

北京大学计算机系主干课教材

微电子学概论

张兴 黄如 刘晓彦 编著

628
北京大学出版社
北 京

内 容 提 要

本书是在北京大学计算机科学与技术系微电子专业《微电子学概论》这一主干基础课的讲义基础上形成的,涵盖了半导体物理和器件物理基础知识,集成电路基础知识、设计、制造、最新技术以及发展趋势,内容系统、全面。广大信息技术领域的从业人员、这一领域的在校大学生以及微电子专业人员阅读本书,不仅能对微电子学基础知识有全面了解,而且可以领略到这一领域技术的最新发展、最新观点和最新成果。

图书在版编目(CIP)数据

微电子学概论/张兴等编. —北京:北京大学出版社,2000.1

(北京大学计算机系主干课教材丛书)

ISBN 7-301-04285-X

I. 微… II. 张… III. 微电子学概论-教材 IV. TN4

书 名: 微电子学概论

著作责任者: 张兴 黄如 刘晓彦

责任编辑: 柯纪 沈承凤

标准书号: ISBN 7-301-04285-X/TP·0487

出版者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区中关村北京大学校内 100871

网 址: <http://cbs.pku.edu.cn/cbs.htm>

电 话: 出版部 62752015 发行部 62754140 编辑室 62752038

电子信箱: zpup@pup.pku.edu.cn

排 版 者: 兴盛达激光照排中心

印 刷 者: 北京银祥福利印刷厂印刷

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787×1092 16开本 15.5印张 382千字

2000年1月第一版 2001年2月第2次印刷

定 价: 20.00元

总 序

“科教兴国”战略强调教育对国民经济的基础地位,要求高等教育“实施全面素质教育,加强思想品德教育和美育,改革教育内容、课程体系和教学方法……”。为了落实好“科教兴国”这一战略决策,北京大学计算机科学技术系与北京大学出版社合作,编审出版基础主干课和专业主干课系列教材。

目前,伴随着微电子和计算机科学技术渗透到社会的各个领域,人类正跨步迈进知识经济时代。在知识经济时代,具有创新能力的高素质人才是经济持续发展的必备条件。

计算机科学技术包括科学和技术两部分,不仅强调严谨的科学性,同时也注重工程性,是一门科学性和工程性并重的学科。信息科学技术的支柱学科是微电子、计算机、通信和软件,其中微电子是基础,计算机和通信是载体,软件是核心,它们相辅相成,共同培育了知识经济。因而,高素质的信息领域科技人才应该掌握上述学科的基础理论和专业技能。

近年来,北京大学计算机科学技术系通过跟踪、分析国际知名大学的相关课程设置、教学实施情况,借鉴国内兄弟院系的课程体系调整建议,总结北大计算机科学技术系集计算机软、硬件技术和微电子学于一体的人才培养经验,对课程体系进行了较大力度的梳理,形成了一系列基础主干课和专业主干课。

这一系列教材正是为配合课程体系的调整而编撰的。所选书稿主要是在我系多年的教学实践中师生反映较好的讲义和教材的基础上修编而成的。我们希望这批教材能够达到“注重基础、淡化专业(或突出交叉)、内容系统、选材先进、利于教学”的要求。

对于教材中的不足之处,欢迎广大读者不吝赐教。

杨英清

一九九九年九月

北京大学计算机科学技术系

基础主干课和专业主干课教材编审指导小组

组 长：杨芙清

成 员：（按姓氏笔画序）

卢晓东 李晓明 许卓群 沈承凤 屈婉玲

张天义 赵宝瑛 袁崇义 董士海 程 旭

序 言


本书的三位作者都是北京大学的青年教师,也都是我和韩汝琦教授的学生。为他们即将出版的书写序言,自然有一番格外的喜悦。江山代代自有人才出,这原是客观规律,只有后浪推前浪,才能形成“不尽长江滚滚来”。

微电子科学技术和产业发展的重要性,首先表现在当代的食物链上,即国民经济总产值(GNP)每增加100~300元,就必须有10元电子工业和1元集成电路产值的支持。而且据相关数据表明,发达国家或是走向发达国家的进程中,在经济增长方面都有这样一条规律:电子工业产值的增长速率是GNP增长速率的3倍,微电子产业的增长速率又是电子工业增长速率的2倍。因此可以毫不夸张地说,谁不掌握微电子技术,谁就不可能成为真正意义上的经济大国,对于像我们这样一个社会主义大国更是如此。

发展微电子产业和微电子科学技术的关键在于培养高质量的人才,因此让广大理工科特别是信息技术学科的大学生掌握微电子的相关知识是十分重要的,由张兴、黄如、刘晓彦三位年轻教授编著的《微电子学概论》正是出于此目的,为非微电子专业的学生讲授关于微电子的相关基础知识,这必将有助于培养出更多的微电子发展综合人才,促进我国微电子产业规模和科学技术水平的提高。

如何组织这些相关知识,还有待于在实践中探索研究。我个人认为还是要包含微电子科学技术的主要内容,包括半导体器件物理、系统行为级的设计考虑、制造过程、测试封装的关键技术以及发展方向,如目前发展潜力巨大的微机电系统技术等等,并且应当把“Top to Down”的设计方法学作为重点内容之一。

我相信,在他们三位的努力下,《微电子学概论》这本书的质量一定会越来越好。我期待着《微电子学概论》早日出版,尽快与广大读者见面,使更多的人从中受益。



1999年春于燕园

北京大学计算机系基础主干课名称

计算引论
数字逻辑
微机原理
计算机组织与体系结构
集合论与图论
代数结构与组合数学
数理逻辑
数据结构
编译原理
操作系统
微电子学概论
集成电路原理与设计

北京大学计算机系专业主干课名称

计算机网络概论
数据库概论
软件工程
计算机图形学
面向对象技术引论

前 言

自本世纪 50 年代晶体管诞生以来,微电子技术发展异常迅速,目前已进入甚大规模集成电路和系统集成时代,微电子已经成了整个信息时代的标志和基础。可以毫不夸张地说,没有微电子就没有今天的信息社会。

各种电子系统都需要大量的集成电路和集成系统芯片,这样,除了从事微电子专业的人员之外,其它相关专业如计算机、电子学、自动控制、通讯等领域的人员都非常需要和渴望了解微电子知识。正是在这种情况下,北京大学开设了《微电子学概论》这门新课。该课程的主要目的是使学生对微电子学的基本知识有一个比较系统、全面的了解和认识。这对于培养新型信息领域的人才是非常重要的。该课程的另一个目的是使刚入校不久的微电子专业的学生了解什么是微电子学、微电子学的研究领域是什么,通过该课程对微电子学有一个总体的、全面的了解,培养对微电子的兴趣。在北京大学,《微电子学概论》已经列入校级主干基础课。

目前国内有关微电子学概论方面的教材很少,很难找到一本合适的教材,为此,我们编写了《微电子学概论》教材。

在编写这本教材时,我们制定了两个原则:第一是让外行的人能够看懂,通过阅读这本书能够对微电子学有一个总体的、全面的了解;第二是让内行的人读完之后不觉得肤浅,要体现出微电子学发展极为迅速的特点,将微电子学领域中的一些最新观点、最新成果涵盖其中。现在这本书写完了,再回过头来看这本书,感觉尚未达到这一境界,特别是第一点,实现起来似乎更加困难。但由于时间的关系,只好等以后再逐步完善了。

全书共分为 9 章,第一章简述微电子技术的发展历史,第二章讨论半导体物理和器件物理基础,第三章介绍集成电路基础,第四章介绍了集成电路制造工艺,第五章介绍集成电路设计,第六章阐述了集成电路计算机辅助设计技术,第七章简要介绍了几种重要的微电子器件,第八章讨论了目前极具发展潜力的微机电系统技术,最后在第 9 章给出微电子技术发展的一些规律和展望。其中第一、四、七、八、九章由张兴教授执笔,第二、三章由刘晓彦副教授执笔,第五、六章由黄如副教授执笔,最后由张兴教授对全书进行了审核。

王阳元院士在百忙之中亲自为本书写了序言,并为本书提出了许多建设性的意见。作为王老师的学生,我们取得的任何成绩都是与王老师的亲切教诲所分不开的,在此向王老师表示最诚挚的感谢。

韩汝琦教授、吉利久教授、倪学文教授、关旭东教授、李映雪教授、郝一龙副教授、张大成教授、赵宝瑛教授、甘学温副教授、张天义副教授、蒋安平博士、康晋峰博士、李志宏博士、万新恒博士等审阅了部分手稿,并与作者进行了多次有益的讨论,提供了一些原始资料,使我们受益匪浅,在此,向他们表示衷心的感谢。

张兴、黄如、刘晓彦
1999 年春于北京大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 晶体管的发明	(3)
1.2 集成电路的发展历史	(5)
1.3 集成电路的分类	(7)
1.3.1 按器件结构分类	(7)
1.3.2 按集成电路规模分类	(7)
1.3.3 按结构形式的分类	(8)
1.3.4 按电路功能分类	(9)
1.3.5 集成电路的分类小结	(9)
1.4 微电子学的特点.....	(10)
第二章 半导体物理和器件物理基础	(12)
2.1 半导体及其基本特性.....	(12)
2.1.1 金属-半导体-绝缘体	(12)
2.1.2 半导体的掺杂	(13)
2.1.3 半导体的电导率和电阻率	(14)
2.1.4 迁移率	(15)
2.2 半导体中的载流子.....	(19)
2.2.1 半导体中的能带	(19)
2.2.2 多子和少子的热平衡	(23)
2.2.3 电子的平衡统计规律	(24)
2.2.4 过剩载流子	(27)
2.3 PN 结	(28)
2.3.1 平衡 PN 结	(29)
2.3.2 PN 结的正向特性	(32)
2.3.3 PN 结的反向特性	(33)
2.3.4 PN 结的击穿	(35)
2.3.5 PN 结的电容	(37)
2.4 双极晶体管.....	(38)
2.4.1 双极晶体管的基本结构	(38)
2.4.2 晶体管的电流传输	(39)
2.4.3 晶体管的电流放大系数	(41)
2.4.4 晶体管的直流特性曲线	(43)
2.4.5 晶体管的反向电流与击穿电压	(45)
2.4.6 晶体管的频率特性	(47)
2.5 MOS 场效应晶体管	(48)
2.5.1 MOS 场效应晶体管的基本结构	(49)

2.5.2	MIS 结构	(49)
2.5.3	MOS 场效应晶体管的直流特性	(52)
2.5.4	MOS 场效应晶体管的种类	(55)
2.5.5	MOS 场效应晶体管的电容	(57)
第三章	大规模集成电路基础	(59)
3.1	半导体集成电路概述	(59)
3.2	双极集成电路基础	(61)
3.2.1	集成电路中的双极晶体管	(61)
3.2.2	双极型数字集成电路	(64)
3.2.3	双极型模拟集成电路	(67)
3.3	MOS 集成电路基础	(67)
3.3.1	集成电路中的 MOSFET	(67)
3.3.2	MOS 数字集成电路	(69)
3.3.3	CMOS 集成电路	(73)
第四章	集成电路制造工艺	(77)
4.1	双极集成电路工艺流程	(77)
4.2	MOS 集成电路工艺流程	(80)
4.3	光刻与刻蚀技术	(83)
4.3.1	光刻工艺简介	(83)
4.3.2	几种常见的光刻方法	(84)
4.3.3	超细线条光刻技术	(85)
4.3.4	刻蚀技术	(86)
4.4	氧化	(88)
4.4.1	SiO ₂ 的性质及其作用	(88)
4.4.2	热氧化形成 SiO ₂ 的机理	(89)
4.4.3	SiO ₂ 的制备方法	(90)
4.5	扩散与离子注入	(91)
4.5.1	扩散	(91)
4.5.2	扩散工艺	(92)
4.5.3	离子注入	(93)
4.5.4	离子注入原理	(94)
4.5.5	退火	(95)
4.6	化学汽相淀积(CVD)	(96)
4.6.1	化学汽相淀积方法	(96)
4.6.2	单晶硅的化学汽相淀积(外延)	(97)
4.6.3	二氧化硅的化学汽相淀积	(98)
4.6.4	多晶硅的化学汽相淀积	(99)
4.6.5	氮化硅的化学汽相淀积	(99)
4.7	接触与互连	(99)
4.7.1	金属膜的形成方法	(100)
4.7.2	难熔金属硅化物栅及其复合结构	(101)

4.7.3	多层互连	(103)
4.8	隔离技术	(104)
4.8.1	双极集成电路隔离工艺	(104)
4.8.2	MOS 集成电路隔离工艺	(106)
4.9	封装技术	(108)
4.9.1	封装工艺	(108)
4.9.2	封装的分类	(110)
4.10	集成电路工艺小结	(110)
第五章	集成电路设计	(113)
5.1	集成电路的设计特点与设计信息描述	(113)
5.1.1	设计特点	(113)
5.1.2	设计信息描述	(115)
5.2	集成电路的设计流程	(116)
5.3	集成电路的设计规则	(120)
5.3.1	以 λ 为单位的設計規則	(120)
5.3.2	以微米为单位的設計規則	(122)
5.4	集成电路的设计方法	(123)
5.4.1	全定制设计方法	(123)
5.4.2	门阵列设计方法(GA 方法)	(125)
5.4.3	标准单元设计方法(SC 方法)	(129)
5.4.4	积木块设计方法(BBL 方法)	(132)
5.4.5	可编程逻辑器件设计方法	(133)
5.4.6	几种布图设计方法的比较	(136)
5.4.7	兼容设计方法	(137)
5.4.8	硅编译器技术	(139)
5.4.9	可测性设计技术	(139)
5.5	集成电路设计举例	(141)
5.5.1	四位运算器的设计流程	(141)
5.5.2	多路开关的设计实现过程	(143)
第六章	集成电路设计的 CAD 系统	(146)
6.1	集成电路设计的 CAD 系统概述	(146)
6.2	系统描述与模拟——VHDL 语言及模拟	(147)
6.2.1	VHDL 语言的基本概念及主要作用	(147)
6.2.2	VHDL 语言建模机制的特点	(147)
6.2.3	VHDL 的模拟算法	(149)
6.2.4	VHDL 语言模拟环境的特点	(150)
6.3	综合	(151)
6.4	逻辑模拟	(152)
6.4.1	逻辑模拟的基本概念和主要作用	(152)
6.4.2	逻辑模拟模型的建立	(153)
6.4.3	逻辑描述	(154)

6.4.4	逻辑模拟算法	(155)
6.4.5	开关级逻辑模拟	(156)
6.5	电路模拟	(157)
6.5.1	电路模拟的基本概念	(157)
6.5.2	电路模拟的基本功能	(157)
6.5.3	电路模拟软件的基本结构	(158)
6.5.4	电路描述	(160)
6.6	时序分析和混合模拟	(162)
6.6.1	时序分析和混合模拟的主要作用	(162)
6.6.2	时序分析的基本原理	(163)
6.6.3	混合模拟	(164)
6.7	版图设计的 CAD 工具	(164)
6.7.1	版图设计的基本概念	(164)
6.7.2	版图的自动设计	(165)
6.7.3	版图的半自动设计	(169)
6.7.4	版图的人工设计	(170)
6.7.5	版图检查与验证	(170)
6.7.6	制版	(172)
6.7.7	版图数据交换的格式	(172)
6.8	器件模拟	(173)
6.8.1	器件模拟的基本概念	(173)
6.8.2	器件模拟的基本原理	(173)
6.8.3	器件模拟的基本功能及所用模型	(174)
6.8.4	输入文件	(175)
6.9	工艺模拟	(179)
6.9.1	工艺模拟的基本概念	(179)
6.9.2	工艺模拟的基本内容	(179)
6.9.3	工艺模拟的输入文件	(180)
6.10	计算机辅助测试(CAT)技术	(183)
6.10.1	故障模型	(183)
6.10.2	计算机辅助测试技术	(184)
第七章	几类重要的特种微电子器件	(187)
7.1	薄膜晶体管	(187)
7.2	光电子器件	(190)
7.2.1	辐射跃迁和光吸收	(190)
7.2.2	发光器件	(191)
7.2.3	光电探测器	(194)
7.2.4	太阳能电池	(196)
7.3	CCD 器件	(197)
第八章	微机电系统	(200)
8.1	微机电系统的基本概念	(200)
8.2	几种重要的 MEMS 器件	(203)

8.4.1	微加速度计	(203)
8.4.2	微陀螺	(205)
8.4.3	微马达	(207)
8.3	MEMS 加工工艺	(209)
8.3.1	硅微机械加工工艺	(209)
8.3.2	LIGA 加工工艺	(213)
8.4	MEMS 技术发展的趋势	(214)
第九章	微电子技术发展的规律和趋势	(217)
9.1	微电子技术发展的一些基本规律	(217)
9.1.1	摩尔定律	(217)
9.1.2	等比例缩小定律	(218)
9.2	微电子技术发展的一些趋势和展望	(220)
9.2.1	21 世纪仍将以硅基 CMOS 电路为主流	(220)
9.2.2	集成系统是 21 世纪微电子技术发展的重点	(222)
9.2.3	微电子与其它学科结合诞生出新的技术增长点	(223)
9.2.4	近几年将有重大发展的一些关键技术	(224)
附录	(229)
附录 A	微电子学领域大事记	(229)
附录 B	微电子学常用缩略语	(232)

第一章 绪 论

综观人类社会发展的文明史,一切生产方式的重大变革都是由新的科学发明而引起的,科学技术作为革命的力量,推动着社会向前发展. 史前的摩擦生火、驯养动物、栽培植物、畜牧业的发展等,可以认为是农业社会中科学技术对生产力发生影响的最初例子. 18 世纪 60 年代到 19 世纪 40 年代,以伽利略自由落体定律、开普勒行星运动三大定律和牛顿在《自然哲学和数学原理》中建立的完整力学体系为科学准备,由纺织机改革引起的动力需求导致了 1774 年英国格拉斯哥大学的修理工瓦特发明蒸汽机,触发了第一次产业革命,产生了近代纺织业和机械制造业,使人类进入利用机器延伸和发展人类体力劳动的时代. 19 世纪 70 年代到 20 世纪 20 年代,以奥斯特 1820 年发现的电磁现象(电动机原理)、法拉第 1831 年发现的电磁感应定律(发电机原理)和麦克斯韦 1840 年发现的电磁波理论为理论准备,1866 年德国科学家西门子利用电磁铁制成了实用的发电机并于 1875 年应用于工业,引发了以电气化为代表的第二次技术革命.

当前,我们正经历着一场新的技术革命,虽然第三次技术革命包含了新材料、新能源、生物工程、海洋工程、航空航天技术和电子信息技术等等,但影响最大、渗透性最强、最具有新技术革命代表性的乃是以微电子技术为核心的电子信息技术. 微电子技术发展的理论基础是 19 世纪末到 20 世纪 30 年代期间建立起来的现代物理学. 这期间的重要发现包括 1895 年德国科学家伦琴发现的 X 射线、1896 年贝克勒尔发现放射性、1897 年英国科学家汤姆逊发现电子、1898 年居里夫人发明镭、1900 年普朗克建立量子论、1905 和 1915 年爱因斯坦提出的狭义相对论和广义相对论等. 正是这一系列发明和发现揭示了微观物理世界的基本规律,导致了海森伯、薛定谔等建立起量子力学的理论体系,为现代电子信息技术革命奠定了理论基础.

信息是客观事物状态和运动特征的一种普遍形式,是继材料和能源之后的第三大资源,是人类物质文明与精神文明赖以发展的三大支柱之一. 目前我们正处在一场跨越时空的新的信息技术革命中,它将比历史上的任何一次技术革命对社会、经济、政治、文化等带来的冲击都更为巨大,它将改变我们的生产方式、生活方式、工作方式以及治理国家的方式.

实现社会信息化的关键是各种计算机和通讯机,但是其基础都是微电子. 1946 年 2 月在美国莫尔学院诞生了第一台名为电子数值积分器和计算器(Electronic Numerical Integrator and Computer)的计算机,即 ENIAC 问世. 当时的 ENIAC 由 18000 个电子管组成,占地 150 m²,重 30 吨,功率为 140 kW,足以发动一辆机车,然而这个庞然大物的运行速度只有每秒 5000 次,存储容量只有千位,平均稳定运行时间只有 7 分钟. 设想一下,这样的计算机能够进入办公室、企业和家庭吗? 所以当时曾有人认为,全世界只要有 4 台 ENIAC 就足够了. 可是现在全世界的计算机不包括微机在内就有几百万台. 造成这个巨大变革的技术基础就是微电子. 现在,电子信息产业已经成为世界第一产业,毫无疑问,21 世纪将是信息化的世纪,因此 21 世纪的微电子技术也必将得到高速发展.

微电子产业对国民经济的战略作用首先表现在当代食物链关系上,现代经济发展的数据表明,GNP 每增长 100 到 300 元,需要 10 元左右电子工业产值的支撑,而其中就包含 1 元的

集成电路产品. 又据有关资料测算, 集成电路对国民经济的贡献率远高于其它门类的产品, 如以单位质量钢筋对 GNP 的贡献为 1 计算, 则小汽车为 5, 彩电为 30, 计算机为 1000, 而集成电路的贡献率则高达 2000. 所以一个日本经济学家认为谁控制了超大规模集成电路技术谁就控制了世界产业, 英国人则认为如果某个国家不掌握半导体技术, 他就会立刻加入不发达国家行列. 在发达国家的发展过程中还体现出一条重要规律, 即电子工业增长速率一般为 GNP 增长速率的 3 倍, 而集成电路工业增长速率又是电子工业增长率的 2 倍. 照此估算, 如果今后 12 年我国 GNP 增长速率保持在 5%~6%, 到 2010 年我国集成电路市场总额将达到 900 亿美元以上, 约占当时世界集成电路总销售额的 20%. 图 1.1 给出了 GNP 和一些主要产业的发展情况, 可以看出, 微电子产业的发展速度是最快的. 几十年来, 世界集成电路业的产值以大于 13%、集成度以 46% 的年增长率持续发展, 世界上还没有一个产业能以这样高的速度持续增长. 预计在 2007 年左右, 微电子产业的产值将超过钢铁工业.

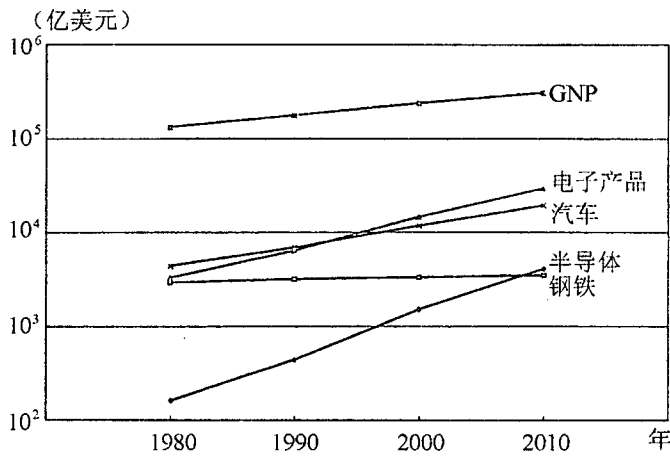


图 1.1 全世界 GNP 和一些主要产业的发展情况

微电子产业发展的如此之快, 除了微电子工业本身对国民经济的巨大贡献之外, 还与它极强的渗透性有关. 几乎所有的传统产业只要与微电子技术结合, 用微电子芯片进行智能改造, 就会使传统产业重新焕发青春. 例如火电厂的锅炉给水泵送风机、引风机占了电厂全部耗能的 72%, 而全国各行业的风机、水泵的总耗电量占了全国发电量的 36%, 仅仅对风机、水泵采用变频调速等电子技术进行改造, 每年即可节电 659 亿度, 相当于 3 个葛洲坝电站的发电量; 采用交流传动改造后, 电力机车可节电 20%~40%, 内燃机车可节油 12%~14%; 对白炽灯进行高效节能改造, 并假设推广应用 6000 万只 (约为全国白炽灯总产量的 1/18), 所节省的电能相当于 3 座大亚湾核电站的发电量. 若全国一半中等以上城市的自来水公司不同程度地在管网自动检测和生产调度中使用计算机控制, 可以使自来水流失率降低 50%, 按 1993 年的统计, 可以节约投资 35 亿元.

微电子技术不仅在节能、节材等方面能够使传统产业升级换代, 而且还可以使传统产品结构、性能等方面发生革命性的质的变化. 例如当采用微机统一控制的轴-电机装置替代传统的蜗轮、蜗杆、齿轮传动时, 汽车将不再是单纯的机械产品, 汽车的电子化将导致汽车革命; 另外数字化机械加工设备、数字通讯技术以及今后的数字地球等等都是以微电子技术作为基础的.

目前, 电子信息技术已经广泛地应用于国民经济、国防建设、乃至家庭生活的各个方面. 全

世界的微机拥有率已经达到 3.7%，在美国每年由计算机完成的工作量超过 4000 亿人年的手工工作量。在日本每个家庭平均拥有约 100 个芯片，集成电路芯片如同细胞组成人体一样，已成为现代工农业、国防装备和家用消费品的细胞。

由于集成电路的原材料主要是硅，因此有人认为，从 20 世纪中期，人类进入了继石器时代、青铜器时代、铁器时代之后的硅器时代(Silicon Age)。

目前，微电子技术已进入甚大规模集成电路和系统集成时代，微电子技术已经成了整个信息时代的标志和基础。现在各种信息电子系统都需要大量的集成电路和集成系统芯片，这样，除了从事微电子专业的人员之外，其它相关专业如计算机、电子学、自动控制、通讯等领域的人员都非常渴望了解微电子知识。正是在这种情况下，我们编著了《微电子学概论》一书。本书既可以作为大学生和非微电子专业研究生的教材，又可以作为从事电子信息领域工作的科研人员比较全面系统地了解微电子学知识的窗口，这对于培养新型信息领域的综合人才是非常重要的。目前，本书已经被北京大学列为学校主干基础课教材。

本书主要介绍了微电子学领域的一些基本概念、工艺技术、设计技术等，努力使大家能够对微电子学有一个总体上的、比较完整的认识；同时还就微电子学发展的一些最新动态及其发展趋势进行了简要的分析和讨论，这样可以使大家能够对微电子学领域的最新发展情况有一些了解。

1.1 晶体管的发明

晶体管是在实际需求牵引和理论推动的共同作用下发明的。

半导体的发展最早可以追溯到 19 世纪 30 年代，1833 年英国物理学家法拉第(M. Faraday, 1791~1867)发现氧化银的电阻率随温度升高而增加，这应该是人们最早发现的半导体性质。之后一些物理学家又先后发现了同晶体管有关的半导体的三个物理效应，即 1873 年英国物理学家施密斯(W. Smith)发现的晶体硒在光照射下电阻变小的光电导效应、1877 年英国物理学家亚当斯(W. G. Adams)发现的晶体硒和金属接触在光照射下产生电动势的半导体光生伏特效应、1906 年美国物理学家皮尔逊(G. W. Pierce)等人发现金属与硅晶体接触产生整流作用的半导体整流效应。

1931 年，英国物理学家威尔逊(H. A. Wilson)对固体提出了一个量子力学模型，即能带理论，该理论将半导体的许多性质联系在一起，较好地解释了半导体的电阻负温度系数和光电导现象。1939 年，前苏联物理学家达维多夫、英国物理学家莫特、德国物理学家肖特基各自提出并建立了解释金属-半导体接触整流作用的理论，同时达维多夫还认识到半导体中少数载流子的重要性。此时，普渡大学和康乃尔大学的科学家也发明了纯净晶体的生长技术和掺杂技术，为进一步开展半导体研究提供了良好的材料保证。

在需求方面，由于本世纪初电子管技术的迅速发展，曾经使晶体探测器失去优势。然而在第二次世界大战期间，雷达的出现使高频探测成为一个重要问题，电子管不仅无法满足这一要求，而且在移动式军用器械和设备上使用也极其不便和不可靠。这样晶体管探测器的研究重新得到关注，又加上前面提到的半导体理论和技术方面的一系列重大突破，为晶体管发明提供了理论及实践上的准备。

正是在这种情况下，1946 年 1 月，基于多年利用量子力学对固体性质和晶体探测器的研

究以及对纯净晶体生长和掺杂技术的掌握, Bell 实验室正式成立了固体物理研究小组和冶金研究小组, 其中固体物理小组由肖克莱(W. Shockley)领导, 成员包括理论物理学家巴丁(J. Bardeen)和实验物理学家布拉顿(W. H. Brattain)等人. 该研究小组的主要工作是组织固体物理研究项目, “寻找物理和化学方法控制构成固体的原子和电子的排列和行为, 以产生新的有用的性质”. 在系统的研究过程中, 肖克莱发展了威尔逊的工作, 预言通过场效应可以实现放大器; 巴丁成功地提出了表面态理论, 开辟了新的研究思路, 兼之他对电子运动规律的不断探索, 经过无数次实验, 第一个点接触型晶体管终于在 1947 年 12 月诞生. 世界上第一个晶体管诞生的具体过程如下:

首先, 肖克莱提出了一个假说, 认为半导体表面存在一个与表面俘获电荷相等而符号相反的空间电荷层, 使半导体表面与内部体区形成一定的电势差, 该电势差决定了半导体的整流功能; 通过电场改变空间电荷层电荷会导致表面电流改变, 产生放大作用. 为了直接检验这一假说, 布拉顿设计了一个类似光生伏特实验的装置, 测量接触电势差在光照射下的变化. 对 N 和 P 型硅以及 N 型锗的表面光照实验证实了肖克莱的半导体表面空间电荷假说以及电场效应的预言.

几天以后, 巴丁提出了利用场效应作为放大器的几何结构, 并与布拉顿一起设计了实验. 把一片 P 型硅的表面处理成 N 型, 滴上一滴水使之与表面接触, 在水滴中插入一个涂有蜡膜的金属针, 在水与硅之间施加 8 MHz 的电压, 从硅中流到针尖的电流被改变, 从而实现了功率放大. 之后又发现利用 N 型锗进行实验的效果更好. 经过若干改进, 最后选用的结构是: 在一个楔形的绝缘体上蒸金, 然后用刀片将楔尖上的金划开一条小缝, 即将金分割成间距很小的两个触点, 将该楔形体与锗片接触, 在锗片表面形成间距约为 0.005cm 的两个接触点, 它们分别作为发射极和集电极, 衬底作为基极, 其具体结构如图 1.2 所示. 在 1947 年 12 月 23 日, 观察到了该晶体管结构的放大特性, 在 10 MHz 的频率下实现了 100 倍的放大.

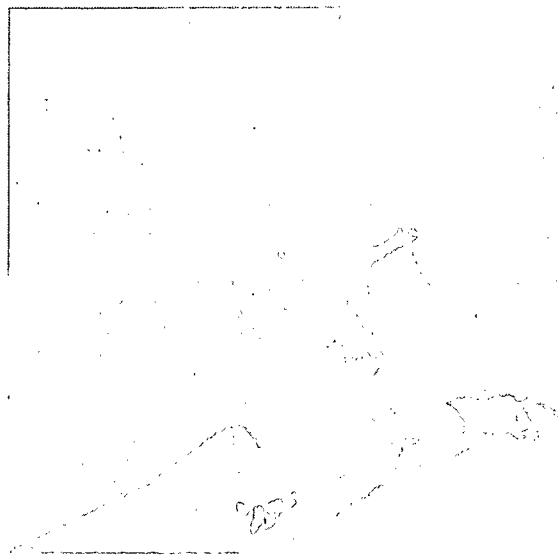


图 1.2 世界上第一个晶体管的照片

翌年 7 月, 巴丁和布拉顿以致编辑部信的方式在《物理评论》上报道了该结果. 同年, 肖克

莱又提出了利用两个 P 型层中间夹一 N 型层作为半导体放大结构的设想,并于 1950 年与斯帕克斯(M. Sparks)和迪尔(G. K. Teal)一起发明了单晶锗 NPN 结型晶体管.此后,结型晶体管基本上取代点接触型晶体管.为此,肖克莱、巴丁、布拉顿共同分享了 1956 年的诺贝尔物理学奖,图 1.3 为三位科学家在实验室中的合影.

晶体管是本世纪最伟大的发明之一,晶体管拉开了人类社会步入电子时代的序幕.它对人类社会的所有领域,包括生活、生产甚至战争都产生了并且还正在产生着深刻的影响.



从左至右别为: 巴丁(J. Bardeen)、肖克莱(W. Schokley)和布拉顿(W. H. Brattain)

图 1.3 发明晶体管的三位科学家在实验室中的合影

1.2 集成电路的发展历史

集成电路(Integrated Circuit, 缩写为 IC)是指通过一系列特定的加工工艺,将多个晶体管、二极管等有源器件和电阻、电容等无源器件,按照一定的电路连接集成在一块半导体单晶片(如硅或 GaAs 等)或陶瓷等基片上,作为一个不可分割的整体执行某一特定功能的电路组件.

晶体管发明以后不到 5 年,即 1952 年 5 月,英国皇家研究所的达默(G. W. A. Dummer)就在美国工程师协会举办的座谈会上发表的论文中第一次提出了集成电路的设想.文中说到:“可以想象,随着晶体管和半导体工业的发展,电子设备可以在一个固体块上实现,而不需要外部的连接线.这块电路将由绝缘层、导体和具有整流放大作用的半导体等材料组成.”之后,经过几年的实践和工艺水平的提高,1958 年以德克萨斯仪器公司的科学家基尔比(C. Kilby)为首的研究小组研制出了世界上第一块集成电路,并于 1959 年公布了该结果.该集成电路是在锗衬底上制作的相移振荡和触发器,共有 12 个器件.器件之间的隔离采用的是介质隔离,即将制作器件的区域用黑腊保护起来,之后通过选择腐蚀在每个器件周围腐蚀出沟槽,形成多个互不连通的小岛,在每个小岛上制作一个晶体管;器件之间互连线采用的是引线焊接方法.

集成电路的迅速发展,除了物理原理之外还得益于许多新工艺的发明.重大的工艺发明主