

# 未来芯片技术发展态势分析\*

王立娜\*\*<sup>1</sup> 唐川<sup>1,2</sup> 徐婧<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院成都文献情报中心, 成都 610041;

2. 中国科学院大学经济与管理学院图书情报与档案管理系, 北京 100049)

**摘要:** 半导体集成电路是现代信息产业的基石,但主导其发展的摩尔定律正遭遇物理学和经济学双重限制,致使传统的硅基电子技术临近发展极限,亟需采用新型芯片技术推动未来信息产业持续蓬勃发展。各国政企积极布局一系列未来芯片技术,抢占国际半导体技术战略制高点。本文梳理了一批主要未来芯片技术,剖析了这些芯片技术的当前发展现状、所处的成熟度阶段和市场应用前景。最后,对我国未来芯片技术的发展提出了建议,以期为我国相关研究工作提供参考。具体建议包括制定未来芯片技术发展规划,打破国外垄断格局;梯次推进未来芯片技术发展,平衡新技术发展面临的机遇与风险;重点推动存内计算技术研发和商业化,缓解我国芯片技术卡脖子问题。

**关键词:** 未来芯片技术;发展态势;市场前景

**DOI:**10.16507/j.issn.1006-6055.2020.02.005

## Analysis on the Development Trends of Future Chip\*

WANG Lina\*\*<sup>1</sup> TANG Chuan<sup>1,2</sup> XU Jing<sup>1,2</sup>

(1. Center for Strategic Study on New Generation Information Technology, Chengdu Library and Information Center, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Department of Library, Information and Archives Management, School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** IC chips are the cornerstone of the modern electronics industry. The impending end of Moore's Law has pushed silicon-based electronics to its performance limits. Thus, it is urgent to use the new chip to develop the IT industry in the future. At present, governments and enterprises all over the world have invested a series of future chip technologies to occupy the commanding height in the international semiconductor industry. This paper reviews a number of future chip technologies. The current development status, maturity stage and market application of these technologies are also analyzed. Finally, the corresponding suggestions for China's development of chips are discussed, in order to provide reference for the related research. Specific proposals include the formulation of future chip development plans to break the foreign monopoly pattern, the gradual promotion of future chip technology development to balance the opportunities and risks, the focus on promoting the development and commercialization of in-memory computing to ease the chip bottleneck problem.

**Keywords:** Future Chip; Development Trend; Market Prospect

信息化、数字化、网络化、智能化是引领当前科技、产业乃至社会变革的时代大潮,半导体产业是顺应这一时代潮流的根基性、战略性和先导性产业,是衡量一个国家科技发展水平乃至综合国

\* 中国科学院青年创新促进会(2019175),四川省软科学研究计划(2018ZR0078),成都市科技项目(2017-RK00-00275-ZF),中国科学院文献情报能力建设专项(Y9290001)

\*\* E-mail:wangln@clas.ac.cn; Tel:028-85235075

力的重要指标。从1985年的日美《广场协议》到中兴事件、华为实体名单,再到日本将韩国移出贸易优惠“白名单”,半导体一直是大国之间贸易战、科技战和经济战的主战场,芯片技术则是各方激烈争夺的战场制高点。当前,主导芯片产业发展的摩尔定律正遭遇物理学和经济学双重极限,一批未来芯片技术被寄予厚望,各国政企纷纷布局,有望给多年来固化的国际半导体竞争格局带来变数。在此背景下,本文对全球未来芯片技术发展态势进行了剖析和讨论,并对我国未来芯片发展提出了建议。

## 1 未来芯片技术发展现状

目前,原子尺度硅材料的基本物理限制使得由摩尔定律驱动的硅技术演进路径似乎正快速接近终点<sup>[1]</sup>。随着摩尔定律走向终结,人工智能、物联网、超级计算及其相关应用却提出了更高的性能要求,半导体产业步入亟需转变突破发展的关键点,芯片架构、材料、集成、工艺和安全方面的创新研究成为新的突破方向。

### 1.1 新型晶体管技术

#### 1.1.1 新架构晶体管技术

鳍式场效应晶体管(Fin Field-Effect Transistor, FinFET)是当前主流半导体制造工艺采用的晶体管架构,成功地推动了从22纳米到7纳米等数代半导体工艺的发展<sup>[2,3]</sup>,并将拓展到5纳米和4纳米工艺节点<sup>[4-6]</sup>。全环栅晶体管(Gate-All-Around Field-Effect Transistors, GAAFET)是一种继续延续现有半导体技术路线寿命的较主流技术,可进一步增强栅极控制能力,克服当前技术的物理缩放比例和性能限制。从3纳米开始,韩国三星电子将放弃FinFET架构转向GAAFET架构,计划在2020年底进行3纳米GAAFET产品风

险试生产<sup>[7]</sup>,2021年底进行批量生产。3纳米以下晶体管潜在技术包括互补场效应晶体管(Complementary Field-Effect Transistors, CFET)、垂直纳米线晶体管、负电容场效应晶体管(Negative Capacitance Field-Effect Transistors, NC-FET)、隧穿场效应晶体管(Tunnel Field-Effect Transistor, TFET)等<sup>[8,9]</sup>。

#### 1.1.2 新材料晶体管技术

研究硅基材料的替代材料,开发新型电子器件是解决当前芯片发展瓶颈的另一种解决方法。当前,替代性半导体材料主要包括第三代半导体材料、碳基纳米材料、二维半导体材料等。

第三代半导体材料包括碳化硅、氮化镓、氧化锌、金刚石、氮化铝、氧化镓等为代表的宽禁带半导体材料<sup>[10]</sup>,可实现高压、高温、高频、高抗辐射能力,被业内誉为固态光源、电力电子、微波射频器件的“核芯”及光电子和微电子产业的“新发动机”<sup>[11]</sup>。目前,碳化硅晶体管和氮化镓晶体管的研发相对较为成熟,推动着5G通信技术、新能源汽车、光电器件等市场快速增长,其他第三代半导体材料尚属于初级研究阶段。德国英飞凌公司已开发出系列碳化硅金属-氧化物半导体场效应晶体管和分立器件。美国Cree公司于2019年宣布投资10亿美元打造碳化硅超级制造工厂,将碳化硅晶圆制造能力提高30倍,以满足2024年的预期市场增长<sup>[12]</sup>。宜普电源转换公司早在2009年就推出第一款商用增强型氮化镓晶体管,目前面向无线电源传送、全自动汽车、高速移动通信、低成本卫星、医疗护理等应用提供100多种氮化镓产品<sup>[13]</sup>。日本AGC公司已联合Novel Crystal Technology公司开发氧化镓晶片<sup>[14]</sup>。

石墨烯和碳纳米管是有望取代硅延续摩尔定律的碳基纳米材料。石墨烯具有非常优异的电

学、力学、光学和热学等特性,可通过微纳加工工艺实现各种类型和功能的器件,现已开发出基于石墨烯的晶体管、二极管、存储器、集成电路、电池、超级电容器、热电器件、太阳能电池、光电探测器、传感器等电子和光电子器件<sup>[15]</sup>。中国科学院金属研究所于2019年10月制备出“硅-石墨烯-锗晶体管”,大幅缩短延迟时间,并将截止频率由兆赫兹提升至吉赫兹。近年来,基于碳纳米管的碳基电子学研究也取得了飞速发展,并逐渐从基础研究转向实际应用<sup>[16]</sup>。美国麻省理工学院于2019年开发出迄今为止用碳纳米管制造的最大计算机芯片,一颗由1.4万余个碳纳米管晶体管(Carbon Nanotube Field-Effect Transistors, CNFET)组成的16位微处理器,证明可以完全由CNFET打造超越硅的微处理器。

高质量的二维材料是潜在的下一代替代材料,但距离传统半导体产业至少还有十年的时间<sup>[17]</sup>。除石墨烯外,较有希望的二维材料包括二硒化钨和二硫化钼等过渡金属二卤化物,但仍处于初级研究阶段<sup>[18]</sup>。

## 1.2 新型存储器芯片技术

当前,静态存储器(Static Random-Access Memory, SRAM)、动态存储器(Dynamic Random-Access Memory, DRAM)、闪存等主流存储器面临着难以逾越的固有技术局限和工艺挑战。以相变存储器(Phase-Change Memory, PCM或PCRAM)、磁性存储器(Magnetoresistive Random Access Memory, MRAM)、阻性存储器(Resistive Random Access Memory, ReRAM)、铁电存储器(Ferroelectric Random Access Memory, FRAM)、碳纳米管存储器(Nanotube Random Access Memory, NRAM)为代表的新型存储器能够带来独特的性能优势,但均采用新材料制造且工艺严苛,大规模量产仍需

一定的时间。其中,PCM、MRAM、ReRAM是普遍认为最有前途的新型非易失性存储器<sup>[19]</sup>。PCM具有成本低和3D可伸缩性等特性,有望取代部分基于DRAM的高端固态硬盘;MRAM具有读写速度快、功耗低、成本低等特性,正在成为物联网设备存储器的领先候选者;ReRAM具有读写速度快和功耗低等显著的性能优势,有望带来高密度和低成本存储应用<sup>[20]</sup>。据美国数据存储分析公司Coughlin Associates报告显示,MRAM和自旋转移矩磁性存储器(Spin-Torque Transfer Magnetoresistive Random Access Memory, STT-MRAM)将在几年内取代或非门闪存;ReRAM是闪存的潜在替代品,但至少仍需十年时间才能完全实现<sup>[21]</sup>。

## 1.3 新架构芯片技术

### 1.3.1 存内计算芯片

存内计算是由一系列迅速融合的软件技术和硬件架构进步实现的,突破了传统存储与计算分离架构对运算能力的限制,在性能、可扩展性和分析复杂性方面有了显著的改进,主要用于数据密集型计算的处理<sup>[22]</sup>。人工智能和新型存储器是推动存内计算发展的主要需求,因此预计存内计算芯片将出现两种形态,一种为带有计算功能的存储器模块,另一种为基于存内计算的人工智能加速芯片<sup>[23]</sup>。美国密歇根大学开发了全球首个基于忆阻器阵列的存算一体通用人工智能芯片,可快速、低能耗地执行多种人工智能算法<sup>[24]</sup>。合肥恒烁半导体科技公司与中国科大团队合作研发的我国首款超低功耗存算一体人工智能芯片系统演示顺利完成,具有边缘计算和推理能力<sup>[25]</sup>。

### 1.3.2 深度神经网络专用芯片

深度神经网络是识别和归类声音、图像、文本等数据的统计模型,目前大多数神经网络的训练和推理任务由图形处理器(Graphics Processing U-

nit, GPU)完成。在加速神经网络运算时,深度神经网络专用芯片具有比中央处理器(Central Processing Unit, CPU)和GPU更高的性能和更低的功耗。谷歌大规模部署了基于深度神经网络的张量处理器(Tensor Processing Unit, TPU)芯片<sup>[26]</sup>,英特尔、亚马逊、华为、阿里等巨头也分别研制了自己的神经网络芯片,寒武纪、Graphcore等新创公司开发的深度神经网络专用芯片受到了欢迎。

### 1.3.3 神经形态芯片

神经形态计算是一种通过构建类似动物大脑结构的计算架构以实现能够模拟神经生物过程的智能系统的新型计算模式,它能极大提升计算系统的感知与自主学习能力,可以应对当前十分严峻的能耗问题,并有望颠覆现有的数字技术。尽管美国与欧盟等国家对神经形态计算都投入了大量研发资源,麻省理工学院、普渡大学、斯坦福、IBM、惠普等大学和公司开展了众多探索性研究工作,但神经形态芯片仍处于非常早期的原型阶段。英特尔推出一款名为“Pohoiki Beach”的新型神经形态芯片,内含800万神经元,速度比现有的CPU快近千倍,效率高近万倍,而耗电量仅为百分之一,所用架构为进一步扩展神经元数量奠定了基础<sup>[27]</sup>。清华大学开发出全球首款异构融合类脑计算芯片——“天机芯”,由多个高度可重构的功能性核组成,可同时支持机器学习算法和类脑计算算法,已成功在无人驾驶自行车上进行了实验<sup>[28]</sup>。

### 1.3.4 量子计算芯片

作为一种借助量子力学理论改进的计算模型,量子计算可超越经典计算机实现指数级的计算速度。近20多年来,量子计算取得了诸多突破性进展,但量子计算系统仍须在规模化、噪声、互联方面获取重大突破才能提供商业价值。量子计

算芯片已获得了大量资金的支持,诸多大学和企业实验室都在开展研究。半导体量子芯片完全基于传统半导体工艺,更容易达到要求的量子比特数目,只要科学家能在实验室里实现样品芯片,其大规模工业生产理论上讲就不存在问题,这是它大大超越其它量子计算方案的优势所在。Intel公司在量子计算机研制方面就选择了硅量子点技术,于2018年研制出首台采用传统计算机硅芯片制造技术的量子计算机。澳大利亚新南威尔士大学开发出了全球首款3D原子级硅量子芯片架构,朝着大规模量子计算机迈出了重要一步<sup>[29]</sup>。目前,中国本源量子公司已与中国科学技术大学合作研发出第一代半导体二比特量子芯片“玄微”。

### 1.3.5 光电集成芯片

光电集成芯片是指利用光子与微电子技术将光子元件和电子元件集成在一起的集成电路,具有高传输带宽、快传输处理速度、高集成度和低成本等优点<sup>[30]</sup>。在美国、欧盟、英国、日本等国家/地区一系列战略布局的推动下,光电集成芯片取得了一定的重要研究进展,但此芯片技术研究仍处于起步阶段<sup>[31]</sup>。荷兰研究人员开发出快速且高能效光子存储器,有望彻底变革未来光子集成电路的数据存储过程<sup>[32]</sup>。日本电信电话公司在处理器中引入光网络技术,开发出集成纳米光子学技术的芯片,实现了超小型光电变换元件<sup>[33]</sup>。

此外,随着Intel芯片、ARM芯片和AMD芯片安全漏洞的持续暴露,芯片设计漏洞检测成为未来芯片技术发展的重点考虑因素之一。2019年,美国斯坦福大学开发出两种人工智能算法,能够更快地检测芯片前端和后端设计漏洞,缩减芯片验证周期<sup>[34]</sup>;密歇根大学研究人员设计出一种新的处理器架构,所开发的“MORPHEUS”芯片可

每秒 20 次加密和随机重编关键数据比特,远快于人类黑客和电子黑客技术的反应速度,进而主动抵御未来威胁<sup>[35]</sup>。

## 2 未来芯片技术成熟度

美国高德纳咨询(Gartner)公司提出的技术成熟度曲线(The Hype Cycle)是对各种新技术的一般发展模式的图形描述<sup>[36]</sup>,是一种评估技术当前发展现状和未来潜力的工具。横轴表示一项技术从原型概念到成熟随时间发展依次经历的五个阶段,依次为萌芽期、过热期、幻想破灭期、复苏期和成熟期;纵轴表示大众对技术未来市场价值的期望值,距主流应用所需时间表示技术的未来发展速度。

本文基于 Gartner 公司的技术成熟度曲线工

具包<sup>[37]</sup>,遴选出潜在 17 项未来芯片技术,剖析了未来芯片技术的成熟度,如图 1 所示(需要说明的是,Gartner 技术成熟度曲线工具包不含石墨烯芯片、碳纳米管芯片、量子计算芯片技术,故本文采用范围更广泛的量子计算、石墨烯、碳纳米管技术来反映这三大未来芯片技术的成熟度)。

正处于萌芽期的技术包括氧化镓晶体管、神经形态硬件、下一代晶体管(如纳米线场效应晶体管、碳纳米管晶体管、2D 单分子膜晶体管等),业界对这三大技术的期望值越来越高,但用户的需求和产品并不成熟,这些技术至少还需要 5 年或 10 年以上才有望带来主流应用。

大量未来芯片技术正处于过热期,包括阻性存储器、深度神经网络专用芯片、量子计算、硅基氮化镓晶体管、石墨烯、碳纳米管、碳化硅晶体

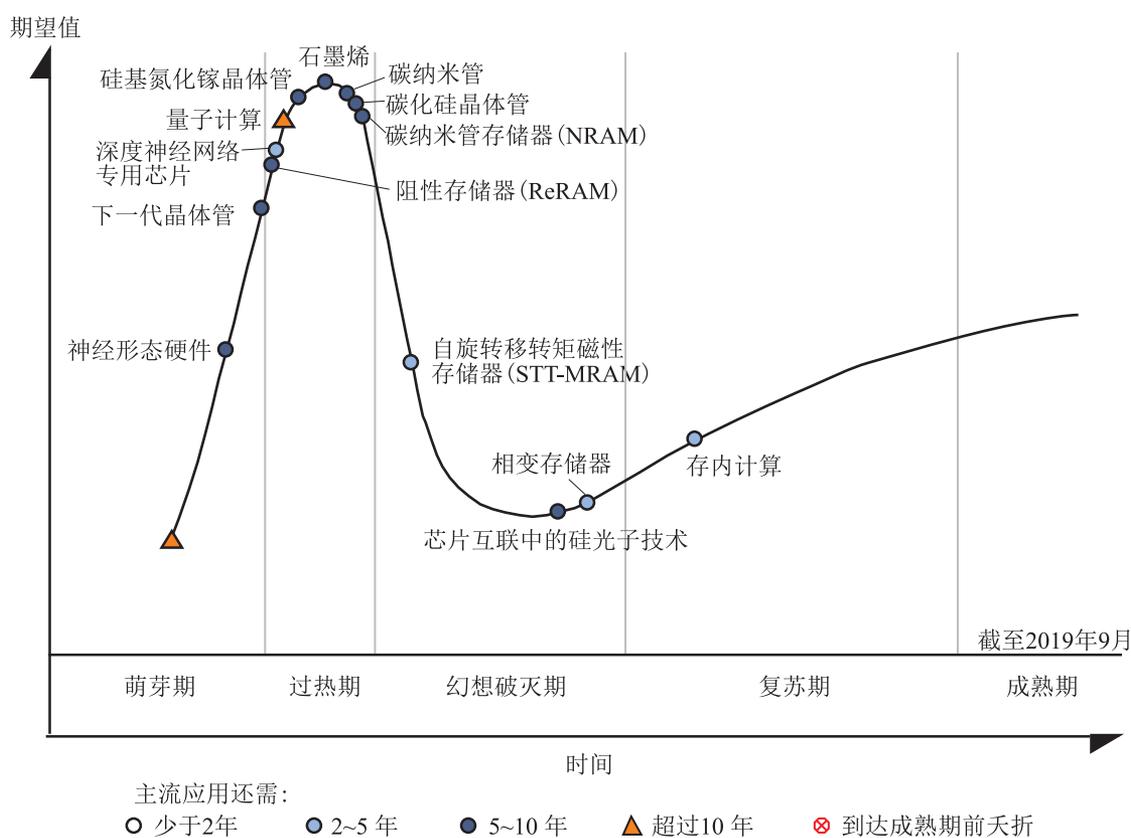


图 1 未来芯片技术成熟度曲线

Fig. 1 The Hype Cycle for Future Chip

管、碳纳米管存储器,这些技术获得了媒体和风险投资的广泛关注,并在少量关键用户中投入初期应用。除量子计算需要10年以上才能成为主流应用外,处于过热期的其他未来芯片技术普遍有望在5~10年带来主流应用,深度神经网络专用芯片只需要2~5年。

由于当前产品的成熟度难以满足过高的期望,自旋转移转矩磁性存储器、芯片互联中的硅光子技术、相变存储器正处于幻想破灭期,人们对这些技术的关注度正快速降低,同时出现大量负面评价。技术供应商正在改进相关产品,推动这些技术和产品达到市场预期。自旋转移转矩磁性存储器和相变存储器有望在2~5年内成为主流应用,芯片互联中的硅光子技术则需要5~10年。

存内计算正处于复苏期,相关产品愈发成熟,有望在2~5年内成为主流应用。

### 3 未来芯片技术的市场前景

为剖析未来芯片技术的市场应用前景,本文基于Gartner技术成熟度曲线工具包<sup>[37]</sup>从市场渗透率和潜在效益等级角度对这些技术进行了归类,如表1所示。未来芯片技术的潜在效益包括“变革性”“高”“中”三个等级,市场渗透率以当

前技术市场占预期目标市场的百分数表示。其中,“变革性”表示所属技术将开创新的业务方式,导致行业发生重大转变;“高”表示所属技术将推动现有行业横向和纵向拓展,大幅提升企业收益或节约成本;“中”表示所属技术将逐步改进现有行业,帮助企业提升收益或节约成本<sup>[36]</sup>。

可见,碳纳米管和神经形态硬件是潜在市场效益最高、市场渗透率却最低的未来芯片技术,技术研发和产业化风险最高,适合以科研机构为主开展尝试性前沿探索研究;相变存储器和自旋转移转矩磁性存储器是当前市场渗透率处于中等级别的未来芯片技术,技术研发和产业化风险相对较低,未来可依潜在市场效益级别确定研发布局力度;存内计算是潜在市场效益和市场渗透率均最高的未来芯片技术,目前处于早期主流应用阶段,技术研发和产业化风险最低,值得大力布局技术和产业化研究。

### 4 启示与建议

芯片是数字经济的重要根基,半导体芯片技术的竞争不仅仅是科技或产业的竞争,还直接影响着各国在政治、经济、国家安全等领域的话语权。基于未来芯片技术发展态势的分析,本文为我国在相关领域的工作提出以下建议。

表1 未来芯片技术的市场渗透率与效益等级情况

Tab. 1 The Market Penetration and Benefit Rating for Future Chip

潜在效益等级	市场渗透率			
	<1%	1%~5%	5%~20%	20%~50%
变革性	碳纳米管	石墨烯	相变存储器	存内计算
	神经形态硬件	下一代晶体管		
高	氧化镓晶体管	深度神经网络专用芯片		
	碳纳米管存储器	硅基氮化镓晶体管		
	量子计算	碳化硅晶体管		
中		片上互联中的硅光子技术		
	阻性存储器	自旋转移转矩磁性存储器		

### 1) 制定未来芯片技术发展规划,打破国外垄断格局

当前,美国、日本、韩国、欧洲等国家和地区基本上垄断了芯片产业链的高价值环节,建立了较难逾越的技术生态体系和知识产权壁垒。我国难以在短时间内实现传统高端通用芯片的国产化替代,仍需长期的技术攻关和高昂的研发投入。在未来芯片的赛道上一些国家已提前部署,但还没有国家真正建立领先优势,我国应在“十四五”时期积极制定未来芯片技术发展规划,全面加强核心技术攻关,加速推动即将步入成熟期技术的商业化,力争在未来芯片技术自主可控方面实现历史性突破。

### 2) 梯次推进未来芯片技术发展,平衡机遇与风险

当今世界正经历百年未有之大变局,新一轮科技革命和产业革命加速演进,准确认识并驾驭不确定性是一项孕育着巨大机遇的严峻挑战。我国应综合评估未来芯片技术的当前成熟度阶段、未来发展趋势、市场效益潜质、国际竞争格局和我国研究基础,把握未来芯片市场航向,通过设立重大专项、开展重点前沿研究和尝试性前沿探索、成立产学研联盟、鼓励/扶持初创企业等发展策略,分层推进各项未来芯片技术梯次发展,指导相关技术研发资金投入、研究力量构建、商业化运作中的资本运营等行动,加快构建未来芯片技术梯次发展格局。

### 3) 重点推动存内计算技术研发和商业化,缓解卡脖子

随着摩尔定律日趋终结,处理器和存储器分离带来的数据传输延迟和损耗成为限制芯片性能的主要瓶颈,存内计算技术是进一步大幅提升芯片性能并降低功耗的解决方案。当前,存内计算技术即将进入成熟期,市场渗透率高达 20% ~ 50%,未来潜在市场效益级别最高,属于高回报低风险的未来芯片技术。我国相关企业与研究机构应充分把握

此机遇,全面谋划存内计算技术研发和商业化发展,联合开发存内计算所需软硬件技术,力争取得一批关键核心技术突破,掌握一批自主知识产权,力争未来产业主导权。

### 参考文献

- [1] BADAROGLU M, WILSON L S, MARINELLA M, et al. IEEE International Roadmap for Devices and Systems [M]. New York: IEEE, 2017.
- [2] VELJKO V. Evolution of FinFETs from 22nm to 7nm [D]. Institut für Festkörperelektronik TU Wien, 2019.
- [3] RADAMSON H H, HE X, ZHANG Q, et al. Miniaturization of CMOS [J]. Micromachines (Basel), 2019, 10(5): 293.
- [4] Solid State Technology. FinFET evolution for the 7nm and 5nm CMOS technology nodes [EB/OL]. (2014-01-23). <https://sst.semiconductor-digest.com/2014/01/finfet-evolution-for-the-7nm-and-5nm-cmos-technology-nodes/>.
- [5] Samsung. Samsung Successfully Completes 5nm EUV Development to Allow Greater Area Scaling and Ultra-low Power Benefits [EB/OL]. (2019-04-16). <https://news.samsung.com/global/samsung-successfully-completes-5nm-euv-development-to-allow-greater-area-scaling-and-ultra-low-power-benefits>.
- [6] ANANDTECH. Samsung's Aggressive EUV Plans: 6nm Production in H2, 5nm & 4nm On Track [EB/OL]. (2019-07-31). <https://www.anandtech.com/show/14695/samsungs-aggressive-euv-plans-6nm-production-in-h2-5nm-4nm-on-track>.
- [7] EXTREMETECH. Samsung Unveils 3nm Gate-All-Around Design Tools [EB/OL]. (2019-05-16). <https://www.extremetech.com/computing/29150>

- 7-samsung-unveils-3nm-gate-all-around-design-tools.
- [8] SEMICONDUCTOR ENGINEERING. Transistor Options Beyond 3nm [EB/OL]. (2018-02-15). <https://semiengineering.com/transistor-options-beyond-3nm/>.
- [9] ZHANG L N, CHAN M S. Tunneling Field Effect Transistor Technology [M]. Switzerland: Springer, 2016.
- [10] 贺春禄. 王占国: 发展中国第三代半导体材料机遇大于挑战 [J]. 高科技与产业化, 2019 (05): 12-15.
- HE Chunlu. WANG Zhanguo. Developing the 3rd-Generation-Semiconductor Materials in China Embraces More Opportunities than Challenges [J]. High-Technology & Commercialization, 2019 (05): 12-15.
- [11] 林佳, 黄浩生. 第三代半导体带来的机遇与挑战 [J]. 集成电路应用, 2017, 34(12): 83-86.
- LIN Jia, HUANG Haosheng. Opportunities and Challenges by the Third Generation Semiconductor [J]. Application of IC, 2017, 34(12): 83-86.
- [12] CREE. Cree to Invest \$1 Billion to Expand Silicon Carbide Capacity [EB/OL]. (2019-05-07). <https://www.cree.com/news-events/news/article/cree-to-invest-1-billion-to-expand-silicon-carbide-capacity>.
- [13] EPC. About Efficient Power Conversion Corporation (EPC) [EB/OL]. (2020-03-11). <https://epc-co.com/epc/AboutEPC.aspx>.
- [14] AGC. AGC Invests in Next-generation Power Semiconductor Material Developer Novel Crystal Technology [EB/OL]. (2018-03-22). [https://www.agc.com/en/news/detail/1196856\\_2814.html](https://www.agc.com/en/news/detail/1196856_2814.html).
- [15] RATNIKOV P V, SILIN A P. Two-dimensional Graphene Electronics: Current Status and Prospects [J]. Physics-Uspekhi, 2018, 61 (12): 1139-1174.
- [16] 梁世博, 张志勇, 彭练矛. 碳基集成电路的研发优势与发展现状 [J]. 新材料产业, 2015 (08): 30-34.
- LIANG Shibo, ZHANG Zhiyong, Peng Lianmao. Advantages and Development of Carbon-based Integrated Circuits [J]. Advanced Materials Industry, 2015 (08): 30-34.
- [17] BRIGGS N, SUBRAMANIAN S, LIN Z, et al. A Roadmap for Electronic Grade 2-dimensional Materials [J]. 2D Materials, 2019, 6(2): 022001. 1-23.
- [18] LI M Y, SU S K, WONG H-S P. et al. How 2D Semiconductors Could Extend Moore's Law [J]. Nature, 2019, 567: 169-170.
- [19] 陈怡然, 赵巍胜, 孙振宇, et al. 新型非易失性存储器 [J]. 现代物理知识, 2015, 27(01): 41-46.
- CHEN Yiran, ZHAO Weisheng, SUN Zhenyu, et al. New Non-volatile Memory [J]. Modern Physics, 2015, 27(01): 41-46.
- [20] Coughlin Associates. Emerging Memories Ramp Up Report (2019) [EB/OL]. (2019-06). <https://tomcoughlin.com/product/emerging-memory-report/>.
- [21] SEMICONDUCTOR ENGINEERING. Comparing New Memory Types [EB/OL]. (2019-04-18). <https://semiengineering.com/comparing-new-memory-types/>.
- [22] 罗乐, 刘轶, 钱德沛. 内存计算技术研究综述 [J]. 软件学报, 2016, 27(8): 2147-2167.
- LUO Le, LIU Yi, QIAN Depei. Survey on In-Memory Computing Technology [J]. Journal of Software, 2016, 27(8): 2147-2167.

- [23] 李飞. 内存内计算,下一代计算的新范式? [EB/OL]. (2018-12-03). <https://mp.weixin.qq.com/s/6j6aPz-c0W3VITsZ2zAorA>.  
LI Fei. In-memory Computing, A New Paradigm for Next-generation Computing? [EB/OL]. (2018-12-03). <https://mp.weixin.qq.com/s/6j6aPz-c0W3VITsZ2zAorA>.
- [24] CAI F, CORRELL J M, LEE S H, et al. A Fully Integrated Reprogrammable Memristor-CMOS System for Efficient Multiply-accumulate Operations. *Nature Electronics* 2019, 2, 290-299( ).
- [25] 合肥日报. 我国首款超低功耗存算一体 AI 芯片在合肥问世 [EB/OL]. (2019-07-24). <https://www.dramx.com/News/Memory/20190724-17177.html>.  
Hefei Daily. China's First Ultra-low-power Storage and Computing AI Chip Launched in Hefei [EB/OL]. (2019-07-24). <https://www.dramx.com/News/Memory/20190724-17177.html>.
- [26] Extremetech. Google Announces 8x Faster TPU 3.0 For AI, Machine Learning [EB/OL]. (2018-05-09). <https://www.extremetech.com/extreme/269008-google-announces-8x-faster-tpu-3-0-for-ai-machine-learning>.
- [27] Intel. Intel's Pohoiki Beach, a 64-Chip Neuromorphic System, Delivers Breakthrough Results in Research Tests [EB/OL]. (2019-07-15). <https://newsroom.intel.com/news/intels-pohoiki-beach-64-chip-neuromorphic-system-delivers-breakthrough-results-research-tests/#gs.z6u5za>.
- [28] 清华大学. 清华大学通用人工智能芯片“天机芯”登上《自然》封面——以“类脑”觅“天机” [EB/OL]. (2019-08-12). [http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9650/2019/20190812150554209694454/20190812150554209694454\\_.html](http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9650/2019/20190812150554209694454/20190812150554209694454_.html).  
Tsinghua University. Tsinghua University's General-purpose Artificial Intelligence Chip "Heavenly Movement" Featured on the Cover of Nature [EB/OL]. (2019-08-12). [http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9650/2019/20190812150554209694454/20190812150554209694454\\_.html](http://news.tsinghua.edu.cn/publish/thunews/9650/2019/20190812150554209694454/20190812150554209694454_.html).
- [29] MATTHIAS K, JORIS G K, P P, et al. Spin Readout in Atomic Qubits in an All-epitaxial Three-dimensional Transistor [J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14:137-140.
- [30] 王绛梅, 徐鹏霄, 王东辰. 光电集成技术研究综述 [J]. *光电子技术*, 2017, 37(03):200-206.  
WANG Jiangmei, XU Pengxiao, WANG Dongchen. Review of Photoelectric Integration Technology [J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(03):200-206.
- [31] 谭旻, 明达, 汪志城. 从光子集成迈向光电融合集成回路:以微环波长锁定为例 [J]. *微纳电子与智能制造*, 2019, 1(03):32-47.  
TAN Min, MING Da, WANG Zhicheng. From Photonic Integration to Electronic-photonic Heterogeneously-converging Integrated Circuits: A Case Study of Wavelength Locking of Microrings [J]. *Micro/nano Electronics and Intelligent Manufacturing*, 2019, 1(03):32-47.
- [32] 远望智库. 新一代光子存储器:快速且高效! [EB/OL]. (2019-01-19). [https://mp.weixin.qq.com/s/mT6GaoHCiB\\_J4OA7cUY8iw](https://mp.weixin.qq.com/s/mT6GaoHCiB_J4OA7cUY8iw).  
Yuanwang Think Tank. New Generation Photonic Memory: Fast and Energy Efficient! [EB/OL]. (2019-01-19). [https://mp.weixin.qq.com/s/mT6GaoHCiB\\_J4OA7cUY8iw](https://mp.weixin.qq.com/s/mT6GaoHCiB_J4OA7cUY8iw).
- [33] 科技日报. 日本 NTT 开发纳米光子学芯片

- [EB/OL]. (2019-11-14). <http://japan.people.com.cn/n1/2019/1114/c35421-31454485.html>.  
Science and Technology Daily. NTT Japan Develops Nanophotonics Chips [EB/OL]. (2019-11-14). <http://japan.people.com.cn/n1/2019/1114/c35421-31454485.html>.
- [34] 黄珊. 与黑客赛跑, 斯坦福团队新方法可加速给芯片“排雷” [EB/OL]. (2019-12-22). [https://mp.weixin.qq.com/s/\\_—0AcnAENoIZRnk-HUneg](https://mp.weixin.qq.com/s/_—0AcnAENoIZRnk-HUneg).  
HUANG Shan. In race against Hackers, Stanford Team's New Approach Could Speed up Chip Demining [EB/OL]. (2019-12-22). [https://mp.weixin.qq.com/s/\\_—0AcnAENoIZRnk-HUneg](https://mp.weixin.qq.com/s/_—0AcnAENoIZRnk-HUneg).
- [35] MARTIN G. To Foil Hackers, this Chip Can Change its Code in the Blink of an Eye [EB/OL]. (2019-07-17). <https://www.technologyreview.com/2019/07/17/102869/a-new-microchip-aims-to-stump-hackers-with-a-constantly-moving-target/>.
- [36] Gartner. Understanding Gartner's Hype Cycles [EB/OL]. (2019-09-23). <https://www.gartner.com/document/3969607?ref=solrAll&refval=243576652>.
- [37] Gartner. Toolkit: Create Your Own Hype Cycle with Gartner's Innovation Database [EB/OL]. (2019-10-24). <https://www.gartner.com/document/code/451068?ref=dochist>.

#### 作者贡献说明

王立娜:设计文章框架,梳理资料,撰写稿件;

唐川:资料整理与分析,修改稿件;

徐婧:收集、整理资料,修改稿件。

## 创新市场发展趋势分析

2020年2月19日,科睿唯安发布《德温特2020年度全球百强创新机构》报告,首度将分析范围扩大到全球百强创新机构之外,揭示了创新市场的三大趋势:

全球排名前1000的机构在创新市场上的份额呈现缩水态势:六年前,德温特世界专利索引中逾四分之一(27%)的发明源自排名前1000的机构。今天,这一比例已经下降到18%。全球专利市场正呈现碎片化趋势,越来越多的专利是由小企业,甚至是个体企业家和发明家孵化而来。大型企业必须学会更好地协作并探索非传统的合作伙伴关系,否则存在落伍的风险。

协作的重要性:创新正日益成为一项知识密集型的活动,并且随着技术的融合,基础科学和工程类学科更频繁地相互结合,因此需要涉及多领域的专业知识。德温特世界专利索引中每项专利记录的发明机构平均数量由2014年的2.84家上升到2019年的2.99家,凸显了这一趋势。

强者恒强:入选“德温特全球百强创新机构”的分数门槛在过去六年间上浮了逾五分之一(22%)。今年新上榜的六家机构分别是藤仓(Fujikura)、宏达电(HTC)、Immersion、微芯科技(Microchip)、施耐德电气(Schneider Electric)和腾讯,它们在当下竞争激烈的创新环境中游刃有余,自2015年以来平均排名跃升了250位。

朱月仙(中国科学院成都文献情报中心)摘编自  
<https://clarivate.com/derwent/top100innovators/>