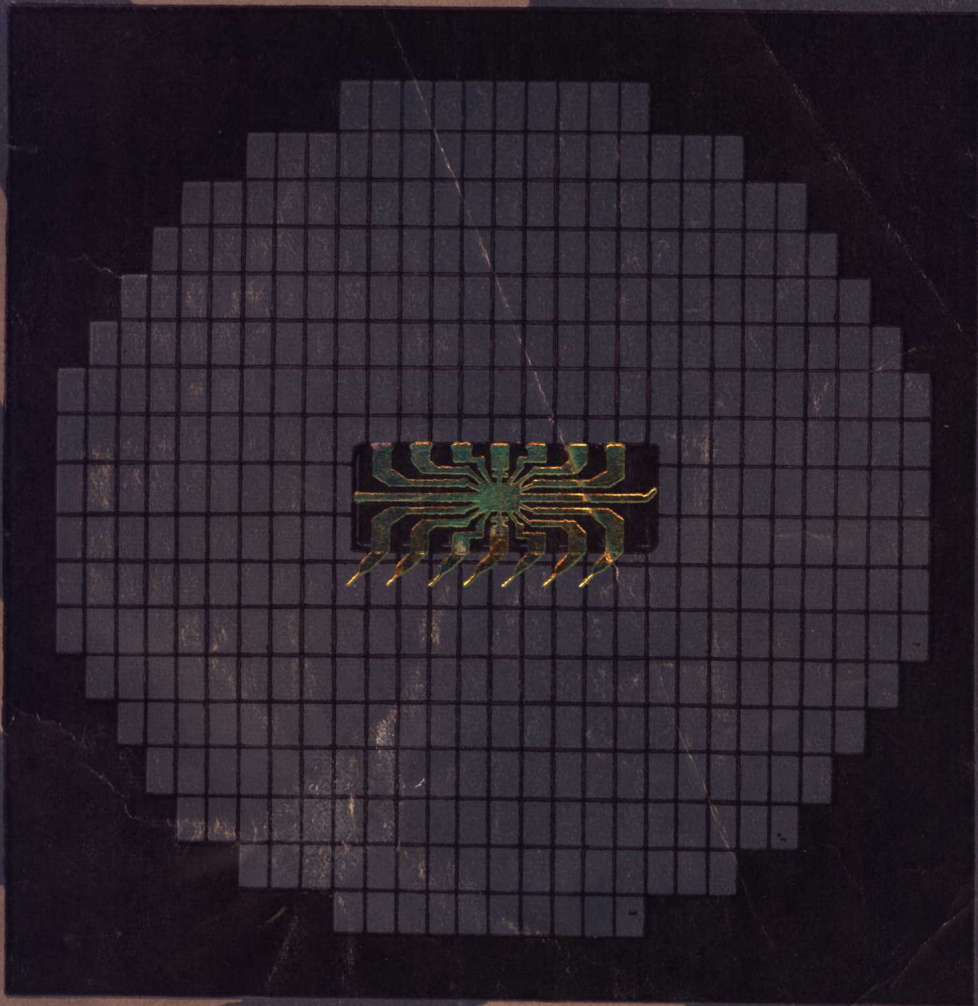


[美] J·米尔曼 著

微电子学:数字和模拟电路及系统

清华大学电子学教研组 译

上册



人民教育出版社

微电子学：数字和模拟电路及系统

上册

[美] J. 米 尔 曼 著
清华大学电子学教研组 译

人 民 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书系根据美国哥伦比亚大学著名教授 J·米尔曼 所著《MICROELECTRONICS: Digital and Analog Circuits and Systems》一书(1979年版)译出。书中全面阐述了微电子学的基本理论,详细介绍了半导体器件(包括各种规模的集成电路)、数字电路与模拟电路及其系统,及时反映了最新技术成果。译本共分三册。上册第一章至第四章讲述半导体器件特性,第五章至第九章介绍数字电路及系统;中册第十章至第十八章集中介绍模拟电路及系统,并有附录;下册包括习题和 T.V. 帕帕托马斯博士及其助手为原著所作的习题解答。每章末尾均有复习题,便于读者巩固概念、掌握重点、启发思考。

本书内容较新,体系完整,材料丰富。可供高等学校计算机、自动化、无线电等有关专业使用,也可供有关方面的科研人员和工程技术人员参考。

本书责任编辑张志军。

微电子学：数字和模拟电路及系统

上 册

〔美〕 J. 米 尔 曼 著

清华大学电子学教研组 译

*

人 民 邮 电 出 版 社 出 版

新华书店北京发行所发行

山东新华印刷厂德州厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张 17.25 字数376,000

1980年12月第1版 1981年9月第1次印刷

印数 00,001—10,500

书号 15012·0299 定价 1.50 元

译 序

近年来微电子学领域的发展日新月异。为了培养一支掌握现代科学技术的队伍，理工科大学的学生，特别是电子工程、自动化工程、无线电工程等专业的学生，必须很好地掌握微电子学的基本知识与技能；从事有关方面工作的科技人员，也必须不断更新他们在微电子学方面的知识，及时了解国际上的最新成果。最近，美国出版了哥伦比亚大学著名教授J·米尔曼一本这方面的教材。这本书反映了当前最新的技术成果，体系完整，材料丰富，教学法的考虑比较细致，既有微电子学基本理论，又有大量实例、复习题、习题和解答，比较适合自学和作为大专院校有关专业电子学课程的教材。对于从事实际工作的科技人员，也很有参考价值。为此，我们决定把它译出。

全书译校工作由童诗白同志主持并参加讨论，作出关键性指导。本教研组孙昌龄同志翻译序、第1~6章、9~18章，胡东成同志翻译引言、第7~8章、附录、习题及习题解答。顾廉楚同志校阅了第二、三、四章，其余部分由孙昌龄、胡东成二同志互校。

由于我们的水平有限，译校工作比较仓促，必有不少缺点和错误，请读者批评指正。

清华大学自动化系电子学教研组

1980年12月

序

本书主要是为电气工程专业大学生作为现代电子学教材而写的。就广度和深度来说,其所包含的内容也将有益于物理专业人员以及那些从事实际工作的工程师和科学家——这些人希望不断更新他们在日新月异的微电子学(集成电路)领域内的知识。

本教材分为三部分,因而可用来作为几门不同的课程,以适合于讲课教师的目的和兴趣。第一部分(第一章~第四章)讨论**半导体器件特性**,打算给在电子学方面尚未初步入门的学生使用。了解第一部分所需要的预备知识仅仅是大学课程中前一、二年通常教过的物理和数学。这四章概述了半导体的性质,阐明单片集成形式的 pn 二极管和双极结型晶体管(BJT)的制造,并包括其特性的讨论。现代电子产品设计中,分立器件不再起那样重要的作用,因此,本书一开始(第四章)就把读者引导到集成电路(IC)片方面来了。

第二部分(第五章~第九章)探讨**数字电路与系统**。本书在模拟内容之前介绍数字内容,有着许多重要的原因:

1. 数字技术只涉及简单的布尔代数,是学生容易学会的。器件不是“导通”就是“截止”,工作状态很简单;需要详细说明的特性,基本上就是开关速度和门的负载。而另一方面,理解模拟问题却要困难得多,因为它们涉及频域和时域的概念、频率补偿,以及更详细、更复杂的电路分析。并且必须考虑小信号情况下的许多器件参数。

第二部分不需要电气工程的预备知识,因为在附录C的网络理论摘要中,阐述了数字网络所需要的很简单的电路分析。因此,包括**数字电子学**的课程可适用于二年级学生。

2. 大多数学生已经学过如何给数字计算机编程(有些人在中学就学过),这就使他们迫切要求学习电子学,以便弄清数字硬件是如何工作的。

3. 在许多大学里(哥伦比亚大学就是其一),电气工程专业计算机科学专门化只要求开一学期的电子学课程,显然就要把范围集中到数字电子学上。这样的一门课程可用第一和第二部分作为教材。这九章里包含的内容比一学期所能包括的稍微多些,从而使教师可自由地删减那些他(或她)不感兴趣或认为不太重要的部分。

4. 大多数电子学课程都要求做实验。设计和进行数字实验要比模拟实验简单得多。这样一个实验课程有可能与数字课程同时开出。而从模拟实验来看,这样安排是不太成功的,因为要求网络理论作为预备知识。

5. 大多数新型电子系统,就其本质来说,主要是数字的。

第二部分介绍小规模集成(SSI)逻辑门(与、或、非、与非……)以及用这些门做成的各种标准系列(DTL, TTL, ECL……)。接着介绍中规模集成(MSI)组合系统,诸如二进制加法器、数字比较器、奇偶校验器、译码器/多路输出选择器、数据选择器/多路转换器、编码器和只读存储器

(ROM)。作为时序数字系统的例子,这部分还讨论了几种触发器($S-R$ 、 $J-K$ 、 T 和 D 型),并用这些触发器作为移位寄存器和计数器的基本组成单元。

既然学生在应用双极型晶体管方面已获得了某些能力,并已了解到这类晶体管在数字系统中的应用,那么,就可介绍另一种半导体器件——场效应晶体管,并将其在逻辑门中加以利用。最后,在第九章里研究金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)和双极结型晶体管(BJT)的两种大规模集成(LSI)系统。主要有存储器,并包括动态金属氧化物半导体移位寄存器、金属氧化物半导体只读存储器(MOSROM)、可擦可编程只读存储器(EPROM)、可编程阵列(PLA)、随机存取存储器(RAM)、电荷耦合器件(CCD)、微处理器和微型计算机,以及集成注入逻辑(I²L)。

第三部分(第十章~第十八章)集中介绍了**模拟电路及系统**。首先给出分立双极结型晶体管或场效应晶体管的偏置方法,并讨论工作点的稳定性。得出每种器件的小信号模型,并用来计算单级和级联放大器的低频性能。

然后介绍反馈概念,指出反馈放大器的四种典型组态并阐述其特点。利用晶体管的高频模型来获得放大器(有反馈或无反馈)的频率响应。

线性(模拟)系统的基本组成单元是运算放大器(OP AMP),在最后四章里叙述其特性及应用并详细介绍运算放大器的单片模拟电路设计方法,包括保证稳定性的频率补偿方法。在运算放大器的广泛应用方面所讨论的内容包括:仪表放大器、模拟计算机、有源滤波器、精密交流/直流变换器、采样-保持系统、模拟多路转换器和多路输出选择器、对数放大器、数/模和模/数转换器、比较器、波形发生器、电压时基发生器、正弦波振荡器、功率放大器和单片稳压电源等。

在两个学期的电子学课程安排中,第二学期的内容基本上是第三部分。这部分内容作为一学期的课程来说,范围是太广了,这样做是为了使讲课教师有可能选出他(或她)希望强调的那些课题。

许多教学计划在电子学方面只设置一门主干课程,但另一方面却提供若干选修的电子学课程。本书包括的内容足够三个学期课程之用。

如果某一位讲课教师希望在第一门电子学课程中,把模拟内容放在数字内容之前讨论,则可选用第一部分以及第三部分的某些章节。然而还应包括第二部分中第八章第一节至第六节关于场效应管的内容。

由前面的讨论可明显看出,本书中各章节的内容是按这样的方式写成的:既可构成一门课程,也可构成几门课程,在这方面允许有很大的自由;其内容可视教师的愿望而定。

自从1959年平面型晶体管问世以来,集成片上的元件数目逐年倍增。随着IC片上元件密度的日益增加,电子电路与系统之间的差异就变得十分模糊了。事实上,我们经常把一块完整的单片组件(譬如一个运算放大器)看成是一个“器件”。当然,尽管单独一个晶体管显然是一个器件,而一个大规模微电子集成片则值得命名为“系统”,或至少是“子系统”;但是本书并不打算在器件、电路或系统之间作出毫不含糊的区分。

现代电子工程师靠连接标准微电子集成片来设计新产品(例如一台仪器、一个控制系统,计

算机系统或通讯系统等等),以使整个系统达到所希望的具体要求。他们试图尽可能利用大规模集成电路(LSI)与中规模集成电路(MSI)来减少组件的数目(因而也降低成本),仅当确实需要时,才利用小规模集成电路(SSI)片与分立元件(诸如很大的电容或电阻、电感、变压器、传感器等等)。显然,工程师必须知道市场上供应什么样的集成电路片,这些集成片完成什么功能以及有什么局限性。

鉴于上述事实,本书的目的在于逐步使读者从具备对半导体性能的定性认识,到了解器件的工作原理(特别是 pn 二极管、双极结型晶体管、金属氧化物半导体场效应管、电荷耦合器件和集成注入逻辑门),并且最终领会如何将这此单片器件组合起来,以形成具有截然不同的和有用的输入-输出特性的微电子集成片组。本书中研究种类繁多的集成电路片,不仅叙述关于在硅内制作什么的问题,而且使读者深入了解这些集成片所能完成的数字和(或)模拟功能。在研究每个电路或系统之后,附带介绍一种专门的组件,这种组件是市场上供应的并具有所要求的工作性能(例如,数字多路传输、模拟比较、数模转换等等)并阐明实际的(而不是理想的)器件在实用中的限制(由于温度、电压、功率、负载等等)。为了估价这些非理想特性,补充了典型的分立器件与集成电路片的厂家规范(附录B)。讨论的深度,论题的广泛选择,以及侧重于实际都是为了训练学生,使他(或她)在参加电子公司之后,能够立即从事实用的工程工作。

本书在米尔曼和哈克斯“集成电子学:模拟和数字电路及系统”(McGraw-Hill图书公司,纽约,1972年版)一书内容的基础上进行了彻底的改组、重写和更新。增加了许多新论题,下面仅列举其中的一部分内容:逻辑门的三态输出级、高阶多路输出选择器和多路转换器、优先编码器、ROM的二元寻址、ROM的字长与地址扩展、多用途移位寄存器、MOS场效应管的工艺改进、具有非饱和型或耗尽型负载的反相器、互补型MOS(CMOS)传输门、可擦可编程ROM、可编程阵列(PLA)、动态RAM单元、电荷耦合器件(CCD)、微处理器、集成注入逻辑(I²L)、模拟设计方法(运算放大器的电流源和电流重复器、有源负载、电平移动和输出级)、采样-保持系统、模拟多路转换器和多路输出选择器、一些模/数转换系统、压控振荡器、正负可控增益放大器、可重复触发的单稳多谐振荡器、电压时基发生器、方波调制、功率放大器(包括热效应的考虑)、开关型稳压电源、功率场效应管(VMOS)。本书试图介绍1978年初微电子学达到的水平,并指出一些可能的发展前景。

为了给新内容留出篇幅,本书缩减甚至完全略去了“集成电子学”一书中的某些论题。例如,大量地删减了半导体器件物理方面的讨论,不再强调分立器件的偏置,删掉了半导体器件中的光电效应,只简要地提及四参数低频混合模型,并略去了放大器噪声、调谐放大器以及阴极射线管字符发生器的讨论。

在引言(紧接此序之后)里,对于电子学与电子工业的简史作了综述。希望师生在开始学习本书之前,先来读读这部引人入胜的历史。

本书对以下几方面作了大量的考虑:表达这些内容的教学法、器件-电路-系统性能的解释、采用首尾一致的符号体系、留心绘制插图、教材中经过详细计算的举例以及每章末尾的复习题等。应该将这些复习题指定为课外作业,因为这些问题能给学生一个检验自己的机会,看看他

们是否理解了所研究章节中已经学过的内容。作者曾很成功地用这些问题作为测验或考试的大约百分之三十的内容(其余百分之七十是定量的问题)。

书中还包括 717 个课外作业题,这些习题将检验学生对于书中所述基本概念掌握得如何,并将使他们得到电子电路及系统分析和设计方面的经验。在几乎所有有关数值的问题中,都选用了实际的参数值和厂家规范。只有极少数课外作业练习是从“集成电子学”一书中原封不动地照搬过来的。大多数习题都是新的,或是根据以前用过的习题加以修改的。在附录 B 中可找到挑选出的部分习题的答案。(略)

J·米尔曼

目 录

序.....	1
引言.....	1

第一部分 半导体器件特性

第一章 半导体	10
1-1 带电粒子.....	10
1-2 场强、电位、能量.....	12
1-3 能量的电子伏特(eV)单位.....	13
1-4 迁移率和电导率.....	13
1-5 本征半导体中的电子与空穴.....	16
1-6 施主杂质和受主杂质.....	18
1-7 半导体中的电荷密度.....	19
1-8 锗和硅的电气性质.....	20
1-9 霍尔效应.....	22
1-10 热敏电阻和硅(正温度系数热敏)电阻.....	23
1-11 扩散.....	24
1-12 梯度半导体内的电位变化.....	25
1-13 扼要重述.....	26
参考文献.....	27
复习题.....	27
第二章 结型二极管特性	29
2-1 开路状态的 pn 结.....	29
2-2 pn 结整流器.....	31
2-3 伏安特性.....	33
2-4 温度对伏安特性的影响.....	36
2-5 二极管电阻.....	36
2-6 空间电荷电容(过渡电容) C_T	37
2-7 二极管内少数载流子的存储.....	40
2-8 扩散电容.....	42
2-9 击穿二极管.....	43
2-10 作为电路元件的二极管.....	45
2-11 负载线概念.....	46

2-12 二极管的分段线性化模型	43
2-13 结型二极管的开关时间	48
参考文献	49
复习题	50
第三章 双极型晶体管特性	52
3-1 结型晶体管	52
3-2 晶体管电流的组成	54
3-3 作为放大器的晶体管	56
3-4 晶体管的结构	56
3-5 共基(CB)组态	58
3-6 共射(CE)组态	61
3-7 共射截止电流	64
3-8 共射饱和区	65
3-9 晶体管结电压的典型值	67
3-10 共射电流增益	70
3-11 倒置工作方式	71
3-12 晶体管的额定值	71
3-13 晶体管的其他特性	73
3-14 晶体管的开关时间	73
参考文献	75
复习题	76
第四章 集成电路: 制作与特点	78
4-1 集成电路(微电子)工艺	78
4-2 基本单片集成电路	79
4-3 外延生长	83
4-4 掩模与蚀刻	83
4-5 杂质的扩散	84
4-6 单片电路晶体管	85
4-7 单片二极管	88
4-8 金属-半导体接触	89
4-9 集成电阻	91
4-10 集成电容	93
4-11 集成元件的特点	94
4-12 单片电路布局	95
4-13 其他隔离方法	97
参考文献	98
复习题	99

第二部分 数字电路与系统

第五章 数字电路	101
5-1 系统的数字(二进制)工作方式.....	101
5-2 或门.....	103
5-3 与门.....	105
5-4 非门电路(反相器).....	106
5-5 禁止(使能)操作.....	108
5-6 异或电路.....	109
5-7 德·摩根定律.....	111
5-8 与非或非二极管-晶体管逻辑(DTL)门.....	112
5-9 改进(集成电路)DTL门.....	114
5-10 高阈值逻辑(HTL)门.....	118
5-11 晶体管-晶体管逻辑(TTL)门.....	118
5-12 输出级.....	120
5-13 电阻-晶体管逻辑(RTL)和直接耦合晶体管逻辑(DCTL).....	123
5-14 射极耦合逻辑(ECL).....	125
5-15 逻辑系列的比较.....	129
参考文献.....	132
复习题.....	132
第六章 组合数字系统	134
6-1 标准门组件.....	134
6-2 二进制加法器.....	136
6-3 运算功能.....	141
6-4 数字比较器.....	142
6-5 奇偶校验器/发生器.....	145
6-6 译码器/多路输出选择器.....	146
6-7 数据选择器/多路转换器.....	149
6-8 编码器.....	151
6-9 只读存储器(ROM).....	155
6-10 ROM的二元寻址.....	157
6-11 ROM的应用.....	159
参考文献.....	162
复习题.....	162
第七章 时序数字系统	165
7-1 一位存储器.....	165
7-2 时钟控制的S-R触发器.....	167
7-3 J-K, T 和 D 触发器.....	169

0AD05/14 ap

7-4	移位寄存器	173
7-5	脉动(异步)计数器	178
7-6	同步计数器	181
7-7	计数器的应用	184
	参考文献	186
	复习题	187
第八章	场效应晶体管	189
8-1	结型场效应晶体管(JFET)	189
8-2	JFET 的伏安特性	191
8-3	JFET 的制作	193
8-4	增强型金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET)	194
8-5	耗尽型 MOSFET	199
8-6	工艺上的改进	200
8-7	MCSFET 反相器	203
8-8	MOSFET 逻辑门	208
8-9	互补型 MOSFET	210
	参考文献	214
	复习题	214
第九章	大规模集成系统	216
9-1	动态 MOS 移位寄存器	216
9-2	无比型移位寄存器级	219
9-3	MOS 只读存储器	221
9-4	可擦可编程只读存储器(EPROM)	224
9-5	可编程逻辑阵列(PLA)	227
9-6	随机存取存储器(RAM)	229
9-7	读/写存储单元	233
9-8	电荷耦合器件(CCD)	238
9-9	CCD 结构	241
9-10	CCD 存储的组成	246
9-11	微处理器和微型计算机	249
9-12	集成注入逻辑(I ² L)	252
9-13	注入逻辑电路	256
	参考文献	259
	复习题	261

引 言

电子学简史

本书的这篇引言回顾了电子器件的发展历史(这些器件的工作频率从直流到几百兆赫),同时也讨论了将这些器件研制成实际电路和系统所引起的工业的进步。

背景

“电子学”这个词对不同的人以及在不同的国家有着不同的含义。所以,让我按照这里所用的含义对这个术语下一个定义。“电子学是研究带电粒子在气体、真空或半导体中流通的科学和技术。”请注意,只局限于金属内部的粒子运动不是我们所说的电子学。

早在**电子工程**出现之前,**电气工程**已经十分兴盛。电气工程是这样的一个领域,它涉及的器件只依赖于金属内电子的运动,例如,发电机、电动机、电灯泡或者电话。这些器件得以发展的主要资助者是有线电话或电报公司以及电力工业。

电子工程和电气工程的形成应归功于一些伟大的科学家在电学和磁学方面的开荒拓野的工作,譬如库仑、安培、欧姆、高斯、法拉第、亨利和麦克斯韦尔,就是这样的先驱者。大约在1865年,麦克斯韦尔综合了前人的研究成果,创立了统一的电磁学理论,现在叫做**麦克斯韦尔方程**。这是历史上理论领先于实践的例子,因为虽然麦克斯韦尔理论预言了电磁波能在空间传播,而且光就是这样的一种电磁波,但是直到23年以后(1888年),赫兹才用一个火花放电振荡器发射了这样的电磁波。1896年,马可尼成功地发射了赫兹波,并在大约两英里的地方成功地进行了检测。在这次试验中,无线电报开始萌芽了。

电子学的历史分为两个时期,可以简单地称为**过去和现在**。**过去**是指真空管或充气管的时代,现在则从1948年发明晶体管开始。本引言对**未来**也简要地作了推测。

过去

1895年,H. A. 劳伦兹假设了**电子**这种离散电荷的存在,从此揭开了电子学的序幕。两年以后,J. J. 汤普森用实验的方法发现了这些电子。就在同一年(1897年),布朗制作了可能是第一个电子管,实际上是一个原始的阴极射线管。

真空管的发明

直到20世纪初叶,电子学才开始在技术上成形。1904年,弗莱明发明二极管,他把它叫做**阀***。这个阀由真空中发射电子的热丝与相距不远的一块金属板组成。如果在这块金属板上加正电压,则电子被收集,而如果加的是负电压,则电流降为零。这种电子管曾被用作无线电信

* 原文为 Valve, 后来统称电子管。——译者注

号的检波器。两年后，皮卡德试用一块带有“触须”的硅晶体(一根细尖的金属丝压入硅中)做检波器。这就是第一个半导体二极管。这个器件是很不可靠的，不久便被人们所抛弃，于是半导体电子学在1906年就夭折了。

在同一年(1906年)，德·福雷斯特在弗莱明电子管中放进了第三个电极(栅极)，发明了真空三极管，把它叫做奥丁*，从而建树了电子学这段早期历史中最重要里程碑。由于栅极电压的微小变化能引起阳极电压大的变化，所以奥丁是最早的放大器件。为了得到可靠的电子器件，人们又花费了大约五年的时间去改进三极管的真空度，并在阴极上加了一层有效的氧化层。这样，大约在1911年，实用电子学的时代开始了。(正好我也在这一年出生。)

无线电和电视

电子学首先应用于无线电，同时，随着电子学的诞生，无线电工程师协会(IRE)也于1912年在美国创立。我们要高度赞扬早期工程师们的想象力，他们迅速地认识了无线电的重要性，并且在无线电通讯事业刚开始的时候就建立了这个组织。美国电气工程师协会(它关心着一般电气工程师们的利益)早在1884年就已经成立。这两个协会在1963年合并成为IEEE(电气与电子工程师协会)。

第一座无线电广播电台KDKA，在1920年由宾夕法尼亚州匹兹堡市的西屋电气公司建立。就在短短的四年之后，到1924年，在美国出现了500个无线电台。广播(包括无线电和电视通讯)的历史可以分为三个主要时期。

1907到1927年 当时的器件仅仅是二极管和三极管，阴极是直热式的。工程师们巧妙地发明了以下电路：级联放大器、再生式放大器(阿姆斯特朗**于1912年发明)、振荡器、外差电路(阿姆斯特朗于1917年发明)以及防止放大器中不希望有的振荡的中和电路。

1927到1936年 发明了二极管和三极管的旁热式阴极。人们在三极管中引进了两个附加电极——第四和第五电极，分别形成了屏栅管和五极管。在这个时期，束射功率管和金属壳管也出现了。有了这些新器件，工程师们就有可能发明超外差接收机、自动增益控制(AGC)、单旋钮调谐和多波段工作的电路。这个时期内无线电成为蓬勃发展的事业。

1936到1960年 在这最后一个时期，新器件有：电极间距密集的高频管(目的是获得高的增益带宽积)，小型玻壳管；到了这个时期的末尾，还有彩色电视显象管。1933年，阿姆斯特朗少校发明了频率调制，大约五年以后，第一台调频接收机问世了。黑白电视大约始于1930年，在这里最重要的人物是美国无线电公司(RCA)的兹沃雷金。十年后，至少在美国，电视已经开始流行了。

1950年前后开始有了商品彩色电视，由于必须完成许多新的功能，所以下列电路应运而生：调频限幅器、鉴频器、自动频率控制(AFC)、锯齿波发生器(用于电视显象管的线性偏转)、同步电路、多路转换电路以及负反馈电路(包括运算放大器)。

* 原文为 Audion 后来统称为三极管。——译者注

** 阿姆斯特朗当时是哥伦比亚大学的学生。

电子工业

电子工业不外乎是下列四种主要类型中的一种或几种，我把这四种类型叫做四个 *C*：元件 (Components) 的 *C*，通讯 (Communications) 的 *C*，控制 (Control) 即自动化的 *C*，以及计算技术 (Computation) 的 *C*。到这个时候为止，已有了一些元件公司提供刚才叙述过的各种类型的电子管和后面将要涉及的别种管子，并提供电阻器、电容器、线圈、变压器等无源电路元件。

第二个 *C* (通讯) 涉及到围绕调幅和调频无线电、高保真系统、黑白和彩色电视接收机及发射机所建立起来的工业。

我所介绍的第三个 *C* (控制的 *C*) 的意义可以用当时所谓的“工业电子学”来解释清楚。“工业电子学”可以定义为“电子器件在工业设备的控制和运行中的应用 (不同于在通讯和计算技术中的应用)”。工业电子学所用的器件有充气二极管和三极管 (闸流管)，汞弧整流器一类的汞弧阴极器件，以及高压管和大功率管。这个时期的电路有大功率整流器、高压整流器、功率放大器、高压传输电路、感应加热和电介质加热电路、功率逆变器 (从直流到交流)、量测电路、电机控制以及工业过程控制电路等。

计算机 (第四个 *C*) 在这一时期还刚刚出现，所以这种工业要在后面详细讨论。

现在

“现在”这一阶段是从大约 30 年前发明晶体管开始的。

双极结型晶体管的发明

这项发明的历史是很有趣的。M. J. 克莱 (贝尔实验室研究工作的指导，后来成为该实验室主任) 卓有远见地认识到电话系统需要电子开关和较好的放大器，而真空管却不很可靠，这主要因为它们产生大量的热，甚至不用它们的时候也在发热，特别是因为灯丝会烧断而必须更换管子。1945 年，那里成立了固体物理小组。下面这段话引自这个小组的工作委托书：“当前进行的研究，其目的在于获得新的知识，用以研制通讯系统中全新的和改良的元件及构件。”他们最重要的具体目标之一是试图研制固态放大器。这个小组由若干位理论和实验物理学家、一名物理化学家和一名电子学工程师组成，他们与实验室的冶金学家共同协作。这些科学家十分了解布洛克、莫特、肖特基、斯莱特、萨默费尔德、凡·乌莱克、威格纳尔、威尔逊以及全世界其他物理学家已经进行过的关于金属和半导体方面的理论研究。(我很荣幸，曾在其中两位教授萨默费尔德和斯莱特指导下做过研究生。)

在 1947 年 12 月的一次实验中，人们将两根紧挨着的金丝探针压入锗晶体的表面，发现在“集电极”探针上的输出电压 (相对于锗基片) 比“发射极”探针上的输入电压大。布拉特恩和巴丁立刻意识到这正是他们所要寻求的效应，于是固态放大器 (点接触型晶体管的形式) 诞生了。不过这些最初的晶体管是很差的，增益低、带宽窄、噪声大，而且器件与器件之间参数的差异

很大。

肖克利认为,问题来自金属的点接触。他几乎立刻提出了关于结型晶体管(见第三章)的建议,并且研究出了这种管子工作的理论问题。这是一种没有尖导线接触的器件,晶体管的工作取决于扩散而不取决于电子管中那样的传导电流。这种新器件有两种极性的载流子同时工作;所以它们是双极型器件。一种载流子是电子,这是大家所熟知的,另一种“奇怪的粒子”是大家还不很了解的。量测的结果表明,这种粒子的极性与电子极性相反,因而与正电荷等效。这些粒子只能用量子力学理论来解释。我们把这些粒子称为“空穴”,因为它们代表在晶体中电子应该占有却没有占有的一个空位。在真空管中,热阴极附近有电子空间电荷区(即电子云),它排斥热阴极上电子的进一步发射,因而管子的电流受到了限制。这种现象在晶体管中不复存在,因为理论表明,这种新器件除了 pn 结附近一层薄薄的不能移动的空间电荷层以外,基本上是中性的,因此,就有希望在外加低电压时从这些新器件中得到很大的电流密度。人们立刻认识到有可能获得的不用加热灯丝的重要而实用的器件。

通过理论上的分析,人们了解到,除非得到超纯度的单晶,否则晶体管就不能可靠地制造出来。大约两年以后,贝尔实验室的梯尔拉制出锗单晶,后来又拉制出硅单晶,这些单晶的杂质原子浓度远小于十亿分之一。于是就有可能有意识地掺入所谓的施主或受主杂质,并控制其浓度使之达到一亿个原子中仅有一个杂质原子的程度。这样,他们做成了双极型晶体管的 pn 结(第2-1节)。第一批生长型的结型晶体管出现于1950年。次年出现了合金结工艺。在发现固体放大作用的短短三年之后,于1951年晶体管就作为商品生产了。

贝尔系统作出了一个最重要的共同遵守的决定——对这些发明不保密。他们确实召开了有关的专题讨论会,与教授们甚至与其他公司分享这方面的知识(教授们又可传播到学生中去)。他们还出售其专利给任何有兴趣制造晶体管的公司。一些电子管公司,例如西方电气公司(为贝尔系统进行生产)、美国无线电公司、西屋公司以及通用电气公司都是最早生产晶体管的。随后,许多新的元件公司看到这种器件有远大的前途,也都开始生产。附录B-1列出了目前的半导体器件厂家的名单。

到1952年,美国拨出一部分军事基金用于晶体管研究。军事部门的兴趣主要是将这些器件用于导弹,在导弹中,体积小、重量轻、功耗低、性能优良以及运行可靠(由于不用灯丝)是头等重要的。这一投资收效很好。除了那些电压很高和功率很大的情况以外,几乎在所有的军事和商业应用方面,固态元件实际上已经取代了电子管。美国的大多数大学在其课程中甚至已不再提到真空管了。

温度变化时,晶体管的特性有很大的变化。当温度高于大约 75°C 时,锗管特性的变化就太大了,而硅管可以用至大约 200°C 。1954年,得克萨斯仪器公司宣布生产了硅晶体管。今天,半导体晶体管和其他半导体器件的绝大多数都是用硅制造的。

1956年,巴丁、布拉特恩和肖克利获得了诺贝尔物理奖金。由于发明工程器件而颁发诺贝尔奖金,这还是第一次。

集成电路

基尔白于 1958 年进入得克萨斯仪器公司以后不久,提出了单片集成的设想,即用锗或硅制成一个完整的电路。他用半导体块做成电阻,并且还制作了扩散层电阻(见第 4-9 节)。他利用硅片上的氧化层(用作绝缘,而制成了电容,而且他想到了 pn 结电容(见第 4-10 节)。为了表明他的设想切实可行,他用这些电阻、电容和一个晶体管制作了一个移相式振荡器,后来又做了一个多谐振荡器,所有的元件都用锗片制造并用金导线加热熔接而成。不过,在专利申请书上,他指明这些元器件可以通过安放导电材料来连接。1959 年,在一次无线电工程师协会(IRE)的会议上,基尔白宣布这样的电路叫做**固体电路**(后来称为**集成电路**)。

大约与此同时,仙童半导体公司研究与发展部门的指导诺依斯(现在为英特尔公司的董事长)也产生了单片电路的想法,他提出,“为了能够把器件之间的内连作为生产过程的一部分,可把多个器件做在一个硅片上,这样可以减小体积和重量等,并且还能降低每个有源元件的成本”。他解释了如何用反向偏置的 pn 二极管实现器件的相互隔离,如何制造电阻,以及如何通过在氧化物的空隙中蒸发金属制成导线来实现电路元件之间的内连。(用背对背的二极管实现元件隔离的想法是莱霍夫克于 1959 年独自提出并取得专利的,他是斯布拉格电气公司的研究指导)。第一批现代的扩散型晶体管(见第 4 章)是仙童公司的霍尔尼在 1958 年研制的。他在表面氧化层钝化 pn 结的平面工艺方面是主要决策者。他采用了诺依斯和莫尔在先前研究出来的光刻技术和扩散工艺。制造集成电路的真正关键是平面型晶体管和批量生产工艺。到 1961 年,仙童公司和得克萨斯仪器公司大量生产了商品集成电路,不久,其他公司也加入了他们制造集成电路的行列。今天,数百万个晶体管、无源元件及其内连可以在一次生产中同时制造出来(见第 4 章)。

场效应晶体管

在发明晶体管之前,就有一些人研究“场效应”,即研究外加横向电场引起的固体导电性能的变化。如前所述,事实上双极型晶体管是在研究这些场效应的期间发明的。结型场效应管于 1951 年由肖克利提出。但是,制造这些器件的早期尝试都失败了,因为无法得到稳定的表面。随着平面工艺和二氧化硅(玻璃,一种很好的绝缘体)钝化表面技术的出现,这个困难被克服了。人们在 SiO_2 薄层(1000Å)上安置了一个金属电极(栅极)。加在栅极和硅块之间的电压使硅表面附近感应出导电电荷,于是栅极在另外两个电极(称为源极 S 和漏极 D)之间横向延伸几个微米(称为沟道), S 和 D 之间的电流则受到了栅压的控制。最早的这种金属-氧化物-半导体场效应管(MOSFET, 见第 8 章)是由贝尔实验室的卡恩和阿特拉于 1960 年宣布研制成功的。但這些器件的可再製性差。大约花费了五年的时间,找到了问题的症结是 SiO_2 中的杂质污染(主要是钠离子),并且弄清楚了如何去消除它们。基本的 MOSFET 已经作了许多技术上的改进,现在这种器件在重要性方面已经可以与双极型晶体管相匹敌。

电荷耦合器件

在源极 S 和漏极 D 之间有可能制造一长串紧挨着的栅极。如果从 S 极引进电荷,那么这些