

Views & Comments

关于后摩尔时代我国集成电路制造领域的一些思考

吴汉明, 郑飞君

School of Micro-Nano Electronics, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

1. 背景

集成电路 (IC) 是现代信息技术的基础和核心产业之一, 是与全球经济社会发展密切相关的基础和先导产业。全球半导体行业将迎来 10 年的增长, 预计到 2030 年将成为一个价值数万亿美金的产业 (图 1 [1])。技术水平和产业规模是评价一个国家或地区的现代化程度和综合国力的重要指标。集成电路被誉为一个国家的“工业粮食”, 是培育和发展战略性新兴产业, 促进信息化与产业化深度融合的基础。从工业 4.0 到汽车电子、人工智能等应用领域, 对尖端芯片和高可靠性芯片的需求持续强劲。作为当前国际竞争的焦点, 集成电路在促进国家经济发展和社会进步, 提高人们的生活水平, 确保国家安全方面也发挥着广泛而关键的作用。当前的竞争不涉及某个技术节点或单一的特定技术。相反, 这种核心竞争力是集成电路产业链的整体实力, 依赖于跟踪产业发展动态目标的能力, 而这又完全依赖于全球高端基础产业的支持。

2. 后摩尔时代的特点

关于这个话题的讨论, 有必要从理解摩尔定律开始, 这是由英特尔的创始人之一戈登·摩尔提出的。在 1965 年的 *Electronics* 期刊上, 摩尔预测, 在元件成本最低的情况下, 集成电路的复杂性每年翻倍 [2]。10 年后, 在 1975

年的 IEEE 国际电子器件会议 (IEDM) 上, 摩尔提出, 芯片上的晶体管密度 (TrD) 可以每 2~3 年 [3] 增加一倍。在随后的 40 年里, 微处理器的开发基本上就遵循了这一步伐。然而, 内存芯片密度的发展速度相对更快, 每 18 个月增长一倍。摩尔本人认为, 到 2005 年, 技术发展的成本将难以维持; 然而, 从技术的角度来看, 根据摩尔定律, 技术发展可以持续到 2025 年。

在一次关于技术发展的讨论中, 英特尔前总裁保罗·欧德宁表示, 英特尔的研发 (R&D) 目标不仅是满足这些重要的性能参数, 而且还要满足每瓦功耗参数。因此, 提出了“每瓦特性能”的概念 [4]。现实情况是, 在 28 nm 技术节点的发展之后, 该行业似乎很难在保持单位面积成本的同时将 TrD 翻一番。未来技术的发展必须在性能、能耗和成本之间进行平衡。也就是说, 如果应用目标主要要求高性能, 就必须放弃追求能耗和成本降低。相反, 简单地考虑成本降低将不可避免地导致功耗和性能方面的权衡。在摩尔定律的框架下, 这三个组成部分不可能每两年更新一次。因此, 可以认为 28 nm 技术一代代表了摩尔定律的终结, 而 20 nm 技术一代开创了后摩尔时代。

图 2 [5] 表明, 每一代新技术节点的 TrD 都得到了不同程度的改进, 英特尔的 TrD 几乎翻了一番。台湾半导体制造公司 (TSMC) 和英特尔对 TrD 的定义不同, 因此无法真正比较两者在 TrD 方面的进展; 只能将其与各自的技术世代进行比较, 这远不是摩尔定律提出的每两年新一代芯

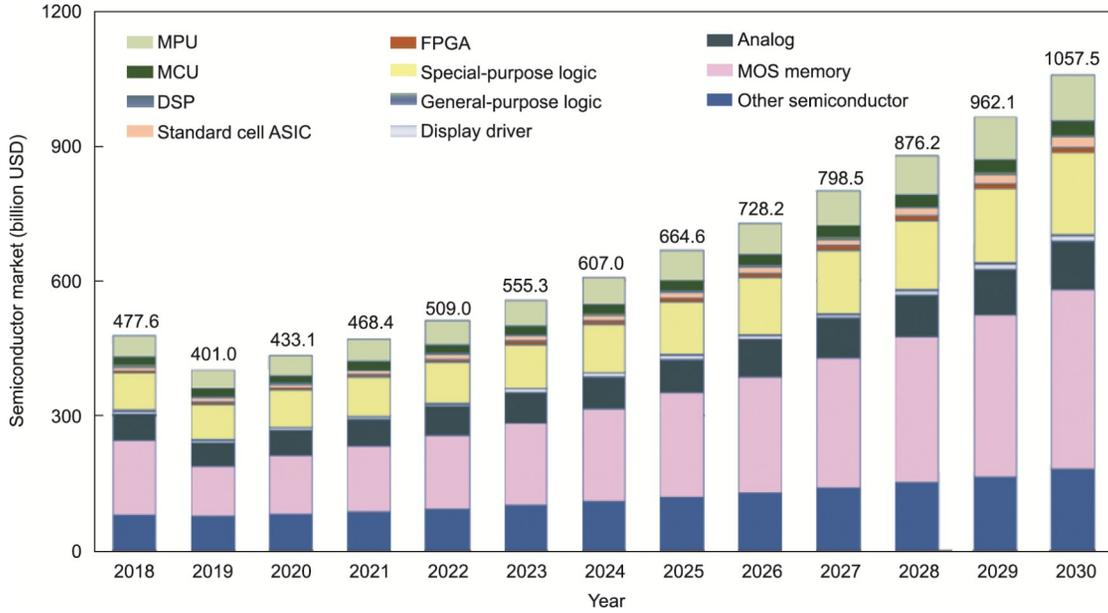


图1. 按产品划分的全球半导体市场趋势。半导体市场将在2030年达到1万亿美元。数据来自国际半导体设备与材料协会（SEMI）[1]。MPU：微处理器单元；MCU：微控制器单元；DSP：数字信号处理；ASIC：应用专用集成电路；FPGA：现场可编程门阵列；MOS：金属氧化物半导体。

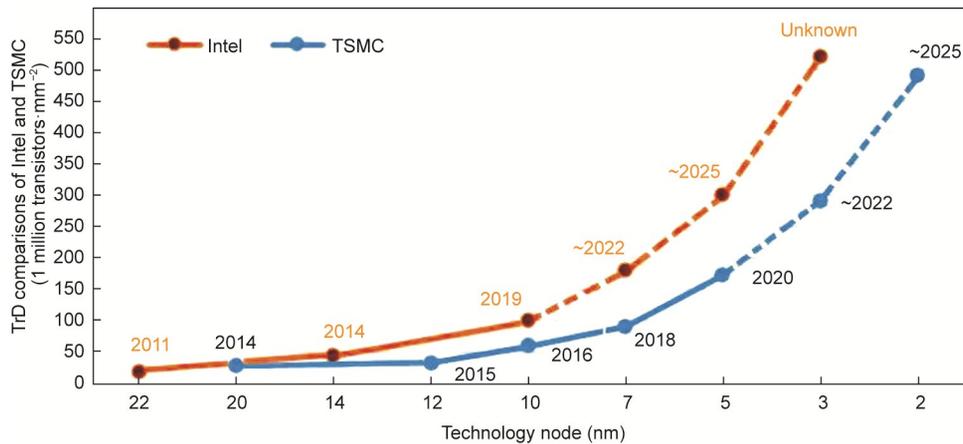


图2. TrD与领先芯片代工厂英特尔和TSMC的技术节点对比[5]。TSMC：台湾半导体制造公司。

片晶体管密度“加倍”的目标。TSMC每单位的相对成本也如图3 [6]所示，其中，成本斜率从20 nm技术节点开始下降。此外，图4 [7]显示了2020年中国集成电路在不同技术节点的收入份额。

后摩尔时代有以下五个特点：①技术方向仍在探索中；②（晶体管）线宽不再是唯一有意追求的参数；③应用范围广，应用在世界各地和日常生活的各个部分；④存在市场分散，没有明显的垄断；⑤研发经费投入相对较低。

在摩尔时代，技术规模每两年缩小一次，创新应用就是基于这个概念。这是所谓的“惯性思维”的一个例子（例如，包括应用程序在内，每个人都在朝着一个方向移动）。相反，在后摩尔时代，创新是无限的，每个人都根据自己的经验朝不同的方向创新。在不同的思维方式下，

各种想法相互竞争，没有明显的赢家或输家。例如，在量子计算和神经形态计算中，一种新的产业模式可能会出现。目前的十大创新项目中有多少项能存活下来？这几乎是不可能预测的。

摩尔定律并不是通过科学研究发现的一个“真正的”定律。相反，它是一个解释技术与产业发展之间关系的经验规律。摩尔定律的本质是技术垄断与技术竞争力的统一。摩尔定律也是工业技术发展过程中技术与资本妥协的结果。

3. 后摩尔时代的挑战和机遇

鉴于上述后摩尔时代的特点，后摩尔时代的中国将有

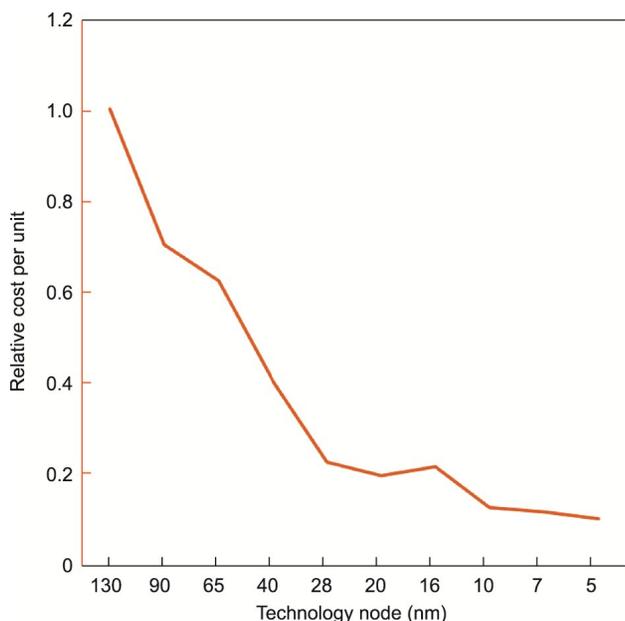


图3. TSMC 技术节点的每单位相对成本[6]。

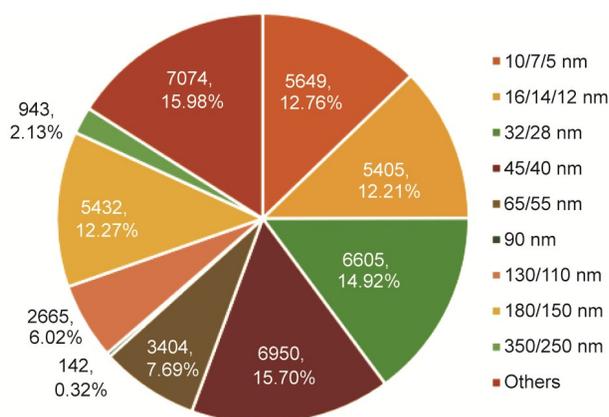


图4. 中国集成电路产品收入按技术节点划分[7]。单位为百万美元。

五个相关的发展机遇：①技术创新空间广阔；②设备将更便宜，其他技术发展的条件也不会那么苛刻；③将有巨大的市场空间，回收投资难度显著降低；④创新型中小企业很容易在上海证券交易所（SSE）科创板（STAR 市场）生存和发展；⑤产品开发将很容易，研发团队和资金需求也不会无法实现。把握好这些机遇，就能有效缩小中国与世界工业技术水平的差距。

从宏观的角度来看，后摩尔时代的挑战主要来自于技术和社会这两个方面。前者是目前世界各国面临的瓶颈，后者是中国崛起所面临的独特的逆全球化环境下的产业生态建设。

3.1. 后摩尔时代的技术挑战

由于后摩尔时代技术研发投资壁垒迅速增加，目前只有英特尔、三星和 TSMC 仍在大力投资 5 nm 及以上的技术

节点开发，并达到了 5/7 nm 制造的目标。中国大陆的中芯国际（SMIC）在三年前也宣布，14 nm 技术节点已经达到了“客户引进”（“customer introduction”）阶段。全球 14 nm 以下高端芯片制造过程中使用的设备基本在美国和日本制造，而光刻机在荷兰制造。荷兰公司 ASML 最高端的极紫外（EUV）光刻机由世界各地 5000 多家顶级组件材料供应商支持，荷兰本土技术约占 30%。更具体地说，核心光源采用美国技术，光学系统采用德国技术，大部分材料来自日本。

后摩尔时代先进芯片制造技术的发展趋势是极小规模 and 超大型项目的混合体。极小的尺度意味着晶体管的物理尺寸小于 10 nm（头发的直径约为 10 000 nm）。在某些关键尺寸上，精度小于 1 nm。超大规模意味着，需要在直径 300 mm 的大型硅片上同时制造数千亿个晶体管、数千亿个通孔或触点，以及几万公里长的只有几纳米宽的沟槽，误差不到 1 nm。这种最低限度几乎达到了人类现代制造业的物理极限，超大规模体现了当代系统工程的最高水平[8]。

集成电路制造工艺技术面临三个关键挑战：精确的图案转移、材料和工艺技术、产量提高和成本控制。

3.1.1. 精确的图案转移

第一个挑战是一个根本性的挑战：精确的图案转移，这主要是指通过光刻和蚀刻的结合将设计图案转移到硅片上。通过离子注入实现的局部材料改性也需要通过光刻技术来定义。光刻技术决定了工艺技术的节点。例如，在 130 nm（或 0.13 μm ）以下，需要使用波长为 193 nm 的 ArF 来确定后续蚀刻过程的蚀刻面积。这种干式 ArF 光刻技术支持三代 130 nm、90 nm 和 65 nm 节点。当技术发展到 45/40 nm 技术节点时，需要采用浸入式 ArF 光刻技术，它支持 45/40 nm 和 32/28 nm 技术节点。从 22/20 nm 开始，包括 16/14 nm、10 nm 和 7 nm 技术节点，第四代技术由 ArF 浸没式光刻技术支持。自 5 nm 技术问世以来，波长为 13.5 nm 的 EUV 光刻技术已成为该行业的主流。理论上，在没有 EUV 光刻的情况下，可以在 5 nm 技术节点上实现芯片制造，也就是说，可以通过多重曝光技术实现图案转移。然而，出于产量和成本的考虑，EUV 光刻技术在主流行业中使用。

光刻是图案转移的基础。在光刻技术完成后，使用蚀刻法将光刻图案转移到硅上。目前，该行业广泛采用等离子体蚀刻技术，根据等离子体的各向异性特性，可以将光刻技术所定义的区域刻蚀在硅上。蚀刻目标只有几十纳米宽，对等离子体参数极其敏感。因此，对等离子体参数的

优化控制已成为蚀刻工艺技术研究的重点。

3.1.2. 材料和工艺技术

第二个关键挑战在于新材料和新工艺技术。在集成电路芯片技术的早期发展中，材料的作用没有得到充分的重视。21世纪初，当技术节点发展到130 nm技术的一代时，材料的作用开始显现，主要是因为以前使用的铝线被铜线取代，以进行后端互连。与此同时，传统的后端介质氧化硅让位于低 κ （其中， κ 为介电常数）的氟硅酸盐玻璃（FSG）材料。虽然铜不是一种新发现的材料，但铜在集成电路芯片上的应用带来了巨大的挑战。主要原因是铜具有独特的非易失性，因此有必要进行颠覆性的加工技术创新，以便铜线图案可以应用于芯片的后端。由于这个原因，一种被称为“大马士革”（dual Damascene）的新的铜相关技术出现了。这项技术的工作原理是通过图案转移形成纳米级的沟槽或“通孔”，并在其中填充铜，形成铜线或铜柱。这种技术类似于中国古代的景泰蓝技术，即在瓷器上制作一个图案，填充铜，然后抛光形成美丽的图案。由于铜的高电子迁移率和扩散率，在填充铜之前必须制备薄膜来阻止铜的迁移和扩散，并且必须制备铜薄膜作为电镀的种子层，才能实现电镀过程。然而，制备这些薄膜的技术要求特别苛刻。

随着65 nm技术时代的出现以及SiGe的采用，应变硅器件开始大规模生产；后来，高 κ 金属栅技术，作为45 nm技术的一部分，开始进入大规模生产。正是由于这些新材料和新技术的支持，32 nm技术节点的正通道金属氧化物半导体（PMOS）性能提高了70%。只有具有扎实材料知识的专业人员才能成功地开发出这些新的薄膜工艺技术。按照摩尔定律回顾集成电路芯片技术的发展轨迹，不难看出，50年来，新材料的研发成果一直是摩尔定律的核心支柱。

显然，在后摩尔时代的技术发展过程中，新材料的核心作用将得到更加突出的体现。以过去十年的芯片技术发展为例，从高 κ 金属栅电介质到超低 κ 材料，从应变硅到金属硅化物，都是新材料和新工艺技术发展的结果。近年来，领先的芯片公司采用铍作为发展1 nm技术的新材料，显著提高了其性能。由此可以看出，新材料技术是芯片制造业技术发展的核心。

3.1.3. 产量提高和成本控制

该行业面临的最终挑战是产量的提高和成本的控制。产量和成本是工业技术发展的永恒主题。在后摩尔时代，随着特征尺寸的缩小，各种随机事件对质量控制构成了越

来越大的威胁，对产量提高的挑战也越来越大。纳米级的统计波动以前并不影响产量，但在后摩尔时代可能对生产线的产量构成巨大威胁。

例如，少量光刻胶暴露的平均光子数对应于所需的暴露剂量。如果一定数量的光刻胶暴露在大量的光子中，相对随机变化会很小。光子发射噪声是指光刻过程中光子数的变化。EUV光子携带的能量是193 nm光子的14倍。因此，相同曝光量会减少14倍光子。光子数越少，光子的散粒噪声就越高。在工业光刻工艺的例子中，光能通量约为 $15 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，基于ArF的193 nm光刻技术中的光子通量约为 $145 \text{ 光子} \cdot \text{nm}^{-2}$ 。然而，相同能量的EUV光刻过程中光子通量仅为 $10 \text{ 光子} \cdot \text{nm}^{-2}$ 。一个光子误差会导致10%的工艺误差，严重影响光刻过程中的线边缘粗糙度（LER）。此外，在离子注入过程中，只有几百个离子被阈值电压调制，并且几种离子通量的波动可能会对产品造成不可接受的屈服损失。为了解决这些问题，需要精确的工艺控制和提高产量的技术。

从工业结构和特点的角度来看，一条生产线的产量提高通常与整个生产线的关键工艺参数有关。此外，这些工艺参数是芯片制造商生产线上最敏感的核心技术，知识产权通常以“专业技术”的形式保留。外部科研机构和技术人员无法获得这些核心参数。因此，在提高产量方面的许多科学问题都不能通过工业、大学和其他研究机构之间的合作来解决，而必须由相关企业基于其有限的技术专长来解决。这样的解决方案通常事倍功半。只有在生产线上配备一套完整的技术，科技人员才能通过专门设计的测试钥匙收集关键工艺参数，并通过科学的数学分析模型来追踪缺陷的来源，从而解决产量降低的问题。因此，人们普遍认为，如果没有整个工艺流程，就不可能在公共平台上系统地开发产量提高技术。

集成电路制造技术发展的根本挑战是精确的图案转移；核心挑战是新材料和新工艺技术的开发；最终挑战是产量的提高和成本的控制。应对每项挑战估计需要总研发投入资源的三分之一。这三项挑战必须在一个配备了整个工艺流程的技术平台上得到解决。

3.2. 逆全球化环境下的后摩尔生态系统

当前的国际形势充满了挑战和机遇。一些国家从国家利益的角度，不顾世界贸易组织（WTO）的基本法规，多次滥用贸易壁垒和国家安全规定，阻止一些领先的高科技公司的发展。目前，全球大国之间的战略力量博弈主要体现在高科技发展上，特别是集中在集成电路制造的技术层面。

过去有一段时间，由于在纯市场经济条件下形成的“买比生产好，租比买好”思想的影响，中国坚持引进、消化、吸收外国技术的技术理念。但是，如果未来中国引进新技术遭到外国利益集团的阻碍，就不可能消化和吸收这些技术。过去，中国对自力更生发展集成电路产业的政策缺乏足够的决心。因此，研发项目经常被中断，导致我们更加落后于其他先进的国际同行。

此外，中国对以产业为导向的高科技文化建设的重视程度还不够。在过去几十年的科技发展中，从研发项目的立项到实施，都没有坚持实施产业引领。多年来，集成电路产业与教育、研究和开发的脱节问题还没有得到根本性的解决。以芯片制造为例，1958年中国生产了第一个单晶硅；然后，1965年开发了第一个硅基集成电路芯片。当时，中国与美国、日本之间的差距并不显著，三个国家大致在相同的起跑线[4]。然而，在随后的30年，中国工业化步伐减缓，直到1988年，中国才具备了年产一亿块集成电路的能力——比美国和日本落后大约20年。到目前为止，集成电路行业的“芯片短缺”已经证明了“以研究为手段、工业为目标、产能为王”的行业主导发展路径必须得到倡导和坚持。

在当前混乱的全球经济环境下，供应链和产业链的安全受到了破坏，继续只追求先进技术的想法是值得怀疑的。开发一套完整的先进技术需要大量的资源。以28 nm节点制造技术为例，开发一套完整的工艺流程技术，需要约10亿美元及数千名优秀的工程师和技术人员。此外，大约需要4年的时间才能达到大批量生产的水平。特别是，在世界市场的挤压下，后续的投资回报（ROI）将更加困难。对于14 nm技术节点，开发一套完整的先进技术需要比28 nm技术节点多出两倍的资源，而资本回报则更加难以获得。如果没有与市场相关的经济杠杆的支持，仅来自政府的研发资金就无法维持可持续的先进技术发展。

未来的技术发展路线需要一个明确的目的和手段。可以建立一条先进的生产线，主要目的是促进当地设备和材料企业的发展，从而建立当地的产业链。因此，通过以退为进，建立一套基本可控的成套制造技术，具有现实意义。也就是说，除了投入适当的资源，继续推进先进技术的研发，最迫切的是投入主要资源进行现有先进技术的本土化和相对成熟技术的研发，并不是每个研发项目都必须完全自主可控，只要基本可控即可。建立一条基本可控的55 nm生产线，远比建立一条完全依靠进口设备和材料的14 nm生产线更具有重要意义。显然，目前领先国家和地区之间的竞争不仅是在某个先进的技术节点内，而且覆盖了整个产业链。

基础设施技术也有类似的发展思路。以光刻机为例，我们可能不必遵循现有的技术路线，去追赶最高端的EUV光刻机的发展。相反，我们应该注重光刻技术的原创创新，努力探索基本的替代技术，以制造配备自主核心技术的国产光刻机。如果我们只是遵循世界领先的公司所设定的技术路线，可能很难赶上适用于该行业的世界先进的光刻技术。目前，最先进的EUV光刻机是由全球5000多家顶级零部件供应商提供的10万多个零部件组装而成。整个EUV光刻机配备了美国光源技术、德国光学技术、英国真空系统、日本材料技术以及来自世界其他国家的先进技术。显然，依靠一个国家或地区自身的力量来制造一台工业上适用的先进光刻机是不切实际的。随着国内集成电路市场和产业的良好发展，我们可以借此机会，制定各种优惠政策，支持光刻机企业在国家重大技术成果（即193 nm ArF光刻机）的基础上实现工业化发展，在未来几年提高国内光刻机的生产能力，以部分满足国内对新芯片制造生产线建设的需求。企业要做强，必须先做大。

图5 [10]显示了2018年主要地区价值链上的半导体销售情况。很明显，没有任何本地市场或公司拥有端到端半导体设计和制造所需的全部能力。因此，我们必须着眼于国家利益的同时，保持清醒和开放的心态，吸引全球顶尖人才，努力与坚持全球化思想和先进技术理念的公司合作。我们应该鼓励邀请外国企业到中国推广本土化，推动当地企业向全球化发展。让我们充分发挥中国巨大的市场优势，积极走出一条双循环发展之路。遵循经济发展规律，有利于在工商界建立越来越多的联系，中国必将有机会实施外循环。一切违反经济发展规律、通过意识形态建立商业联盟的企图都注定要失败。

4. 建议

面对当前错综复杂的国际形势，我们要有自己的发展定力，全力练就自身内功。坚持双循环，以内循环为主。保持开放心态，支持全球化发展。在芯片制造领域有以下四方面的建议：

(1) 充分利用国家重大专项取得的成果，支持特色工艺和相关的产业链各环节发展。后摩尔时代的产业技术发展趋缓，市场和技术创新空间大，这也是我们作为追赶者的机会。14 nm以上的产品在全球市场上占83%。如果我国可以把这些特色工艺产品的一半以上控制在自己手上，在相当程度上就可以掌握对产业的话语权。因此在跟踪前沿技术研发的同时，需要加大对主流特色工艺的支持。依托我国规模经济优势，在量大面广的芯片制造领域争取世

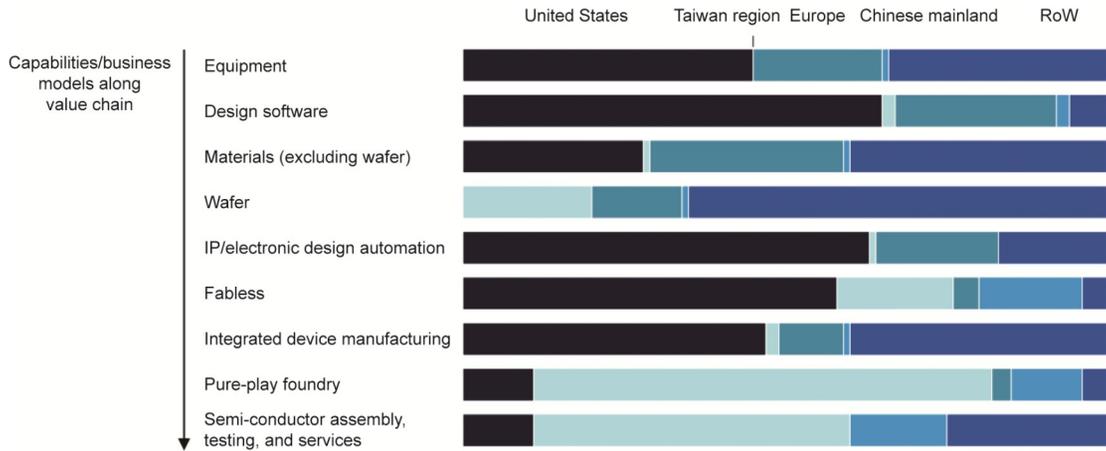


图5. 2018年沿价值链的半导体销售额（份额，%）[10]。IP：知识产权；RoW：世界其他地区。

界市场话语权。需要加紧推进现有工艺导向下的装备、材料和零部件核心产业链的本土化进程。健全可控的产业链是大国博弈立于不败之地的基础。

(2) **坚持产业引领技术路线。**我国集成电路技术研发起点不晚（1958年自制硅单晶，1965年研发IC芯片），行业从业人员远高于韩国和中国台湾地区。为什么发展速度那么不尽人意？回顾《国家集成电路产业发展推进纲要》，经历了7年多的发展，总体投入也不少，但是看到的结果是我国芯片市场对国外依赖度非但没有减少，7年来进口比例占全球半导体市场从64.8%增加至82.2%。其原因主要是投入的资金太散太少，世界级产业领军人才奇缺，龙头企业的发展远跟不上全球产业发展的步伐。从根本上看，产业引领的科技文化短板需要引起足够的重视，这也是几十年来发展过程一直困扰我们的问题。

(3) **保持战略定力，坚持自立自强、对外开放发展道路。**集成电路芯片发展途径很长。没有现成的弯道让你超车。“中国芯”产业发展之路注定艰难坎坷，尤其是在全球化基础上发展起来的芯片制造工艺，挑战必然严峻和长期。虽然全球化途径不畅，我们依然需要借助双循环模式，努力推动本土企业国际化、外企本土化进程。以容纳百川的精神学习全球的先进技术和广纳精英人才。其中，世界IP龙头企业ARM公司和其他一些国际大公司的本土化就是一个值得研究和参考的成功例子。

(4) **建立具有主流成套工艺能力的设计制造一体化公共技术平台。**目前我国尚缺少真正意义上中立的、产教融合和科教融合的、具备芯片制造成套技术的高端公共研发平台。公共平台以典型产品为载体，开展产学研协同创新，主要具备四大功能：①高效支持创新型设计企业的产品流片验证，缩短研发周期，使新产品尽快走向市场；②为装备和材料企业等提供工艺验证流片，推进产业链各

环节建设；③构建产教融合产业新人才培养模式，为国内院校提供设计制造产学研实训基地；④支持企业研发芯片量产共性技术（如成套工艺的良率提升、生产优化调度以及虚拟生产线建设等），尤其要帮助企业攻克那些单一企业无法解决的技术难点。平台建设必须保持开放心态，与全球企业开展交流。针对性地培养具有前瞻性、能够引领未来发展的科技创新领军人才和复合型、工程型人才。

5. 结论

后摩尔时代的集成电路行业出现各种技术创新。然而，目前主流硅基技术的发展趋势仍不明朗。各种颠覆性技术也令人眼花缭乱。我们必须保持头脑清醒，坚持主流技术的发展。在一定程度上适当减缓对先进技术开发的投资，可以后退一步，再前进两步，加大对大规模、宽领域的专业技术发展的投资，实现产业链建设的可控化。任何尖端的颠覆性技术都可能在十年内成为一种工业技术。在重视颠覆性技术的同时，必须对主流产业技术的发展提供足够的支持，这是中国产业发展的基础，也是该产业未来生存的必要条件。

由于集成电路行业覆盖范围较广，产业链极长，我们的视野有限，必然会导致一些不足。我们真诚欢迎读者的批评、指正和建议。

致谢

感谢许居衍教授对本文的审阅和提出许多建设性的意见。

References

- [1] He Y, Zhou W, Qian G, Chen B. Methane storage in metal–organic frameworks. *Chem Soc Rev* 2014;43(16):5657–78.
Jones H. Semiconductor market by product [presentation]. In: Industry strategy symposium; 2020 Jan 12–15; Halfmoon Bay, CA, USA; 2020.
- [2] Moore GE. Cramming more components onto integrated circuits. *Electronics* 1998;86(1):82–5.
- [3] Moore GE. Progress in digital integrated electronics. In: Proceedings of International Electronics Devices Meeting; 1975 Dec 1–3; Washington, DC, USA; 1975.
- [4] Wang Y. Complete book of integrated circuit industry. Beijing: Publishing House of Electronics Industry; 2018. Chinese.
- [5] Hwang C. TSMC dossier (4): technology contention among world-class leaders [Internet]. Taipei: Digitimes; 2021 Jul 13 [cited 2021 Sep 18]. Available from: <https://www.digitimes.com/news/a20210713VL201.html>.
- [6] Jones SW. Technology and cost trends at advanced nodes. Report. Georgetown: IC Knowledge LLC; 2021 Jan.
- [7] Gu W. Research report of China fabless IC industry. Report. Shanghai: Xinmou Research; 2021 Feb.
- [8] Wu H, Yu S. Research on science and technology development of electronic information engineering in China: special topics on integrated circuit industry. Beijing: Science Press (Beijing); 2019. Chinese.
- [9] Wu H, Yu S. Research on science and technology development of electronic information engineering in China: special topics on integrated circuit manufacturing process. Beijing: Science Press (Beijing); 2019. Chinese.
- [10] Norwood A. Market share analysis: semiconductors, worldwide, 2018. Report. Stamford: Gartner; 2019 Apr.