

集成电路前沿技术趋势研判及对北京的启示

朱 晶^{1,2}

(1.北京国际工程咨询有限公司,北京 100055;2.北京半导体行业协会,北京 100191)

摘 要: 集成电路是关系国民经济和社会发展的基础性、先导性和战略性产业。当前正值集成电路全面进入后摩尔时代,前沿技术领域创新活跃,是产业革命和技术革命历史性交汇的关键时期,以前沿技术突破式创新的全新路径有望给予我国通过“换道超车”走向世界集成电路创新强国的重大机遇。通过梳理国际知名研发和市场机构发布的前沿技术路线,以及全球先进国家及地区在集成电路前沿技术上战略布局和重大科研计划,对后摩尔时代集成电路技术发展趋势进行研判。并结合目前北京集成电路科研资源和创新引领优势,提出相关启示和建议。

关键词: 集成电路;创新;前沿技术;颠覆性技术;启示

中图分类号: F062.9;F49

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.211777

中文引用格式: 朱晶. 集成电路前沿技术趋势研判及对北京的启示[J]. 电子技术应用, 2021, 47(12): 51-56, 63.

英文引用格式: Zhu Jing. Development trend of integrated circuit cutting-edge technology and its enlightenment to Beijing[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(12): 51-56, 63.

Development trend of integrated circuit cutting-edge technology and its enlightenment to Beijing

Zhu Jing^{1,2}

(1.Beijing International Engineering Consulting Company, Beijing 100055, China;

2.Beijing Semiconductor Industry Association, Beijing 100191, China)

Abstract: Integrated circuit is a basic, leading and strategic industry related to national economic and social development. At present, integrated circuits are fully entering the post-Moore era, and innovations in cutting-edge technology are active. It is a critical period for the historical intersection of industrial revolution and technological revolution. The new path of breakthrough innovation with cutting-edge technology is expected to give China to the world through "changing lanes and overtaking" a major opportunity for an integrated circuit innovation power. This article combs through the cutting-edge technology routes released by internationally renowned R&D and market institutions, as well as the strategic layout and major scientific research plans of advanced countries and regions in integrated circuit technology, to study and judge the development trend of integrated circuit cutting-edge technology in the post-Moore era. Combined with the current Beijing integrated circuit research resources and innovation leading advantages, relevant suggestions are put forward.

Key words: integrated circuit; innovation; cutting-edge technology; disruptive technology; enlightenment

0 引言

当前集成电路作为关系国民经济和社会发展的基础性、先导性和战略性产业,已经成为先进国家对我国全方位“战略打击”一张重要的“牌”,因此无论是国家安全、全球竞争还是社会发展,都迫切需要集成电路领域的重大突破来提供强大支撑。而集成电路新一轮科技革新正进入关键时期,以前沿技术、颠覆性技术为核心的布局有可能对集成电路产业具有另辟蹊径的变革性意义,日益受到社会各届和国家的高度关注。北京作为国内集成电路科研创新资源最为集中的创新策源地,应该在产业前沿和颠覆性创新上下足功夫,着眼长远超前部署集成电路国际前沿技术,为解决事关长远发展的问

题提供战略性技术储备,推动北京在助力我国加快实现科技自立自强上发挥引领作用。

1 对集成电路前沿技术发展趋势的研判

当前,摩尔定律虽仍在延续,但晶体管微小型化的平面布局逼近物理与工艺极限,技术升级明显放缓,以硅为主体的经典晶体管难以维持集成电路产业的可持续发展。而基于新材料和工艺、三维异构集成、开源新架构等多个领域前沿技术创新成为突破方向,将持续推动集成电路产业的变革。

1.1 从各国发布的集成电路领域重大科研计划看技术发展趋势

当前集成电路已经成为各国竞相角逐和储备的战

略物资,为抢占经济、军事、安全、科研等领域的全方位优势,各国纷纷采取一系列重大战略规划和政策措施全力抢占集成电路前沿核心技术领域的战略制高点和关键技术控制权。

1.1.1 美国重点布局基础架构、材料和异构集成领域

美国 2017 年启动由国防高级研究计划局(DARPA)牵头实施的电子复兴计划(ERI)^[1-3],第一阶段重点面向集成电路下一代逻辑和存储器件所需的候选材料和集成、架构、设计三个研发攻关方向部署。2020 年 DARPA 对 ERI 计划进行了更新,提出了四个关键的发展领域:三维异构集成、新材料和器件(面向集成电路下一代逻辑和存储器件所需的候选材料)、专用功能(例如根据软件需求进行调整的可重构物理架构、加速器组合架构等)、设计和安全。更新后的 ERI 计划在以前的三大方向基础上进一步突出了前沿新技术领域的重要性。例如 ERI 第二阶段部署的首个项目“面向极端可扩展性的封装光子(PIPES)”探索把光子学带入芯片的技术。此外,下一代

氮化镓晶体管、超导电路设计工具、生物基半导体等技术也是美国政府关注的重点。表 1 所示为美国 ERI 计划部分内容。

1.1.2 欧洲积极布局工业半导体和先进工艺

欧洲正逐渐加大对半导体和集成电路开发的投资力度,2018 年欧盟委员通过了法、德、意、英四国共同提出的“微电子联合研究创新项目”,用于研发与工业场景联系紧密的芯片、集成电路、传感器等创新性技术与元器件。重点研发高效芯片、功率半导体、智能传感器、先进的光学设备、替代硅的复合材料五大技术领域。2019 年,欧洲国家电子元件和系统领导地位联合执行体(ECSEL JU)多年度战略计划(2020)中明确了四个重点研究方向:第一,开发先进的逻辑和存储技术,以实现纳米级集成和应用驱动性能,扩展传统 ICT 环境和更具挑战性的条件(如低温);第二,开发异构片上系统(SoC)集成技术;第三,通过组合封装中的异构构建块,开发先进封装和智能封装系统(SiP)技术;第四,在半导体设备、材

表 1 美国 ERI 计划部分内容

阶段	具体方向	主要项目	总经费和研究时间	参与机构
基础阶段	8 个 DARPA 早期已部署的基础性研究项目	探索微电子领域的创新性方法,8~12 年的探索性研究,鼓励大学、工业界和国防应用交叉共享、联合研究。 (1)通用异构集成和知识产权重用战略项目(CHIPS) (2)分层识别验证利用项目(HIVE) (3)实现更快速的集成电路项目(CRAFT) (4)毫米波数字阵列项目(MIDAS) (5)终身学习机器项目(L2M) (6)近零功耗射频和传感器工作项目(N-ZERO) (7)通过硬件和固件进行系统安全集成项目(SSITH) (8)联合大学微电子学项目(JUMP)	2017 年启动,1.5 亿美元/5 年,预期的商业和国防利益将在 2025~2030 年实现	主要来自美国 30 多所高校的研发资源为主,全球半导体工业界和美国国防配合
I 阶段	6 个 I 阶段项目 (“Page3” ¹⁾)	着力支持系统架构、电子设计、材料和集成这 3 个领域的研究和开发,确保美国在半导体芯片领域的竞争优势。 (1)软件定义硬件项目(SDH) (2)特定域片上系统项目(DSSoC) (3)电子设备智能设计(IDEA) (4)一流的开源硬件(POSH) (5)三维单片系统芯片(3DSoC) (6)新型计算基础研究(FRANC)	2018 年启动,每个项目投资总金额为 2 500 万美元~5 000 万美元	主要由全球半导体工业界主导,高校配合,开放全球资源合作
II 阶段	10 个 II 阶段项目	强调电子安全和隐私、差异化的国内供应能力以及新颖的国防应用。 (1)数字射频战场空间仿真器(DRBE) (2)实时机器学习(RTML) (3)混合超大规模集成电路技术(T-MUSIC) (4)并行汇编的高性能自动化(PAPPA) (5)针对硬件隐藏效应和异常木马的防御措施(SHEATHE) (6)安全硅的自动实践(AISS) (7)物理安全保障架构(GAPS) (8)通用微光学系统激光器(LUMOS) (9)极端可扩展性光子学封装(PIPES) (10)国防应用(DA)	2018~2019 年启动,总预算金额超过 3 亿美元,每个项目投资总金额为 4 000 万美元~7 000 万美元	主要由美国半导体工业界主导,高校配合,以维护美国本土供应链安全为主

1)“Page 3”的命名是为向摩尔定律的提出者戈登·摩尔致敬而定的。摩尔在 1965 年 4 月发表提出摩尔定律的论文第 3 页针对将来尺寸缩放的条件不再具备时,提出了一些技术探索方向。正是受此启发,DARPA 提出“Page 3”计划,着力支持系统架构、电子设计、材料和集成这 3 个领域的研究和开发。

料和制造解决方案方面扩大世界领先地位,包括先进或新型半导体积木、符合摩尔定律的先进逻辑和存储器技术以及异构集成技术。2020年欧盟17个国家共同签署了《欧洲处理器和半导体科技计划联合声明》,要在接下来的2~3年时间内投入1450亿欧元(折合约11579亿元人民币)的资金,用于研究2nm先进工艺制造、先进处理器等半导体技术,建立起欧洲独有的先进的芯片设计以及产能。

1.1.3 日韩主要面向人工智能与半导体融合领域进行投资布局

日本出于对国际研发投资的危机感,2019年初启动了旨在支持颠覆性创新、复兴科技创新立国的新项目——“登月型”研发项目。从解决未来日本国内外社会可能出现的问题角度,提出了面向2050年的研发目标。主要与半导体相关的包括通用人工智能、容错型通用量子计算机等支持方向。韩国近年来在集成电路和半导体领域连续出台了多项重大科技计划和一批具体科技政策,包括《研发投资系统创新方案》、《以人工智能强国为目标的人工智能半导体产业发展战略》,以及为应对日本零部件出口限制的《材料、零部件、装备2.0战略》等,将在未来10年投资1.5万亿韩元,以支持人工智能芯片合并存储器和运算功能的存算内一体芯片研发。

1.1.4 中国台湾重点发展光子集成电路、人工智能芯片和先进工艺

中国台湾在2018年启动了四年40亿新台币的半导体“射月计划”,主要面向人工智能场景所需的“前瞻感测元件、电路与系统”、“下一代存储器设计”、“感知运算与人工智能芯片”、“物联网系统与安全”、“无人机与AR/VR应用元件、电路与系统”、“新兴半导体制程、材料与元件技术(3nm及以下)”六大前沿领域。此外中国台湾还在光子集成电路领域出台了“硅光子与集成电路”专案研究计划,积极整合台湾在集成电路先进工艺及封测、光电产业上的优势资源,研发硅光子主被动元器件、硅光集成电路与系统、工艺与封测量测等核心技术,建立硅光生态链及IP布局。2020年中国台湾发布埃米(<1nm)世代半导体发展计划(Å世代半导体—先端技术与产业链自主发展计划),计划在2021–2025年间,投入近43.72亿元新台币来探寻1nm以下产业方向,包括设备、仪器、材料与制程技术等瓶颈。

1.1.5 中国大陆加强后摩尔时代基础技术研究的投入

我国在2019年–2021年连续三年发布“后摩尔时代新器件基础研究”重大研究计划,主要面向芯片自主发展的国家重大战略需求,以芯片的基础问题为核心,旨在针对后摩尔时代芯片技术的算力瓶颈,围绕三个核心科学问题展开研究。一是研究CMOS器件能耗边界及突破机理;二是突破硅基速度极限的器件机制;三是研究超越经典冯·诺依曼架构能效的机制。

1.2 从 Gartner 发布的技术成熟度曲线看技术发展趋势

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^[4],是评估技术当前发展现状和未来潜力的工具。

依据 Gartner 在 2020 年发布的新兴半导体领域的技术成熟度曲线^[5](如图1所示),正处于萌芽期的技术包括氧化镓晶体管、三进制逻辑系统、芯片级硅光互联、神经形态/类脑器件、太赫兹通信等,业界对这些技术的期望值逐步攀升,但这些技术离主流应用尚远,至少还需要5年或10年以上才能看到真正的市场需求和成熟的产品。

处于炒作过热期的技术包括新型晶体管(例如环绕栅极晶体管GAA或者负电容晶体管等)、无线电能收集、毫米波、ReRAM忆阻器以及深度学习专用集成电路、嵌入式AI芯片、边缘计算AI芯片、eFPGA、RISC-V开源架构芯片等智能计算类芯片,硅基氮化镓和SiC等化合物半导体也处于炒作期。这些技术距离主流应用普遍在2~5年间,只有硅基氮化镓和ReRAM忆阻器需要5~10年,而量子计算芯片尽管距离主流应用还有10年以上,也依然被过热炒作。

由于当前产品的成熟度难以满足过高的期望,一部分技术正处于幻想破灭期,人们对这些技术的关注度正快速降低,例如碳基的晶体管和碳基存储器(NRAM)等。而可重构计算和软件定义无线电、STT-MRAM、相变存储器、传感器融合正在远离炒作而更快地进行技术改进以达到真正的市场需求,这些技术有望在2~5年内成为主流应用。而碳基技术还需要再等5~10年。

1.3 对集成电路前沿技术发展趋势的研判

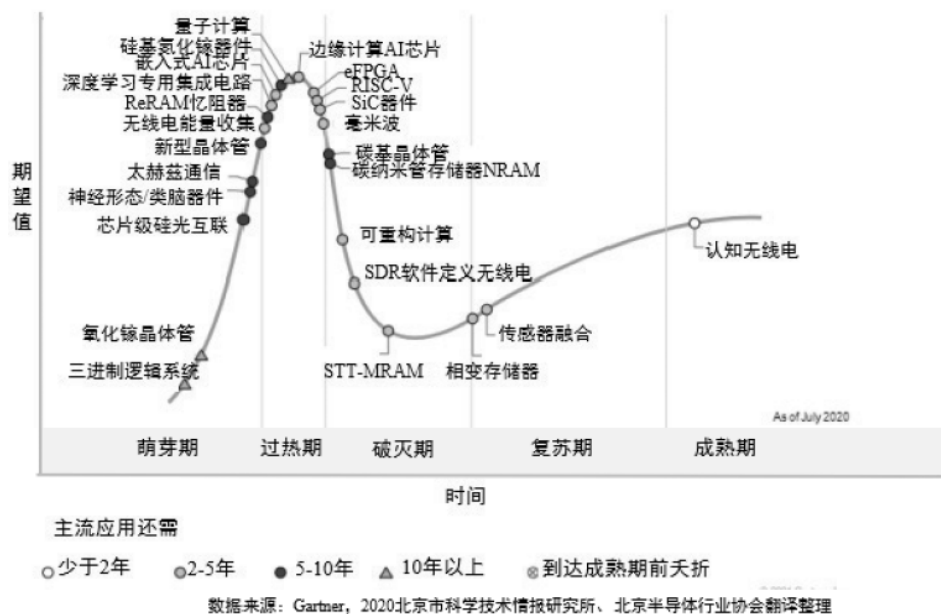
综合各个集成电路先进国家及地区发布的集成电路领域重大科研计划,以及美国高德纳咨询(Gartner)公司提出的新兴领域集成电路相关技术成熟度曲线中重点关注的内容,可以总结出如下集成电路前沿技术发展趋势。

1.3.1 磁性、碳基和二维材料等新材料创新备受关注

新材料将通过全新物理机制实现全新的逻辑、存储及互联概念和器件,推动半导体产业的革新。拓扑绝缘体、二维超导材料等能够实现无损耗的电子和自旋输运,可成为全新的高性能逻辑和互联器件的基础;新型磁性材料和新型阻变材料能够带来高性能磁性存储器如MRAM和阻变存储器。碳纳米管、石墨烯等碳基材料的技术突破已可满足大规模集成电路的制备要求,为柔性电子提供了更好的材料选择。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。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^[6]。

1.3.2 异质集成开拓摩尔时代新路径

作为超越摩尔定律发展的重要途径之一,异质集成

图 1 新兴领域集成电路相关技术成熟度曲线^[5]

技术已从多种不同材质芯片的二维三维封装发展到在同一衬底上外延集成具有多种材料和结构的器件^[7-10]。例如硅光异质集成,通过电子电路和光子电路的集成形成混合光电框架进行硬件革新,利用光的优异特性,如低延迟、低损耗、超宽频带、多维复用、波动特性等,与微电子技术结合,在硅衬底上巧妙构造软硬件深度融合的光电计算体系,解决传统微电子处理器在高速计算应用上的算力、能耗和输入输出瓶颈问题,将在通信、数据中心操作和云计算等领域具有重要的应用^[11]。

1.3.3 计算架构呈现开源、异构化发展

以 CPU 为中心的传统架构已经难以满足当代海量数据处理的要求,面向人工智能、大数据时代的先进计算模式围绕多核并行、异构并行、边缘计算等体系架构创新而多路径演进。计算存储一体化在硬件架构方面的革新,存内计算架构将数据存储单元和计算单元融合为一体,能显著减少数据搬运,极大地提高计算并行度和能效,将突破人工智能算力瓶颈。软硬系统垂直整合成为当下主流厂商布局焦点,通过软件硬件的协同,提升系统应用性能^[7,10]。以 RISC-V 为代表的开放指令集架构创新及其相应的开源 SoC 芯片设计成为新风口,高级抽象硬件描述语言和基于 IP 的模板化芯片设计方法将取代传统芯片设计模式,更高效应对快速迭代、定制化与碎片化的芯片需求。

1.3.4 集成电路与多学科融合将拓展技术应用空间

集成电路作为信息应用实现的硬件载体,正不断通过与生命、数理、材料、工程等多学科的交叉融合,拓展各类新兴应用空间。以脑机接口为代表的神经技术的突破使得脑科学与集成电路之间的结合越来越紧密,脑机接口芯片对神经工程的发展起到了重要支撑与推动作用

用,帮助人类从更高维度空间进一步解析人类大脑的工作原理。脑机融合及其一体化已成为未来神经形态计算技术发展的一个重要趋势。量子计算的工程化尚处于初始发展阶段,其核心的量子芯片已崭露头角,超导、量子点(电子自旋)、微纳光子系统、离子阱、金刚石 5 种技术路线发展各具特色,总体向固态化、长相干时间和多量子比特方向发展,其中超导量子芯片和离子阱量子比特芯片更接近工程化^[12]。

2 北京集成电路前沿领域主要研究进展和布局方向

北京市的科研创新资源聚集,拥有多所示范性微电子学院,高校、科研院所集成电路科研智力资源储备雄厚,集聚了一批战略性科技创新领军人才及其高水平创新团队,在集成电路前沿技术领域具备先导研发优势。

2.1 北京集成电路领域主要科研团队和成果

2.1.1 碳基材料与新型磁存储领域全球领先

北京在碳基集成电路和新型磁存储领域具备跻身国际领跑行列的优势。北京大学彭练矛院士团队全球首创高密度高纯半导体碳纳米管阵列薄膜晶圆制备技术,首次突破了超大规模碳管集成电路发展的材料瓶颈。基于该材料,首次展示了性能超过相同尺寸的硅基 CMOS 电路的碳纳米管集成电路,在国际上保持至少两年的技术领先优势^[13]。北京航空航天大学赵巍胜团队发明的自旋协同矩效应可实现高速读写非易失自旋存储器件^[14],是当前磁性存储器(MRAM)领域的领先候选技术,已被列入格罗方德的 MRAM 发展路线图,IMEC 及英特尔等机构及企业也都基于该效应研制其新一代自旋存储器。该团队还成功制备出国内首个 80 nm 自旋转移矩-磁随机存储器器件(STT-MRAM),相关关键参数达到国际领先,受到学术界与产业界的高度关注。

2.1.2 智能计算群体式跃升条件已初步具备

北京在先进智能计算芯片领域的基础理论、关键技术方面、计算系统、企业布局方面已积累了一定量级的底层储备,并且几乎在专用深度学习处理器、存算一体芯片、可重构人工智能芯片、开源 RISC-V 架构芯片等所有智能计算芯片的技术路线上都有布局,群体式跃升条件初步形成。清华大学魏少军、尹首一团队,是创新芯片架构技术——可重构计算的提出者和引领者,推出了面向深度学习应用的完全中国自主知识产权的可重构计算芯片——“Thinker”,被《MIT Technology Review》评价为中国的顶级成就^[15]。清华大学钱鹤、吴华强研究团队在国际上首次实现了基于多个忆阻器阵列的存算一体系统,大幅提升了计算设备的算力,证明了存算一体技术在人工智能等领域应用的可行性及广阔前景。在开源 RISC-V 架构方面,北京拥有较为完整的 RISC-V 产业生态基础。由北京新型研发机构微芯边缘计算研究院主要发起的中关村科学城开源芯片源码创新中心设立在北京,聚焦 RISC-V 全球标准创建、RISC-V 开源平台和社区建设以及 RISC-V 架构的处理器内核、配套基础软件和芯片的研发创新。

2.1.3 硅光和光子集成电路极具研发资源优势

北京在光电子领域汇聚全国顶尖的科技资源^[16],已积累了深厚的技术储备。近五年来,北京在光电子领域获国家奖共计 15 项,占全国(40 项)总数的将近 40%。在光通信、光传感材料与器件研发方面处于国内领先甚至国际领先的地位。北京聚集了涉及光电子材料生长、光电子器件制备、平台工艺等领域的 30 多个优势团队,涌现出北京大学周治平团队、清华大学黄翊东团队、中科院半导体所刘峰奇团队、中科院物理所张建军团队、中科院微电子所王文武团队等具有国际影响力的优秀团队。面向超大容量光互连需求,北京大学彭超副教授团队从拓扑视角出发实现了不依靠反射镜的光定向辐射技术,显著降低片上光端口的插损,为高密度光子集成及光子芯片开拓新方向。此外北京中科院微电子所还率

先搭建了硅基光电子工艺平台,是我国首个具有完整硅光子工艺流片能力的平台,使北京具备了实现全链条创新的硬件基础条件。

2.1.4 类脑研究、脑机接口等领域研究活跃

北京在脑科学领域从基础研究到创新应用,均处于国内领先地位,尤其是在脑认知及类脑研究、脑机接口等领域拥有全国最完整的学科布局。北京大学黄如院士团队研发出高精度模拟生物突触多种短时程、长时程可塑性的突触晶体管,除具有丰富的类生物突触可塑性之外,该器件的单次突触事件能耗达到与生物突触相当的水平,对低功耗类脑计算电路和系统的实现具有重要意义。清华大学微纳电子系的钱鹤、吴华强教授团队利用忆阻器的仿生与存算一体特性,合作提出了基于忆阻器阵列的新型脑机接口,构建了高效智能的脑电神经信号处理系统,实现 93.46% 准确率的大脑癫痫状态识别,并将系统功耗降低 400 多倍。清华大学施路平团队研发出世界首款异构融合类脑芯片,也是世界上第一个既可支持脉冲神经网络又可支持人工神经网络的人工智能芯片,在类脑芯片领域获得了全球同行的认可。

2.2 北京集成电路领域前沿技术未来布局方向的思考

结合上述北京目前具有技术引领优势的领域情况,综合考虑各技术领域发展的趋势和阶段,可以得到北京应该重点布局的优先级矩阵,如表 2 所示。从优先级矩阵可以看出,北京应优先发展 STT-MRAM、RISC-V 开源架构、边缘计算 AI 芯片、可重构计算、碳化硅器件、深度学习专用集成电路等在 2 年内或者 2~5 年内会有明显产业化进展的技术,由于这些技术研发和产业化风险相对较低,适合以企业为主体进行产业化布局。北京还应该利用在集成电路科研智力资源的领先优势,加大力度支持 ReRAM 阻变存储器、芯片级硅光互联、碳基晶体管、碳纳米管存储器(NRAM)、硅基氮化镓器件、非冯架构类脑器件等在 5~10 年会成为主流应用的相关技术,这些技术还处在相对早期的阶段,适合以高校及科研单位为主体开展尝试性前沿探索研究。

表 2 北京集成电路前沿技术应该重点布局的优先级矩阵

北京优势	技术成熟度周期			
	小于 2 年	2~5 年	5~10 年	10 年以上
优势明显	RISC-V 开源架构 STT-MRAM 边缘计算 AI 芯片 深度学习专用集成电路	SOT-MRAM 可重构计算 碳化硅器件 光子集成电路	ReRAM 阻变存储器 芯片级硅光互联 碳基晶体管 碳纳米管存储器(NRAM) 硅基氮化镓器件 非冯架构的类脑器件	量子计算 氧化镓晶体管(GaO, 第四代化合物半导体)
优势较大		传感器融合 毫米波	新型晶体管(环绕栅极晶体管 GAA 或者负电容晶体管)	
具备基础	认知无线电	相变存储器(PCM) 软件定义无线电(SDR) 嵌入式 FPGA(eFPGA) 无线电能量收集		

3 结论

先进国家在集成电路前沿领域的积极布局 and 大力扶持启示我们,北京应该去充分思考在新一轮科技革命和产业变革的重大机遇前,如何找准北京的着力点和突破点,前瞻布局下一代可能改变“竞争赛道”和“游戏规则”的前沿领域,去抢抓技术变革的制高点和下一代技术引领的话语权,突破更多国家重大技术短板,为保障产业链供应链安全稳定提供有力支撑,在国家应对全球性挑战中贡献更多“北京智慧”。

一是充分认识集成电路基础研究投入的战略意义,对前沿性、颠覆性技术创新加强识别评估和全过程培育。

集成电路基础研究不仅对解决“卡脖子”技术至关重要,也是集成电路前沿创新领域不可忽视的重要因素。从国际先进国家对集成电路前沿领域的科研计划和重大规划布局来看,任何前沿性、颠覆性的技术创新都离不开基础理论和实验研究作为支撑,特别是在集成电路产业技术变革和创新踊跃的时代,重视前沿性、颠覆性技术,更要重视背后的基础内涵和原始创新。北京要充分利用科研资源密集的优势,向集成电路领域各类创新载体和新型研发机构征集、推荐和挖掘潜在的前沿及颠覆性技术^[17],并通过对前沿和颠覆性技术的预测、识别、评估分析,尤其是对目前北京已经具备领先优势并且具备一定技术成熟度的领域,如 MRAM 磁性存储器、基于 RISC-V 新架构的智能计算、硅基氮化镓和 SiC 等化合物半导体等,应依托专业集成电路技术服务机构跟进这些前沿技术创新从研发、创新培育到产业化的全过程,评估不同类型不同成熟度的技术预期的转化时间,以及所需要的创新资源和产业化配套政策等,完善培育前沿及颠覆性集成电路技术的相关机制。

二是探索与产业需求和实际应用相结合的支持方式和组织模式。

集成电路领域前沿技术不确定性强,单纯从形成科研成果的角度去支持培育,很难真正产生对产业具有重大影响的关键技术。因此需要参考借鉴美国 ERI 计划、中国台湾半导体“射月计划”等国家和地区对集成电路前沿技术的支持方式和组织模式,引导重点科研计划与产业需求和实际应用相结合。建议北京市可以依托众多高校及科研院所、央企国企等创新资源,建立产业目标导向的前沿技术库,支持领军企业积极申报参与这些尚处在科研阶段的前沿项目,引导大型骨干企业加强与前沿科学对接,以协同合作、众包众筹等方式,精准破解产业发展的重大基础性、战略性问题。支持在重点行业的央企、市属国企、领军民营企业与国家、省、市自然科学基金建立联合基金,推进大中小企业、国有和民营企业的融通创新,探索以后补助方式支持企业投入基础研究的新机制,同时加大对依托领军企业组建的国家重点实验室的支持力度^[18]。

三是对不同阶段的集成电路前沿技术领域分类建立长效稳定的支持机制。

由于集成电路前沿及颠覆性技术具备一定的前瞻性,往往领先于现有市场,大部分都存在现有市场需求不足的情况,因此对于目前北京具备领先优势和发展基础的领域,可以分阶段分类建立长效稳定的支持机制,形成有重点、有梯度、有层次的前沿技术布局,帮助这些技术跨越创新的“死亡之谷”(科技成果无法有效地商品化、产业化,导致科技成果与产业化发展之间出现断层,被称为科技成果转化的“死亡之谷”现象。这种现象普遍存在于各国创新活动中,我国尤其明显。数据显示,我国科技成果转化率仅为 10% 左右,远低于发达国家 40% 的水平)。对于离主流应用阶段尚远,还处于技术萌芽期的领域,例如碳基集成电路、量子计算芯片等,可以稳定支持与竞争相结合,以政府主导的重大科研计划进行稳定支持为主,但需大幅提高重大科研计划对这类前沿技术研发项目的支持周期和支持力度。对于技术成熟度较高,成果转化风险较低的领域,可以加大企业的投入和引入社会资本,推动这些前沿技术尽快与现有市场需求对接,促进新技术和新生态的培育壮大。

四是营造对前沿创新更加包容的环境,培育集聚一流的多元化、国际化集成电路战略性科学家。

集成电路是高度依赖人才创新的产业,美国等集成电路先进国家和地区的重大科研计划和战略规划得以实施,主要源于全球各地的高层次、多学科专业人才的支撑。而前沿及颠覆性技术往往是过于超前、另辟蹊径、对已有主流技术路径形成颠覆性替代的技术,很难得到业界或者传统思维的“共识”,因此必须通过营造鼓励创新、宽容失败的社会氛围,建设有利于颠覆性技术成果孵化的环境,才能稳固和吸引全球最顶尖的创新型人才形成集聚。建议北京提供具有国际竞争力和吸引力的政策和环境条件,针对全球集成电路及相关学科领域具有顶尖科研创新能力的战略性科学家进行重点引进和培养,充分发挥其对前沿技术创新规划和决策引领能力,加大对非共识、变革性技术领域的支持力度^[19]。加强知识产权保护,形成公平竞争的市场秩序,打造法制化的创新环境,为前沿技术萌芽提供生长的土壤。提高北京集成电路产业科研人才、专业技术人才和管理人才的薪酬福利及社会保障水平,调动创新人才的积极性,形成有利于前沿技术转移转化的政策支持和资本保障。

参考文献

- [1] 王龙奇,彭玉婷,焦丛.美国“电子复兴”计划为后摩尔时代电子工业发展奠定基础[J].红外,2019,40(4):25-28.
- [2] 李铁成,李茜楠.从美国“电子复兴计划”新阶段部署看我国电子业创新技术转移[J].中国集成电路,2019,28(6):22-32.
- [3] 韩芳.美国 DARPA 电子复兴计划的解读及启示[J].中国

(下转第 63 页)

- Proceedings of 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics; Human Language Technologies. Minneapolis, MN: ACL, 2019: 4171-4186.
- [4] SENNRICH R, HADDOW B, BIRCH A. Neural machine translation of rare words with subwordunits[C]//Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. Berlin: ACL, 2016.
- [5] KIM Y. Convolutional neural networks for sentence classification[C]//Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. New York: ACA, 2014: 1746-1751.
- [6] SHI X J, CHEN Z R, WANG H, et al. Convolutional LSTM network: a machine learning approach for precipitation now-casting[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Cambridge, MA: MIT Press, 2015: 802-810.
- [7] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, et al. Attention is all you need[C]//Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems. Red Hook, NY: Curran Associates Inc., 2017: 6000-6010.
- [8] PETERS M E, NEUMANN M, IYYER M, et al. Deep contextualized word representations[C]//Proceedings of the 2018 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics; Human Language Technologies. New Orleans, LA: ACL, 2018: 2227-2237.
- [9] PLATT J C. Sequential minimal optimization: a fast algorithm for training support vector machines[C]//Advances in Kernel Methods Support Vector Learning. Cambridge, MA: MIT Press, 1998.
- [10] BAHDANAU D, CHO K, BENGIO Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate[C]//Proceedings of the International Conference on Learning Representations. Banff: IEEE, 2014.
- (收稿日期: 2021-10-12)
- 作者简介:**
- 孙璐(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 大数据等软件产业政策、数据治理、隐私计算等。
- 薛强(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 工业互联网。
- 刘巍(1981-), 通信作者, 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 大数据及软件产业, E-mail: liuweic@eics-cert.org.cn.



扫码下载电子文档

(上接第 56 页)

- 集成电路, 2019, 28(1): 19-27.
- [4] Gartner. Understanding Gartner's hype cycles[EB/OL]. (2018-08-20)[2021-05-21]. <https://www.gartner.com/document/3887767>.
- [5] Gartner. Hype Cycle for Semiconductors and electronics technologies, 2020[EB/OL]. (2020-07-06)[2021-05-21]. <https://www.gartner.com/document/3987181?ref=solrResearch&refval=277731557&toggle=0>.
- [6] 王立娜, 唐川, 徐婧. 未来芯片技术发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(1): 47-56.
- [7] 朱进宇, 闫峥, 苑乔, 等. 集成电路技术领域最新进展及新技术展望[J]. 微电子学, 2020(2): 219-226.
- [8] 中国信息与电子工程科技发展战略研究中心. 中国电子信息工程科技发展研究-信息光电子专题[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [9] 中国信息与电子工程科技发展战略研究中心. 中国电子信息工程科技发展研究-集成电路产业专题[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [10] 武俊齐, 赖凡. 硅基异质集成技术发展趋势与进展[J]. 微电子学, 2020, 50(2): 214-218.
- [11] 周治平, 徐鹏飞, 董晓文. 硅基光电计算[J]. 中国激光, 2020, 47(6): 1-15.
- [12] 赵正平. FinFET 纳电子学与量子芯片的新进展(续)[J]. 微纳电子技术, 2020, 57(2): 85-94, 118.
- [13] Zhao Chenyi, Zhong Donglai, Liu Lijun, et al. Strengthened complementary metal-oxide-semiconductor logic for small-band-gap semiconductor-based high-performance and low-power application[J]. ACS Nano, 2020, 14(11): 15267-15275.
- [14] Wang Mengxing, Cai Wenlong, Zhu Daoqian, et al. Field-free switching of a perpendicular magnetic tunnel junction through the interplay of spin-orbit and spin-transfer torques[J]. Nature Electronics, 2018, 1. 10.1038/s41928-018-0160-7.
- [15] 尹首一, 郭珩, 魏少军. 人工智能芯片发展的现状及趋势[J]. 科技导报, 2018, 36(17): 45-51.
- [16] 杨晓丽, 夏瑾, 张欢, 等. 深度剖析光电子技术和产业现状[EB/OL]. [2019-05-27]. <http://www.elecfans.com/d/942690.html>.
- [17] 黄水芳, 张光宇. 新型研发机构培育颠覆性技术的机制研究[J]. 广东工业大学学报, 2020, 37(2): 22-29.
- [18] 邓衢文, 刘敏, 黄敏聪, 等. 我国及世界科技强国的基础研究经费投入特点与启示[J]. 世界科技研究与发展, 2019, 41(2): 37-147.
- [19] 罗晖. 非对称超越: 实现科技领跑的战略突破口[J]. 人民论坛·学术前沿, 2016(21): 64-70.
- (收稿日期: 2021-05-21)
- 作者简介:**
- 朱晶(1984-), 女, 硕士, 高级经济师, 主要研究方向: 集成电路、新一代信息技术、技术经济学。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所