



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

工程硕士教育 集成电路工程领域 发展报告

全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

工程硕士教育 集成电路工程领域发展报告

全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组 编著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS

浙江大学出版社

内容提要

本书是全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组受全国工程硕士专业学位教育指导委员会委托而编写的,介绍了集成电路工程学科 10 多个领域的发展现状。全书由一个主题报告和 12 个专题组成。主题报告使读者对集成电路的分类、发展历史、产业等方面的全貌有所了解,而后各专题报告分述相关领域的技术进展,包括集成电路器件与制造工艺、模拟集成电路、射频集成电路、数字集成电路、嵌入式 CPU、系统芯片、集成电路测试与封装、集成电路可靠性、FPGA 技术、电源管理芯片技术等。

本书具有以下特点:编写人员在相关领域中具有一定影响;内容新,编写人员查阅并参考了国内外最新文献,关注最新的技术发展情况;覆盖面广,案例多,不少案例反映了国内自主创新的研究成果,应用新强。本书不仅可作为工程硕士的教学用书,而且可以供企业、科研院所和高校的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程硕士教育集成电路工程领域发展报告 / 全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组编著. —杭州:浙江大学出版社, 2011.8

ISBN 978-7-308-08960-9

I. ①工… II. ①全… III. ①集成电路—研究生—教材 IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 157967 号

工程硕士教育集成电路工程领域发展报告

全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组 编著

丛书策划 樊晓燕

责任编辑 樊晓燕

出版发行 浙江大学出版社

(杭州市天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排版 杭州中大图文设计有限公司

印刷 富阳市育才印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 22

字数 535 千

版印次 2011 年 9 月第 1 版 2011 年 9 月第 1 次印刷

书号 ISBN 978-7-308-08960-9

定价 56.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部邮购电话 (0571)88925591

序

集成电路是我国战略性新兴产业——新一代信息技术产业的基础。2010年,我国进口集成电路芯片总值高达1400亿美元,据我国大宗进口产品之首,超过了我国石油的进口总额。我国信息技术产业“缺芯少魂”的现象依然严重。

国务院2000〔18〕和2011〔4〕号文件,分别要求加快发展和进一步加快发展集成电路产业。国务院在根据《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》部署的国家科技重大专项中,在信息板块的三个专项中重点部署了集成电路技术与产品。

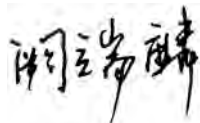
具有创新意识的高级应用型、技术型、复合型专业人才的严重缺乏是制约我国集成电路产业发展的一个重要因素。集成电路工程硕士培养点的建设是培养集成电路产业的工程高级人才的重要举措。

我国集成电路产业的发展急需人才,特别是需要具有工程技术能力的高层次人才。工程硕士教育的培养目标就是高级技术型、应用型、开发型、复合型人才。2006年,全国集成电路工程领域工程硕士培养单位协作组被批准成立以来,集成电路工程硕士的培养工作得到了迅速的发展。集成电路工程技术的发展日新月异,全面了解集成电路的产业技术并及时了解技术前沿的发展动态是当代集成电路工程师应该具备的能力之一。全国工程硕士专业学位教育指导委员会组织编写集成电路工程领域发展报告,对集成电路产业各个主题方向的发展进行了专题研究分析,内容丰富,对工程硕士研究生全面了解产业情况和技术发展,拓展视野具有很好的作用。

全国集成电路工程领域工程硕士培养协作组组织了浙江大学、北京大学、清华大学、复旦大学、西安电子科技大学、东南大学、电子科技大学、上海交通大学、华中科技大学、天津大学的教授联手编写了“集成电路领域发展报告”,介绍了集成电路工程学科十多个领域的技术发展现状。发展报告由1个主题报告和12个专题报告组成。主题报告使读者对集成电路的发展历史、集成电路的分类、集成电路产业的发展与变革、集成电路的设计与制造等有所了解,而后各专题报告分叙述集成电路器件与制造工艺、模拟与数字集成电路设计、射频集成电路、嵌入式CPU与系统芯片、集成电路封装与测试、现场可编程逻辑阵列(FPGA)、集成电路可靠性等。

这本发展报告内容丰富,具有以下特色:(1)编写人员主要来自第一批“国家集成电路人才培养基地”单位,在相关领域有影响和丰富的实践经验;(2)内容新颖,编写人员不仅自己熟悉专题领域的发展状况,而且还查阅了大量的国内外该领域的最新进展,紧跟技术前沿;(3)覆盖面宽,内容覆盖了集成电路产业的各个方面,按集成电路产业的主要分类,包括了集成电路器件与工艺制造、集成电路设计、集成电路封装与测试等;(4)应用性强,由于是工程硕士用书,所以不过多追求学术性,更重视实践性与实用性。书中案例较多,许多案例反映了国内自主创新的研究成果。

中国科学院院士



2011年8月27日

前 言

工程硕士专业学位是与工学硕士同一学位层次、不同培养规格,目的是培养应用型、技术型、复合型的专业人才。2004年集成电路工程领域工程硕士培养单位协作组被批准成立以来,在全国工程硕士教育指导委员会指导下,协作组在各培养单位的大力支持下,在学位标准制定、课程建设与教材建设、毕业论文规范等方面做了大量的工作,促进了集成电路工程领域的人才培养的健康发展。

集成电路工程领域是38个可授予工程硕士专业学位的工程领域之一。全国现有41个培养单位有集成电路领域工程硕士授予权。集成电路工程领域是一个覆盖面宽、学科交叉性强的领域,从集成电路产业分类来看,其覆盖范围包括集成电路器件与工艺制造、集成电路设计、集成电路封装与测试、集成电路应用与系统开发、电子设计自动化(EDA)、电子产品与仪器等。从学科上看,集成电路工程领域涉及了电子科学与技术、计算机科学与技术、信息与通信工程三个一级学科及其所属的二级学科:电路与系统、微电子与固体电子学、电磁场与微波技术、信号与信号处理、计算机硬件技术、软件技术与计算机应用等。

自从1958年集成电路发明以来,集成电路技术的发展基本上按照所谓的摩尔定律,即集成电路的集成度每18个月翻一翻的增长速度高速发展。集成电路的产业已经分为各自相对独立的集成电路设计、加工、封装与测试、集成电路应用等。集成电路工程师要跟上迅猛发展的前沿技术,就应该不断学习,更新知识,更上技术发展的步伐。目前,各集成电路工程领域工程硕士培养方案中,都设有“集成电路技术发展趋势”的课程。针对这一课程,全国工程硕士教育指导委员会组织全国集成电路工程领域工程硕士教育协作组编写领域发展报告,针对集成电路技术近年来的发展趋势,为工程硕士研究生提供全面了解各集成电路产业技术的发展状态和动态,以拓宽视野,为其扩展知识和能力提供帮助。

集成电路工程领域工程硕士教育协作组为编写本领域技术报告,多次召开了协作组的核心成员会议,并组织了由浙江大学、清华大学、北京大学、复旦大学、东南大学、电子科技大学、西安电子科技大学、华中科技大学、上海交通大学、天津大学教授组成编写组,联手编写了这本《集成电路工程领域发展报告》。发展报告由1个主体报告和12个专题报告组成,报告内容覆盖了集成电路工程领域的产业以及学科,其主要内容和作者如下:

主题报告:集成电路的历史与发展(浙江大学严晓浪、何乐年)

专题报告1:集成电路工艺与器件(电子科技大学张波)

专题报告2:模拟集成电路进展(清华大学魏琦 杨华中)

专题报告3:数字集成电路设计技术(东南大学王学香 杨军)

专题报告4:射频集成电路技术的应用与发展(天津大学马建国 张瑞峰 吕辰刚)

专题报告5:嵌入式系统与系统芯片(浙江大学潘赞)

专题报告6:嵌入式CPU(浙江大学黄凯 孟建熠)

专题报告7:集成电路测试(上海交通大学付宇卓 郭箬)

专题报告 8:集成电路封装(北京大学王振宇 石广秩)

专题报告 9:PFGA 技术发展趋势(复旦大学王伶俐)

专题报告 10:集成电路可靠性技术(西安电子科技大学郝跃 刘红侠)

专题报告 11:电源管理集成电路技术(华中科技大学邹雪城)

专题报告 12:集成电路制造工艺新技术(清华大学李铁夫 杨秩)

特别感谢浙江大学的阙端林院士为本书撰写了序言。

由于全书作者多,时间紧,虽经修改审稿,疏漏之处难免,请读者指正。

编者

2011年8月

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

总序

2010年国家颁布的《国家中长期教育改革和发展规划纲要》强调高等教育的核心任务是提高教育质量,并且提出要大力发展专业学位研究生教育。全国工程硕士专业学位教育指导委员会(以下简称教指委)高度重视、不断推进工程硕士专业学位研究生教育的质量建设。教指委课程建设研究组在加强公共课程、领域核心课程建设的同时,于2010年启动编写工程硕士教育“工程领域发展报告”(以下简称“工程领域发展报告”)系列丛书的工作,旨在帮助广大工程硕士研究生(或高级工程技术人员)拓展知识、扩大视野、活跃思维和提升集成创新能力,进一步完善培养应用型、复合型和创新型的高层次工程技术人才的教学体系,更好地满足国家产业创新发展、企业提升核心竞争力的需求。

一、编印工程领域发展报告系列丛书的背景情况

工程硕士是与工程领域任职资格相联系的专业性学位,与工学硕士学位处于同一层次,但类型不同,各有侧重。长期以来,各培养单位已比较重视工学硕士研究生学术前沿课程的建设。但是,在工程硕士研究生的培养中,工程技术最新发展方面的课程、讲座、教材却比较薄弱。尽快提高工程硕士研究生工程技术前沿方面的教学质量,已成为各培养单位十分迫切的需求。

二、工程领域发展报告系列丛书的特点

工程领域发展报告主要针对本领域的发展现状和发展趋势,为工程硕士研究生前沿课程(或讲座形式)提供相关的最新动态,以利于工程硕士研究生了解领域的工程科技的发展现状和动态,以拓宽视野,为其扩展知识和能力提供帮助。

1. 共性原则

工程领域发展报告应是对本工程领域最新技术成果的描述,着重提炼出本领域具有共性的工程技术问题和工程应用进展。

2. 特色原则

工程领域发展报告应坚持工程特色,着重体现工程的综合性、应用性等特点。

3. “新、短、快”原则

工程领域发展报告着重反映本领域最新技术成果、发展动态和发展趋势,对工程硕士研究生教学应具有参考性,对工程硕士研究生学习应具有启发性。同时,工程领域发展报告篇幅不宜过长,编印应及时快速。

4. 可读性原则

工程领域发展报告将作为各培养单位、各工程领域的教学用书和阅读文献,并送全国工

程硕士专业学位教育指导委员会成员、中国工程院教育委员会成员、学术界、工业界、政府部门的有关专家学者、领导参阅。因此,该报告表述应准确、简练,并具有一定的可读性。

三、工程领域发展报告系列丛书的主要内容

工程领域发展报告,既是教学用书,又是课堂的延伸。其主要内容应体现我国科技和产业中长期发展规划,体现国家的重大需求,体现工程领域新进展和技术新进步。具体应集中体现在科学研究、技术开发与工程应用三个方面,特别应注重技术及技术向工程的转化上,以符合工程硕士研究生的培养需求。

科学研究应集中在领域相关的最新研究进展方面,特别是具有潜在工程价值的科研成果。

技术开发主要介绍中短期有望实现产业化的高科技技术。

工程应用主要包括国内外最新的工程技术成果,特别是同国家重大需求相关的重大工程技术成果,所涉及的领域应该有较宽的覆盖面。

由于工程领域发展报告覆盖的面比较宽,不可能将所有的技术领域都涉及。因此,每册工程领域发展报告一般选择一些重点领域若干方向进行撰写,由各工程领域教育协作组组长负责组成编写组。编写组成员邀请本领域若干位具有较高水平的教授以及相关行业、企业的知名专家参加。

为了加强统筹规划和具体实施,认真做好“工程领域发展报告”的编写出版工作,教指委专门成立编写委员会。编委会主任由教指委副主任委员兼课程建设研究小组组长陈子辰教授担任,编委会委员由陈子辰(浙江大学)、印杰(教指委委员兼课程建设研究小组副组长、上海交通大学)、史铁林(课程建设研究小组副组长、华中科技大学)、沈岩(教指委秘书兼课程建设研究小组成员、清华大学研究生院)、章丽萍(课程建设研究小组成员、浙江大学研究生院)等组成。希望本书能够为我国从事工程硕士专业学位研究生教育工作的师生提供有益的参考,也为广大工业界、政府部门的有关专家学者、领导架设交流的桥梁。由于编辑出版“工程硕士教育工程领域发展报告”,在我国专业学位研究生教育中尚无先例,是一项探索性工作,难免存在不当和疏漏,敬请专家、同行和广大读者批评指正。

本系列丛书的出版,得到了浙江大学出版社的大力支持,在此表示衷心感谢!

全国工程硕士专业学位教育指导委员会
工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

编委会

2011年3月1日

工程硕士教育“工程领域发展报告”系列丛书

编 委 会

- 顾 问** 顾秉林(中国科学院院士,全国工程硕士专业学位教育指导委员会主任委员)
谢和平(中国工程院院士,全国工程硕士专业学位教育指导委员会副主任委员)
- 主 任** 陈子辰(教授,全国工程硕士专业学位教育指导委员会副主任委员)
- 副主任** 印 杰(教授,全国工程硕士专业学位教育指导委员会委员)
史铁林(教授,课程建设研究小组成员、华中科技大学机械学院)
- 成 员** (以姓氏笔画为序)
李建东(课程建设研究小组成员,西安电子科技大学研究生院)
沈 岩(课程建设研究小组成员,清华大学研究生院)
杜振民(课程建设研究小组成员,北京科技大学材料学院)
巫世晶(课程建设研究小组成员,武汉大学研究生院)
严晓浪(课程建设研究小组成员,浙江大学信息科学与工程学院)
章丽萍(课程建设研究小组成员,浙江大学研究生院)
廖文武(课程建设研究小组成员,复旦大学研究生院)

《工程硕士教育集成电路领域发展报告》

主要编著者名单

(以姓氏笔画为序)

- | | |
|-------------|---------------|
| 于敦山(北京大学) | 何乐年(浙江大学) |
| 马建国(天津大学) | 杨华中(清华大学) |
| 王伶俐(复旦大学) | 邹雪城(华中科技大学) |
| 王学香(东南大学) | 张 波(电子科技大学) |
| 付宇卓(上海交通大学) | 郝 跃(西安电子科技大学) |
| 李铁夫(清华大学) | |

目 录

主题报告 集成电路的历史与发展	1
1 集成电路定义	1
2 集成电路的重要作用	1
3 集成电路的发展历史	2
4 集成电路的分类	3
4.1 按处理的信号类型分类	3
4.2 按生产的分类	3
4.3 按设计风格分类	4
5 集成电路产业发展与变革	4
6 集成电路设计、生产、销售模式	6
7 集成电路设计与制造	6
7.1 集成电路的设计流程	6
7.2 集成电路的制造工艺	8
8 集成电路工艺技术水平衡量指标	8
9 国际集成电路的发展	9
10 我国的集成电路产业发展	12
专题 1 集成电路工艺与器件	15
1 集成电路工艺与器件介绍	15
1.1 集成电路工艺概述	15
1.2 集成电路基本工艺	17
1.3 单片集成电路工艺	24
1.4 半导体器件概述	27
1.5 半导体集成器件	28
1.6 半导体分立器件	34
2 集成电路工艺与器件发展趋势分析	44
2.1 微纳集成器件与集成电路工艺发展趋势分析	44
2.2 半导体分立器件发展趋势分析	50
专题 2 模拟集成电路进展	53
1 模拟集成电路研究背景及其重要性	53
2 运算放大器	53

2.1	低电压下增益的提高	54
2.2	高速低功耗开关运放大器	55
2.3	高跨导低功耗运算放大器	57
3	数据转换器	60
3.1	流水线模数转换器中的校正技术	60
3.2	逐次逼近模数转换器的数字化	61
3.3	高速高精度电流舵型数模转换器(Current Steering DAC)	64
专题 3 数字集成电路设计技术		68
1	数字集成电路设计方法	68
1.1	定制电路设计	68
1.2	以标准单元为基础的半定制设计方法	69
2	CMOS 数字集成电路的主要单元设计方法	73
2.1	CMOS 组合逻辑的设计	73
2.2	时序逻辑电路设计	75
2.3	运算单元设计	79
3	数字集成电路的低功耗设计技术	83
3.1	低功耗逻辑综合和优化	83
3.2	RTL 结构级低功耗设计	86
3.3	系统级低功耗设计	88
4	数字集成电路发展趋势分析	90
4.1	超越摩尔定律	90
4.2	数字集成电路的 ESL 设计	91
4.3	数字集成电路的低功耗设计	95
专题 4 射频集成电路		99
1	射频集成电路研究背景及其重要性	99
2	射频集成电路的功能模块	101
2.1	频率合成器和锁相环	101
2.2	振荡器	104
2.3	功率放大器	106
2.4	低噪声放大器	108
2.5	混频器	110
3	RFIC 的支撑技术	112
3.1	RFIC 设计相关的 EDA 软件	112
3.2	RFIC 封装技术	114
3.3	RFIC 测试技术	115
3.4	单片微波集成电路	115
3.5	RF SoC 技术	116

4	RFIC 技术的应用及发展现状	117
4.1	RFIC 技术在无线通信领域的应用及发展现状	117
4.2	RFIC 技术的市场应用现状	119
5	RFIC 技术的发展历程	121
5.1	RFIC 技术的萌芽期	121
5.2	RFIC 技术的起步期	123
5.3	RFIC 技术发展初期	124
5.4	RFIC 技术发展中期(2005 年—2008 年)	127
5.5	RFIC 技术发展成熟期	131
5.6	RFIC 技术的应用	132
6	RFIC 技术的未来趋势	135
6.1	RFIC 技术的未来发展(2011 年之后的发展)	135
6.2	RFIC 技术发展方向	137
6.3	RFIC 技术的未来发展(2011 年之后)	137
专题 5 嵌入式系统与系统芯片		141
	引 言	141
1	嵌入式系统的定义与内容	142
1.1	定义及特点	142
2	嵌入式系统的内容及组成	144
2.1	硬件部分	144
2.2	软件	151
3	技术发展的历史、现状与发展趋势	152
3.1	发展历史概述	152
3.2	国际发展现状及趋势	153
专题 6 嵌入式 CPU		164
1	嵌入式 CPU 概述	164
1.1	定义与内容	164
1.2	嵌入式 CPU 特点	165
1.3	嵌入式 CPU 的组成	166
2	嵌入式 CPU 的发展历程与发展现状	167
2.1	嵌入式 CPU 现状	167
2.2	嵌入式 CPU 产品的技术发展趋势	167
2.3	CPU 技术发展新趋势	171
3	主流嵌入式 CPU 产品简介	174
3.1	ARM 系列处理器	174
3.2	MIPS 系列处理器	176
3.3	PowerPC 系列处理器	177

3.4	Xtensa 系列处理器	178
3.5	国产 C-CORE 嵌入式处理器	180
专题 7	集成电路测试技术	186
引 言	186
1	集成电路测试技术研究背景及其重要性	187
1.1	国内外研究背景	187
1.2	研究测试技术的重要性	188
2	集成电路测试的主要内容	189
2.1	集成电路测试设备	189
2.2	集成电路测试技术及方法	191
2.3	集成电路测试技术的市场情况	195
3	我国对集成电路测试领域技术研究及其应用现状	196
3.1	集成电路测试设备的发展	197
3.2	产业发展情况	197
3.3	我国对集成电路测试领域的新研究	199
4	集成电路测试技术发展趋势与对策	200
4.1	技术发展趋势	200
4.2	我国亟待解决的问题和发展探索	201
专题 8	集成电路封装技术	205
引 言	205
1	普通 IC 封装	206
1.1	常见 IC 封装简介	206
1.2	仿真模拟	207
1.3	制造工艺	208
1.4	测试与可靠性	210
2	工程领域的封装技术	212
2.1	江阴长电	212
2.2	南通富士通	214
2.3	天水华天	217
3	CSP 封装技术	218
3.1	CSP 封装技术简介	218
3.2	CSP 技术的特点	219
3.3	CSP 的基本结构及分类	221
3.4	CSP 封装技术展望	223
4	3D SIP	225
4.1	3D SIP 技术概念	225
4.2	研究概况	227

专题 9	FPGA 技术发展趋势	235
1	硬件可编程性与 FPGA 的由来	235
1.1	从“存储程序”到“存储逻辑”	235
1.2	从 PROM 到 GAL	237
1.3	从 CPLD 到 FPGA	240
2	FPGA 可编程互连结构	242
3	系统级 FPGA 硬件结构发展趋势	243
4	系统级 FPGA 的编译技术	247
5	FPGA 对冯诺依曼体系结构的发展	248
专题 10	集成电路可靠性技术	252
引 言		252
1	集成电路可靠性的发展历史与技术特点	254
1.1	集成电路可靠性的发展历史	254
1.2	集成电路可靠性发展的技术特点	255
2	集成电路可靠性技术的发展现状	256
3	集成电路的可靠性技术研究进展	257
3.1	MOS 器件的热载流子效应	257
3.2	MOS 器件的 NBTI 效应	260
3.3	超薄栅氧化层介质的可靠性	262
3.4	集成电路中的静电放电损伤	266
3.5	ULSI 中铜互连可靠性相关技术	272
专题 11	电源管理集成电路技术	281
1	电源管理集成电路技术概述	281
1.1	电源管理集成电路发展趋势	281
1.2	电源管理集成电路分类	283
1.3	电源管理集成电路学术研究及工程技术热点	284
2	电源管理芯片中的可靠性和稳定性	285
2.1	定义与内容	285
2.2	关键技术与发展趋势	286
2.3	小结	291
3	智能电源及数字控制技术	291
3.1	数字电源概述	291
3.2	电源管理总线	293
3.3	数字电源控制	295
4	电源管理芯片中的高低压集成技术	298
4.1	高低压集成技术简介	298

4.2	高低压集成技术的研究进展	300
4.3	高低压集成的电源管理芯片的实例及前景	303
5	电源管理芯片中的高效能低功耗技术	304
5.1	定义与内容	304
5.2	高效能低功耗技术概况	305
专题 12 集成电路制造工艺新技术		311
1	集成电路制造工艺技术新趋势与展望	311
1.1	光刻技术	312
1.2	沟槽填充技术	312
1.3	等效栅氧厚度(EOT)的微缩	312
1.4	源漏工程	313
1.5	展望	313
2	介质薄膜	313
2.1	氮氧化硅栅极氧化介电层的制造工艺	313
2.2	高 k 栅极介质	314
2.3	半导体绝缘介质的填充	314
2.4	超低介电常数薄膜	315
3	应力工程	315
3.1	嵌入式锗硅工艺	316
3.2	嵌入式碳硅工艺	316
3.3	应力记忆技术	316
3.4	应力效应提升技术	317
4	金属互连	317
4.1	预清洁	318
4.2	阻挡层	318
4.3	种子层	319
4.4	铜化学电镀	320
5	光刻技术	321
5.1	曝光设备	321
5.2	光刻的工艺流程	323
6	刻蚀	325
7	掺杂	326
7.1	离子注入	326
7.2	快速热退火	328
8	可靠性	329

主题报告 集成电路的历史与发展

浙江大学超大规模集成电路设计研究所 严晓浪^① 何乐年^②

1 集成电路定义

集成电路(Integrated Circuit, IC)是一种微型电子器件或部件。采用一定的加工工艺,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,成为具有所需特定电路功能的微型结构^[1]。其中所有元件在结构上已组成一个整体,这样,整个电路的体积大大缩小,且引出线和焊接点的数目也大为减少,从而使电子元件向着微小型化、低功耗和高可靠性方面迈进了一大步。

集成电路具有体积小、重量轻、引出线和焊接点少、寿命长、可靠性高、性能好等优点,同时成本低,便于大规模生产。它不仅在工业、民用电子设备如电视机、计算机等方面得到了广泛应用,同时在军事、通讯、遥控等方面也得到广泛的应用。用集成电路来装配电子设备,其装配密度比晶体管可提高几十倍至几千倍,设备的稳定工作时间也可大大提高。

2 集成电路的重要作用

集成电路从发明到现在只有 50 多年的历史,但其发展的速度是非常惊人的,也是任何其他产业无法与之相比的。集成电路的基本作用是对信息的存储、传输和处理。集成电路的出现使电子设备向着微小化、高速度、低功耗和智能化方向发展,使人类社会进入了信息社会。现在人们的工作、学习、生活和娱乐都离不开集成电路芯片。国民经济建设和国防现代化更是离不开集成电路。小到手机、大到飞机,它们的核心部件都有集成电路。

^① 严晓浪,浙江大学集成电路与基础软件研究院院长、教授、博士生导师,长期从事集成电路设计领域的工作,主要研究方向包括具有自主知识产权的高性能嵌入式 CPU 及系统芯片(SOC)设计技术、SOC 设计方法学、集成电路可制造性设计技术等。曾多次获得国家科学技术进步奖。

^② 何乐年,浙江大学超大规模集成电路设计研究所教授、博士生导师,从事模拟与数模混合集成电路设计领域的工作,主要研究方向包括 LED 驱动电路芯片、直流-直流电压转换器(DC-DC)等电源管理芯片,以及高速高精度模数与数模转换器(ADC/DAC)设计技术等。

从世界范围看,以集成电路为核心的电子信息产业已经发展为第一大产业,超过了以汽车、石油、钢铁为代表的传统产业,成为拉动国民经济增长的强大引擎和基石。1994年全世界集成电路的年销售额达到1097亿美元,首次突破了1000亿美元。2000年销售额超过了2000亿美元,到2005年销售额接近3000亿美元。尽管2008年至2009年,世界集成电路产业遭遇全球金融危机的影响,年销售额有所下降,但近十年来集成电路的年销售额大约每年平均增长15%^[2,3]。

另一方面,集成电路占整机系统总成本的比例逐年增大,1987年大约是10%,2003年已增加到23%,在航天器中集成电路占到总成本的66%^[3]。集成电路已经成为现代信息社会的基础,是当今电子系统的核心。

3 集成电路的发展历史

1947年12月16日,美国的贝尔实验室威廉·肖克莱(William Shockley)研究组第一次观察到锗(Ge)点接触型PNP晶体管具有放大作用,为今天的微电子学奠定了基石,并引发了从电子真空管到固体电子器件的现代电子学革命^[4-6]。世界上第一只晶体管的发明是基于约翰·巴丁(John Bardeen)的表面态理论、威廉·肖克莱的放大器设想以及沃特·布拉顿(Walter Brattain)设计的实验,是物理学史上的重大发明,具有划时代意义。肖克莱、巴丁和布拉顿也因此获得了1956年诺贝尔物理学奖。

1958年12月12日,美国德州仪器公司(Texas Instruments Incorporation, TI)的杰克·基尔比(Jack S. Kilby)在半导体锗衬底上形成台面双极晶体管和电阻等元件,并用超声波焊接的方法将这些元器件连接起来,形成了一个电路^[7]。1959年2月基尔比申请了专利,将它命名为集成电路(Integrated Circuit, IC),宣布发明了世界上第一片集成电路。当时该电路仅为12个元件的混合集成电路,但是它使人们看到了在一块固体上可以形成一个电路。这项发明标志着世界从此进入了集成电路时代,基尔比也因此获得了2000年诺贝尔物理学奖。

1959年7月美国仙童半导体公司(Fairchild Semiconductor Company)的诺依斯(R. N. Noyce)基于J. Hoerni发明的硅平面双极晶体管的技术^[8],提出用淀积在二氧化硅上的导电膜作为元器件之间的连线^[9],解决了集成电路中的互连问题,为利用平面工艺批量制作单片集成电路奠定了基础。诺依斯的发明也获得了美国专利^[6]。诺依斯的发明让人们认识到用这种方法可以在硅片上集成成千上万个晶体管。1960年仙童半导体公司利用平面工艺制作出第一个单片集成电路系列,称为“微逻辑(Micrologic)”^[9]。

上述革命性的发明为微电子技术奠定了重要的基础,使人类社会进入了一个以微电子技术为基础,以集成电路为核心的信息时代。

集成电路是从双极型电路开始的。20世纪60年代双极集成电路得到迅速发展,但是功耗问题限制了双极集成电路集成度的提高。20世纪60年代初MOS集成电路问世,开始是PMOS集成电路,后来解决了制作增强型n沟道MOS管的技术问题,70年代NMOS集成电路得到迅速发展。发展到超大规模集成电路以后功耗问题越来越突出。CMOS集成