



王阳元,中国科学院院士,北京大学教授,主要研究方向微电子新器件、新工艺和新结构电路等

发展中国集成电路产业的“中国梦”

王阳元

北京大学微纳电子学研究院,北京 100871

摘要 集成电路和集成微系统已成为信息社会发展的基石。简述了集成电路的发明过程,分析了集成电路战略性和市场性的双重特性,总结了集成电路 60 年发展的规律,指出中国集成电路产业发展正处于“天时、地利、人和”的难得机遇期,处理好人才、资本、技术、市场、机制的相互关系,以相对优势解决“卡脖子”问题,中国集成电路科学技术和产业就有望大踏步前进。

关键词 集成电路;后摩尔时代;技术创新

2016年4月19日,习近平总书记在网络安全和信息化工作座谈会上指出:“如果核心元器件严重依赖外国,供应链的‘命门’掌握在别人手里,那就好比在别人的墙基上砌房子,再大再漂亮也可能经不起风雨,甚至会不堪一击。”集成电路和在其上运行的软件正是建设信息社会的“墙基”,是推动经济发展的驱动器,是国家信息安全的重要保障。

1 集成电路的本质和基本特征

集成电路具有信息的获取、处理、存储、传输和执行功能,可以大批量、高性能/价格比地生产,其应用如水银泄地般无孔不入,涵盖了政治、经济、文化、军事、

科技等各个领域,已经成为各个信息系统的组成细胞,这便是集成电路的生命所在。

“核武库”的战略性体现在其威慑力,但其系统数量一般在 10^3 左右。而集成电路则具有战略性与市场性的双重特性,其战略性以市场性的方式得以具体体现,若 10^{11} 产量的集成电路不能在整机系统应用,不仅集成电路生产线不能正常运转,其战略性亦得不到充分显现(图1)。也就是说,制造集成电路产品,关乎其“产业链”的建设,而集成电路的应用和市场开拓则关乎其“生态链”的构成和不断拓展。因此掌握好战略性和市场性的基本特点是发展集成电路产业及其重要的问题。

集成电路与软件已经成为推动国家经济高质量发展的驱动器。据美国能效经济委员会(ACEEE)2009

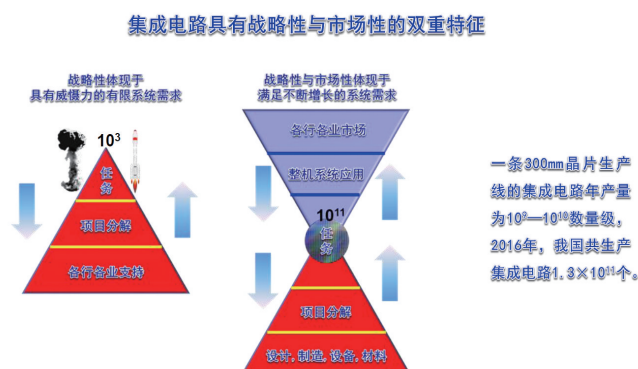


图1 集成电路具有战略性与市场性的双重特性

年发表的报告测算,2006年,美国整个半导体技术的应用节约了大概7750 kW·h的能源(约相当于三峡水电站年发电量的9倍),随着各种各样的政策和措施激励半导体节能技术投入的增加,预计到2030年,美国经济增长量与2008年相比将超过70%,但耗电量却减少11%。

集成电路和软件还是国家信息安全的守卫者。据统计,2012年中国1420万台主机被境外监控,涉及5亿网民以及金融、交通、能源等多个部门。此外,美国国家安全局还通过监听微软、谷歌、雅虎等9家网络公司,能够截获包括电子邮件、聊天日志等任何通信数据,全面监控特定目标及其联系人的一举一动。如果信息安全的钥匙控制在他人手中,后果将不堪设想。为此,必须加强中国具有自主知识产权的软、硬件研发,堵住一切可能产生的漏洞,方能在各系统中不受国外“入侵者”的任何袭击。

可喜的是,国内在这方面的研发已经取得部分成果,清华大学魏少军、刘雷波团队的“CPU硬件安全动态检测管控技术”,入选2018世界互联网大会15项全球领先科技成果,并应用于联想集团、长城集团和新华集团的商用服务器;北京大学黄如院士团队的低功耗多栅新结构器件和隧穿场效应晶体管(TFET)超低功耗器件都已在中芯国际集成电路制造有限公司进行产业化,而对纳米级器件可靠性模型和测试方法已嵌入Cadence的EDA软件中,并注明“北京大学”的知识产权;中微半导体设备(上海)有限公司尹志尧团队经过十几年潜心研发,相关刻蚀机产品已进入国际市场。

2 集成电路的发明

集成电路的发明者之一——Kilby 于1949和1950

年分别在 Illinois 和 Wisconsin 获得学士和硕士学位,随后在 Globe-Union 公司的 Centralab 部门负责小型化研究。

1954年,Bell实验室发明了硅晶体管,TI公司获得了授权,而Centralab没有获得该授权,Kilby希望从事前沿性的创新工作,于1954年5月转入TI公司仍然负责电子装备小型化工作。

当时小型化工作有3条途径:(1)沿着传统的微型化模块的工作方式继续缩小;(2)当时 NASA 支持的薄膜技术;(3)空军支持的“分子电子学”工作。

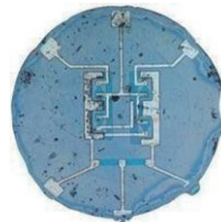
Kilby 分析后认为,继续沿着传统的微型化模块工作,不可能降低成本,没有出路。而“薄膜技术”和“分子电子学”距离实践还太遥远,将主动元件和被动元件都“集成”在一块半导体上,采用全新的工艺才有出路,这就是集成电路发明的思路。

1958年9月12日,Kilby进行了集成电路相移振荡器演示(图2(a)),1959年5月6日申请了《Miniaturized self-contained circuit modules and method offabrication》专利,在1964年6月23日获得批准,专利号为3138744。

1959年7月30日,仙童公司的Noyce发明了平面工艺集成电路(图2(b)),并申请了《Semiconductor device-and-lead structure》专利,1961年4月25日获得批准,专利号为2981877。平面工艺更适合于大生产。



(a) 第一块集成电路



(b) 平面工艺集成电路

图2 Kilby 和 Noyce 发明的集成电路

TI公司与仙童公司为集成电路发明权争论不休,最后两家均获得认可。可惜的是,Kilby因发明集成电路获得2000年度诺贝尔物理学奖时,Noyce已经去世,与诺贝尔奖失之交臂。

Kilby 申请的集成电路专利仅由1个晶体管和4个元件组成,而到2015年,由于在1 cm²大小的芯片上可以集成数十亿个晶体管,加之信息产品市场的急剧扩大,全球人均拥有1500亿只晶体管(图3)。



图3 全球晶体管总用量

(图片来源:《Industry Strategy Symposium 2012》)

3 集成电路发展60年的历史是一部技术创新的文明史

集成电路发展的历史是一部技术创新的文明史。图4所示为集成电路发展过程中的主要发明及其发明者,华人有CMOS结构的首批制造参与者萨支唐、

NVSM Flash概念的提出者施敏和FinFET的发明人胡正明。

集成电路的每项重要发明都在改变人类的生产方式和生活方式(图5):图像传感器的发明产生了电视和数码相机;非易失性存储器的发明颠覆了传统的胶片产业;微处理器和动态随机存取存储器(dynamic random access memory, DRAM)的发明开创了计算机的新时代;微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)的发明使可穿戴设备成为生活的时尚;高级驾驶辅助系统(advanced driver assistance system, ADAS)使得无人驾驶汽车离人们不再遥远;全自动港口彻底解放了沉重的体力劳动;一部手机可以观看视频,可以瞬间传送书信,可以替代有线电话,可以玩游戏,可以时时知悉全世界的实时新闻,成为了人手一部的移动信息终端。

集成电路整个技术进步来源于不断增长的市场需要,包括图像信息、声音信息、传输信息、处理信息的能力等(图6)。而对电子设备更加轻便、功能更多、功耗更低、容量更大、处理速度更快、图像显示更加清晰等需求,对集成电路提出了更新、更强的挑战。

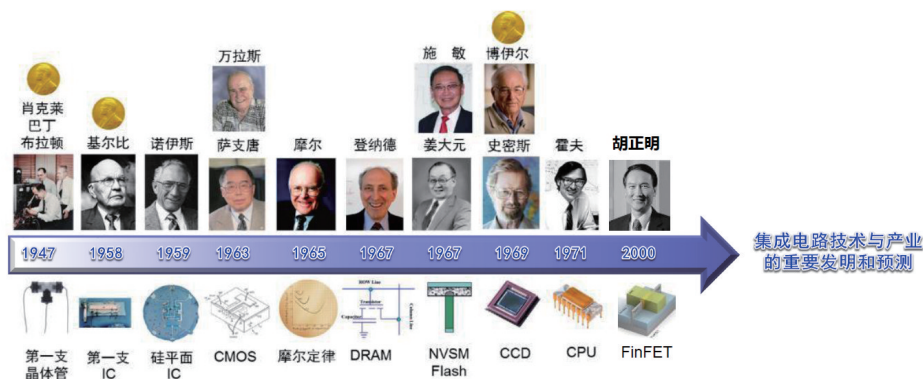


图4 集成电路技术与产业的重要发明和预测

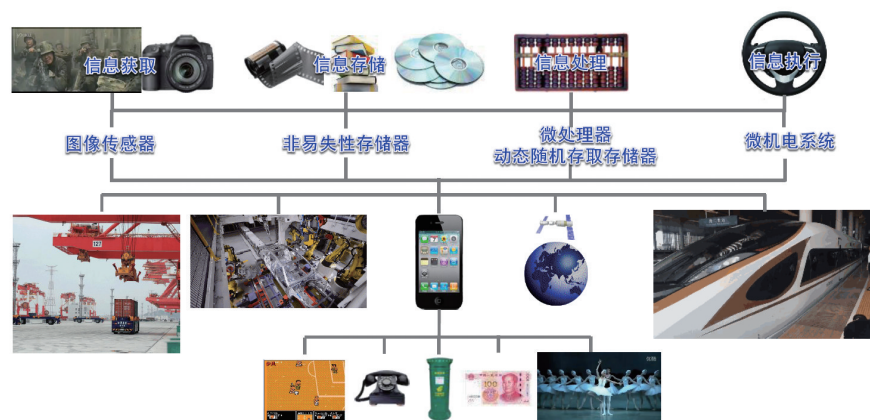


图5 集成电路改变人类的生产方式和生活方式



图6 集成电路的技术进步源于不断增长的市场需求

图7显示了集成电路复杂度的提高源于技术创新和产业结构的不断进步。最早的硅片直径为1英寸,其后,集成电路生产的主流硅片直径逐渐增加,1992年达到200 mm(8英寸),2002年起开始使用300 mm(12英寸)的硅片。从产业结构看,最早生产集成电路的是系统厂商,后来集成器件制造商(IDM)从系统厂商中分离,成为独立的集成电路生产商;其后,设计部分的分离形成了独立的无生产线企业(fabless)、制造部分的分离形成了独立的代工企业(foundry)。而等离子刻蚀、铜互连、浸没式光刻等技术创新则使CPU上晶体管数量每两年翻一番,印证了摩尔定律的预测。

研究事物发展规律是科学研究的使命。发现规律

并按规律办事,就会减少盲目决策,节省资源,少走弯路;反之,违背规律、急于求成,就会重蹈失败覆辙,浪费资源,事倍功半。在集成电路60年的发展过程中,除了众所周知的“摩尔定律”外,还存在如下规律性的发展特征。

1) 集成电路产业的发展必须保证资金的密集投入和持续投入。1970—2015年,集成电路工厂的建设投资平均每5年增长1.5倍;从180 nm工艺到14 nm工艺,集成电路工艺研发的成本平均每个技术节点是上一节点的1.5倍。自2000年起至今,世界集成电路前三强企业(英特尔公司、三星公司、台积电公司)平均每年的资本支出为100亿美元(含研发及设备折旧费用),其投资

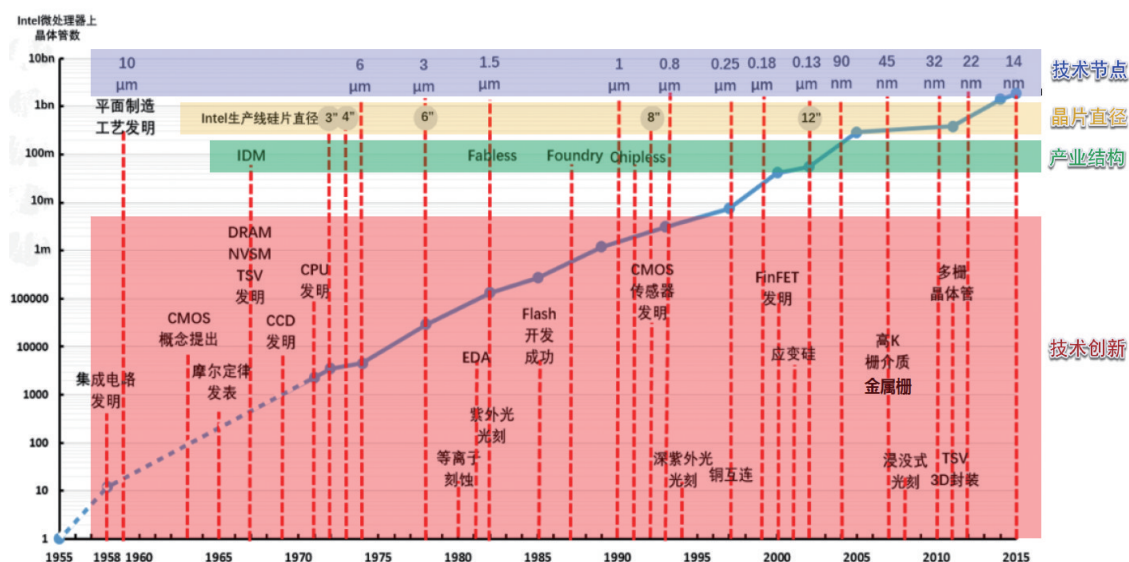


图7 集成电路技术和产业发展里程碑

强度相当于一个航母战斗群(包括航空母舰及配套数量的巡洋舰、护卫舰、驱逐舰、补给舰、核潜艇、舰载机)的造价。图8表明,由于集成电路市场的波动性,恰恰应在市场低谷期更要加强研发的投入。为此,集成电路产业的投入须集中资源,且不能急求回报。

2) 集成电路从研发到批量生产约需 10 年的时

间。由图8可以看出,集成电路产业形成、CPU、DRAM、Flash、FinFET乃至中国第二代居民身份证IC卡从研发到量产莫不如此。为此,要产生必要的技术积累,必须提前10年进行基础研究的部署工作。

3) 集成电路技术约每 10 年取得一代技术进步(图9)。

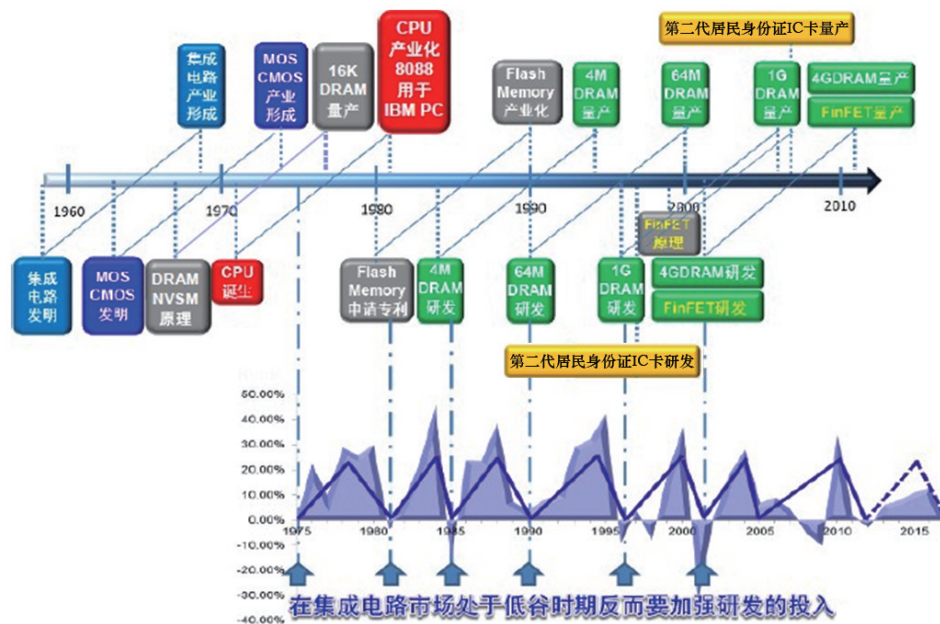


图8 集成电路 10 年量产规律

	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代	第六代
时间	1965—1975	1975—1985	1985—1995	1995—2005	2005—2015	2015—2025
主流光刻技术光源	汞灯	g线	i线	KrF	ArF	EUV, EPL
光源波长/nm	多波长	436	365	248	193 Immersion DPT	13.5
特征尺寸/ μm	12~3	3~1	1~0.35	0.35~0.065	0.065~0.022	0.022~0.007
存储器/Bit	$\leq 1\text{K} \sim 16\text{K}$	16K~1M	1M~64M	64M~1G	1G~16G (芯片组)	16G~ $\geq 1\text{T}$ (芯片组)
Intel CPU产品	4004~8080	8086~286	386~486	Pentium (奔腾)	Core (酷睿)	
CPU字长/位	4~8	8~16	16~32	32~64	64	
CPU 晶体管数	10^3	$10^4 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^6$	$10^6 \sim 10^7$	$10^8 \sim 10^9$ 多核架构	多核架构
CPU时钟频率/MHz	$10^{-1} \sim 10^0$	$10^0 \sim 10^1$	$10^1 \sim 10^2$	$10^2 \sim 10^3$	非主频标准	非主频标准
Wafer直径/英寸	2~4	4~6	6~8	8~12	8~12	8~16
主流设计工具	手工	LE~P&R	P&R~Synthesis	Synthesis~DFM	SoC, IP	SoC, IP, SiP
主要封装形式	TO~DIP	DIP	DIP~QFP	DIP, QFP, BGA	多种封装, SiP	SiP, 3D

图9 集成电路 10 年一代技术进步

4) 集成电路产品驱动电子系统约每 10 年进行一次更新换代。从最早的大中型计算机时代,到PC时代、移动通信时代、泛网时代,到目前的新一代信息技术时代,电子系统在集成电路产品的推动下约每 10 年进行一次更新迭代(图10)。而以大数据、云计算、量子计

算、人工智能、生物识别、物联网及无人驾驶汽车等为代表的新一代信息技术会持续发展 to 21 世纪三四十年代,甚至更长一段时间。这同时表明电子系统的创新是拉动集成电路技术创新的强劲动力。

当今,集成电路科学与技术的发展已经进入后摩

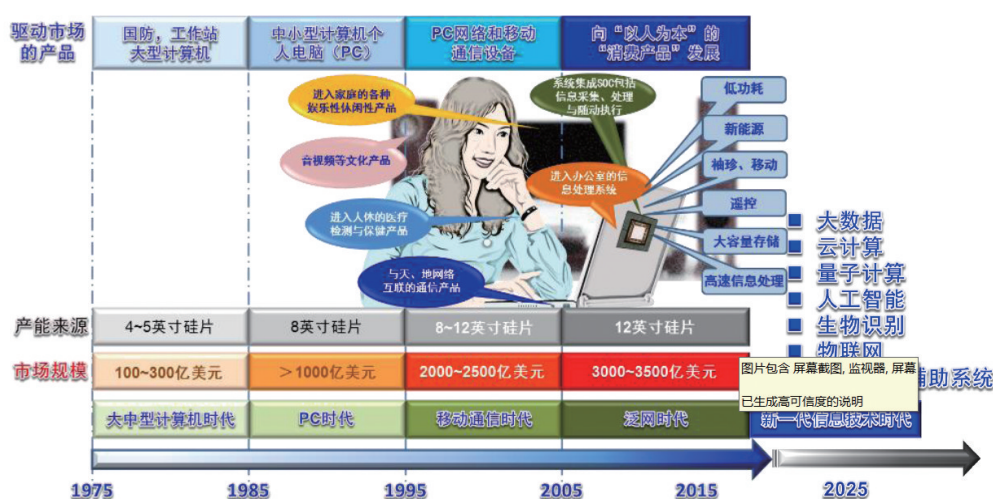


图 10 集成电路产品驱动电子系统约每 10 年进行一次更新换代

尔时代(图 11),其主要发展方向如下。

1) 沿着继续缩小加工尺寸 (scaling down) 的方向迈进 (more Moore, 延续摩尔)。目前量产产品的最小加工尺寸已达到 7nm, 产品表现为系统芯片 (system on chip, SoC), 非量产产品加工尺寸的研究成果已达到 3 nm。

2) 将模拟电路、射频电路、传感器、高压器件、功率器件等与逻辑电路通过封装形式完成集成, 使集成电路具备更多、更广的功能 (more than Moore, 拓展摩尔)。产品形式为系统封装 (system in package, SiP)。

3) 以全新材料、全新工艺制作的量子器件、自旋器件、单电子器件、磁通量器件、石墨烯器件、碳纳米管、

纳米线来结构和演绎全新的集成电路 (beyond Moore, 超越摩尔)。

4) 未来, 随着物理、数学、化学、生物学等领域新的发现和技术突破, 有可能建立全新形态的信息科学技术及其产业 (much Moore, 丰富摩尔)。未来集成电路产业和科学技术发展的驱动力是降低功耗, 而不仅以提高集成度 (减小特征尺寸) 为节点, 即以性能/功耗/成本比为标尺。然而遗憾的是, 至今仍未能将此理论认识数据化成为一条曲线, 如果能将其数据化, 哪怕在某个领域数据化为一个规律的话, 将被更多的人所接受。

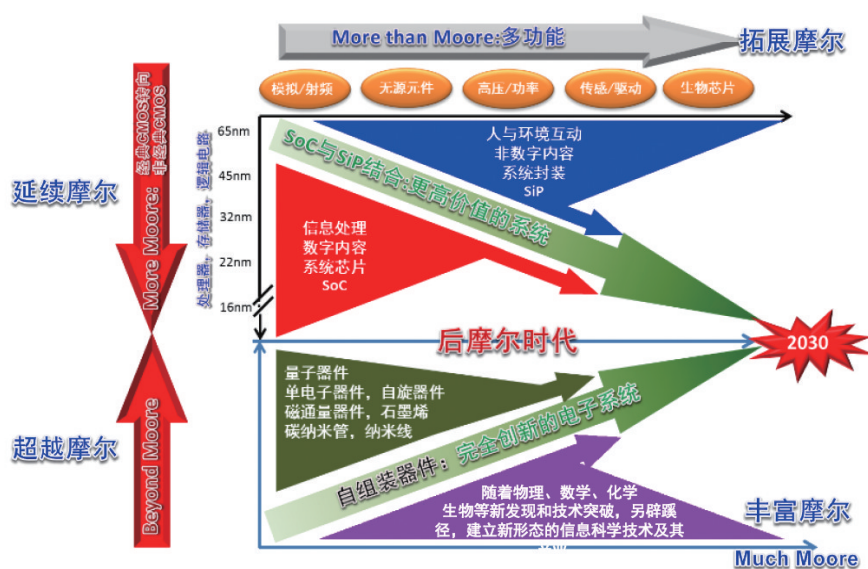


图 11 集成电路发展进入后摩尔时代

4 抓住历史交汇期, 发展中国集成电路科学技术和产业

图 12 显示了中国集成电路产业的发展概况。20 世纪 60 年代中期至 20 世纪末, 由于没有掌握好集成电路产业发展的基本规律以及对其战略性、市场性的双重特性认识不足, 中国集成电路产业一直发展迟缓。1981 年, 中国集成电路全行业销售额只有 1 亿元人民币。1983 年起, 虽然实施了无锡微电子工程、“908 工程”和“909 工程”(即中国在 20 世纪 90 年代发展微电子

产业的第八、九个五年计划), 但由于计划经济体制的制约, 审批繁复, 投资单一, 待工程完工、产品投产时, 其产品市场窗口已然关闭。为此, 到 1999 年, 虽然全行业销售额增加到 79.5 亿元人民币, 但仅占当时世界市场的 1%。进入 21 世纪初, 以中芯国际建设为重要标志, 中国集成电路产业进入规范发展阶段。党的十八大以来, 在党中央的决策和领导下, 中国集成电路产业开始进入高速发展时期, 部分企业进入了世界排名前十, 部分产品和设备打入了国际市场。

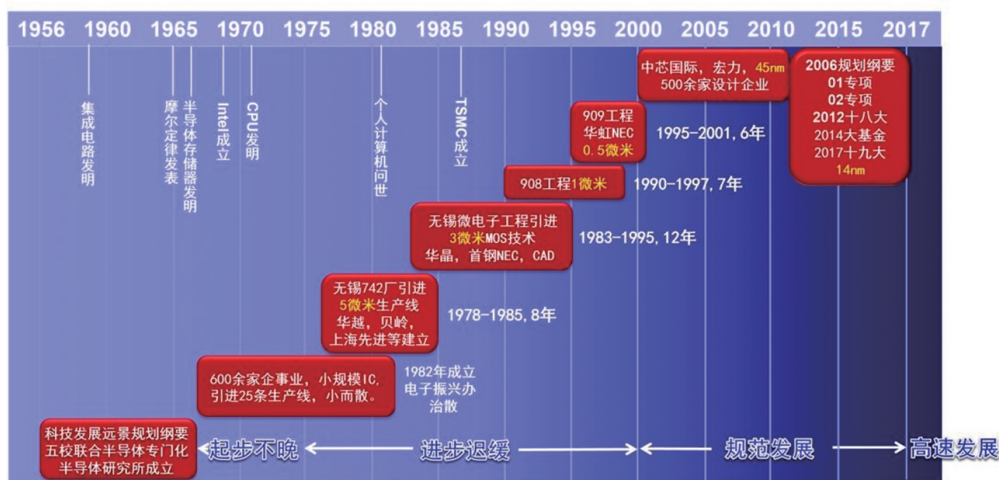


图 12 中国集成电路产业的发展

在中国集成电路产业进入了高速发展阶段的今天, 充分利用天时、地利、人和的有利条件和比较优势。

4.1 天时

中国正处于“两个 100 年”奋斗目标的历史性交汇期, 也是工业社会和信息社会融合的历史性交汇期。2018 年 5 月 28 日, 习近平总书记在两院院士大会上强调: “我们必须清醒认识到, 有的历史交汇期可能产生同频共振, 有的历史交汇期也可能擦肩而过。”希望以集成电路和软件为支撑点的信息产业, 能够与这一历史性交汇期产生同频共振, 以信息产业的创新, 作为基石, 铺设中华民族的伟大复兴之路。

图 13 绘出了中国经济近 200 年的马鞍型变化。1820 年, 中国占世界 GDP 总量的 1/3, 预测未来在没有发生全面战争及全球经济危机的情况下, 2035 年左右中国的经济总量将会超过美国, 成为世界第一大经济体, 但人均 GDP 仍只有美国的 1/5~1/4; 到第二个百年目标实现时, 中国的经济总量将占世界 GDP 的 30%。

4.2 地利

中国倡议的“一带一路”, 成果惠及世界。2018 年 8 月中国已经与 103 个国家和国际组织共同签署了“一带一路”方面的合作协议; 2018 年 9 月中国与拉丁美洲 9 个国家签署了“一带一路”合作协议。

中国集成电路市场规模世界第一。据 2017 年统计数据, 中国半导体市场占世界半导体市场总额的 56%, 其中存储器、微处理器等重要器件在集成电路市场分布中占了比较大的份额(图 14)。巨大的市场需求为中国集成电路产业提供了大有可为的舞台。

4.3 人和

习近平总书记曾指出: “当今世界的综合国力竞争, 说到底还是人才竞争, 人才越来越成为推动经济社会发展的战略性资源, 教育的基础性、先导性、全局性地位和作用更加突显, ‘两个一百年’奋斗目标的实现、中华民族伟大复兴中国梦的实现, 归根到底靠人才、靠教育。”

2020 年, 中国集成电路产业需要技术人员 72 万人,

在信息社会的发展中实现中华民族伟大复兴

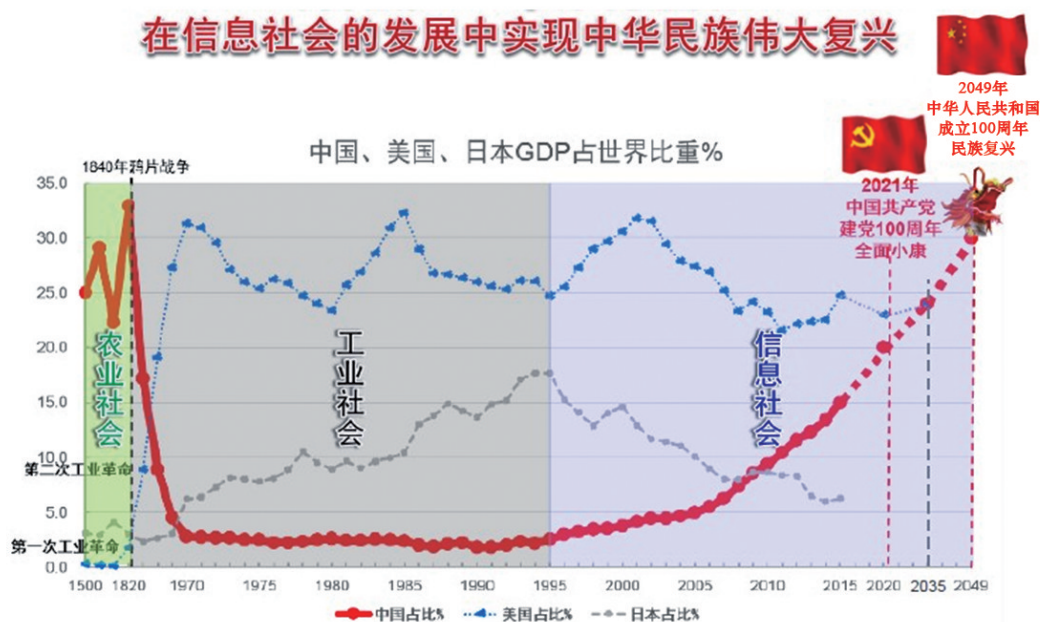


图 13 中国经济 200 年的马鞍型变化

(根据《世界经济千年史》、国家统计局、联合国统计司、世界银行、IMF 数据及预测整理)

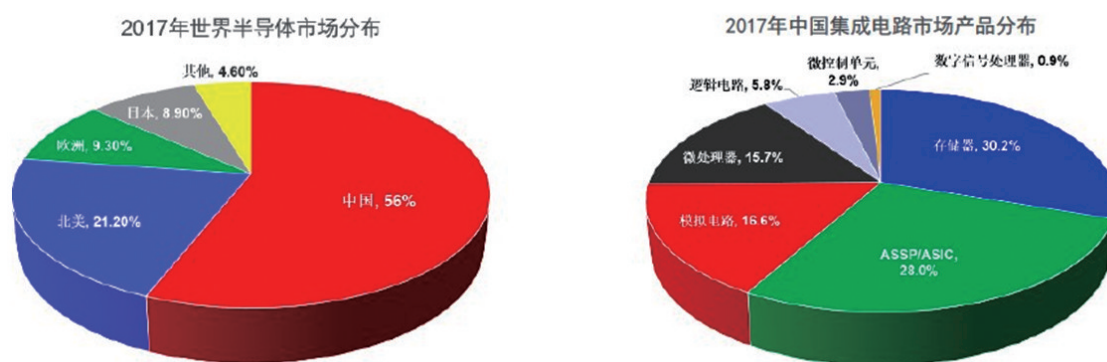


图 14 2017 年世界半导体市场分布(数据来源:WSTS、赛迪顾问)

目前中国集成电路技术人才存量 40 万人,缺口 32 万人;预计 2030—2035 年中国集成电路产业人才差额为 30 万~50 万人,而“十三五”期间培养的人才只有 7.5 万人,缺口甚大。为此,培养集成电路人才的任务应立即提到集成电路产业发展的议事日程上来。建议将“集成电路科学技术与工程”设立为一级学科,扩大其招生名额,同时在加强与产业结合的基础上,对教育体系、教材、课程设置、教学方法进行一系列深化改革,出台有利于引进人才、留住人才和培育人才的相关举措。

针对国外的技术封锁、专利垄断和市场围剿,当前必须解决以下“卡脖子”问题,包括:硬件(中央处理器、图形处理器、存储器、模拟电路);软件(桌面操作系统、移动操作系统,EDA 工具);制造技术,关键专用设备及

专用材料。

解决的途径建议如下:(1)集中人才、资金、政策相对优势,加强产学研结合,建立产研联盟;(2)防散治乱,切忌一拥而上,聚集资源,决战市场;(3)技术积累,重在创新,加强基础研究,加速科研成果向市场转化;(4)构建创新的人才体制机制,聚天下英才而用之;(5)集成电路产业是国际性产业,要加强国际合作,充分利用国际资源。

5 展望

1) 希望到 2021 年,中国集成电路产业能够达成如下目标:创建一批明星企业,培育一批明星企业家;提

高专用设备、300 nm 晶片和专用材料的市场占有率；加强 CPU、存储器和 FPGA 等高端产品的创新能力；涉及国家安全的关键集成电路产品，自给率达 70%；在具有中国特色的集成电路研发体系和培育人才体制机制上有所创新；大生产技术水平与世界先进水平相差一个技术节点；新器件结构、材料、工艺的领域出现更多的创新成果，最重要的是在应用中完善与发展。

2) 在此基础上，经过 15 年左右的努力，中国集成电路产业规模应达到世界三分天下有其一，产业链中各环节均有位列世界前三的明星企业，原始创新能够从点滴汇聚成泉涌之势，人才储备力量充实，产业的市

场、资金、技术、人才能够形成互相支撑的良性循环。

3) 在此基础上，再经过 15 年，在达到第二个百年目标前后，设想硅基集成电路会继续沿着提高性能/功耗/成本方向发展，新材料、新结构器件、新电路形态的创新会不断涌现，集成电路向多领域的渗透和交叉作用越来越强，越来越深。集成电路产业将为中国自立于世界民族之林做出卓越的贡献。

致谢：王永文研究员在本文成文过程中提供了诸多帮助。

(责任编辑 刘志远)