



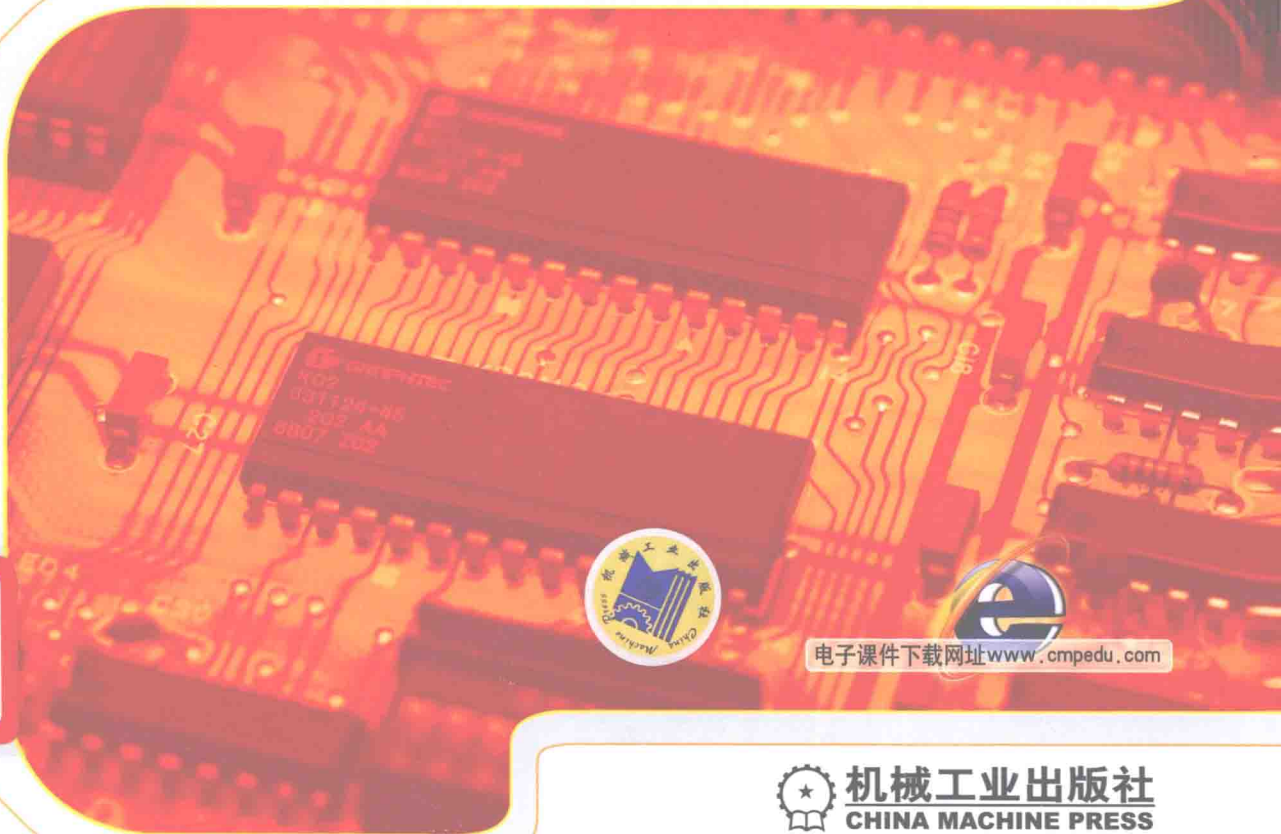
全国高等职业教育规划教材

集成电路设计与项目应用

主 编 张 红

副主编 余 建

参 编 刘 新



电子课件下载网址 www.cmpedu.com



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

全国高等职业教育规划教材

集成电路设计与项目应用

主 编	张 红
副主编	余 建
参 编	刘 新
主 审	刘 涛



机械工业出版社

本书按照项目教学的要求进行编排。全书共分为引言、基本 CMOS 门电路设计模块、基本 TTL 门电路设计模块和一个综合训练模块——A/D 转换器中的时钟稳定电路设计。其中第一个模块包含 CMOS 反相器设计在内的 9 个子项目，第二个模块包含 TTL 与非门设计在内的 3 个子项目，第三个模块包含运算放大器设计在内的 3 个子项目。建议本课程的授课时数为 64 ~ 80 学时。

本书可作为高职院校微电子专业的教材及工程技术人员学习参考用书。其他专业的读者也可通过本书对集成电路设计有所了解。

本书配套授课电子教案，需要的教师可登录 www.cmpedu.com 免费注册、审核通过后下载，或联系编辑索取（QQ：1239258369，电话：010 - 88379739）。

图书在版编目（CIP）数据

集成电路设计与项目应用/张红主编. —北京：机械工业出版社，2012. 4

全国高等职业教育规划教材

ISBN 978-7-111-37541-8

I. ①集… II. ①张… III. ①集成电路—电路设计—高等职业教育—教材 IV. ①TN402

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 028507 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

责任编辑：王 颖 版式设计：刘 岚

责任校对：肖 琳 责任印制：乔 宇

三河市国英印务有限公司印刷

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 9.5 印张 · 229 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-37541-8

定价：23.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010) 88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销售一部：(010) 68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销售二部：(010) 88379649

读者购书热线：(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

全国高等职业教育规划教材电子类专业 编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 董维佳 俞 宁 杨元挺 任德齐
华永平 吴元凯 蒋蒙安 祖 炬 梁永生

委 员 (按姓氏笔画排序)

尹立贤	王用伦	王树忠	王新新	邓 红	任艳君
刘 松	刘 勇	华天京	吉雪峰	孙学耕	孙津平
朱咏梅	朱晓红	齐 虹	张静之	李菊芳	杨打生
杨国华	汪赵强	陈子聪	陈必群	陈晓文	季顺宁
罗厚军	姚建永	钮文良	聂开俊	袁 勇	袁启昌
郭 勇	郭 兵	郭雄艺	高 健	崔金辉	曹 毅
章大钧	黄永定	曾晓宏	蔡建军	谭克清	

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国近60所高等职业院校的骨干教师对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了全面的修订和增补,并更名为“全国高等职业教育规划教材”。

本系列教材是由高职高专计算机专业、电子技术专业和机电专业教材编委会分别会同各高职高专院校的一线骨干教师,针对相关专业的课程设置,融合教学中的实践经验,同时吸收高等职业教育改革的成果而编写完成的,具有“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价,并有多品种被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。在修订和增补过程中,除了保持原有特色外,针对课程的不同性质采取了不同的优化措施。其中,核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。同时,根据实际教学的需要对部分课程进行了整合。

归纳起来,本系列教材具有以下特点:

- 1) 围绕培养学生的职业技能这条主线来设计教材的结构、内容和形式。
- 2) 合理安排基础知识和实践知识的比例。基础知识以“必需、够用”为度,强调专业技术应用能力的训练,适当增加实训环节。
- 3) 符合高职学生的学习特点和认知规律。对基本理论和方法的论述要容易理解、清晰简洁,多用图表来表达信息;增加相关技术在生产中的应用实例,引导学生主动学习。
- 4) 教材内容紧随技术和经济的发展而更新,及时将新知识、新技术、新工艺和新案例等引入教材。同时注重吸收最新的教学理念,并积极支持新专业的教材建设。
- 5) 注重立体化教材建设。通过主教材、电子教案、配套素材光盘、实训指导和习题及解答等教学资源的有机结合,提高教学服务水平,为高素质技能型人才的培养创造良好的条件。

由于我国高等职业教育改革和发展的速度很快,加之我们的水平和经验有限,因此在教材的编写和出版过程中难免出现问题和错误。我们恳请使用这套教材的师生及时向我们反馈质量信息,以利于我们今后不断提高教材的出版质量,为广大师生提供更多、更适用的教材。

机械工业出版社

前 言

目前,我国的信息产业正处于飞速发展时期,而集成电路技术是属于信息技术领域的关键核心技术。国家颁布了一系列对集成电路产业的扶持政策,因此,加快集成电路产业人才的培养已经成为高等教育改革和发展的一项紧迫的任务。

集成电路设计产业不仅需要高层次的设计人才,也需要较低层次的辅助设计人才,而这一类人才就需要高职院校来培养。目前,市场上现有的教材大多是适合本科院校的,高职院校的学生都是按照本科教材来进行这门课程学习的。这样,很不利于人才的培养。在国家示范性高职院校建设的大背景下,我院专门立项编写了适合高职院校学生的《集成电路设计与项目应用》这本教材。

本书按照项目教学的要求进行编排,共分为引言、基本 CMOS 门电路设计模块、基本 TTL 门电路设计模块和一个综合训练模块——A/D 转换器中的时钟稳定电路设计。其中第一个模块包含 CMOS 反相器设计在内的 9 个子项目,第二个模块包含 TTL 与非门设计在内的 3 个子项目,第三个模块包含运算放大器设计在内的 3 个子项目。建议本课程的授课时数为 64~80 学时。

本书可作为高职院校微电子专业的教材及工程技术人员学习参考用书。其他专业的读者也可通过本书对集成电路设计有所了解。

本书为了适应工程环境的需要,采用了 Cadence 软件设计环境。因此,本书凡涉及 Cadence 设计环境的,都没有采用国标,而是沿用了 Cadence 原界面中的图示。例如,电阻在国标中,用  表示,而在 Cadence 中是用  表示。

本书由常州信息职业技术学院的张红老师担任主编,负责本书模块 1 中前 8 个子项目的开发和编写、第 9 个子项目的开发,模块 3 的开发和编写。常州信息职业技术学院的余建老师担任副主编,负责模块 1 第 9 个子项目的编写和负责模块 2 项目的开发,重庆城市管理职业学院的刘新老师负责模块 2 的编写,中电集团第 24 所的刘涛工程师担任主审。在此,对于所有提供帮助的老师和同学表示最诚挚的感谢!

由于时间和水平有限,本书难免存在许多不足之处,恳请专家、老师、同学和其他读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

引言	1
0.1.1 能力目标	1
0.1.2 学习内容	1
0.1.3 任务书	1
0.1.4 相关知识	4
0.1.5 思考题	12
模块1 基本CMOS门电路设计	13
1.1 项目CMOS反相器设计	13
1.1.1 能力目标	13
1.1.2 学习内容	13
1.1.3 任务书	13
1.1.4 相关知识	16
1.1.5 思考题	32
1.2 项目CMOS传输门设计	32
1.2.1 能力目标	32
1.2.2 学习内容	32
1.2.3 任务书	32
1.2.4 相关知识	35
1.2.5 思考题	38
1.3 项目CMOS两输入与非门设计	38
1.3.1 能力目标	38
1.3.2 学习内容	39
1.3.3 任务书	39
1.3.4 相关知识	41
1.3.5 思考题	47
1.4 项目CMOS两输入或非门设计	47
1.4.1 能力目标	47
1.4.2 学习内容	47
1.4.3 任务书	48
1.4.4 相关知识	50
1.4.5 思考题	54
1.5 项目CMOS与或非门设计	54

1.5.1	能力目标	54
1.5.2	学习内容	55
1.5.3	任务书	55
1.5.4	相关知识	57
1.5.5	思考题	60
1.6	项目 CMOS 或与非门设计	61
1.6.1	能力目标	61
1.6.2	学习内容	61
1.6.3	任务书	61
1.6.4	相关知识	64
1.6.5	思考题	67
1.7	项目 CMOS 三态门设计	67
1.7.1	能力目标	67
1.7.2	学习内容	67
1.7.3	任务书	67
1.7.4	相关知识	70
1.7.5	思考题	71
1.8	项目 CMOS 异或门设计	72
1.8.1	能力目标	72
1.8.2	学习内容	72
1.8.3	任务书	72
1.8.4	相关知识	75
1.8.5	思考题	76
1.9	项目 CMOS 同或门设计	77
1.9.1	能力目标	77
1.9.2	学习内容	78
1.9.3	任务书	78
1.9.4	相关知识	80
1.9.5	思考题	83
模块 2	基本 TTL 门电路设计	84
2.1	项目晶体管非门设计	84
2.1.1	能力目标	84
2.1.2	学习内容	84
2.1.3	任务书	84
2.1.4	相关知识	87
2.1.5	思考题	96
2.2	项目 TTL 与非门设计	97
2.2.1	能力目标	97
2.2.2	学习内容	97

2.2.3	任务书	97
2.2.4	相关知识	100
2.2.5	思考题	105
2.3	项目 TTL 或非门设计	105
2.3.1	能力目标	105
2.3.2	学习内容	105
2.3.3	任务书	105
2.3.4	相关知识	108
2.3.5	思考题	110
模块 3	A/D 转换器中的时钟稳定电路设计	111
3.1	项目运算放大器设计	111
3.1.1	能力目标	111
3.1.2	学习内容	111
3.1.3	任务书	111
3.1.4	相关知识	114
3.1.5	思考题	124
3.2	项目延迟锁相环设计	124
3.2.1	能力目标	124
3.2.2	学习内容	124
3.2.3	任务书	124
3.2.4	相关知识	127
3.2.5	思考题	133
3.3	项目时钟稳定电路设计	133
3.3.1	能力目标	133
3.3.2	学习内容	134
3.3.3	任务书	134
3.3.4	相关知识	136
3.3.5	思考题	139
附录	书中非标准符号与国标的对照表	140
	参考文献	141

引言

0.1.1 能力目标

- 1) 了解集成电路的发展历程、分类。
- 2) 了解集成电路的代工工艺。
- 3) 知道摩尔定律。
- 4) 明白专用集成电路设计的要求及其设计方法。
- 5) 知道集成电路设计的常用软件。
- 6) 了解集成电路设计相关的期刊和学术会议。

0.1.2 学习内容

- 1) 集成电路的历史与发展。
- 2) 代工工艺。
- 3) 集成电路的分类。
- 4) 集成电路设计方法。
- 5) 常用 EDA 软件介绍。
- 6) 集成电路设计相关的期刊和学术会议介绍。

0.1.3 任务书

任务书	项目名称	班级 姓名 学号
	集成电路基础知识	
一、项目要求 1. 知道集成电路的定义。 2. 知道集成电路的历史与发展。 3. 知道代工工艺。 4. 能进行集成电路的分类。 5. 知道集成电路的设计方法。 6. 熟悉集成电路的设计软件。 二、项目资讯 1. 集成电路的历史与发展。 2. 代工工艺。 3. 集成电路的分类。 4. 集成电路的设计方法。		

(续)

任务书	项目名称	班级 姓名 学号
	集成电路基础知识	
5. 常用 EDA 软件介绍。 6. 集成电路设计相关的期刊和学术会议。 三、项目计划 1. 学习集成电路的基本知识。 2. 进行集成电路的分类。 3. 调研集成电路的产业结构。 四、项目决策 1. 调研集成电路产业。 2. 教师指导并分析学生对集成电路产业的调研。 五、项目实施 1. 集成电路是什么？ 2. 我国有哪些 IC 设计公司和 FOUNDRY（代工厂家）？ 3. 世界上有哪些大的 IC 设计公司和 FOUNDRY？		

(续)

任务书	项目名称	班级 姓名 学号
	集成电路基础知识	
4. 数字集成电路和模拟集成电路的区别是什么?		
5. 集成电路的发展趋势是什么?		
六、项目检查		
1. 学生填写检查单。		
2. 教师填写评价表。		
七、项目评估		
1. 学生自我评述。		
2. 教师抽查学生汇报。		
3. 提交汇报资料, 教师继续评估。		
指导老师评价任务书完成情况:		
指导老师签名: 年 月 日		

0.1.4 相关知识

1. 集成电路的历史与发展

(1) 集成电路的定义

集成电路 (Integrated Circuit, 简称 IC) 是一种微型电子器件或部件, 是采用一定的工艺, 把一个电路中所需的晶体管、二极管、电阻、电容和电感等元器件及布线互连一起, 制作在一小块或几小块半导体晶片或介质基片上, 然后封装在一个管壳内, 就成为具有所需电路功能的微型结构。其中所有元器件在结构上已组成一个整体, 这样, 整个电路的体积就大大缩小, 且引出线和焊接点的数目也大为减少, 从而使电子元器件向着微小型化、低功耗和高可靠性方面迈进了一大步。封装好的 IC 如图 0-1 所示。

(2) 集成电路的历史与发展

1) 1947 年, 美国贝尔实验室的肖克莱 (William B · Shockley)、波拉坦 (Walter H · Brattain) 和巴丁 (John Bardeen) 发明了晶体管, 他们为此获得了 1956 年的诺贝尔物理学奖。点接触型晶体管的照片如图 0-2 所示。

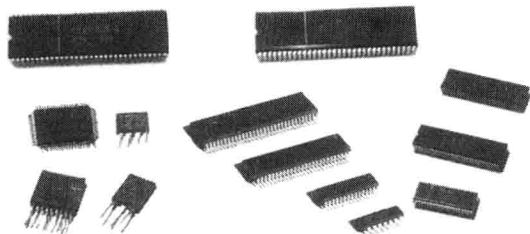


图 0-1 封装好的 IC

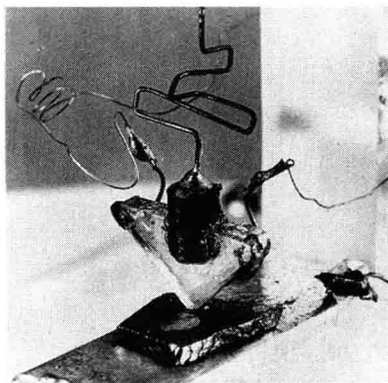


图 0-2 点接触型晶体管的照片

2) 1950 年, 结型晶体管研制成功。

3) 1952 年, 英国皇家雷达研究所的达默 (G · W · A. Dummer) 在美国工程师协会举办座谈会上发表的论文中第一次提出“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定块上实现, 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”。

4) 1958 年, 以德克萨斯仪器公司的科学家杰克·基尔比 (Jack Kilby) 为首的研究小组研制出了世界上第一块集成电路 (如图 0-3 所示), 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。杰克·基尔比于 2000 年获得诺贝尔物理学奖。

5) 1960 年, 第一块 MOS 集成电路制造成功。

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。重大的工艺发明主要包括 1950 年美国奥奥尔和肖克莱发明的离子注入工艺、1956 年美国富勒发明的扩散工艺、1960 年卢尔和克里斯坦森发明的外延生长工艺、1970 年斯皮勒和卡斯兰尼发明的光刻工艺。这些关键工艺为晶体管从点接触结构向平面结构过渡并使其集成化提供了基本的技术支持。

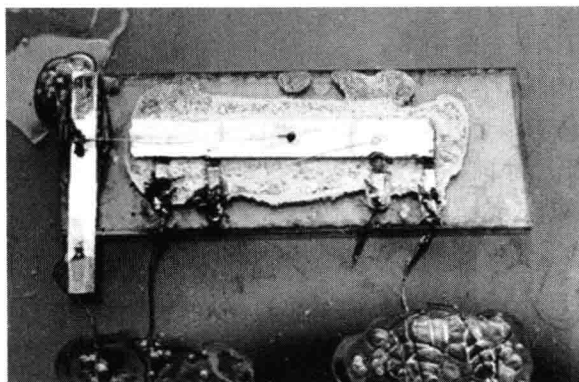


图 0-3 Jack Kilby 发明的世界上第一块集成电路

从此，电子工业进入了 IC 时代。经过几十年的发展，集成电路已经从最初的小规模发展到目前的甚大规模和系统芯片，单个电路芯片集成的元器件数从当时的十几个发展到目前的几亿个甚至几十、上百亿个。

早期研制和生产的集成电路都是双极型的。1962 年以后又出现了由金属——氧化物——半导体（MOS）场效应晶体管组成的 MOS 集成电路。实际上，远在 1930 年，德国科学家 Lilienfield 就提出了关于 MOS 场效应晶体管的概念、工作原理以及具体的实施方案，但由于当时材料和工艺水平的限制，直到 1960 年，Kang 和 Atalla 才研制出第一个利用硅半导体材料制成的 MOS 晶体管。从此 MOS 集成电路得到了迅速发展。

双极和 MOS 集成电路一直处于相互竞争、相互促进、共同发展的状态中。但 MOS 集成电路具有功耗低、适合于大规模集成等优点，在整个集成电路领域中占的份额越来越大，目前已经成为集成电路领域的主流。虽然双极集成电路在整个集成电路总份额当中所占比例在减小，但它的绝对份额却在增加，它在一些应用领域中的作用短期内也不会被 MOS 集成电路所替代。

在早期的 MOS 技术中，铝栅 P 沟 MOS 晶体管是最主要的技术。20 世纪 60 年代后期，多晶硅取代 Al 成为 MOS 晶体管的栅材料。20 世纪 70 年代中期，利用 LOCOS 隔离的 NMOS（全部 N 沟道 MOS 晶体管）集成电路开始商品化。由于 NMOS 器件具有可靠性好、制造成本低等特点，所以 NMOS 技术成为 20 世纪 70 年代 MOS 技术发展的主要推动力。虽然早在 1963 年就提出了 CMOS 工艺，并研制成功了 CMOS 集成电路，但受工艺技术的限制，直到 20 世纪 80 年代 CMOS 才迅速成为超大规模集成电路（VLSI）的主流技术。CMOS 具有功耗低、可靠性好、集成密度高等特点，目前它已成为集成电路的主流工艺。

集成电路的出现打破了电子技术中器件与线路分离的传统，使晶体管和电阻、电容等元器件以及它们之间的互连线都被集成在小小的半导体基片上，开辟了电子元器件与线路甚至整个系统向一体化发展的方向，为电子设备的性能提高、价格降低、体积缩小、能耗降低提供了新途径，也为电子设备迅速普及、“走向”平民大众奠定了基础。

（3）集成电路的发展趋势

1960 年，美国 Intel 公司 G·Moore 预言集成电路的发展将遵循指数规模，人们称之为“摩尔定律”，其主要内容如下：

- 1) 集成电路最小特征尺寸以每 3 年减小 70% 的速度下降，集成度每一年翻一番。
- 2) 集成电路价格每两年下降一半。
- 3) 这种规律在 30 年内是正确的（从 1965 年开始）。

集成电路的发展具体有以下几个方面的趋势：

1) 集成电路的特征尺寸向深亚微米发展，目前，国际上规模化生产已达 32nm 工艺（Intel 公司），而我国还处于 65nm 的阶段（中芯国际）。

2) 晶圆的尺寸增加。当前的主流晶圆的尺寸为 8in、12in。图 0-4 给出了晶圆尺寸的发展图及 12in 晶圆与一个一元硬币的对比图。

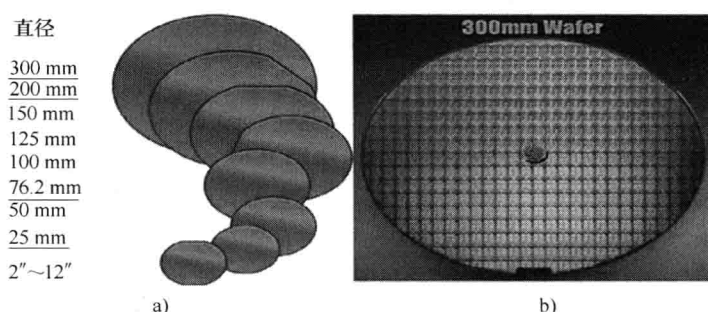


图 0-4 晶圆尺寸的发展图及 12in 的晶圆与一个一元硬币的对比图

- 3) 集成电路的规模不断提高。CPU 已经超过上亿个晶体管了。
- 4) 集成电路的速度不断提高。采用 32nm 工艺实现的 CPU 主频已是 3.6GHz，Intel 在 2012 年 2 月发布第一款四核心型号“Core i7 - 3820”。
- 5) 集成电路复杂度不断提高，已经发展成 SoC（System - on - Chip）。
- 6) 模数混合集成向电路设计工程师提出挑战。
- 7) 由于集成电路器件制造能力以每 3 年翻两番，即每年 58% 的速度提升，而电路设计能力每年只能以 21% 的速度提升，所以电路设计能力落后于器件制造能力，且其鸿沟（gap）呈越来越宽的趋势。
- 8) 集成电路产业连续几十年的高速增长和巨额利润导致世界范围内集成电路生产线的大量建设，目前已出现过剩局面。
- 9) 工艺线投资的高成本和设计能力的普遍落后，导致多数工艺线走向代工（代客户加工，Foundry）的经营道路。
- 10) 电路设计、工艺制造、封装的分立运行为发展无生产线（Fabless）和无芯片（Chipless）集成电路的设计提供了条件，为微电子领域的发展提供了条件。

2. 代工工艺

随着集成电路规模的爆炸式扩张和模数混合集成系统的广泛需要，知识密集型的芯片设计变得比技术密集型的芯片制造重要起来。另一方面，集成电路生产的高利润前景引发了众多生产线在各地的建造，从而导致了集成电路产业生产能力的剩余，即生产线“无米下锅”局面的出现。人们需要更多的功能芯片设计，这种需求促进了集成电路设计的发展，并使得不少设计公司应运而生。这些设计公司拥有设计人才和技术，但不拥有生产线，成为无生产线（Fabless）的集成电路设计公司。在国外，已有众多这样的公司在运作。芯片设

计单位和工艺制造单位的分离，即芯片设计单位要不拥有生产线而存在和发展，而芯片制造单位致力于工艺实现（代客加工，简称代工），已成为集成电路技术发展的一个重要特征。

代工单位将经过前期开发确定的一套工艺设计文件（Process Design Kits, PDK）通过互联网传送（或光盘等媒介邮寄）给设计单位，这是一个信息流过程。PDK 文件包括工艺电路模拟用的器件的 SPICE 参数、版图设计用的层次定义和设计规则，晶体管、电阻、电容等元器件和通孔（Via）、焊盘等基本结构的版图，与设计工具关联的设计规则检查（Design Rule Check, DRC）、参数提取 EXT（extraction）和版图电路图对照（Layout Vs Schematic, LVS）用的文件。

设计单位根据研究项目提出的技术指标，在自己掌握的电路和系统知识基础上，利用 PDK 提供的工艺数据和 CAD/EDA 工具，进行电路设计、电路仿真（或称之为模拟）和优化、版图设计、设计规则检查 DRC、参数提取和版图电路图对照 LVS，最终生成一种通常称之为 GDS-II 格式的版图文件，再通过互联网传送给代工单位，这也是一次信息流过程。

代工单位根据设计单位提供的 GDS-II 格式的版图数据，首先制作掩膜（Mask），将版图数据定义的图形固化到铬板等材料的一套掩膜上。一张掩膜一方面对应于版图设计中一层的图形，另一方面对应于芯片制作中的一道或多道工艺。正是在一张张掩膜的参与下，工艺工程师完成芯片的流水加工，将版图数据定义的图形最终有序地固化到芯片上。这一过程通常简称为流片（run wafer）。根据掩膜的数目和工艺的自动化程度，一次流片的周期约为两个月。在代工单位完成芯片加工后，根据路程远近，利用飞机等不同的快速运输工具寄给设计单位。

设计单位对芯片进行参数测试和性能评估，若符合技术要求，则进入系统应用，从而完成一次集成电路设计、制造和测试与应用的全过程。否则，就需进行改进和优化。

国内近几年建立的 Foundry（代工）厂家和转向为代工的厂家包括：无锡上华、上海先进半导体公司、首钢 NEC、上海华虹 NEC、上海中芯国际、台积电、联华等。国外的有 X-FAB、Tower Semiconductor、Agilent 等。

3. 集成电路的分类

（1）按结构形式分类

按照集成电路的结构形式可以将其分为半导体单片集成电路及混合集成电路。

1) 半导体单片集成电路。

它是指电路中所有的元器件都被制作在同一块半导体基片上的集成电路，这是最常见的一种集成电路。通常，在不加任何修饰词的情况下提到的集成电路就是指这类集成电路。在半导体集成电路中最常用的半导体材料是硅。除此之外，还有 GaAs 等半导体材料。

2) 混合集成电路。

它是将多个半导体集成电路芯片或半导体集成电路芯片与各种分立元器件通过一定的工艺进行二次集成，构成一个完整的、更复杂的功能器件，该功能器件最后被封装在一个管壳中，作为一个整体使用。因此，有时也称混合集成电路为二次集成 IC。在混合集成电路中，主要由片式无源器件（电阻、电容、电感、电位器等）、半导体芯片（集成电路、晶体管等）、带有互联金属化层的绝缘基板（玻璃、陶瓷等）以及封装管壳组成。

根据制作混合集成电路时所采用的工艺，还可以将其分为厚膜集成电路和薄膜集成电路。

在厚膜集成电路中，需要采用厚膜工艺在陶瓷板上制作电阻和互连线。厚膜工艺采用的

主要材料是各种浆料，如氧化钼—银等电阻浆料、金或铜等金属浆料以及作为隔离介质的玻璃浆料等。各种浆料通过丝网印刷的方法涂敷到基板上，形成电阻或互连线图形，图形的形状、尺寸和精度主要由丝网掩膜决定，在每次完成浆料印刷后要进行干燥和烧结。

薄膜集成电路是指利用薄膜（薄膜的厚度一般小于 $1\mu\text{m}$ ）工艺制作电阻、电容元件和金属互连线。它采用的工艺主要有真空蒸发、溅射等，各种薄膜的图形通常采用光刻、腐蚀等工序实现。

（2）按电路功能分类

根据集成电路的功能可以将其分成数字集成电路、模拟集成电路和模/数混合集成电路3类。

1) 数字集成电路（Digital IC）。

数字集成电路是处理数字信号的集成电路，即采用二进制方式进行数字计算和逻辑函数运算的一类集成电路。由于这些电路都具有某种特定的逻辑功能，所以也称它为逻辑电路。

根据它们与输入信号时序的关系，又可以将该类集成电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。前者的输出结果只与当前的输入信号有关，例如反相器、与非门、或非门等都属于组合逻辑电路；后者的输出结果则不仅与当前的输入信号有关，而且还与以前的逻辑状态有关，诸如触发器、寄存器、计数器等就属于时序逻辑电路。

2) 模拟集成电路（Analog IC）。

模拟集成电路主要是指将电容、电阻、晶体管等组成的模拟电路集成在一起用来处理模拟信号（连续变化的信号）的集成电路。模拟集成电路的用途很广，例如在工业控制、测量、通信、家用电器等领域都有很广泛的应用。

有许多用途的模拟集成电路，如运算放大器、模拟乘法器、锁相环、电源管理芯片等。模拟集成电路的主要构成电路有：放大器、滤波器、反馈电路、基准源电路、开关电容电路等。模拟集成电路设计主要是通过有经验的设计师进行手动的电路调试和模拟而得到，与此相对应的数字集成电路设计大部分是通过使用硬件描述语言在 EDA 软件的控制下自动的综合产生。

3) 模/数混合集成电路（Analog - Digital IC）。

随着电子系统的发展，迫切需要既包含数字电路，又包含模拟电路的新型电路，这种电路通常称为模/数混合集成电路。早期由于集成电路工艺和设计技术的限制，通常采用混合集成电路技术实现这种电路，直到 20 世纪 70 年代，随着半导体工艺技术的发展，才研制成功单片模/数混合集成电路。

最先发展起来的模/数混合集成电路是数据转换器，它主要用来连接电子系统中的数字部件和模拟部件，用以实现数字信号和模拟信号的互相转换。因此它可以分为数/模转换器（DAC）和模/数转换器（ADC）两种。目前，它们已经成为数字技术和微处理机在信息处理、过程控制等领域推广应用的关键组件。除此之外，模/数混合电路还有电压 - 频率转换器和频率 - 电压转换器等。

（3）按集成电路的规模分类

按集成电路的规模不同，集成电路可分为：

1) 小规模集成电路（SSI）。

2) 中规模集成电路（MSI）。

3) 大规模集成电路（LSI）。