

全球碳基电子技术发展态势分析*

王立娜^{*,1} 唐川^{1,2} 徐婧¹

(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:当前, 摩尔定律正遭遇技术与成本两方面的发展瓶颈, 传统的硅基电子技术临近发展极限。凭借尺寸小、速度快、功耗低、工艺简单等优势, 碳基电子成为极具发展潜力的替代性半导体技术之一, 获得了众多国家政府机构和大型公司的积极关注与研发布局。本文回顾了近年来美国、欧盟、英国、日本等主要国家和地区在碳基电子技术方面的战略规划和项目部署, 分析了石墨烯电子技术、碳纳米管电子技术、碳化硅电子技术三大碳基电子技术的发展现状与趋势。最后, 对我国碳基电子技术的发展提出了建议, 具体包括: 应制定国家碳基电子技术发展战略, 完善顶层布局; 进一步整合优势资源, 建立产学研联合攻关网络, 突破关键碳基电子技术产业化瓶颈, 在全球电子信息技术产业中获取更多的话语权。

关键词:半导体; 摩尔定律; 碳基电子技术; 战略规划; 发展态势

DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2021.04.002

Analysis on the Development Strategies and Trends of Carbon-based Electronics*

WANG Lina^{*,1} TANG Chuan^{1,2} XU Jing¹

(1. 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: At present, the development of Moore's Law is encountering both technical and cost bottlenecks. The traditional silicon-based electronics technology is approaching the development limit. With the advantages of small size, fast speed, low power consumption, carbon-based electronics has become one of the alternative semiconductor technologies with great development potential. Many national government agencies and large companies have funded carbon-based electronics. This paper reviews the strategic planning and project deployment of carbon-based electronics in major countries and regions such as United States, European Union, United Kingdom, and Japan in recent years, analyzes the development status and trends of the three major carbon-based electronics technologies: graphene electronics, carbon nanotube electronics and silicon carbide electronics. Finally, suggestions are proposed for the development of China's carbon-based electronics, specifically including that China should formulate a development strategy for carbon-based electronics, improve the top-level layout; further integrate advantageous resources, establish a joint research network among industry, academia and research institutes, and

* 中国科学院青年创新促进会“信息科技领域国际发展态势研究”(2019175), 中国科学院文献情报能力建设专项“科技领域战略情报研究咨询体系建设”(E0290001)

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

make break-throughs in the industrialization of key carbon-based electronics technologies.
Keywords: Semiconductor; Moore's Law; Carbon-based Electronics; Strategy; Development Trend

半导体集成电路是现代信息产业的基石。但是,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^[1]。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^[2]。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一种重要解决方法。凭借尺寸小、速度快、功耗低、工艺简单等优势,碳基电子技术成为硅基电子技术的重要补充者之一。在工艺技术高度成熟前,碳基芯片可以作为硅基芯片的补充,增强硅基芯片的性能,应用于一些特殊场景^[3]。例如,碳基芯片可以柔性、透明等新形态呈现,在显示、医疗和健康监控、抗辐射等特殊环境以及近红外成像等领域具有广阔的应用前景。

1 国内外碳基电子技术战略部署格局

1.1 美国:多角度布局碳基电子技术

美国非常重视碳基电子技术的研究工作,国家科学基金会(National Science Foundation, NSF)、国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)和陆军研究办公室、能源部(Department of Energy, DOE)等国家项目资助机构均大力支持碳基电子技术的发展。美国较早开始探索石墨烯电子技术,2008 年 DARPA 就资助 2200 万美元探索碳电子射频技术研究,开发超高速和超低功耗的石墨烯基射频电路。NSF 设立了众多碳基电子基础研究项目,涵盖了碳基电子研究和应用的各个领域。美国在全球石墨烯产业综合实力排名中居领先地位,所取

得的诸多基础性研究成果被广泛引用。
NSF 开展了多项有关石墨烯、碳纳米管、碳化硅的碳基电子技术研发项目,大多数资助额度介于 10 ~ 50 万美元之间,主要涵盖石墨烯电子器件、石墨烯电路、石墨烯传感器、石墨烯在量子开关等量子技术中的应用、碳纳米管太阳能电池、碳纳米管光电子器件、碳纳米管射频电子器件、碳纳米管传感器、碳纳米管电路、碳纳米管的量子纳米光子学、碳化硅高温集成电路、碳化硅晶体管等光电子器件、碳化硅在量子技术中的应用等研究主题,如表 1 所示。

为解决摩尔定律延续面临的挑战,DARPA 重金打造了一项具有国家战略意义的计划,2017 年 6 月宣布旨在开启下一次电子革命的“电子复兴计划”^[2],计划五年内投入 15 亿美元,围绕新材料、新体系结构、软硬件设计三大重点研究领域开展技术攻关。例如,麻省理工学院研究人员获资 6100 万美元开展“三维单芯片系统”研究,旨在利用石墨烯制作碳纳米晶体管,研制出 3D 芯片^[4]。

此外,DARPA 还资助开发射频与毫米波晶体管和石墨烯红外探测器等碳基电子技术研究工作,陆军研究实验室积极探索高功率碳化硅功率半导体封装技术和超高压碳化硅电力电子芯片。美国能源部先进能源研究计划署宣布投资 3000 万美元开展“利用独创的拓扑结构和半导体材料制造创新可靠电路”项目研究^[5],利用碳化硅氮化镓宽禁带半导体材料开发新型高效、轻量化、可靠的电力电子变换器,结合全新的电路拓扑结构、数字化控制技术、热管理、半导体封装技术提高各类半导体电子器件的性能,降低能耗,为交通、信息、电力等行业带来变革性影响。

表 1 NSF 资助的主要碳基电子技术项目列表

Tab.1 Carbon-based Electronics Projects Funded by NSF

类别	项目名称	起止年份	承担机构
石墨烯	用于高级数字电子器件的结构化外延石墨烯和半导体石墨烯	2015—2019	Georgia Tech Research 公司
	面向下一代纳米电子器件的二维材料的热传输——从基础到器件	2015—2020	伊利诺伊大学芝加哥分校
	具有可调电子特性的窄石墨烯纳米带	2015—2020	内布拉斯加大学林肯分校
	通过功能化、折叠和自组装制作独立的三维石墨烯纳米结构	2015—2020	明尼苏达大学
	二维石墨烯光电学中的多体超快光物质相互作用	2016—2020	加州大学洛杉矶分校
	太赫兹碳纳米结构量子电子学:粒子数反转、增益和相干带隙工程	2016—2020	爱荷华州立大学
	使用二维材料和铁电金属氧化物变革电子器件	2017—2022	伊利诺伊大学厄巴纳香槟分校
	基于石墨烯的实时传感器的定制喷墨印刷	2017—2021	威斯康星大学密尔沃基分校
	基于拓扑石墨烯纳米带的量子系统	2018—2021	加州大学伯克利分校
碳纳米管	基于事件计算的动态石墨烯突触神经形态启发神经网络	2019—2022	匹兹堡大学
	透明和弹性有机发光二极管显示器	2015—2016	NEOVEL Technologies 公司
	碳纳米管中腔增强激子发射	2015—2018	史蒂文斯理工学院
	制造半导体碳纳米管整齐排列阵列,实现更快、更节能的下一代电子产品	2015—2019	威斯康星大学麦迪逊分校
	单个碳纳米管中激子态的原子级可视化	2015—2020	俄勒冈大学
	用于多重检测的无标记、化学、微流体纳米生物传感器阵列	2016—2020	加州大学河滨分校
	面向射频应用的高质量碳纳米管	2016—2021	Carbon Technology 公司
	碳纳米管晶圆	2016—2021	威斯康星大学麦迪逊分校
	使用超灵敏石墨烯和碳纳米管离子传感器设计和开发高性能微型辐射探测器	2017—2019	东北大学
	超越 S-Q 效率极限:理解和控制碳纳米管 PN 结中的载流子倍增	2017—2020	俄勒冈州立大学
	碳基集成电子器件的晶片级制造	2017—2020	阿拉巴马农工大学
	周期碳纳米管阵列的量子纳米光子学	2018—2021	北卡罗来纳中央大学
碳化硅	采用高温碳化硅互补金属氧化物半导体技术的专用数据采集	2015—2017	阿肯色大学
	极限带隙半导体	2015—2019	康奈尔大学
	可扩展的集成量子光子互连	2016—2020	罗切斯特大学
	碳化硅缺陷在物理和量子技术中的应用	2018—2021	霍华德大学

1.2 欧盟:全力落实石墨烯旗舰计划

作为石墨烯的诞生地,欧洲十分注重在此领域的战略布局。早在 2013 年 1 月,欧盟委员会就计划把“石墨烯旗舰计划”列为首批“未来新兴技术旗舰项目”之一,拟在 10 年内投资 10 亿欧元开展石墨烯和相关二维材料技术基础研究和应用研究,促进产业革命和经济增长,创造更多就业机会。“石墨烯旗舰计划”于 2013 年 10 月正式启动,先后经历了三个发展阶段,于 2020 年 4 月 1 日起步入第四个发展阶段,各阶段的起止时间、

投资额度、研发目标、主要研究机构如表 2 所示。

石墨烯旗舰计划由 6 大部门共同分担及实施石墨烯全链条科研及产业化工作,包含合作协调部门 1 个、管理服务部门 1 个、科研应用部门 4 个^[10]。其中,四大科研部门分别为基础材料与理论研究部,健康、医疗及传感器部,电子设备及光电子部,能源、复合材料及应用部。同时,石墨烯旗舰计划下设 19 个工作组,3 个基础工作组负责理论研究、自旋电子、材料制备等研究方向,12 个应用工作组负责材料应用、复合材料、泡沫材料

及涂料、储能、能源、规模化晶圆制备、柔性电子、光电子、电子设备、传感器、生物医药、健康及环境等研究方向,4 个工作组负责管理、宣传、创新、产业服务工作。

1.3 英国:校企联合推动石墨烯商业化应用

英国于 2011 年将石墨烯确定为重点发展的四项新兴技术之一,2013 年又联合欧洲研究与发展基金会投资 6100 万英镑,于曼彻斯特大学创立国家石墨烯研究院,旨在为学术界和企业界提供协同研发平台,推动石墨烯技术的早期开发和商业化进程。2014 年,英国工程和自然科学研究理

事会 (Engineering and Physical Sciences Research Council, EPSRC) 与技术战略委员会,于曼彻斯特大学创立了石墨烯工程创新中心。该中心将进一步推动石墨烯电子技术的应用研究和开发,维持英国在相关方面的世界领先地位。目前,曼彻斯特大学已与全球数十家企业合作开展研究,将实验室石墨烯科学研究成果转化成商业化产品。

作为国家科技创新战略政策的重要落实机构, EPSRC 推出了一系列碳基电子技术研究行动,如表 3 所示。

表 2 石墨烯旗舰计划各阶段的发展目标
Tab. 2 Development Goals for Each Phase of the Graphene Flagship

发展阶段	起止时间	资助额度 /万欧元	研究目标
过渡阶段	2013 年 10 月至 2016 年 3 月	5400	开发信息通信技术及其他领域的材料技术,确定由石墨烯及相关二维材料实现的新器件,将其集成到提供新功能的系统中,开辟新应用领域,彻底改变从柔性、可穿戴和透明电子,到新能源应用和新型功能复合材料等行业 ^[6] 。
第一核心阶段 (Core1)	2016 年 4 月至 2018 年 3 月	8900	开发基于石墨烯及相关二维材料的器件和初级系统 ^[7] 。
第二核心阶段 (Core2)	2018 年 4 月至 2020 年 3 月	8800	侧重于将石墨烯器件集成到更大系统中,开展以市场为导向的研究工作 ^[8] 。
第三核心阶段 (Core3)	2020 年 4 月至 2023 年 3 月	15000	进一步朝着石墨烯和层状材料的商业化应用迈进,相关预算的约 30% 将专门用于资助由工业界主导、以明确的市场需求目标为基础而设立的项目,提高石墨烯技术成熟度水平,到 2023 年使石墨烯创新走出实验室,进入商业应用阶段 ^[9] 。

表 3 EPSRC 资助的碳基电子项目
Tab. 3 Carbon-based Electronics Projects Funded by EPSRC

项目名称	起止年份	获资机构	资助额度/万英镑
石墨烯纳米光子学:更小、更强、更快	2014—2019	埃克塞特大学	~ 97
制造范德瓦尔斯异质结:从原子级逐层组装到可印刷的创新设备	2016—2021	曼彻斯特大学	~ 406
自旋电子器件中的新材料集成	2016—2021	剑桥大学	~ 99
石墨烯应变工程:生长、改性和电子特性	2017—2021	诺丁汉大学	~ 91
用于能量收集、具有超低热导率的自组装分子单分子膜	2017—2020	兰卡斯特大学、剑桥大学、杜伦大学	~ 42、~ 36、~ 32
GaN-金刚石集成微波电子学:从材料、晶体管到单片微波集成电路	2017—2021	布里斯托大学	~ 433
用于扫描霍尔显微镜和荧光测定法的石墨烯纳米传感器	2018—2020	巴斯大学	~ 40
纳米级先进材料工程平台	2018—2020	曼彻斯特大学	~ 70
太赫兹超材料/石墨烯光电调制器	2019—2021	兰卡斯特大学	~ 21
大面积低成本低尺寸电子设备制造	2019—2021	剑桥大学	~ 25
用于生命体征监测的自供电可穿戴传感器	2019—2021	埃克塞特大学	~ 20
量子材料中的新型电子流体	2019—2022	埃克塞特大学	~ 35
毫米波高数据速率低延迟皮肤传感器的设计和制造	2019—2022	曼彻斯特大学	~ 62

1.4 日本:侧重碳基电子技术应用基础研究

日本政府也非常重视碳基电子技术的发展,文部科学省和经济产业省积极支持碳基电子技术研发,鼓励学术界和企业界从事相关研究工作,大力推动碳基电子技术商业化应用。早在 2007 年,文部科学省下属的日本科学技术振兴机构就资助石墨烯材料和器件技术研究,旨在基于硅基石墨烯工艺技术,研制超高速大规模集成器件、先进开关器件、等离子共振器等^[11]。日本科学技术振兴机构和产业综合技术研究所还资助开展绝缘体基板表面石墨烯吸附机理研究。2011 年,日本经济产业省资助开展“低碳社会实现之超轻、高轻度创新融合材料”研究,计划投资 9 亿日元探索碳纳米管和石墨烯材料的批量合成技术。此外,日本日立、索尼、东芝等公司也投入了大量资源推动石墨烯的基础研究和应用开发。

在碳化硅电力电子技术方面,2008 年“日本新一代节能器件技术战略与发展规划”提出将采用碳化硅等宽禁带半导体器件进一步降低功率器件的功耗。2010 年,日本经济产业省资助“下一代电力电子研发计划”,主要开展碳化硅服务器电源供给、光伏功率调解器系统、高温模块等研究;日本学术振兴会开展“面向于低碳社会的碳化硅新型电力电子器件研发计划”项目,主要研究高压碳化硅绝缘栅双极型晶体管。2014 年,新能源产业技术综合开发机构开展“下一代碳化硅研发计划”,主要研究下一代碳化硅衬底、器件、模块;“国家硬电子计划”将碳化硅衬底的制备与器件外延作为了重点研究课题投以巨资进行支持。

1.5 中国:列入中国制造 2025 重点发展领域

为把握当前全球制造业格局重大调整的历史机遇,我国于 2015 年 5 月发布了《中国制造

2025》战略。国家制造强国建设战略委员会于 2015 年 9 月发布了《<中国制造 2025>重点领域技术创新绿皮书—技术路线图》,进一步明确了未来十大重点领域发展趋势和重点,服务企业技术创新,2017 年 6 月又在总结技术路线图实施情况的基础上更新发布了《<中国制造 2025>重点领域技术创新绿皮书—技术路线图(2017 年版)》。新材料是此技术路线图的一大重点研究领域,先进半导体材料和石墨烯材料均被列为重点发展方向,如表 2 所示^[12]。此外,2016 年 7 月,国务院印发《“十三五”国家科技创新规划》,指出以石墨烯、高端碳纤维为代表的先进碳材料、超导材料等前沿新材料为突破口,抢占材料前沿制高点^[13]。此外,工信部、科技部和发改委联合发布了《关键材料升级换代工程实施方案》,明确提出支持石墨烯批量稳定生产和规模应用^[14];工信部印发了《加快石墨烯产业创新发展的若干意见》。习近平主席在参观英国国家石墨烯研究院时指出:“中英两国在石墨烯研究领域完全可以实现强强联合”。此外,国家重点研发计划积极部署了一系列的碳基电子技术研发项目,如表 4 所示。

我国国家自然科学基金委员于 2020 年 5 月发布“后摩尔时代新器件基础研究”重大研究计划项目指南,重点发展新材料与低功耗器件、新材料与高性能器件、超低功耗新原理信息器件等后摩尔时代新器件和计算架构,突破芯片算力瓶颈,促进我国芯片研究水平的提升,支撑我国在芯片领域的发展与创新。碳基电子技术是后摩尔时代新器件的重点研究方向之一。

2 碳基电子技术研究现状与趋势

2.1 石墨烯微纳电子器件研究精彩纷呈

20 世纪 80 年代后期,人们越来越关注使用

表 4 国家重点研发计划部署的碳基电子技术研发项目

Tab. 4 Carbon-based Electronics Projects Funded by National Key R&D Program of China

时间	项目名称	承担机构	牵头人
2016 年	纳米碳材料产业化关键技术及重大科学前沿	北京大学	张锦
	石墨烯宏观体材料的宏量可控制备及其在光电等方面的应用研究	南开大学	陈永胜
	碳基纳米电子器件与集成	北京大学	彭练矛
	石墨烯等碳基纳米材料 NQI 技术研究、集成与应用	中国计量科学研究院	任玲玲
2017 年	柔性基板材料关键技术开发及应用示范	上海大学	张建华
	基于分子识别的纳米生物传感器用于膀胱癌数字化诊断的研究	武汉大学	袁荃
	海水总有机碳光学原位传感器及在线监测仪研发	燕山大学	毕卫红
2018 年	碳纳米管有序宏观体功能化及在极端条件下的应用	清华大学	姜开利
	基于自焦耳热效应的碳纳米管抗腐蚀复合膜器件的海水淡化研究	厦门大学	侯旭
	基于碳化硅技术的车用电机驱动系统技术开发	上海电驱动股份有限公司	张琴
	碳化硅大功率电力电子器件及应用基础理论研究	全球能源互联网研究院有限公司	邱宇峰

碳基材料作为器件中的有源电子材料以及诸多的无源应用。2004 年英国曼彻斯特大学的物理学家安德烈海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫,在实验室成功地从石墨中剥离出了石墨烯,证明了石墨烯可以单独存在,以“在二维石墨烯材料的开创性实验”荣获 2010 年诺贝尔物理学奖,从而掀起了石墨烯制备、改性和应用的全球研究热潮。

由于石墨烯具有非常优异的电学、力学、光学和热学等特性,结合石墨烯和微纳加工工艺可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^[15]。例如,美国斯坦福大学和麻省理工学院于 2017 年 7 月通过使用二维石墨烯卷成圆柱体形成的碳纳米管将随机存取存储器集成到中央处理器中,开发了一种三维计算机芯片,能够运行程序和简单的多任务操作系统,执行 MIPS 指令,克服了逻辑电路和存储器之间通信的瓶颈问题。中国科学院重庆绿色智能技术研究院于 2013 年制备出 7 英寸的柔性石墨烯触摸屏;金属研究所于 2019 年 10 月

制备出“硅-石墨烯-锗晶体管”,可大幅缩短延迟时间,并将截止频率由兆赫兹提升至吉赫兹。华为在 Mate 20 系列手机上首次采用石墨烯散热,其等效导热能力是纯铜膜的 2.8 倍;荣耀 Note 20 手机采用石墨烯电池,16 分钟就能充满电。

欧盟石墨烯旗舰计划支持制定的新版《石墨烯技术和创新路线图》给出了石墨烯面向 2030 年及以后的主要领域应用目标,如表 5 所示^[16]。在电子技术领域,石墨烯将在 2022 年及以前用于制造低成本印刷电子产品,2023—2029 年间将主要用于制造高频电子器件和柔性电子器件,2030 年后将用于开发自旋逻辑器件。在数据通信领域,石墨烯将在 2022 年及以前用于先进光通信技术,2023—2029 年间将主要用于先进网络基础设施的建设,2030 年后将用于 6G 及更高级无线网络和片上光数据产品。在能源领域,石墨烯将在 2022 年及以前用于快速充电电池和先进光伏产品,2023—2029 年间将主要用于制造柔性钙钛矿太阳能电池和仓储物流用超级电容,2030 年后将用于开发钙钛矿多结光伏器件和交通用燃料电池。总体来说,尽管这些应用目标并不一定能够

如期实现,但指明了石墨烯电子技术的预期发展方向。

欧盟 2015 年发布的《石墨烯科学和技术路线图》指出了石墨烯电子器件和光子器件的预期应用时间表,如图 1 和图 2 所示^[17]。在石墨烯电子器件方面,2015—2020 年间主要是基于中等质量的石墨烯材料,开发触摸屏、可卷曲的电子纸、可折叠的有机发光二极管产品;从 2020 年开始,高质量石墨烯将逐渐发展,开始用于制造射频晶体管、逻辑晶体管/薄膜晶体管、其他未来电子器件等产品。在石墨烯光电子器件方面,2020 年后石

墨烯光电探测器、锁模半导体激光器、调制器、偏振控制器、固态锁模激光器、无线电收发器、可调光纤锁模激光器、太赫兹波探测器将逐渐步入应用阶段,石墨烯隔离器和太赫兹发生器将于 2025 年后步入应用阶段。总体来说,尽管这些预期应用目标并没有全部如期实现,但指明了石墨烯电子器件和光子器件的预期发展方向。

2.2 碳纳米管电子技术逐渐从基础研究转向实际应用

碳纳米管具有独特的电学、力学和光学特性,尤其是高迁移率、纳米尺寸、柔性、通透性和

表 5 面向 2030 年及以后的石墨烯主要应用领域

	复合材料	能源	数据通信	电子技术	传感器和成像	生物技术
	功能涂料和表面改性	快速充电电池	先进光通信	低成本印刷电子	光探测器和物理化学传感器	生物传感器
2022 年及以前	结构材料	先进光伏			广谱 CMOS 相机和光谱仪	
	多功能结构材料	柔性钙钛矿太阳能电池				
2023—2029 年	多功能结构材料	柔性钙钛矿太阳能电池	先进网络基础设施	高频电子器件		神经界面
	水处理和海水淡化	仓储物流用超级电容		柔性电子器件		
		钙钛矿多结光伏				
2030 年及以后	钙钛矿多结光伏	6G 及更高级无线网络	自旋逻辑器件		药物输送	
		交通用燃料电池	片上光数据			生物电子医学

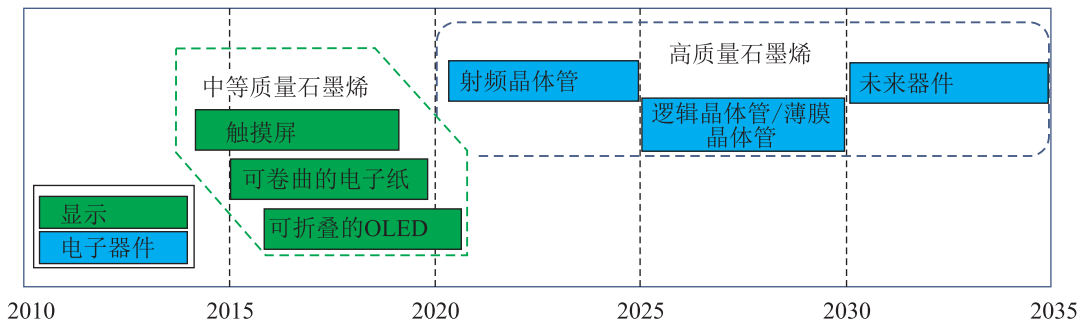


图 1 石墨烯电子器件的预期应用时间表

Fig. 1 Timeline of Expected Applications of Graphene Electronics Devices

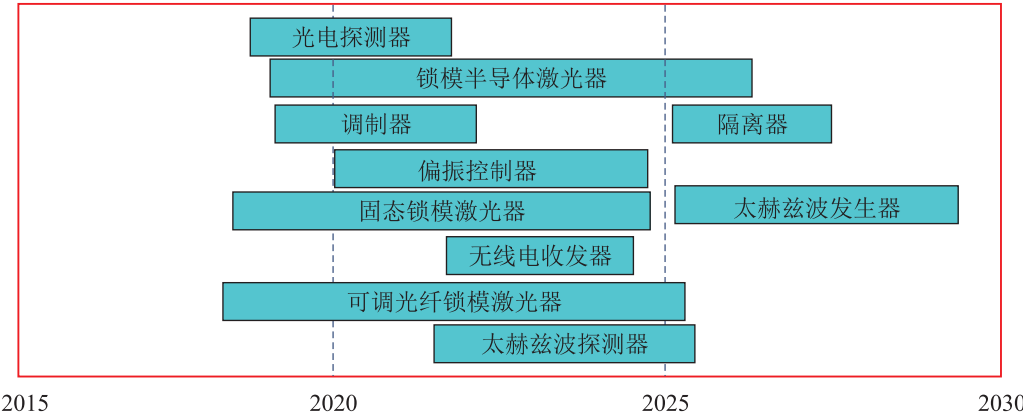


图 2 石墨烯光电子器件的预期应用时间表

Fig. 2 Timeline of Expected Applications of Graphene Optoelectronic Devices

生物可兼容性等与传统硅基材料和其他纳米材料相比独一无二的特性,能够满足未来信息产业对高性能、低功耗和各种功能化的需求,是电子器件应用的理想材料。自 1991 年被首次观测以来,碳纳米管一直受到学术界和产业界的持续关注,碳纳米管电子器件和集成电路的研究也不断深入。近年来,基于碳纳米管的碳基电子学研究取得了飞速发展,并逐渐从基础研究转向实际应用^[18]。得益于材料自身的优良性质和世界范围的政策和资金支持,研发人员在碳纳米管的器件物理、器件制备、集成方法等方面都取得了相当的成就。研究进展表明碳基电子学器件相比传统硅基器件具有 5 ~ 10 倍的速度和能耗优势,可以实现 5 纳米以下的半导体技术节点,满足 2020 年之后新型半导体芯片的发展需求。研发人员已经实现了具有各种功能的基础逻辑单元,原则上就可以利用这些逻辑单元制备出具有极高复杂程度的碳基集成电路。

近年来,碳纳米管电子技术取得了令人瞩目的研究进展。2013 年,美国麻省理工学院开发了由 178 个晶体管组成的只能执行简单指令的碳纳米管计算机^[19]。2017 年,IBM 研究人员使用钼金属来直接接驳碳纳米管端部,最终将整个晶体管

的接脚面积压缩到了 40 平方纳米,打造出世界最小晶体管。2019 年 8 月美国麻省理工学院和半导体企业亚德诺的研究人员利用 1.4 万余个碳纳米管晶体管制造出一颗 16 位微处理器^[20],证明可以全部利用碳纳米管场效应晶体管制造性能更高的微处理器,有望为先进硅基微电子器件带来一种高效能的替代品。这标志着碳纳米管互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)技术正在快速走向成熟,走向应用这个事实。

我国北京大学彭练矛教授团队发展了基于碳纳米管的高性能、低功耗 CMOS 晶体管和集成电路技术,有望在性能和功耗上全面超越现有硅基技术。该研究团队于 2017 年首次开发了 5 纳米栅长的碳纳米管 CMOS 晶体管,首次实现中等规模的高性能碳基 CMOS 集成电路;2018 年制备出速度达 5.54 GHz 的碳基集成电路;2020 年制备出直径分布 1.45 ± 0.23 纳米、半导体纯度超过 99.9999%、密度高达 120/微米的碳纳米管平行阵列,并基于这些碳纳米管研制出性能超越同等栅长硅基 CMOS 技术的晶体管和集成电路^[21],突破了纯度、密度顺排和面积等在碳纳米管材料制备上长期无法攻克的瓶颈,首次在实验上证明了

碳纳米管电子器件和集成电路相对于传统硅基电子技术的性能优势,为碳基电子技术的实用化和规模工业化发展奠定了基础。

2.3 碳化硅电子技术产业应用如火如荼

碳化硅具有高电子迁移率、高临界击穿电场等特性,是制造高温、高压、高功率、抗辐照器件的优良半导体材料,也是目前综合性能较好、商品化程度最高、技术成熟度最高的第三代半导体材料。碳化硅功率半导体器件为更小体积、更快速度、更低成本、更高效率的下一代电力电子技术的进步提供了机遇,在智能电网、轨道交通、电动汽车、新能源并网、开关电源、工业电机以及家用电器等领域具有重大的应用前景和产业价值。随着碳化硅材料制备技术不断进步,全球主要发达国家竞相发展碳化硅电力电子器件技术。近年来,多家国际大公司纷纷布局向 6 英寸碳化硅电力电子器件制造工艺,积极开发高压、大容量碳化硅电力电子器件产品。目前,肖特基二极管、PIN 二极管、金属-氧化物-半导体场效应晶体管、绝缘栅双极型晶体管等碳化硅电力电子器件耐压高达 10 kV 以上,单管器件最高电压超过 27 kV^[22]。2019 年,Cree 公司宣布投资 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^[23]。

3 启示与建议

随着芯片性能遭遇增长瓶颈,人工智能应用成为半导体行业发展的重要推动力,所需的海量计算数据搬运进一步加剧了传统冯诺依曼计算架构芯片固有的“内存墙”挑战,半导体行业亟需采用新架构和新材料来寻求芯片性能突破。在诸多新型半导体材料技术中,碳基电子技术成为硅基电子技术的重要补充者之一。目前,碳基电

子技术获得了美国、欧盟、英国、日本、韩国等国家/地区的政府机构和大型公司的积极关注与研发布局,多年来取得了一系列重要甚至里程碑式研究进展。

中国在碳基电子技术研究领域具有良好的研究基础和广阔的发展空间,但核心技术仍受制于人,未来应进一步整合优势资源,聚力突破关键碳基电子技术发展障碍。本文提出以下建议,为中国在相关领域的工作提供参考。

制定碳基电子技术发展战略,完善顶层布局。美国已通过“超越摩尔定律的科学与工程”和“2020 年后的纳米电子学”等项目来资助碳基纳电子材料等硅基替代技术研究;欧盟启动了“石墨烯旗舰计划”;英国也建立了国家级石墨烯研究机构和工程创新中心,支持早期研发及商业化。因此,中国应充分把握半导体产业面临的变革机遇,推动制定碳基纳电子国家战略,从顶层设计层面部署科学化、体系化的碳基电子技术发展举措,制定关键碳基电子技术研发路线图,明确优先发展领域、发展目标、关键挑战和时间节点,抢占未来半导体技术发展新的制高点,在全球电子信息产业中获取更多的控制权。

建立产学研联合攻关网络,突破关键碳基电子技术产业化瓶颈。石墨烯电子技术、碳纳米管电子技术、碳化硅电力电子技术是当前热点碳基电子技术,石墨烯电子技术和碳纳米管电子技术已逐渐从基础研究向应用研究转变,碳化硅电子技术已逐渐步入应用阶段。中国应携手政府、学术界、产业界、投融资机构等所有利益相关者共同部署石墨烯电子技术、碳纳米管电子技术、碳化硅电子技术项目,以基础研究为抓手,以商业化应用为目标,力争取得碳基芯片、石墨烯射频器件、石墨烯自旋电子器件、碳化硅功率电子器

件等技术突破,扭转中国高端电子信息产品依赖国外进口的被动局面。

致谢:中南大学教授汪炼成、东方电气中央研究院储能与新材料技术研究所高级工程师张中伟、电子科技大学副教授尹良君对本文提出了宝贵的意见与建议,谨致谢忱!

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]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.

WANG Lina,TANG Chuan,XU Jing. Analysis on the Development Trends of Future Chip[J]. World Science and Technology Research and Development, 2020,42(1):47-56.

[3]麦洛. 专访北大碳基芯片团队:我们换道走了 20 年,觉得能走下去 [EB/OL]. (2020-06-03). <http://news.pku.edu.cn/mtbdnew/ee024da5367d47a9a2ffebb8a3d3df12.htm>.

MAI Luo. Interview with BYU's Carbon-based Chip Team; We've Been Changing Lanes for 20 Years and We Can Go On [EB/OL]. (2020-06-03). <http://news.pku.edu.cn/mtbdnew/ee024da5367d47a9a2ffebb8a3d3df12.htm>.

[4]RICK M. 美国投入 15 亿美金投入“电子产业振兴计划”,以应对中国的崛起 [EB/OL]. (2018-07-31). <https://www.esmchina.com/news/3900.html>.

RICK M. U. S. Invests \$ 1.5 Billion in Electronics Resurgence Initiative to Deal with the Rise of

China [EB/OL]. (2018-07-31). <https://www.esmchina.com/news/3900.html>.

[5]Department of Energy. Department of Energy Announces 21 New Projects to Develop High-Performance Circuits for Industrial, Consumer Use [EB/OL]. (2017-08-23). <https://arpa-e.energy.gov/?q=news-item/department-energy-announces-21-new-projects-develop-high-performance-circuits-industrial>.

[6]European Commission. Graphene-Based Revolutions in ICT and Beyond [EB/OL]. (2013-10-01). <https://cordis.europa.eu/project/id/604391>.

[7]European Commission. Graphene-based Disruptive Technologies [EB/OL]. (2016-04-01). <https://cordis.europa.eu/project/id/696656>.

[8]European Commission. Graphene Flagship Core Project 2 [EB/OL]. (2018-04-01). <https://cordis.europa.eu/project/id/785219>.

[9]European Commission. Graphene Flagship Core Project 3 [EB/OL]. (2020-04-01). <https://cordis.europa.eu/project/id/881603>.

[10]石墨烯联盟. 一文了解 2019 年欧盟石墨烯旗舰工作进展[EB/OL]. (2020-04-23). <https://mp.weixin.qq.com/s/CDOFeRhGZ8nrVJbSMaKoPA>.

Graphene Alliance. The Progress of the EU Graphene Flagship in 2019 [EB/OL]. (2020-04-23). <https://mp.weixin.qq.com/s/CDOFeRhGZ8nrVJbSMaKoPA>.

[11]先进制造业. 诸国石墨烯研发之争,谁能杀出突围 [EB/OL]. (2015-08-06). <http://www.amdaily.com/NewMaterial/leading/30.html>.

Advanced Manufacturing. Graphene R&D Battle between Countries [EB/OL]. (2015-08-06).

<http://www.amdaily.com/NewMaterial/leading/30.html>.

[12] 中华人民共和国工业和信息化部.《< 中国制造 2025 > 重点领域技术创新绿皮书-技术路线图(2017)》发布辛国斌副部长出席发布会并致辞[EB/OL]. (2018-01-26). <http://www.miit.gov.cn/newweb/n1146285/n1146352/n3054355/n3057267/n3057272/c6037831/content.html>. Ministry of Industry and Information Technology. Green Paper on Technology Innovation in Key Areas of Made in China 2025 - Technology Roadmap (2017) released [EB/OL]. (2018-01-26). <http://www.miit.gov.cn/newweb/n1146285/n1146352/n3054355/n3057267/n3057272/c6037831/content.html>.

[13] 国务院. 国务院关于印发“十三五”国家科技创新规划的通知 [EB/OL]. (2016-07-28). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm. State Council. Notice on the Issuance of the "Thirteenth Five-Year Plan" for National Science and Technology Innovation [EB/OL]. (2016-07-28). http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-08/08/content_5098072.htm.

[14] 史冬梅,何大方,张雷. 石墨烯材料发展现状与趋势[J]. 科技中国,2018(1):3-6. SHI Dongmei, HE Defang, ZHANG Lei. Graphene Materials Development Status and Trends [J]. Scitech in China, 2018(1):3-6.

[15] RATNIKOV P V, SILIN A P. Two-Dimensional Graphene Electronics: Current Status and Prospects[J]. Physics-Uspekhi, 2018, 61(12): 1139-1174.

[16] Graphene Flagship. European Roadmap for

Graphene Science and Technology [EB/OL]. (2020-05-07). <https://graphene-flagship.eu/project/roadmap>.

[17] FERRARI A C, BONACCORSO F, FAL'KO V, et al. Science and Technology Roadmap for Graphene, Related Two Dimensional Crystals, and Hybrid Systems [J], Nanoscale, 2015, 7(11): 4587-5062.

[18] 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(8): 30-34. LIANG Shibo, ZHANG Zhiyong, PENG Lianmao. R&D Advantages and Development Status of Carbon-Based Integrated Circuits [J]. Advanced Materials Industry, 2015(8):30-34.

[19] KATHERINE B. The First Carbon Nanotube Computer [EB/OL]. (2013-09-25). <https://www.technologyreview.com/2013/09/25/176332/the-first-carbon-nanotube-computer/>.

[20] HILLS G, LAU C, WRIGHT A, et al. Modern Microprocessor Built from Complementary Carbon Nanotube Transistors[J]. Nature, 2019, 572:595-602.

[21] 虞涵棋. 北大排列高密度半导体碳纳米管, 电子学性能超同尺寸硅基器件 [EB/OL]. (2020-05-22). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_7493538. YU Hanqi. Peking University Aligns High-Density Semiconductor Carbon Nanotubes with Electronic Performance Exceeding that of Silicon-Based Devices of the Same Size [EB/OL]. (2020-05-22). https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_7493538.

[22] 陈硕翼,张丽,唐明生,等. 碳化硅电力电子器

www.globesci.com

件技术发展现状与趋势[J]. 科技中国,2018
(6):4-7.
CHEN Shuoyi,ZHANG Li,TANG Mingsheng, et
al. Silicon Carbide Power Electronics Technology
Development Status and Trends[J]. Scitech in
China,2018(6):4-7.
[23]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>.

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。



量子信息前沿领域和战略科技力量高层次专家研讨会在成都召开

2021 年 9 月 28 日,由中国科协主办、中国科学院成都文献情报中心承办、《世界科技研究与发展》编辑部等单元协办的“量子信息前沿领域和战略科技力量高层次专家研讨会”在成都召开。中国科学院院士/中国科学技术大学郭光灿教授、中国科学院院士/南京大学祝世宁教授为研讨会开幕致辞,会议承办方中国科学院成都文献情报中心党委书记曲建升研究员祝研讨会取得高水平成果,中心副主任房俊民研究馆员主持启动研讨会。

郭院士在致辞中强调量子技术对国防建设和国家安全的重要性,并为我国量子科技发展、抓住“第二次量子革命”机遇、抢占量子科技创新高地提出了宏观规划建议!祝院士指出,此次研讨会不仅设置了量子通信、量子计算机等前沿科技领域的研讨环节,还特别关注量子产业的发展,可见量子科技不仅基础研究进展快,成果应用与转化也是指日可待。

研讨会共设置了 4 个议题。在“量子通信发展现状与应用前景”环节中,主持嘉宾清华大学龙桂鲁教授与研讨专家们重点研讨了保密通信、通信与密钥安全、量子密钥远距离传输、量子互联网与应用前的标准制定、量子无人机、量子生物学等前沿问题与新兴交叉方向。中国科学技术大学郭国平教授担任“量子计算机发展现状与趋势”环节的主持嘉宾,他强调通用型量子计算还需未来很长的时间才能实现,目前量子计算与传统计算并非替代关系,而是应发挥优化、加速的作用;同时提出量子世界与人类感知的经典世界之间的信息交互与转换,是量子计算实用化必须要考虑的问题。在“量子产学研联盟构建及创新案例”环节,主持嘉宾合肥本源量子计算科技有限责任公司张辉总经理与来自产业界、学术界的专家们,共同呼吁通过量子产学研联盟,推动量子科技科普与人才教育,引导政府与资本加大对量子产业的投资,开拓量子科技新产品市场。中国科学院成都文献情报中心张志强研究员在“量子科技国际竞争与政策布局比较研究”研讨议题中指出,全球量子信息技术研发四大热点地区/国家为北美、欧洲、日本和中国。美国是最早将量子信息技术列入国家战略、国防与安全研发计划的国家,已形成立法保障、制定专项战略和优先发展相互衔接配套的政策体系。

田倩飞(中国科学院成都文献情报中心)