王维平

模拟电子线路

(低频部分)

MONI
DIANZI
XIANLU

电子科技大学出版社

[川]新登字 016 号

内 容 提 要

《模拟电子线路》为八五统编教材,分为低频部分和高频部分,本书为低频部分。全书共分八章,内容包括:半导体器件、放大电路基础、放大器的频率响应、放大电路中的负反馈、集成运放及其应用、宽频带放大器、低频功率放大器和直流稳压电源。本书内容新颖,力图反映电子技术的新进展。

本书可作为中专无线电技术类专业以及技校、职高相应专业的教材或教学参考书,并适合从事电子行业工作的技术员、工人以及广大的无线电爱好者的自学或参考。

模拟电子线路

(低频部分)

郑应光 王维平

*

电子科技大学出版社出版

(成都建设北路二段四号)邮编 610054

电子科技大学出版社印刷厂印刷

四川省新华书店经销

*

开本 787×1092 1/16 印张 28.75 字数 696.62 千字

版次 1995 年 3 月第一版 印次 1995 年 3 月第一次印刷

印数 1--12000 册

ISBN 7-81043-112-9/TN·12

定价:18.00 元

前 言

本教材是根据电子工业部(原中国电子工业总公司)《中等专业学校无线电技术专业(模拟电子线路)(含低频电子线路、高频电子线路)教学大纲》编写的,并经电子工业部中专电子技术类专业教学指导委员会组织的审稿会审定通过。

《模拟电子线路》分为低频部分、高频部分出版,两部分之间既相对地独立,又有机地联系在一起。本书为《模拟电子线路》(低频部分)。

当前,电子技术的发展日新月异,新的器件、新的电路不断出现。面对着电子技术的飞速发展,考虑到《模拟电子线路》是中专无线电技术专业的核心基础课程,如何编写一本符合教育改革精神、反映电子技术的新进展而又具有中专特色的教材,无疑是一个艰巨的任务。本书力求做到科学性与通俗性的有机结合,着重于讲清物理意义,避免繁琐的公式推导。在编写时主要解决下述两个矛盾:

1. 集成电路与分立元件电路的矛盾

由于集成电路的飞速发展,集成电路正迅速地取代大部分的分立元件电路,因此教材必须突出集成电路。但是,集成电路和分立元件电路都是由半导体器件构成的,它们的基本工作原理是相同的,仅是电路结构、性能特点和设计考虑上有所不同,没有分立元件电路的基础就不能讲清集成电路,更何况目前分立元件电路还没有完全被集成电路所取代,因此教材还必须兼顾分立元件电路。本着这一精神,本书对分立元件电路的内容作了适当的压缩,并把集成运放的某些基本单元电路提前在第二章中介绍。为了能在负反馈电路中以集成运放为对象进行讨论,本书在第二章中通过简单差动放大电路引出集成运放的概念及其电路符号。

2. 教材的先进性与篇幅的有限性矛盾

解决这一矛盾的措施是:在保证基本概念、基本理论和基本分析方法的前提下,精减或删除一部分无关大局或较为繁杂的内容,并适当介绍新器件和电路,以体现教材的先进性。例如,本书介绍了发光二极管、光电二极管、光电三极管、VMOS 功率场效应管及有关电路,专门讨论了有源负载放大电路和开关式直流稳压电源,加强了集成运放的应用(如开关电容滤波器)等。

为了巩固所学的内容,更好地掌握基本理论和基本分析方法,培养学生分析问题和解决问题的能力,本书选取了较多的习题,使教师在教学时有充分的选择余地,同时也便于学生的课后练习。

书中打星号(*)内容可不讲授。

本书是按先器件、后电路的形式进行编写的,其优点是系统性强,且便于较快地介绍集成电路。在使用本书时,教师可灵活地处理。例如,在介绍一种器件后,可接着分析其有关电路等。

本书书稿由黄文洁等同志整理和抄写。

本书由南京无线电工业学校郑应光主编。其中,绪论、第一至第五章由郑应光编写,第六

章由郑应光和王维平合编,第七、八章由王维平编写,最后由郑应光定稿。本书由武汉无线电工业学校陈继生高级讲师和福建电子工业学校潘平仲高级讲师主审。他们认真审阅了教材的原稿,指出了书稿中的不妥之处,并提出了许多的宝贵意见。上海电子技术学校吴汉森高级讲师、南京电力高等专科学校张若辉高级讲师和常州无线电工业学校唐文源高级讲师等参加了审稿会,他们都提出了宝贵的意见。其中吴汉森高级讲师为本书的责任编委,在本书的编写和审稿过程中做了大量的工作。编者在此对以上同志表示衷心的感谢。编者还要对电子工业部中专电子技术类专业教学指导委员会主任俞家琦副教授表示深切的谢意,他在编写大纲和书稿的形成过程中提出了许多中肯的建议,并给予热情的指导。此外,南京无线电工业学校的领导对本书的编写工作给予大力的支持,为本书的出版创造了良好的条件。

由于编者水平有限,书中一定存在许多错误及不当之处,期望得到广大读者的批评指正。

编 者

1994年6月于南京

本书常用符号表

一、基本符号

I, i	电流	L	电感
U, u	电压	C	电容
P, p	功率	M	互感
R, r	电阻	A	放大倍数, 增益
G, g	电导	t	时间
X, x	电抗	f, F	频率
Z, z	阻抗	ω, Ω	角频率
Y, y	导纳		

二、电流和电压

1. 原则(以基极电流为例)

I_B	直流(静态)值		(峰值)
i_b	交流(正弦)瞬时值	i_B	总瞬时值
I_b	交流(正弦)有效值	I_{BAV}, i_{BAV}	平均值
I_b	交流(正弦)的复数量	I_{BM}	总的最大值
I_{bm}	交流(正弦)的最大值	Δi_B	i_B 的变化量

2. 其他

u_i, i_i	输入交流电压、电流的瞬时值	u_v, u_n	集成运放的反相输入端电压
u_o, i_o	输出交流电压、电流的瞬时值	u_{ic}	共模输入电压
u_s, i_s	交流信号源电压、电流的瞬时值	u_{id}	差模输入电压
U_{REF}, I_{REF}	参考(或基准)电压、电流	V_{CC}	集电极回路电源对地电压
u_f, i_f	反馈电压、电流的瞬时值	V_{DD}	漏极回路电源对地电压
u_P, u_P	集成运放的同相输入端电压	U_{IO}, I_{IO}	输入失调电压、电流
		U_{omax}, I_{omax}	最大输出电压、电流的幅值

三、功率

P_o	输出交变功率	P_c	集电极耗散功率
P_{om}	最大输出功率	P_V	电源消耗的功率

四、频率

f_{bw}	通频带(带宽)		下降 3dB 截止频率
f_H	上限(下降 3dB)截止频率	f_0	中心频率, 振荡频率
f_L	下限(下降 3dB)截止频率	f_c	单位增益带宽
f_{HF}, f_{Lf}	反馈放大器的上限、下限(均)		

五、电阻

R_i	电路的输入电阻	R_o	电路的输出电阻
-------	---------	-------	---------

R_{if}, R_{of}	反馈放大器的输入电阻与输出电阻	R_s	信号源内阻
R_L	负载电阻	R_i	集成运放同相输入端外接电阻
		R_o	集成运放反相输入端外接电阻

六、放大倍数或增益

A_u, A_{us}	电压放大倍数, 源电压放大倍数	A_{uf}	有反馈时的电压放大倍数, 余类推
A_i, A_{is}	电流放大倍数, 源电流放大倍数	A_{usf}	有反馈时的源电压放大倍数, 余类推
A_r	互阻放大倍数	A_{um}	中频电压放大倍数的复数量
A_g	互导放大倍数	A_{uh}	高频电压放大倍数的复数量
A_{uc}	共模电压放大倍数	A_{ul}	低频电压放大倍数的复数量
A_{ud}	差模电压放大倍数		

七、器件参数

1. 晶体二极管

a	阳极(正极)	C_b	势垒电容
k	阴极(负极)	C_d	扩散电容
U_T	温度的电压当量	C_j	结电容
U_{A0}	平衡时 PN 结的内建电位差	I_F	正向电流
U_{on}	二极管(或三极管)导通电压	f_M	最高工作频率
$U_{(BR)}$	击穿电压	D	二极管
I_{sat}	反向饱和电流	D_z	稳压管
I_R	反向电流		

2. 晶体三极管

b	基极	g_m	跨导
c	集电极	α	共基极(交流)电流放大系数
e	发射极	β	共发射极(交流)电流放大系数
I_{CBO}	发射极开路时 $c-b$ 间的反向电流	f_α	共基截止频率
I_{CEO}	基极开路时 $c-e$ 间的穿透电流	f_β	共射截止频率
I_{CM}	集电极最大允许电流	f_T	特征频率
$U_{(BR)CBO}$	发射极开路时 $c-b$ 间的击穿电压	f_{max}	最高振荡频率
$U_{(BR)CEO}$	基极开路时 $c-e$ 间的击穿电压	$r_{bb'}$	基区体电阻
$U_{(BR)CER}$	$b-e$ 间接入电阻时 $c-e$ 间的击穿电压	r_{be}	发射结微变等效电阻(结层电阻)
$U_{(BR)CES}$	$b-e$ 间短路时 $c-e$ 间的击穿电压	r_{ce}	共射接法下 $b-e$ 间的微变电阻
$U_{CE(sat)}$	$c-e$ 间的饱和压降	C_{ve}	共射接法下 $c-e$ 间的微变电阻
P_{CM}	集电极最大允许耗散功率	C_{vc}	发射结结电容
		T	集电结结电容
			半导体三极管

3. 场效应管

D	漏极	$U_{GS(th)}$	增强型管的开启电压
G	栅极	$U_{(BR)DS}$	漏源间的击穿电压
S	源极	P_{DM}	漏极最大允许耗散功率
I_{DSS}	耗尽型管 $u_{GS}=0$ 时的漏极电流	C_{gs}	栅源电容
I_{DO}	增强型管 $u_{GS}=2U_{GS(th)}$ 时的漏极电流	C_{gd}	栅漏电容
$U_{GS(off)}$	耗尽型管的夹断电压	r_{ds}	漏极输出电阻

4. 集成运放

I_{IB}	输入偏置电流	K_{CMR}	共模抑制比
S_R	转换速率	U_{idmax}	最大差模输入电压
A_{od}	开环电压增益	U_{icmax}	最大共模输入电压

八、其他符号

Q	品质因数, 工作点	F	反馈系数
n	变压器的变比	φ	相位角
γ	变容管的变容指数	ϕ	时钟脉冲
τ	时间常数	S	整流电路中的脉动系数
THD	非线性失真系数	S_r	稳压电路中的稳压系数
η	效率		

目 录

绪 论	1
第一章 半导体器件	3
§ 1-1 半导体的基本知识	3
1-1-1 本征半导体	3
1-1-2 杂质半导体	5
1-1-3 PN 结	7
§ 1-2 半导体二极管	12
1-2-1 二极管的结构和类型	12
1-2-2 二极管的伏安特性	13
1-2-3 二极管的等效电路	15
1-2-4 二极管的主要参数及其选择	20
§ 1-3 特殊二极管简介	21
1-3-1 稳压二极管	21
1-3-2 变容二极管	23
1-3-3 光电二极管	24
1-3-4 发光二极管	24
1-3-5 隧道二极管	25
§ 1-4 双极型三极管	26
1-4-1 三极管的结构与分类	26
1-4-2 三极管的放大原理	27
1-4-3 三极管的共射特性曲线	35
1-4-4 三极管的主要参数	38
1-4-5 三极管的 H 参数等效电路	43
§ 1-5 场效应管	49
1-5-1 结型场效应管	50
1-5-2 绝缘栅型场效应管	56
1-5-3 各类场效应管的比较	61
1-5-4 场效应管和三极管的比较	63
1-5-5 场效应管的微变等效电路	64
§ 1-6 集成电路简介	65
1-6-1 集成电路的分类	65
1-6-2 集成电路的制造工艺简介	66
1-6-3 集成电路中的元器件	69
1-6-4 集成电路中元器件的特点	71

1-6-5 集成电路的封装形式	72
小 结	72
本章附录	73
附录 1-1 常用二极管的型号、意义和用途	73
附录 1-2 国产半导体器件的型号命名法	74
附录 1-3 常用三极管的型号、意义和用途	75
附录 1-4 场效应管的型号、意义和用途	75
习题一	75
第二章 放大电路基础	81
§ 2-1 放大电路的基本概念	81
2-1-1 放大电路的基本框图	81
2-1-2 放大电路的性能指标	82
§ 2-2 共射基本放大电路	87
2-2-1 电路的组成和元器件的作用	87
2-2-2 工作原理	89
§ 2-3 放大电路的分析方法	91
2-3-1 直流通路和交流通路	91
2-3-2 图解法	92
2-3-3 微变等效电路法	99
2-3-4 两种分析方法的比较	101
§ 2-4 工作点稳定的电路	104
2-4-1 温度对固定偏流电路工作点的影响	104
2-4-2 分压式偏置电路	106
§ 2-5 共集电路和共基电路	112
2-5-1 共集电路	112
2-5-2 共基电路	117
2-5-3 放大电路三种基本组态的比较	119
§ 2-6 级间耦合和多级放大电路	120
2-6-1 阻容耦合多级放大电路	121
2-6-2 电隔离耦合多级放大电路	124
2-6-3 直接耦合多级放大电路	126
§ 2-7 场效应管放大电路	132
2-7-1 场效应管的偏置电路及静态分析	132
2-7-2 场效应管放大电路的动态分析	135
§ 2-8 电流源电路	138
2-8-1 三极管电流源电路	138
2-8-2 场效应管电流源电路	140
2-8-3 镜象电流源电路	141
2-8-4 微电流源电路	142

2-8-5 比例式电流源电路	143
2-8-6 多路电流源电路	144
§ 2-9 有源负载放大电路	145
2-9-1 有源负载的概念	145
2-9-2 三极管有源负载放大电路	146
2-9-3 MOS管有源负载放大电路	147
小 结	149
习题二	151
第三章 放大器的频率响应	167
§ 3-1 频率响应的基本概念和基本分析	167
3-1-1 频率响应的基本概念	167
3-1-2 RC电路的频率响应	170
§ 3-2 半导体管的高频等效电路和频率参数	174
3-2-1 三极管的共射混合 π 型等效电路	174
3-2-2 三极管的频率参数	178
3-2-3 场效应管的高频等效电路和频率参数	182
§ 3-3 放大器的频率响应	183
3-3-1 单级RC共射放大器的频率响应	183
3-3-2 放大器的增益带宽积	193
3-3-3 多级放大器的频率响应	194
3-3-4 共基放大器和共集放大器的频率响应	197
小 结	199
习题三	200
第四章 放大电路中的负反馈	203
§ 4-1 反馈的基本概念	203
4-1-1 反馈	203
4-1-2 反馈形式及其判别	205
§ 4-2 负反馈放大器的组态和方框图表示法	210
4-2-1 负反馈放大器的组态	210
4-2-2 负反馈放大器的方框图	215
4-2-3 负反馈放大器的一般表达式	216
§ 4-3 负反馈对放大器性能的影响	217
4-3-1 提高放大倍数的稳定性	217
4-3-2 减小非线性失真	218
4-3-3 扩展频带	219
4-3-4 改变输入电阻和输出电阻	221
4-3-5 引入负反馈的一般原则	223
§ 4-4 负反馈放大器的计算	224

4-4-1 用微变等效电路法计算简单负反馈放大器	225
4-4-2 深度负反馈放大器的计算	225
* 4-4-3 方框图法	230
§ 4-5 负反馈放大器的稳定性	233
4-5-1 负反馈放大器的自激振荡	234
4-5-2 负反馈放大器的稳定	234
小 结	239
习题四	239
第五章 集成运算放大器及其应用	247
§ 5-1 集成运放的特点及组成	247
5-1-1 集成运放的特点	247
5-1-2 集成运放的组成	248
§ 5-2 差动放大器	248
5-2-1 差动放大器的基本概念	248
5-2-2 射极耦合差动放大器	250
5-2-3 差动放大器的四种接法	255
5-2-4 具有恒流源的差动放大器	252
5-2-5 失调与调零	260
5-2-6 场效应管差动放大器	263
§ 5-3 集成运放内部电路简介	263
5-3-1 集成运放的基本单元电路	263
5-3-2 F007 双极型集成运放	268
5-3-3 MC14573 CMOS 型集成运放	271
* 5-3-4 专用型集成运放	272
§ 5-4 集成运放的主要参数	273
§ 5-5 集成运放的理想化及基本电路	277
5-5-1 理想运放	277
5-5-2 集成运放的三种基本电路	278
* 5-5-3 非理想运放电路的误差分析	285
§ 5-6 集成运放的线性应用	289
5-6-1 运算电路	289
5-6-2 放大电路	305
5-6-3 有源滤波器	309
* 5-6-4 开关电容滤波器	321
§ 5-7 集成运放的非线性应用	323
5-7-1 电压比较器	323
5-7-2 非正弦波形发生器	330
§ 5-8 集成运放应用中的一些问题	334
5-8-1 调零	334

5-8-2 消除自激	335
5-8-3 保护电路	335
5-8-4 性能的扩展	336
小 结	337
习题五	338
第六章 宽频带放大器	350
§ 6-1 宽频带放大器的特点和主要技术指标	350
6-1-1 宽带放大器的主要特点和分析方法	350
6-1-2 宽带放大器的主要技术指标	352
§ 6-2 扩展放大器通频带的方法	353
6-2-1 补偿法	353
6-2-2 负反馈法	358
6-2-3 组合电路法	361
6-2-4 集成宽带放大器	363
小 结	365
习题六	365
第七章 低频功率放大器	368
§ 7-1 低频功率放大器的特点及主要指标	368
7-1-1 低频功率放大器的特点	368
7-1-2 低频功率放大器的主要技术指标	370
7-1-3 功率放大器获得高效率的条件	371
§ 7-2 互补对称功率放大器	373
7-2-1 乙类互补对称电路	373
7-2-2 甲乙类互补对称电路	376
7-2-3 单电源互补对称电路	380
§ 7-3 BTL 功率放大器	381
7-3-1 基本电路及原理	381
7-3-2 BTL 倒相电路	382
§ 7-4 集成功率放大器	383
7-4-1 F4100 集成功放	383
7-4-2 F4100 应用举例	384
§ 7-5 VMOS 功率放大器	386
7-5-1 VMOS 功率场效应管	386
7-5-2 VMOS 功率放大器	387
§ 7-6 功率管的安全使用	389
7-6-1 功率管的散热及二次击穿	389
7-6-2 功率管的保护	391
* § 7-7 变压器耦合功率放大器	393

7-7-1 互补对称电路的优缺点	393
7-7-2 乙类变压器耦合功率放大器	394
小 结	396
习题七	397
第八章 直流稳压电源	404
§ 8-1 直流稳压电源的组成及主要技术指标	404
8-1-1 直流稳压电源的组成及特点	404
8-1-2 直流稳压电源的主要技术指标	405
§ 8-2 整流滤波电路	407
8-2-1 单相整流电路	407
8-2-2 滤波电路	411
§ 8-3 稳压管稳压电路	415
8-3-1 电路组成及原理	416
8-3-2 限流电阻的选择	417
§ 8-4 串联负反馈式稳压电路	418
8-4-1 电路组成及原理	418
8-4-2 性能分析及提高性能的措施	419
8-4-3 三端式集成稳压器的原理及应用	423
§ 8-5 开关式直流稳压电源	428
8-5-1 开关式直流稳压电源的组成原理	428
8-5-2 开关稳压电源的主要技术指标	432
小 结	433
习题八	434
主要参考文献	440
部分名词术语汉英对照表	441

绪 论

自 19 世纪麦克斯韦和赫兹分别从理论和实践两个方面揭示出电磁波的存在后,一门新兴的学科——无线电电子学(简称电子学)就诞生了。在短短的一个多世纪内,电子学得到飞速的发展。与此同时,作为研究和应用电子学的技术,即电子技术,也取得惊人的进步。

现在,由于电子技术的影响面广、渗透力强、发展速度快和富于生命力,使得它的应用日益广泛。在现代的科学研究中,科学家使用的先进的科学仪器离不开电子技术;在国民经济的各个部门,电子技术不仅广泛地应用于工农业生产,而且渗透到各个领域。无论是通信、广播、电视、计算机、自动化设备、电子医疗器械、新型武器、人造卫星和宇宙航行等,还是人们日常生活中已须臾不可缺少的家用电器,都是离不开采用电子技术制造出来的各种电子设备。

各种电子设备主要由电子线路构成的。电子线路是指由电子器件(如电子管、半导体管、集成电路等)和电路元件(如电阻、电容、电感和互感等)组成的具有一定功能的电路。因此,电子线路的核心是电子器件。电子器件的每一次重大的改进和发明,都扩大了电子线路的功能,促进了电子技术水平的提高;反之,人们在科学实践和生产实践中对新的电子技术的需求,将转化为对电子线路新的功能和更高的性能指标的需求,这就促进了电子器件的改进和新的电子器件的诞生。

1904 年开始出现的电真空器件(电子管),使电子技术进入兴旺发达的第一个时代——电子管时代。从此,无线电通信、广播、电视、雷达、导航和计算机等开始出现,并得到了迅速的发展。

但是,由于电子管组成的电子设备的体积大、重量重、耗电多、寿命短和抗振性差等缺点,迫使人们去寻找新的电子器件。1948 年开始出现的半导体器件,使电子技术进入了晶体管时代。由于和电子管相比,晶体管具有体积小、重量轻、耗电省、抗振性好和直流电源电压低等优点,因此在许多应用领域中,晶体管迅速取代了电子管。但是,在高频和大功率的领域中,电子管仍然具有晶体管无法完全替代的优势地位。

晶体管的出现和广泛使用,开始了电子设备小型化和微型化的进程。无论是电子管还是晶体管,由于它们组成的电路都是由一个个独立的电子器件和电路元件构成的(称为分立元件电路),因此电子设备的小型化和微型化受到了限制。为此,人们经过大量的探索和实践,终于在 60 年代初制造出集成电路,电子技术也进入了集成电路时代。集成电路是一种新型的半导体器件,它把半导体管和电阻、电容以及它们之间的连线制作在一小块硅基片上,构成特定功能的电子电路。由于集成电路的体积更小、重量更轻、耗电更省、可靠性更高,并且还具有成本低、电性能优良和便于安装调试等一系列突出优点,因此它的发展速度十分迅速,从小规模历经中规模、大规模而发展到超大规模,使电子技术进入超大规模集成电路时代。集成电路的发展,打破了器件和电路的界限,使电子设备的小型化和微型化成为现实,因此在许多场合迅速取代了分立元件电路,应用范围日益扩大。尤其在

计算机、卫星通信、宇宙航行和新型武器等领域中，集成电路对它们的发展起着非常重要的作用。

电子线路可分为分布参数电路和集中参数电路两大类，前者将在《电磁场与电磁波技术》或有关课程中介绍，后者按照处理的信号形式不同，又分为模拟电子线路和数字电路。时间上和数值上都是不连续（离散）的信号称为数字信号，数字电路则是产生和处理数字信号的电路，它将在《脉冲与数字电路》中介绍。时间上和数值上都是连续的信号称为模拟信号，它是指模拟真实世界物理量（如声音、温度、压力等）的电压或电流，其变化是连续和平滑的，而模拟电子线路则是产生和处理模拟信号的电路。

《模拟电子线路》是无线电技术专业最重要的专业基础课之一，它在专业的课程设置中起着承上启下的重要作用。本书为《模拟电子线路》（低频部分），共八章，主要是介绍各种半导体器件和电子线路的基本概念，分析了一些基本单元电路。通过本课程的学习，应达到下述的要求：了解各种电子器件的工作原理，熟悉它们的主要参数和外特性；掌握各种基本单元电路的组成、工作原理和基本分析方法（如图解法、微变等效电路法）；了解模拟集成电路的工作原理和性能特点，熟练掌握它的各种应用电路；学会根据需要选择合适的电路，培养分析和解决电子技术问题的能力，并能阅读和分析电子设备中简单的电原理图。此外，由于电子线路是一门实践性很强的课程，为了加深对书本知识的理解和加强动手能力的培养，一定要重视实验和其他实践性环节（如课程设计等）。

面对电子技术的飞速发展，新的器件和新的电路将层出不穷，作为一本教材，本书不可能囊括模拟电子线路的全部内容和完全反映出电子技术的最新进展。因此，学习本课程时一定要抓住基本概念和基本理论，并注意正确的学习方法，尤其要掌握本课程的一些与数学、物理、电工基础等课程不同的独特分析方法。这些分析方法有：

1. 估算 在数学等课程中，要求计算的结果完全准确。但是，在对电子线路进行分析和计算时，常常根据实际情况作合理的近似，即忽略次要因素，突出主要矛盾，这就是工程估算。采用工程估算的方法，不但可以使计算简单，而且使物理概念更加清楚。否则，如果一味追求“严密”与“精确”，则必然使问题复杂化。更何况由于电子元器件参数的分散性和实际电路中各种寄生因素的影响，任何严格的计算都不可能得到与实际完全一致的精确结果，因此严格的计算也就没有实际意义了。例如，两个阻值相差 10 倍以上的电阻并联，由于它们的数量级不同，则可忽略大阻值的电阻，近似认为并联后的阻值近似等于阻值小的电阻的阻值。

2. 等效 电子线路中的电子器件，其电流与电压关系（称为伏安特性）是非线性的。但是，在一定的条件下，电子器件的非线性特性退居次要的地位，这时就可把它近似看成一个线性器件，于是整个电子线路就可用一个线性电路来等效，从而用线性电路的求解方法进行分析和计算，这就是等效的方法。

本书的授课约需 135 学时，各章的学时分配建议如下（不包括实验）：绪论 1 学时；第一章半导体器件 28 学时；第二章放大电路基础 28 学时；第三章放大器的频率响应 8 学时；第四章放大电路中的负反馈 12 学时；第五章集成运算放大器及其应用 24 学时；第六章宽频带放大器 6 学时；第七章低频功率放大器 12 学时；第八章直流稳压电源 16 学时。

第一章 半导体器件

各种电子线路最重要的组成部分是半导体器件，如半导体二极管、双极型三极管、场效应管和集成电路。本章先讨论构成各种半导体器件基础的PN结，然后分别介绍半导体二极管、双极型三极管和场效应管的结构、工作原理、特性曲线、主要参数和等效电路，最后简单介绍集成电路的分类、制造工艺和元器件的特点，这将为后续各章的学习打下良好的基础。

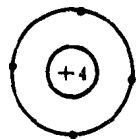
§ 1-1 半导体的基本知识

1-1-1 本征半导体

导体如铜、铝、银等，其内部存在大量的摆脱原子核束缚的电子，即自由电子，在外电场作用下，这些自由电子将逆着电场方向作定向运动而形成较大的电流，因此导体的导电能力强。我们把在电场作用下，能运载电荷形成电流的带电粒子称为载流子。显然，自由电子是一种载流子。而绝缘体如云母、塑料、橡皮等，其原子核对最外层电子的束缚力很大，常温下内部的自由电子很少，因此导电能力很差。半导体则是导电能力介于导体和绝缘体之间的物质，如硅、锗、砷化镓等，最常用的是硅和锗。制造半导体器件的材料都要制成单晶体，单晶硅或单晶锗是由硅或锗原子按一定的规则整齐地排列（称为空间点阵）而成的。由于这种半导体非常纯净，几乎不含杂质，结构又完整，所以称为本征半导体。

1. 本征激发

硅和锗都是四价元素，它们原子的最外层电子都是四个，称为价电子。价电子受原子核的束缚力最小，半导体的导电性能与价电子有关。内层电子与原子核构成稳定的惯性核，若用 $+4$ 代表惯性核所具有的电荷量，则可用图 1-1 来表示硅或锗的简化原子结构模型。



硅或锗制成单晶体后，由于晶体中原子之间距离很近，价电子不仅受到原来所属原子核的作用，而且还受到相邻原子核的吸引，即一个价电子为相邻的两个原子核所共有。这样，相邻原子之间通过共有价电子的形成而结合起来，即形成“共价键”结构。共价键指的是两个相邻原子各拿出一个价电子作为共有价电子所形成的束缚作用。因此，每个硅或锗的原子都以对称的形式和其邻近的四个原子通过共价键紧密地联系起来，如图 1-2 所示，图中两条虚线表示原子间的共价键。

晶体原子间的共价键具有很强的结合力，在绝对温度为零度（写成 0K ，相当于 -273.15°C ）时，价电子不能挣脱共价键的束缚，也就不能自由移动，所以共价键内的价电子又称为束缚电子。这样，本征半导体中虽有大量的价电子，但没有自由电子，此时半导

体是不导电的。当温度升高或受光照射时，价电子以热运动的形式不断从外界获得一定的能量，少数价电子因获得的能量较大而挣脱共价键的束缚，成为自由电子，同时原来的共价键的相应位置上留下一个空位，这个空位称为“空穴”，如图 1-3 所示，其中 A 处为空穴，B 处为自由电子。显然，自由电子和空穴是成对出现的，所以称它们为电子空穴对。我们把在热或光的作用下，本征半导体中产生电子空穴对的现象，称为本征激发。

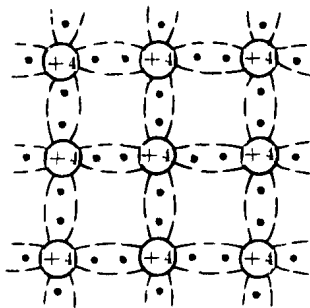


图 1-2 硅或锗晶体中共价键结构示意图

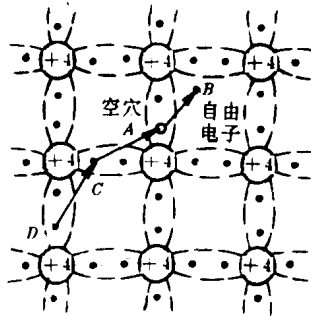


图 1-3 本征激发产生电子和空穴及空穴的移动
· 自由电子 ○ 空穴

2. 两种载流子

本征激发产生的自由电子，将在电场作用下作定向运动形成电流，因此它构成本征半导体中的一种载流子——电子载流子。那么空穴的情况又是怎样呢？

当共价键中失去一个价电子出现一个空穴时，如图 1-3 中的 A 处，与其相邻处于热运动状态的价电子很容易离开它所在的共价键填补到这个空穴中来，使该价电子原来所在的共价键中出现一个空穴，如图 1-3 中的 C 处，这样空穴便从 A 处移至 C 处；同样，邻近的价电子（图中 D 处）又可以填补 C 处的空穴，空穴又从 C 处移到 D 处。因此，空穴可以在半导体中自由移动，实质上是价电子填补空穴的运动。在电场作用下，大量的价电子依次填补空穴的定向运动也形成电流。价电子填补空穴的运动，可以等效为带正电荷的空穴在与价电子运动相反的方向运动。为了区别于自由电子的运动，我们把这种价电子的填补运动称为空穴运动，认为空穴是一种带正电荷的载流子，它所带电量与电子相等，符号相反。那么，为什么我们不说价电子的运动，而说是空穴的运动呢？这是因为本征半导体的导电能力只取决于电子空穴对的多少，而与价电子多少无关。在电场作用下，并非所有的价电子都参与导电，而只是少量价电子在共价键中依次作填补运动才起导电作用。

可见，在本征半导体中存在两种载流子：带负电荷的电子载流子和带正电荷的空穴载流子。我们注意到，金属导体中只有一种载流子——电子载流子，这是二者的一个重要区别。

在本征激发产生电子空穴对的同时，自由电子在运动中有可能和空穴相遇，重新被共价键束缚起来，电子空穴对消失，这种现象称为“复合”。显然，激发和复合是矛盾着的双方。在一定的温度下，激发和复合虽然都在不停地进行，但最终将处于动态平衡状态，这时半导体中的载流子浓度（即 1cm^3 晶体中的载流子数目）保持在某一定值。由于本征激发产生的电子空穴对的数目很少，则本征半导体中载流子浓度很低，其导电能力很弱。