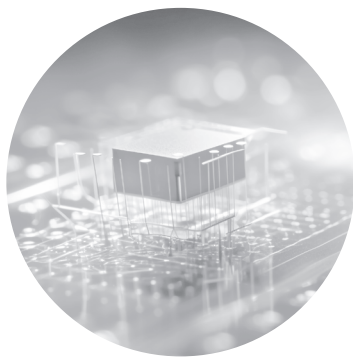
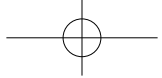




第 1 篇

机遇篇：

半导体芯片全球 进程与智造机遇



第 1 章 集成电路推动全球 GDP 增长与工业革命

第 2 章 美国科技制裁与中国自主替代

第 3 章 集成电路与新信息技术交叉融合的智造机遇





第 1 章

集成电路推动全球 GDP 增长与工业革命

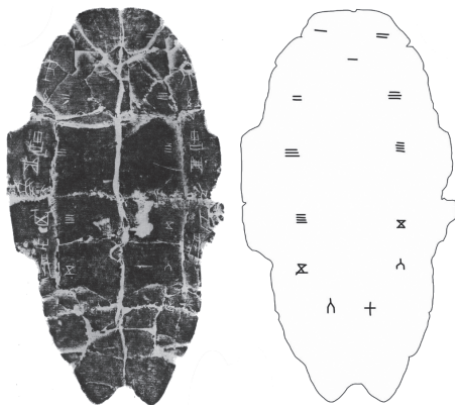
1.1 集成电路推动全球 GDP 增长三十年与中国成就

1.1.1 半导体集成电路一直所处的战略领地

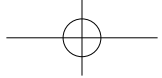
1) 底层计算逻辑与其本质结构有关

所谓半导体，是指一种导电性能介于导体和绝缘体之间的材料，它的电阻比导体大得多，但又比绝缘体小得多，其电学性能可以人为加以改变。许多电气和电子设备有两种状态：关闭或开启（例如电灯开关），真空管和晶体管都是如此，以 0 和 1 来代表开关的断开和闭合。逻辑是数字电路的精髓，所有的功能归根结底都是逻辑功能，而逻辑的基本构成元素是逻辑 0 和逻辑 1。通过半导体材料制造出的晶体管恰好具备这种功能——通过电信号来控制自身开合，这使计算机可以理解两个数字：0 和 1，并在其中完成所有二进制模式的算术运算。二进制是机器语言，计算机使用它来处理、读取和写入数据，半导体这一属性奠定了整个数字时代的计算基础。

如图 1-1 所示，物质基本的结构属性在很大程度上决定了计算的规则，比如人类计数最为常见的十进制和计算机基于半导体属性的二进制。



(a) 公元前 13 世纪人类基于十指的十进制计数



(b) 现代计算机基于半导体 0 与 1 结构的二进制计数

图 1-1 人类的十进制与计算机的二进制

资料来源：中国珠算博物馆

在人类的语言中，广泛使用 0 ~ 9 这 10 个数字符号进行记数，这也是我们日常生活中使用最多的进位制——十进制。在各个古文明中都有使用十进制记数的历史，例如，从我国古代公元前 13 世纪的甲骨文中，就找到了十进制的记数符号。为什么人类使用十进制而计算机语言使用二进制呢？这可能源于人类十指的生理结构特点，原始社会的人类学会使用简单工具进行捕猎获得生存，但还只会使用简单的语言交流，计数是交流中的重要内容（比如获得的猎物数量或剩余的食物数量等），那么辅以手指来计数是最自然的。计算机的二进制也跟“硅基生命”的“生理结构”有关，如上所述，是半导体的开关形成了 0 与 1 的特征，所以就有了二进制。二进制在半导体出现后成为计算机的底层计算语言并获得了广泛认知，但二进制在我国历史上同样历史久远，0 和 1 如同中国古代《易经》提出的阴和阳两种状态，通过阴和阳的两两组合，又形成了《易经》的六十四卦象。《易经》的这些符号，引起了数学家莱布尼茨的兴趣，他在 1703 年就发表了《论只使用符号 0 和 1 的二进制算术，兼论其用途及它赋予伏羲所使用的古老图形的意义》^①，使用现代数学语言的方式阐述了二进制。随后又过了 200 年，在 1904 年，全球第一个基于二进制特征电子管的英国被发明出来。技术的进步是人类文明发展的根本动力，其发展的过程与突破都遵循一定的逻辑与规律，或许未来随着新材料结构的发现，人类可以发明出更低能耗、更小空间占用，却有更大规模和更高效的新进制算法。

^① 戈特弗里德·威廉·莱布尼茨（Gottfried Wilhelm Leibniz, 1646—1716）的一篇关于二进制与中国伏羲八卦图的论文。原文于 1703 年完成，最初于 1705 年发表在巴黎出版的《1703 年皇家科学院年鉴》。

2) 半导体的科学探索

半导体产业的发展经历了科学探索与技术发明这两个过程。表 1-1 阐述了半导体四个特征的发现过程。

表 1-1 半导体四个特征的科学探索里程碑

序号	年份	发现过程
1	1833	英国科学家迈克尔·法拉第在测试硫化银的特性时，发现了硫化银的电阻随着温度的上升而降低的特异现象，这被称为电阻效应，是人类发现的半导体的第一个特征
2	1839	法国科学家埃德蒙·贝克雷尔发现半导体和电解质接触形成的结，在光照下会产生一个电压，这就是后来人们熟知的光生伏特效应，简称光伏效应。这是人类发现的半导体的第二个特征
3	1873	英国的威洛比·史密斯发现硒晶体材料在光照下电导增加的光电导效应，这是人类发现的半导体的第三个特征
4	1874	德国物理学家费迪南德·布劳恩观察到某些硫化物的电导与所加电场的方向有关。在它两端加一个正向电压，它是导电的；如果把电压极性反过来，它就不导电。这就是半导体的整流效应，这是人类发现的半导体的第四个特征。同年，出生在德国的英国物理学家亚瑟·舒斯特又发现了铜与氧化铜的整流效应

资料来源：基于半导体发展史整理

图 1-2 是发现半导体特征的四位科学家。



图 1-2 发现半导体特征的四位科学家

资料来源：Wikipedia 半导体

3) 半导体的技术发明与中国事件

当人类的科学探索达到一定的阶段，应用其成果进行技术发明就应运而生。为了有一个新的视角一览中西的发展进程，表 1-2 简单罗列了世界半导体技术发明的重大事件和当时中国重要事件的对照。这个对照告诉我们，科学探索与技术发明都有历史的脉络与进展，既需要勇于探索的精神，也需要坚韧的意志，当然

还需要时间。很多半导体集成电路产业的专业人士也反复强调，发展芯片是一个长期的过程，容易发现的都被发现了，容易发明的也都被发明了，难以发现和发明的只会难上再难。

表 1-2 半导体技术发展里程碑与中国重要事件对照

序号	年份	半导体技术发明里程碑	中国重要事件
1	1904	英国物理学家约翰·安布罗斯·弗莱明发明了世界上第一个电子管，它是一个真空二极管	上海成立光复会，蔡元培被推选为会长，后任北大校长
2	1906	美国工程师李·德·福雷斯特在弗莱明真空二极管的基础上又多加入了一个栅极，发明了真空三极管，使得电子管在检波和整流功能之外，还具有放大和振荡功能。真空三极管被认为是电子工业诞生的起点	● 京汉铁路全线正式通车 ● 上海理工大学的前身浸会神学院创办
3	1945—1953	● 1945 年，二战结束，美国获得了大量先进技术 ● 1947 年，美国贝尔实验室的肖克利、巴丁和布拉顿组成的研究小组，研制出一种点接触型的锗晶体管。晶体管发明是微电子技术发展历程中第一个里程碑。由于电子管具有体积大、耗电多、可靠性差的缺点，最终它被后来的晶体管所取代 ● 1950 年，图灵^①发表《计算机与智能》(Computing Machinery and Intelligence) 论文，文中阐述了“模仿游戏”的设想和测试方式，也就是大家后来熟知的图灵测试。这篇文章是对机器模仿人类智能的深度思考和系统论述 ● 1953 年，日本东京通信工业公司从美国西屋电气引进晶体管技术，生产出索尼第一款收音机	● 1949 年，中华人民共和国成立后组建科学院，郭沫若为院长 ● 1950 年，科学院第一批研究所成立 ● 1953 年，自主开展抗生素研究工作
4	1955—1956	● 1955 年，肖克利、巴丁、布拉顿三人，因发明晶体管同时荣获诺贝尔物理学奖。肖克利也被誉为晶体管之父。肖克利于 1957 年创立仙童半导体公司，成为美国半导体精英的摇篮，支撑起硅谷崛起的“神话” ● 1955 年，麦卡锡、明斯基等科学家在美国达特茅斯学院研讨“如何用机器模拟人的智能”，会前提出的 AI (Artificial Intelligence) 概念形成共识，标志着 AI 学科的诞生，这一年也被称为 AI 元年	● 1955 年，成立中国科学院学部，编制中国科学院 15 年发展远景计划 ● 1956 年，成立中国科学院院章起草委员会 ● 1956 年，《关于知识分子问题的报告》指出：为了实现社会主义工业化，必须依靠体力劳动和脑力劳动的密切合作，依靠工人、农民、知识分子的兄弟联盟。全国开始出现“向科学进军”的新气象

① 图灵 (Alan Turing)，英国计算机奇才、密码学家、逻辑学家、计算机与 AI 之父。

续表

序号	年份	半导体技术发明里程碑	中国重要事件
5	1958	● 美国仙童公司的罗伯特·诺顿·诺伊斯^①与美国德州仪器公司的杰克·基尔比^②间隔数月分别发明了集成电路，开创了世界微电子学的历史，基尔比因为发明集成电路而获得 2000 年的诺贝尔物理学奖 ● 诺伊斯在基尔比发明的基础上，发明了可商业生产的集成电路，使半导体产业由“发明时代”进入了“商用时代”	● 获得第一根硅单晶 ● 第一批锗高频晶体管问世 ● 研究性核反应堆和加速器建成 ● 提出早期的人造卫星研制计划 ● 成立中国科学技术大学 ● 各地纷纷建立中国科学院分院 ● 成立中国科学院原子核科学委员会 ● 光机所研制完成“八大件” ● 第一座电视台——北京电视台开播，它是中央电视台的前身
6	1961—1963	1962 年，美国无线电公司（RCA）的史蒂文·霍夫施泰因与弗雷德里克·海曼研制出了可批量生产的金属氧化物半导体场效晶体管 ^③ ，并采用实验性的 16 个 MOS 晶体管集成到一个芯片上，这是全球真正意义上的第一个 MOS 集成电路	● 1961 年，中科院组织星际航行座谈会，裴丽生、钱三强赴东北安排与原子弹研制有关的任务。中国第一台红宝石激光器研制成功。承接高效能炸药研制任务 ● 1963 年，中科院成立星际航行委员会。中国硅平面型晶体管诞生。研制成功一种高温黏合剂和一种空对空红外测向装置
7	1964	● 英特尔公司创始人之一的戈登·摩尔提出著名的摩尔定律，在到现在 60 多年的发展过程验证了这一预测基本还是准确的 ● 开始制造硅基新器件集成电路，由于其廉价可靠，快速推动了半导体行业的发展	
8	1997	半导体发展使 AI 取得突破性进展，每个芯片集成 1500 万个晶体的 IBM 深蓝超级计算机战胜了国际象棋世界冠军卡斯帕罗夫	国家科技领导小组第三次会议决定制定和实施《国家重点基础研究发展规划》。随后，国家重点基础研究发展计划（又称“九七三计划”）实施

资料来源：基于半导体发展史与中科院编年史编辑

① 罗伯特·诺顿·诺伊斯（Robert Norton Noyce，1927—1990），仙童半导体公司和英特尔的共同创始人之一，有“硅谷市长”“硅谷之父”的绰号。诺伊斯也是电子器件集成电路的发明者之一。

② 杰克·基尔比（Jack Kilby，1923—2005），集成电路的两位发明者之一。1958 年，他成功研制出世界上第一块集成电路。2000 年，基尔比因集成电路的发明被授予诺贝尔物理学奖。这是一个迟来 42 年的诺贝尔物理学奖。迄今为止，正全面改造人类的个人计算机、移动电话等，皆源于他的发明。

③ 金属氧化物半导体场效晶体管（Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor，MOSFET）是一种可以广泛使用在模拟电路与数字电路的场效晶体管（Field-Effect Transistor）。

4) 半导体、集成电路与芯片的关系

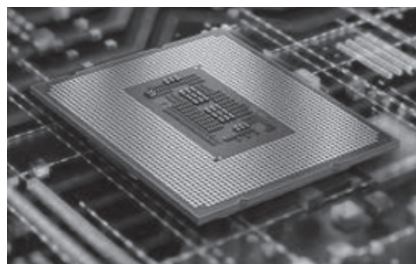
在业界，半导体、集成电路与芯片经常混用。老牌公司经常爱称自己为半导体公司，显然这是一个更为悠久而广泛的疆界；而新一代公司却乐于称自己是元宇宙公司，他们更愿意畅想未来无限的可能。半导体与集成电路有时候称为产业，有时候又称为行业，芯片又经常作为集成电路的统称。为了理清三者之间的关系，表 1-3 列出了半导体、集成电路与芯片的定义与关联。

表 1-3 半导体、集成电路与芯片的定义与关联

	半导体（Semiconductor）定义：在室温下其导电性介于导体与绝缘体之间的一种材料，如硅、砷化镓与碳化硅 集成电路（Integrated Circle，IC）定义：使用半导体材料，通过集成工艺生产制造的、不可分割的微型电子器件或部件 芯片（Chip）定义：通过切割、测试、封装，提供给特定客户实现特定功能的元器件成品	
集成电路	模拟器件	信号链和电源管理两大类
	逻辑器件	可编程逻辑器件：PLD、PLA、PAL、FAL、CPLD、FPGA、ASIC
	微处理器	x86、ARM、RISC-V 架构
	存储器	DRAM、SRAM、EEPROM、NOR FLASH、NAND FLASH、EMMC、UFS
分立器件	二极管	几乎所有电子电路中都有二极管的存在
	三极管	具有电流放大作用，是电子电路的核心组件
	功率半导体器件	广泛于工业、汽车、轨道牵引、家电等各个领域
	电容 / 电阻 / 电感	电容、电阻和电感并称为三大被动组件
光电器件	光敏电阻、光电二极管、光电三极管、光电池、光电管、光电倍增管	
传感器	热敏组件、光敏组件、气敏组件、力敏组件、磁敏组件、湿敏组件、声敏组件、色敏组件、味敏组件、放射线敏感组件	

资料来源：作者根据网络数据编辑

半导体主要由四个部分构成：集成电路、分立器件、光电器件、传感器。由于集成电路又占了器件 80% 以上的份额，因此通常将半导体和集成电路等价。集成电路按照产品种类又主要分为四大类：模拟器件、逻辑器件、微处理器、存储器。通常我们统称它们为芯片，芯片是由晶体管组成的，严格意义上讲，晶体管泛指一切以半导体材料为基础的单一组件，包括各种半导体材料制成的二极管、三极管、场效应管、可控硅等。晶体管有时多指晶体三极管。图 1-3 展示了英特尔自发布全球第一款 CPU 后 50 年的性能巨变。



(a) 英特尔于 1971 年发布世界上第一款 CPU 4004 (b) 50 年后的 2021 年，英特尔发布 12 代酷睿 CPU，其晶体管数量约是前者的 5 万倍

图 1-3 英特尔自发布全球第一款 CPU 后 50 年的性能巨变

资料来源：英特尔官网

英特尔是集成电路发展史的代表，让我们来简单回顾一下：

- 1971 年，英特尔推出了它的第一款处理器：4004，它使用 10 微米制程，是一款 4 位的处理器，集成了 2250 个晶体管，每秒运算 6 万次，关键是成本得以控制在百美元之内。它虽然弱小，但意义重大。它被时任英特尔公司 CEO 的戈登·摩尔称为“人类历史上最具革新性的产品之一”，实现了从 0 到 1 的突破。
- 1978 年，英特尔推出了一款 16 位的处理器：8086。
- 1979 年，英特尔又推出了 8088，它是第一个成功应用于个人计算机的 CPU。
- 1982—1989 年，陆续推出了 80286、80386、80486 微处理器。
- 1993 年 3 月，英特尔正式发布了自己的第五代处理器 Pentium，并有一个响亮的中文名“奔腾”。这颗俗称 586 的处理器可以让用户更简单地处理语音、图像和手写任务。于是我们迎来了微软的 Windows 3.x 的视窗操作系统，从此行业里面有了 WinTel（Windows+Intel）联盟一说。
- 1995 年，“奔腾 Pro”发布，内置 550 万个晶体管，专为 32 位服务器和工作站应用设计，可以大大提速计算机辅助设计、机械工程和科学计算。
- 2005 年，酷睿走进大众的视野，酷睿 i3、i5、i7 成为个人计算机的主流。
- 从第一颗 CPU 算起，50 年后的 2021 年，英特尔最新的 12 代酷睿 CPU 采用 7 纳米工艺，集成了数十亿个晶体管，比 4004 提升了近五万倍。
- 2022 年，英特尔发布了英特尔 Core i9-12900KS 桌面异构微处理器，拥有 30MB 高速缓存，可提供 8 个性能核心和 8 个效率核心。性能核心（P-core）支持超线程，可同时处理 24 个线程。性能内核的频率最高可达 5.5 GHz（Turbo Boost Max 3.0）。

5) 又长又宽的集成电路产业

集成电路作为半导体产业的核心，技术错综复杂，产业结构高度专业化。随着行业规模迅速扩张，产业竞争加剧，分工模式不断细化。半导体产业的整个价值链有着明显的区域专业化特征，也反映了各国在集成电路领域的竞争比较优势。

- 美国由于拥有顶尖的大学和大量优秀的工程人才，设立了很多研究机构并建立了完善的产业链生态，商业模式也非常健壮，有大量芯片设计软件公司、芯片设计公司。
- 东亚大部分地区拥有良好的基础设施、成本效率和熟练的工人，加上政府的补贴，可以在晶圆制造和材料生产上发力。
- 欧洲则在尖端的研发密集型领域发挥着重要作用（例如，荷兰的 ASML 公司处于世界领先地位，英国的 ARM 公司是芯片知识产权的核心），并有强大的基础研究（例如，比利时的 IMEC^①、法国的 CEA-Leti、荷兰的 TNO 和德国的 Fraunhofer 等研究中心），还与大学建立了广泛的研究联盟。

由于半导体涉及的技术过于宽泛，其产业的专业化与资源能力分布的全球化明显，随着产能的不断攀升，其整个全球价值链上的公司之间的依赖性也越来越强。例如：ASML EUV 光刻机需要超过 10 万个零配件，而且很多还是定制的；美国的 F-35 隐形战机需要超过 20 万个零配件，整机拥有超过 3500 个集成电路和 200 种不同的芯片。

表 1-4 为按类型和收入划分的全球主要半导体公司。

表 1-4 按类型和收入划分的全球主要半导体公司

序号	地区	公 司 名 称	公 司 类 型	收入（单位：亿美元）
1	美国	英特尔（Intel）	IDM ^②	780
		应用材料（Applied Materials）	设备公司	230
		科磊（KLA）	设备公司	60
		格罗方德（Global-Foundries）	晶圆代工厂	50

① 微电子研究中心（Interuniversity Microelectronics Centre, IMEC）是一个科技研发中心，创办于 1984 年，位于比利时。它拥有来自全球近 80 个国家的 4000 多名研究人员，是世界领先的纳米电子和数字技术领域研发和创新中心。作为全球知名的独立公共研发平台，IMEC 是半导体业界的标志性研发机构，拥有全球先进的芯片研发技术和工艺，与美国的 Intel 和 IBM 并称为全球微电子领域的“3I”，与英特尔、三星、TSMC、高通、ARM 等全球半导体产业链巨头有着广泛合作。

② 半导体芯片行业的三种运作模式，分别是 IDM（Integrated Device Manufacturer，垂直整合制造）、Fabless（没有芯片加工厂）和 Foundry（代工厂）模式。IDM 有 2C 的业务，而 Foundry 只有 2B 的业务。IDM 模式指从设计、制造、封装测试到销售自有品牌产品都一手包揽。

续表

序号	地区	公司名称	公司类型	收入（单位：亿美元）
1	美国	德州仪器（Texas Instruments）	IDM	150
		高通（Qualcomm）	无晶圆厂 / 设计公司	220
		超威（AMD）	无晶圆厂 / 设计公司	100
		科林（LAM Research）	设备公司	120
		英伟达（Nvidia）	无晶圆厂 / 设计公司	170
		美光（Micron）	IDM	210
		博通（Broadcom）	无晶圆厂 / 设计公司	240
		西部数据（Western Digital）	IDM	80
2	荷兰	阿斯麦（ASML）	设备公司	160
		先域（ASMI）	设备公司	20
		恩智浦（NXP）	IDM	90
3	瑞士	意法半导体（STMicro）	IDM	100
4	德国	英飞凌（Infineon）	IDM	100
5	中国	中芯国际（SMIC）	晶圆代工厂	40
		日月光（ASE）	封测公司	170
		联华电子（UMC）	晶圆代工厂	60
		联发科（Mediatek）	无晶圆厂 / 设计公司	110
		台积电（TSMC）	晶圆代工厂	460
6	日本	铠侠（Kioxia）	IDM	40
		瑞萨（Renesas）	IDM	60
		东京电子（Tokyo Electron）	设备公司	100
7	韩国	SK 海力士（SK Hynix）	IDM	270
		三星电子（Samsung Electronics）	IDM	580

注：公司名单以举例说明，并非详尽

资料来源：ING 基于研究对象公司报告^①

集成电路最初发展的强驱动力是满足军工的发展需求，特别是需要通过集成电路来制造精密、轻便、可靠的导弹电子导航系统。按照浙江大学吴汉明院士的提法，集成电路芯片的行业生态链“又长又宽”。集成电路大体上可分为设计、制造和封装测试。由于计算机从一开始就是集成电路的主要应用，因此数字集成电路已大行其道，从导弹的电子导航系统开始，我们看到，如今通过数字语言设计集成电路并实现其功能控制、同时与其他系统进行无缝通信的电子系统已是无处不在。

图 1-4 展示了“又长又宽”的集成电路全产业链。

① 所有收入均为 2020 年。三星收入数据为其半导体部门。西部数据的收入数据仅针对闪存部分。公司名单以举例说明，并非详尽无遗。

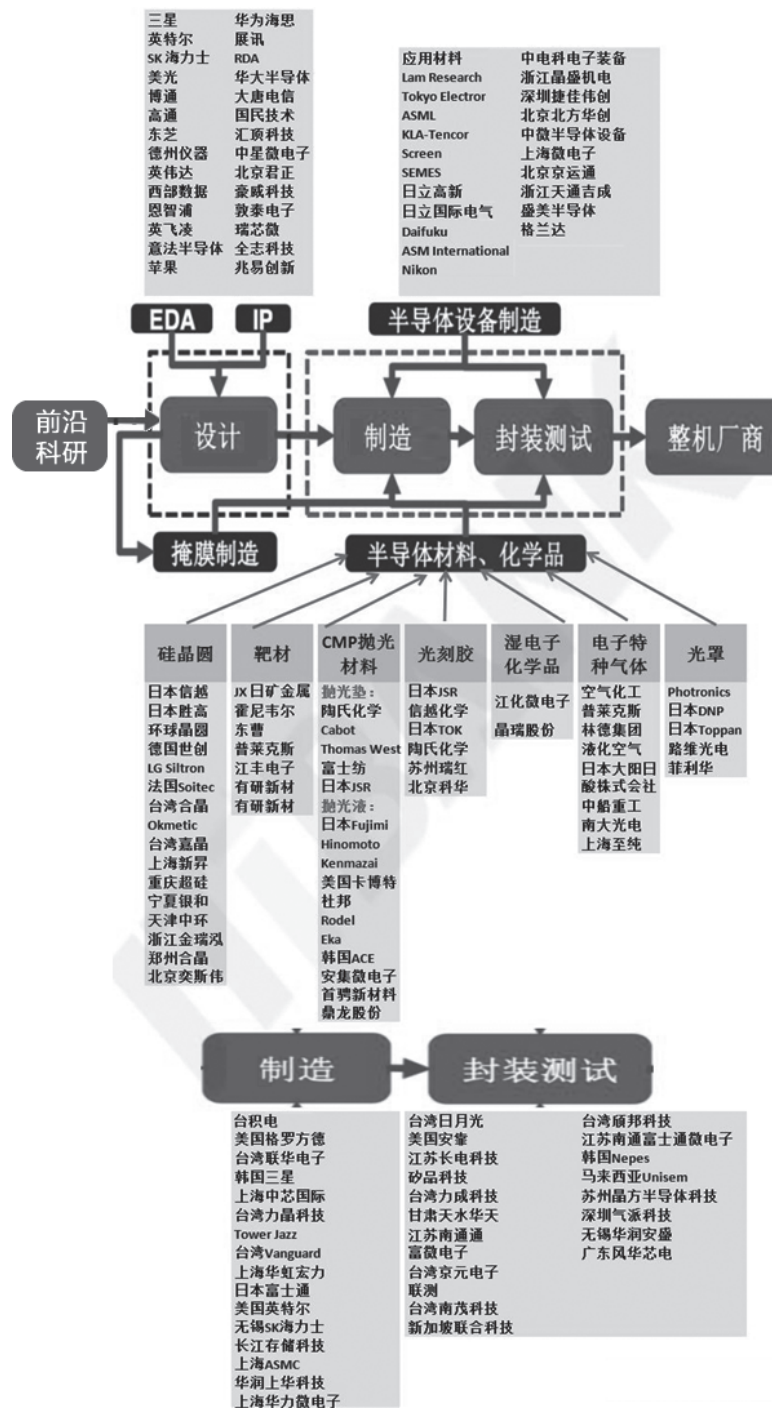
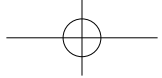


图 1-4 “又长又宽”的集成电路全产业链

注：公司名单以举例说明，并非详尽

资料来源：根据 ITTBANK@ 芯语制图加工

集成电路芯片对全球经济增长的价值非常明显。从行业组织和咨询机构来看,根据美国半导体协会(SIA)发表的数据显示,全球在2020年制造了约1万亿颗芯片,在2021年售出了约1.15万亿颗芯片,按全球2021年人口约为78亿计,每人可以分到147颗芯片。如今,每个家庭都可能拥有了上千颗芯片。例如,2021年生产一辆新能源汽车,由于电子化、智能化的需要,平均每辆车所需芯片数量已经达到了1000颗以上,而一部手机也需要有几百个电子组件。芯片的大量使用除了本身的市场价值外,其辐射效应十分明显。芯片普及进一步推动了全球经济的发展,据国际货币基金组织测算:1元的集成电路(芯片)产值将带动10元左右的电子产品产值和100元左右的国民经济增长。

如表1-5所示,在2017—2021年,全球前四的半导体企业名单相差不大,英特尔与三星一直排在前二,台积电与SK海力士在第3、第4的位置,美光、博通与高通的位置是在第5、第6、第7,倒是英伟达在取代东芝的位置后持续攀升。与CPU相比,英伟达通过GPU很好地解决了深度学习所需要的庞大算力问题,为AI发展作出了巨大贡献。而联发科也在2021年第一季度取代了德国的英飞凌排到了全球第十位。

表 1-5 2017—2021 年全球前十半导体企业榜单

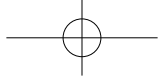
排名	2021 (第一季度)	2020	2019	2018	2017
1	英特尔(美国)	英特尔(美国)	英特尔(美国)	三星(韩国)	三星(韩国)
2	三星(韩国)	三星(韩国)	三星(韩国)	英特尔(美国)	英特尔(美国)
3	台积电(中国)	台积电(中国)	台积电(中国)	SK海力士(韩国)	台积电(中国)
4	SK海力士(韩国)	SK海力士(韩国)	SK海力士(韩国)	台积电(中国)	SK海力士(韩国)
5	美光(美国)	美光(美国)	美光(美国)	美光(美国)	美光(美国)
6	博通(美国)	高通(美国)	博通(美国)	博通(美国)	博通(美国)
7	高通(美国)	博通(美国)	高通(美国)	高通(美国)	高通(美国)
8	英伟达(美国)	英伟达(美国)	德州仪器(美国)	东芝(日本)	德州仪器(美国)
9	德州仪器(美国)	德州仪器(美国)	东芝(日本)	德州仪器(美国)	东芝(日本)
10	联发科(中国)	英飞凌(德国)	英伟达(美国)	英伟达(美国)	英伟达(美国)

资料来源: IC Insight 前瞻产业研究院整理

6) 集成电路在过去三十年推动全球 GDP 的增长

从半导体发展的历程来看,美国 SIA 和 BCG 在 2021 年 4 月发布的报告^①表明,自 1958 年发明集成电路以来,每块硅片上的晶体管数量增加了约 1000 万个,使处理器的速度提高了 10 万倍,并且在同等性能下,每年的成本降低了 45% 以

① 《在不确定的时代加强全球半导体供应链》(Strengthening the Global Semiconductor Supply Chain in an Uncertain Era)。



上。再加上工程上的创新，如先进的包装和材料技术，这使得电子器件的性能得到了提高。在 1995—2015 年，全球 GDP 中新增的 3 万亿美元与半导体创新直接相关，并产生了 11 万亿美元的影响。在过去三十年中，半导体行业经历了快速增长，并带来了巨大的经济影响。从 1990—2020 年，半导体市场以 7.5% 的复合年增长率增长，超过了在此期间全球 GDP 的 5% 的增长。半导体行业所带来的性能和成本的改善，使 20 世纪 90 年代从大型机到个人计算机的演变成为可能，21 世纪推出支持互联网架构的大型服务器集群后，半导体行业继续推动 2010 年以来智能手机的快速发展，使之成为每人口袋里的计算机。

从行业代表性企业的角度来看，2022 年 3 月，美国高盛发布数据推测 2021 年美国 GDP 的 12%，即约 2.76 万亿美元与台积电相关，依据台积电 2021 年度营收为 568.2 亿美元计算，其杠杆比例达到约 49 倍。在 2019 年的第二届全球 IC 企业家大会暨第十七届中国国际半导体博览会上，时任中国半导体产业协会理事长、中芯国际董事长周子学表示：半导体产业是宏观经济的晴雨表，其发展水平与全球 GDP 增速呈正相关。自 2018 年来，受全球贸易摩擦等外部因素影响，半导体产业也受到一定波及。尽管全球贸易体系面临挑战的不确定性在增大，但全球半导体产业同仁也在积极行动，协同应对。同时，全球半导体技术仍在遵循摩尔定律加速演进，超摩尔定律也在蓬勃发展。在技术持续进步的驱动和 5G、智能网联汽车、AI 等新兴市场海量需求的带动下，预计全球半导体市场会呈不断上升的趋势。

从行业学术机构的视角来看，在 2021 年的一个半导体产业峰会上，清华大学教授魏少军表示：1987—2002 年的 16 年里，全球 GDP 累计为 445.5 万亿美元，平均每年为 27.84 万亿美元。2003—2020 年的 18 年里，全球 GDP 累计达到 1221.4 万亿美元，平均每年 67.85 万亿美元，是前面 16 年的 2.44 倍。2000 年之后，以互联网技术、移动通信技术，尤其是二者的结合——以移动互联网技术为代表的信息技术产业的崛起，促进了全球经济的高速发展。

如图 1-5 所示：在最新 2022 年的 McClean Report 中，从全球 GDP 增速与半导体市场增速的对比来看，在这个三十年（1992—2021 年）的整体起伏趋势中，集成电路市场的较大跌宕是从 2019 年开始的，全球新冠疫情暴发后，其跌幅为 15%。随后的一年，全球 GDP 增速受到集成电路市场下行及疫情的影响，出现了历史最大跌幅 -3.6%。随着 2020 年集成电路市场触底反弹，提前释放和复苏并出现了 13% 的增长，再一次推动了全球 GDP 的增速达到了 2021 年的历史最高 5.4%，其中的一个主要原因是疫情之后，全球对数字经济有了更多的依赖，包括

近年大热的元宇宙^①概念。在可以预见的未来，尚不会出现能够替代集成电路的其他技术，所以这样的对比曲线在未来相当长的一段时间内都会延续。

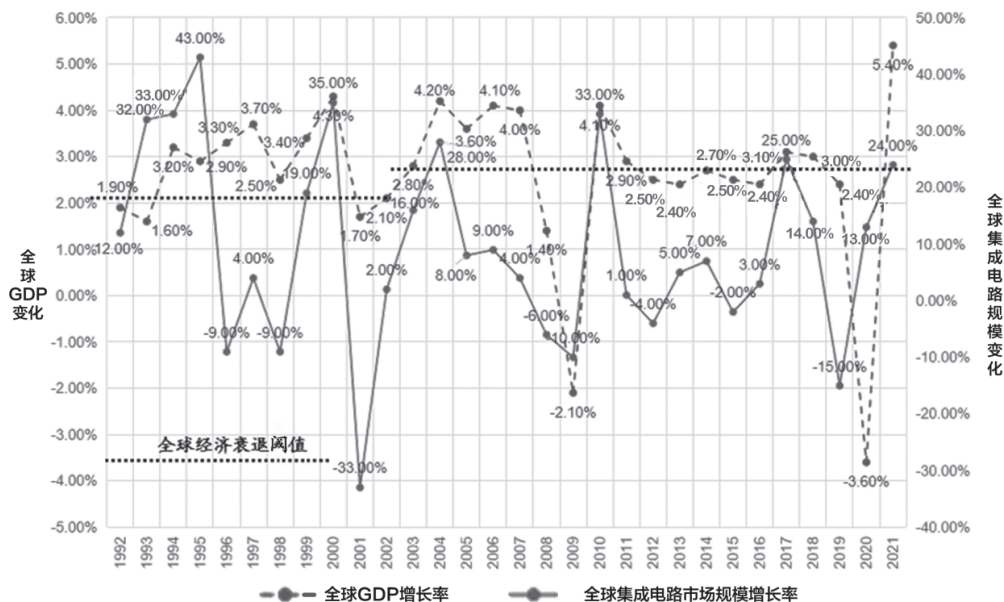


图 1-5 1992—2021 年全球集成电路市场增速与 GDP 增速呈现正相关

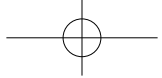
资料来源：The McClean Report 2022

集成电路行业推动了全球 GDP 的增长，那么是谁在推动集成电路行业的发展呢？集成电路的快速发展是过去三十年全球巨额投资和行业集体智慧推动发展的成果。集成电路产业应用的领跑者是美国。美国政府很早就意识到半导体产业的战略意义，它为先进的国防、通信、大数据和 AI 等行业提供了基础支持技术。

- 根据中国半导体行业协会援引 SIA 的报告^②：2000—2020 年，美国半导体产业研发支出的年复合增长率约为 7.2%。2020 年，美国半导体产业研发投入合计 440 亿美元。
- 根据美国官方组织统计的美国上市公司数据，美国芯片上市公司 2019 年的研发投入和资本支出总计 717 亿美元。1999—2019 年，美国芯片上市公

① 元宇宙（Metaverse），或称为后设宇宙、形上宇宙、元界、魅他域、超感空间、虚空间，是一个聚焦于社交连接的三维虚拟世界网络。作为一个持久化和去中心化的在线三维虚拟环境，人们将可以通过虚拟现实眼镜、增强现实眼镜、手机、个人计算机和电子游戏机进入人造的虚拟世界。目前元宇宙的运用，主要受到与实时虚拟环境交互所需的硬件设备和传感器的技术限制。融入元宇宙的影视作品有很多，例如《黑客帝国》《头号玩家》《创战纪》。

② 中国半导体行业协会发布的《美国半导体研发占比达 18.6% 全球第一，美半协呼吁加强制造业投资》援引了美国半导体行业协会（SIA）发布的《2021 年美国半导体行业报告》。



司整体资金总投入将近 9000 亿美元。就研发占比（研发支出占销售额的百分比）而言，美国半导体产业达到 18.6%，在美国仅次于制药和生物技术产业，超过了任何其他国家的半导体产业。高水平的研发再投资推动美国半导体创新行业发展，进而维持其全球销售市场份额的领先地位并创造就业机会。

从电子产业技术发展路径来看，20 世纪基于无线电技术发明了电报等技术，之后催生了真空电子管技术，而后军事技术革命催生了互联网产业革命，芯片技术的成熟又催生了个人计算机的技术革命。进入 21 世纪，技术革命的步伐越来越快，从移动互联网到物联网^①，再到第四次工业革命中虚实结合的信息物理系统（CPS）、数字孪生（DT）、元宇宙（Metaverse）等。人类又再次迈向第五次工业革命，向超级人类的方向狂奔。以往每次的技术革命浪潮都是建立在上一代技术革命的基础上，可 21 世纪的技术革命特点有所不同，其在科学知识爆炸的背景下出现了大量的交叉科学，出现了多头并进的技术融合。例如，超级人类计划就是典型的代表之一，它至少包括人类在电子及生物两个维度最前沿的研究和混合应用，这两个方向也是美国研发比最高的两个领域。2020 年 12 月，我国国务院学位委员会、教育部发出通知：“交叉学科”成为我国第 14 个学科门类，并于该门类下设立“集成电路科学与工程”一级学科。这被认为是国家培养创新型人才，解决制约我国集成电路产业发展难题的有力举措。

7) 集成电路发展的内在逻辑与全球竞争

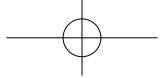
1958 年，美国德州仪器^②展示的全球第一块集成电路板标志着世界进入集成电路时代。作为一个发展跨越六十多年的行业，集成电路每一次进步都有它的内在逻辑^③，这个逻辑就是持续的科学探索与重要的技术发明，再加上由广泛的国际联盟支撑起的严谨的产业布局和全球的市场应用。

集成电路是一个高技术、高门槛、长周期和需要远规划、近投入的产业，纵观美国、日本、韩国这些半导体强国，大都经历过痛苦的鏖战。美国是全球集成电路产业发展的起源地，经过多年的发展涌现了一批如英特尔、高通、博通、德州仪器等优秀的集成电路生产企业，且这些企业普遍具有一定的实力不断研发集

① 1999 年，物联网（IoT）的概念被初步提出。物联网通过传感器和小工具将物理世界中的一切连接到互联网。这些小工具具有唯一标识，并且能够在连接到互联网后自动发送和接收信息。

② 德州仪器（Texas Instruments, TI）是全球领先的半导体公司，为现实世界的信号处理提供创新的数字信号处理（DSP）及模拟器件技术。TI 总部位于美国得克萨斯州，在多个国家设有制造、设计或销售机构。

③ 康斯坦丁，2021，《“芯片荒”会是中国制造的机会吗？》。

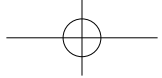


成电路技术。康斯坦丁对美国在半导体、集成电路行业的发展历程作了概括性的描述：美国在二战中大发战争财，二战以后就稳居半导体产业高地，而且能长期地、阔绰地把大量资金投入芯片行业。自 1961 年开始，美国的芯片研发费用占 GDP 的比重要远远高于欧洲、日韩等发达地区，且专注于底层架构、基础技术的研发。此外，美国长期着眼于全球布局，自 20 世纪 70 年代开始，美国向日本提供技术和设备支持，把一些繁杂试验放到国外，自己却把持着光刻机前五的企业以及芯片设计纠错软件领域。也正因如此，美国才能为本国企业创造更优越的竞争环境，从而保持其在产业链中高昂的利润收益。如果从二战结束开始计算，美国、日本已经积累 60 多年，三星芯片自 20 世纪 70 年代开始直到 90 年代才有所起色，亏了近 20 年的钱才一步一步发展到现在的规模。所以我国也要把集成电路当成一项长期、艰苦的战略任务来对待。

欧盟近年来认识到芯片的重要性，希望提高战略自主性。特别是新型冠状病毒感染暴发令欧盟进一步意识到，如果全球供应链受到严重破坏，欧洲一些工业部门将很快陷入芯片短缺，许多行业将因此陷入停滞。位于柏林的德国智库新责任基金会的科技政策专家克莱因汉斯（Jan-Peter Kleinhans）在接受彭博社采访时指出，占据了晶圆代工环节过半市场份额的中国台湾，已经成为“整个半导体产业链上最为致命的潜在单点故障^①”。因此，欧盟从 2020 年就开始加强并不断巩固半导体产业的联合发展体系，回顾近年的重大进程如下：

- 2020 年 12 月，欧盟 22 个成员国签署了关于欧洲处理器和半导体技术倡议的宣言^②。他们注意到，欧洲在全球半导体市场的份额远低于其经济地位。他们同意“特别努力加强处理器和半导体生态系统，并扩大整个供应链的工业存在，以应对关键的技术、安全和社会挑战”。
- 2021 年 3 月，欧盟委员会基于之前的共同宣言，发布“2030 数字罗盘计划^③”，即到 2030 年，“欧盟尖端和可持续发展的半导体产量至少占世界的 20%”，旨在构筑一个以人为本、可持续发展的数字社会。该计划雄心勃勃，希望增强欧洲的数字竞争力，摆脱对美国和中国的依赖，使欧洲成为世界上最先进的数字经济地区之一。该计划的根本目标是落实欧盟委员会主席乌尔苏拉·冯德莱恩关于“增强欧洲数字主权”的要求。可见，“数

① 单点故障（Single Point of Failure, SPOF）指体系中某一个一旦失效就会令整个体系无法运转的环节。
② 芯东西，2022，《430 亿欧元，能扶起欧洲芯片制造业吗？》。
③ 2021 年 3 月 9 日，欧盟委员会正式发布《2030 数字罗盘：欧洲数字十年之路》（2030 Digital Compass: The European Way for the Digital Decade），为欧盟到 2030 年实现数字主权的愿景指出方向。

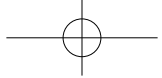


字”已不仅是技术革命或先进制造，而是主权！

- 2021年7月，欧盟委员会启动处理器和半导体产业联盟，明确欧盟当前在微芯片生产方面的差距。同年9月，欧盟委员会主席乌尔苏拉·冯德莱恩在“盟情咨文”中提及欧洲芯片战略愿景，表示将构建欧洲芯片生态系统。
- 2022年2月，欧盟委员会公布了备受关注的《芯片法案》，旨在确保欧盟在半导体技术和应用领域的竞争优势以及芯片供应安全，进而成为这一领域的领导力量。根据法案，到2030年，欧盟拟动用超过430亿欧元的公共和私有资金，支持芯片生产、试点项目和初创企业，并大力建设大型芯片制造厂。根据《芯片法案》，到2030年，欧盟计划将芯片产量占全球的份额从10%提高至20%，满足自身和世界市场需求。乌尔苏拉·冯德莱恩表示，该法案将提升欧盟的全球竞争力。在短期内，此举有助预判并避免芯片供应链中断，增强对未来危机的抵御能力；从长远来看，《芯片法案》应能实现“从实验室到晶圆工厂”的知识转移，并将欧盟定位为“创新下游市场的技术领导者”。

违背了科学基本规律与产业发展逻辑的大跃进是危险的。过去几年，我国先后出现了若干个以“总投资1280亿元的武汉弘芯半导体制造项目”为代表的、被业界称为“纸上谈兵”的集成电路烂尾项目。6起百亿级的重大芯片项目烂尾，引起了业界广泛的质疑与批评。事实上，创立于2000年的中芯国际才完成14纳米的量产，以此技术发展时间线来看，武汉弘芯2020年高调宣称的主攻14纳米每月3万片量产、紧接着拿下7纳米的目标根本不可能实现。据腾讯网报道：弘芯项目请到的芯片界传奇人物蒋尚义^①也极有可能是被利用来为他们作秀，甚至事后发现弘芯最初的几个组局人全无半导体从业背景，甚至大多是大专学历。国家发改委新闻发言人孟玮曾在2020年10月举行的新闻发布会上表示：“一些没经验、没技术、没人才的‘三无’企业投身集成电路行业，个别地方对集成电路发展的规律认识不够，盲目上项目”。对此，发改委将按照“谁支持、谁负责”原则，对造成重大损失或引发重大风险的地方予以通报问责。之后，发改委将会同有关部门强化顶层设计，狠抓产业规划布局，努力维护产业发展秩序。在2020年11月，

^① 蒋尚义，1946年出生于中国台湾，比张忠谋小15岁。1974年获得斯坦福大学博士学位，之后任职于德州仪器和惠普。1997年返回中国台湾进入台积电担任研发副总裁，2006年7月首度退休，2009年被张忠谋返聘后担任首席运营官，2013年再度退休。2016年12月首次加入中芯国际，2019年6月加入武汉弘芯担任首席执行官，2020年12月重回中芯国际担任副董事长。2021年11月，蒋尚义辞去中芯国际公司副董事长、执行董事及董事会战略委员会成员职务。



武汉市政府正式接管武汉弘芯，由武汉东西湖区国有资产监督管理局 100% 持股的两家公司接手。新华网评论说：集成电路产业也要防止“一哄而上”，发展集成电路产业尤其是核心高端芯片并非易事，我国在这一领域本就起步较晚、与发达国家差距较大，不少企业和地方政府还对其产业特性和规律认识不足。发展集成电路产业应坚持“主体集中、区域集聚”原则，做好规划布局，避免“遍地开花”带来的重复建设、资源浪费和恶性竞争。

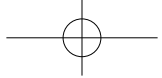
1.1.2 俄罗斯集成电路产业现状与未来电子战

1) 俄罗斯的集成电路产业现状

俄罗斯在软件和高科技服务方面历来相当成功，但由于发展芯片产业需要的巨额投资（通常在万亿人民币规模以上）及专业技术全球化分布的属性，俄罗斯虽然拥有 Mikron 和 Angstrom 两大集成电路厂商^①，但在先进芯片设计和制造方面非常落后，目前 90% 以上的电子元件和芯片均依赖进口。无人机、导弹、直升机、战斗机、坦克和电子战设备等军用武器都是芯片需求大户，在缺少先进半导体设计制造能力的情况下只能勉强为之。俄罗斯向印度出口的塔尔瓦级导弹护卫舰、自用的 11356R 型护卫舰上的指挥系统设备，尤其是计算机设备，都是美国 IBM 公司生产；T-90 坦克安装着法国泰利斯的凯瑟琳热成像仪；自用的苏 -30SM 战机上原来安装法国泰利斯激光衍射平显和西格玛综合导航系统，在遭到西方制裁以后又换上了老式的平显和导航系统。2014 年，俄罗斯伊尔库特公司从印度斯坦航空公司购买了 34 台雷达火控计算机，用于苏 -30SM 战机的 N011M “雪豹” R 相控阵雷达的火控系统，随后又陆续订购了 100 台。

俄罗斯作为一个军事强国，在现代军用方面势必会需要新兴科技，除了依赖进口和代工，还有自主研发。2014 年开始，俄罗斯为了政府机构与军事单位的独立自主与信息安全，大力发展自用的 CPU 以摆脱对美国 CPU 的依赖。例如，俄罗斯莫斯科中央科技公司（MCST）2014 年自主研发、并于 2015 年量产的军用芯片“厄尔布鲁士 -8S”，只需要 28 纳米之前的技术，它抗辐射、抗碰撞。俄罗斯很早就将数字电路改造为模拟电路，在原有基础上自行研发出一款晶体振荡器，可以完全取代传统的军事芯片。而对于自己实在无力制造的芯片，如涉及国防工业信息安全的 Elbrus 系列以及 Baikal 系列两款重要芯片，则交给台积电为之代工

^① Mikron 成立于 1964 年，总部位于泽列诺格勒，是俄罗斯最大的微电子制造商和出口商之一，占据了 54% 的出口业务，采用 180/90/65 纳米的工艺制程。Angstrom 则成立于 1963 年，是俄罗斯领先的全周期微电路和功率半导体器件生产企业，同时也是唯一一家能够提供工业级规模生产的电子元件制造商。



生产。而如今，因为俄乌冲突的原因，全球有能力设计、制造高端芯片的巨头，包括英特尔、AMD、英伟达、高通、ARM、台积电、三星、格芯^①等大多已暂停对俄业务。

无论是 AI、量子运算、虚拟现实、增强现实还是高效能运算、先进武器系统，都离不开高端芯片的支持。另外，现代战争从某种程度上讲就是“芯”战，芯片是硬件基础，软件是计算大脑，AI 是决策脑核。芯片的需求实在是太大了，芯片产业本就薄弱的俄罗斯，如今还受到美国及其盟国的制裁，只有坚定地走一条自我复兴之路。2021 年 11 月，俄罗斯《独立报》表明：AI、高超声速导弹技术、激光武器、机器人技术正在成为军备计划的一个主要优先方向。有报告称，俄罗斯高度重视将电子战融入军事行动，并一直在这方面投入大量资金。例如，2019 年列装的 Tirada-2 系统就可对通信卫星实施干扰。

2) 美军以 JADC2 开启未来虚拟战争演练与发展

作为未来数字战争的规划和设想，JADC2（Joint All-Domain Command and Control，全域联合指挥与控制）是最典型的案例。JADC2 是美国国防部提出的概念，它把所有军种——空军、陆军、海军陆战队、海军和太空部队连接成一个大网络。原来每个军种都开发了自己的战术网络，但与其他军种互不兼容。美国国防部官员认为，未来的军事冲突需要在几小时、几分钟甚至几秒钟内做出决策，而目前分析作战环境和发布命令的过程则需要数天，这导致现有的指挥和控制架构根本无法满足要求。JADC2 概念中，数字空间作为继空中、陆地、海上、太空后的第五空间，负责收集和整合所有的空间数据并将所有空间通过系统连接在一起，这个系统连接到战争决策中心，通过预测分析、机器学习和 AI 分析后采取军事行动。决策中心通过界面、架构与具体特征一边连接五大空间信息系统，一边通过人员、流程和具体特征连接战斗群，实现两者的实时互动。

美国国防部下属的高级研究计划局（DARPA）开发的异质电子系统的技术集成工具链（STITCHES）是支撑 JADC2 的纯软件工具链，用于在系统之间自动生成极低时延、高通量的中间件来快速集成跨任何域的异构系统，而无须升级硬件或破坏现有软件。STITCHES 可为战争指挥官在 JADC2 的战状下连接“所有传感器和士兵”。具体来说，它将来自空中、陆地、海上、太空和网络空间的行动和硬件数据连接起来，建立一个军事物联网，并将这些数据输送给指挥官和 AI 的机器，以便更好地快速决策。STITCHES 可以通过 AI 来自动编程，从而创建实时

^① 格芯（Global Foundries）是一家总部位于美国的半导体晶圆代工公司，起初是从超微半导体的制造部分剥离而出，目前为世界第四大专业晶圆代工工厂，仅次于台积电、三星电子及联华电子。

网络，在没有烦琐数据标准的情况下为终端提供数据链接，在运行中建立自己的数据链接和可互操作的网络。在 2021 年 9 月美国空军的大规模实验 on-ramp 中，STITCHES 连接了相隔数十年建造的不同平台，从而实现操作和数据共享。与此相关，2022 年 3 月，DARPA 宣布启动一个新项目，目的是在决策过程中引入 AI 技术，以帮助战争指挥官在复杂环境下快速做出正确的决策。

军事冲突越严重、市场竞争越激烈，芯片产业发展就越快。集成电路产业正处于强大的地缘政治利益、全球军备竞赛、数字主权维护和数字经济发展的中心。随着政治屏障高立、新式冷战开启，原来半导体技术具有领先地位的国家都在竭力确保其地位不被取代，甚至扩大领先优势；而其他国家也不甘于在数字化时代受他人掣肘，因此各国纷纷入局半导体以提升产业链的完整性和竞争优势。

预计到本世纪末，全球对芯片的需求将翻一番^①。近年各国在半导体产业的大手笔竞争已然越来越激烈。可以预见的是，今后在半导体产业链的各个环节，甚至是上游相关的矿产资源、原材料购买、研发、生产和对人才的争揽，都将上演令人眼花缭乱的“芯”战故事。

1.1.3 我国软件与集成电路行业发展的三个十年

1) 半导体的第三次转移走向中国

纵观全球半导体产业 60 多年的发展历程，其完成了两次明显的半导体产业转移：第一次是从美国转向日本，第二次是从日本转向韩国与中国台湾，目前明朗的是第三次转移，产业逐渐转向中国大陆^②，我国迎来了产业发展的新机会。详细事件如表 1-6 所示。

表 1-6 半导体产业的三次转移

时 期	转 移 轨 迹	事 件
20 世纪 70 年代	从美国到日本	IDM 厂商开始出现，东芝、NEC 和日立是代表厂商。日本半导体 1986 年 DRAM 市场占有率达 80%，反超美国成为世界半导体第一强国。英特尔被迫放弃存储器业务，转向微处理器研发
20 世纪 80 年代	从日本到韩国和中国台湾	PC 的普及成就了英特尔和三星等 IDM 厂商，韩国与中国台湾大约同时发展，抓住大型机到消费电子的转变期对新兴存储器与代工产生的需求。台积电开创的纯晶圆代工模式也成就了高通和英伟达等 Fabless 设计公司

① 联合新闻网，2022，《欧洲芯片法案宣示欧盟誓保半导体产业要角的决心》。

② 恒大研究院、连一席、谢嘉琪，2018，《全球半导体产业转移启示录》。

续表

时 期	转 移 轨 迹	事 件
当前	从韩国和中国台湾到中国大陆	我国在过去的二十多年中，凭借低廉的劳动力成本，获取了部分国外半导体封装、制造等业务。通过长期引进外部技术，培养新型技术人才，承接低端组装和制造业务，我国完成了半导体产业的原始积累

如图 1-6 所示，半导体产业的这三次转移基本上经历了六个时代。首先是军工需求带动的时代，然后是军用时代带动了家电时代，军工与家用的结合产生了个人计算机，我们进入了个人计算机时代，计算机进一步微缩使我们进入手机时代，手机的普及产生的大量数据、庞大的市场又推动各种传感器的和应用产生，于是万物互联的时代开启了。庞大的电子消费推动半导体产业的发展，在功耗和价格不断下降的前提下算力逐渐提升，智能时代来临了。

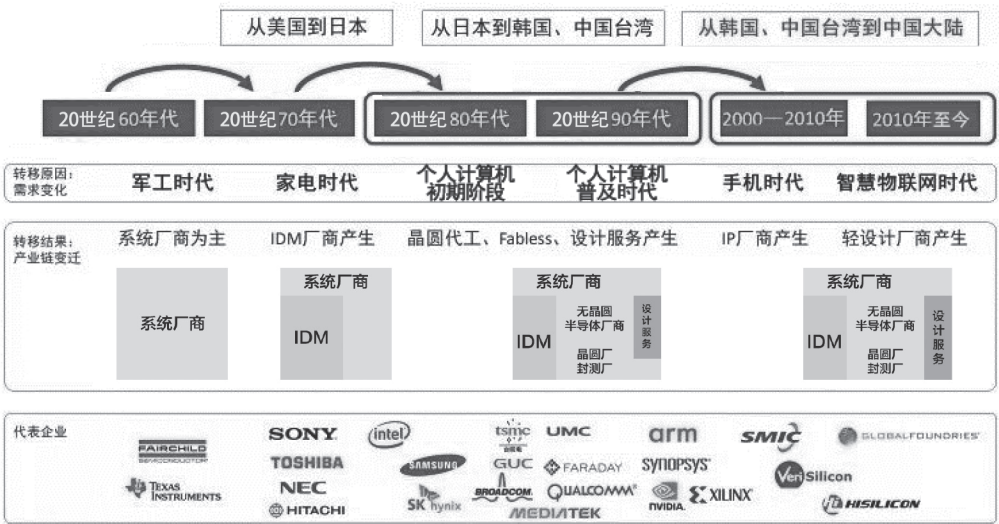


图 1-6 半导体产业的三大转移

资料来源：EDN 电子技术设计、全球半导体转移启示录

半导体产业第三次转移的时代背景是智能手机和 AIoT^① 的发展，由于技术复杂性进一步提高以及全球不同区域优势的差异化，开始细分为更多的赛道，其中芯片设计就是最为典型的细分市场。这使我国开始思考在半导体产业越发细分的今天，如何进行有利于局势发展的规划。从过去几年来看，中兴和华为事件的刺

① AIoT=AI+IoT(物联网)。AIoT 融合 AI 技术和 IoT 技术，通过物联网产生、收集来自不同维度的、海量的数据存储于云端、边缘端，再通过大数据分析，以及更高形式的 AI，实现万物数据化、万物智联化。

激加速了中国大陆本土晶圆制造和 IC 设计产业的发展，源自大学的 RISC-V 开源微处理器架构（ISA）在国内也开始流行起来。

集成电路作为电子信息产业的核心，是支撑国家经济社会发展的战略性、基础性、先导性产业。数字时代对通信容量及算力的需求几乎是无穷无尽的。随着 5G 的发展，这种趋势更是如此。虽然大众消费品手机的更换频繁已经下降，但半导体将要更好地满足万物互联和高性能计算的需求，这都是工业革命 4.0 重要的基础架构。

如图 1-7 所示，我国集成电路的产业发展大致可分为三个阶段。2013—2018 年，我国集成电路产量逐年增大。据国家统计局数据显示，2018 年我国集成电路产量达 1717 亿块，同比增长 9.7%。同时集成电路行业核心技术也取得了突破，芯片设计水平提升了 2 代，制造工艺提升 1.5 代，像 32 纳米、28 纳米的工艺都实现了规模化的量产。

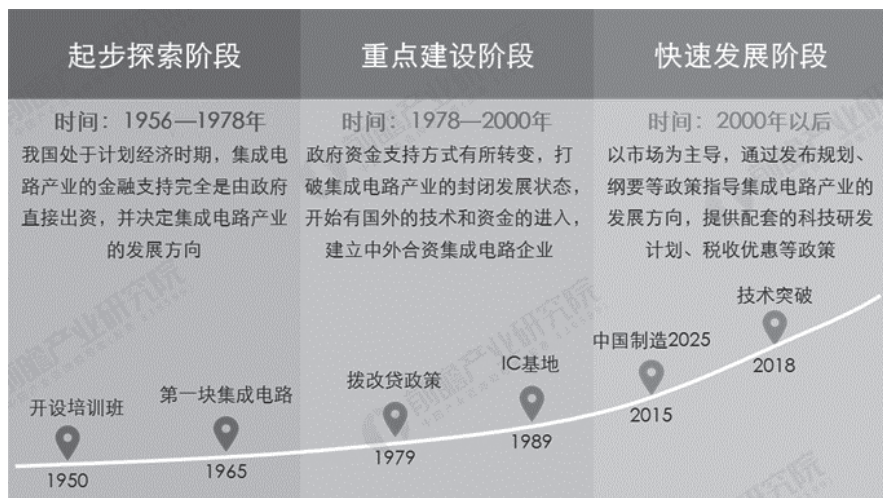
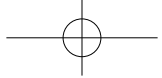


图 1-7 中国集成电路行业发展历程

资料来源：前瞻产业研究院

2) 鼓励软件与集成电路产业发展的“三个十年”规划

我国高度重视集成电路行业的发展，出台了多项政策。回顾发展历程，我国从国家宏观政策层面推动软件及集成电路行业融合发展已有“三个十年”的战略部署。第一个十年是从 2000 年开始，国务院印发了《鼓励软件产业和集成电路产业发展若干政策的通知》，明确软件产业和集成电路行业作为信息产业的核心和国民经济信息化的基础，越来越受到世界各国的高度重视。我国拥有发展软件产业和集成电路行业最重要的人力、智力资源，面对加入世界贸易组织的形势下，通



过制定鼓励政策，加快软件产业和集成电路产业发展，是一项紧迫而长期的任务，意义十分重大。

第二个十年是从 2011 年开始，《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》发布，再次重申这两个产业的重要性，明确软件和集成电路产业是国家战略性新兴产业，是国民经济和社会信息化的重要基础。虽然发展快速，产业规模迅速扩大，技术水平显著提升，有力推动了国家信息化建设，但与国际先进水平相比，我国软件和集成电路产业还存在发展基础较为薄弱、企业科技创新和自我发展能力不强、应用开发水平亟待提高、产业链有待完善等问题。因此，需要进一步优化软件和集成电路产业发展环境，提高发展质量和水平，培育一批有实力和影响力的行业领先企业。随后，2014 年《国家集成电路行业发展推进纲要》出台，国家集成电路行业投资基金（简称“国家大基金”）成立。

第三个十年是从 2020 年开始，国务院印发《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展若干政策的通知》（后文简称《若干政策》），提出探索构建社会主义市场经济条件下关键核心技术攻关新型举国体制，开创我国集成电路行业发展新时期。《若干政策》指出：我国集成电路和软件产业快速发展，有力支撑了国家信息化建设，促进了国民经济和社会持续健康发展。为进一步优化集成电路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，中国芯片自给率要在 2025 年达到 70%。从 2000 年的“18 号文”，到 2011 年的“4 号文”，再到 2020 年的“8 号文”，政策的产业聚焦是一脉相承的。产业发展的政策环境有了长期性和延续性，就允许企业的发展有一个持续积累和厚积薄发的过程。与此同时，《若干政策》也作了与时俱进的更新，以集成电路领域的制造工艺为例，国家将对集成电路线宽小于 28 纳米（含），且经营期在 15 年以上的集成电路生产企业或项目，给予企业所得税等方面的优惠，这体现了紧贴时代发展的科学态度。《若干政策》还涉及集成电路全产业链，材料、装备、封测等环节在“4 号文”和“18 号文”几乎没有涉及。

这三个十年呈现的态势非常清晰：第一个十年是认识到集成电路和软件产业的重要性、紧迫性和长期性；第二个十年是认清自身不足并明确需要通过科技创新来弥补短板，缩短与国际的差距；第三个十年是深化国际合作并提升质量。

2020 年 11 月，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》，正式将集成电路写进中国“十四五”规划，旨在健全我国社会主义条件下

新型举国体制，打好关键核心技术攻坚战，突破我国在集成电路领域的关键技术难关。

2021年3月12日，《中华人民共和国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纲要》（以下简称《纲要》）发布，集成电路位列7大科技前沿领域攻关的第3位。《纲要》特别指明集成电路攻关方向包括：集成电路设计工具，重点装备和高纯靶材等关键材料研发，集成电路先进工艺和IGBT^①、MEMS^②等特色工艺突破，先进存储技术升级，碳化硅、氮化镓等宽禁带半导体发展。《纲要》在第八章第三节推动制造业优化升级中提出：培育先进制造业集群，推动集成电路、航空航天、船舶与海洋工程装备、机器人、先进轨道交通装备、先进电力装备、工程机械、高端数控机床、医药及医疗设备等产业创新发展。《纲要》在第十五章第一节提出：聚焦高端芯片、操作系统、AI关键算法、传感器等关键领域，加快推进基础理论、基础算法、装备材料等研发突破与迭代应用。加强通用处理器、云计算系统和软件核心技术一体化研发。加快布局量子计算、量子通信、神经芯片、DNA存储等前沿技术，加强信息科学与生命科学、材料等基础学科的交叉创新，支持数字技术开源社区等创新联合体发展，完善开源知识产权和法律体系，鼓励企业开放软件源代码、硬件设计和应用服务。

2021年5月14日，国家科技体制改革和创新体系建设领导小组第十八次会议在北京召开。本次会议专题讨论了“面向后摩尔时代的集成电路潜在颠覆性技术”。近年随着芯片工艺不断演进，硅工艺发展趋近于其物理极限，晶体管尺寸缩减的技术要求和研发投入越发高昂，目前手机已普及，消费电子移动通信对算力增长要求有限，后期主要是靠5G和AI所需要的海量云算力需求来拉动。越来越多的人认为摩尔定律放缓，因此超摩尔或后摩尔时代概念随之而出，而后摩尔时代的潜在颠覆性技术，可以理解为绕过现有主流技术推演的新技术路径，对这个路径的普遍理解是不再跟随以晶体管制造工艺节点（即多少纳米）为对标的技术路线。事实上，截至2022年年中，不仅是我国，全球除了台积电和三星没有第三家芯片厂商可以量产5纳米芯片。

2000—2022年的二十多年间，国家针对集成电路行业出台的政策主要内容请扫码查看。



① IGBT（Insulated Gate Bipolar Transistor，绝缘栅双极型晶体管），兼有 MOSFET 的高输入阻抗和 GTR 的低导通压降两方面的优点。

② MEMS（Microelectromechanical Systems，微机电系统），微机电系统是将微电子技术 with 机械工程融合到一起的一种工业技术，它的操作范围在微米尺度内。

3) 二级市场资本发展迅速

智研咨询公布的 2021 年 11 月中国半导体及元件行业上市企业股票市值排名榜显示,在 A 股市场共有 128 家半导体及元件上市公司,包括 51 家集成电路企业、35 家印制电路板企业、19 家半导体企业、12 家被动元件企业和 11 家分立器件企业,总市值高达 4.28 万亿元。自 2019 年 7 月 22 日科创板开板运行以来,半导体公司纷纷在科创板开启上市征程。中国 A 股半导体及元件行业上市公司十强如表 1-7 所示。

表 1-7 中国 A 股半导体及元件行业上市公司十强

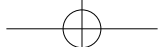
排名	公司名称	截至 2021 年 11 月的 市值(单位:亿元)	业务领域
1	中芯国际	4288.56	半导体集成电路芯片制造、针测及测试
2	韦尔股份	2367.27	集成电路、计算机软硬件的设计、开发、销售
3	北方华创	2034.23	半导体装备、真空装备、新能源锂电装备及精密元器件业务
4	紫光国微	1401.08	集成电路设计
5	卓胜微	1250.19	集成电路研发、设计、销售
6	兆易创新	1004.77	各类存储器、控制器及周边产品的设计研发
7	中微公司	986.18	半导体干法刻蚀(等离子体刻蚀)设备
8	华润微	944.92	芯片设计、晶圆制造、封装测试
9	鹏鼎科技	934.16	各类印制电路板的设计、研发、制造
10	澜起科技	930.95	高性能处理器和全互连芯片设计

注:业务准确介绍请参见其公司官网;资料来源:智研咨询

另据不完全统计,截至 2021 年年底,整个半导体产业约有 52 家公司在科创板上市,占科创板上市公司总量的 17%,占同期各市场板块国内半导体企业 IPO 总数的 70% 以上。

2022 年 2 月 28 日,国新办举行促进工业和信息化平稳运行和提质升级发布会,工业和信息化部总工程师、新闻发言人田玉龙在会上表示:

- “十三五”中国集成电路产业发展总体是非常骄人的,产业规模不断增长。据测算,2020 年我国集成电路销售收入达 8848 亿元,平均增长率达 20%,为同期全球集成电路产业增速的 3 倍。
- 技术创新上也不断取得突破,制造工艺、封装技术、关键设备材料都有明显大幅提升。企业实力稳定提高,在设计、制造、封测等产业链上涌现出一批新的龙头企业。
- 我国高度重视芯片产业、集成电路产业,发布了促进集成电路产业和软件



产业高质量发展的政策，全面优化完善高质量发展芯片和集成电路产业的有关环境政策。

- 从未来看，集成电路仍然是高度的全球化产业，也凸显了加强全球产业链、供应链合作的重要性。各国产业界加强分工协作，只有这样才能推动集成电路技术的不断进步、市场规模的不断扩大。我国是全球规模最大、增速最快的集成电路市场，为全球企业发展提供了广阔的市场机会。同时也是集成电路重要的生产国和提供者，一直为全球的集成电路产业作出贡献。因此，保证产业链、供应链的稳定，不仅是为中国的自给自足提供支持，同时也是为全球的发展提供资源。我们继续欢迎全球集成电路产业加大在华的投资，开展多种形式的合作，共同为稳定全球集成电路产业链、供应链作出贡献。我们也要继续为国内外的集成电路企业提供良好的政策、市场环境，平等对待各类市场主体，依法给予内外资同等待遇，特别是加强知识产权保护，共同推动集成电路产业的创新发展，维护全球集成电路产业链、供应链的稳定。

1.2 工业革命与不死摩尔定律

1.2.1 五次工业革命与半导体发展

1) 五次工业革命历程

工业革命是制造业的革命，更是人类文明和自身的革命，每次革命都进一步地将人类从原来相对低级的劳动中解脱出来，而正在发生的第五次工业革命（工业革命 5.0）中的超级人类主题尤其引人注目：蜘蛛侠不再是传奇，它的部分超级功能已经实现；意念控制也不再是科幻，猴子可以用意念玩乒乓游戏。人类正成为一切智能的创造者。在人与自然的深度融合方面，可以连接的版图不断扩大，以实现更广泛的连接与操控，包括物理世界，也包括虚拟空间。而人的永生也成为第五次工业革命中的热门话题。表 1-8 列出了四次工业革命过程及第五次工业革命推演。

表 1-8 四次工业革命过程及第五次工业革命推演

名 称	开始 时间	特 点
前工业革命	农耕文明	● 生物体的能量 ● 人力或从自然界中获得能量（风车、马车）

续表

名 称	开 始 时 间	特 点
第一次工业 革命	18 世纪 60 年代	● 煤的能量 ● 织布机问世、蒸汽机发明 ● 借助水和蒸汽引入机械生产 ● 城市化
第二次工业 革命	19 世纪 90 年代	● 电力与石油的能量 ● 电气化、内燃机应用 ● 电能引发分工和大规模生产，进入电气化时代 ● 交通与通信改善，更好的就业机会
第三次工业 革命	20 世纪 60 年代	● 信息的能量 ● 计算机、互联网和卫星的应用 ● 可编程逻辑控制器（PLC）问世，自动化产品和 IT 系统的引入，又被称为信息技术革命，半导体、电子集成电路和计算机的发展加速了信息时代的来临 ● 网络通信、自动化系统以及互联网得到了大规模普及，进一步拉近了消费者和生产者以及信息提供者的距离 ● 航天技术也得到重大发展，首次发射了人造地球卫星 ● 办公与生产自动化
第四次工业 革命	21 世纪 前期（约 2010 年）	● 数据与计算智能的能量 ● 以 AI、物联网、区块链、生命科学、量子物理、新能源、新材料、虚拟现实等一系列创新技术引领的范式变革。这场革命正将数字技术、物理技术、生物技术三者有机融合，而相比前三次工业革命，它的发展速度将更快、影响范围将更广、程度将更深 ● 以信息物理系统（CPS）为核心，以三项集成（纵向集成、端对端集成、横向集成）为手段，是一种高度自动化、高度数字化、高度网络化的智能制造模式，从而实现高效、敏捷、智能的生产，在效率、成本、质量、个性化方面都得到质的飞跃 ● 第六代互联网协议（IPv6）问世
第五次工业 革命	21 世纪 前期（约 2020 年）	● 人机合一的能量 ● 由于科学探索与技术进步，人类在过去的一万年里经历了语言 / 沟通革命、农业革命、工业革命、数字革命——第四次工业革命的过程 ● 具有量子计算潜力：人工智能、生物电子、碳中和、星联网、完全自主车辆、认知计算、网络人机、3D 打印等 ● 如果说数字革命标志着数字时代的开始，那么第五次工业革命是人机世界新时代的开始

资料来源：根据世界经济论坛及超人类主义资料整理

第一、二、三次工业革命的驱动因素分别是蒸汽、电力、计算机技术。第四次工业革命（工业革命 4.0）的实现通常称为“智能制造”。工业革命 4.0 的主要

特点包括制造系统的垂直整合。在工厂中，具有网络连接的生产系统称为信息物理生产系统（CPPS）^①。在工业革命 4.0 中，CPPS 将信息垂直整合和连接，以便使环境和价值链中的任何变化都能反映到制造过程中。特点是将制造设备与合作伙伴、供应商、分包商等一起水平整合到价值链中，通过云、大数据、移动和 AI 等新一代技术实现加速整合。

第四次工业革命的核心是信息物理系统（CPS）^②，它通过 3C^③ 技术的有机融合与深度协作，实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。CPS 实现了计算、通信与物理系统的一体化设计，可使系统更加可靠、高效，实时协同，具有重要而广泛的应用前景。从产业角度看，CPS 涵盖了小到智能家庭网络、大到工业控制系统乃至智能交通系统等国家级甚至世界级的应用。更为重要的是，这种涵盖并不仅仅是将现有的家电简单连在一起，而是要催生出众多具有计算、通信、控制、协同和自治性能的设备。图 1-8 是信息物理系统的一个示意图，物理世界的所有信息通过传感器到达云端的数字中心，经过智能大脑创造基于物理现象的多维度价值，包括分析与预测、计划与优化等。

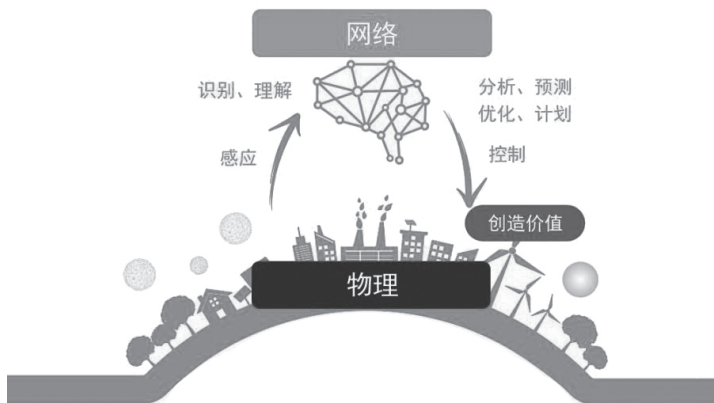


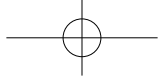
图 1-8 信息物理系统平台

资料来源：东芝官网

① 信息物理生产系统（Cyber Physical Production System, CPPS）是信息物理系统在生产领域中的一个应用，它是一个多维智能制造技术体系。CPPS 以大数据、网络和云计算为基础，采用智能感知、分析预测、优化协同等技术手段，将计算、通信、控制三者有机地结合起来，结合获得的各种信息和对象的物理性能特征，形成虚拟空间与实体空间的深度融合，具有实时交互、相互耦合、及时更新等特性，实现生产系统的智能化和网络化，包括自感知、自记忆、自认知、自决策、自重构运算与分析等。

② 信息物理系统（Cyber Physics System, CPS）从 2006 年开始出现，是可以快速、有效开发以计算机信息为中心的物理和工程系统的科学技术，目标是引导新一代互联、高效、高性能的“全球虚拟和局部物理”工程系统。

③ 3C 是指计算（Computation）、通信（Communication）、控制（Control）。



数字化转型的加速使半导体在工作与生活中触手可及，由于技术的整合和快速商品化，半导体公司之间的竞争继续加剧，创新日益重要。公司必须设法克服前所未有的半导体设计挑战并不断创新，才能生存和繁荣。在向工业革命 4.0 的核心 CPS 转型的浪潮中，拥有 150 年历史的东芝是典型代表。东芝于 1980 年研发出全球第一款闪存芯片，于 2018 年成立东芝内存株式会社，其 NAND 闪存固态硬盘收入约占全球市场的五分之一。后来品牌被命名为铠侠（KIOXIA），成为全球第二大 NAND 内存厂商。同样是在 2018 年，东芝公布了未来五年发展规划——“东芝 Next 计划”，明确指出东芝的未来发展目标是“成为世界上首屈一指的 CPS 技术企业”，并通过在制造领域长年积累的实践经验，以及产业数字化领域积累的物联网和 AI 等技术融合的方式，提高各事业领域的附加价值，创造出新活力。这个目标也源于东芝的“三好”理念，即基于对买卖双方和整个社会都有利的经营模式打造企业。在具体应用上，东芝在能源管理领域和精准医疗领域的两个案例都非常有特色：

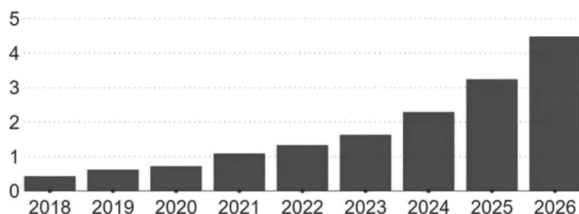
- 能源管理领域：东芝可以部署虚拟发电厂（VPP）来协调分布式能源，如太阳能、风能和氢能发电站，可充电电池和电动汽车。这些资源都可以实现虚拟控制，就好像它们是单一的发电厂一样。
- 精准医疗领域：重粒子束癌症治疗设备将碳离子的重粒子束加速到光速的 70% 左右，以照射癌细胞。同时使用图像识别技术，通过与患者呼吸运动同步的电子束来精确识别肿瘤位置。这两种技术都有望显著减轻患者的压力。

东芝再次进行转型，着重发展新能源、物联网、AI 等业务，逐渐从一家传统制造业企业，转型为一家以技术为导向的多元数字化公司。东芝目前在全球拥有约 13 万员工，年销售额在 3000 亿元左右。东芝希望每一位员工都能清楚地认识到：不实施数字化战略，东芝将无法存活！2022 年 2 月 7 日，东芝发布声明称，将最早于两年内将公司整体按业务拆分为两家公司，分别是包含发电、公共基础设施、IT 解决方案、铠侠控股股权管理等基础设施的服务型公司，以及包含功率半导体、HDD、半导体制造设备相关的组件公司。

目前东芝的半导体业务主要包括功率、通用逻辑 IC、射频器件、存储等。全球范围内，东芝在功率半导体领域具备较强竞争力，2020 年在 Discrete IGBTs 领域东芝占有全球 5.5% 的市场份额，在 MOSFETs 领域东芝占有全球 7.7% 的市场份额。随着全球环境气候问题的日趋严峻，下游应用市场更加注重节能减排，对功率半导体的需求将持续上升。东芝在 2022 财年投资约 8.3 亿美元用于扩大石

川县工厂功率半导体的制造能力，这比 2021 财年所预期的 5.7 亿美元增加了约 45%，这使东芝使用碳化硅或氮化镓的新一代功率半导体的产能增加，其目标是将功率半导体的整体产能提升 2.5 倍，如图 1-9 所示。此外，东芝正在研发将存储容量提高至目前的 1.7 倍、达到 30TB 以上的技术。2022 年 2 月，东芝表示计划投资约 10.9 亿美元，将电源管理半导体的产量提高一倍以上，旨在追赶英飞凌等电源芯片巨头。

碳化硅功率芯片市场规模（单位：10亿美元）



(a) 预测到 2026 年，碳化硅功率芯片市场将比 2020 年增长六倍，达到 44.8 亿美元

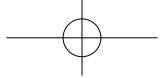


(b) 东芝将在加贺东芝电子占地内建设新厂房

图 1-9 碳化硅功率芯片市场增长与东芝扩产

资料来源：法国市场研究公司 Yole Development & 日经中文网

让我们回到工业革命 4.0 与半导体的关系。从半导体产业来看，并不严格区分第四次工业革命与第五次工业革命。第四次工业革命的计算机时代是半导体产业推动的，之后集成电路产品“进入寻常百姓家”又推动了全球 GDP 的快速增长，在 2010 年之后又快速推动人类进入第五次工业革命。因此对于半导体产业来说，这是一个连续、完整的过程。台积电的定义代表了一种新视角，即半导体产业的发展模式经历了四个阶段：IDM、ASIC、Fabless 和开放式创新 OIP（即基于产业链各专业分工，形成一个紧密协同的虚拟大 IDM 的利益共同体）。总的来说，半导体从第四次工业革命到第五次工业革命的连续发展过程体现了人类开始从宏观科学走向微观科学，即原子的领地。芯片制程也开始向埃米级挺进。



从技术应用上看,一方面,工业革命 4.0 已经远远超出了最初的概念,在制造中融入了越来越多的基于智能的控制技术,并为制造增加了更多的前瞻性、一致性和敏捷性。另一方面,半导体远在工业革命 4.0 这个概念出现之前就在朝着这个方向努力。20 世纪 70 年代,半导体产业就制定了 SECS/GEM^① 半导体设备通信协议的两个标准,如图 1-10 所示。这两个标准保障了机械化的设备可以基于一样的语言进行通信。

- SECS 包括了三个主要的文件 SECS-I (E04)、SECS-II (E05)、SECS-HSMS(E37),其中 E04 是基于 RS232(串口),E37 是针对 TCP/IP(网口)。而 E05 则定义了 SECS 传输的内容规范。
- GEM 则定义了设备的模型和所提供的功能。

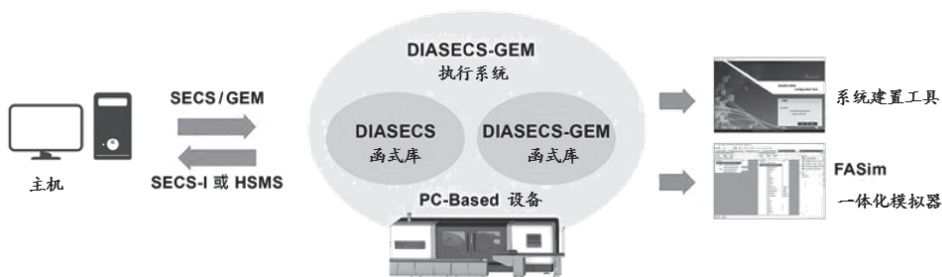


图 1-10 SECS/GEM 是半导体产业中用于设备到主机数据通信的设备接口协议

资料来源: Delta Electronics

2) 半导体视角的新工业革命说

如图 1-11 所示,1947 年贝尔实验室的研究人员肖克利、巴丁、布拉顿三人发明了第一个晶体管,这个器件具有扩展电子设备实用性的巨大潜力。



图 1-11 全球第一个晶体管和发明它的肖克利、巴丁、布拉顿

资料来源: ENCYCLOPEDIA

^① SECS (Semiconductor Equipment Communication Standard, 半导体设备通信标准), GEM (Generic Equipment Model, 通用设备型号)。

早期的晶体管是用锗作为材料，在 20 世纪 50 年代后期的研究中，成功地生产出适用于半导体器件的硅材料，并且从大约 1960 年开始制造出由硅制成的新器件。硅比锗丰富得多，价格便宜，很快成为首选原材料。硅基允许通过光刻工艺形成的掩膜图案也创建了微型晶体管和其他电子组件。1960 年，真空管迅速被晶体管取代，因为后者体积小、抗高温、更耐用、更可靠。这一特点很快就被军工行业看中，晶体管满足了导弹电子制导系统的紧凑、轻便与可靠的需求，从而促成了集成电路的发明。早期的集成电路在 3 毫米（0.12 英寸）见方的硅芯片上包含大约 10 个单独的组件；到 1970 年，相同尺寸的芯片上的组件数量达到 1000 个；到 20 世纪 80 年代中期，廉价的微处理器刺激了种类繁多的消费产品的计算机化，常见的例子包括可编程微波炉和恒温器、洗衣机和烘干机、自调谐电视机和自聚焦相机、录像机和视频游戏、电话和答录机、乐器、手表和安全系统。微电子也在商业、工业、政府和其他领域脱颖而出。基于微处理器的设备激增，如零售店的自动取款机（ATM）和销售点终端，以及自动化工厂组装系统和办公工作站。

从历史的进程来说，上面的这个过程显然包括在第三次工业革命之中，可是，从另外一个视角（也就是从宏观走向微观）来说，半导体可能开启了一个全新的工业革命时代。所以对工业革命的断代，半导体人也有独到的理解和洞察。2019 年，中微半导体董事长尹志尧博士^①在世界人工智能大会（WAIC）做了题为《从微观加工为基础的数码时代展望第三代工业革命的到来》演讲，如图 1-12 所示。



图 1-12 尹志尧博士分享他的工业革命观

资料来源：世界人工智能大会（WAIC）官网

① 尹志尧，1944 年出生，美籍华人。中国科学技术大学学士，加州大学洛杉矶分校博士。1984—1986 年，就职于英特尔中心技术开发部，担任工艺工程师；1986—1991 年，就职于泛林半导体，历任研发部资深工程师、研发部资深经理；1991—2004 年，就职于应用材料，历任等离子体刻蚀设备产品总部首席技术官、总公司副总裁及等离子体刻蚀事业群总经理、亚洲总部首席技术官；2004 年至今，担任中微公司董事长及总经理。2012 年，尹志尧获得上海市“白玉兰纪念奖”。2020 年 8 月，尹志尧位列“2020 福布斯中国最佳 CEO 榜”第 30 位。

他的“半导体工业革命说”是当代我国半导体人在中美集成电路与芯片博弈下，对历史的总结及对未来的深刻思考。很多专家把蒸汽机和电的发明算作两代工业革命，他认为关于工业革命的断代应该做不同的解释，具体如表 1-9 所示。更详细的阐释请扫码查看。

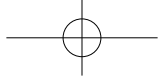


表 1-9 尹志尧博士的工业革命观

名 称	开 始 时 间	特 点
第一次工业革命	18 世纪 60 年代	● 本质是发展以宏观加工为核心的传统工业，首先要有宏观的材料：钢铁、化工、陶瓷、纤维、塑料等。有了材料以后要用机器把它加工成型，如车床、铣床、刨床、镗床、钻床、磨床等，现在叫五轴联动加工中心，甚至六轴联动加工中心。有了机器，还需要有宏观能源的推动，包括蒸汽机、内燃机、电动机等，这样就形成了一个以宏观加工为核心的传统工业，这段时期称为机械化时代 ● 机械化时代的特点是把东西越做越大，现在盖楼可以盖到 600 米、800 米，甚至上千米。跨海长桥、高铁、大飞机，这就是这一代工业革命的标志性产品
第二次工业革命	20 世纪 60 年代	● 从美国硅谷开始，催生了数码时代，也有人叫智能化时代。这个时代的特点是从机械化到智能化，造出计算机来代替人脑，造出很多不同的微观器件 ● 微观加工成为核心产业，它的特点是越做越小。它也需要基本产业的组合：第一是微观材料。第二是要有微观加工的母机，包括光刻机、等离子刻蚀机等，在很小的尺度上精雕细刻，做出微观结构。伴随着这一代的工业革命，产生了能源的变革，包括核能、太阳能和氢能等。我们现在正处在此次工业革命的高潮，微观器件的产品层出不穷，特别是集成电路正处于大发展时期
第三次工业革命	现在到未来	● 由生物工程和电子技术集成的电子生物工业革命 ● 前两次工业革命是人类改造世界的阶段，目前人类开始进入的第三次工业革命——人类改造自己，而 AI 是人类从数码时代到第三次工业革命的重要催化剂。这场新的革命已经悄悄开始，我们应当进一步认识这场革命的机会和风险，积极参与这场革命，积极引导这场革命向健康的方向发展

资料来源：尹志尧博士演讲

在时隔三年后的一次访谈中，他表示：我国在集成电路的发展中晚了 30 年，后面的科技发展将迎来“超级人类时代”，我国不能再晚了，因为这是未来的科技战场。面向未来的第三次工业革命是令人兴奋的，我们将进入超级人类时代，得以基于原生人和智能器件的合体来改造自身，使人类可以更健康、更智慧、更美丽。尹博士这样来解释他们的工作难度：最杰出的米粒微雕艺术家在一颗米粒上雕刻 200 个汉字已经达到极限，而中微半导体公司研发的等离子刻蚀机的加工



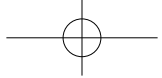
工艺相当于在一颗米粒上雕刻 10 亿个汉字。这似乎让我们想起了电影《阿丽塔：战斗天使》，其中的角色大部分都是半人半机械的合体，在未来，加工超级人类就如同制造一台计算机那样简单。

尹博士是一位把技术和管理完美结合的半导体行业领导人。中微半导体实现了全员持股制度，因为高科技企业和低端生产力为主的企业不同，没有员工的断层结构，是一个阶梯式的渐进结构，不能只允许高管持有公司的股票。从具体的技术细分来看，半导体制造业中影响品质的“魔鬼”都藏在细微之中，需要每个人都有担当。公司除了提供处于核心地位的、在业界领先的刻蚀机之外，尹博士更着眼于长远的未来。在 2020 年的一次会议中，他在回顾了中微半导体公司发展历史之后，提出了一个问题：如何发明中国每个家庭都需要的下一代智能设备？这个下一代智能设备当然不是智能音箱，应该是他所关注的科技下一站——超级人类时代的智能设备。

1.2.2 不死摩尔定律正从纳米深入埃米

就像芯片中的开关一样，晶体管由源极、漏极和栅极组成。我们可以将晶体管理解为一种类似于“水龙头”的电子器件，主要用于控制电流（水流）的大小。由于晶体管对电流的控制是通过对栅极施加一个电压，从而在通道内部产生一个电场，以此来调节源极和漏极之间电流的大小，所以它的全称是场效应晶体管（Field Effect Transistor, FET）。在操作中，电子从源极流向漏极，并受栅极控制。如图 1-13 所示，鳍式 FET（FinFET）在 22 纳米节点的首次商业化为晶体管——芯片的微型开关——带来了颠覆性变革。与此前的平面晶体管相比，与栅极三面接触的“鳍”所形成的通道更容易控制。但是，随着 3 纳米和 5 纳米技术节点面临的难题不断累积，FinFET 的效用已经趋于极限，进一步减小 FinFET 的尺寸会限制驱动电流和静电控制能力。此外，虽然“鳍”的三面均受栅极控制，但仍有一面是不受控的，随着栅极长度的缩短，短沟道效应就会更明显，也会有更多电流通过器件底部无接触的部分泄漏，更小尺寸的器件就会无法满足功耗和性能要求。环绕栅极 FET（GAAFET）是一种经过改良的晶体管结构，其中通道的所有面都与栅极接触，这样就可以实现连续缩放。

在半导体与集成电路的发展历程中，硅基出现之后，在成本不变的情况下实现了晶体管数量的不断增加，这是集成电路行业发展过程中的一个客观现象。几十年来，集成电路行业一直试图跟上并持续这种现象，即保持摩尔定律的步伐，每 18 ~ 24 个月将芯片中的晶体管密度翻一番。事实上，芯片厂商确实也会以



18 ~ 24 个月的节奏推出具有更高晶体管密度的新工艺技术，从而降低每个晶体管的成本。在每个技术节点，设备厂商可以通过缩小晶体管的方法来降低器件面积、成本和功耗并实现性能提升，这种方式也称为 PPAY^① 缩放。

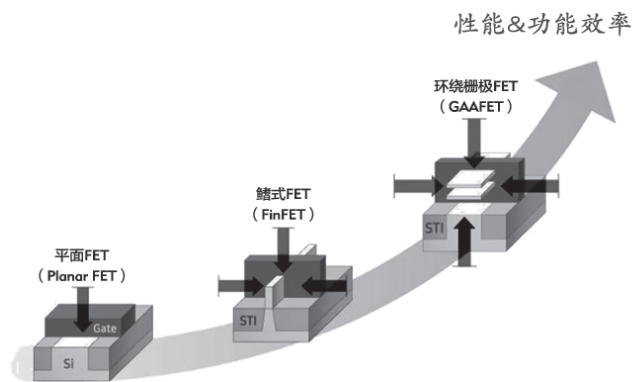


图 1-13 越发先进的三代晶体管结构

资料来源：三星官网

多年前，节点名称是基于一个关键的晶体管指标，即栅极长度。例如，7 纳米技术节点生产了一个栅极长度为 7 纳米的晶体管。一段时间以来，节点编号已成为单纯的营销名称。例如，5 纳米是当今最先进的工艺，但没有达成一致的 5 纳米规范。3 纳米、2 纳米等也是如此。当供应商对节点使用不同的定义时，情况会更加混乱。英特尔正在出货基于其 10 纳米工艺的芯片，这大致相当于台积电和三星的 7 纳米工艺产品。

纳米阶段的竞争还没有结束，世界领先的厂商已开始了埃米级^②制程计划。据悉，半导体制程将于 2024 年进入埃米时代。2021 年 7 月，英特尔继在 3 月宣布 IDM 2.0 计划之后，又公布了最新的半导体制程和先进封装的路线图。英特尔计划在 2024 年用 Intel 20A 制程将半导体行业带入埃米时代。英特尔的 CEO 帕特·基辛格表示：“对于未来十年走向超越 1 纳米节点的创新，英特尔有着一条清晰的路径。在穷尽元素周期表之前，摩尔定律都不会失效，英特尔将持续利用硅的神奇力量不断推进创新。”台积电 2 纳米 Fab 20 超大型晶圆工厂已选定建厂地点为新竹宝山，2 纳米之后的更先进制程已进入埃米时代，预期台积电将推进到 18 埃米（1.8 纳米）。台积电超大型晶圆工厂布局如表 1-10 所示。

① PPAY（即功率、性能、面积、良率：Power、Performance、Area、Yield）或 PPAC（即功率、性能、面积、成本：Power、Performance、Area、Cost）一直是所有芯片产品开发避不开的关键要素。

② 埃米（Angstrom）是晶体学、原子物理、超显微结构等常用的长度单位，其尺寸是纳米的十分之一。

表 1-13 台积电超大型晶圆工厂布局

晶圆厂区	Fab 12	Fab 14	Fab 15	Fab 18	Fab 20
建厂地点	新竹	台南	台中	台南	新竹
最新制程布局	7 纳米	16 纳米	7 纳米	5 纳米	2 纳米
	6 纳米	12 纳米	6 纳米	4 纳米	
	5 纳米		Fab 15 旁的新厂可能为 2 纳米	3 纳米	

资料来源：业界公告与法人预估

当然，摩尔定律并不是一成不变的。1965 年，戈登·摩尔在行业杂志《电子学》35 周年特刊上发表的一篇文章指出：单一硅芯片上的组件数量每年大约翻一番，他预计这一趋势将继续下去，这是他的一个观点或者说是一个猜想，而这个猜想在十年中得到了验证。十年后，摩尔将他的预计从一年改为两年，因为微观制造越发艰难。就如同往地下打桩，桩打得越深，下面的情况越不可见，操作环境越复杂、人为的有效控制越难、对技术要求越高。近年来，尽管制造技术的不断突破和芯片设计的不断创新保持着这种势头，但摩尔定律的发展依旧受到了质疑。所以在后摩尔时代，有两种不完全相同的技术路线（由 ITRS 于 2005 年在第一份白皮书提到）：

（1）“More Moore”：继续延续摩尔定律的精髓，以缩小数字集成电路的尺寸为目的，同时器件优化重心兼顾性能及功耗。

（2）“More than Moore”：芯片性能的提升不再靠单纯的堆叠晶体管，而更多地靠电路设计以及系统算法优化；同时，借助于先进封装技术，实现异构集成^①，即把依靠先进工艺实现的数字芯片模块和依靠成熟工艺实现的模拟 / 射频等集成到一起以提升芯片性能。

Google 首席工程师雷·库兹韦尔的一项研究表明，历史上计算机处理能力和技术创新会出现指数式增长。在这些过程中，每个阶段的速度基于前阶段知识的积累得以加速发展。换句话说，在进化过程中，前一个阶段产生的更好的方法与算力，一定会顺延到下一阶段，这样一旦发生重大的技术革新，进化的速度就会加快。技术增长将变得无法控制，人类文明也会发生巨大变化。

基于这样的发展逻辑，半导体产业的投资大战正持续进行。加上周期性与地缘政治等因素带来的芯片短缺，芯片的制造难度无论是在制程工艺上，还是在

① 异构集成（Heterogeneous Integration）是指在封装层面，通过先进封装技术将不同工艺节点、不同材质的芯片集成在一起，如将 Si、GaN、SiC、InP 生产加工的芯片封装到一起，形成不同材料的半导体协同工作的场景。基于异构集成的异构计算可以充分利用各种计算资源的并行和分布计算技术，能够将不同制程和架构、不同指令集、不同功能的硬件进行组合，已经成为解决算力瓶颈的重要方式。

大规模量产产能上都在持续升级和放大。如今，2～3 纳米的芯片有望于 2022—2025 年间量产。全球最大的芯片代工企业台积电已拥有 6 座 12 英寸超大晶圆工厂、6 座 8 英寸晶圆工厂、1 座 6 英寸晶圆工厂和 4 家后端封测厂，2021 年又推出高达 280 亿美元的设备投资计划。

根据市场研究机构集邦咨询的数据，台积电控制着全球芯片 55% 的市场份额，其次是三星，占有 17% 的市场份额。台积电于 2020 年披露了在美国亚利桑那州建造一座价值 120 亿美元的芯片工厂的计划，预计将于 2024 年投产。2021 年，三星宣布了一项 170 亿美元的投资计划，以在美国建造一座代工厂，根据其 2030 年愿景，三星计划投资总额达到 133 万亿韩元（约合 1160 亿美元），届时将成为全球最大的代工企业。台积电与三星之间的竞争正值美国试图提高其国内芯片产量以对抗中国日益增长的影响力之际，英特尔也宣布了一项 200 亿美元起步，最终规模可达 1000 亿美元的投资计划，以建立两个新的芯片制造工厂并涉足代工业务。新工厂的建设于 2022 年就开始了，计划 2025 年实现量产。英特尔凭借其先进的技术进军代工市场，将对三星造成打击，而三星正在努力缩小与台积电的差距。

台积电的 3 纳米技术（N3）将是基于 5 纳米技术（N5）的又一全新节点。与 N5 技术相比，N3 技术将提供高达 70% 的逻辑密度增益、高达 15% 的速度提升以及相同速度下高达 30% 的功耗降低。据 IBS 称，开发主流 3 纳米芯片设计的成本高达 5.9 亿美元，而开发 5 纳米器件的成本为 4.16 亿美元，7 纳米的成本约为 2.17 亿美元，28 纳米的成本只有 4000 万美元。此外，无论是 IBM、三星还是台积电，采用 2 纳米芯片制造技术都需要 ASML 的全新一代 EUV 光刻机做辅助，该光刻机预计在 2023 年交付厂商研发测试、2024 年量产。ASML 的全新一代 EUV 光刻机的售价超过 3 亿美元，这意味着 2 纳米芯片的成本也将上涨。由于纳米的尺寸是难以想象的，因此用图 1-14 给出比较示例。

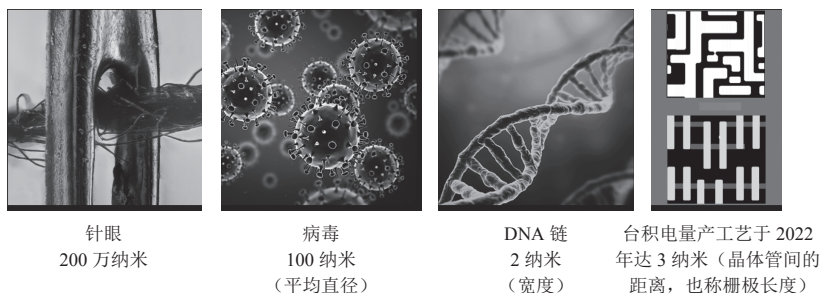
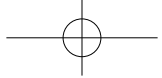


图 1-14 纳米的尺寸概念

资料来源：根据示例改编^①

① Jacob George, 2021, *Challenges In Adopting ML In Manufacturing*。



相关报道称，台积电决定于 2022 年 8 月率先量产第二版 3 纳米制程芯片，正式以 FinFET 架构，对决三星的 GAAFET 架构，3 纳米工厂的月晶圆产量估计为 3000 ~ 5000 片。随着 3 纳米晶圆量产，苹果公司预计在 2023 年发布首批采用台积电制造的 3 纳米芯片的设备，包括采用 M3 芯片的 Mac 和采用 A17 芯片的 iPhone 15 机型。像往常一样，转向更先进的工艺会带来性能和电源效率的提高，这将使未来的 Mac 和 iPhone 拥有更快的速度和更长的电池寿命。The Information 的 Wayne Ma 报道称，一些 M3 芯片将有多达四个模具，他说这可能允许 40 核 CPU。相比之下，M1 芯片有 8 核 CPU，M1 Pro 和 M1 Max 芯片有 10 核 CPU。M1 Mac 已经提供了行业领先的性能，而 iPhone 13 中的 A15 芯片是智能手机中最快的处理器，因此在几年内转向 3 纳米工艺应该会加强苹果公司在该领域的领先地位。

在 2 纳米芯片上，各大芯片厂商将采用不同的制造工艺。2021 年 5 月，IBM 已经发布了全球首个 2 纳米芯片制造技术，该技术比主流的 7 纳米工艺芯片性能提升 45%，能效提升 75%。2 纳米芯片的潜在优势包括：手机电池寿命翻两番，用户只需每四天为其设备充电；削减占全球能源使用量 1% 的数据中心的碳排放；大大提升笔记本电脑的性能；加快自动驾驶汽车的物体检测和反应时间。

台积电的 Fab 20 将是其 2 纳米工艺的主要站点。位于新竹科学园区的 Fab 20 预计于 2024 年下半年开始量产，和以往一样，台积电的 2 纳米工艺将首先应用于苹果的新 iPhone 系列智能手机。台积电预计投入将达到 360 亿美元，是亚利桑那州 5 纳米工厂投资的 3 倍，占地近 100 万平方米。台积电位于台湾中部科学园区的工厂也将托管其超过 2 纳米的工艺节点。如果一切顺利，一些半导体设备厂商的 1.8 纳米（18 埃米）芯片将在 2026—2027 年进入量产阶段。

1.2.3 投资成本增势与产能预期

芯片如此重要，造成芯片荒的根本原因是供需不平衡，即数字化进程发展太快，需求过于旺盛，设计能力够而制造能力却不足。那么制造能力为何不足呢？从产业链条上看，我国除芯片设计能力外，在生产设备、芯片原材料和设计软件等方面还存在较大差距，特别是在高性能芯片领域，国内企业的全球竞争力很弱。而芯片制造并非靠“集中力量办大事”就能一蹴而就。例如芯片材料的纯度配方，需要经过几十年的不断试验，在失败中积累经验。一款新的芯片从构想，到量产问世需要十年以上的时间，其中，制造芯片的设备需要五年的研发周期，而芯片厂商从建厂到量产又需要五年。先进制程生产的芯片由于对工艺、设备、材料等方面的要求更高，因此需要的时间更长。2022 年，欧盟委员会公布的《芯片法案》

中计划投资约 500 亿美元以新建 2 ~ 4 家超级芯片工厂，包括带动的其他公共与私人投资预计达到 1500 亿欧元，但预计到 2030 年也只能将欧盟的芯片产能从目前占全球 10% 的份额提高到 20%，可见芯片的制造实属不易。大量的自动化工具使得芯片设计过程变得更顺利，设计芯片比以往任何时候都更容易，而制造芯片却从未如此艰难。

在晶圆代工市场规模方面，IC Insights 预估，排除三星及英特尔等 IDM 之外的纯晶圆代工市场，2019 年的规模减少了 1%，但 2020 年增长了 19%，增长幅度创下近年新高。

如图 1-15 所示，纯晶圆代工市场规模在 2014—2019 年的年复合成长率（CAGR）达 6.0%，2019—2024 年的 CAGR 将增加 3.8 个百分点达 9.8%。

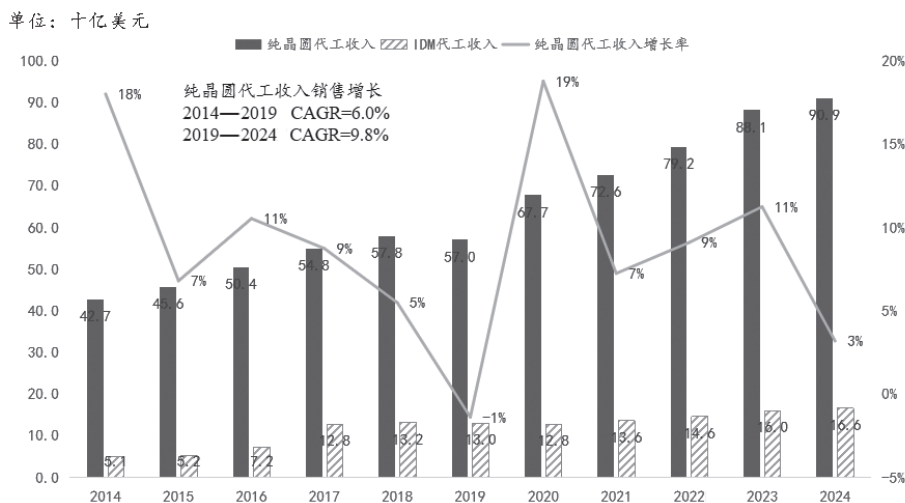


图 1-15 2014—2024 年芯片代工厂销售预期

资料来源：IC Insights

汽车行业是“芯片荒”的重灾区，调研机构 IHS Markit 表示，2021 年一季度因芯片短缺导致的汽车减产数量达 67.2 万辆，二季度减产约 130 万辆。目前看来这一短缺难以提到快速缓解，根据 2021 年中国银行研究院的报告，全球晶圆工厂在 2015—2019 年扩产不足，尤其是 8 英寸等成熟制程。全球芯片制造龙头台积电通常采取较为激进的折旧策略，设备折旧完成后即对成熟制程降价以打击竞争对手，导致 8 英寸晶圆等成熟制程利润有限，晶圆产能整体呈现出由 8 英寸向 12 英寸转移的趋势。根据 IC Insights 统计，2009—2019 年，全球共关闭了 100 座晶圆代工厂，其中，8 英寸晶圆工厂为 24 座，占比 24%，6 英寸晶圆工厂为 42 座，占比 42%。目前 8 英寸设备主要来自二手市场，数量较少且价格昂贵，设备的稀缺

钳制着 8 英寸晶圆产能的释放。8 英寸晶圆通常对应 90 纳米以上制程，在这些制程下生产的功率器件、CIS、PMIC、RF、指纹芯片及 NORflash 等产品的产能被明显限制。

根据 SIA 发布的数据显示，2021 年全球半导体市场销售额总计 5559 亿美元，同比增长 26.2%，创下历史新高。同期，中国以 1925 亿美元的半导体销售额成为全球规模最大的区域市场，占比 34.6%，同比涨幅为 27.1%，全球第三，位于美国（27.4%）和欧洲（27.3%）市场之后。

近几年，集成电路已成为“科技战”的关键战场。多重因素驱动下，中国集成电路市场规模逐年增长，产业整体实力迅速提升，产业结构不断优化，产业区域聚集度也不断提高。2022 年 3 月，中国半导体行业协会（CSIA）发布统计数据表示：2021 年是中国“十四五”开局之年，在国内宏观经济运行良好的驱动下，国内集成电路行业继续保持快速、平稳增长态势，2021 年中国集成电路行业首次突破万亿元。2021 年中国集成电路行业销售额为 10458.3 亿元，同比增长 18.2%。其中，设计业销售额为 4519 亿元，同比增长 19.6%；制造业销售额为 3176.3 亿元，同比增长 24.1%；封装测试业销售额为 2763 亿元，同比增长 10.1%。2015—2021 年我国集成电路行业销售收入及增长情况如图 1-16 所示。

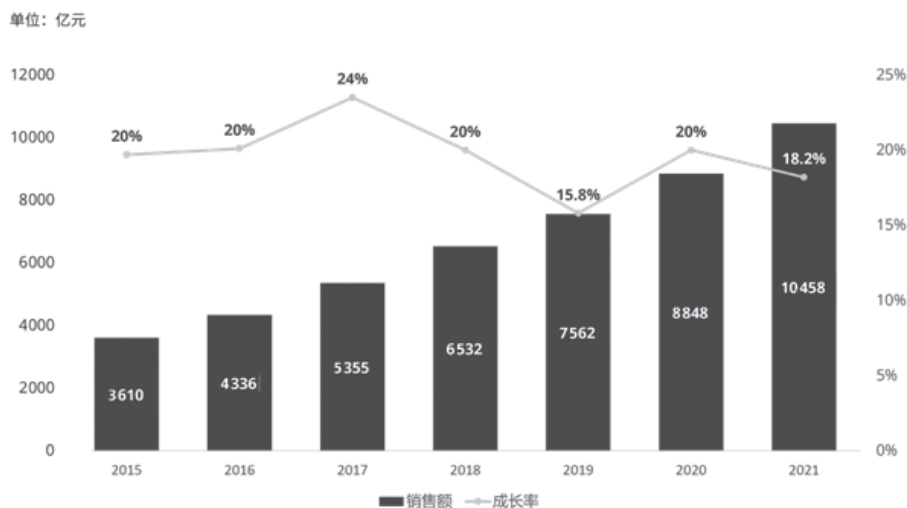
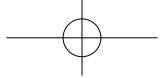


图 1-16 2015—2021 年我国集成电路行业销售收入及增长情况

资料来源：Colliers 高力国际官网

即使我国集成电路销售收入不断增长，但相对更为旺盛的需求而言，中国本土的产能还是严重不足的。

造成这一现象的原因是中国本土芯片产业的研发能力与制造能力严重不匹配。



而高端芯片研发人才和制造人才资源短缺，使这一问题雪上加霜。中芯国际联席 CEO 赵海军在 2021 年红杉数字科技全球领袖峰会上表示，如果本地制造能够实现对于三成本土需求的支撑，那么国内的半导体制造业至少还要增长五倍的产能。IC Insights 预测，以中国本土为基地的集成电路制造业在 2025 年将上升到 432 亿美元，只占预测的 2025 年全球集成电路市场总额 5779 亿美元的 7.5%。即使对一些中国本土生产商的集成电路销售加价，中国本土的集成电路生产仍可能只占 2025 年全球集成电路市场的 10% 左右。由此可见，我国已是集成电路大国，拥有比较完整的集成电路产业链和产品体系，但还不是集成电路强国，主要短板体现在集成电路制造上。供应链分析公司 Supplyframe 首席营销官巴奈特表示，芯片短缺将持续到 2023 年，未来将会“一波接一波”冲击市场，那么对于中国本土芯片行业来说，突围之路的第一步就是扩产。

全球高科技产业研究机构集邦咨询统计，2022 年以后全球将新增 12 座完整的晶圆代工厂。中国本土的半导体制造业也在迅速扩大产能，以中芯国际为例，2021 年 2 月，中芯国际在北京亦庄投资的中芯京城一期项目开始建设，该项目投资总额约为 497 亿元，预计于 2024 年完工。2021 年 3 月，中芯国际宣布斥资 88.7 亿美元新建上海临港厂房，规划建设新的晶圆代工生产线项目，聚焦于 28 纳米及以上技术节点（属于成熟制程，是目前全球多个产业迫切需要的芯片类型），产能达到每月 10 万片 12 英寸晶圆的规模。2021 年 10 月，深圳市坪山区投资推广服务署公示了中芯深圳 12 英寸晶圆代工生产线配套厂房项目遴选方案，中芯国际斥资 23.5 亿美元建立深圳坪山厂房，全力推动 12 英寸生产线建设。中芯国际在北京、上海、深圳的扩产项目均属于公司 12 英寸成熟制程，投资金额总计超 1200 亿元。同时我们关注到，随着全球先进芯片制程迈入 5 纳米工艺节点，每座单一晶圆厂的投资规模也普遍达到千亿元人民币的规模。

如图 1-17 所示，随着工艺节点不断微缩，虽然芯片的设计成本也有所增加，但这种增长即使到了 5 纳米节点也可以控制在 5 亿美元左右，而制造成本则达到了设计成本的近十倍，是 7 纳米的两倍，从最初在 65 纳米的 4 亿美元左右达到 60 亿美元左右。未来先进制程芯片的工厂投资如此巨大，导致建立这样先进工厂的机会越来越少。目前几个巨头之间的竞争也会白热化，而其他腰部和尾部的半导体厂商无论是资本实力，还是技术储备都难以进入这些领域。

如图 1-18 所示，在 130 纳米量产时代，全球有 18 家芯片厂商；到了 14 纳米节点，全球只有 4 家，包括中国的中芯国际；到了 10 纳米只剩下 3 家；7 纳米厂商则只有台积电和三星。

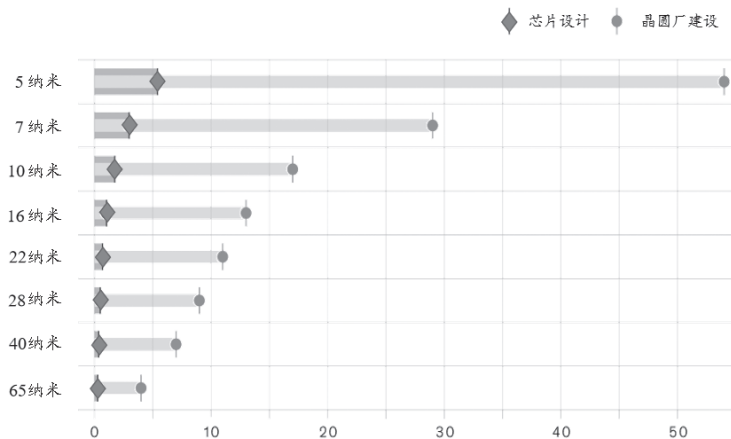


图 1-17 不同工艺节点的芯片设计与晶圆厂建设成本（单位：亿美元）

注：按节点尺寸递增

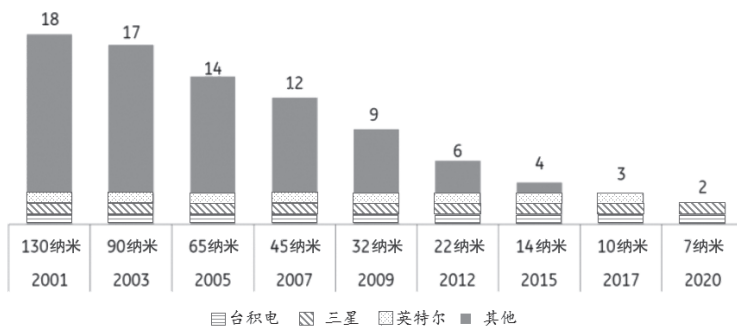
资料来源：IBS、麦肯锡报告^①

图 1-18 芯片厂商随着先进制程节点推进而递减

注：顶部数字表示厂商数量

资料来源：德意志银行、ING 研究

即使未来的总体产能可以满足需求，但由于人们对于算力和体验有着无尽的追求，包括元宇宙的兴起，最为先进的芯片供给始终不会宽裕。换句话说，无论是先进芯片制造的设备还是厂商，其规划的产能都是被提前预订的，就如同先进芯片制造厂商在抢 ASML 最先进的光刻机，终端产品厂商都在抢台积电最先进的芯片一样。在这样的情况下，大量腰部与尾部的芯片厂商即使不进入先进制程领域，而是在相对成熟的制造发力，也同样面临与先进厂商的产品竞争。在设备、工艺、材料相对固定的情况下，必须通过智造软件不断提升良率和产能，同时降低成本，才能占领市场的一席之地。

^① McKinsey & Company, 2021, *Scaling AI in the Sector that Enables it: lessons for Semiconductor-Device Makers*.