



王阳元,微纳电子学家,中国科学院院士。现任北京大学教授,北京大学微纳电子学研究院首席科学家,IEEE Life Fellow, IEE Fellow,工业和信息化部电子科学技术委员会顾问,国家集成电路产业发展咨询委员会副主任。研究方向为微纳电子学的新器件、新工艺技术和新结构电路。

掌握规律,创新驱动,扎实推进中国集成电路产业发展

王阳元

北京大学微纳电子学研究院,北京 100871

摘要 论述了集成电路产业的战略特征,总结了集成电路投资、技术和市场的发展规律,回顾了中国集成电路产业的发展历程,分析了中国集成电路产业的现状、产业能力和产业短板,给出了今后集成电路基础研究和生产技术的发展方向,指出并强调了创新是发展之源,提出了2035年中国集成电路产业的发展目标和在政策、投资、人才等领域的相应举措。

关键词 集成电路;集成电路产业;基础研究

2020年10月29日,中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议通过了《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》,提出:“加强基础研究、注重原始创新,优化学科布局和研发布局,推进学科交叉融合,完善共性基础技术供给体系。瞄准人工智

能、量子信息、集成电路、生命健康、脑科学、生物育种、空天科技、深地深海等前沿领域,实施一批具有前瞻性、战略性的国家重大科技项目。”其中所列八大领域均与集成电路的研发、生产以及应用密切相关。

当前,中国集成电路产业的发展正处于机遇与

收稿日期:2020-12-22;修回日期:2021-01-27

引用格式:王阳元. 掌握规律,创新驱动,扎实推进中国集成电路产业发展 [J]. 科技导报, 2021, 39(3): 31-51; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.

2021.03.002

挑战既同在又都有新变化的历史时期,如何抓住机遇、应对挑战,首先要清晰地认识集成电路科学、技术和产业的发展规律,才能有效地利用和配置人、财、物等各种资源,使其产生最大价值,在满足市场需求和国际竞争的博弈中沿着正确的道路高速发展。

世间万物发展皆有规律,循规者兴,罔规者怠,违规者诫,逆规者亡。社会发展与技术进步,莫不如是。对未知事物需要探寻或预测其规律,对已知事物需要总结并践行其规律。

1 集成电路产业的规律性研究

1958年发明的集成电路,迄今已逾甲子。在这60余年的发展轨迹中,集成电路技术及其产业显现出如下特点和发展规律。

1.1 集成电路产业具有战略性和市场性的特征

当今世界正处于“百年未有之大变局”时代,在重塑信息时代的世界格局中,集成电路扮演了举足轻重的角色。关键的、核心的集成电路可以成就一个新兴企业乃至一个产业,也可以让这个企业或产业的前进脚步突然停止。华为的“麒麟”和相关5G产品与美国的较量即是一例。图1表明,两弹的战略性感体现于“有限需求”,其“市场”应用的可能性甚微;而集成电路的战略性感恰恰体现于“市场”,即产品生态链建设的深度与广度。集成电路的生态链越深(即电子信息产品对其他产业的影响深度,系统软件和应用软件的开发深度)、越广(即涉及生产

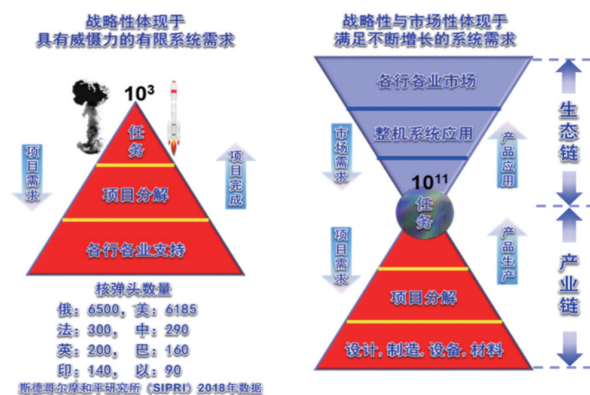


图1 集成电路的战略性与市场性

与生活的广度,使用信息产品人群的广度),其战略性的表现也愈加凸显。

集成电路的市场性源于两个方面,一是人们对信息产品不断增长的需求,二是其生产规模。一条300 mm晶片生产线的集成电路年产量为 $10^9 \sim 10^{10}$ 数量级,2019年,中国共生产集成电路 2.018×10^{11} 个,进口 4.451×10^{11} 个,而当今世界核武器大国存储的核武器数量仅为 10^3 数量级。如果没有庞大的市场需求和市场消化, 10^{10} 数量级的集成电路产品无法维持集成电路生产线的正常运转。

就生产链而言,同具有战略性的核武器与集成电路均是各种材料在各种设备上通过不同工艺制造形成的集合,但核武器的研发与制造是不需要通过市场交易的、独立自主的封闭形态;而集成电路生产链则表现为开放的特征,即上千种材料和上百台套的设备只能实现部分自主供给,其余部分需要通过市场交换完成。在市场交换的过程中,任何一种材料、一种设备都可能成为制约竞争者的手段,如日本的氟聚酰亚胺、氟化氢、光刻胶“断供”韩国,荷兰阿斯麦尔公司(ASML)的极紫外(EUV)曝光机不能获得出口中国的许可,台积电的工艺不能为华为代工等。也就是说,集成电路生产链中也存在着无数具有战略性特征的环节,而集成电路产品又是无数信息产品中战略性特征的核心(图2)。

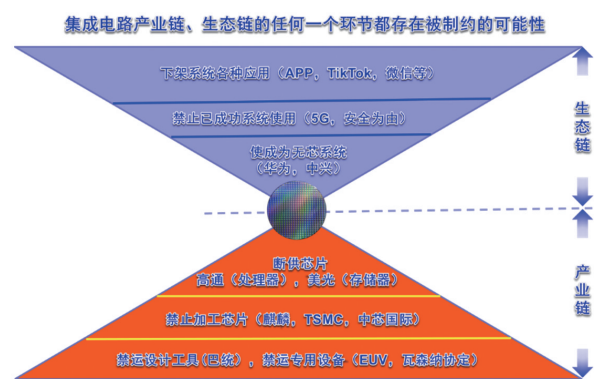


图2 集成电路的产业链与生态链

对于“要不来”“买不来”“讨不来”的关键核心技术,必须凭借举国体制的优势来攻坚克难,努力培育战略科技力量和战略储备能力;对于集成电路生产线所需的一般性材料和设备,正如习近平总书记

记于2020年9月11日在科学家座谈会上的讲话所说：“我们要更加主动地融入全球创新网络，在开放合作中提升自身科技创新能力。越是面临封锁打压，越不能搞自我封闭、自我隔绝，而是要实施更加开放包容、互惠共享的国际科技合作战略。”

1.2 集成电路投资具有密集性和持续性的特征

集成电路产业投资的特点是投资巨大、投资连续和长期回报。因此，集成电路生产线建设一定不能遍地开花。

1.2.1 投资强度高且日趋集中

以Intel、三星和台积电近年来的资本支出为例，2017年起，3个企业每年资本支出均超过100亿美元，其中三星电子的资本支出更是超过200亿美元(图3)，相当于组建一个包括航母(含舰载机)、巡洋舰、驱逐舰与核潜艇组成的中型航母战斗群的造价(150亿~200亿美元)。这种高强度投资导致了行业日趋集中于少数企业，形成了“大者恒大、强者恒强”的局面。图4表明，2002—2003年，采用130 nm工艺的企业有26家；2016年，采用16/14 nm工艺加工的集成电路企业锐减为7家，其中包括中国的中芯国际和华虹；到2018年，具有10 nm加工能力的企业只剩下三星、台积电和Intel这3家。因此，这种进入门槛极高的产业，尤其是集成电路生产线的建设，一定要在政策的指导下以及政府的规划与牵头下进行投资，低水平的重复建设只会造成资源的浪费。

图5表明，世界排名前5的半导体企业，其资本支出之和占全部半导体企业资本支出的比例一直

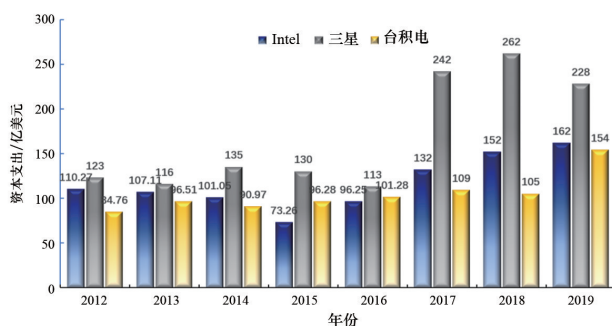


图3 集成电路产业的资本支出
(数据来源:各公司财报)



图4 加工逻辑集成电路产品的企业日趋集中
(根据Intel资料补充整理)

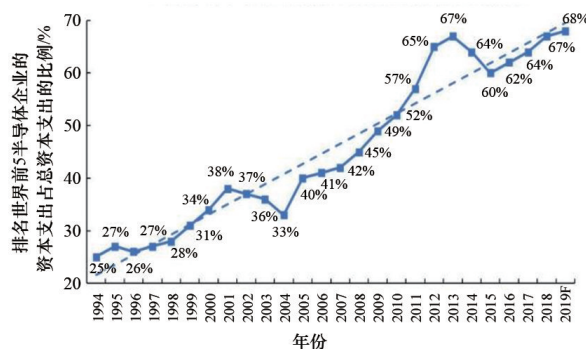


图5 排名世界前5半导体企业的资本支出比例
(数据来源:IC Insights)

呈增长趋势。20世纪90年代中期，该比例为25%；2010年，该比例超过50%；2012年以后，该比例超过60%，并向70%的方向发展。其启示是，发展集成电路产业一定要将有限的资源集中使用，才能充分产生可期望的效益，一定要有统筹全局的规划和调控举措，坚决避免无视投资规律、仅凭主观愿望就匆匆“上马”不切实际的建设项目状况，从而避免“村村点火，户户冒烟”的“小而散”现象，甚至“烂尾工程”的出现。

1.2.2 投资要有持续增长的能力

1) 建设新生产线。

集成电路产业的投资不是“一锤子买卖”，不是一次投资就可以成为表现“工作业绩”的资本，更不是急于求得高额回报的短期商业行为。决不能在技术、产品、市场、人才及设备均不成熟的条件下，

就审批项目、开工建厂。

对于台积电这样的代工厂(foundry)而言,其主要投资用于建设生产线和进行工艺开发;对于Intel和三星这样的“集成器件制造商”(IDM)而言,除建设工厂和开发工艺外,其部分投资还用于产品设计和产品开发。

随着集成电路工艺水平的不断提高,自20世纪70年代至今,集成电路生产线建设的投资逐年增加。2012年,建设一条300 mm硅片、32 nm工艺、月产35000片晶片的生产线,其工艺加工设备费用为30亿美元,工艺检测及晶片传输设备费用为2.2亿美元,超纯水、特种气体、电力及空气净化设施费用为2.4亿美元,2.2万m²厂房(不含土地费用)建设费用为0.4亿美元(仅占总投资1.1%),合计35亿美元(图6)。2017年,建一条7 nm工艺的生产线费用达到了54亿美元;2022年,建一条5~3 nm工艺生产线的费用预计将高达200~250亿美元。

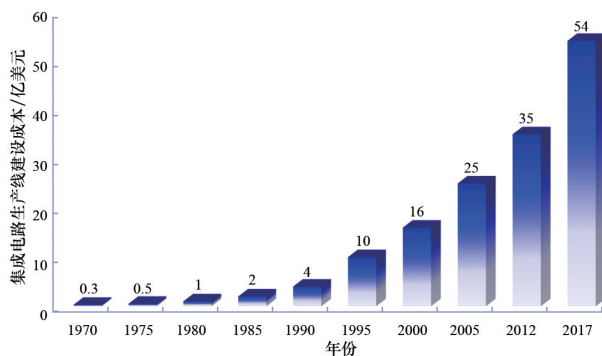


图6 集成电路生产线的建设费用
(数据来源:IC Insights)

2) 开发新工艺。

厂房建成,设备就位,不等于生产线能够正常运转,还必须要生产线上开发适应生产线运行并保证产品一定成品率的工艺。如果每道工艺的成品率为99%,则经过 N 道工艺后,产品成品率就仅有 0.99^N 。假设 $N=50$,则最终成品率仅为60%,仍然达不到企业运转进入良性循环的要求。为此,要对每道工序进行反复试验和调校,直至得到最佳工艺参数。这一过程需要投入大量人力和物力,是研发工艺必要的投资和成本。当某个技术节点的工艺

达到成熟并可进行量产时,工艺研发人员又需开发下一技术节点的工艺,否则,既不能满足市场需求,又有可能被竞争对手超越。

从图7可以看出,180 nm工艺的研发费用为1.39亿美元;28 nm工艺的研发费用增长5.7倍,至7.96亿美元;而14 nm工艺的研发费用进一步上升,达到24.96亿美元。这就是集成电路产业需要持续投资的原因所在。

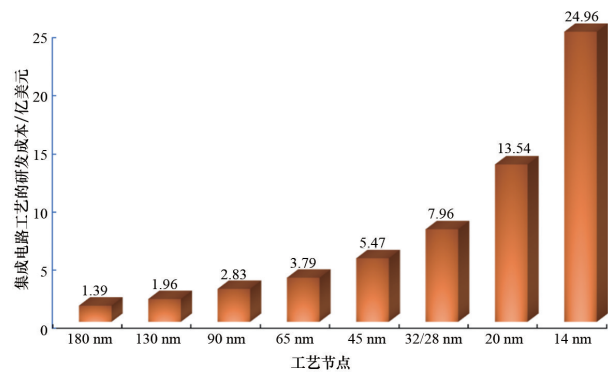


图7 集成电路工艺的研发费用(数据来源:IC Insights)

3) 开发新产品。

集成电路生产链大致可以分为3个环节:设计、制造和封装。除包含了全部生产环节>IDM企业外,在企业形态上还有独立的无生产线的企业(Fabless)、仅提供代工生产的代工企业和仅进行封装的封装企业。无论是IDM还是Fabless,都需要对产品设计投入必要的研发资金。随着工艺技术的进步,相应的产品设计成本也在逐年增加。图8表明,适合65 nm工艺的主流产品设计成本为0.29亿美元;28 nm产品的设计成本涨至0.7亿美元

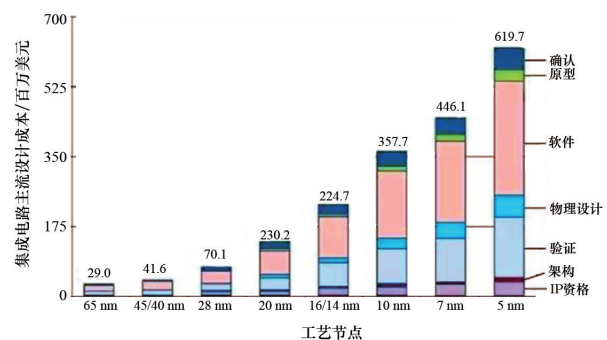


图8 集成电路主流工艺产品设计成本
(根据International Business Strategies(IBM)数据整理)

元;当加工工艺达到 20 nm 时,每个芯片上所集成的晶体管数以亿计,其设计复杂度随之增加,设计成本也达到 2.3 亿美元。当今,7 nm 工艺的产品已实现量产,其设计成本达到 4.46 亿美元,其中电子设计自动化(EDA)软件成本约占 45%,预计 5 nm 集成电路产品的设计成本约为 6.2 亿美元,3 nm 工艺 GPU 的设计成本将超过 15 亿美元。

1.3 集成电路市场具有延展性和波动性的特征

1.3.1 无所不在的应用市场

集成电路最初的市场是政府和军方,20 世纪 70 年代起,企业成为集成电路应用的主力。21 世纪初,各种电子信息产品的出现,使得个人消费群体成为构筑集成电路市场的主流(图 9)。

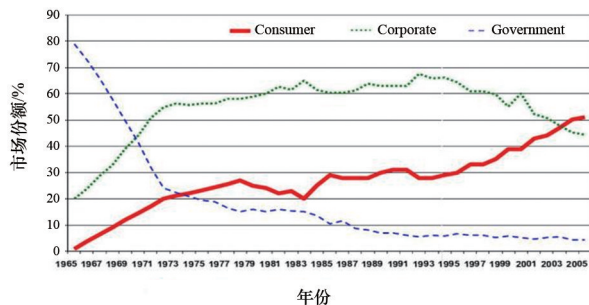


图 9 集成电路市场的演变
(资料来源:George Scallse, SIA)

由于集成电路可以集信息获取、存储、处理、传输和执行功能于一身,其应用范围已经渗透到当今社会的每一个角落,正在迅速地改变着人类的生产方式和生活方式。北斗卫星可以精确地授时和导航,高铁的建成迅速缩短城际间的距离,从青海发射的导弹经过近 3000 km 的飞行可以准确击中位于南海的靶标,无人驾驶汽车在不远的将来将行驶于大街小巷,数字货币替代现金已经在中国成为主要的支付手段,在手机上出示健康码成为疫情期间出入公共场所的必要条件,网红可以“直播带货”,某些总统也喜好“推特治国”(图 10)。不断增长的系统需求是集成电路市场持续延展的强劲动力。

1.3.2 周期性波动的集成电路市场

图 11 为世界半导体市场的变化,可以看出,自 1981 年 IBM 的个人计算机(PC)问世后,催生了个人电脑的市场,集成电路市场也随之逐步扩大,但 PC 尚未进入普通家庭,能够使用电脑的人群还属小众,集成电路市场总额在 1000 亿美元以内。自 20 世纪 90 年代中期个人电子信息产品(例如,彩电、录音机、数码相机、寻呼机、移动电话等)的逐渐普及后,集成电路市场随之逐渐突破了 2000 亿美元。其后,随着移动网络和智能手机的进一步普及,从 2017 年起,世界半导体市场总额(集成电路

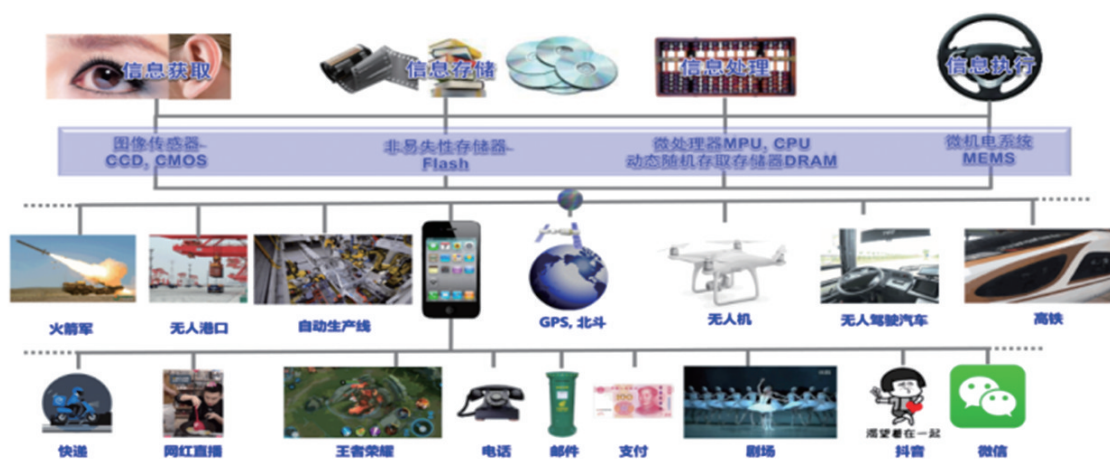


图 10 集成电路正在改变人类的生产和生活方式

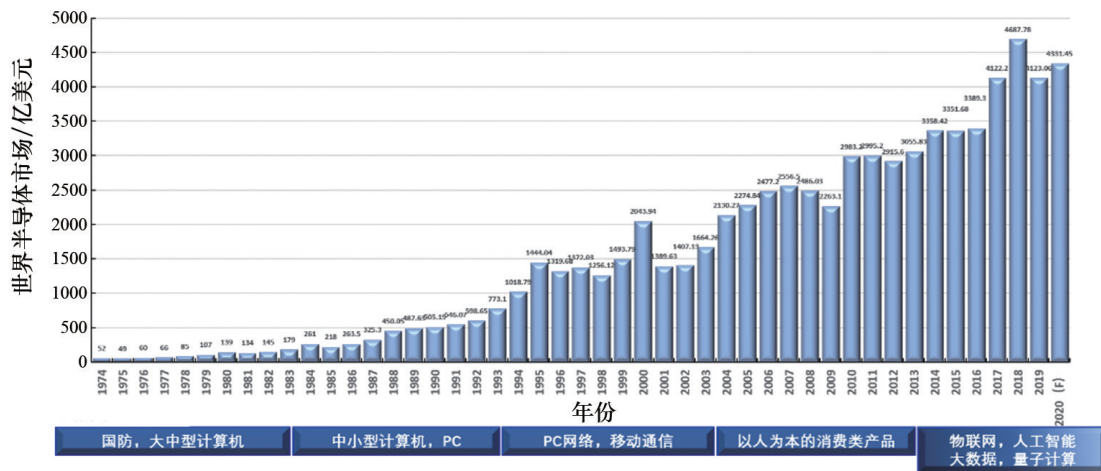


图11 世界半导体市场的变化(数据来源:WSTS)

市场约占半导体市场的85%)达到了4000亿美元以上。在2020年12月初,世界半导体贸易统计组织(WSTS)预测,2020年世界半导体市场为4331.45亿美元。

世界集成电路市场的增长率一直呈周期性的波动状态,表现为每10年左右的增长率大致呈现“M”型态势,在两个峰值(峰值大小的绝对值不尽相

同,出现的时间也有前有后)之间有一个低谷存在(图12)。低谷出现的原因有:(1)宏观经济的影响,如地区性或全球性的经济危机和经济衰退;(2)部分电子信息系统产品的需求饱和,半导体产品销售随之萎缩;(3)低迷时期生产厂商加大的产能显现,出现供大于求,产品价格下跌。在半导体市场增长率呈低谷时,是生产商增加投入的最佳时期。

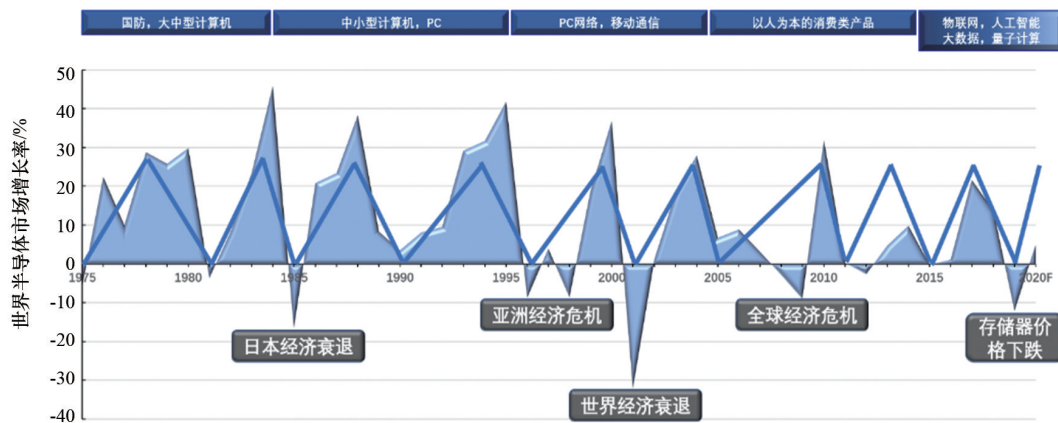


图12 世界半导体市场增长率的周期性变化(数据来源:WSTS)

1.4 集成电路技术具有革命性和规律性的特征

1.4.1 集成电路技术的革命性

集成电路市场的不断扩大源于集成技术革命性的进步。在人类社会的发展中,信息存储、信息处理和信息传输经历了人工时代、机械时代和电子

时代3个革命性的历史阶段,当今,“电子”成为了信息存储、处理和传输的主体,集成电路则是承载和控制“电子”运行的主要载体,成为了信息技术革命的主力军(表1)。

表1 信息的存储、传输与处理主体的变化

	远古至今	17—18世纪	19世纪	20世纪	21世纪
信息记录形式	文字, 绘画, 雕塑, 建筑	模拟信息	模拟信息	模拟信息 数码信息	数码信息
信息记录介质	颜料, 痕迹, 造型, 结构	载体形变 算盘, 计算尺, 穿孔纸带, 机械计算机	载体形变 手摇留声机 磁场变化 钢丝、磁带录音机 化学变化 照片, 电影	载体形变 光盘 磁场变化 录音, 录像, 磁芯, 磁带, 磁盘, 磁鼓 电荷变化 半导体存储器, 录音, 录像, 文字图像处理	电荷 实时获取信息 实时存储信息 实时处理信息 实时传输信息
信息记录载体	纸, 布, 泥, 石, 竹, 木, 金属等	纸, 木, 金属	金属, 塑料	金属, 塑料, 半导体	半导体
信息传输媒介	语言, 文字	文字, 实物	导线, 电码	电磁波	电磁波
信息传输方式	口耳, 人递	驿站, 邮政	电话, 电报	广播, 电视	网络, 卫星
信息处理主体	人工	人工, 机械	机械, 化学	电子管, 晶体管, 集成电路, 软件	集成电路, 软件

电子管是从“机械”到“电子”革命的“转戾点”，晶体管则完成了“电子在真空中运动”到“电子在固体中运动”的革命。

在电子管和晶体管时代, 作为无源器件的电阻、电容和电感由不同材料制成, 而在集成电路中, 有源和无源器件均由同一半导体材料构成, 这是一次革命性的转变。集成电路的发明人基尔比 (Jack S. Kilby) 在 2001 年访问北京大学时, 曾对笔者说: “由于电容、电阻、晶体管等所有部件都可以用一种材料制造, 我想可以先在一块半导体材料上将它们做出来, 然后进行互联形成一个完整的电路。”虽然基尔比的第 1 个集成电路样品现在看起来非常粗糙、简陋, 第 2 个集成电路专利仅有 1 个晶体管和 4 个阻容元件 (图 13、图 14), 但其中蕴含具有革命性意义的智慧却值得我们深思、传承和发扬光大。正是有了由“一个晶体管”构筑的集成电路思想火花, 才有了今天数以亿计晶体管集成在一个芯片上的中央处理器 (CPU)、图形处理器 (GPU)、动态随机存取存储器 (DRAM)、现场可编程门阵列 (FPGA)、Flash 等无数的集成电路产品。

在 1958 年基尔比申请了第 1 个集成电路专利后, 仙童公司的诺伊斯申请了平面工艺制造的集成

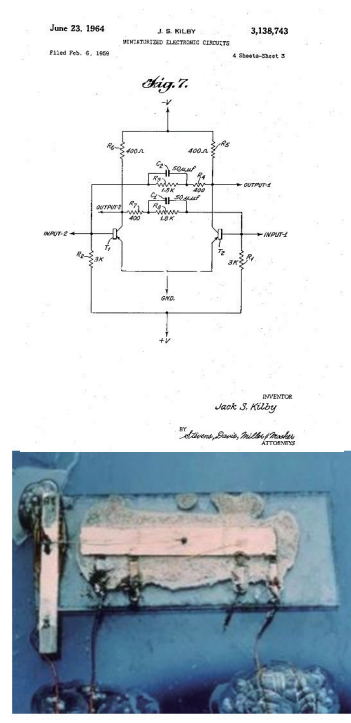


图 13 基尔比第 1 个集成电路专利和样品

电路专利, 为此后的集成电路平面工艺奠定了基础。

2000 年, 加利福尼亚大学伯克利分校胡正明教授团队发明了鳍式场效应晶体管 (fin field-effect transistor, FinFET), 将集成电路制造工艺从 2D

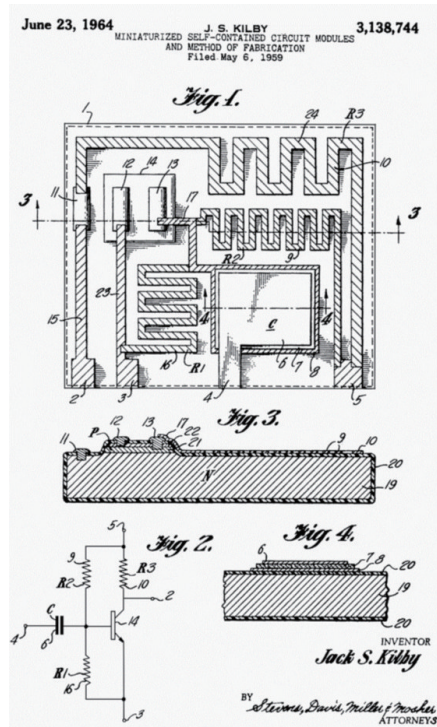


图14 基尔比第2个集成电路专利

推向了革命性的3D进程,使得集成电路制造工艺登上了历史的新台阶。

同样,为了获得更高的存储密度,防止邻近存储单元之间的串扰(cross talk),自2015年起,NAND Flash的生产也采用Vertical Scaling的堆叠技术开始转入3D时代。2018年,堆叠层数为96层Flash的存储容量达到了1.33 TB 四层式存储单元(QLC, 4 bit/cell);2019年,东芝采用BiCS(bit cost scalable)工艺开发出112层、容量为512 Gb 三层式存储单元(TLC, 3 bit/cell)的快闪存储器。

在封装领域,硅通孔(through silicon via, TSV)技术的应用可以使CPU、GPU、存储器、传感器等不同种类的芯片以3D方式封装在一块集成电路当中。

采用浸没式、多图形曝光的方法,可以用波长193 nm的光源实现20~14 nm工艺产品的生产。采用“大马士革”工艺实现了铜代替铝的互连。

60余年来,每一项具有革命性技术的发明都成为了集成电路产业发展的驱动器(图15)。

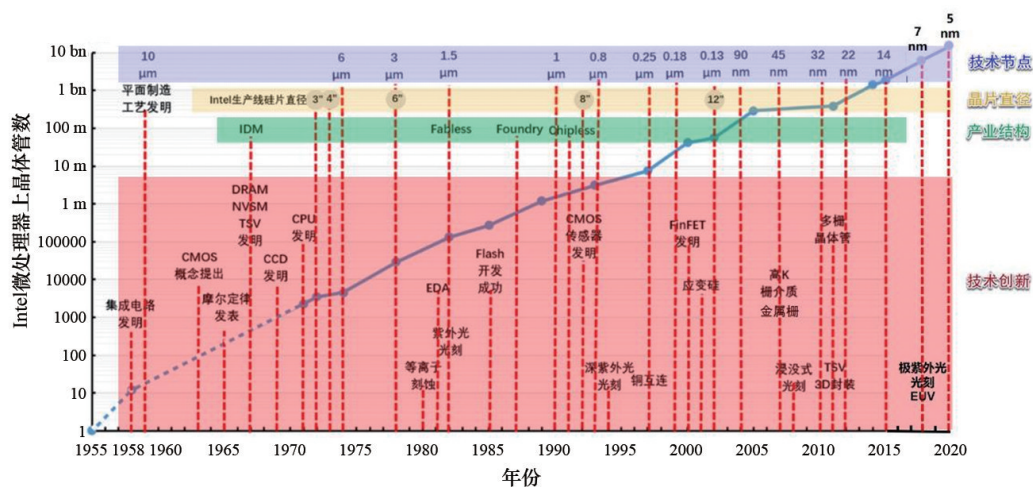


图15 集成电路技术和产业发展的里程碑

1.4.2 集成电路应用的革命性

集成电路因其广泛的应用,使得许多领域产生了革命性变化。

1) 鉴于新冠疫情的影响,2020年11月20日,亚太经合组织(APEC)领导人非正式会议在云端以视频的方式进行。

2) 中国人民解放军火箭军于2015年12月31

日正式成立。2020年8月26日,一枚东风-26B弹道导弹与一枚东风-21D弹道导弹分别从青海、浙江2个不同方向射向解放军在南海进行军事演习的封锁区域,并精准命中了移动靶标。

3) 同等亮度的LED灯比白炽灯节约了80%以上的能耗。2010年,中国白炽灯产量和国内销量分别为38.5亿只和10.7亿只。据中国照明学会测

算,中国照明用电约占全社会用电量的12%,如果把白炽灯全部替换为节能灯,可节用电480亿kW·h,相当于减少4800万t二氧化碳的排放。2009年7月,联合国秘书长潘基文在绿色照明项目签字仪式上说:“改变一个灯泡,同时改变我们的思维方式,我们就可以改变整个世界。”

4) 以MP3格式来录放声音的电子信息产品使得唱片业(78转、45转、33 1/3转的黑胶唱片)、磁带式录音机退出了历史舞台。

5) 数字摄影、摄像(数码相机,手机)颠覆了胶卷产业,市场上已不见了“柯达”“富士”“乐凯”等胶卷的踪影。

6) 微信、短信、电子邮件替代了手写书信,贴着邮票的信封和里面的信件变成了历史收藏;矗立在路旁的绿色邮筒和骑自行车穿梭于大街小巷的邮递员成为了过去的事情。

7) 互联网和电子信息的阅读方式导致传统纸媒发行率大幅下降。2009年,第六次全国国民阅读调查显示,中国成年人报纸阅读率为63.9%;而根据2018年第十六次全国国民阅读调查的结果,报纸阅读率降为35.1%。2012年,全国报纸零售发行量为3006.58万份,到2014年下降到1568.77万份,2年内下降了50%。

8) 2019年,全国网上零售总额达106324亿元;至2020年6月,中国网络购物用户达7.49亿,网络支付用户达8.05亿。

9) 中国互联网络信息中心于2020年9月30日发布了《第46次中国互联网络发展状况统计报

告》,至2020上半年,中国网民达到9.4亿(城镇6.54亿,农村2.85亿),互联网普及率为67%。在控制新冠疫情的过程中,远程会诊、非接触体温检测、“健康码”一码通行等举措发挥了重要作用。

简言之,集成电路的应用极大丰富了信息获取的多样性(听觉、视觉、触觉)、信息存储的综合性(文字、数据、图像、音频、视频)、信息处理的复杂性(大数据、云计算、人工智能)和信息传输的时效性与广域性,开创了全新、全面革命的信息时代。

1.4.3 集成电路技术进步的规律性

1) 集成电路市场增长率与GDP相关。

图16为1975—2019年世界GDP增长率与世界半导体市场增长率的比较,可以看出,两个增长率之间存在较强的相关性。这说明GDP总量直接影响着半导体产业的发展,反之,半导体产业的发展及其电子信息产业的发展又成为GDP总量涨落的重要因素。

图17是2000—2019年中国GDP总量、中国电子信息产业销售额、中国集成电路市场和集成电路产业销售额的比较。从图17中大致可以看出以下几点:

(1) 中国电子信息制造业的销售额在2000年为GDP总量的13.28%,到2019年,该比例上升至17.59%,说明电子信息制造业一直呈快速发展态势,这与中国已经成为电子信息产品制造大国息息相关。

(2) 集成电路市场的增长曲线与电子信息产品销售额的增长曲线呈平行关系,其比值一直接近1:10。

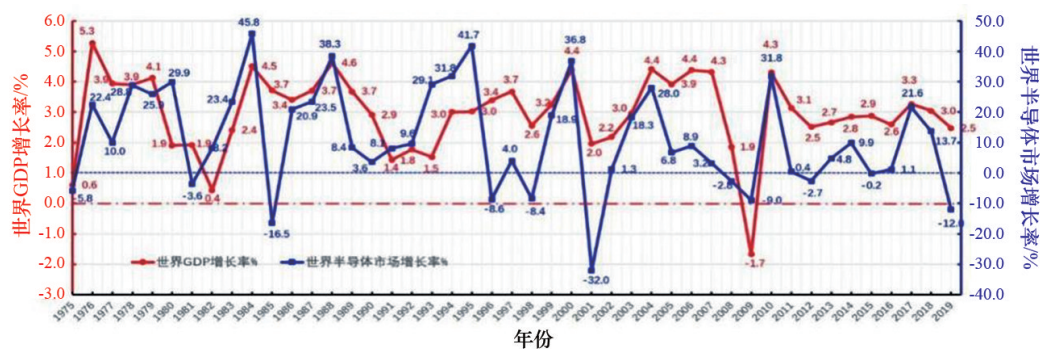


图16 世界半导体市场增长率与GDP增长率的关系(数据来源:世界银行、WSTS)

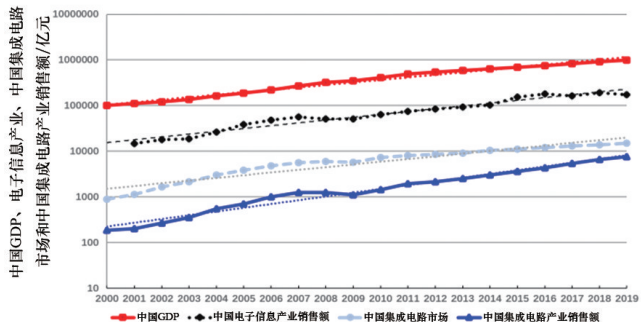


图 17 中国 GDP、电子信息产业销售额、中国集成电路市场规模与中国集成电路产业销售额的比较 (数据来源:国家统计局、工业和信息化部)

(3) 中国集成电路产业销售额增长曲线的斜率逐渐大于集成电路市场增长曲线的斜率,说明国产集成电路在国内市场中的比例逐渐增大。

2) 集成电路市场增长率与资本支出增长率相关。

集成电路技术进步与市场扩展密切相关,而技术进步的基础是研究开发,研发则需要巨大的资金投入。投资带动研发,研发带动新产品生产和相应投资,新产品带动新的系统应用,新系统应用带动集成电路市场的不断增长。图 18 表明了集成电路产业的资本支出增长率与集成电路市场增长率高度相关的关系。

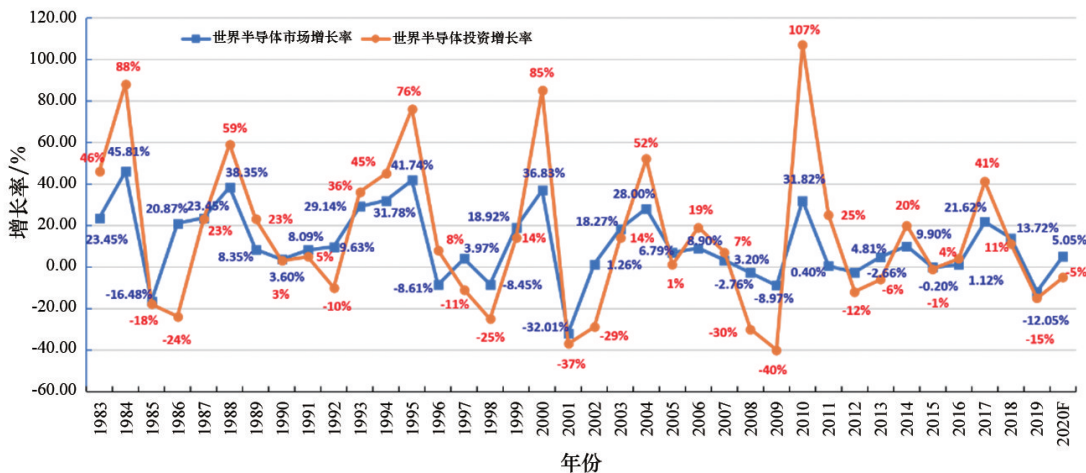


图 18 世界半导体市场增长率与资本支出增长率的相关关系(数据来源:WSTS、IC Insights)

3) 摩尔定律。

1965 年 4 月 19 日,任职于仙童半导体公司 (Fairchild Semiconductor) 的戈登·摩尔 (Gordon E. Moore) 在《Electronics》杂志上发表了《Cramming more components onto integrated circuits》一文,提出集成电路在最低元件成本下的复杂度大约每年增加一倍。1975 年,摩尔在电气与电子工程师协会 (IEEE) 组织的 IEDM 会议上发表了题为《Progress In Digital Integrated Electronics》的论文,将上述每年增长一倍的推断进行了修正,改为每两年增长一倍。这就是大家熟知的“摩尔定律”。对于这个“定律”有两点需要澄清:一是这个规律仅仅是摩尔预测的发展“规律”,并非物理学、数学等严格定义的

科学“定律”;二是网传集成电路上的晶体管数每 18 个月翻一番,只是对 DRAM 产品发展的统计规律,并不是戈登·摩尔本人的说法,他真实的说法是 Intel CPU 上的晶体管数每 24 个月翻一番(图 19)。

4) 每 10 年左右取得一代集成电路技术进步。

表 2 表明,随着主流光刻技术光源波长的缩短,集成电路主流设计工具、加工特征尺寸、硅圆片直径、主要封装形式等技术约每 10 年左右取得一代明显的进步。

5) 集成电路产品从研发到量产的时间跨度约为 10 年。

图 20 和图 21 从不同角度统计,都说明集成电路从最初研发到批量生产需要 10 年的时间跨度。

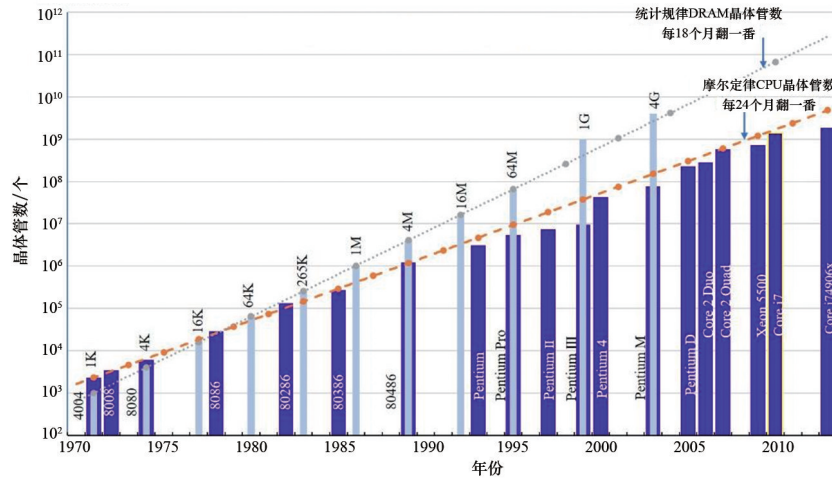


图19 CPU和DRAM上晶体管数的增长(根据公开资料整理)

表2 集成电路10年一代的技术进步

时间	第一代 1966—1975	第二代 1976—1985	第三代 1986—1995	第四代 1996—2005	第五代 2006—2015	第六代 2016—2025
主流光刻技术光源	汞灯	g线	i线	KrF	ArF	EUV
光源波长/nm	多波长	436	365	248	193(浸没)	13.5
特征尺寸/nm	12000~3000	3000~1000	1000~350	350~65	65~14	14~3
主流存储器容量/bit	≤1 K~16 K	16 K~1 M	1 M~64 M	64 M~1 G	1 G~16 G (芯片组)	16 G~≥1 T (芯片组)
主流CPU产品	4004~8080	8086~286	386~486	Pentium	Core	—
CPU字长/位	4~8	8~16	16~32	32~64	64	—
CPU晶体管数	10 ³	10 ⁴ ~10 ⁵	10 ⁵ ~10 ⁶	10 ⁶ ~10 ⁷	10 ⁸ ~10 ⁹	多核架构
CPU时钟频率/MHz	10 ⁻¹ ~10 ⁰	10 ⁰ ~10 ¹	10 ¹ ~10 ²	10 ² ~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	12为主
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

注: LE: Logic Editor, 逻辑编辑; P&R: placement and routing, 布局布线; Synthesis: 综合; DFM: Design for manufacturability, 可制造设计; SoC: System on Chip, 系统芯片; IP: Intellectual Property; DIP: Dual In-line Package, 双列直插封装; QFP: quad flat package, 四面管脚扁平封装; BGA: Ball Grid Array, 球型阵列封装; SiP: System in Package, 系统封装; KrF: 氟化氪准分子激光; ArF: 氟化氪准分子激光; Immersion: 浸没; EUV: extreme ultraviolet, 极紫外光。

集成电路从研发到批量生产约10年

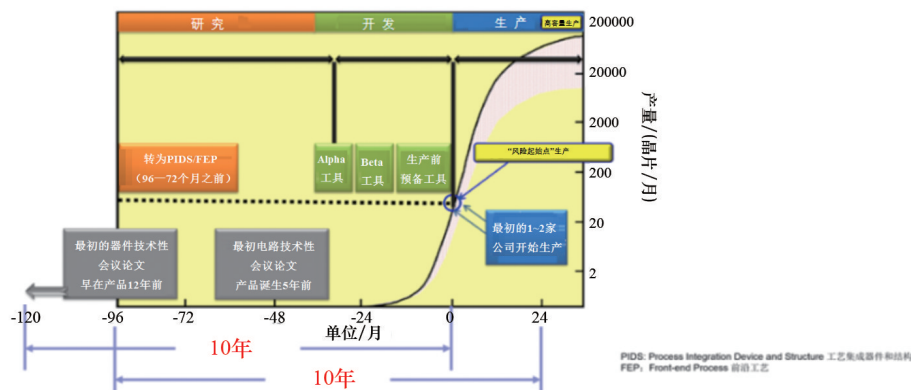


图20 集成电路从研发到量产的时间跨度(图片来源:ITRS, 2012)

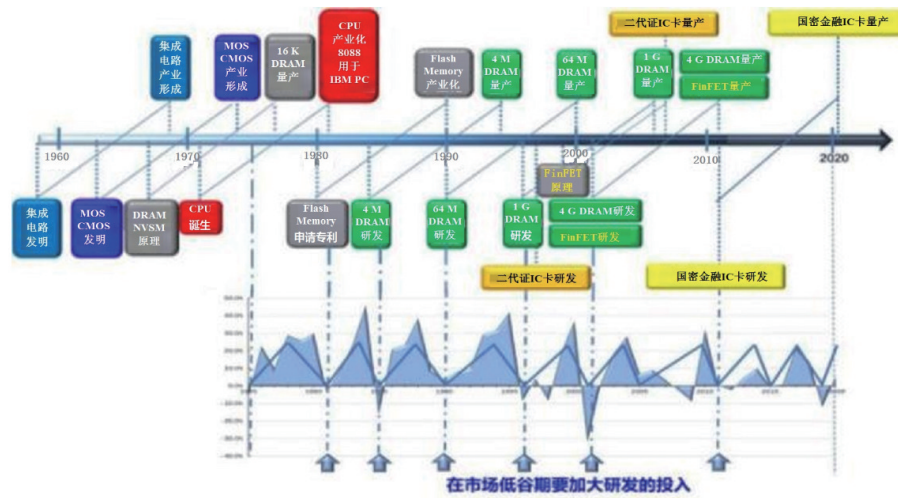


图21 集成电路从研发到量产时间跨度的例证

2 中国集成电路产业的现状、问题和分析

2.1 简要历史回顾

2.1.1 初始创业

20世纪60年代中期,首块集成电路诞生,中国集成电路产业开始萌芽。20世纪60年代中期至70年代中期是国外集成电路产业迅速发展的时期,囿于国外禁运环境和国内文化大革命的环境所限,我们对集成电路技术及产业的发展规律认识不足,导致了我国集成电路产业总体规模小、技术水平低。1975年,第1块以硅栅N沟道MOS集成电路技术为主体的1024位MOS动态随机存取存储器在北京大学研制成功,但在向全国企业成果转移时,并未取得理想结果。在这一初始创业阶段中,管理部门只对工厂下达集成电路生产量(块数)的指标,1981年之前并没有销售额的统计。

2.1.2 探索前进

20世纪70年代后期,开始以不同方式对引进国外的设备和技术进行初步尝试。为了加强对集成电路产业的领导,1982年,国务院“电子计算机和大规模集成电路领导小组”成立;1987年,电子工业部微电子器件局成立。在各有关部门的指导下,陆续实施了“无锡微电子工程”、“908”工程和“909”工程,集成电路生产技术从5 μm逐步提升到

0.35 μm。但由于企业体制、投资、市场以及人才等诸多因素的影响,集成电路销售额增长有限,从1981年到1999年,全国集成电路产业销售总额仅由1.1亿元增长到79.5亿元,不足世界市场的1%。在这18年中,平均每年的销售额仅增长4.4亿元。

2.1.3 规范发展

自2000年起,在改革开放的大环境中,中国集成电路产业开始步入规范发展的轨道。其标志性事件一是2000年6月24日《国务院关于印发鼓励软件产业和集成电路发展若干政策的通知(国发[2000]18号)》发布,二是“中芯国际”以及一批符合集成电路产业发展规律的企业陆续建立。2003年,《半导体国际》杂志载文评价:“中芯国际把中国与全球权威者的差距由原来的4至5代缩小到仅剩1至2代。”1999—2009年,中国集成电路产业平均每年销售额增长103亿元,集成电路加工技术达到了65 nm。

2.1.4 高速发展

从2009年起,中国集成电路产业步入高速发展阶段。2011年1月28日《国务院关于印发进一步鼓励软件产业和集成电路产业发展若干政策的通知(国发[2011]4号)》的发布和2014年“国家集成电路产业投资基金股份有限公司”的成立是最重要的驱动力。同时,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》中实施的“核心电子器件、高端通

用芯片及基础软件产品”专项(01专项)和“极大规模集成电路制造装备及成套工艺”专项(02专项)的作用也逐步显现。2009—2019年,中国集成电路产业平均每年销售额增长645.3亿元,是上一个10年平均增长额的6.3倍。2019年,中芯国际的14

nm加工技术已经投入批量生产。这10年间,中国集成电路产业销售额的年平均增长率为21.04%,是同期世界半导体市场年平均增长率6.18%的3.4倍。

1981—2019年,中国集成电路产业发展情况如图22所示。

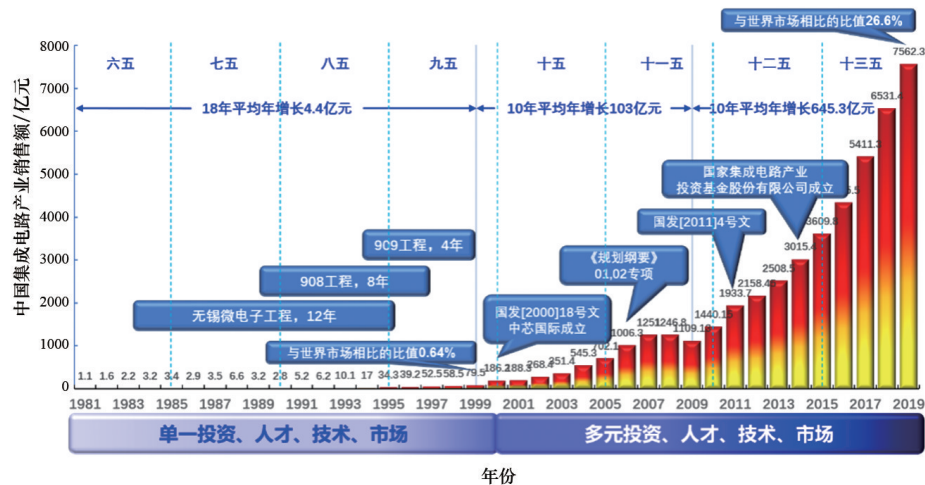


图22 1981—2019年中国集成电路产业发展

需说明的是,中国集成电路产业销售额的统计是设计业、制造业和封装业三业销售额的叠加,其中对集成电路产品销售额存在重复统计的部分;而WSTS统计的半导体市场仅对集成电路产品销售额进行统计,且仅限于对总部所在地企业销售的集成电路产品进行统计。因此,图22中国集成电路产业销售额不是在世界集成电路市场中真正的“占比”,只是一个相对比值。如果真正按照WSTS的统计标准和统计渠道进行统计,即仅对企业总部所在地(国家或地区)的企业及其产品销售额进行统计,2019年中国大陆企业集成电路产业销售额仅占世界市场的5%。这是真实的、与国际接轨的“占比”(图23)。

鉴于中国消费和中国制造对集成电路的巨大需求,2009年起,中国半导体市场规模超过美洲、欧洲、日本而成为世界第一大市场。2019年,中国半导体市场规模为1446亿美元(实际消费部分),占世界市场的35%(图24)。如此巨大的集成电路市场,使得中国进口集成电路总额逐年增长,成为进口额第一的产品(图25)。

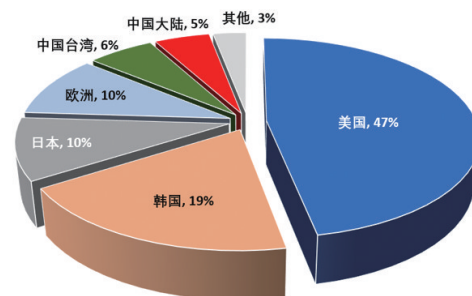


图23 2019年世界半导体企业(区域划分)销售额占市场总额的比例(数据来源:WSTS)

2019年,中国集成电路进口额为3055.5亿美元,而中国实际“消费”的集成电路市场额为1446亿美元,两者的差额正是中国作为第一制造大国的需求,即1609.5亿美元的进口集成电路随着各种整机电子信息产品又出口到世界各地,并未成为中国实际消费集成电路市场的组成部分。

2.2 现状与存在的问题

2.2.1 国际环境

自2016年美国政府换届开始,美国对中国的和平崛起采取了全面的打压和围剿政策,包括在贸

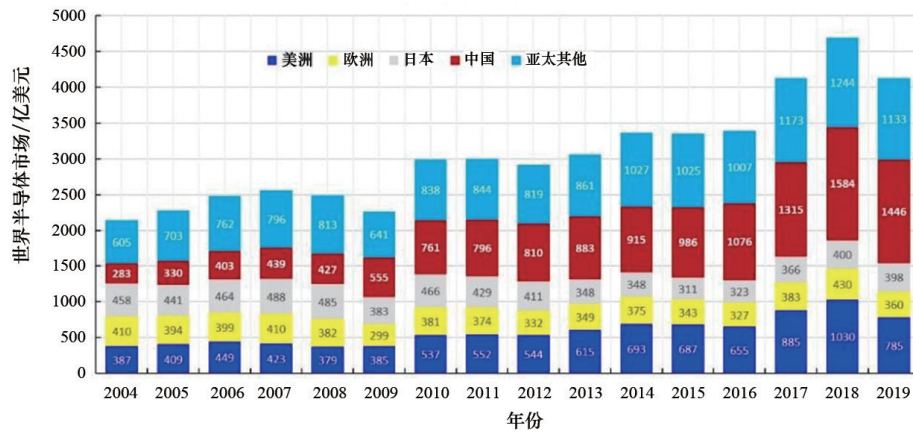


图24 2019年世界半导体市场的区域分布(数据来源:WSTS)

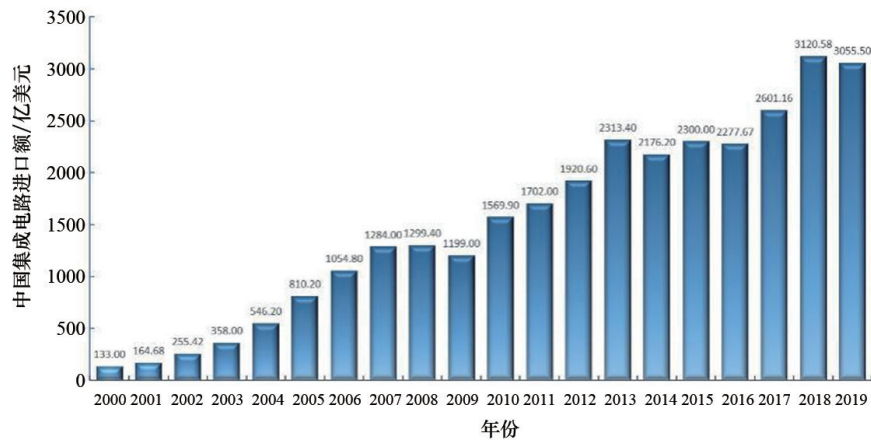


图25 中国集成电路进口额(数据来源:中国海关)

易中高筑关税壁垒,在系统层面阻挠中国5G产品进入美国和其盟友的市场,在应用层面要求下架抖音(TikTok)和微信(WeChat),在制造层面不允许台积电等代工企业为华为麒麟芯片加工并将中芯国际列入黑名单,在产品层面断供高端集成电路(处理器、存储器),在设备方面利用“瓦森纳协议”禁止ASML公司向中国出口EUV设备等。

这种“美国优先”的思想源于美国对世界资源的占有和掠夺。以用电为例,2020年上半年,美国居民人均每月用电342度(美国能源署数据),而中国居民人均每月用电为63.5度(国家统计局数据)。美国前总统奥巴马于2010年4月15日在白宫接受澳大利亚电视台专访时说:“如果十几亿的中国公民有着和澳大利亚和美国居民一样的生活方式,那么世界将处于非常悲惨的境地,地球会无法承受。”

(If over a billion Chinese citizens have the same living patterns as Australians and Americans do right now, then all of us are in for a very miserable time, the planet just can't sustain it.)

当我们没有的时候,对方封锁市场,让我们得不到最先进的技术和设备;当我们萌芽的时候,对方挤占市场,摧毁幼苗,将新技术、新产品扼杀在摇篮之中;当我们强大的时候,对方设立门槛,不允许在世界市场中分一杯羹,不能形成有效的外循环。这就是美国阻遏中国发展的逻辑,为此,必须丢掉幻想,唯有自强才能彻底改变被他人制约的命运。

美国对中国集成电路产业的打压握有两个“杀手锏”:一是EDA软件,二是材料和设备(特别是EUV曝光机)。对付这两个“杀手锏”,我们唯有正面迎战,才能撕开封锁的“铁幕”,正如毛主席所言:

“以斗争求和平则和平存,以妥协求和平则和平亡。”有3个成功案例佐证:一是2018年5月上海中微半导体的刻蚀机进入了台积电供应链,美国马上放松了对刻蚀机的出口控制;二是MOCVD设备被全球两大供应商(Axitron、Veeco)垄断,当上海中微半导体将国产MOCVD设备推向市场时,两大供应商将原价2000万元人民币的设备降价至600万元人民币,妄图将上海中微半导体挤出国内外市场;三是笔者亲身经历的事件,1984年,中法两国时任总理签署了协议,中国采购法国的程控交换机,法国提供集成电路设计工具EDA源程序,而美国借助“巴黎统筹委员会”要求禁止法国出口EDA工具。在这种形势下,中国决定以在产业中实用为指向,以企业为集中国内人力资源的基地,发挥举国体制的优势进行攻关。在攻关队伍的建设中,引进国外专家为总设计师,笔者临危受命担任全国集成电路计算机辅助设计(ICCAD)专家委员会主任,以“不破楼兰终不还”的信念、“咬定青山不放松”的毅力,和全国118名专家学者一起开发出了中国第一部采用软件工程方法自行开发集成的、具有完全自主知识产权的、功能齐全的大型ICCAD系统,并命名为“熊猫系统”。就在“熊猫系统”获得国家科技进步一等奖不久,美国EDA三巨头——Cadence、Synopsys、Mentor全都迫不及待地进入了中国市场。

2.2.2 国内环境

在共产党的坚强领导下,中国具有举国之力办大事的政治优势,这一点在抗击新冠病毒流行的“战疫”中得到充分体现。

国内有着良好的发展集成电路的政治环境。党的十九届五中全会提出,“坚定不移建设制造强国、质量强国、网络强国、数字中国”,“发展战略新兴产业”,“加快数字化发展”。2020年8月4日,国务院印发的《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》中强调,集成电路产业和软件产业是信息产业的核心,是引领新一轮科技革命和产业变革的关键力量。为进一步优化集成电路产业和软件产业发展环境,深化产业国际合作,提升产业创新能力和发展质量,制定出台财税、投融资、研究开发、进出口、人才、知识产权、市

场应用、国际合作等8个方面政策措施。进一步创新体制机制,鼓励集成电路产业和软件产业发展,大力培育集成电路领域和软件领域企业。

此外,在经济方面,中国是世界第二大经济体,有着可靠的对集成电路产业的投资能力。而且中国现在是世界第一制造大国,有较为完整的生产链,有广泛的能够融入世界市场的生态链。在大学教育方面,增设了“集成电路科学与工程”为一级学科,扩充了培养集成电路科技人才的平台。

在“天时、地利、人和”的环境下,面对西方霸凌主义者的挑战,我们有信心、有能力加速发展中国的集成电路产业。

2.2.3 产业能力

1) 设计能力。

中国内陆的集成电路设计业已经超越中国台湾地区,成为全球第二大设计业聚集地,其销售额占全球集成电路设计业的比重由2004年的3.56%提升到2019年的42.99%。但是,由于所设计产品多为中低档芯片,因此中国设计业的产品在2019年全球芯片市场的占比(按价值计算)仅为10.3%。在中国大陆市场所用的1446亿美元的芯片当中,国产芯片的占比仅为29.5%,即逾70%的芯片为国外产品。

2) 制造能力。

2019年,中国拥有4英寸以上晶片集成电路生产线199条,其中12英寸生产线有28条(全球121条),8英寸生产线有35条。不同生产线占总产能的比例如图26所示。

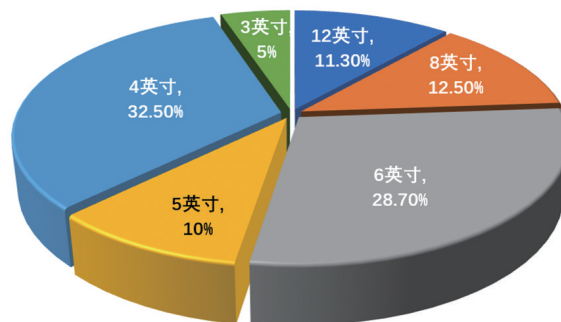


图26 2019年中国半导体生产线装机产能分布
(数据来源:魏少军在2020全球CEO峰会上的报告《人间正道是沧桑——关于大变局下的战略定力》)

2019年,中芯国际作为中国最大的代工模式企业,在世界半导体代工市场的占有率为5.1%,营收为31.16亿美元,在全球排名第5,其营收额不足排名第一台积电357.74亿美元的1/10。营收额中,90 nm工艺以下的占50.7%,65 nm工艺的占27.3%。中芯国际14 nm工艺已经进入量产阶段,2020年年底,7 nm工艺已完成开发。2019年,中芯国际的资本支出为21亿美元,约为三星电子资本支出的1/10。

同是代工企业的华虹半导体公司,2019年在世界半导体代工市场的占有率为1.5%,在全球代工企业中排名第7,其65/55 nm射频与BCD特色工艺平台达到世界先进水平,14 nm的FinFET工艺已实现全线贯通。

2019年,武汉长江存储科技有限公司开始进入小批量生产阶段;2020年,在128层3D-NAND(快闪存储器)技术上取得突破,达到国际先进水平。

合肥长鑫存储技术有限公司在2018年进入量产阶段,产品为19 nm、8 GB的第四代双倍数据速率同步动态随机存取存储器(DDR4)。

3) 封装能力。

中国封测企业的代表是长电科技、通富微电和天水华天,三者在世界排名中分别为第3、第6和第7。2019年,长电科技营收额为235.3亿元,在世界封测市场中的占有率为15%。

4) 设备能力。

部分刻蚀机、大部分离子注入机、扩散氧化和清洗设备可以由国产设备供给。

2.2.4 产业短板

1) 高端芯片对外依存度高。进口微处理器/控制器(占世界半导体产品市场11%)的金额从2014年的1052.2亿美元增长到2019年的1437.7亿美元,增加了385.5亿美元,增长比例为36.6%;进口半导体存储器(占世界半导体产品市场26%)的金额从2014年的542.8亿美元增长到2019年的947.0亿美元,增加了404.2亿美元,增长比例为74.5%。

2) 高端材料与设备自给率较低,在40~45 nm节点接近50%,在28 nm节点为30%,在7~14 nm

节点仅为5%。电子气体及金属有机物源(MO)对外依存度超过80%,化学机械抛光(CMP)的抛光液国产化率小于10%,溅射靶材大部分需要进口,用于大生产的300 mm的硅片至今主要依靠进口。

3) EDA软件尚难以与“三巨头”抗衡,成系统的国产EDA软件市场份额不足5%。

4) 缺少能够在世界市场中独树一帜的IDM型大企业。

5) 人才,尤其是高端的、具有综合管理能力的人才严重不足。

3 创新驱动发展

以上分析的集成电路产业短板和市场占有率不高的现状,促使我们要认真思考如何以创新驱动发展。十九届五中全会提出:“增强机遇意识和风险意识,立足社会主义初级阶段基本国情,保持战略定力,办好自己的事,认识和把握发展规律,发扬斗争精神,”为此,就“十四五”发展规划和2035年远景目标提出一些建议。

3.1 “摩尔时代”向“后摩尔时代”转变

随着物联网、大数据、云计算、人工智能和量子计算的发展速度越来越快,对集成电路创新量的需求也越来越多,质的需求也越来越高。

集成电路技术的创新路径如图27所示。一般来说,人们将16 nm非经典CMOS作为基础器件以后的时代称为“后摩尔时代”。随着加工尺寸的不断缩小,微电子学科正在转向纳电子学科,“摩尔时代”正在转向“后摩尔时代”,沿着延续摩尔、拓展摩

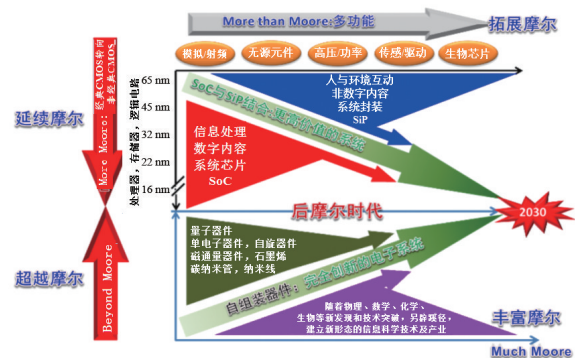


图27 后摩尔时代集成电路的发展

尔、超越摩尔与丰富摩尔的路径不断向前发展。

1) 延续摩尔(More Moore)。

集成电路加工的特征尺寸以及芯片上集成的晶体管数将继续沿着摩尔预测的规律发展。从图28可以看出,最早的集成电路特征尺寸为10 μm,随着加工技术的进步,集成电路的特征尺寸呈规律缩小,尤其在0.8 μm以后,该规律呈现为:相邻两代技术节点的特征尺寸呈 $1:1/\sqrt{2}$ 的关系。特征尺寸继续缩小主要表现在系统芯片 SoC(system on

chip)上。特征尺寸每缩小至上一节点的70%,芯片性能可以提高15%,面积减少50%,功耗降低40%,成本减少35%。

2) 拓展摩尔(More than Moore)。

拓展摩尔的主要表现形式是发展集成微纳系统(如MEMS, NEMS)和系统封装(System in Package, SiP),即将不同工艺、不同功能的器件(模拟、射频、高压、功率、传动、驱动、生物等)封装在一个集成电路中,形成多功能集成系统。

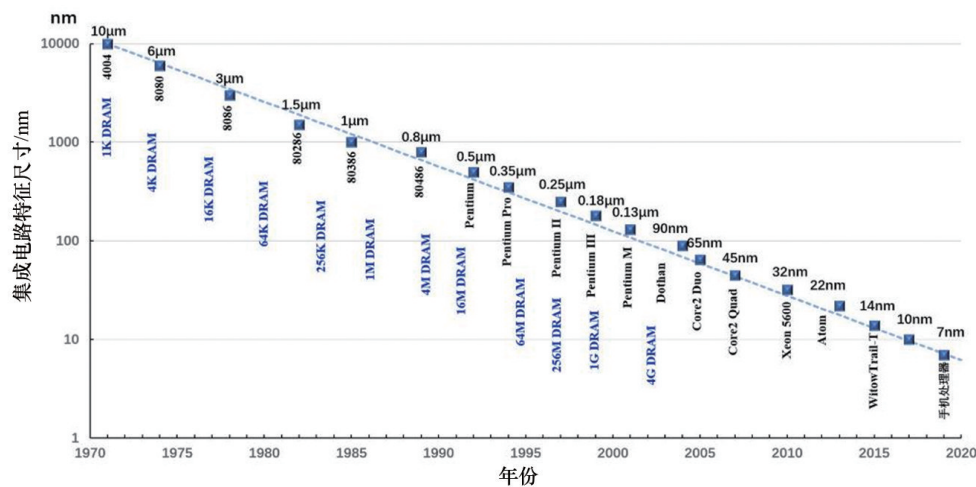


图28 集成电路特征尺寸的缩小及相应典型产品(根据公开资料整理)

3) 超越摩尔(Beyond Moore)。

主要是各种新器件的研发,包括量子器件、单电子器件、自旋器件、磁通量器件、石墨烯器件、碳纳米管、碳纳米线等。

4) 丰富摩尔(Much Moore)。

建立新形态的信息科学技术及产业。

3.2 增强原始创新能力

2020年9月11日,习近平总书记在科学家座谈会上的讲话中指出:“基础研究是科技创新的源头。在激烈的国际竞争面前,在单边主义、保护主义上升的大背景下,我们必须走出适合国情的创新路子,特别是要把原始创新能力提升摆在更加突出的位置。”

一部集成电路发展史就是一部原始创新的发明史(图29)。在材料、器件结构和专用设备的创新中,正在研发、并期待进入量产阶段的关键技术有:

专用材料:高频、高速、高功率、抗辐照、耐高温器件使用的化合物半导体材料,包括III-V族(GaAs、GaN、InP)、II-VI族(ZnS、CdTe)、IV-IV族(SiC)、氧化物半导体(ZnO、Ga₂O₃、NiO、MoO₃)等;新型互连材料(钴Co、钌Ru、碳纳米管);碳基材料(石墨烯,碳纳米管);纳米线材料以及量子线材料等。

器件结构:垂直场效应晶体管(VFET)、互补场效应晶体管(CFET)、围栅场效应晶体管(GAAFET)、隧道效应晶体管(TFET)、自旋场效应晶体管(SFET)、磁阻存储器(MRAM)、阻变存储器(RRAM)、相变存储器(PCRAM)、量子集成电路(quantum IC)及生物医学芯片(biomedical chip)等。

专用设备:最主要是7 nm以下工艺必备的EUV,且要不断提高EUV的数值孔径(numerical aperture, NA)。

微电子研究中心(IMEC)发布的最新技术路线

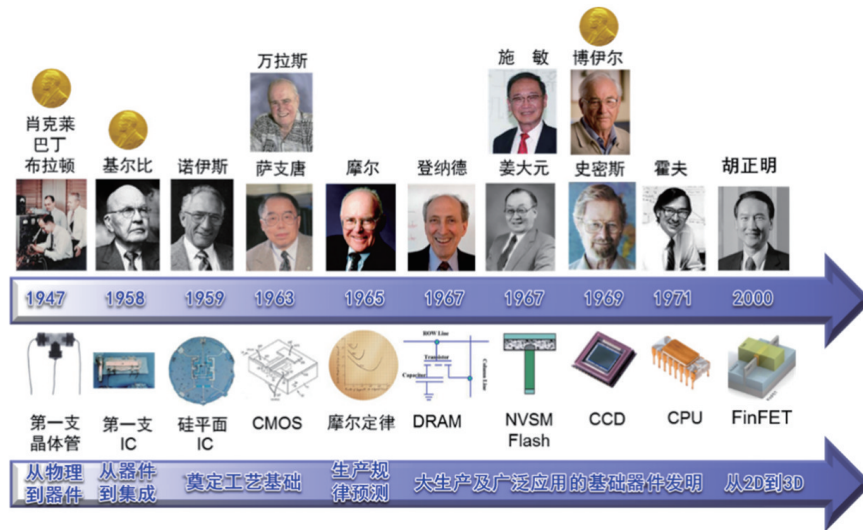


图29 集成电路技术与产业的重要发明和预测

如图30所示。其中表明,在28 nm技术节点上,采用了高K金属栅(HKMG)工艺;在16 nm/14 nm节点之后,器件结构开始转向3D的FinFET。从7 nm/5 nm节点开始,钴代替铜成为互连的新型材料,同时,0.33 NA的EUV正式投入生产;围栅晶体管结构将部分取代FinFET结构,成为主流产品结构。

2005年,北京大学微纳电子研究院的年轻团队就对围栅器件结构、基础理论、输运特性和可靠性进行了全面研究,取得了在世界范围内最早的研究成果。按目前预测,韩国三星公司在3 nm技术和台积电2 nm技术节点上都将采用围栅结构,且

在2~3年内实现量产。北京大学微纳电子研究院还正在进行隧道效应晶体管等多种超低功耗器件的新结构、新原理研究,隧道效应晶体管正在中芯国际进行量产试验,有可能在3~5年内用于低功耗物联网系统中。

清华大学的可重构设计是芯片架构设计的原始创新,已开始Intel的产品开发中得到应用。

从4 nm/3 nm节点开始,采用“半镶嵌”(semi-damascene)技术的钌将成为主流互连材料,EUV的数值孔径将从0.33提升到0.55,纳米片(nanosheet)结构的产品开始进入批量生产流程。

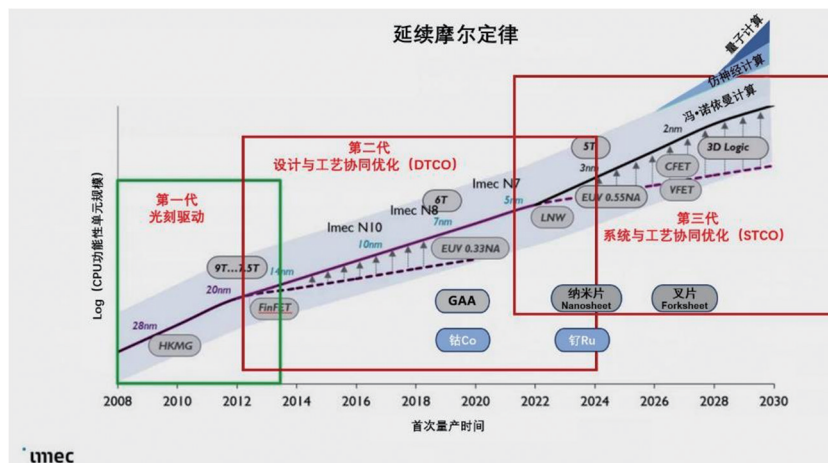


图30 IMEC最新技术路线

(根据IMEC在ITF(2017—2020年)上发布的最新路线图多图综合整理)

在 2 nm 技术节点上,将采用叉片(forksheat)结构,其中 n 型和 p 型纳米片紧密地靠在一起,并且其间有一层“绝缘墙”,因其截面类似于餐叉得名。同时,通过 3D 堆叠形成的垂直场效应晶体管(VFET)、互补场效应晶体管(CFET)结构将大大减小标准单元的面积,以这种结构设计的集成电路产品开始量产。

图 30 还表明,作为延续摩尔定律的第一代技术为光刻驱动,第二代技术中加入了设计与工艺协同优化(DTCO)的内容,第三代技术则再加入系统与工艺协同优化(STCO)的举措。图 31 为器件结构路线示意。

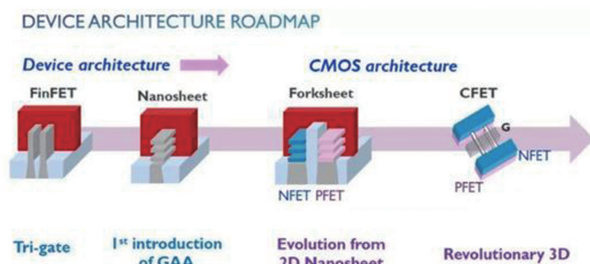


图 31 器件结构路线示意(资料来源:IMEC)

3.3 加强基础技术研究

1) 根据集成电路从研发到批量生产 10 年跨度的规律,对关键的基础技术研究要提前 10 年进行部署。要对“10 年坐冷板凳”的基础技术研究人员给予特殊政策,不应追求“急功近利”的结果,更不能以论文论英雄。

2) 基础研究要实行产、教、研紧密结合,特别要注重激发企业研发的活力,以扩大基础研究成果的转化渠道和缩短转化进程,实现在人才交流、成果共享等多方面的渗透、交叉与融合,不要让研究成果仅仅停留在论文上。以 FinFET 为例,由于 Intel 成功应用,从而驱动了全球集成电路技术由 2D 登上了 3D 的阶梯。

3) 加强低功耗器件研究。对小于 7 nm 工艺的逻辑器件而言,要坚持两条腿走路,一方面要加强新结构、新原理、新材料的创新研究,另一方面要看到今后集成电路的技术进步节点将不再以特征尺寸为标尺,而以提高系统的性能/功耗比为切入点,降低功耗成为重要指标。

从经济角度看,也不必单纯地以缩小特征尺寸为唯一追求目标。图 32 为台积电不同工艺对 2018 年营收的贡献,可以看出,当前,10 nm 以上工艺的贡献为 80%,也就是说,从企业经营的角度看,大于 10 nm 工艺的产品现在仍是对企业营收贡献的主流。

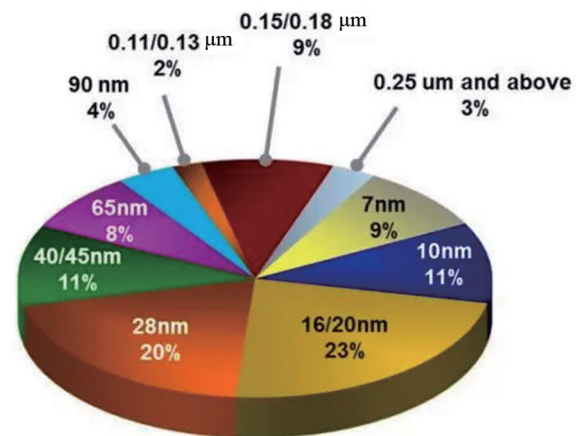


图 32 2018 年, TSMC 不同工艺对营收的贡献

4) 延展基础研究的广度,争取在模拟电路、数模混合电路、射频电路、功率电路、微纳机电系统等领域取得技术和市场的领先地位。

5) 加强基础研究的国际合作,融入国际化的集成电路产业链中。以中芯国际的创建为例,1999 年以前,中国的集成电路产业投资者单一,无锡工程、908 工程、909 工程均为国家投资;市场单一,仅为国内市场;人才单一,绝大多数技术专家和企业管理者均为国内人员。2000—2009 年,笔者在和张汝京博士创建中芯国际和任董事长期间,与海内外同仁一道,使中芯国际真正在机制、市场、技术、投资和人才各个方面都实现了国际化。

4 迈向产业强国

4.1 发展目标预测

预测到 2035 年,发展目标达到以下水平。

1) 以 2019 年世界半导体市场 4123.06 亿美元,中国集成电路产业销售额(三业叠加)7562.3 亿元(1096 亿美元)为基数进行测算:

2019—2035 年,世界集成电路市场年平均增

长率设为5%(2009—2019年为6.18%),至2035年,市场总额达到9000亿美元;

2019—2035年,中国集成电路产业销售额年平均增长率设为10%(2009—2019年为21.04%),至2035年达到5037亿美元(设计、制、造封装三业叠加),其值为世界市场的56%(非占比)。

按WSTS的统计标准,中国集成电路产业的销售总额占世界市场的比例由5%提高到30%,跻身集成电路产业强国的行列。

2) 国民经济领域需求的芯片自给率提高到80%。

3) 能够独立自主地设计和生产国家安全及国防建设所需的重要与关键集成电路产品,自给率达到100%。

4) 拥有大量的微电子技术专利、自主知识产权产品标准,建成具有中国特色的集成电路研发体系,为本土企业提供知识产权保护。

5) 以关键设备和主要材料为标志的集成电路支撑行业能够基本满足产业发展需要,集成电路产业专用设备不再受制于人。

6) 集成电路大生产技术水平与国际先进水平同步,实现2~1 nm技术节点工业化大生产技术突破。

7) 在基础研究领域,原始创新能不断地涌现,在新器件结构、新材料、新工艺研发和生产的某些领域引领世界发展潮流。

4.2 对实施举措的建议

1) 以10倍于当今的投资强度,持续加大对集成电路产业的投资力度。一是在世界半导体市场增长率下降的低谷期进行投入;二是要加强创新投入,尤其是对基础研究的、不求短期回报的投入;要加强对国家投资的调控能力,必须将有限的资金在有限的时间和有限的空间内集中使用,切不可在地域或部门的利益分配中,避免造成资金的游移、分散和迟延现象,坚决杜绝低水平重复建设。

2) 以性能功耗比作为标尺,以3D集成为发展方向,沉下心来进行器件结构、材料、EDA算法等基础研究工作,使其能够产生革命性的创新成果。要扩展研究成果转化为生产力的渠道,缩短研究成

果转化为生产力的时间,使其在产业发展中产生价值,同时要注重科研成果的知识产权保护工作。

3) 以举国之力攻克最重要的材料(硅圆片、电子气体)、设备(曝光机)难关,努力提高国产EDA软件的系统集成水平,扩大其在国内外市场的占有率。

4) 建设1~2家IDM型企业,缩短设计与制造间的流程,缩短产品与系统应用的距离。该企业能够在3~5年内做到生产线装备和生产材料来自多元和自主可控,不再受任何霸凌者的制约。

5) 国际合作是大趋势,对于一般材料和设备的研发或采购,要融入国际产业链和生态链,构建国内国际双循环的发展格局。

6) 加大贯彻执行《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》的力度,各地区、各部门要尽快出台《若干政策》中关于财税、投融资、研究开发、进出口、人才、知识产权、市场应用以及国际合作的实施细则。尤其要对从事集成电路产业和研发等相关工作的人才所得税提供优惠政策。

7) 结合集成电路科学与工程学科的建立,将集成电路专业人才的培养规模扩大到当前培养人数的10倍。改革教育和培养方式,在培养理科博士的同时,加强工程博士的培养,尤其要注重复合型、创新型人才的培养。给予创新领军人才更大的技术路线决定权和经费使用权。要建设一支来自产业和学校共同组成的教师队伍,与产业发展进一步融合。改变对专业人才的评价体系,破除“唯论文、唯帽子、唯职称、唯学历、唯奖项”的观念,要强调人才对科学前沿、国家战略需求和经济主战场上的贡献,创造一种留住人才、保护人才的机制和环境。

4.3 实现强国梦想

在人类发展的历史上,迄今国家与国家之间的竞争从未终止,无论是表现为和平方式的巧取,还是表现为战争方式的豪夺。为了维护国家利益,核心技术已经成为国家间竞争最重要的砝码。为此,任何一个国家都不会向他国出售本国的以核心技术构成的核心竞争力。在以集成电路和软件为基

础的信息时代,在全球已经联网的智能社会,集成电路正在成为国家安全的重要屏障。

“强自立,弱被欺”,是历史、也是现实世界的真实写照。1820年,中国是世界第一大国。由于没有跟上工业社会发展的步伐,1840年鸦片战争以后,在中国上演了无数被外夷凌辱和欺侮的悲剧。进入21世纪后,中国的经济飞速发展,中国的国际

政治地位不断提高,中国的和平崛起,实现以合作共赢为目的的国际外交政策,中华民族的复兴已成为当今中国发展的主旋律。相信历经200年的马鞍型曲折,在驾驭信息社会的浪潮中,一定能够在中华民族的复兴之路上实现强国的梦想,中华民族的才智将展现更加灿烂的辉煌(图33)。

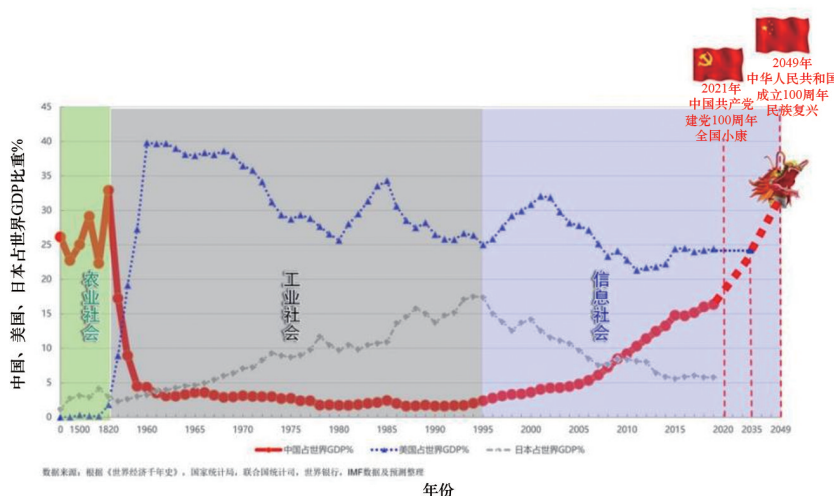


图33 中国、美国和日本占世界GDP的比重

致谢:北京大学软件与微电子学院微电子发展战略研究室主任王永文研究员在分析数据、总结规律等方面鼎力相助。

Solidly promoting the integrated circuit(IC) industry of China: Mastering law and adhering to innovation

WANG Yangyuan

Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China

Abstract This featured article aims to discuss the strategic characteristics of the integrated circuit(IC) industry and summarize the development law of IC investment, technology and market. By reviewing the pathway developed in the past decades of China’s IC industry, the current status, industrial competence and various limitations are analyzed, the forward directions of fundamental research and production technology of IC industry are therefore pointed out. It is emphasized that innovation is the source of development. The advancing goal of China’s IC industry in 2035 and corresponding suggestions are proposed in terms of policy decisions, investment opportunities, talent needs and training, etc.

Keywords integrated circuit(IC); integrated circuit industry; basic research ●



(责任编辑 王丽娜)