

# 创新链赶超：中国集成电路产业的创新与发展\*

曲永义 李先军

(中国社会科学院工业经济研究所,北京 100006)



**内容摘要:** 集成电路产业是数字经济的基础产业,是构筑我国经济未来竞争新优势的基础力量来源之一。本文在阐释创新链相关理论的基础上,从创新要素投入—创新成果生产—创新成果市场化和产业化的创新链逻辑出发,深入分析 21 世纪初以来集成电路产业创新链的全球演化特征以及当前竞争格局,利用量化评价方法对代表国家和地区集成电路产业创新力予以评价,并从创新链赶超视角提出相关建议。从演化过程来看,美国在全球产业大转移过程中始终维持着对创新链的绝对控制力,欧盟创新力相对稳定且有强化的趋势,日本创新力快速下降且正在被韩国赶超,中国是创新链的后发者,表现出相对稳定的上升态势。当前,集成电路产业的全球创新链竞争表现出“一超多强”特征,美国依然稳居集成电路产业创新链的领军地位,欧洲次之,日本位居第三,韩国位居第四,中国位居第五。围绕我国集成电路产业创新链的现实问题和赶超目标,要进一步加大创新投入和创新链协同为产业发展注入内生动力,以产业链创新和整体突破提升全球竞争力,以深化对外开放和强化自主创新来激发产业发展的全球生态活力,以科学布局提升协同发展能力,并把握数字科技革命和产业变革先机实现产业的创新发展。

**关键词:** 创新链 集成电路产业 演化 竞争

**中图分类号:** F273.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002—5766(2022)09—0005—22

作为当前科技竞争和经济竞争的焦点之一,集成电路产业对于数字时代的全球竞争格局嬗变具有重要的影响。集成电路产业是一个高度全球化的产业,产业链中的设计、制造、封测环节,以及材料、设备、EDA 软件和 IP 核等领域分布在全球不同的国家和地区,并以极为复杂的形式相互交织和演化,表现为创新链中的创新投入、创新成果生产、创新产品市场化和产业化的全球分工与协作,构筑了集成电路产业广阔的应用场景和市场规模。已有研究主要关注于集成电路的产业链分工和发展,对于从创新链视域下审视集成电路产业的文献较少。为此,本文基于集成电路产业发展的创新特征,从创新链视角出发,对全球集成电路产业创新链的总体演化态势进行分析,并在此基础上构建集成电路产业创新链评价模型,对当前全球集成电路产业创新力予以评价。最后,基于我国集成电路产业创新力的现实,围绕集成电路产业创新链赶超目标,本文提出相关建议,以期为我国集成电路产业底层创新能力提升和产业高质量发展提供支持。

## 一、文献综述:集成电路产业创新链的理论阐释

创新链的理论阐释,源于经济学家熊彼特在他早期的经典作品《经济发展理论》中对创新的定

收稿日期:2022-03-20

\* 基金项目:国家社会科学基金重点项目“新技术革命背景下全球创新链的调整及其影响研究”(19AJY013)。

作者简介:曲永义,男,研究员,博士生导师,主要研究方向为创新管理等,电子邮箱:quyy@cass.org.cn;李先军,男,副研究员,硕士生导师,主要研究方向为中小企业创新与经济发展、经济体制改革、关键核心技术创新的组织与政策研究等,电子邮箱:lixianjuncass@foxmail.com。通讯作者:李先军。

义。熊彼特认为,“创新”就是建立一种新的生产函数或供应函数,即把一种从来没有过的生产要素和生产条件的“新组合”引入生产体系。具体说来,包括五个方面的内容:引入新的产品或提供产品的新质量(产品创新);采用新的生产方法(工艺创新);开辟新的市场(市场创新);获得新的供给来源(资源开发利用创新);实行新的组织形式(体制和管理的创新)(Schumpeter,1934)<sup>[1]</sup>。熊彼特之后,许多经济学家和相关组织研究阐述了对创新的理解和认识。Solo(1951)<sup>[2]</sup>经过对创新理论的深入研究后,在《在资本化过程中的创新:对熊彼特理论的评论》一文中,提出了创新成立的两个条件,即新思想的来源和以后阶段的实现发展,这一“两步论”被认为是技术创新概念界定研究上的一个里程碑(李永波和朱方明,2002)<sup>[3]</sup>,也成为创新链研究的理论渊源。

### 1. 创新链的概念和内涵

创新链是从链路视角对创新活动的重新定义,其来源于技术提供者推动和市场力量拉动以实现研发和营销的耦合(Rothwell,1992)<sup>[4]</sup>,是创新思想产生、研究开发、成果转化以及产品实现(Sen,2003)<sup>[5]</sup>的分步骤、分阶段过程。在Solo(1951)<sup>[2]</sup>“两步论”的基础上,Visvanathan(1977)<sup>[6]</sup>将创新链分为研究、开发和产品化三个阶段;Timmers(1999)<sup>[7]</sup>将创新链划分为基础研究、技术开发、现实应用及产业化四个阶段;Rothwell(1992)<sup>[4]</sup>将创新链总结为观点产生、开发、原型产品、制造以及市场化销售五个阶段,创新链的阶段划分成为学者研究创新链过程的基本范式。从本质来看,绝大部分学者认为创新链的起点是科学或者创意,重点是科学知识转化为市场化、产业化和规模化的产品。创新链所体现的创新转化过程都可归纳为“科学—技术—产品”的转化过程(林润辉等,2022)<sup>[8]</sup>,也是创意孕育到成熟技术产业化的完整过程(康健和胡祖光,2017)<sup>[9]</sup>。

链路视角下的创新,创新链主体不仅包括科学技术的创造者——科研工作者和高校及科研院所,还包括科学技术产品化的实现主体——企业,以及作为创新工作的支持者——政府和中介机构,多主体的合作共同推动基础研究、应用开发、中间试验、商品化和大规模产业化(张杰等,2017)<sup>[10]</sup>这一系列创新创造活动的发生和转化。在创新链的不同阶段,创新的核心主体也表现出差异。随着全球化劳动大分工的发展,创新链表现出全球化形态(林润辉等,2022)<sup>[8]</sup>,各国政府也成为创新链的重要参与主体,政府成为打造国家竞争优势的重要力量来源。李雨晨和陈凯华(2019)<sup>[11]</sup>从国家创新力的视角将国家创新链分为国家科学创造力、国家技术开发力、国家产业发展力以及环境支撑能力四个维度。

事实上,创新链的起点应当延伸至科学这一创新结果的本质来源,相关的资源和要素投入是科学产生和发展的必要前提。因此,本文定义的创新链朝着更为前端的创新投入延伸,创新链指的是从创新投入到产出的发展过程,主要包括创新要素投入(包括研发投入和人才基础)、创新成果生产(包括学术论文、专利以及默会知识)、创新成果市场化(包括产品工程化和产品化)和产业化(包括市场化和产业规模增长)三个阶段如表1所示。不同的主体,包括政府、高校及科研院所、企业、个人、中介服务机构等<sup>①</sup>,通过知识和资源的投入创造新知识,并借助市场化和产业化实现知识的经济价值实现,并进而反哺知识的创造过程,从本质上是知识的创造、扩散、使用和再创造过程,知识是创新链的核心客体。尽管各个阶段表现出先行后续的逻辑,但创新过程不是单向的投入和产出关系,各主体通过多方向、多层次的互动,形成复杂的全球创新网络(Ernst,2009)<sup>[12]</sup>、制造网络(Ernst和Kim,2002)<sup>[13]</sup>和供应网络(Meixell和Gargeya,2005)<sup>[14]</sup>。但是,不可忽视的是,各国/地区出于竞争、安全等方面的考量,以及知识传播和扩散中的现实困难,创新链的全球网络未能实现与产业链和供应链一样的全球化,且在当前百年未有之大变局的现实背景下更是表现出创新链的本地化、隔离化、区域化、短化等特征。

<sup>①</sup> 事实上,从主体论视角来看,政府、企业、高校及科研院所、中介机构等在创新过程中扮演着对创新活动的组织者角色,它们更应该被归结为创新链的组织者,创新链中的创新主体应当是直接从事和服务创新活动的个人,例如高校及科研院所和企业的研究者、科技成果转化的相关人员。

表 1 创新链各阶段的主要特征

| 创新过程 | 创新要素投入               | 创新成果生产             | 创新成果市场化和产业化                             |
|------|----------------------|--------------------|---|
| 目标   | 科学和知识生产              | 科学和知识的组合和再生产       | 科学和知识的工程化、产品化以及商业化价值实现                  |
| 主体   | 政府、企业、高校及科研院所        | 研究者、企业员工、企业        | 研究者、企业员工、中介机构                           |
| 形式   | 人才培养<br>研发投入<br>平台建设 | 学术论文<br>专利<br>默会知识 | 新产品原型<br>新产品中试、小批量生产<br>产品大规模扩张<br>产业发展 |

资料来源:作者整理

## 2. 集成电路产业创新链的概念与特征

已有不少学者从产业视角来研究创新链,并且把创新链与产业链的融合研究作为重要落脚点。例如 Bossink(2015)<sup>[15]</sup>将能源产业的创新链分为研发、示范和扩散三个阶段,Bamfield(2006)<sup>[16]</sup>以化学药品开发为例,将创新链定义为推测性研究、流程开发、试制、市场投放以及生产和销售固化五个阶段。事实上,由于产业属性的差异,不同产业的创新链也表现出自身的特色。本文以集成电路产业为例,分析其创新链演进和变化的趋势以及当前的竞争态势,从创新视角把握我国集成电路产业的全球竞争地位演变和现实。集成电路产业的创新链,是半导体相关知识创造、扩散、使用和再创造过程中的创新要素投入、创新成果生产以及创新成果市场化和产业化的过程。其中,创新要素的投入包括创新的人才、资金、设施投入,创新成果的生产包括学术论文、专利的创造以及默会知识的发掘和传承,创新成果市场化和产业化主要包括先进产品的生产以及产业规模的增长。

集成电路产业有显著的行业特征:一是知识基础极为复杂。传统的物理、化学、数学等基础科学以及在此基础上衍生的应用科学(例如微电子、有机材料、无机材料、光学等)是其产生和发展的根本,工程学能力决定了其设计制造水平。而量子物理、神经网络等新兴知识学科已成为其不断发展的内驱力量。此外,蕴含在工业生产过程中的默会知识成为产业竞争的“核心机密”。二是产业的基础性和中间品特征显著。尽管消费电子产品是集成电路产品的主要应用领域,但集成电路产品需要与其他零部件组合形成最终产品,这也形成了根据用途将集成电路分为计算机类、通信类、汽车类、消费类、工业类、军用类等类型的差异,集成电路产业已成为数字经济时代最基础的支撑产业。三是具有较大的产业规模,但创新驱动的二次增长曲线依然陡峭。从 1958 年基尔比(Kilby)和诺伊斯(Noyce)发明集成电路开始,集成电路产业经过 60 余年的发展,已经形成极大的产业规模。根据 SIA 的数据显示,2021 年,全球半导体产业规模达到 5558.9 亿美元,预计 2022 年将达到 10.37% 的高速增长建设<sup>①</sup>。尽管摩尔定律似乎已经式微,但第三代、第四代半导体材料发展迅速,量子理论、神经网络等技术快速突破和加速应用,数字经济对集成电路产品的需求快速扩张,各国为获得在数字时代的竞争优势,不断加大集成电路产业的投资和政策支持,技术、市场、政策的多重因素共同驱动着集成电路产业的持续高速增长。四是产业,进入门槛和风险极高。复杂的知识和技术基础、中间产品对质量标准的高要求、消费者对性价比的诉求、快速迭代的技术和产品,各种因素叠加,决定了集成电路产业需要极其精密的设备、精细的材料和极洁净的环境,这必然导致集成电路产业需要高额的投资以及高素质的人才。目前新建一个 12 英寸的先进晶圆厂所需投资在 60 亿美元以上,6 纳米制程的芯片设计费用需要 6 亿美元以上,行业进入门槛极高,且在行业周期性投资的情境下面临较高的风险。五是产业的全球化程度极高。自集成电路被发明和应用开始,在

① 数据来源:美国半导体行业协会(SIA)。

全球化的产业分工和转移浪潮下,集成电路产业形成了极为复杂的全球产业分工和供应链网络,当前表现为美欧主导设备、设计和 EDA 软件,日本主导材料和设备,韩国和中国台湾主导制造,中国大陆主导封测和产品组装的全球大分工格局。尽管当前以美国打压中国为代表的“逆全球化”对集成电路产业的全球大分工造成威胁,但短期内集成电路产业的全球大分工总体趋势难以改变。

集成电路产业的创新链具有与产业特征紧密关联的特征。一是产业发展需要极高的创新投入,以保证产业所需知识和科技成果的创造,包括企业自身的投入、政府研发经费和教育的投入、政府相关补助资金的投入等,在摩尔定律的驱动下,集成电路产业的创新需要持续的高强度投入。根据美国半导体行业协会(SIA)发布的数据显示,半导体领域的研发强度极高,集成电路制造和设备行业的研发强度分别为 18.6% 和 10.8%,仅次于制药和生物行业(27.1%)以及软件行业(17.5%),高于其他所有行业<sup>①</sup>。2022 年 8 月美国总统拜登签署生效的《芯片与科学法案》中,明确了为生产计算机芯片的美国公司提供超过 520 亿美元的资金支持,是国家支持集成电路产业发展的典型代表。二是在产业发展过程中形成了极为丰硕的知识成果。作为典型的创新型行业,企业尤其是领先企业是集成电路产业创新知识成果的创造主体,涌现出大量专利、学术论文等成果,这些成果既有相互合作的结果,更多地则是企业在摩尔定律推动下,从工艺、技术等现实问题出发,通过不断创新(例如铜互联工艺、浸入式光刻工艺)以维持竞争优势、提高竞争力的主动选择,知识的交流和竞争推动了行业的不断发展。2021 年欧洲专利办公室(EPO)受理的专利申请中,数字通信和计算机技术专利申请量占全部专利申请量的 28.63%<sup>②</sup>。此外,作为企业维系核心竞争优势来源之一的“生产诀窍”等非专利知识也是集成电路产业中的重要知识成果。三是全球化的创新分工和协作与产业分工和协作交织,形塑了集成电路产业创新链的全球研发和发展格局。由于集成电路产业高昂的要素投入成本,使得其需要庞大的市场需求和产能来分摊高昂的研发投入和投资成本,这就使得创新链的市场化和产业化不仅需要进一步拓展应用场景和领域,更需要面向全球市场,以形成产业规模扩张—企业收入增加—研发投入增加的强化循环。基于欧洲企业安谋的 IP 核,美国和欧洲的无晶圆企业和一体化企业利用美国楷登电子、新思科技和西门子等企业的 EDA 软件开始设计,以台积电、联电、三星为代表的晶圆厂采购美国、日本和欧洲的设备,辅之以日本、美国、欧洲的原材料和化学品,用以生产定制化的芯片,之后交由中国、马来西亚和新加坡的企业予以封装,最终在中国组装成为产品销往世界各地,形成了集成电路产业的全球大循环。从创新链的研究合作来看,尽管当前美国和欧洲将集成电路产业发展置于技术主权和国际安全的高度来打压中国,但越来越多的国际合作尤其是研究合作成为推动产业创新发展的重要驱动力,以三大顶级学术会议(IEDM、ISSCC、VLSI)发表的合作论文来看,1995 年美国只有 11% 的论文是与国外作者共同撰写的,而 2020 年这一比例达到 36%<sup>③</sup>。

## 二、全球集成电路产业创新链演化特征勾勒

创新链不仅反映了知识到创新的演化过程,还带来财富、经济发展以及国家繁荣的变化(Larson 和 Brahmakulam,2002)<sup>[17]</sup>。近 20 年来,集成电路产业全球创新链发生了显著变化,创新投入快速增长,尤其是中国成为创新投入的首要贡献力量,创新成果持续增长且中韩迅速追赶,创新成果的产业化步伐加速且在后发者赶超的压力下美国不断强化其主导地位,最终反映了集成电路产业全球竞争格局的变化。

① 数据来源:SIA(2021)。

② 数据来源:Patent Index 2021(EPO)。

③ 数据来源:Publikationen(2010)。

### 1. 创新投入快速增长,中国是创新链新增投入的首要贡献力量

创新人才和研发资金是创新投入的核心内容,也是保障未来创新链优势的基础。在全球步入信息时代和数字经济的大背景下,各国在集成电路产业的创新投入总量表现出快速的增长态势,这也成为驱动集成电路产业遵循摩尔定律快速迭代的动力来源。但是,从结构来看,以中国和韩国代表的后发国家和经济体表现出显著的赶超特征。

#### (1) 美国创新人才持续增长,但中国表现出快速赶超态势

人才是集成电路产业发展的根基,也是创新链的基础支撑力量,尤其是自然科学和工程学领域的高学历人才是集成电路产业发展的基础支撑。①从数量来看,根据对主要集成电路国家自然科学和工程学年度获得博士学位的人数变化趋势来看,中国增长最快,从 2000 年的 0.78 万人增长到 2018 年的 3.98 万人,美国从 2.61 万人增长到 4.12 万人,英国、德国、韩国均有所增长,但日本却表现出下降的趋势,从 0.71 万人下降到 0.68 万人(如图 1 所示)。②从人才质量来看,美国依然是全球创新人才的主导者。以科睿唯安(Clarivate Analytics)发布的 2021 年度全球“高被引科学家”名单为例,2021 年来自全球 70 多个国家和地区的 6602 位高被引学者中,美国高被引科学家为 2622 人,遥遥领先;中国位居第二,但也只有 931 位学者进入名单(如图 2 所示)。从变化情况来看,2019 年中国超越英国位居第二,反映了中国在高质量人才方面的巨大进步;从结构来看,美国学者占比从 2019 年的 44.03% 下降到 2021 年的 39.7%,中国则从 10.23% 上升到 14.10%,反映了中美在全球人才结构上的此消彼长。另外,日本在 2014 年的“高被引科学家”数量达到 99 人,位居世界第五,但到 2018 年则跌出前十位;西班牙自 2018 年进入全球第十位,瑞士则于 2021 年跌出全球前十位,沙特阿拉伯在 2021 年进入全球第十位。

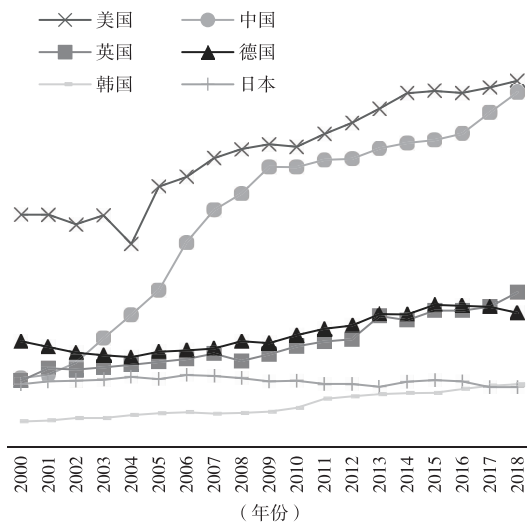


图 1 2000—2018 年代表国家自然科学和工程学授予博士学位人数(单位:人)

资料来源:OECD 教育统计数据,以及欧洲统计局、日本文部科学省、韩国国家统计局和中国国家统计局统计数据

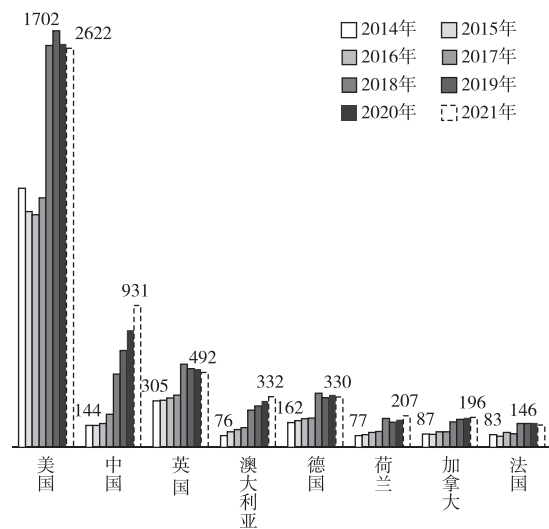


图 2 2014—2021 年高被引科学家工作地域分布数量图(单位:人)

资料来源:Clarivate Analytics(2021)

从创新人才的变化情况来看,中国追赶的步伐不断加快,2000—2018 年自然科学和工程学年度获得博士学位的人数年均复合增长率达到 8.98%,而美国同期只有 2.42%,2018 年中国人才数量已接近美国;从质量来看,中国高被引科学家数量从 2016 年的 156 人上升至 2021 年的 931 人,从全球第四名上升至第二名,尽管与美国还有一定的差距,但也反映了东升西降的基本态势。

#### (2) 美国以强大的研发投入维持创新链主导地位,但中韩研发投入增速和增量最快

研发投入是创新的基础资源支撑,也是集成电路产业快速发展的重要驱动力之一。根据美国国家科学基金会(NSF)的数据(如图3所示),美国研发支出的全球占比从2000年的37.1%下降到2019年的27.3%,而中国则从4.5%快速增长到21.9%,中国成为全球研究支出的最大贡献国。从贡献度来看(如图4所示),2000—2019年,中国对全球新增R&D支出的贡献率达到29%,超过美国的23%、欧盟27国的17%、日韩的9%、其他东南亚和南亚地区的7%以及世界上其他国家和地区的14%<sup>①</sup>。在持续高强度的研发投入刺激下,中国是世界主要经济体研发强度增速最高的国家之一,从2000年的0.89%增长到2019年的2.23%(2021年继续增长至2.44%<sup>②</sup>),研发强度位居主要经济体第五位。从趋势来看,中国与发达国家在研发强度方面的差距不断缩小。

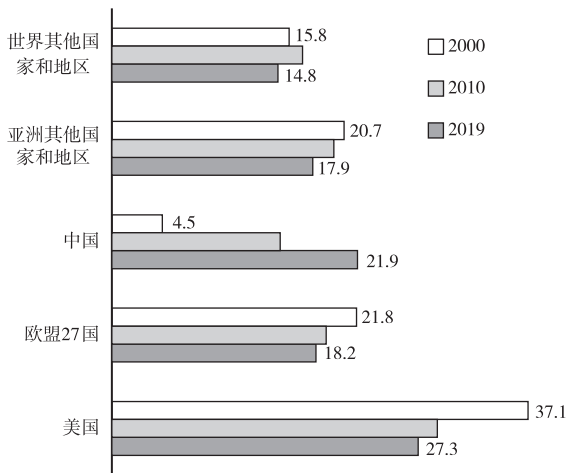


图3 2000年、2010年和2019年各国/地区研发支出的全球占比(单位:%)

资料来源:美国国家科学基金会(NSF)

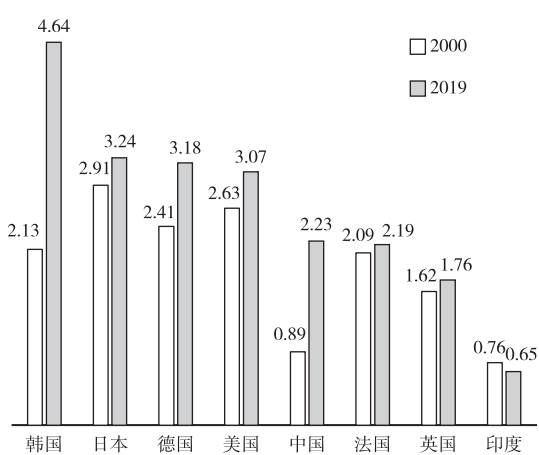


图4 2000年和2019年主要经济体研发强度比较(单位:%)

资料来源:美国国家科学基金会(NSF)

具体到集成电路行业,由于产业的高技术密度和高资本密度特征,企业需要高额的研发投入以保持领先。美国半导体行业协会(SIA)2022年4月发布的数据显示,2001—2021年,美国半导体行业的R&D支出平均增速达到6.9%,2021年,美国半导体行业的R&D支出达到502亿美元,R&D强度高达18.0%<sup>③</sup>。且从半导体行业研发强度的国际比较来看(如图5所示),美国一直是全球研发强度最高的国家,而欧盟位居其后达到15.1%,韩国和日本分别为9.1%和8.3%,中国最低,仅为7.6%<sup>④</sup>。研发强度与企业竞争力表现出高度一致的特征,规模和竞争力居于优势的企业有更充裕的资金用于增加其研发投入,这进一步强化其竞争力和规模优势以形成良性循环,反之亦然。中国集成电路产业的龙头企业规模相对较小,这限制了其高强度的研发投入,完善相关政策机制和加大政府创新投入,以弥补企业研发投入不足是促进集成电路产业创新链赶超的重要工具。

企业是研发投入的主要提供者,这不仅能直接促进企业自身的创新,也通过产业反哺为高校及科研院所研究提供了良好的资源支撑。根据《欧盟工业R&D投资积分卡(The EU Industrial R&D

① 数据来源: Amy Burke, Abigail Okrent, and Katherine Hale. The State of U. S. Science and Engineering 2022[EB/OL]. <https://ncses.nsf.gov/pubs/nsb20221/u-s-and-global-research-and-development>, January 18, 2022.

② 数据来源: 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2022年2月28日.

③ 数据来源: SIA(2022).

④ 中国集成电路行业的研发投入下降主要受中美贸易摩擦后中国企业销售收入下降后的研发投入下降,企业因为自身经营收入和利润总额的限制,企业用于研发投入的资源相对不足。

Investment Scoreboard)》<sup>①</sup>所列示的全球 2500 家 R&D 投入最高的企业数来看(如表 2 所示),欧盟、美国、日本、韩国的企业数分别从 2014 年的 633 家、804 家、387 家和 80 家下降到 2021 年的 421 家、779 家、293 家和 60 家,中国则从 199 家增长到 597 家,全球研发投入最高的 2500 家企业中,中国企业占 23.88%,仅次于美国的 31.16%。从高研发企业数占比来看,从 2014 年位居美国、欧盟和日本之后位居第四,到 2021 年超越欧盟和日本成为世界第二,中国企业研发投入在全球企业研发投入中的比重不断提升。

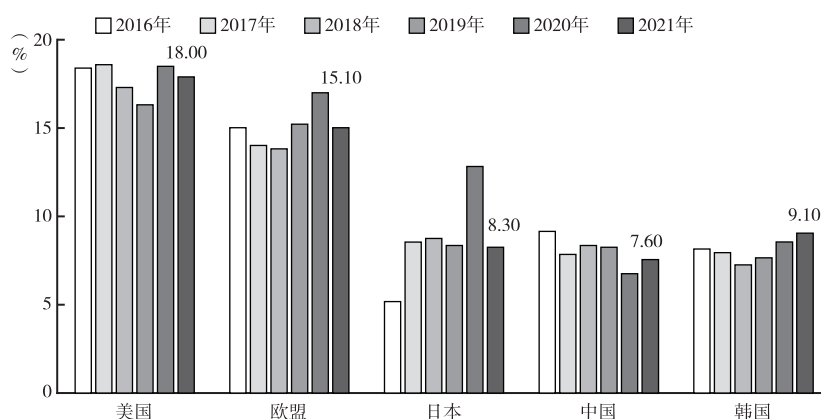


图 5 2016—2021 年代表国家/地区半导体行业研发强度

注:韩国 2020 年的数据报告未单独列出,以新兴市场数据替代

资料来源:SIA2017—2022 年度报告

表 2 2014 年、2018 年和 2021 年代表国家/地区高研发投入企业数

| 国家和地区   | 2014 年 |       | 2018 年 |       | 2021 年 |       |
|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|         | 数量(家)  | 占比    | 数量(家)  | 占比    | 数量(家)  | 占比    |
| 欧盟      | 633    | 25.32 | 577    | 23.08 | 421    | 16.84 |
| 美国      | 804    | 32.16 | 778    | 31.12 | 779    | 31.16 |
| 中国      | 199    | 7.96  | 438    | 17.52 | 597    | 23.88 |
| 日本      | 387    | 15.48 | 339    | 13.56 | 293    | 11.72 |
| 韩国      | 80     | 3.20  | 70     | 2.80  | 60     | 2.40  |
| 其他国家/地区 | 397    | 15.88 | 298    | 11.92 | 350    | 14.00 |

资料来源:2014 年、2018 年和 2021 年《欧盟工业 R&D 投资积分卡》

## 2. 创新成果持续增长,美日欧主导但中韩迅速追赶

集成电路产业的全球化不仅体现在产业链分工上,而且也体现在学术研究领域。美国、欧洲、日本、中国等都举办了很多学术会议以加强学术交流,大学、科研院所、企业都是学术会议论文的重要贡献者,尤其是行业内的领先厂商,例如台积电、英特尔、IBM、德州仪器、三星等,它们是行业学术会议的重要参与者和推动者,一些顶级的学术会议则成为各个大学、科研院所以及企业科研工作者交流的平台。其中,国际电子器件会议(IEDM, www.ieee-iedm.org)、国际固态电路会议(ISSCC, www.isscc.org)和 VLSI 技术和电路研讨会(VLSI, www.vlssymposium.org)被行业誉为最

<sup>①</sup> 欧盟委员会自 2004 年发布《欧盟 2020 年工业 R&D 投资积分卡》以来,其样本企业数从 2004 年的 500 家欧盟企业 + 500 家非欧盟企业开始逐步增加,2005 年为 700 家欧盟企业 + 700 家非欧盟企业,2006 年为 1000 家欧盟企业 + 1000 家非欧盟企业,2007—2009 年为 2000 家全球企业,2010—2011 年又调整为 1000 家欧盟企业 + 1000 家非欧盟企业,2012 年为 1500 家全球企业(其中 405 家欧盟企业和 1095 家欧盟外企业),2013 年又恢复为 2000 家全球企业,从 2014 年至今保持为 2500 家全球企业。

重要的学术会议。1995—2020年,主要国家/地区在集成电路上述三大顶级学术会议上的累积论文贡献情况表现出如下特征(如图6所示):美国在学术论文数量上遥遥领先,日本次之,二者合计发表的论文数量(10338篇)超过全球其他国家和地区的总和(8187篇),韩国位列其后,与集成电路产业的全球竞争结构表现出高度的一致性。位列之后的比利时、法国和德国因为拥有IMEC(比利时)、CEA-Leti(法国)和Fraunhofer(德国)等重要的半导体研究和技术组织,它们在与台积电、三星、英特尔等芯片公司的密切合作中产出大量前沿性论文。从发表数量的变化趋势来看,美国在总体数量和结构上相对稳定且占据主导地位,日本从全球第二下滑至欧盟、韩国和中国之后,与比利时的数量和占比接近,欧盟、韩国和中国的比重大幅提高。具体来看,美国在全部论文中的比重保持在40%以上,但从1995年占比43.22%略微下降到2020年的40.88%;日本的比重快速下降,从38.62%下降到9.57%;欧盟的比重几近翻番,从12.53%上涨至24.92%;韩国也从4.80%上升至12.92%;中国则从0上升至10.03%<sup>①</sup>。

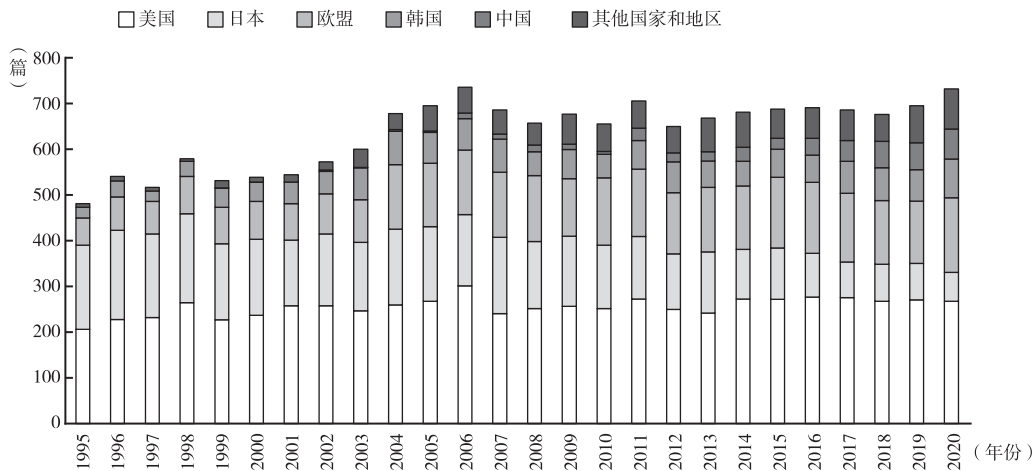


图6 1995—2020年代表国家/地区在集成电路三大顶级学术会议上发表的论文数量变化情况

资料来源:Publikationen(2021)

美国作为半导体领域的领导者,在专利授权方面也占据绝对优势地位。根据查询美国专利商标局(USPTO)2001—2020年授予的专利数据显示(如表3所示),2001—2020年,美国半导体领域的专利授权数尽管在期间内有所波动,但总体表现出快速的增长态势,从2001年的8636件增长到2010年的29050件,尽管2015年和2020年有所下降,但也分别达到19619件和17287件。从来源国/地区来看,美国、欧洲、日本、韩国和中国的占比变化较大,从2001年的46.94%、6.31%、24.29%、5.96%和0.04%变化为2020年的31.72%、5.80%、19.71%、14.41%和7.93%,美国和日本占比大幅下降,欧洲略微下降,下降份额为韩国和中国所获得,反映了中韩在集成电路创新成果生产方面的快速进步。

另据欧洲专利办公室(EPO)发布的“专利指数2021(Patent Index 2021)”显示(如表4所示),2012—2021主要半导体国家和地区在欧洲专利办公室申请和获得授权的半导体领域专利数量表现出显著的分化。申请量方面,中国和韩国的专利申请量快速增长,10年间合计增长了895.74%和95.28%,而日本和欧洲分别下降了30.34%和8.55%,美国保持稳定增长0.71%;授权量方面,均保持增长,但日本是增速最低的国家,10年间仅增长了14.08%,中国和韩国依然保持超高速增长,分别增长了56.33倍和2.95倍,美国和欧洲分别增长82.56%和43.88%。

<sup>①</sup> 数据来源:Publikationen(2021)。



表 3 2001—2020 年美国专利商标局在半导体领域对主要和国家地区的授权专利数及其占比

| 国家/地区 | 2001 年 |       | 2005 年 |       | 2010 年 |       | 2015 年 |       | 2020 年 |       |
|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|       | 专利数    | 占比    | 专利数    | 占比    | 专利数    | 占比    | 专利数    | 占比    | 专利数    | 占比    |
| 美国    | 4054   | 46.94 | 4394   | 45.60 | 11063  | 38.12 | 6499   | 33.13 | 5483   | 31.72 |
| 欧洲    | 545    | 6.31  | 695    | 7.21  | 2151   | 7.41  | 1438   | 7.33  | 1003   | 5.80  |
| 日本    | 2098   | 24.29 | 2743   | 28.47 | 8247   | 28.41 | 4784   | 24.38 | 3408   | 19.71 |
| 韩国    | 515    | 5.96  | 729    | 7.57  | 4164   | 14.35 | 2761   | 14.07 | 2492   | 14.42 |
| 中国    | 3      | 0.03  | 23     | 0.24  | 197    | 0.68  | 620    | 3.16  | 1370   | 7.93  |
| 其他    | 1421   | 16.47 | 1051   | 10.91 | 3203   | 11.03 | 3517   | 17.93 | 3531   | 20.43 |
| 合计    | 8636   | 100   | 9635   | 100   | 29025  | 100   | 19619  | 100   | 17287  | 100   |

注:欧洲数据选择了英国、德国、法国、意大利、荷兰、比利时、瑞士、瑞典、芬兰九国的数据合计

资料来源:根据美国专利和商标办公室(USPTO)数据整理

表 4 2012—2021 年主要国家和地区半导体领域在欧洲专利办公室申请和授权的专利变化情况

| 年份   | 美国  |     | 欧洲   |     | 日本  |     | 韩国  |     | 中国  |     |
|------|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|      | 申请量 | 授权量 | 申请量  | 授权量 | 申请量 | 授权量 | 申请量 | 授权量 | 申请量 | 授权量 |
| 2012 | 707 | 281 | 1158 | 449 | 857 | 426 | 339 | 73  | 47  | 3   |
| 2013 | 667 | 277 | 1164 | 415 | 838 | 322 | 304 | 76  | 110 | 6   |
| 2014 | 574 | 223 | 1124 | 387 | 770 | 287 | 310 | 100 | 92  | 5   |
| 2015 | 568 | 236 | 1012 | 482 | 631 | 284 | 319 | 104 | 70  | 8   |
| 2016 | 645 | 285 | 946  | 594 | 480 | 401 | 313 | 175 | 167 | 21  |
| 2017 | 607 | 318 | 992  | 604 | 565 | 471 | 349 | 229 | 361 | 40  |
| 2018 | 650 | 390 | 995  | 809 | 585 | 534 | 325 | 321 | 271 | 59  |
| 2019 | 622 | 525 | 983  | 910 | 589 | 611 | 382 | 450 | 269 | 146 |
| 2020 | 689 | 591 | 926  | 888 | 494 | 578 | 486 | 443 | 321 | 138 |
| 2021 | 712 | 513 | 1059 | 646 | 597 | 486 | 662 | 289 | 468 | 172 |

资料来源:欧洲专利办公室(EPO)

### 3. 创新成果产业化成为经济增长的新助力,美国主导地位不断强化但后发者赶超加速

创新链的经济价值最终反映到新产品开发和创新成果的产业化。集成电路产业的产品创新首先表现在摩尔定律驱动下的产品成本下降和性能提升,以及由此加速的芯片在各个领域的广泛使用,集成电路产业市场规模的持续快速成长成为产业创新的重要表现。2001—2021 年,全球半导体产业规模从 1390 亿美元快速增长至 5558.9 亿美元,年均增速 7.18%,远超同期全球经济增长,也成为牵引全球经济数字化转型的重要力量。预计 2022 年将增长 10.37% 达到 6135.2 亿美元<sup>①</sup>。

从集成电路产业全球竞争力的演化和竞争态势来看,美国居于主导地位且比较稳定,欧洲的影响力总体较弱但保持稳定,日本在 20 世纪七八十年代迅速崛起后很快进入下降态势,韩国和中国的影响力稳步上升。具体来看,美国自 20 世纪 80 年代通过贸易制裁和政治手段等对日本集成电路产业予以打压以来,从 90 年代开始重新获得全球领导地位,在 1997 年市场份额超过 50%,其全球市场份额保持相对稳固的状态,2004—2020 年的市场份额维持在 47% 上下(如

① 数据来源:SIA(2022)。

图7所示)。与之形成鲜明对比的是,日本则从20世纪90年代开始市场份额持续下降,成为集成电路产业市场份额唯一快速下降的主要经济体,市场份额从2004年的26.5%下降到2020年的10%。韩国和中国的市场份额分别从2004年的9.1%和0.5%上升至2020年的20%和5%。欧洲则保持相对的稳定性但市场份额也略有下降,从2004年的12.8%下降到2020年的10%。

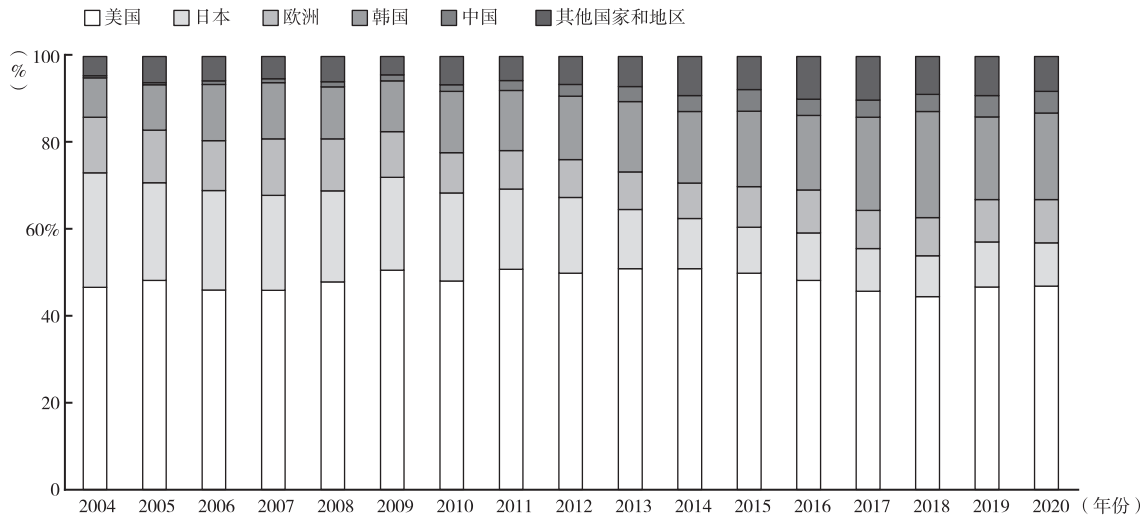


图7 2004—2020年全球半导体产业市场份额变化情况

资料来源:美国半导体行业协会(SIA)

集成电路产业的资本密集性和技术密集性特征决定了行业较高的集中度,领先企业代表了行业产品的先进性和产业竞争力。从企业规模来看,2000年最大半导体企业英特尔销售额为297亿美元,而2021年排名第五的高通销售额已达到293亿美元,位居行业第一位的三星销售额则达到了820亿美元(如表5所示)。行业内领先企业的变化情况反映了美国全球控制力的进一步增强,日本和欧洲的份额及影响力下降、韩国迅速崛起。具体来看,2000年,前十大半导体企业中,美国、日本和欧洲企业各3家,英特尔位居第一,东芝和日本电器分别位居第二和第三,韩国三星位居第四并成为唯一一家韩国企业;2008年,美国依然是3家企业,但高通取代摩托罗拉以无晶圆厂设计企业上榜,韩国海力士进入前十位,三星位居全球第二,日本依然是3家,欧洲企业飞利浦跌出前十名;2021年,三星取代英特尔成为全球最大的半导体企业,SK海力士也位居第三,其中7家均为美国企业,除英特尔和德州仪器外,其他美国企业均为无晶圆厂设计企业,日本和欧洲企业均未进入前十名。

表5 2000年、2008年和2021年全球前十大半导体企业销售额及市场份额的变化情况

| 排名 | 2000年 |       |     |         | 2008年 |       |     |         | 2021年 |       |     |         |
|----|-------|-------|-----|---------|-------|-------|-----|---------|-------|-------|-----|---------|
|    | 公司    | 总部所在地 | 销售额 | 市场份额(%) | 公司    | 总部所在地 | 销售额 | 市场份额(%) | 公司    | 总部所在地 | 销售额 | 市场份额(%) |
| 1  | 英特尔   | 美国    | 297 | 13.6    | 英特尔   | 美国    | 345 | 13.0    | 三星    | 韩国    | 820 | 13.3    |
| 2  | 东芝    | 日本    | 110 | 5.0     | 三星    | 韩国    | 203 | 7.6     | 英特尔   | 美国    | 767 | 12.5    |
| 3  | 日本电器  | 日本    | 109 | 5.0     | 德州仪器  | 美国    | 116 | 4.4     | SK海力士 | 韩国    | 374 | 6.1     |
| 4  | 三星    | 韩国    | 106 | 4.8     | 东芝    | 日本    | 104 | 3.9     | 美光    | 美国    | 300 | 4.9     |
| 5  | 德州仪器  | 美国    | 96  | 4.4     | 意法半导体 | 瑞士    | 103 | 3.9     | 高通*   | 美国    | 293 | 4.8     |
| 6  | 摩托罗拉  | 美国    | 79  | 3.6     | 瑞萨    | 日本    | 70  | 2.6     | 英伟达*  | 美国    | 232 | 3.8     |
| 7  | 意法半导体 | 瑞士    | 79  | 3.6     | 高通*   | 美国    | 65  | 2.4     | 博通*   | 美国    | 210 | 3.4     |

续表 5

| 排名    | 2000 年 |       |      |          | 2008 年 |       |     |          | 2021 年 |       |     |          |
|-------|--------|-------|------|----------|--------|-------|-----|----------|--------|-------|-----|----------|
|       | 公司     | 总部所在地 | 销售额  | 市场份额 (%) | 公司     | 总部所在地 | 销售额 | 市场份额 (%) | 公司     | 总部所在地 | 销售额 | 市场份额 (%) |
| 8     | 日立     | 日本    | 74   | 3.4      | 索尼     | 日本    | 64  | 2.4      | 联发科技*  | 中国台湾  | 177 | 2.9      |
| 9     | 英飞凌    | 德国    | 68   | 3.1      | 海力士    | 韩国    | 62  | 2.3      | 德州仪器   | 美国    | 173 | 2.8      |
| 10    | 飞利浦    | 荷兰    | 63   | 2.9      | 英飞凌    | 德国    | 59  | 2.2      | 超微半导体* | 美国    | 164 | 2.7      |
| 合计    |        |       | 1081 | 49.4     |        |       |     | 1191     | 44.9   |       |     |          |
| 全行业行业 |        |       | 2190 | 100      |        |       |     | 2652     | 100    |       |     |          |

注：\* 代表无晶圆厂设计企业；本数据不包含纯晶圆代工，台积电 2021 年在全部集成电路企业中的市场销售额位居第三名  
资料来源：IC Insights(2022)

### 三、集成电路产业链创新链全球竞争格局刻画

集成电路产业的全球创新链表现出“一超多强”的特征。尽管面临后发者的挑战，但美国在创新链各个环节保持绝对的控制力，在创新投入数量和强度、创新成果生产、市场化和产业化发展方面均有强大的控制力；日本尽管在市场化和产业化方面有较强的影响力，但其研究开发和创新成果生产方面趋于下滑；欧洲在基础研究、创新成果生产等方面有较强的竞争力，但在产业端的竞争力相对较弱；韩国借助强大的研发投入，成为集成电路创新链中进步最快的国家；中国则依托强大的国家投入和规模优势，在基础人才、创新成果生产等方面快速成长，但在创新投入的成果转化以及产业链后端的市场化和产业化方面面临严峻的挑战。

#### 1. 领先的人才力量和高强度的创新投入是美国构筑创新链优势的根基

从竞争力来看，美国在人才总量和质量上都居于无可争议的领先地位，尤其是国际影响力方面更为突出(胡蝶和王嵩迪,2021)<sup>[18]</sup>，近年来更是通过推动移民和签证制度改革，加大对国外高技能应用型人才以及基础研究人才的争夺和吸引。自然科学和工程学年度获得博士学位的人数方面，美国依然保持领先地位，中国和欧洲位居其后，韩日位列第三梯队。2018 年，美国为 4.12 万人，中国、英国、德国、韩国、日本位列其后，分别为 3.98 万人、1.74 万人、1.51 万人、0.71 万人和 0.68 万人。从质量来看，以科睿唯安(Clarivate Analytics)发布 2021 年度全球“高被引科学家”名单为例，2021 年来自全球 70 多个国家和地区的 6602 人中，美国高被引科学家为 2622 人，遥遥领先；中国居第二，但也只有 931 位学者进入名单。

从研发投入来看，美国以其强大的研发投入支撑其在集成电路产业的领先优势。从《2021 年欧盟工业 R&D 投资积分卡》所选择的 2500 家研发投入领先企业的研发投入来看，其占到全球企业研发投入的 90%，美国企业 R&D 投资占比 38.5%，欧盟企业占比 20.9%，日本企业占比 12.7%，中国企业占比 13.5%，世界其他国家占比 14.8%。从企业总研发支出的变化情况来看，2019 年美国、欧盟和中国企业研发费用增长率分别为 10.8%、5.6% 和 21%，中国成为全球企业创新投入增量的主要贡献者。根据 IC Insights 最近发布的数据显示，2021 年总部位于美国的半导体企业贡献了全行业研发投入(805 亿美元)的 55.8%，研发强度高达 16.9%，超过总部位于欧洲和亚洲地区半导体企业研发强度的 14.4% 和 9.8%<sup>①</sup>。

分行业来看，研发投入前 500 位的企业中，有 ICT 产业企业 115 家，其中，华为、三星、苹果、英特尔、高通、博通、台积电、英伟达、SK 海力士、镁光、西数、联发科技、阿斯麦、应用材料、中兴等半导

① 数据来源：IC Insights. Americas' Chip Suppliers Continue to Dominate R&D Spending[EB/OL]. <https://www.icinsights.com/news/bulletins/Americas-Chip-Suppliers-Continue-To-Dominate-RD-Spending/>, July 20, 2022.

体行业企业位列研发投入前 100 位<sup>①</sup>。美国、欧洲、日本、韩国、中国是半导体行业研发投入的主要供给者,但美国依然处于遥遥领先地位,包括在集成电路设计(高通、博通、英伟达等)、制造(英特尔)、设备(应用材料)等重要领域都保持技术的领先优势,中国企业华为研发投入增长最快,研发投入仅次于谷歌(ALPHABET)。《韩国经济日报》2021 年 4 月 5 日报道的数据显示,韩国前 100 家公司的 R&D 支出在 2020 年达到创纪录的 49.5 万亿韩元(440 亿美元)<sup>②</sup>,其中三星、LG 电子、SK 海力士是研发投入分别达到 21.2 万亿韩元、4.0 万亿韩元和 3.5 万亿韩元,三星电子和 SK 海力士的研发强度分别达到 9.0% 和 10.9%。

### 2. 构筑“专利墙”等产业进入的知识壁垒是美国强化控制力的重要手段

企业是半导体领域的主要专利拥有者,且半导体领域的专利也是各国新兴产业核心竞争力的重要体现。从欧洲专利办公室 2021 年受理的专利数量来看,前 10 名专利企业<sup>③</sup>中大部分都居于通信、计算等与集成电路有关的行业,中国企业华为超过三星成为专利申请数最多的企业。分领域来看,数字通信领域,华为、OPPO、中兴通讯、VIVO、小米、大唐移动、联想等均位居申请专利最多的企业行列;计算机领域,百度、华为、腾讯、阿里、小米等也均位居申请专利最多的企业行列。这些均显示了创新链地位的上升。

从集成电路领域高质量论文发表数量来看,2021 年美国学者在三大顶级会议上发表论文数占比高达 40.88%,欧盟为 24.92%,韩国为 12.92%,中国为 10.03%,日本为 9.7%<sup>④</sup>,反映了美国的绝对影响力。近年来,为维持在集成电路产业的优势地位,美欧日韩等将保护本国的产业秘密和“技术诀窍”等作为维系国家安全的重要内容,通过将研发中心撤回本土、禁止本国人才为外国提供服务等防止人才外流,且通过非正当竞争手段污蔑中国等后发国家“盗窃”商业机密,借以维系其在集成电路产业的知识优势。

### 3. 利用全球大分工控制高附加值环节是发达国家保证产业持久控制力的根本

从当前的竞争态势来看,美国依然在全球集成电路产业链具有绝对的控制优势,不仅市场份额遥遥领先,还在设计、制造、设备、EDA 软件和 IP 核方面保持绝对控制力;日本尽管总体规模上快速下降,尤其是在美国打压下逐步退出制造和设计领域,但其在材料和设备领域有强大的影响力,成为其在集成电路产业竞争力的核心内容;欧洲依托强大的工业基础,在集成电路应用环节具有独特优势,也造就了其在设计和设备方面的优势;韩国利用美国打压日本半导体行业的机遇,主动承接制造和封测环节产能,并利用产业进一步分工的机会加大部署制造能力,也成为集成电路创新链的积极贡献者;中国则成为集成电路创新链的后发者,既有超大规模市场优势对集成电路产业发展的内在吸引力,也有应对美国打压下维护国家安全的内在驱动力。

在集成电路行业上游设备、材料、EDA 软件和 IP 核方面(如表 6 所示),前十大设备企业中,美国有 4 家、日本 4 家、欧洲 2 家;前十大材料企业中,美国 1 家、日本 6 家、德国 2 家;EDA 和 IP 核企业中,美国 4 家企业基本上垄断了芯片设计和通信产品设计,X86 相对封闭的 IP 核为英特尔所有,欧洲拥有当前增速和市场占有率最高的 ARM 的 IP 核,中国尽管有华大九天等在细分领域的企业,但在 EDA 和 IP 核领域竞争力相对落后。与韩国和中国在制造、封装等方面表现出明显优势相比,美日欧牢牢控制产业链上游以“攫取”高附加值。

① 数据来源:European Commission(2022)。

② 数据来源:Kyung-Min Kang. Chips, EV and AI lead Korean firms' 2020 R&D spending[EB/OL]. <https://www.kedglobal.com/r-ds/newsView/ked202104050003>, Apr 05, 2021。

③ 这十家企业分别为:华为、三星、LG、爱立信、西门子、雷神科技、高通、索尼、飞利浦和博世,数据来源于欧洲专利办公室发布的 Patent Index 2021。

④ 数据来源:European Commission(2022)。

表 6 2020 年集成电路上游领先企业经营数据对比(单位:亿美元)

| 设备企业① |       |       |        | 材料企业②  |       |       | EDA 软件和 IP 核③ |         |       |       |
|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|---------------|---------|-------|-------|
| 排名    | 厂商    | 总部所在地 | 销售收入   | 厂商     | 总部所在地 | 销售收入  | 排名            | 厂商      | 总部所在地 | 销售收入  |
| 1     | 应用材料  | 美国    | 163.65 | 信越化学   | 日本    | 36.57 | 1             | 是德科技    | 美国    | 42.21 |
| 2     | 阿斯麦   | 荷兰    | 153.96 | 环球晶圆   | 中国台湾  | 34.77 | 2             | 新思科技    | 美国    | 37    |
| 3     | 泛林半导体 | 美国    | 119.29 | 胜高     | 日本    | 28.06 | 3             | 楷登电子    | 美国    | 27    |
| 4     | 东电电子  | 日本    | 113.21 | 陶氏化学   | 美国    | 20.47 | 4             | 西门子 EDA | 美国    | 12.8  |
| 5     | 科磊半导体 | 美国    | 54.43  | 东京应化   | 日本    | 11.97 | 5             | 安谋      | 英国    | \     |
| 6     | 爱德万测试 | 日本    | 25.31  | 日本合成橡胶 | 日本    | 8.57  | 6             | CEVA    | 美国    | \     |
| 7     | 迪思士   | 日本    | 23.31  | 林德集团   | 德国    | 约 25  | 7             | 华大九天    | 中国    | \     |
| 8     | 泰瑞达   | 美国    | 22.59  | 凸版印刷   | 日本    | 13.85 |               |         |       |       |
| 9     | 日立高新  | 日本    | 17.17  | 大日本印刷  | 日本    | 17.12 |               |         |       |       |
| 10    | 先域    | 荷兰    | 15.16  | 巴斯夫    | 德国    | 98.57 |               |         |       |       |

资料来源:①根据 vlsiresearch 和各个公司网站数据整理。②数据来源于 SEMI,晶圆企业数据为 2019 年公司营业收入,2021 年 1 月环球晶圆收购德国晶圆制造企业 Siltronic,故环球晶圆数据为合并前 2 家企业的合计营业收入;陶氏化学收购杜邦之后,杜邦光刻胶业务被纳入到陶氏,数据来源于杜邦公司报表,为半导体技术业务销售收入;东京应化数据来自公司报表,为公司材料业务数据,按照 2021 年 12 月 31 日美元对日元利率换算;日本合成橡胶数据来源于公司报表,为数字解决方案业务中的半导体材料 2021 年收入;林德集团数据来自于 2021 年财务报告,根据其当年销售额 308 亿美元,其中电子气体占比约 8% 估算得出;凸版印刷数据来源于公司报表,为 2022 财年电子部门数据,按照 2021 年 12 月 31 日美元对日元利率换算;大日本印刷数据来源于公司报表,为 2021 财年电子部门数据,按照 2021 年 12 月 31 日美元对日元利率换算;巴斯夫数据来源于公司报表,为 2020 财年化学部门对第三方销售额,按照 2020 年 12 月 31 日美元对欧元利率换算。③根据公开数据整理

从集成电路设计—制造—封测的环节来看(如表 7 所示),美国拥有全球最为领先的设计企业,前十大设计企业中有 9 家为美国企业;前十大制造企业中美国有 4 家、韩国 2 家、欧洲 2 家,日本 1 家、中国台湾 1 家;前十大封测企业中,美国 1 家、中国大陆 3 家、中国台湾 6 家。产业链中高附加值的设计为美国所牢牢控制,由于制造环节的关键性,美国依然保持在制造环节的相对领先优势,并逐步退出劳动密集型且附加值相对较低的封测环节。

表 7 2021 年集成电路产业不同环节领先企业销售收入及排名情况(单位:亿美元)

| 设计企业① |      |       |        | 制造企业②  |       |         | 封测企业③ |       |       |
|-------|------|-------|--------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|
| 排名    | 厂商   | 总部所在地 | 销售额    | 厂商     | 总部所在地 | 销售额(预测) | 厂商    | 总部所在地 | 销售额④  |
| 1     | 高通   | 美国    | 293.33 | 三星     | 韩国    | 830.85  | 日月光   | 中国台湾  | 21.48 |
| 2     | 英伟达  | 美国    | 248.85 | 英特尔    | 美国    | 755.50  | 安靠    | 美国    | 16.81 |
| 3     | 博通   | 美国    | 210.26 | 台积电    | 中国台湾  | 566.33  | 长电科技  | 中国大陆  | 12.52 |
| 4     | 联发科  | 中国台湾  | 176.19 | SK 海力士 | 韩国    | 372.67  | 矽品    | 中国台湾  | 10.36 |
| 5     | 超威   | 美国    | 164.34 | 镁光     | 美国    | 300.87  | 力成科技  | 中国台湾  | 8.02  |
| 6     | 联咏   | 美国    | 48.36  | 德州仪器   | 美国    | 169.04  | 通富微电  | 中国大陆  | 6.36  |
| 7     | 美满   | 美国    | 42.81  | 意法半导体  | 欧洲    | 125.74  | 华天科技  | 中国大陆  | 5.02  |
| 8     | 瑞昱   | 美国    | 37.67  | 铠侠     | 日本    | 121.32  | 京元电子  | 中国台湾  | 3.23  |
| 9     | 赛灵思  | 美国    | 36.77  | 恩智浦    | 欧洲    | 107.15  | 南茂科技  | 中国台湾  | 2.57  |
| 10    | 奇景光电 | 美国    | 15.47  | 亚德诺半导体 | 美国    | 100.79  | 欣邦    | 中国台湾  | 2.55  |

注:高通仅计算 QCT 部门营收,英伟达扣除 OEM 和 IP 核营收,博通仅计算半导体部门营收

资料来源:①设计企业数据来源于 TrendForce(2022);②制造企业数据来自于 IC Insights;③封测企业数据来自于 TrendForce(2021);④封测企业为 2021 年前三季销售额

#### 四、集成电路产业全球创新力评价

创新力是从创新链维度对集成电路产业竞争力的另一个刻画维度,能比较好地体现集成电路这类创新型产业的竞争力。为更加全面地呈现集成电路创新链的全球竞争力,按照集成电路创新

链的创新要素投入、创新成果生产、创新成果市场化转化和产业化三阶段的维度,本文对主要国家和地区集成电路产业创新力予以评价。

### 1. 评价方法

(1)数据标准化处理。鉴于创新链三个维度的纵向关联性,且指标所代表的经济学意义上的差别,需要对指标进行无量纲化处理。由于文中所选择的指标均为正向指标,故统一用如下公式处理:

$$X_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{i1}, \dots, x_{i6})}{\max(x_{i1}, \dots, x_{i6}) - \min(x_{i1}, \dots, x_{i6})}$$

其中, $X_{ij}$ 是第  $j$  个国家/地区指标  $i$  无量纲化后处理的值, $x_{ij}$ 是第  $j$  个国家/地区指标  $i$  的原始值, $\min(x_{i1}, \dots, x_{i6})$ 是第  $i$  个指标在 6 个国家/地区中的最小值, $\max(x_{i1}, \dots, x_{i6})$ 是第  $i$  个指标在 6 个国家/地区中的最大值。

(2)简单赋权处理。创新链本身的链式特征,导致每一个环节对创新产出和整体创新绩效都非常重要。此外,本文所选择的测度指标有限,可以相对较为简单地计算出各指标的权重。为此,本文对全部三级指标进行无量纲化处理后,采用同一层级指标内部等权重方法来确定权重,即 3 个一级指标、每一个一级指标内的二级指标等权重,每一个二级指标内的三级指标等权重。在无量纲化处理和简单赋权的基础上,即可计算出某一国家/地区创新链竞争力指数。

### 2. 评价过程

首先,基于创新链要素投入、创新成果生产以及创新产业化三个阶段,以可获取的最新数据(主要为 2021 年数据)为基础,获取各个指标的具体数据(如表 8 所示)。

其次,根据公式(1),采用标准化法对各个三级指标予以具体评价,得出无量纲化的具体指标结果(如表 9 所示)。

表 8 全球集成电路产业创新力的评价体系及原始值

| 一级指标   | 二级指标 | 具体指标                                 | 美国    | 欧洲    | 日本    | 韩国   | 中国    |
|--------|------|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|
| 创新要素投入 | 研发投入 | 研发强度(%) <sup>①</sup>                 | 18.00 | 15.10 | 8.30  | 9.10 | 7.60  |
|        |      | 企业研发投入量占全球比重(%) <sup>②</sup>         | 37.80 | 20.26 | 12.22 | 3.68 | 15.51 |
|        | 人才基础 | 人才数量(万人) <sup>③</sup>                | 4.12  | 5.01  | 0.68  | 0.71 | 3.98  |
|        |      | 人才质量(人) <sup>④</sup>                 | 2622  | 1387  | 89    | 55   | 931   |
| 创新成果生产 | 学术论文 | 三大学术会议发文数(篇) <sup>⑤</sup>            | 269   | 164   | 63    | 85   | 66    |
|        | 专利   | 美国专利商标局授权的各国半导体授权专利数(件) <sup>⑥</sup> | 6955  | 1931  | 5648  | 3138 | 729   |
|        |      | 欧洲专利办公室接受的专利申请量(件) <sup>⑥</sup>      | 712   | 1059  | 597   | 662  | 468   |
| 创新产业化  | 先进产品 | 设计环节领先企业数量(家) <sup>⑦</sup>           | 9     | 0     | 0     | 0    | 0     |
|        |      | 制环节领先企业数量(家) <sup>⑧</sup>            | 4     | 2     | 1     | 2    | 0     |
|        |      | 封测环节领先企业(家) <sup>⑨</sup>             | 1     | 0     | 0     | 0    | 3     |
|        |      | 设备领域领先企业数量(家) <sup>⑩</sup>           | 4     | 2     | 4     | 0    | 0     |
|        |      | 材料领域领先企业数量(家) <sup>⑪</sup>           | 1     | 2     | 6     | 0    | 0     |
|        |      | EDA 和 IP 核领域领先企业数量(家) <sup>⑫</sup>   | 5     | 1     | 0     | 0    | 1     |
|        | 产业规模 | 全球市场份额(%) <sup>⑬</sup>               | 47    | 10    | 10    | 20   | 5     |

注:①研发投入数据来源于 SIA 对 2021 年主要半导体国家和地区研发强度估计值;②数据来源于《2021 年欧盟工业 R&D 投资积分卡》,根据研发投入最多的 2500 家企业总部所在地计算得到;③数据来源于美国科学基金会,相关数据为 2018 年数据,其中欧洲数据为法国(8987 人)、德国(15061 人)、西班牙(9480)和英国(17366)4 国数据之和;④数据为 2020 年数据,来

源于科睿唯安 2021 年 11 月 16 日发布的《2021 年度“高被引科学家”名单》；⑤数据为 2020 年各国/地区在集成电路三大顶级学术会议上 (IEDM、ISSCC、VLSI) 发表的论文数, 数据来源于 Publikationen (2021) ; ⑥美国专利商标局授权的各国/地区专利数量来源于美国专利和商标办公室 (USPTO), 欧洲专利办公室接受的专利申请来源于欧洲专利办公室发布的专利指数 2021 (Patent Index 2021) (其中中国台湾数据以其他地区数据替代); ⑦选择设计环节全球前 10 大企业中各国或地区企业数量, 数据来源于 TrendForce; ⑧选择制造环节全球前 10 大企业中各国或者地区企业数量, 企业数据来自于 IC Insight; ⑨封测环节全球前 10 大企业中各国或地区企业数量, 数据来自于 TrendForce; ⑩设备企业数据来源于 IC Insights; ⑪材料企业数据来源于 SEMI; ⑫根据公开数据整理; ⑬集成电路市场份额数据来源于美国半导体行业协会 (SIA)

表 9 全球集成电路产业创新力评价具体指标标准化结果

| 一级指标   | 二级指标 | 具体指标               | 美国   | 欧洲   | 日本   | 韩国   | 中国   |
|--------|------|--------------------|------|------|------|------|------|
| 创新要素投入 | 研发投入 | 研发强度               | 1.00 | 0.72 | 0.07 | 0.14 | 0.00 |
|        |      | 企业研发投入量占全球比重       | 1.00 | 0.51 | 0.28 | 0.04 | 0.38 |
|        | 人才基础 | 人才数量               | 0.81 | 1.00 | 0.07 | 0.08 | 0.78 |
|        |      | 人才质量               | 1.00 | 0.52 | 0.02 | 0.01 | 0.35 |
| 创新成果生产 | 学术论文 | 三大学术会议发文数          | 2.00 | 0.98 | 0.00 | 0.21 | 0.03 |
|        | 专利   | 半导体授权专利数 (美国专利商标局) | 1.00 | 0.00 | 0.54 | 0.33 | 0.08 |
|        |      | 半导体授权专利数 (欧洲专利办公室) | 0.77 | 1.00 | 0.73 | 0.39 | 0.19 |
| 创新产业化  | 先进产品 | 设计环节领先企业数量         | 0.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
|        |      | 制环节领先企业数量          | 0.40 | 0.22 | 0.10 | 0.20 | 0.00 |
|        |      | 封测环节领先企业           | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.10 |
|        |      | 设备领域领先企业数量         | 0.40 | 0.20 | 0.40 | 0.00 | 0.00 |
|        |      | 材料领域领先企业数量         | 0.05 | 0.10 | 0.30 | 0.00 | 0.00 |
|        |      | EDA 和 IP 核领域领先企业数量 | 0.30 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.06 |
|        | 产业规模 | 全球市场份额             | 2.00 | 0.24 | 0.24 | 0.71 | 0.00 |

第三,按照一二级指标等权重方法,对测度结果赋值,最终得到各国/地区集成电路产业创新力的评价结果。为保证所有数据的可比较,对所有标准化的数据全部按照权重作百分制处理(如表 10 所示)。

表 10 全球集成电路产业创新力评价结果

| 一级指标   | 二级指标 | 美国    | 欧洲    | 日本    | 韩国    | 中国    |
|--------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 创新要素投入 | 研发投入 | 100   | 61.48 | 17.53 | 9.41  | 18.77 |
|        | 人才基础 | 90.49 | 76.15 | 4.82  | 4.48  | 56.34 |
| 创新成果生产 | 学术论文 | 100   | 49.03 | 0.00  | 10.68 | 1.46  |
|        | 专利   | 88.67 | 50.00 | 63.21 | 36.21 | 13.72 |
| 创新产业化  | 先进产品 | 79.17 | 29.11 | 40.00 | 10.00 | 8.00  |
|        | 产业规模 | 100   | 11.90 | 11.90 | 35.71 | 0.00  |
| 总体评价   | 得分   | 93.05 | 46.28 | 22.91 | 17.75 | 16.38 |
|        | 排名   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |

从定量评价结果来看,美国、欧洲、日本、韩国和中国在创新力总体得分分别为 93.05、46.28、22.91、17.75 和 16.38,结果表现出显著的分化特征。美国位列第一,欧洲位居第二但得分不足美国的一半,日本得分也不足欧洲的一半,韩国和中国得分相对比较接近,但远远低于前三个国家/地区。

### 3. 结果分析

从结果来看,美国依然稳居集成电路创新链的领军地位,研发投入、人才基础、创新产出、产品领先性和产业规模等都位居全球第一的位置,仅在人才基础和先进产品方面未能实现绝对控制力;欧洲次之,在人才基础方面表现出较为显著的优势,创新投入、专利、学术论文等也表现出较强的竞争力,但在先进产品和产业规模方面表现不佳;日本位居第三位,主要来源于其强大的专利积累以及设备、材料等先进产品上的强大竞争力,但在学术论文、人才基础以及产业规模方面表现不佳;韩国位居第四,在专利产出和产业规模方面也表现出一定的优势,但由于相对较少的企业数量和不完善的产业生态,在先进产品、人才基础、学术论文方面表现出一定的劣势;中国位居第五位,主要来源于在人才基础方面的优势,但在专利、产业规模、先进产品等方面上位居最末位,其他方面也表现不佳。

## 五、我国集成电路产业创新链赶超的战略思路

从集成电路产业全球创新力评价结果来看,我国在集成电路产业的资本和人才投入方面进步较快,但总体投入密度、创新成果生产和创新产业化方面水平表现较差,且自主产业规模和先进产品方面也明显落后于领先国家和地区。围绕创新链赶超,需要进一步加大创新投入和创新链协同为产业发展注入内在动力,以产业链创新和整体突破提升全球竞争力,以深化对外开放和强化自主创新来激发产业发展的全球生态活力,以科学布局提升协同发展能力,并把握数字革命和产业革命发展机遇,实现集成电路产业的领先力。

### 1. 以加大创新投入和创新链协同为集成电路产业赶超注入内生动力

要从创新链协同视角来提升创新链治理水平,不仅要夯实集成电路产业发展的基础,也要面向市场推动产品的规模化和高效化,还需要关注研究开发到产业化的“死亡之谷”转化问题(高运胜和杜晓晴,2022)<sup>[19]</sup>,提升集成电路产业投入的转化效率,驱动集成电路产业在投入不断提升的背景下快速发展。

一是进一步加大集成电路产业的创新资本投入,尤其是基于我国集成电路企业规模相对较小的现实,加大公共资源投入,同时发挥相关政策优势,鼓励企业加大基础投入。从行业领先企业创新投入的实践来看,长期高强度的研发投入是保持竞争优势的关键。例如,阿斯麦在极紫外光刻技术及其批量化生产中花费了 17 年时间和大约 70 亿美元,不仅巩固了其极紫外光刻机的垄断地位,也使得极紫外光刻机成为其当前的主要业务增长来源;安谋在 64 位计算处理器 IP 核开发中花费了六年时间,这也成为当前公司收入的主要来源。集成电路产业应坚持长期导向的创新赶超战略,包括高强度的研发投入、人才投入等,以夯实产业发展的资源基础。但是,与国际上集成电路领先企业极高的研发投入和研发强度形成鲜明对照的是,我国集成电路企业总体规模较小,企业尚处于盈亏平衡点之内或者略有盈余,资源难以支撑创新要素投入。为此,在数字经济竞争的时代背景下,需要发挥有为政府作用(刘建丽,2021)<sup>[20]</sup>,鼓励集成电路产业优先布局和集聚区地方政府加大对创新投入的支持,强化对行业发展具有重要溢出效应和协同效应的公共研发投入,加大共性研发平台、科技成果转化平台建设;同时,强化对企业利用有限资源加大创新投入的引导和激励,例如对成长阶段的集成电路企业给予更高的税前加计扣除比例。

二是将高质量人才培养和有效供给作为集成电路产业长期竞争力提升的内源动力,进一步加



大人才培养力度和优化人才结构。尽管我国培养的科学与工程博士人才数量已经接近美国,但我国在吸引国际学生比例、学生培养水平等方面与之尚存在较大的差距,加之美国当前发起对中国高科技领域为主要目标的精准打击以来,中美在集成电路产业的人才交流方面面临严峻的挑战(张杰,2022)<sup>[21]</sup>。为此,建议进一步强化集成电路领域的高水平人才培养,在集成电路学院、微电子学院的基础上,有步骤地扩大集成电路人才培养数量和比例,并逐步扩大对全球留学生的招生比例,以此来提升我国集成电路产业的全球嵌入度。此外,进一步拓宽我国集成电路相关领域人才与境外高校、科研机构、龙头企业的交流与合作研究。

三是鼓励集成电路领域高水平创新成果的生产,形成可与全球互动并形成独特优势的高质量创新成果。我国在集成电路领域高水平学术论文总体数量较少且占比较低,在专利和行业标准方面更是远远落后。为此,要进一步鼓励各类创新主体的成果产出,尤其是强化与国外同行的交流与合作,以知识交流和互通推动全球创新链的发展;注重创新成果的专利和标准转化,加大与行业内龙头企业互相授权,提升对一些恶性竞争的制衡能力。

四是加快推动集成电路创新链先进产品的产研用协同,提高创新产品的全球竞争力。在摩尔定律的驱动下,集成电路产业是技术进步最快的行业之一,这也拉动了创新链上的设备、材料、软件的快速发展和迭代。但是,我国在这些创新产品上的表现较差,在全球竞争中处于相对劣势地位。为此,需要强化对集成电路产业创新链先进产品的突破,形成在关键产品尤其是国外垄断的系统级产品的产研用协同,鼓励用户参与到产品研发和制造过程,并助推产品的逐步完善和迭代升级;同时注意新技术路线的前瞻性布局,维系在突变情境下的快速跟进。

五是强化对集成电路产业世界一流企业的培育,使其成为全球市场的重要引领者。无论是设备、材料、软件三大领域还是关键的设计和制造环节,中国大陆都未有世界级领先企业,我国企业在集成电路产业上游和高附加值环节的影响力极为有限,这也成为我国在全球市场竞争力弱的重要原因之一。为此,要在培育世界一流企业的顶层设计下,注重集成电路产业世界一流企业的培育。全球集成电路领先企业表现出典型的多元化成长路径,英特尔以技术引领和用户锁定型发展模式形成领先优势,台积电以商业模式创新和效率叠加模式快速崛起,三星以专注细分领域和高强度研发投入模式后发赶超,阿斯麦以全球创新资源整合模式实现在最前沿领域的有效控制,应用材料以完善的产品系列和服务型制造模式实现其在设备领域最有效的影响力,信越化学以其产品创新和企业升级逐步涉入集成电路材料领域并形成在先进产品领域的领先优势,不同细分行业和领域的集成电路企业成长模式差异显著。此外,美日欧集成电路领先企业的成长路径还表现出显著的国别差异,美国企业将资本运作和全球范围内的并购整合与技术创新置于同等重要的位置,日本企业注重自身能力的逐步夯实和对“短板”的补足,欧洲企业注重全球资源和市场的匹配与整合,不同的成长模式对于我国集成电路领先企业成长也具有一定的参考价值。在集成电路产业世界一流企业培育过程中,鼓励企业把握数字经济时代的技术、市场、地缘政治格局变化等机遇,结合具体细分行业和领域的特征选择不同的模式和成长线路。

六是进一步把握全球集成电路产业变化的新趋势,强化在重要环节的创新投入。近年来,美国通过出台《芯片与科学法案》,打造所谓的“芯片同盟”,对我国集成电路重点领域实施“实体清单”制裁、高端设备和产品限购等,不仅打压我国集成电路产业的发展,更强化其在高端制造领域的控制力。为应对美国在集成电路产业对我国的极限施压,需要在创新政策方面进一步提升对重点领域的支持力度,尤其是对高端制程芯片和下一代芯片全产业链的支持,以形成与美国企业具有相对公平的竞争地位。

## 2. 以产业链创新和整体突破提升全球竞争力实现产业赶超

作为一个极端重要的产业,集成电路产业创新链赶超过程中不仅需要技术上的领先,还需要在

产业和市场上的领先,以形成持续发展能力。具体来看,需强化集成电路产业链从软件、设备、材料领域到设计、制造、封测环节的竞争力,激发集成电路产业赶超和发展的生态活力。

一是要树立集成电路产业链的整体安全观,确保我国在极限压力下的产业“备份”能力。近年来全球范围内的集成电路产业竞争,凸显了各国都关注于构建完善的产业生态系统,以避免部分环节和领域被“卡脖子”,对于被美国视为“关键战略对手”的我国尤其如此。我国不仅要强化集成电路产业链“长板”的锻造,更要加速补齐产业链“短板”,实现全产业链的贯通能力。

二是加快从国家层面协同推动集成电路和软件系统生态的建设。在关注集成电路 EDA 工具和 IP 核国产突破和迭代升级的同时,要统筹推进操作系统、开源生态、指令级架构等整体软硬件系统、用户生态的协同推进,否则国产替代的目标只能停留在技术层面而非产业层面。

三是需进一步强化战略定力,推动设备国产化和赶超发展。着眼于长期发展目标以加大政策支持力度和创新政策工具,强化对龙头企业的精准支持和创新型小企业的普惠性支持,把握技术、市场等机会窗口期推动产业跃迁,强化国际合作尤其是与韩国等处于类似市场地位的国家合作,完善我国在设备领域的供应链体系(李先军等,2022)<sup>[22]</sup>。

四是强化产业链协同,加快材料的商业化应用以实现有序迭代升级。既要发挥我国传统化工产业优势,推动化工企业与集成电路制造企业协同合作和有序升级,开发可用于集成电路制造过程中的各类高纯度、创新型化工产品,形成跨界的合作优势;也要发挥政府、行业团体或者龙头企业的引导作用,构建产业上下游和横向企业之间的社会协同网络,真正将产品从研发企业、实验室走向车间,走向大规模应用。

五是加强芯片设计公共技术服务平台建设,为国内多场景芯片设计提供远端集成服务。构建国产 EDA 工具和 IP 核整合平台,把握汽车芯片、工业级芯片、第三代半导体设计发展的机遇,围绕国内多场景芯片需求,为国产芯片设计企业、代工企业提供芯片设计集成服务、云端服务,降低设计企业投入成本和设计风险。

六是进一步提高芯片制造能力,尤其是高端制程芯片和下一代芯片制造能力。紧跟全球芯片产能扩张浪潮,进一步吸引台积电、三星、英特尔等行业龙头企业在我国扩张产能尤其是先进产能,强化本土芯片供应能力;鼓励中芯国际、华润微、长江存储等国内领军企业复制产能,进一步提升自主可控供给能力;鼓励制造技术、工艺创新型企业探索制造模式创新,前瞻性部署前沿性制造线路。

七是进一步强化架构、封装和材料创新。探索满足更为先进制程需要的架构创新,从 2D 到 3D,从鳍场效应晶体管(Fin Field-Effect Transistor, FinFET)到全环绕栅极晶体管(Gate-All-Around FET, GAA)再到互补场效应晶体管(Complementary Field Effect Transistor, CFET),不仅是集成电路制造工艺上的变化,也是集成电路设计、封装以及配套的设备、材料、EDA 软件的重新设计。围绕纳米级和原子级等微观电子及其物理特征,探索架构上的创新来满足未来高制程集成电路的需要。提升先进封装能力,创新封装技术以较低制程产品实现对先进产品的性能替代。利用我国在封装领域的优势,加大与晶圆制造企业、设计企业的协同,提升系统级(SIP)封装、3D 封装、晶圆级封装(Wafer Level Packaging, WLP)、倒装封装(Flip-chip)、芯粒/小芯片封装(Chiplet)等先进封装能力,并创新在相对较低制程芯片的封装工艺以保证单位体积上的运算能力。加速晶体管本身、互联材料等方面的创新,加快推进在碳纳米管、碳化硅、砷化镓等晶圆材料的产业化应用以及在其他复合材料方面的实验和中试,在铜互联工艺上可进一步开发铍、钴、钨或钼等材料与工艺的创新来提升晶体管连接效率,包括探索光互连等新的联接工艺。

### 3. 以深化开放和强化自主创新激发集成电路产业的全球生态活力

集成电路产业的高度全球化和关键重要性,决定了产业发展既要坚持国际合作的开放思路,也

要坚持自主创新的可控能力,在深度融入全球中强化自主创新。在当前各国强化本地供应链控制力的情境下,应进一步创新开放思路融入全球化,强化与全球其他国家在标准、技术、知识和市场方面的合作,防范技术“黑箱”导致的产业不信任以及技术脱钩产生的“加拉帕戈斯化”(李先军和刘建丽,2021)<sup>[23]</sup>。

一是深化技术标准的国际合作和自主能动性。利用我国在集成电路技术和产业方面的一些优势,例如封测环节、5G芯片设计等,主动推动我国企业的相关技术标准向国际标准化组织和欧美企业的开放与共享,形成在集成电路产业有序合作和竞争的基本态势,推动国际标准的全球应用,以降低全球集成电路产业发展的交易成本。

二是加强与跨国公司的横向与纵向合作,鼓励企业以专利相互许可等方式强化与国际产业网络的相互嵌入,通过打造国际化产业论坛等平台,增加中国企业、科研人员与国外合作的机会,鼓励技术的联合开发以及共同专利申请,形成在关键技术上的跨国合作,缓解其他国家对我国的“专利墙”制约。依靠超大规模市场优势并与发展中国家合作,积极推动竞争性技术路线的落地和推广,规避既有路线的生态壁垒。

三是鼓励学术机构和大型企业研究者和从业者的国际知识交流与合作。加大与国外学术机构、标准化组织、全球顶级研发机构、国际论坛的合作交流,鼓励企业和高校及科研院所积极参与全球知识网络,进一步提升自然科学基金等基金项目国外团队、专家和企业的开放水平,通过机构和人员互动形成“你中有我、我中有你”的创新合作生态。

四是坚持开放市场、寻求国际产能合作,提升我国在国际产业生态中的话语权。进一步开放市场并鼓励欧美日韩对我国企业开放产业链供应链,打造中欧、中美、中日、中韩、中以以及多国合作示范产业园,通过横向合资和纵向合作提升中国集成电路产业与国际产业链的相互嵌入程度,通过让渡部分市场换取国际标准接口,避免技术路线和前沿技术“脱钩”,防范产业过度保护所带来的“加拉帕戈斯化”,并通过产能绑定强化我国在全球产业生态中的话语权。

#### 4. 以科学的产业、区域和产品布局提升集成电路产业的协同发展能力

集成电路产业在全球大转移过程中,形成了以美国硅谷、日本九州岛集成电路集聚区、韩国K半导体产业带(以京畿道和忠清道为核心)、德国德累斯顿、中国台湾新竹科技园等为代表的集成电路产业集聚区,高效聚集成为驱动集成电路产业创新链协作的重要驱动力量,不同集聚区在集成电路产业发展中也表现出独特的优势。此外,从美欧日韩近年来为提升本国集成电路供应链安全的举措来看,强化全产业链的自主可控能力也成为各国应对全球供应链重构秩序的重要举措。为此,在构建自主可控集成电路产业的总体战略目标下,应结合产业发展规律和国际竞争态势,科学布局以提升集成电路创新链的协同发展能力。

一是在继续关注产业关键环节和领域追赶和破解“卡脖子”问题的同时,要引导市场投资“多点布局”维系我国集成电路产业的安全可控。高度关注集成电路系统级设备的整机制造、供应链稳健性以及产业化应用能力,除了光刻机、刻蚀机需要集中力量快速突破之外,也需要关注镀膜设备、量测设备、清洗设备、离子注入设备、化学机械研磨设备、快速退火设备等领域创新型企业的发展;集成电路材料领域,在优先攻克大尺寸硅片、掩模版(光罩)生产技术以及制造工艺的同时,关注国内企业在光刻胶、电子气体、湿化学品、溅射靶材、化学机械抛光材料等方面的突破和应用迭代,既要通过工艺创新推动相关高精密材料的产业化形成在成本和质量上的优势,也要提前布局第三代、第四代先进半导体材料的研究和产业化;培育一批集成电路的个性化生产性服务企业,例如超高洁净室设计和运维、车间内传统和搬运系统、污染物回收与处理等,通过专业化分工和有效的市场协作实现在特定领域和环节的快速突破;关注集成电路应用的细分领域,例如在汽车芯片、新能源、智能电网、高速轨道交通等形成差异化优势。

二是结合地方产业基础和创新链协同需要,强化集成电路产业的重点布局。培育一批空间集聚、功能关联、产业链有效适配的集成电路产业集群,支持北京、上海围绕基础研究和战略前沿技术研发能力提升,构建集设计、制造、装备和材料于一体的产业创新高地;推进京津冀协同发展、长三角一体化,打造具有国际竞争力的综合性产业集群;发挥粤港澳大湾区先行先试、应用需求大、经济实力雄厚、人才资源丰富的优势,打造产业集聚“第三极”;在符合国家规划布局的前提下,支持地方政府因地制宜,培育形成各具特色的集成电路产业基地。

三是强化在集成电路重要产品上的布局。从集成电路产业的增长来看,通讯类、汽车类、工业类芯片是当前最具增长潜力的领域,而与之相匹配的不同类型芯片,例如基带芯片、射频芯片、CMOS、GPU、MPU、传感器等近年来也增长迅速。为此,在集成电路产业赶超发展过程中,要关注集成电路产品尤其是关键产品、先进产品、前沿性产品的布局,例如把握当前汽车芯片短缺的机遇引导汽车制造企业和芯片制造企业加快在这一领域的快速突破和国产替代(李先军等,2022)<sup>[24]</sup>,把握数字经济发展对数据中心、人工智能等领域高端 GPU 的需求,强化芯片设计、制造与用户的协同创新。

四是打造创新合作平台,为集成电路产业创新主体协同合作创造条件。借鉴美日韩集成电路发展过程中的官产学研合作方式,创新多主体协作方式,扶持产业联盟和共同研发组织,推动形成新的上下游合作、收益共享、共同发展的模式,以多种创新资源获取来提升创新平台竞争优势(张杰等,2022)<sup>[25]</sup>。例如借鉴日本的“超大规模集成电路计划”、美国的“半导体制造技术战略联盟”等,以共同的基础研发、共享的基础专利、归属本企业的应用开发和专利共同作用,不仅有效地促进了技术的集中攻关和突破,也有利于配置本地生态,促进本土企业竞争,有利于整个行业的高质量发展。打造集成电路全球开放合作的跨国、跨行业联合创新平台,参考比利时微电子研究中心(IMEC)运营模式,以上海集成电路研发中心有限公司(ICRD)为基础,打造成成立东方微电子研究中心(OMEC),打造面向全球的知识共享、项目合作、人才培养的开放创新平台,打造一个跨国界、跨学科、跨组织,以学术研究为支撑、项目研究为具体内容、服务产业和企业为基本内容的全球知识共享和创造平台,真正推进中国集成电路研究开发、产业化融入全球创新链产业链,以开放集聚资源来赢得信任,提升中国设备和材料在全球集成电路产业的参与度。

#### 5. 把握数字科技革命和产业变革先机实现在集成电路产业的跨越式创新发展

数字技术不仅从需求端牵引集成电路产业的发展,也从供给端促动集成电路产业的技术和模式创新。在创新链赶超驱动集成电路产业发展的过程中,进一步增加集成电路的需求和应用场景,利用数字技术尤其是智能技术驱动集成电路产业的自我革命。

一是大力推动数字经济发展,扩张和深化集成电路的应用场景。一方面,作为数字经济发展底层基础设施和构成要素,集成电路产业竞争力对于支持数字经济高质量发展至关重要;另一方面,数字经济是集成电路的经济体现和结果,其发展水平决定了市场中对于集成电路的现实需求。为此,在统筹中华民族伟大复兴战略全局和世界百年未有之大变局的时代背景下,要加速数字经济高质量发展,为集成电路产业自主创新和赶超发展创造有效的市场需求,并进而反哺数字经济发展,为大变局背景下构筑国家竞争新优势夯实基础。进一步强化数字基础设施建设,以需求牵引集成电路产业的持续增长;进一步加速数字场景创新和产业化,以新的场景牵引集成电路产品创新;进一步加快工业化联网等大中小企业数字化融通平台建设,提升经济的数字化转型水平。

二是推动数字技术在集成电路创新链中的应用,实现集成电路在数字时代下的“换道发展”。例如,把握人工智能和云计算机遇,加速推动 AI 技术在 EDA 工具中的运用,支持芯片设计企业运

用 AI 技术在芯片功能实现决策、性能预测、性能黑盒优化和自动化设计等方面的优化,形成对传统 EDA 巨头已有传统设计路径的有效赶超。利用 AI 等新技术,加速化合物半导体材料的分析、识别、筛选、模拟等,加快数字经济发展背景下对新材料和特殊材料的需求。

#### 参考文献

- [1] Schumpeter J A. The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle [M]. Cambridge: Harvard University Press, 1934.
- [2] Solo C S. Innovation in the Capitalist Process: A Critique of the Schumpeterian Theory [J]. Quarterly Journal of Economics, 1951, 65, (3): 417 - 428.
- [3] 李永波, 朱方明. 企业技术创新理论研究的回顾与展望 [J]. 成都: 西南民族学院学报 (哲学社会科学版), 2002, (3): 188 - 191, 252.
- [4] Rothwell R. Successful Industrial Innovation: Critical Factors for the 1990s [J]. R&D Management, 1992, 22, (3): 221 - 240.
- [5] Sen N. Innovation Chain and CSIR [J]. Current Science, 2003, 85, (5): 570 - 574.
- [6] Visvanathan, S. From Laboratory to Industry: A Case Study of the Transfer of Technology [J]. Contributions to Indian Sociology, 1977, 11, (1): 117 - 136.
- [7] Timmers P. Building Effective Public R&D Programmes [A]. PICMET'99: Portland International Conference on Management of Engineering and Technology [C]. Proceedings Vol - 1; Book of Summaries (IEEE Cat. No. 99CH36310). IEEE, 1999.
- [8] 林润辉, 陆艳红, 李亚林, 李碧婷, 王伦, 高亚瑞. 全球创新链测度体系研究 [J]. 上海: 研究与发展管理, 2022, (1): 71 - 80.
- [9] 康健, 胡祖光. 创新链内多重网络, 创业能力与创业绩效关系研究 [J]. 广州: 科技管理研究, 2017, (2): 7 - 16.
- [10] 张杰, 吉振霖, 高德步. 中国创新链“国进民进”新格局的形成, 障碍与突破路径 [J]. 北京: 经济理论与经济管理, 2017, (6): 5 - 18.
- [11] 李雨晨, 陈凯华. 面向创新链的国家创新力测度体系构建研究: 多维创新指数的视角 [J]. 天津: 科学学与科学技术管理, 2019, (11): 45 - 57.
- [12] Ernst D. A New Geography of Knowledge in the Electronics Industry? Asia's Role in Global Innovation Networks [R]. East-West Center Policy Studies Series, 2009.
- [13] Ernst D, Kim L. Global Production Networks, Knowledge Diffusion, and Local Capability Formation [J]. Research Policy, 2002, 31, (8 - 9): 1417 - 1429.
- [14] Meixell M J, Gargeya V B. Global Supply Chain Design: A Literature Review and Critique [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2005, 41, (6): 531 - 550.
- [15] Bossink, B. A. G. Demonstration Projects for Diffusion of Clean Technological Innovation: A Review [J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2014, 17, (6): 1409 - 1427.
- [16] Bamfield P. Research and Development in the Chemical and Pharmaceutical Industry [M]. John Wiley & Sons, 2006.
- [17] Eric V. Larson, Irene T. Brahmakulam. Building a New Foundation for Innovation: Results of a Workshop for the National Science Foundation [R]. Santa Monica, CA: Science and Technology Policy Institute, RAND, 2002.
- [18] 胡蝶, 王嵩迪. 中美高校科技人才规模与质量比较研究 [J]. 北京: 中国高教研究, 2021, (6): 65 - 71.
- [19] 高运胜, 杜晓晴. 我国集成电路行业产学研合作模式创新发展的双重困境与突破路径 [J]. 南昌: 企业经济, 2022, (4): 124 - 134.
- [20] 刘建丽. 有效市场与有为政府——兼论中国特色社会主义市场经济 [J]. 北京: 中国劳动关系学院学报, 2021, (1): 1 - 10.
- [21] 张杰. 中美科技创新战略竞争驱动下的全球产业链演变格局与应对策略 [J]. 南京: 世界经济与政治论坛, 2022, (4): 1 - 21.
- [22] 李先军, 刘建丽, 闫梅. 我国集成电路设备的全球竞争力、赶超困境与政策建议 [J]. 北京: 产业经济评论, 2022, (4): 46 - 61.
- [23] 李先军, 刘建丽. 中国集成电路产业发展: “十三五”回顾与“十四五”展望 [J]. 南京: 现代经济探讨, 2021, (3): 87 - 96.
- [24] 李先军, 刘建丽, 闫梅. 产业链优势重塑: 各国破解汽车芯片短缺的举措及中国对策 [J]. 石家庄: 当代经济管理, 2022, (7): 64 - 71.
- [25] 张杰, 陈容, 郑姣姣. 策略性创新抑或真实性创新——来自中国企业设立研发机构的证据 [J]. 北京: 经济管理, 2022, (3): 5 - 23.

## Innovation Chain Catches Up: Innovation and Development of China's IC Industry

QU Yong-yi, LI Xian-jun

(Institute of Industrial Economics, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing, 100006, China)

**Abstract:** Integrated circuits (IC) industry is the source of the digital economy and the basis to build China's new competitive advantages in the future. On the basis of explaining the relevant theories of the innovation chain, this paper starts from the innovation chain logic of the input of innovation elements—the production of innovation achievements—the marketization and industrialization of innovation achievements, and deeply analyzes the global evolution characteristics of the innovation chain of the IC industry since the beginning of this century and the current competition landscape. And then the authors use quantitative evaluation methods to evaluate the innovative power of the IC industry of representative countries and regions, and finally put forward relevant suggestions from the perspective of innovation chain catch-up.

From the perspective of evolution process, the United States still maintains absolute control of the innovation chain in the process of global industrial transfer. The European Union's innovation power is relatively stable and has a tendency to strengthen. Japan's innovation power is declining rapidly and is being overtaken by South Korea. China is a latecomer in the innovation chain, showing a relatively stable upward trend.

At present, the global innovation chain competition of IC shows the characteristics of “one superpower and many strong”. The United States is still firmly in the leading position in the IC innovation chain, and it failed to achieve absolute control only in terms of talent base and advanced products. Followed by Europe, it has significant advantages in talent base, innovation investment, patents, academic papers, but it performs poorly in advanced products and industrial scale. Japan ranks third, mainly due to its strong patent accumulation and strong competitiveness in advanced products such as equipment and materials, but in terms of academic papers, talents and industrial scale have poor performance. South Korea ranks fourth, and it also shows certain advantages in terms of patent output and industrial scale. However, due to a relatively small number of enterprises and an imperfect industrial ecology, it shows certain disadvantages in terms of advanced products, talent base, academic papers. China ranks fifth, mainly due to its advantages in talent base, but it ranks last in terms of patents, industrial scale, advanced products.

Focusing on the practical problems of China's IC industry innovation chain, it is necessary to further increase innovation investment and innovation chain coordination to inject internal momentum into industrial development. Enhancing global competitiveness with industrial chain innovation and overall breakthroughs is essential. and stimulate industry by deepening development and strengthening independent innovation. It is very important to deep Reform and Opening and strengthen independent innovation for stimulating the global ecological vitality of IC industrial. It is of great significance to enhance the coordinated development capability of the IC industry through scientific layout for industry, regional and product. Finally, it is necessary to grasp the development opportunities of the digital revolution and the industrial revolution in order to achieve a leading edge in the IC industry in the digital economy era.

**Key Words:** innovation chain; IC industry; evolution; competition

**JEL Classification:** O3, O5, L6

**DOI:** 10.19616/j.cnki.bmj.2022.09.001

(责任编辑:刘建丽)