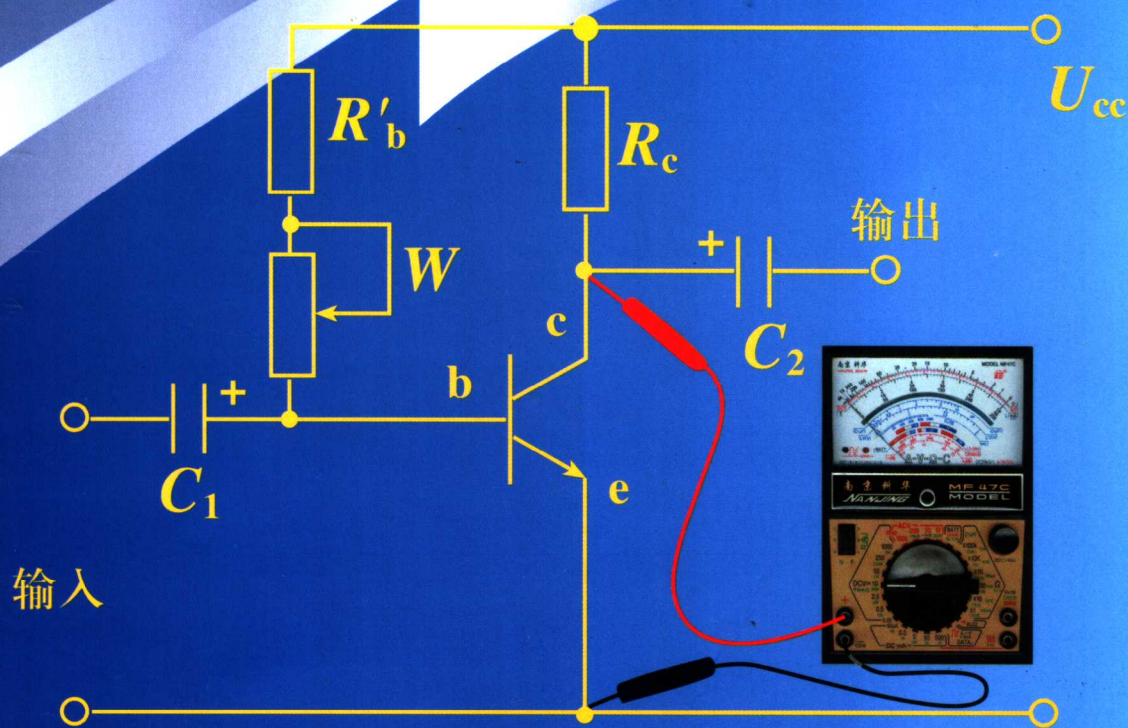


电子技能基础

李忠志 编著



NEUPRESS
东北大学出版社

电子技术基础

李忠志 编著

东北大学出版社

• 沈 阳 •

© 李忠志 2003

图书在版编目 (CIP) 数据

电子技能基础 / 李忠志编著. — 沈阳 : 东北大学出版社, 2003.3 (2003.6 重印)
ISBN 7-81054-881-6

I. 电… II. 李… III. 电子技术—高等学校—教材 IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 017951 号

出 版 者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress.com

http: // www. neupress. com

印 刷 者: 沈阳农业大学印刷厂

发 行 者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 184mm × 260mm

印 张: 22

字 数: 570 千字

出版时间: 2003 年 3 月第 1 版

印刷时间: 2003 年 6 月第 2 次印刷

印 数: 1001~2000 册

责任编辑: 王兆元

封面设计: 唐敏智

责任校对: 王 乾

责任出版: 杨华宁

定 价: 34.00 元

前 言

电子技术是当今科技领域极其具有生命力的新兴学科之一。纵观信息发展史, 电子技术已在国防、科技、文化、工农业生产等各个领域得到了广泛的应用。电子技术的发展极大地推动了人类社会的进步, 并正在创造出一个又一个人间奇迹。由此, 越来越多的学生热诚地学习电子技术及其应用, 并萌发了自己动手设计、制作、维修电子产品与设备的浓厚兴趣, 表现出强烈的求知欲望。电子知识与技术正在普及和发展。为满足科技实践、理论联系实际的需要, 特撰写此书, 意在为广大学生和无线电爱好者奠定良好的、坚实的电子技能基础。

电子技能的提高, 有待于对学习者的基础理论、专业素质、实验技巧、兴趣爱好等多方面培养。本书以提高读者解决实际问题的能力为出发点, 抓住培养读者的动手能力这一主线, 在撰写的过程中力求做到: 编排方式循循善诱, 层次简明扼要, 道理通俗易懂, 依据扎扎实实, 有利于读者自学。

本书具有以下几个特点。

1. 教材体系的内容结构分两个层次。第1章至第7章全面、系统地阐述了电子线路的基础理论; 第8章至第9章介绍实践内容。使用时, 这两部分可分别作为模拟电子技术基础和基本技能的实训教材。

2. 突出理论与实际的联系。书中介绍了典型电路的结构与特点, 原理与应用, 器件的性质与识图知识等内容。意在使读者理论联系实际。很好地理解、掌握所学知识, 提高分析解决问题的能力。

3. 强调动手能力的培养和提高。书中标有“*”号的章节, 详细阐述了检测、维修电路的理论依据, 操作方法, 规范程度。这些内容独成体系, 是为提高检测者的动手能力所撰写, 该部分可作为已具有一般电子技术知识的维修人员的进修讲义。

4. 注重电子器件及产品系统的内在联系。第8章介绍了无线电广播与接收原理, 并详细讲述了半导体外差收音机电路的结构特点、信号处理过程、整机的安装及统调, 以提高读者对电子部件系统的整体认识。该内容可作为无线电技术讲座教材, 供无线电爱好者选用。

5. 提高实训技能。第9章介绍了电子元件的特性与检测、焊接技术及万用表的使用常识等内容。初学者通过自学与实践, 即可提高电子技能及操作水平。

6. 为自学者提供阅读提纲。书中前7章的每一章、节后均配有适量的阅读思考与习题, 实为该章、节的阅读提纲。读者可按其顺序阅读, 即可了解电子技术的基本概念和基础理论, 领略其内容实质。

由于作者水平所限, 时间匆促, 书中难免存在不妥之处, 敬请读者批评指正。

李忠志

2002年10月于沈阳

内 容 提 要

本书系作者在总结多年来讲授“电子技术”的基础上编著而成。全书本着“保证基础，加强概念，精选内容，联系实际，学以致用，利于自学”的原则，系统地阐述了电子线路的基本原理。其内容包括：半导体器件特性，晶体管放大电路基础，放大器中的负反馈，常用放大器，集成运算放大器，振荡器及直流稳压电源。在这些章节的后面均附有适量的思考题和习题，并保持一定的深度和广度。为帮助学生沟通理论与实践的联系，提高读者处理实际问题的能力，本书还选编了无线电广播与接收、电装技能基础等内容，进而为培养学生电子制作的设计、组装、调试能力奠定基础。

本书可作为高等学校理工科电子技能教材，同时可作为电子工程技术人员的学习指导书，还可作为无线电爱好者的自学参考书以及电器行业维修人员的实训讲义。

常用符号说明

一、基本符号

A 放大倍数
 C 电容
 f 频率
 L 电感
 V 电压单位伏
 I, i 电流
 U, u 电压
 R, r 电阻
 P, p 功率
 T, t 时间, 温度
 $Z = R + jX$, 阻抗

二、电流、电压

i 交流电流瞬时值
 i_b 基极电流瞬时值
 i_B 基极电流总瞬时值 (脉动电流)
 I 直流电流, 正弦电流有效值
 I_b 正弦基极电流有效值
 I_B 基极电流静态值
 I_b 正弦基极电流相量
 I_m 正弦电流幅值
 I_s 信号源正弦电流有效值
 U_m 正弦电压幅值
 U 正弦电压相量
 U_i 正弦输入电压有效值
 U_o 正弦输出电压有效值
 u_i 输入电压瞬时值
 u_o 输出电压瞬时值
 $U_{CC}, U_{BB}, U_{EE}, U_{DS}$, 直流电源电压

三、电阻、电容

C_i 输入电容
 C_o 输出电容
 C_e 旁路电容
 C_M 耦合电容
 C_N 中和电容
 R_i 放大器输入电阻
 R_o 放大器输出电阻
 R_b 基极偏流电阻
 R_c 集电极负载电阻
 R_e 发射极反馈电阻
 R_L 放大器负载电阻
 R_s 信号源内阻

四、放大倍数 (增益)

A_u 电压放大倍数
 A_i 电流放大倍数
 A_p 功率放大倍数
 A_{us} 源电压放大倍数
 A_f 反馈放大器闭环放大倍数
 A_{ud} 差模电压放大倍数
 A_{uc} 共模电压放大倍数

五、频率

BW 通频带宽度
 f_h 3dB 上限频率
 f_l 3dB 下限频率
 f_{hf} 有反馈时上限频率
 f_{lf} 有反馈时下限频率
 f_o 回路固有谐振频率
 ω_o 谐振固有圆频率

六、时间

t_d 延迟时间
 t_r 上升时间
 t_{on} 开通时间
 t_s 存贮时间
 t_f 下降时间
 t_{off} 关闭时间

七、器件参数符号

1 晶体二极管

$I_{R(sat)}$ 反向饱和电流
 U_{th} 门限电压
 U_{BR} 反向击穿电压
 U_T 温度电压当量
 I_{FM} 最大平均整流电流
 U_{RM} 最高工作反压

R_D 直流电阻

r_d 交流电阻

C_T 势垒电容

C_D 扩散电容

C_j PN 结结电容

U_Z 稳压管稳定电压

I_{Zmax} 稳压管最大工作电流

I_{Zmin} 稳压管最小工作电流

U_S 恒流管饱和电压

I_H 恒流管恒定电流

2 晶体三极管

β 共射极电流放大系数

α 共基极电流放大系数、电压温度系数

I_{CBO} 集电极与基极之间反向饱和电流
 I_{CEO} 集电极与发射极之间反向穿透电流
 I_{CM} 集电极允许最大工作电流
 I_{BS} 基极临界饱和电流
 I_{CS} 集电极临界饱和电流
 U_{CES} 集电极与发射极之间饱和电压降
 U_{BES} 基极与发射极之间饱和电压降
 $U_{(\text{BR})\text{CEO}}, BU_{\text{CEO}}$ 极间反向击穿电压
 f_{α} 共基极截止频率
 f_{β} 共射极截止频率
 f_{T} 特征频率
 P_{CM} 集电极允许最大消耗功率
 h_{fe} 输出交流短路时电流放大系数
 h_{ie} 输出交流短路时输入电阻
 h_{oe} 输入交流开路时输出导纳
 h_{re} 输入交流开路时反向电压传输系数
3 场效应管
 U_{GSP} 夹断电压
 U_{GST} 开启电压
 g_{m} 低频跨导
 $C_{\text{GS}}, C_{\text{GD}}, C_{\text{DS}}$ 极间电容
 I_{DSS} 漏极饱和电流
 P_{DSM} 漏极最大允许功率
4 晶闸管
 U_{BFM} 正向阻断峰值电压
 U_{BRM} 反向阻断峰值电压
 U_{GT} 控制极触发电压

I_{G} 控制极电流
 I_{H} 维持电流
5 单结管
 η 单结管分压比
 U_{P} 峰点电压
 U_{V} 谷点电压
 I_{P} 峰点电流
 I_{V} 谷点电流

八、其他符号

CMRR 共模抑制比
 η 耦合因子, 效率
 K 矩形系数、耦合系数
 Q 品质因数
 γ 纹波系数
 K_{fl} 频率覆盖系数
 U_{osat} 集成运放饱和电压
 ξ 回路相对失谐量
 n 变压比, 取样比, 接入系数
 α 晶闸管正向导通电角度
 θ 角度, 导通角
 u_{g} 可控硅触发脉冲
 K_{V} 输入调节系数
 K_{T} 温度系数
 S_{r} 稳压系数
 S 脉动系数
 δ 矩形脉冲占空比

作者简介

李忠志，1947年生，吉林省吉林市人。1982年毕业于东北师范大学物理系，现任沈阳大学师范学院自然科学系教学主任、副教授，中国高等师范电子学会常务理事，辽宁省物理学会理事。主要从事基础物理、电子技术等课程的教学与研究工作。

目 录

0 绪 论	
——电子技术史话	1
1 半导体器件特性	5
1.1 PN 结的导电特性	5
1.1.1 半导体材料的导电特性	5
1.1.2 本征半导体的导电特性	5
1.1.3 N 型半导体和 P 型半导体	6
1.1.4 PN 结的形成	7
1.1.5 PN 结的单向导电性	8
1.1.6 PN 结电容	9
1.1.7 不对称结	10
思考与习题	10
1.2 晶体二极管	11
1.2.1 晶体二极管的结构和分类	11
1.2.2 二极管的伏安特性	11
1.2.3 二极管的参数	13
1.2.4 二极管交流小信号等效电路	14
1.2.5 普通二极管	15
1.2.6 特殊用途的二极管	16
1.2.7 二极管应用举例	20
*1.2.8 用万用表检测二极管	21
思考与习题	24
1.3 晶体三极管	25
1.3.1 晶体三极管的结构	25
1.3.2 晶体管内部载流子的运动规律	26
1.3.3 晶体管的电流分配关系	27
1.3.4 晶体管的放大作用	28
1.3.5 晶体管的连接方式	29
1.3.6 晶体管共射极特性曲线	30
1.3.7 晶体管的主要参数	32
*1.3.8 用万用表检测晶体管	34
思考与习题	36
1.4 场效应管	38
1.4.1 结型场效应管	38
1.4.2 绝缘栅型场效应管	41
1.4.3 场效应管的主要参数	45
1.4.4 场效应管的特点及使用注意事项	46
*1.4.5 用万用表检测场效应管	47
思考与习题	47
1.5 晶闸管	48
1.5.1 晶闸管的结构和工作原理	48
1.5.2 晶闸管的伏安特性	50
1.5.3 晶闸管的主要参数	51
1.5.4 双向晶闸管	52
1.5.5 单结晶体管	53
*1.5.6 用万用表检测晶闸管	55
思考与习题	56
2 晶体管放大电路基础	57
2.1 单管放大电路	57
2.1.1 单管放大电路的组成	57
2.1.2 静态工作点	58
思考与习题	60
2.2 放大器的图解分析法	61
2.2.1 确定放大器的静态工作点	62
2.2.2 放大器的动态分析	63
思考与习题	69
2.3 放大器的微变等效电路分析法	71
2.3.1 晶体管的 h 参数	71
2.3.2 晶体管 h 参数等效电路	73
2.3.3 输入电阻 h_{ie} 的估算	73
2.3.4 用 h 参数等效电路分析放大器	74
思考与习题	77
2.4 静态工作点的稳定与偏置电路	78
2.4.1 影响静态工作点的因素	79
2.4.2 稳定工作点的偏置电路	79
2.4.3 其他偏置电路举例	83
思考与习题	84
2.5 放大电路的频率特性	85

2.5.1 放大电路频率特性的一般概念	86	4.2 射极输出器	137
2.5.2 RC耦合放大器的频率特性	87	4.2.1 射极输出器的构成与静态分析	137
思考与习题	90	4.2.2 射极输出器的动态分析	138
2.6 晶体管的开关特性	90	4.2.3 射极输出器的应用和改进	141
2.6.1 晶体二极管的开关特性	91	思考与习题	143
2.6.2 晶体三极管的开关特性	91	4.3 功率放大器	143
2.6.3 晶体管可靠开关的条件	92	4.3.1 功率放大器的特点及分类	144
2.6.4 晶体管的开关时间	93	4.3.2 甲类功率放大器	145
思考与习题	94	4.3.3 乙类互补对称功率放大器	147
2.7 场效应管基本放大电路	94	4.3.4 甲乙类互补对称功率放大器	150
2.7.1 共源极场效应管放大电路	94	4.3.5 变压器耦合推挽功率放大器	152
2.7.2 自偏压电路	96	4.3.6 复合互补对称功率放大器	154
2.7.3 源极输出器	97	*4.3.7 功率放大器的检测	156
思考与习题	97	思考与习题	159
*2.8 用万用表检测单元电路	98	4.4 调谐放大器	160
2.8.1 偏置电路故障部位的判断	98	4.4.1 调谐放大器的特点	160
2.8.2 静态工作点的测量与调整	101	4.4.2 谐振回路	161
2.8.3 单元电路的检测	102	4.4.3 单调谐放大器	169
思考与习题	104	4.4.4 双调谐放大器	171
3 放大器中的负反馈	105	4.4.5 调谐放大器的稳定问题	173
3.1 反馈的概念及反馈的类型	105	*4.4.6 调谐放大器的检测	173
3.1.1 反馈的概念	105	思考与习题	175
3.1.2 反馈的基本类型	106	5 集成运算放大器	176
思考与习题	110	5.1 差动放大器	176
3.2 负反馈放大电路	111	5.1.1 零点漂移问题	176
3.2.1 负反馈放大电路的反馈深度	111	5.1.2 基本差动放大器	177
3.2.2 负反馈电路的4种基本组态	111	5.1.3 射极耦合差动放大器	179
思考与习题	117	5.1.4 差动放大器的改进	185
3.3 负反馈对放大器性能的影响	118	思考与习题	187
3.3.1 提高放大倍数的稳定性	118	5.2 集成电路基础	188
3.3.2 减小非线性失真	119	5.2.1 集成电路的特点	188
3.3.3 加宽通频带	120	5.2.2 恒流源与有源负载	189
3.3.4 改变输入电阻和输出电阻	121	5.2.3 集成运放的基本组成	191
3.3.5 负反馈放大电路的分析方法	125	思考与习题	193
思考与习题	127	5.3 集成运放的典型电路与参数	194
4 常用放大器	128	5.3.1 F007内部电路简介	194
4.1 多级放大器	128	5.3.2 集成运放的主要参数	195
4.1.1 多级放大器的耦合方式	128	5.3.3 集成运放的选用及注意事项	197
4.1.2 多级放大器的动态分析	131	思考与习题	199
4.1.3 多级放大器的频率特性	133	5.4 集成运放的应用	199
*4.1.4 用万用表检测直接耦合放大器	134	5.4.1 理想运放及其特性	199
思考与习题	136	5.4.2 集成运放的三种基本运算	201
		5.4.3 集成运放在运算方面的应用	203

思考与习题	207	7.3.3 稳压电路性能的改进	245
6 振荡器	209	思考与习题	249
6.1 正弦波振荡电路基础	209	7.4 集成稳压电路	250
6.1.1 自激振荡的条件	209	7.4.1 W7800 系列集成稳压器	250
6.1.2 振荡的建立与稳定	210	7.4.2 W317 系列集成稳压器	252
6.1.3 正弦振荡器的组成与分类	210	思考与习题	253
6.1.4 正弦振荡器的分析方法	211	7.5 开关型稳压电路	254
思考与习题	211	7.5.1 开关型电源的基本原理	254
6.2 LC 正弦振荡器	211	7.5.2 调宽型开关电源的电路结构	254
6.2.1 变压器反馈式振荡器	211	7.5.3 开关型稳压电路实例	255
6.2.2 三点式 LC 振荡器	213	思考与习题	256
6.2.3 改进型三点式振荡器	215	*7.6 稳压电源的检测	257
思考与习题	216	7.6.1 典型稳压电路介绍	257
6.3 石英晶体正弦振荡器	217	7.6.2 稳压电源故障分析要点	258
6.3.1 石英晶体特性及其等效电路	217	7.6.3 稳压电源的检测方法	259
6.3.2 石英晶体振荡器	218	7.6.4 稳压电源的调试	263
思考与习题	219	8 无线电广播与接收	264
6.4 RC 振荡器	220	8.1 无线电广播的基本过程	264
6.4.1 RC 移相式振荡器	220	8.1.1 无线电广播的发射系统	264
6.4.2 RC 桥式振荡器	222	8.1.2 无线电广播的传输过程	265
思考与习题	225	8.1.3 无线电广播的接收过程	265
*6.5 振荡器的检测	226	8.2 调制与解调	266
6.5.1 LC 振荡器的偏置状态	226	8.2.1 调 幅	266
6.5.2 振荡器检测举例	228	8.2.2 检 波	269
思考与习题	229	8.3 超外差收音机原理	271
7 直流电源	230	8.3.1 高频电路	272
7.1 整流电路	230	8.3.2 中频放大电路	276
7.1.1 半波整流电路	230	8.3.3 检波和自动增益控制电路	278
7.1.2 全波整流电路	231	8.3.4 低频放大电路	280
7.1.3 桥式整流电路	232	8.3.5 整机电路分析	281
7.1.4 倍压整流电路	233	8.4 超外差收音机的安装	282
7.1.5 可控硅整流电路	233	8.4.1 元器件的检查及处理工作	283
思考与习题	237	8.4.2 机壳的安装	286
7.2 滤波电路	237	8.4.3 机芯的安装	287
7.2.1 电容滤波电路	238	*8.5 超外差收音机的调试	289
7.2.2 电感滤波电路	239	8.5.1 静态工作点的测试与调整	289
7.2.3 复式滤波电路	240	8.5.2 中频放大级频率的调整	292
7.2.4 有源滤波电路	241	8.5.3 频率覆盖调整	295
思考与习题	242	8.5.4 统 调	296
7.3 稳压电路	242	*8.6 外差机故障与检修	297
7.3.1 并联型稳压电路	243	8.6.1 无 声	297
7.3.2 串联型稳压电路	244	8.6.2 声音小	298
		8.6.3 只能收强电台信号	299

8.6.4 无明显选台特性	300	9.2.5 电容器的检测	322
8.6.5 失真	300	9.3 电感器件的识别与检测	323
8.6.6 啸叫	301	9.3.1 电感的种类与参数	324
思考与习题	304	9.3.2 常用的电感器件	325
*9 电装技能基础	305	9.3.3 电感器的检测	327
9.1 常用电阻器的识别和检测	305	9.4 焊接技术	328
9.1.1 固定电阻器	305	9.4.1 电烙铁的使用	328
9.1.2 电位器	309	9.4.2 焊料和焊剂	329
9.1.3 敏感电阻器	312	9.4.3 焊接技术	330
9.1.4 特殊电阻器	313	9.5 万用表的使用常识	331
9.2 常见电容器的识别与检测	315	9.5.1 表盘结构和量程范围	331
9.2.1 固定电容器	315	9.5.2 万用表使用方法	332
9.2.2 可变电容器	317	9.5.3 万用表使用注意事项	335
9.2.3 半可变电容器	319	附录 常见半导体器件的识别	336
9.2.4 电容器的主要参数	320	参考文献	340

0 绪 论

——电子技术史话

电子技术是当今科技领域最具有生命力的新兴学科之一。近一百年以来,电子技术的产生和发展,使得人类许多远古的幻想和神话变为现实,使科学界创造出一个又一个人间奇迹,有力地加快了人类社会的精神文明和物质文明建设,取得了无比辉煌的硕果。在科学技术发生日新月异的今天,电子技术正显示出它无与伦比的魅力,伴随着人类社会创造着更加光辉灿烂的文化,使人们更加对未来充满了希望。因此,在学习、浏览本书内容之前,回顾一下电子技术发展史,了解一下电子理论建立过程中的有关史实和重大事件,重温一下它对人类作出的贡献,这对于我们学好、用好电子技术是十分必要的,并有助于我们在前人的基础上开拓、创新。

电子技术的初起,应该追溯到无线电和电子学的诞生。它萌芽于 19 世纪末,发展于 20 世纪中叶,腾飞于 20 世纪末。在 19 世纪中期,有关于电工学(强电和弱电)的基础知识体系业已建立,相继出现了各种发现和发明,科学界已完成了电磁理论的综合,这意味着电子时代的到来。无线电和电子学的发展,主要依赖于当时科学界两个重要的实验事实:第一件事是,1887 年德国的物理学家赫兹(1857—1894)用实验的方法,证明了电磁波的真实存在,验证了电磁场具有能量和动量,是一种物质,可以作为信息的传递媒介。这恰好为人们苦苦寻找的、不用导线来传输信息的臆想辟出蹊径,为无线电的实现提供了依据,奠定了无线电理论基础。第二件事是,1883 年美国的发明家爱迪生(1847—1931)在致力于研究延长白炽灯寿命时,发现了热电子的发射现象,即“爱迪生效应”。这使得制造具有革命性的电子器件——真空电子管——成为可能。无线电和电子学两者相互依存,在矛盾中相互促进和发展,密不可分,实为一体。可以设想,若没有无线传播的理论依据,没有电子器件及其不断的更新换代,电子技术很难达到今天这样的完善程度。

溯本求源,电子技术的起始,自然要从麦克斯韦电磁理论建立算起。英国剑桥大学卡文迪许实验室创始人、著名物理学家麦克斯韦(1831—1879)以其特有的天才,总结了奥斯特、法拉第等人的电磁理论,大胆地提出了“位移电流”的设想,以数学的方法将繁杂、浩瀚的电磁理论规律全部概括为一组简洁方程式,为人类留下不朽的杰作。麦克斯韦预言了人们还没有发现的电磁波的存在,并且指出,电场和磁场可以脱离场源存在,变化的电场和磁场相互激发,以横波的形式一环扣一环地以光速迅速传播至无穷远处,光是电磁波的一种。麦克斯韦完成了电、光、磁的统一,他的巧夺天工、奇妙绝伦的电磁理论在科学界引起强烈的反响,是人类知识宝库中一份博大精深的科学遗产。

由于麦克斯韦电磁理论用的是比较高深、新颖的数学知识,当时并没有被科学家们普遍接受和承认。进入 19 世纪 80 年代,科学界许多学者都在为麦克斯韦理论寻求证据。有的国家,例如柏林普鲁士科学院于 1879 年还专门为此发出悬赏征文,力求对电磁波进行实验验证。赫兹在 1887 年完成了证明电磁波确实存在的实验。他设计了一个电磁波发生器,通电后能使 10m 以外的检波器产生火花。连赫兹本人也没有想到,用这样简单的仪器竟验证了麦氏高深理论,从此,电磁波的存在没有人再怀疑了。赫兹本人追求的是对自然法则的理解,他虽然解

决了悬赏问题的答案,但对电磁波的应用并没有引起足够的认识,甚至认为“没什么用途”,加之他英年早逝,根本就没有考虑可以用电磁波来传递信息。尽管如此,缺口已经打开,无线传输信息的渠道已探明,无线电产生的条件已经成熟,无线电的发明已成为历史的必然。赫兹的工作已为波波夫、马可尼等人发明无线电搭好了舞台,提供了成功的机会。

电磁波的确实存在被科学界承认后,人们预感到科学技术领域将会有重大突破。许多有志者都纷纷投入到电磁波实际应用的研究之中,他们希望运载信息的电磁波能翻山越岭、漂洋过海,传递到世界上每一个角落。在19世纪末、20世纪初的这段世纪之交的短时间里,就相继出现很多发明,硕果累累,且一发不可收拾。当时有线电话、有线电报等业已问世,发明家们正在探求,能否不用导线而把信息传至远处。这种想法与电磁波的发现不期而遇,电磁波的物质性、波动性恰好作为传递媒介,于是无线传输获得了成功。利用无线电波传递信息最早的是无线电报,在这方面作出卓越贡献的有很多人,其中最突出的可算是波波夫和马可尼。

俄国物理学家波波夫(1869—1906)是研究电磁波应用的前驱者之一(略早于马可尼)。1895年波波夫在海军学校任教期间,曾发明了收集闪电发出的电磁波接收装置,并且可以用这种雷电检波器接收到人工振荡源发出的信号。同年,他又在彼得堡大学两个建筑物之间,演示了用电波传递信号的实验。1896年,波波夫成功地研制出第一台无线电发报机,传递了莫尔斯电码,并逐渐地将发报距离由250m提高到几千米。1898年波波夫在无线电接收机上加装天线,实现了海军通讯,距离超过10km。

意大利工程师马可尼(1874—1937)于1894年首次实现了用无线电信号打响了距离10m处的电铃。而后,他改进了火花发射机和金属粉末检波器,于1895年秋将通讯距离提高到2.8km,录拍了莫尔斯码。两年后,马可尼利用风筝提高天线,使通讯距离提高到14km。1899年马可尼完成了英吉利海峡两岸间的通讯。以后又有了突破性进展,采用水银检波器实现了跨洋通讯,在相距3200km的大西洋彼岸,架起了信息桥梁。这意味着无线电时代已经开始,电子技术已发展到一定程度,无线电波已祥照整个世界。

无线电的发明权一直存在着争议。由于历史上的原因,前苏联一直认为波波夫是发明无线电的先驱者。而西方国家都坚持马可尼才是无线电的真正发明人,是最先将无线电技术应用于实践的。波波夫和马可尼都在各自的研究中作出了应有的贡献。更重要的是,无线电时代已经到来,电子技术要发挥其历史作用已成趋势。1909年马可尼因其对无线电事业的贡献而获得了当年的诺贝尔奖,而波波夫于三年前不幸逝世,没有获此殊荣,他和马可尼共同被誉为“无线电之父”。

除波波夫和马可尼之外,还有许多科学家在无线电研究方面作出了卓越贡献。例如法国的布冉利发明了金属粉末检波器。美国的阿姆斯特朗发明了再生电路、超外差式电路、反馈电路和调频器等,还提供了高保真广播方法,无线传输的应用越来越广泛。

电子技术是在电子器件不断更新换代过程中逐渐发展起来的。“电子”这个名称最先是由英国物理学家斯通尼于1874年提出的,1897年英国物理学家汤姆逊(1856—1940)发现了阴极射线是由带负电的粒子组成之后,电子才为科学界所承认。在这以前,物理学界曾对真空放电管中产生的阴极射线的性质一直存在激烈的争论。在这个热门话题中,德国的一些科学家认为阴极射线是一种以太波,而英国科学家则认为是一种物质流。汤姆逊对这一问题极感兴趣,他想弄清阴极射线究竟是什么。于是,汤姆逊特别注意阴极射线管内的气体放电现象。汤姆逊的实验是这样的:让阴极射线通过平行板中间的电场,这时他观察到阴极射线偏向于正极板一侧,这充分说明该射线是由带负电的粒子组成的。同时,汤姆逊还采用了极其巧妙的方

法,测试出了射线中粒子的电荷与其质量之比,即荷质比。该比值比最轻的氢原子的荷质比还要大 2000 倍,这个结果使科学家们大吃一惊。因为当时已经知道氢原子是所有元素中最轻的原子,射线中粒子的荷质比说明,该粒子的质量是氢原子的 2000 分之一。1897 年汤姆逊宣布了他的实验结果。电子的发现使人们对物质的结构有了新的认识,原子是可以进一步进行分解的,汤姆逊因此获得了“电子之父”称号。

真空电子管的问世,人们习惯称它为电子技术的种子。1883 年,爱迪生在寻找白炽灯丝的材料时,发现真空灯泡中的空间有电流穿过的现象。他进一步实验,又发现灯泡内出现黑色的堆积物质,电极上发出蓝色的光晕。起初他怀疑是分子轰击的结果,于是使用锡箔包住灯泡,并将电流计连在锡箔和灯丝的正极之间,结果证实了灯丝和锡箔所在的空间确实有电流通过。这就是著名的“爱迪生效应”。因为当时电子还没有被发现,人们并没有意识到它将是 19 世纪末最重要的一项发现,更没有想到它预示一种新型的电子器件——真空二极管——即将诞生,以及会引起一场电子技术革命和新兴的电子工业到来。爱迪生致力于灯泡的改良工作,这种效应连他自己也没想到其应用价值,同赫兹一样,他把发明真空管的机遇让给了别人。

1904 年英国科学家弗来明在研究无线电的应用时,联想到“爱迪生效应”。弗来明认为,这种效应是炽热的灯丝使电子异常活跃造成的结果。电子受热后,得到足够的能量,在正极电压的作用下,电子冲出阴极而射向锡箔(电源正极),形成电流穿越空间。若锡箔连于灯丝的负极,则不会发生这种效应。他进一步研究,若灯丝输入的是交流电,则阳极中产生的电流是单向的,输出的是直流电。弗来明根据这个原理,成功地研制成单向导电的真空二极管,并把它用于高频检波上,明显地提高了检波效率,把电子技术又推向一个新的台阶。

美国科学家德福雷斯特也在研制真空管,只可惜他比弗来明稍迟一步。但他并不气馁,继续研究,功夫不负有心人,1906 年他在试验阴极和阳极之间的距离对检波效果的影响时,在阴极和阳极之间增加了第三电极(栅极)。实验中意外地发现,当栅极加有微小电流时,会在阳极上得到较大的电流变化,这正是人们寻觅已久的信号放大效果。于是,电子技术中最重要的器件、无线电的“心脏”——真空三极管——诞生了。

真空二极管和真空三极管的研制成功,意味着电子学学科的建立,电子技术领域的大门彻底打开,一场新的电子技术革命即将来临,科技界将要发生翻天覆地的变化。电子技术的种子业已出现,在合适的外界条件下,就要萌发、生根、成长以至于开花结果。随之而来的是,成千上万种电子产品与设备如雨后春笋,蜂拥而出。1920 年,美国建成世界第一座无线电台,第一个实现了无线电广播。1925 年,英国的贝尔德发明了电视机,首次利用电视机成功地转播了 23km 以外的赛马表演。1946 年,在美国诞生了第一台电子管电子计算机,虽然该机用了 18000 多个电子管,机重达 30t,功率 150kW,运算速度仅为 5000 次/s,但它毕竟开创了历史的先河,把人们从繁杂的脑力劳动中解放出来。计算机的诞生对人类简直是太重要了,它是半个世纪以来电子技术发展的必然产物,它代表着一种新的生产力,将在未来的科技领域中发挥极其重要的作用。

电子器件的发展共经历了五次换代,即真空电子管电路,晶体管电路,中小规模集成电路,大规模集成电路和超大规模集成电路。

1947 年,美国科学家巴丁、肖克莱和布拉克发明了晶体三极管。他们在研究锗晶体的物理性质时,为了探测其周围电位的分布情况,把一枚加有正电压的探针固定在锗晶体上,再用另一枚加有负电压的活动探针分别触及晶体的各个部位。当活动探针移至距固定探针仅有 0.5mm 左右的距离时,突然发现通过活动探针上的小电流,能引起固定探针上电流较大的变

化。与真空三极管比较,凭着丰富的科学知识,三人立刻意识到这是一项重大发现,可以放大微弱信号。晶体三极管的发现,在电子史上又确立了一块新的里程碑。如果说 20 世纪的前半叶,电子管电路独领风骚,在通讯、交通、军事领域显示出无比神通,那么晶体管的产生,又使电子技术有了根本性突破。晶体管体积小,经久耐用,价格便宜,性能优越,在各方面都远远超过真空电子管。真空管已完成其历史任务,电子技术已进入晶体管时代。20 世纪后半叶,半导体技术与器件得到空前发展。

1958 年,美国研制成世界第一块集成电路,即电子器件第三代产品。所谓的集成电路,就是把一个功能完整的电路集中做在一小块晶片上,以满足体积小、功能全、成本低、稳定性能好的需要。1964 年,出现了集成运算放大器,研制成中小规模集成电路。20 世纪 60 年代又出现了第四代电子器件,即可在 5mm^2 左右的晶片上制成上千个电子元件,集成度已经提高到相当高程度。1977 年,美国又研制出超大规模集成电路,被称之为“芯片”。在面积为 30mm^2 的硅片上可制造出 15 万个之多的晶体管元件,由此而产生真正意义上的微型电脑,且已达到智能化程度。目前,智能化微电脑正处于腾飞发展阶段,电子技术已进入现代化时期。

在当今信息网络化时代,微电子技术正在蓬勃、飞速地发展,其中 CMOS 集成电路仍是主流工艺。微电子技术与其他学科的广泛结合,将会产生新的技术增长点。微电子技术与精密机械相结合,会产生微电子系统;与纳米技术相结合产生纳米电子学;与生物工程技术相结合产生 DNA 芯片;与材料技术相结合会产生多用途的芯片;与国防科技相结合就会产生信息化武器。总而言之,未来各种科技的发展程度都与微电子技术的发展水平息息相关。

电子技术的发展直接影响到人类的生活与生存。20 世纪 70 年代,若人们能拎上一台半导体收音机,则可认为是富有和时髦的象征。而 80 年代,录音机、黑白电视机已成为人们追求的社会时尚。到了 90 年代,彩色电视机、微型电脑、移动电话则遍及家庭和社会。电子技术的不断更新,极大地丰富了人类的生活方式。现在,网络技术已使整个世界变成了地球村,任何角落之间的通讯都将成为零距离,人们将活动的空间逐渐移向太空。随着超导现象的研究、纳米技术的出现、人类基因工程的兴起,电子技术又将面临一场新的变革和突破,随着时间的推移,人类所有梦想与期望终将会变成现实。

回想电子技术的发展历程,我们深深感到:在每一个阶段、每一种发现、每一个元件、每一种电路的产生和发展过程中,无处不在述说着多少前辈为之奋斗几年、几十年,乃至几代人的艰辛努力。这里体现出一种哲理,那就是人类自身创造的灿烂文化,在运用于大自然改造过程中不断得以充实和提高。电子技术也是这样,人们在驾驭它改造世界的同时,其自身也在不断地得到发展和完善,这将产生更加惊人的奇迹,将使得整个世界变得更加绚丽多彩。

1 半导体器件特性

半导体器件主要有半导体二极管、半导体三极管、场效应管及集成电路等,它们都是由半导体材料经过特殊工艺制成所谓的 PN 结而组成的。本章从半导体材料的导电特性入手,在介绍 PN 结的基础上,重点阐述各半导体器件的电气特性。

1.1 PN 结的导电特性

1.1.1 半导体材料的导电特性

导体的导电性能良好,电阻率很低,一般在 $10^{-8} \sim 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ 之间,例如铜的电阻率为 $1.57 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。绝缘体的导电能力很差,电阻率很高,在 $10^8 \sim 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 之间,例如橡胶的电阻率为 $10^{16} \Omega \cdot \text{m}$ 。除了导体和绝缘体之外,还存在一类物质,其导电特性介于导体和绝缘体之间,它们的电阻率通常在 $10^{-5} \sim 10^9 \Omega \cdot \text{m}$ 范围内。例如:硅, $\rho = 10^5 \Omega \cdot \text{m}$; 砷化镓, $\rho = 10^9 \Omega \cdot \text{m}$; 在室温下的锗, $\rho = 0.47 \Omega \cdot \text{m}$ 。

自然界中属于半导体的物质很多,但可用来制造半导体器件的主要是硅(Si),锗(Ge)和砷化镓等材料。半导体之所以引起人们的注意,得到了广泛的应用,其主要原因在于它的电阻率在各种因素(温度、光照、掺杂等)作用下将出现非常大的差别。

① 半导体的电阻率随温度的上升而明显下降(呈负温度系数),利用这种特性很容易制成热敏电阻及传感器。

② 半导体的电阻率因光照的不同而改变,光照增强,电阻率降低,利用这一性质制成光敏电阻、光导管等器件。

③ 半导体的电阻率受杂质的影响极大。纯净的半导体,即使掺杂 10^{-6} 的磷(或硼),其导电能力就会增加 10^6 倍。利用这种性质可制成各种不同性能的半导体器件。

半导体以上特点,可从其内部导电机理说明。

1.1.2 本征半导体的导电特性

用半导体材料来制造器件,首先要经过提纯、加工,使之成为原子有规律排列的单晶体。非常纯净(其纯度为 99.9……,9 个“9”)的单晶体被称为本征半导体。下面从原子结构的规律出发,分析本征半导体硅和锗材料的导电特征。

在元素周期表中,硅的原子序数是 14,锗的原子序数是 32,它们的原子序数虽然不同,但它们的原子核最外层都有 4 个价电子,均属于 4 价元素。半导体导电特性与价电子有关,为了方便研究价电子的作用,通常把原子核及其内层电子看做一个整体,称之为“惯性核”。这样,便可用惯性核和最外层电子来表示其原子结构的简化模型。于是可得到本征硅、本征锗原子结构简化模型,如图 1-1 所示。

在图 1-1(c)中,惯性核带 4 个正电荷,价电子共带 4 个负电荷,因此,整个原子对外仍呈现电中性。