

中国电子信息工程 科技发展研究

集成电路产业专题

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心



科学出版社

中国电子信息工程科技发展研究

集成电路产业专题

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书简要分析了集成电路产业先进国家和地区的成功经验,介绍了产业发展的特点,结合我国发展现状,提出除了资金和人才两大因素以外,集成电路产业发展存在三大挑战,即战略和产业的双重性、极小和超大的技术性,以及超长生态链产业链完备性的挑战;其中生态链产业链的挑战较为严峻。书中分析了全球产业规模和技术发展趋势,并列举了近年来我国集成电路产业蓬勃发展的亮点,同时客观给出了我们与世界先进水平的差距。在创新驱动发展中,需要重视商业模式、核心技术及技术路线创新。在芯片制造技术发展中,既要探索高端工艺,也要重视成熟工艺的研发。在产业追赶发展过程中,保持战略耐心和持之以恒的努力是必不可少的。

本书的工作成果同时包含了科技前沿技术研究成果和部分产业现状,对国家不同层面和不同领域的专家学者、工程科技管理人才、科研工作者、在校相关专业学生的工作和学习具有较高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

中国电子信息工程科技发展研究: 集成电路产业专题/中国信息与电子工程科技发展战略研究中心著. —北京: 科学出版社, 2019.5

ISBN 978-7-03-060675-4

I. ①中… II. ①中… III. ①集成电路产业-产业发展-研究-中国 IV. ①F426.63

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第038542号

责任编辑: 赵艳春 / 责任校对: 张凤琴

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencecp.com>

北京虎彩文化传播有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年5月第 一 版 开本: A5

2019年5月第一次印刷 印张: 2 1/8

字数: 66 000

定价: 42.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《中国电子信息工程科技发展研究》指导组

组长：

陈左宁 卢锡城

成员：

李天初	段宝岩	赵沁平	柴天佑
陈 杰	陈志杰	丁文华	费爱国
姜会林	刘泽金	谭久彬	吴曼青
余少华	张广军		

国家高端智库



CETIC
中国电科

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

CHINA ELECTRONICS AND INFORMATION STRATEGIES

中国信息与电子工程科技 发展战略研究中心简介

中国工程院是中国工程科学技术界的最高荣誉性、咨询性学术机构，是首批国家高端智库试点建设单位，致力于研究国家经济社会发展和工程科技发展中的重大战略问题，建设在工程科技领域对国家战略决策具有重要影响力的科技智库。当今世界，以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮方兴未艾，信息技术日新月异，全面融入社会生产生活，深刻改变着全球经济格局、政治格局、安全格局，信息与电子工程科技已成为全球创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域之一。为做好电子信息领域工程科技类发展战略研究工作，创新体制机制，整合优势资源，中国工程院、中央网信办、工业和信息化部、中国电子科技集团加强合作，于2015年11月联合成立了中国信息与电子工程科技发展战略研究中心。

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心秉持高层次、开放式、前瞻性的发展导向，围绕电子信息工程科技发展中的全局性、综合性、战略性重要热点课题开展理论研究、应用研究与政策咨询工作，充分发挥中国工程院院士，国家部委、企事业单位和大学院所中各层面专家学者的智力优势，努力在信息与电子工程科技领域建设一流的战略思想库，为国家有关决策提供科学、前瞻和及时的建议。

《中国电子信息工程科技发展研究》

编写说明

当今世界，以数字化、网络化、智能化为特征的信息化浪潮方兴未艾，信息技术日新月异，全面融入社会生产生活，深刻改变着全球经济格局、政治格局、安全格局。电子信息工程科技作为全球创新最活跃、应用最广泛、辐射带动作用最大的科技领域之一，不仅是全球技术创新的竞争高地，也是世界各主要国家推动经济发展、谋求国家竞争优势的重要战略方向。电子信息工程科技是典型的“使能技术”，几乎是所有其他领域技术发展的重要支撑，电子信息工程科技与生物技术、新能源技术、新材料技术等交叉融合，有望引发新一轮科技革命和产业变革，给人类社会发展带来新的机遇。电子信息又是典型的“工程科技”，作为最直接、最现实的工具之一，直接将科学发现、技术创新与产业发展紧密结合，极大地加速了科学技术发展的进程，成为改变世界的重要力量。电子信息工程科技也是新中国成立 70 年来特别是改革开放 40 年来，中国经济社会快速发展的重要驱动力。在可预见的未来，电子信息工程科技的进步和创新仍将是推动人类社会发展的最重要的引擎之一。

中国工程院是国家工程科技界最高荣誉性、咨询性学术机构,把握世界科技发展大势,围绕事关科技创新发展的全局和长远问题,为国家决策提供科学的、前瞻的和及时的建议。履行好国家高端智库职能,是中国工程院的一项重要任务。为此,中国工程院信息与电子学部在陈左宁副院长、卢锡城主任和学部常委会的指导下,第一阶段(2015年年底至2018年6月)由邬江兴、吴曼青两位院士负责,第二阶段(2018年9月至今)由余少华、陆军两位院士负责,组织学部院士,动员各方面专家300余人,参与《中国电子信息工程科技发展研究》综合篇和专题篇(以下简称“蓝皮书”)编撰工作。编撰“蓝皮书”的宗旨是:分析研究电子信息领域年度科技发展情况,综合阐述国内外年度电子信息领域重要突破及标志性成果,为我国科技人员准确把握电子信息领域发展趋势提供参考,为我国制定电子信息科技发展战略提供支撑。

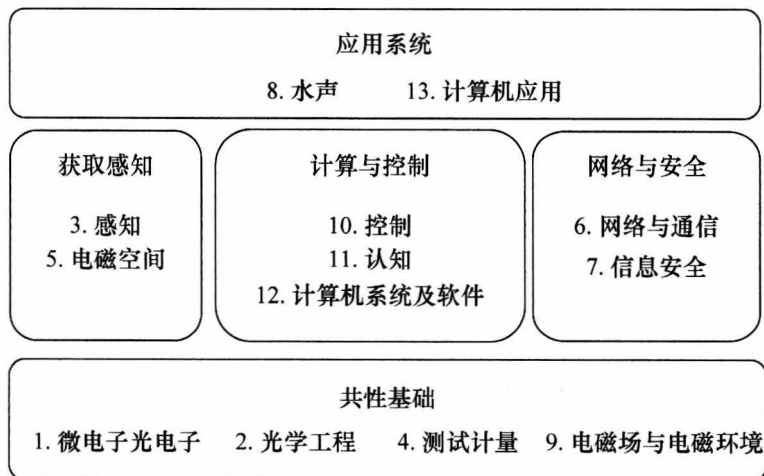
“蓝皮书”编撰的指导原则有以下几条:

(1) 写好年度增量。电子信息工程科技涉及范围宽、发展速度快,综合篇立足“写好年度增量”,即写好新进展、新特点、新趋势。

(2) 精选热点亮点。我国科技发展水平正处于“跟跑”“并跑”“领跑”的三“跑”并存阶段。专题篇力求反映我国该领域发展特点,不片面求全,把关注重点放在发展中的“热点”和“亮点”。

(3) 综合专题结合。该项工作分“综合”和“专题”两部分。综合部分较宏观地讨论电子信息领域科技全球发展态势、我国发展现状和未来展望;专题部分对13个子领域

中热点亮点方向进行具体叙述。



子领域归类图

5 大类和 13 个子领域如上图所示。13 个子领域的颗粒度不尽相同，但各子领域的技术点相关性强，也能较好地与学部专业分组对应。

编撰“蓝皮书”仍在尝试阶段，难免存在很多疏漏，敬请批评指正。

中国信息与电子工程科技发展战略研究中心

2019 年 3 月

前 言

集成电路发明 60 年来,以惊人的速度渗透到我们日常生活的各个方面。现在已经发展成为集成系统,在小小的芯片上集成了信息收集、处理、存储、传输和指令执行等功能。尤其是芯片可以大批量、高可靠地实现低成本制造。如果把当今信息社会比喻为一个人的话,那么集成电路就好比是人体的细胞。

随着技术的发展,先进大生产技术已经可以制备关键尺寸为 7nm 的芯片,5nm、3nm 和 1.5nm 的芯片也已经在实验室演示其功能。集成度已经达到 10^{11} 甚至更高,每个单元的功耗仅 pW 量级甚至更低,这几乎已经到达我们制造工艺和物理极限。未来发展也许不能仅仅以几何尺寸来标定,而应是以性能功耗比以及性能成本比来衡量,这也是后摩尔时代的特征之一。从发展趋势看,摩尔定律终究会终结,进入所谓后摩尔时代。然而技术创新的步伐永远不会停止,这些技术创新包括设计、工艺、器件、材料、封装等形式,将会不断发展。

信息产业是国家战略的重要组成部分,而集成电路产业是其中的核心之一。集成电路产业是同时具备战略性、基础性和先导性的产业,这些特点使我们充分认识到其发展的重要性和紧迫性。我国政府对集成电路产业的重视程度大大提升。近几年来,我国集成电路发展速度加快,平

均增速为全球同期发展增速的两倍多。但是由于我国集成电路产业起步较晚，底子薄弱，导致生态链产业链缺失严重，核心技术匮乏，芯片制造产能不足，与世界先进水平差距明显，追赶的道路仍很漫长。

纵观近两百年来的中华民族，受苦受难，历经沧桑，当今正在走向复兴之路。我们从大国走向强国，必须要越过集成电路这道坎，在发展道路中充满了艰辛和曲折。我们要以集成电路发展为支点，追赶中必须要坚持战略的判断力，路径的预见力，发展的创造力，实施的执行力。这是我国集成电路产业发展并成功赶上世界先进水平的关键，从而为实现“两个一百年”的奋斗目标提供坚实的基础。

目 录

《中国电子信息工程科技发展研究》编写说明

前言

第 1 章 全球发展态势	1
1.1 集成电路产业领先发展国家和地区	2
1.2 产业规模的重要性	6
1.3 全球产业技术发展趋势	8
第 2 章 我国发展现状	12
2.1 集成电路技术与产业已有基础	12
2.2 高速发展的市场和匮乏的制造能力	14
2.3 产业发展面临的主要挑战	16
第 3 章 我国热点亮点	27
第 4 章 创新驱动	32
4.1 商业模式创新	32
4.2 技术创新	36
4.3 研发技术路线创新	39
第 5 章 发展的思考	42
5.1 高端芯片	43
5.2 成熟芯片	44
5.3 装备和材料	45
5.4 追赶发展中的政策期望	47
第 6 章 我国未来展望	49
第 7 章 总结和致谢	51
参考文献	53

第 1 章 全球发展态势

著名流体力学专家冯·卡门认为“科学家发现现存世界，工程师创造未来世界”。集成电路(integrated circuit, IC)是一门微纳电子工程技术科学，既与科学家的基础研究有关，更是工程师工程创新的产物。整个集成电路工程精细而庞大，从硅的提炼($<10^{-9}$ 杂质)，晶片制备，芯片设计、制造(纳米精度)，封装测试一直到系统架构整合；生态链极长、涉及领域极宽。集成电路的产业水平，集中体现了一个国家的综合工业水平。

信息产业是国家战略的重要组成部分，而集成电路产业处于核心层，是支撑信息产业发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业^[1]。其产业的三大特性主要体现在以下三个事实：①我国近几年每年集成电路进口额巨大，2017年 2601 亿美元，2018年 3120.58 亿美元，远高于原油或其他战略物资进口总额；②产业的发展高度依赖于材料、机械(装备)、电子和软件等基础工业的支撑；③尖端的先导技术研发成果通常在这些产业中首先得应用并引导其他产业的发展方向。芯片的重要性如同第一、二次工业革命中的蒸汽机和内燃机。无论是日常生活的手机、电脑，还是企业应用的数据中心、工业机器人，乃至国防安全都离不开芯片。

从技术发展角度，集成电路技术发展大约每 10 年就有一个技术代飞跃。这种技术跨越发展相当程度上依赖于芯片

制造中的光刻工艺技术。例如 20 世纪 80 年代发展的 365nm 波长(i 线)光刻技术支撑了芯片进入亚微米时代。90 年代的 248nm 波长(KrF)光刻技术推动了芯片进入深亚微米芯片时代。21 世纪初的 193nm 波长(ArF)光刻技术提供了纳米芯片(90nm 以下技术代)发展的基础。目前依靠 193nm 波长的光源,通过各种先进光刻技术,例如浸没式、反向计算光学和多重曝光等,可以在大生产中支持最小至 7nm 技术代的芯片制造。可以预料,目前如日中天的 13.5nm 波长(极紫外 EUV)光刻技术,一定是芯片制造进入 5nm 以下技术代的技术基础。先进芯片制造工艺的发展,为功能繁多的产品发展提供了制造基础。以 Intel 的 CPU 为例,目前一个多核芯片系统集成了 10^9 以上的晶体管。预计在 10nm 技术节点的 CPU 芯片将集成超过 2560 亿个晶体管。越来越复杂的系统给集成电路设计行业提出了一系列的严峻的挑战和难得的机遇,尤其是 SoC 和 IP 核的发展将是设计领域未来热点之一。可以预料全球设计产业将在今后几年有大幅度的发展,在整个产业链的比重也许可达一半以上^[2]。

1.1 集成电路产业领先发展国家和地区

集成电路产业是当前国际政治、经济竞争的重要砝码,也是国际化竞争最激烈、全球资源流动和配置最为彻底的产业之一。全球的微电子和集成电路发展水平较高的国家和地区主要集中在美国、欧洲、日本、韩国和中国台湾地区^[2]。

其中美国是集成电路技术的摇篮和产业的发源地。美国从 20 世纪 50 年代末 Jack S. Kilby 在德州仪器(TI)发明了

第一块锗材料的集成电路样品后,经历了60多年的持续发展,无论从技术还是规模方面一直处于引领地位。产业早期在美国政府和军方的订单支持下快速成长。产业结构在市场驱动下不断优化,例如以英特尔(Intel)、美光(Micron)、德州仪器等为代表的集成器件制造(integrated device manufacturer, IDM)模式,以苹果为代表的虚拟IDM,即制造依靠代工企业,封测依靠封装企业的商业模式。美国的产业规模在发展过程中,20世纪80年代一度被日本超越。但美国迅速成立了美国半导体行业协会,组建半导体技术产业联盟(SEMATECH)和国家半导体咨询委员会,时任美国总统乔治·布什听取了国家半导体咨询委员会的建言“危机中的战略工业”,采用了一系列的推动措施,用了5年时间重新回到产业霸主地位^[3,4]。现在美国的产业规模约占全球的48%,全球较大的10家供应商中美国占4家(Intel、高通、美光和德州仪器)。Fabless的前10大厂商中美国有6家(高通、苹果、英伟达、AMD、马威尔和赛灵思)。美国主导了全球集成电路产业发展,并正在实施新的国家战略来确保其半导体领导地位。

欧洲集成电路产业发展基于模拟电路和功率器件等产品。自20世纪80年代末起,集成电路制造企业从整机厂陆续分离出来,例如从西门子独立出来的英飞凌,从飞利浦独立出来的恩智浦(NXP)。而早些时候,意法半导体(ST)则是1987年意大利和法国两家公司合并而成。欧洲的基础研究和人才培养有良好的基础,有力地支持了产业快速发展。比利时的IMEC公司为全球较成功的产学研联合研发机构之一,他们宣称已经发展到3nm技术代工艺,研究进

入 1.5nm 技术代。英国的 ARM 处理器为世界较大的设计 IP 核企业之一，其产品垄断性地渗透到几乎所有的移动通信类处理器。荷兰的光刻机厂商 ASML 份额超过日本的尼康和佳能，成长为世界光刻机的垄断企业。欧洲的集成电路产业规模约占世界总量的 1/10^[5]。

日本的集成电路发展从 20 世纪 60 年代开始，发展的技术路线主要采用“引进、吸收、赶超”的策略。大规模的生产技术最初是 NEC 从美国仙童引进，在政府协调下技术授权分享给其他三家日本公司，通过产学研合作，实施了超大规模集成电路 (VLSI) 共同组合技术创新行动项目，大幅度提升了日本集成电路制造水平，摆脱了对美国的进口依赖。经过十多年的努力，到 80 年代，日本在存储器领域全面赶超美国。NEC、东芝和日立在后来的十年一直盘踞世界前三的位置。1989 年达到鼎盛时期，日本的集成电路产品全球市场占有率高达 53%，高于美国的 37%。到 90 年代中期美国乔治·布什政府开始从移动通信和笔记本电脑等新兴领域发力，开始重回世界第一的位置。反观日本，产品单一，起支柱作用的 DRAM 又被韩国超越，到 2012 年，仅剩的存储器技术领先企业尔必达(ELPIDA)又被国外收购。到 2016 年，日本集成电路产业规模占全球市场的比例降至 11%。虽然比例下降，但是日本的产业技术和相应的话语权仍然很大。日本的集成电路特色产品(NAND Flash 和 CIS)、芯片制造装备和集成电路材料等产品依然在上占有重要位置，尤其是材料(硅片和光刻胶等)，全球大约有近一半以上的集成电路材料是日本制造的^[6]。

韩国是集成电路产业大国，其产值约占韩国 GDP 的 5%。

韩国的集成电路产业起源于1966年，摩托罗拉和仙童等公司在韩国投资建立了封装厂，而后日本东芝等企业在韩国也开始投资建厂，从而奠定了韩国的集成电路发展基础。1973年韩国政府建立了高级科学技术委员会，策划推动韩国的集成电路产业发展，建立了韩国高级技术研究院(KAIST)和电子技术研究所(KIST)等集成电路研发机构。以国家研究机构 KAIST 和 KIST 为中心，三星、现代、LG 等大企业集团参加组成半导体研发组织，政府制定了一系列的高科技促进计划以及产业配套政策。到70年代末，韩国已经初步具备了超大规模集成电路生产能力。从1981年开始，三星等企业开始为IBM和Intel等代工DRAM芯片。1995年率先制造出256Mbit的DRAM产品，标志着其技术水平开始超过美国和日本。截至2016年，韩国产业规模占全球市场的17%左右，全球排名仅次于美国，位列第二^[7]。

中国台湾地区的集成电路产业发展主要起源于代工模式的建立。1974年台湾成立了工研院的电子研究所，开始组织人力、物力和财力发展自己的集成电路技术，选派了37名工程师到技术领先国进行为期一年的技术培训。1978年开始掌握CMOS的制造技术，第二年开始向企业转移其制造技术。在台湾当局和产业界的支持下，先后成立了台联电(UMC)和台积电(TSMC)。20世纪80年代中期，启动了委托加工的代工模式。经过30多年的发展，成为全球大规模的集成电路代工基地，其中台积电已经成为世界技术先进、规模最大的代工企业。为了迅速发展规模，占领中国大陆市场，台积电和台联电先后在大陆建立生产线。在制造企业的支撑下，台湾的设计和封测也发展迅速。在全

球十大芯片代工和封测企业中，中国台湾地区各占四席^[8]。

综上所述，集成电路产业较发达的美国、欧洲、日本、韩国和中国台湾地区，都是全球的开放、技术和资金合作发展的范例。政府在其发展中发挥了重要推动作用，细数每一个在集成电路产业有所作为的国家和地区，无一例外地成就于政府宏观的规划布局、财税政策和人才培育，以及微观精准的资金扶持。其中美国的领先地位得益于长年积累的宽厚的基础研究成果和充裕的资金支持。同时开放式的人才流动给美国输送了大量的技术和管理人才。而韩国以政府主导积极扶持三星、现代和 LG 以 DRAM 为突破口，逐渐取代日本成为 DRAM 领域的领导者。中国台湾则是在当局扶持下，出台集成电路产业财税扶持政策，以台湾工研院为发端，突破产业局限，创造性地发展代工模式，形成了集成电路产业新生态。

1.2 产业规模的重要性

自从集成电路发展 60 年来，基本上一直遵循摩尔定律，即每 18 个月晶体管的密度增加一倍。隐含的意思就是每个晶体管的价格只降不升，从而市场可以接受技术发展带来的红利。摩尔定律的实现使得晶体管的价格从 60 年前的一美元买几个晶体管降至一美元可以买二千多万个晶体管。然而，当技术发展至 28nm 技术节点以后，单个晶体管的价格无法继续下降，导致了市场对高端芯片的追逐渐渐形成高度垄断的寡头游戏，技术发展节奏开始减缓，无法持续每代新技术性能提升 40% 功耗下降 50%，这标志着产业技术发