

高等学校试用教材



西安交通大学
电子学教研室编
沈尚贤 主编

电子技术

上册 ▶ 导论

高等教育出版社

内 容 简 介

本书是根据西安交通大学电子学教研室多年教学实践,参照1980年《高等工业学校电子技术基础教学大纲(草案)》,考虑到电子技术迅速发展的情况编写的。本书采用先讲数字电子技术,后讲模拟电子技术的体系。为适应技术发展的需要,突出了集成电路的讲解。本书上册内容包括:绪言、半导体二极管和二极管电路、晶体管及其模型、晶体管基本放大电路、数字系统基础、集成逻辑门、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、微处理器和微型计算机等九章。下册内容包括:模拟电子电路(以集成运算放大器为核心)各章以及信号发生器、模数和数模转换、直流电源等七章。各章配有例题、小结、参考书目和习题。

本书可作为高等学校电力类和自动化类专业“电子技术基础”课程和其他类似课程的教材;亦可供与电子技术有关的工程技术人员参考;也可供自学者使用。

责任编辑 张志军

高等学校试用教材

电子技术导论

上 册

西安交通大学电子学教研室 编

沈尚贤主编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

通县觅子店印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 22 字数 500,000

1985年10月第1版 1985年10月第1次印刷

印数 00,001—7,700

书号 15010·0666 定价 3.80 元

序 言

本书是根据工科电工教材编审委员会电子技术编审小组 1981~1985 年教材规划,以教育部 1980 年颁发的高等工业学校《电子技术基础教学大纲(草案)》为依据编写的。考虑到教学大纲拟订较早,电子技术发展很快,本书对内容和要求作了若干调整,以体现教育要面向现代化、面向世界、面向未来的精神。

编写本书的主导思想是:保证基础,推陈出新,管为路用,加强集成,扩大眼界,符合辩证,简明扼要,引导入门。

按照教学大纲的要求,作为一门技术基础课教材,应力求保证基础,打好基础,起到引导入门的作用,所以书名称为“导论”。当然,随着技术的进展,哪些是“基础”,其概念是会有所改变的。我们是从我国当前实际出发,兼顾今后发展来选择内容的。

书中对推陈出新方面,曾作了较多考虑。例如分立电路部分,根据“分立为集成服务”的要求,内容有所删节;对反馈和振荡的论述,作了改革;增设了模数和数模转换、微处理器和微计算机等内容;充实了线性集成电路的应用等等。总之是按照管为路用、加强集成的原则来处理内容的取舍。

为了扩大眼界,增加知识面,书中安排了一些加*号的部分,例如指出若干特种器件和某些新问题,但不深入讨论,只推荐参考书,感兴趣的读者可以进一步查阅。在编写时我们力求做到论述时符合辩证观点。例如对于晶体管特性的非线性,指出在放大模拟信号时它是一个缺点,但又利用晶体管具有截止和饱和的性能,使它起开关作用,广泛应用于数字电路和开关电路。又如放大器中应避免自激振荡,而信号发生器中正是利用自激来产生振荡,从而达到构成信号源的目的。

在力求简明扼要上,主观上也给予一定的注意,但感到做得还很不够。书中删节了器件内部微观物理过程的描述,有意识地略去器件(包括组件)的生产工艺,如果读者要从事器件的设计和制造,可在本导论的基础上进一步学习其它有关课程。在集成规模越来越大的今天,本书对分立电路的篇幅有所压缩。

为了培养阅读专业外语文献的能力,书中在首次出现电子技术名词之后,加注了英文。各章列有例题、小结、参考书目、思考题及习题,以利学习。对于所用物理量符号和单位,注意于符合国家标准 GB3102.5-82《电学和磁学的量和单位》,按照这个标准,电压的符号采用 U 和 u , 不用 V 和 v 。

书中的体系是先讲数字电路,后讲模拟电路,以使微计算机原理的课程可以较早开出。本书上册共 9 章,第 1、2、3 章为分立器件及其基本电路,为数字和模拟电路的公共基础,第 3 章中把双极型管和场效应管放在一起讲,利于对比,但也可分开讲授。除第 4 章为数字系统基础外,第 5

至9章都是属于用集成组件构成的数字电路。下册包括七章,其中第10至13章属模拟电路,以讨论运算放大器为核心。其后两章都包含有模拟和数字电路的内容。末章讲直流稳压电源,对连续控制和开关控制两种类型都论及。本书第2、3、10章由叶德璇同志编写,何金茂同志和叶德璇同志共同编写了第11到13章,孙志馨同志编写了第4、5、9、15章和第6章部分内容,张志清同志编写了7、8、16章和第13章部分内容,我编写了绪言和第1、6、14章,其中14.8节由迟钦河同志所写。傅宁同志在习题解答方面作了许多工作。

本书由清华大学童诗白教授主审,许道荣副教授也参加了上册的审阅。他们逐章逐句地详细评审,指出了错误和不妥之处,提出了许多中肯的修改意见。对此,谨致以衷心的感谢。今年5月和11月分别在西安和广州召开电子技术编审小组会议进行审稿,组长童诗白教授主持会议,编委李士雄、汤之璋、康华光、吴存亚、邓汉馨、何金茂等教授都出席了会议。此外,清华大学阎石副教授也参加了这两次会议,南京工学院衣承斌副教授参加了西安会议。会议中经过认真的讨论,又对本书提出了许多宝贵的改进意见。书稿在送审前,曾于1982年至1984年在我校自动控制专业试用过两届,同学们也提出了不少好意见。西安交通大学吴柏梅同志精心地绘制了全部插图。我们对所有给本书帮助和支持的同志表示衷心谢意。

电子技术的内容更新很快,我们的水平有限,书稿虽根据各方面的意见数度修改,但一定还存在不少缺点和错误,恳切希望兄弟院校的师生和其他读者,不吝批评指正,则幸甚。

西安交通大学 沈尚贤

1984年12月

目 录

绪言.....1	参考书目.....7
0.1 什么是电子技术.....1	附录 0.1 国内有关电子技术的报刊.....7
0.2 怎样学习电子技术课程.....4	

第一章 半导体二极管和二极管电路

1.1 半导体.....8	1.6.1 整流电路.....23
1.1.1 半导体和金属导体.....8	1.6.2 整形电路.....26
1.1.2 本征半导体.....9	1.6.3 逻辑电路.....27
1.1.3 掺杂半导体.....11	1.7 二极管的开关特性.....29
1.2 PN 结.....12	1.8 二极管的主要电参数.....30
1.2.1 PN 结势垒的形成.....12	1.9 特种二极管.....31
1.2.2 PN 结的单向导电性.....13	1.9.1 硅稳压管.....31
1.2.3 PN 结的电压与电流的关系.....14	1.9.2 肖特基二极管.....33
1.3 半导体二极管.....16	1.9.3 变容二极管.....34
1.3.1 二极管的伏安特性.....16	1.9.4 光敏二极管.....34
1.3.2 伏安特性的讨论.....17	1.9.5 发光二极管.....34
1.4 二极管模型.....19	1.9.6 隧道二极管.....34
1.4.1 折线化模型.....19	小结.....35
1.4.2 数学方程模型.....20	参考书目.....36
1.4.3 交流模型.....20	思考题及习题.....36
1.5 二极管电路的基本分析方法.....21	附录 1.1 一些半导体二极管
1.5.1 图解法.....21	的主要电参数.....40
1.5.2 解析法.....23	附录 1.2 我国半导体分立器件
1.6 二极管应用.....23	的命名方法.....43

第二章 晶体管及其模型

2.1 双极型晶体管的工作原理.....44	2.4 晶体管的主要参数.....60
2.1.1 结构.....44	2.4.1 极间反向电流.....60
2.1.2 工作原理.....44	2.4.2 微变参数(交流参数).....60
2.1.3 晶体管共射极接法的伏安特性.....49	2.4.3 极限参数.....62
2.2 晶体管模型.....52	2.4.4 开关参数.....63
2.2.1 埃伯斯-摩尔模型.....52	2.5 温度对管子特性的影响.....64
2.2.2 正向放大状态模型.....53	2.5.1 对 I_{CBO} 的影响.....64
2.2.3 倒置状态模型.....57	2.5.2 对 u_{BE} 的影响.....65
2.2.4 截止状态模型和饱和状态模型.....57	2.5.3 对 β 的影响.....65
2.3 晶体管在开关工作状态下的特性.....58	2.6 场效应晶体管.....66
2.3.1 开关时间.....58	2.6.1 结型场效应管的结构.....66
2.3.2 加速电容.....59	2.6.2 结型场效应管的工作原理及伏安特性.....67

2.6.3 绝缘栅型场效应管的结构和 工作原理.....	70	2.8.3 光电耦合管.....	78
2.6.4 场效应管模型.....	73	小结.....	78
2.6.5 开关工作状态.....	75	参考书目.....	79
2.6.6 场效应管参数.....	75	思考题及习题.....	79
2.7 单极型管与双极型管的比较.....	76	附录 2.1 双极型晶体管主要电参数(举例)	83
*2.8 特种晶体管简介.....	77	附录 2.2 场效应晶体管主要电参数(举例)	84
2.8.1 肖特基晶体管.....	77		
2.8.2 光电晶体管.....	77		

第三章 基本晶体管电路

3.1 晶体管反相器.....	86	3.4 反相器作开关用的分析.....	104
3.1.1 双极型晶体管反相器的电路组成 和工作原理.....	86	3.5 场效应管反相器的电路分析.....	106
3.1.2 场效应管反相器的电路组成和 工作原理.....	90	3.6 共集电极(共漏极)放大电路.....	108
3.2 双极型晶体管反相器的电路分析.....	91	3.6.1 电路分析.....	108
3.2.1 静态分析.....	91	3.6.2 射极跟随器的特点.....	111
3.2.2 反相器作放大用的动态分析.....	92	3.6.3 共漏极放大电路.....	113
3.3 静态工作点的选择和稳定.....	101	3.7 具有有源负载的场效应管反相器.....	114
3.3.1 静态工作点的选择.....	101	小结.....	117
3.3.2 静态工作点的稳定.....	102	参考书目.....	118
		思考题及习题.....	118

第四章 数字系统基础

4.1 逻辑变量.....	123	4.5.3 用逻辑代数定理化简逻辑函数.....	141
4.2 数的数字表示.....	123	4.6 逻辑函数的图解表示及其化简.....	142
4.2.1 几种常用的数制.....	124	4.6.1 基本逻辑运算的图解表示.....	142
4.2.2 数制间的换算.....	127	4.6.2 最小项的卡诺图.....	143
4.3 基本逻辑运算和逻辑门.....	128	4.6.3 逻辑函数的卡诺图表示.....	145
4.3.1 与运算、或运算和与门、或门.....	128	4.6.4 用卡诺图化简逻辑函数.....	146
4.3.2 非运算和非门.....	130	*4.6.5 或与式逻辑函数和最大项.....	149
4.3.3 基本逻辑运算定理.....	131	4.7 逻辑电路的分析和综合.....	150
4.4 逻辑函数和逻辑电路.....	134	4.7.1 逻辑电路的分析.....	150
4.4.1 逻辑函数.....	134	4.7.2 逻辑电路的综合.....	152
4.4.2 逻辑图(逻辑电路).....	137	小结.....	153
4.5 逻辑代数定理和逻辑函数的化简.....	138	参考书目.....	153
4.5.1 逻辑代数定理.....	138	思考题及习题.....	154
4.5.2 逻辑代数定理的证明.....	139		

第五章 集成逻辑门

5.1 基本的集成逻辑门.....	158	5.2 集成逻辑门的主要性能指标.....	159
-------------------	-----	-----------------------	-----

5.2.1 逻辑电平和抗干扰能力.....	159	5.7.2 CMOS 集成门.....	186
5.2.2 动态响应特性(开关速度).....	162	5.8 各种集成逻辑门的性能比较.....	191
5.2.3 负载能力.....	162	小结.....	192
5.2.4 功耗.....	164	参考书目.....	193
5.3 TTL 集成逻辑门.....	164	思考题及习题.....	193
5.3.1 TTL 与非门的工作原理.....	164	附录 5.1 TTL 中速与非门电参数规范	
5.3.2 其它 TTL 集成门.....	167	和测试条件.....	198
5.3.3 TTL 集成门的主要参数及其测试电路.....	173	附录 5.2 TTL 低功耗肖特基系列非门	
5.3.4 使用 TTL 门的几个实际问题.....	175	电参数规范和测试条件.....	199
5.4 高阈值逻辑门.....	179	附录 5.3 TTL2 输入端四异或门电参数	
5.5 发射极耦合逻辑门.....	179	规范和测试条件.....	200
5.5.1 工作原理.....	180	附录 5.4 半导体集成电路型号命名方法.....	201
5.5.2 ECL 电路的性能特点和主要参数.....	181	附录 5.5 国标 TTL 集成电路与国外	
*5.6 集成注入逻辑.....	182	TTL 集成电路型号对照的说明.....	202
5.7 单极型集成逻辑门.....	183		
5.7.1 PMOS 和 NMOS 集成逻辑门.....	183		

第六章 组合逻辑电路

6.1 组合逻辑电路的一个例子.....	203	6.4.2 多路分配器.....	215
6.2 逻辑电路的等效关系.....	204	6.5 编码器和译码器.....	216
6.2.1 等效的与门和与非门, 等效的或门		6.5.1 BCD-7 段译码器.....	216
和或非门.....	205	6.5.2 BCD 制变为十进制的译码器.....	218
6.2.2 各种门之间的等效变换.....	205	6.6 只读存储器.....	220
6.2.3 正逻辑和负逻辑.....	207	6.6.1 只读存储器的原理和结构.....	220
6.3 组合逻辑电路的设计.....	209	6.6.2 只读存储器的编程.....	224
6.3.1 用与非门构成的异或门.....	211	6.6.3 只读存储器的应用.....	225
6.3.2 逻辑比较器.....	211	6.7 可编程逻辑阵列.....	227
6.3.3 二进制加法器.....	212	小结.....	228
6.3.4 二进制乘法器.....	213	参考书目.....	229
6.4 多路选择器和多路分配器.....	214	思考题及习题.....	230
6.4.1 多路选择器.....	214		

第七章 集成触发器

7.1 基本 RS 触发器.....	235	7.2.3 T 触发器.....	244
7.1.1 用或非门组成的基本 RS 触发器.....	235	7.2.4 JK 触发器.....	246
7.1.2 用与非门组成的基本 RS 触发器.....	238	7.2.5 采用主从式结构防止空翻.....	247
7.1.3 防反跳开关.....	240	7.2.6 采用维持-阻塞的方式防止空翻.....	249
7.2 时钟触发器.....	241	7.3 触发器功能小结.....	253
7.2.1 时钟 RS 触发器.....	242	7.3.1 集成触发器的功能比较.....	253
7.2.2 D 触发器.....	242	7.3.2 不同功能触发器之间的代用.....	253

7.4 触发器的脉冲工作特性	257	思考题及习题	269
7.4.1 维持阻塞 <i>D</i> 触发器的脉冲工作特性	257	附录 7.1 CT 1072、CT 2072 型与门输入	
7.4.2 主从 <i>JK</i> 触发器的脉冲工作特性	258	主从 <i>JK</i> 触发器功能表及主要电	
7.5 MOS 触发器	259	参数	273
7.5.1 NMOS 基本 <i>RS</i> 触发器和时钟 <i>RS</i>		附录 7.2 T 076 型单 <i>D</i> 触发器主要	
触发器	259	电参数	274
7.5.2 CMOS 触发器	260	附录 7.3 C 013、C 043 型双 <i>D</i> 触发器主要	
7.6 集成单稳态触发器	262	参数	275
7.6.1 5G555 型组件的工作原理	263	附录 7.4 5 G 1555 型时基电路主要	
7.6.2 单稳态触发器	266	电参数	275
小结	268		
参考书目	268		

第八章 时序逻辑电路

8.1 移位寄存器	276	8.4.1 移位寄存器型分配器	297
8.1.1 寄存器	276	8.4.2 计数器型分配器	299
8.1.2 移位寄存器	277	8.5 读写存贮器	301
8.2 异步计数器	280	8.5.1 RAM 结构	302
8.2.1 二进制异步计数器	280	8.5.2 静态存贮单元	303
8.2.2 十进制异步计数器	284	8.5.3 读写控制器	304
8.3 同步计数器	286	8.5.4 RAM 整体结构举例	305
8.3.1 二进制同步计数器	286	8.5.5 动态存贮单元	306
8.3.2 十进制同步计数器	289	8.5.6 其它存贮器	307
8.3.3 十进制可逆计数器	293	小结	307
8.3.4 <i>N</i> 进制计数器	293	参考书目	308
8.4 脉冲顺序分配器	296	思考题及习题	309

第九章 微处理器和微型计算机

9.1 微处理器和微型计算机的		9.4 微型计算机的存贮器	331
基本结构	316	9.5 微处理器的控制器	331
9.1.1 输入-输出接口	317	9.5.1 控制器的微操作控制信号	
9.1.2 微处理器	317	及其时序	331
9.1.3 存贮器	319	9.5.2 控制器的组成原理	335
9.1.4 总线结构	319	9.6 输入、输出设备和输入、输出接	
9.2 微型计算机的操作过程	321	口简述	340
9.3 微处理器的算术逻辑部件		小结	341
和寄存器	324	参考书目	342
9.3.1 算术逻辑部件	324	思考题及习题	342
9.3.2 寄存器	327		

绪 言

电子技术是发展很迅速的学科之一。它的应用目前已广泛渗透到各种领域,成为现代先进科学技术的一个重要组成部分。

电子技术也称为**电子学**。英语为 electronics。顾名思义,它是与**电子**(electron)有关的技术。脱胎于物理中的电磁学,虽然从十六世纪起,人们已开始探索和研究电的现象,取得了不少成就,但是直到 1897 年,才由**汤姆逊**(J. J. Thomson)用实验验证了电子的存在。本世纪 1904 年,**弗列明**(J. A. Fleming)发明了最简单的真空二极管,用来检测微弱的无线电信号。以后,1906 年**德福雷斯特**(L. De Forest)在二极管中再引入了一个控制栅极,成为具有放大作用的三极管^①。于是电子技术作为一门新兴学科而兴起,迄今不过七、八十年。在开始阶段,它是与无线电技术交织在一起的,所以又称为**无线电电子学**(radio electronics)。这种技术后来扩展到用于控制、计量和计算技术等方面,作为处理信息(例如放大、运算、转换、编码等)的一种手段,形成了**信息电子学**(information electronics)。另一方面,电子学与电力工程相结合,成为一种变换电能形式的新型工具(例如把交流电变为直流),产生了**电力电子学**(power electronics)。此外,电子技术与其它学科相结合,又形成了许多边缘学科,例如**光电子学**(optoelectronics)、**空间电子学**(space electronics)、**核电子学**(nuclear electronics)、**生物医学电子学**(biomedical electronics)等等,不胜枚举。

本绪言中将讨论两个问题,即什么是电子技术和怎样学习电子技术课程^②。

0.1 什么是电子技术

电子技术的特征,是它要采用电子管、离子管、半导体管这一类**电子器件**(electronic device)。因此学习电子技术,首先要了解电子器件。

电子管(electron tube)是电子技术发展的开路先锋。它们也称为**真空管**(vacuum tube),都有密封的管壳,内部抽到高真空。常用的**热阴极电子管**(thermionic tube)中,有一个阴极,它可由灯丝加热,使温度升高,发射出电子。**光电管**(photo-electric cell)则依靠光线照射到阴极上来发射电子。电子管中的电流,是由于这些电子受外加电场和磁场的影响,在真空中的运动所形成的。

离子管(ion tube)是电子管的兄弟。它们也要抽成高真空,然后再充以适当的气体,所以也称为**充气管**(gas-filled tube)。管中的气体原子或分子在外加能量的条件下,可分为电子和带正电荷的离子。这类管子中的电流,除电子外,正离子也起着作用,因此叫离子管。离子管在外

① 参阅《电子科学技术》1978 年第 11 期 46 页“国外电子技术发明创造大事记”。

② 可放映西安交通大学 1981 年摄制,沈尚贤主讲的教学电视录象《电子技术基础绪论》代替讲课。

观上与电子管相似,不过当管内的正离子与电子复合时,将释放能量,能够发光。流经管子的电流愈大,发光愈强。

电子管和离子管都是属于电真空器件,为电子器件的第一代。肖克利(W. Shockley)、巴丁(J. Bardeen)和布拉顿(W. H. Brattain)等经过共同的研究,于1948年创制出了第一只晶体管(transistor),这是电子技术发展的一个里程碑。它们是用半导体晶体材料制成的,所以我国把它们称为晶体管^①,也叫做**半导体管**(semiconductor device)或者**固体器件**(solidstate device)。这类管子是电子器件的第二代。它们体积较小,重量较轻,寿命较长,耗电较省,耐振性较好,在许多电子设备中,已逐渐代替了它们的前辈。在无线电收音机和电视机中,以前采用电子管,现在则基本上晶体管化了。可是这并不意味着电子管、离子管将会完全淘汰,因为还有不少场合,可以发挥它们的优势。例如电视机中的显象管,电子示波器中的示波管,无线电发射台中的大功率高频放大管等,目前还是采用电子管。在工作频率很高的微波设备中,电子管仍大有用武之地。半导体管也有弱点,例如过载能力较差,受温度变化的影响较大,外加电压不能太高等。我们相信,这些缺点会随着生产技术的发展而得到改善。

电子器件与通常的电阻器、电容器、电感器、变压器、开关等元件适当地连接起来,组成**电子电路**,才能发挥它们的容易控制、工作灵敏、响应速度快等特点。因此,学习电子技术除了要了解电子器件外,还要研究电子电路。电子电路与普通电路的区别,在于它们包含有电子器件,而这些器件的特性往往是非线性的。

由各种单个的器件和元件连接起来的电路称为**分立电路**(discrete circuit)。目前的分立式电子电路通常是把许多元件和器件焊接在印刷电路板上组成的。复杂的电路有成千上万个焊接点,这些焊接点的接触不良,往往是电子设备发生故障的一种原因,影响设备运行的可靠性。

由于半导体技术的发展,现在已能把许多晶体管与电阻等元件做在同一块硅晶片上组成电路,这就是五十年代末出现的**集成电路**(integrated circuit,简称IC),它们既进一步缩小了体积,减轻了重量,降低了功耗,又由于减少了电路中的焊接点,提高了工作的可靠性。这种集成电路很象一个硅晶体管,不过管脚多些,内部不仅包含器件,还有元件和连线,是“管”与“路”的结合,可称为**组件**(module)。集成技术的发展情况,如图0.1.1所示。图中的小圆圈表示各个时期一个典型组件的**芯片(chip)**中所包含的元、器件数,即**集成度**(degree of integration)。而那

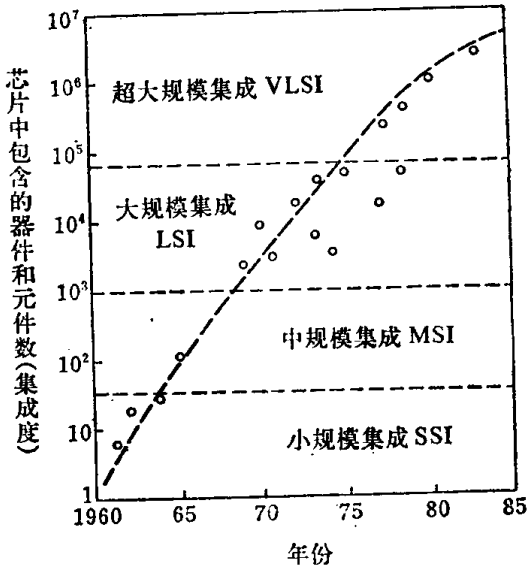


图 0.1.1 集成电路的发展趋势

^① 习惯上把本书第二章所讲的半导体三极管称为晶体管,虽然从广义上讲,晶体管还可以包括用半导体制成的二极管等。

的虚线,则表示发展趋势。由图可见,从1960到1980的20年间,半导体芯片上的集成度增加了约 10^6 倍。因此,每年的平均递增率为 $\sqrt[20]{10^6}=1.995$,也就是说,每年约翻一番。按照集成度的大小,组件有**小规模、中规模、大规模和超大规模**(small、medium、large、very large scale integration,简写为SSI、MSI、LSI和VLSI)之分。80年代起,由于受材料和工艺等的限制,技术上如无新的突破,则集成度的发展趋势将略减缓,预计将每一年半到两年递增一倍^①。集成组件的出现,使实现同样的电子电路的价格比采用分立电路便宜,这就进一步促进了电子技术的发展。展望未来,今后的集成度必将进一步提高。还应指出,目前的超大规模集成电路,每块半导体芯片上制有上百万个元件和器件,而芯片的面积只有几十平方毫米,象一片指甲那样大,所以集成电路的出现,使电子学来了一个新的飞跃,进入了**微电子学**(microelectronics)时代,迅速地促进了航天、计算机等先进技术的发展。当然,在采用集成组件的电子系统中,还是要配合应用一些分立的元、器件,以获得所需要的功能,不过这些电子设备的构成,已是大大简化了。

电子技术的内容,还包含它们的应用。在这篇绪言中如果要列述电子技术各种各样的应用是困难的。因此,现在只能归纳为四个主要方面,扼要地讲一下。

电子技术最初应用于**通信**(communication),就是传递消息。无线电技术与电子技术相结合,使通信科学在本世纪内获得惊人的发展。过去千里眼、顺风耳的幻想,如今都已成为现实。利用同步地球卫星的转播,可以看到世界各地当时的实况。除了无线电外,有线载波通信、激光通信、光纤通信等,也都应用了电子技术的成就。

控制(control)是电子技术的另一个大的应用领域。在自动化技术中,电子控制是后起之秀。它具有快速、灵敏、精确等特点。程序控制机床,就是一个例子。先进的自动控制系统中,首先要检测被控对象的情况,然后进行自动调节,所以控制与测量经常是联系在一起的。目前电子测量技术和电子计量仪表的应用,日益广泛。一个大的电力系统,依靠电子技术,可以远距离测量各发电厂的参数,并及时进行合理的自动调整和调度,保证运行的可靠性,提高劳动生产率。诸如火箭发射等的控制,更是离不开电子技术。

电子技术又有力地推动了**计算机**(computer)的发展。计算机可以帮助人们的脑力劳动,所以它又称为电脑。四十年代第一部通用数字电子计算机,用了一万八千个电子管,是用分立电路组成的,所需功率为130千瓦,重量达三十吨,占地约150平方米,运算速度每秒仅约5000次,而且故障率高。现代的微型计算机,采用大规模和超大规模集成电路,可以做得很小,功能则日益扩大。一些大型机的运算速度,每秒达上亿次。一只袖珍电子计算器,体积小,使用方便,用干电池作能源,价格仅几十元。如果没有微电子学,这些是难以想象的。综合地利用电子技术进行无线电通信和计算机控制等,是实现国防现代化的一个关键环节。

电子技术目前已深入于人们的**文化生活**(cultural life)中。广播、电视、录音、录像,无一不与电子技术有关。在教育工作中,电子技术也日渐成为一种重要的辅助工具。遥控的航空和航海模型、电子玩具以及电子琴等,为我们提供了丰富多彩的文体生活。走时准确、价格便宜的电子

① 参阅 N. G. Einspruch: "VLSI Electronics Microstructure Science Vol. 3" p. 2, 1982.

表,是机械手表的具有威胁的竞争对手。微型电脑能够减轻人们的家务劳动。

通信、控制、计算机、文化生活这四个词的英语,都是以字母 C 开始的,所以电子技术应用,可以概括为四个“C”。

综上所述,可知电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。这样就回答了什么是电子技术的问题。知道了电子技术的概貌,可以激励读者的学习兴趣。

0.2 怎样学习电子技术课程

在讲学习方法之前,有必要先说明一下本课程的性质、任务以及内容的重点。

根据教学大纲^①,本课程是“一门电子技术方面入门性质的基础技术课”。它的任务是“使学生获得电子技术的基本理论、基本知识和基本技能,培养学生分析问题和解决问题的能力,为以后深入学习电子技术的某些领域,以及为电子技术在专业中的应用打好基础”。为此,本课程的内容,在于讲述电子学中最初步、最根本、最共性的东西,着重抓“三基”,而不是面面俱到地讨论电子技术的各个方面。概要地说,基本理论主要是指在已经学过“电路”课的基础上,进一步掌握电子电路的分析方法;基本知识是要求熟悉基本的电子器件和电子电路的性能及其主要应用;基本技能是学习电子测试技术和电子电路的运算能力和识图能力。

关于器件、电路、应用的三者关系,则是: **管、路、用结合,管为路用,以路为主**。就是把课程的重点,放在最基本的电路上。对于电子器件,包括集成组件,则重点在于了解它们的外部性能和如何用于电路中,不深入论述内部微观的物理过程及生产工艺等,而且只讲常用的半导体器件。

就分立电路与集成电路的关系来说,则是: **分立为基础,集成是重点,分立为集成服务**。以适应当前电子技术的发展趋向。需要指出,这里所讲的“集成”,是包括具有集成组件的电路和系统,而不仅仅指集成组件本身。

电子电路按照它们处理信号的不同,可以分为模拟电路 (analog circuit)和脉冲数字电路 (pulse and digital circuit)。在模拟电路中,电流和电压的波形是连续变化的。图 0.2.1 (a) 所示的正弦波,是一种常用来分析电路作用的模拟信号的波形。在脉冲数字电路中,信号波形具有突然的跃变,是脉冲式的。图 0.2.1 (b) 所示的锯齿波和矩形波,是这类波形的例子。这两类电

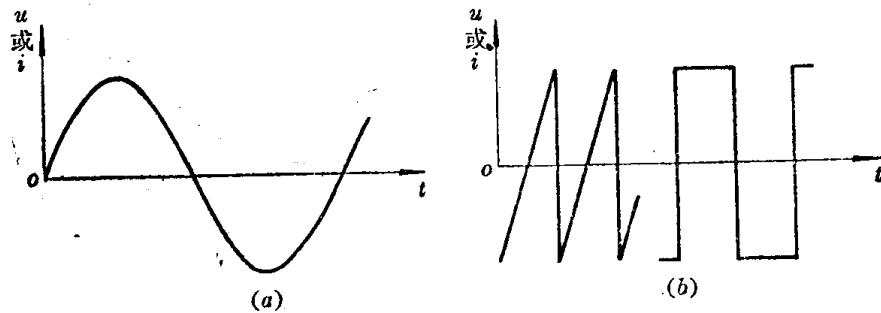


图 0.2.1 典型的信号波形
(a) 正弦波 (b) 锯齿波和矩形波

^① 高等工业学校《电子技术基础教学大纲(草案)》,人民教育出版社,1980年。

路的区别,在于电路中电子器件工作状态不一样,后者经常工作在开关状态,时通时断,而前者不如此。抓住了这一点,就容易理解它们工作的特殊性。由于当前电子技术的发展,本书对于脉冲数字电路部分,主要讲数字集成电路。

下面针对本课程的特点,谈谈学习方法。

本门课是属于技术基础课的性质。以后同学们要转向学习专业课,接触工程实际,因此在学习时要注意采用工程观点。又由于它是一门实践性很强的课,所以应重视实验技术。先讲工程观点的问题。

工程技术人员要从实际出发,讲求实效。电子技术的一个特点,就是电路中含有非线性的电子器件,分析起来比较复杂^①。

图 0.2.2 是一个简单的串联电路,它包含有一只二极管 D 。如果要计算流过电路的直流电流 I_D ,须先知道二极管的端电压 u_D 与流过管子的电流 i_D 的关系,如图 0.2.3 的伏安特性所示;然后按下章的图解法,可以求得电流 I_D 为 9.32mA,二极管两端间的直流压降 U_D 为 0.68V(见例题 1.5.1 的解)。但是在工程计算中,要考虑下列实际因素:

一、同型号的电子器件的特性,容许有一定的差异,称为分散性。因此用同一类型的管子,在同样的电路中,所得到的实际电流并不一致。

二、所用电阻的实际阻值与其标称值相比是有偏差的。如果采用标称值为 $1\text{k}\Omega$ 偏差容许值为 $\pm 10\%$ 的电阻,那么实际阻值可能是在 0.9 到 $1.1\text{k}\Omega$ 之间,用这样的电阻作为图 0.2.2 中的 R ,所得的实际电流也会与按标称值算出的数值不一样。

三、环境温度的改变、元件和器件的老化以及电源电压的波动,也会使电流随温度和时间而变。

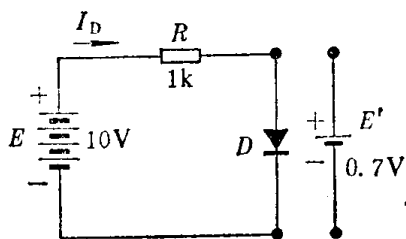


图 0.2.2 简单的二极管电路

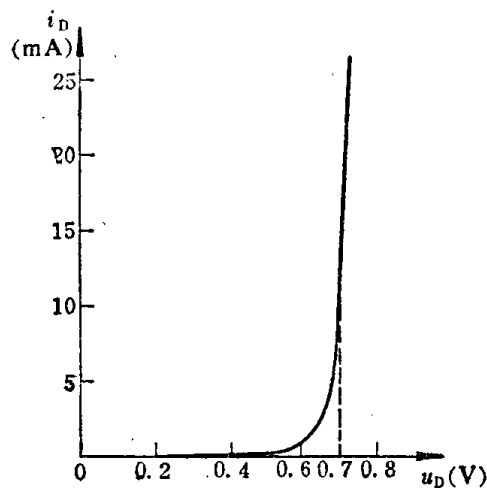


图 0.2.3 硅二极管伏安特性

由于这些因素,即使采用过于精确的求解方法,实际意义也不大。对此,我们常用工程估算法,既简便,又能满足实际工作中的计算要求。例如从图 0.2.3 的硅二极管伏安特性中可见,当 i_D 较大时,管压降 u_D ,基本上约为 0.7V ,与电流的大小无关。于是图 0.2.2 中的管子,可近似地用一个内阻为零的 0.7V 反电势 E' 来代替,可得

$$I_D \approx \frac{E - E'}{R} = \frac{10 - 0.7}{1} = 9.3\text{mA}$$

^① 参阅邱关源主编,《电路》(修订本,下册)第十三章“非线性电路”,人民教育出版社,1983年。

而从图 0.2.3 可见, 当 i_D 为 9.3mA 时, 管压降 u_D 仅略小于 0.7V, 今假定 u_D 为 0.7V, 由于它比电源电压 E 小十多倍, 因此所造成的误差仅约为 0.2%, 即

$$\text{误差} = \frac{9.32 - 9.3}{9.32} \times 100\% = 0.21\%$$

在此例中, 还可以进一步忽略管子正向导通时的压降, 得

$$I_D \approx \frac{E}{R} = \frac{10}{1} = 10\text{mA}$$

即使这样估算, 误差还只有 7.3%, 这在工程上通常是可以容许的。

因此, 采用工程观点, 进行近似估算, 可使分析计算复杂电子电路的工作大大简化, 这是学习本课的一个特点。

但是估算必须合理。上例中由于 E 为 10V, 比管压降 0.7V 大得多, 所以忽略管压降去求电流, 尚属合理。如果 E 只有 2V, 那么管压降就不能忽略。如果不忽略管压降, 而仍假定管压降为 0.7V, 则估算结果为

$$I_D \approx \frac{2 - 0.7}{1} = 1.3\text{mA}$$

从图 0.2.3 中看出, 在 1mA 左右的小电流时, 管压降约为 0.6V, 于是得 I_D 约为 1.4mA, 两者相差仍不太大。考虑到管子特性的分散性等因素, 估算结果的误差不超过 10%, 工程上一般仍可认为是合理的。但若完全忽略掉管压降, 则

$$I_D \approx \frac{E}{R} = 2\text{mA}$$

那么误差太大, 就不合理了。所以估算时应注意是否合理, 就是要看产生的误差是否可以容许。

前面已经讲过, 电阻的实际阻值与其标称值相比是有偏差的。所用电阻的容许偏差愈大, 则所得实际电流与按标称值计算出来的数值之间的误差, 也可能愈大。读者或许要问, 在电路中, 我们改用容许偏差较小的电阻, 岂不更好? 回答是不完全这样。因为精密的电阻, 价格较贵, 应考虑经济问题。从工程观点来看, 倒是要尽量采用价钱比较便宜而能满足实际要求的产品。

下面谈谈学习方法中的第二个问题, 就是要重视实验技术。

实验技术在电子学中占有相当重要的地位。仅仅有书本知识, 而缺乏实践, 不能把电子学真正学到手。同样一个晶体管放大电路, 各人装起来的效果可能大不相同, 有的使人满意, 有的却不行。或者有失真, 或者干扰大, 或者产生寄生振荡, 完全失去了放大外来信号的作用。所以, 装好了的电子仪器, 往往要经过调试才能良好地工作。电子设备通常较为复杂, 出故障时进行检修, 更需要有丰富的实际经验。为此, 一定要把实验技术作为一种基本功, 好好重视起来。

归纳起来, 通过实验, 要求达到下列目的:

一、熟悉最常用的电子仪器。如示波器、正弦波和脉冲波信号发生器、交流毫伏表、直流稳压电源等, 能够正确使用。今后的工作中, 必然会遇到许多新的电子仪器, 本课程仅仅打一个基础。

二、掌握基本的电子测量和调试技术。例如测量晶体管的电流放大系数、放大器的电压放大倍数等。

三、通过实验,增加感性知识。把理论与实践结合起来,可以学得活,学得牢。

四、进一步培养观察和思考的能力,严谨认真的工作作风,实事求是的科学态度,以及文明做实验的习惯。在实验中往往会发生一些未意料到的现象,可供思考和探索。

五、提高写作实验报告的能力。报告要写得清晰、整洁,合乎规范。通过这一环节,可以培养编写技术文件的才能,而这种才能,往往是不少科技人员所欠缺的。

由于实验教学的重要,有些院校录制了一些关于电子仪器和电子测试技术方面的电视录象片,可供观看。

总之,电子技术是丰富多彩的,电子世界日新月异,希望大家努力学习,把这种新技术逐渐熟悉起来,为祖国的四个现代化多做贡献。

参 考 书 目

[参 0.1] 冯秉铨:《今日电子学》,科学普及出版社,1981年。

[参 0.2] 陈芳允:《无线电电子学的新发展》,科学出版社,1980年。

[参 0.3] B. H. Shore 著,李锦林,熊大传译:《近代电子学概说》,科学普及出版社,1981年。

[参 0.4] J. Millman 著,清华大学电子学教研组译:《微电子学:数字和模拟电路及系统》,第1~9页,引言——电子学简史,人民教育出版社,1981年。

[参 0.5] 中国科技大学录制,张作生主讲:《电子时代》,电教录象片,1979年。

附录 0.1 国内有关电子技术的报刊^①

一、报纸:电子报,中国电子报,北京电子报,电子市场报(以上为周报);国际电子报,计算机世界,儿童计算机世界(以上为半月刊)。

二、学报:电子学报,电子科学学报,半导体学报,计算机学报(以上为双月刊);通信学报(季刊)。

三、专业刊物:电子技术,电子科学技术,电子技术应用,电信技术,电信科学,电信快报,无线电电子学与自动化技术(国外科技资料馆藏目录),半导体文摘,电子工艺技术,电测与仪表,自动化仪表,小型微型计算机系统,电视月刊,现代通讯,计算机研究与发展,微型电脑应用文摘(以上为月刊);电视技术,电声技术,电子测量技术,电子与自动化,无线电与电视,半导体情报,半导体技术,核电子学与探测技术,电子与电脑,微电子学与计算机,微型计算机,计算机科学,信息与控制,计算机工程,计算机应用与软件,机械与电子(以上为双月刊);电子生产技术,电力电子技术,国外电力电子技术,陕西电子,微计算机应用,微型电脑,微小型计算机开发与应用(以上为季刊)。

四、科普刊物:电子世界,无线电(均为月刊)。

^① 本附录系根据西安市邮政局编印的《1985年报刊简明目录》摘录的,均由邮局发行。其他有关刊物尚多,可查看《中国报刊名录》,新华出版社,1985年。

第一章 半导体二极管和二极管电路

绪言 0.2 节中已经提及, 对于电子器件, 本书只讲半导体管。这一章先来讨论半导体二极管。按照“管为路用”的编写原则, 书中对于器件内部的微观物理过程, 只作简单介绍, 不求深入, 而把论述的重点, 放在器件的外部性能上。本章在讲了二极管之后, 接着就分析含有二极管的一些典型电路。至于器件的设计和制造方面的内容, 则不属于本课程的范围。

1.1 半导体

1.1.1 半导体和金属导体

我们已知, 象锗和硅那样的半导体, 与银、铜等金属导体相比, 虽然都是固体, 但在导电性能方面有很大的差异。金属导体的电阻率很小, 容易导电; 而半导体的电阻率比导体大许多数量级。例如从表 1.1.1 可见, 纯净的硅的电阻率比银和铜大一千亿(10^{11})倍以上。

为什么导电性能有这样大的差别呢? 可以用原子结构的不同来解释。由化学元素周期表可知, 银和铜属于 I 族, 原子中的价电子很容易从原子中脱离出来, 成为带有负电荷的自由电子, 起着导电作用。一个电子所带的电荷量(不计其负号) q 为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 。从能带理论来说, 它们的价带和导带之间没有禁带, 也就是禁带宽度为零, 所有价电子都可能成为传导电流的载流子(carrier), 因此电阻率很低。锗和硅则属于 IV 族, 每个原子有 4 个价电子, 分别与晶体中 4 个相邻原子中的价电子组成共价键。这些价电子需要具有足够的能量, 才能从原子中挣脱出来, 成为自由电子, 而价电子则是束缚电子, 不能起载流子的作用。也就是说, 半导体的价带与导带之间, 存在着窄的禁带, 其宽度为 E_G 。例如表 1.1.1 中列出了硅的禁带宽度为 1.11eV, 即价电子至少要具有

表 1.1.1 银、铜、锗、硅的电阻率^①
(材料纯净; 温度在 300 K 即 27°C 时)

材 料		电 阻 率 ρ [$\Omega\cdot\text{m}$]	禁 带 宽 度 E_G [eV]
导 体	银 Ag	1.6×10^{-8}	0
	铜 Cu	1.67×10^{-8}	0
半 导 体	锗 Ge	0.46	0.66
	硅 Si	2300	1.11

(方括弧内表示所采用的单位。eV 表示单位为电子伏特)

$qE_G = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.11 = 1.776 \times 10^{-19} \text{J}$, 才能从共价键中释放出来。因此, 半导体的导电性能, 比导体差很多, 但优于禁带较宽的绝缘体。当温度升高时, 因热能激发出来的载流子急剧增加,

① 摘自《电机工程手册》第一篇“常用数据和资料”和第十一篇“半导体材料”, 机械工业出版社, 1980 年。其它资料中所列的数据, 可能与本表有差异。

从而使半导体的电阻率大大下降。

半导体导电的另一个特点,是除自由电子外,还存在有空穴(hole)。当价电子从共价键中挣脱出来成为自由电子后,该共价键中就留下一个空穴。于是,其它相邻共价键中能量不够 E_g 电子伏特的价电子,可能跑过来填补这个空穴,从而使空穴从原来位置转移到那个相邻的共价键中。由于空穴处缺少一个电子,且可以移动,它实际上相当于一个带正电荷 q 的载流子,也能起导电作用。不过在同一电场下,自由电子和空穴的流动方向是相反的,因此由它们形成的电流则是相加的。此外,在纯净的半导体中,自由电子和空穴这两种载流子受热激发总是成对地产生,它们相遇复合时也是成对地消失,因此两者的数目总是彼此相等。这样的半导体称为本征(intrinsic)半导体。

1.1.2 本征半导体

由上所述,本征半导体中的电子密度 n 与空穴密度 p 总是相等的,通常用 n_i 表示,即

$$n = p = n_i \text{ ①}$$

或

$$np = n_i^2 \text{ (1.1.1)}$$

式中 n_i 代表在本征情况下的电子或空穴密度,它与温度 T 很有关系。例如当 $T=300\text{K}$ 时,硅的 n_i 为 1.48×10^{16} 个/ m^3 ,而当 T 升到 325K 时, n_i 将增加到 10^{17} 个/ m^3 (见图 1.1.1)。

n_i 的数值是热激发和复合两种互相矛盾的过程达到动态平衡的结果。因为当温度升高时,单位时间内半导体受热激发释放出来的载流子(自由电子和空穴)将增加,而载流子数目的增加,又导致电子和空穴相遇复合的机会增多,从而使载流子数目减少。当激发率和复合率(单位时间内激发和复合的载流子数)相等时, n_i 将维持不变。这种动态平衡的情况,在日常生活中也经常发生。例如冬天在房间里生一个火炉,当热量的产生率与散失率(散失到室外冷空气中)平衡时,室温将维持恒定。如果炉子烧得旺些,那么室内温度将升高到另一个新的平衡状态为止。

每立方米本征硅中的 n_i 值,可用 $n_i^2 = AT^3 e^{-B/T}$ 来计算②,式中 A 和 B 为常数,它们分别为 1.5×10^{45} 和 1.4×10^4 。图 1.1.1 表示本征硅的 n_i 与 T 的关系曲线,其中图(a)的纵坐标采用线性坐标,而图(b)则用对数坐标。在所示的温度范围内($300 \sim 350\text{K}$),由图(b)可见, $\log n_i$ 与 T 的关系几乎成线性关系,因此 n_i 基本上按 T 的指数关系上升。

【例题 1.1.1】 在 300K 到 350K 的范围内,求本征硅的温度每增加 10K (即 10°C), n_i 相对地增加到原来的几倍。

【解】 由图 1.1.1 可见,在所示的温度范围内, $\log n_i$ 与 T 基本上成线性关系,这说明 n_i 大致随着 T 按等比级数递增。今知当 $T=300\text{K}$ 时, $n_i=1.48 \times 10^{16}$; 而 $T=350\text{K}$ 时,则 $n_i=52.3 \times 10^{16}$ 。即 T 增加 50K 时, n_i 增加到原来的 35.3 倍($52.3 \div 1.48=35.3$)。因此温度每增加 10K , n_i 平均约递增到原来的 2 倍($\sqrt[5]{35.3}=2.04$)。

这例题在于说明本征半导体的 n_i 受温度的影响很大。硅的温度只要增加 10°C , n_i 将增加一倍以上。

① 式中 n 和 p 分别为 negative(负)和 positive(正)的第一个字母,代表带负电荷的自由电子和带正电荷的空穴的密度。 n_i 的下角注 i 为 intrinsic(本征)的第一个字母。

② 参看[参 1.5]1-1 节,本书图 1.1.1 中的曲线,是按此方程式绘出的。