

ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Views & Comments

初探智能社会驱动下的潜在信息与电子工程颠覆性技术

吕跃广^a, 张雅鑫^{bc}, 刘阳^d, 陈伟芳^e, 张希琳^f, 徐文渊^g, 吴昌聚^e, 王兰^c, 曾泓鑫^c, 盛 譞^c, 睿 阳^b, 王增辉ⁱ, 况琨^j, 吴飞^j

- ^a Chinese Academy of Engineering, Beijing 100088, China
- b Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313001, China
- School of Electronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China
- ^d Institute of Systems Engineering, Beijing 100091, China
- ^e School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
- School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China
- g College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China
- h University of Michigan Shanghai Jiao Tong University Joint Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China
- Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China
- ¹ College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

1. 引言

新世纪以来,在智能社会发展驱动下,信息电子领域加速与各技术领域和产业融合,成为新一轮科技革命和产业变革的主要驱动力,推进全球技术、产业和分工格局深刻调整,正在重塑世界各国的创新能力和竞争实力。信息电子领域作为当前全球研发投入最集中、创新最活跃、辐射带动作用最强的科技创新领域,成为世界科技大国推动经济发展、谋求竞争优势的重要战略必争领域。

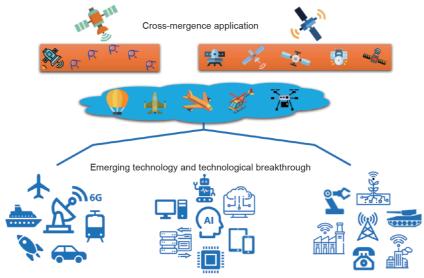
在万物互联、宽带实时、智能泛在等智能社会对信息 技术的需求驱动下,后摩尔时代的电子信息领域数字化、 网络化、智能化等特征愈发明显,孕育着对社会带来巨大 变化的颠覆性技术。在基础研究层面,量子电磁学、突破 摩尔定律的集成电路、数字空间与物理空间相结合的信息 等将为基础技术带来原始创新力;新兴技术的突破,将可 能通过引发大规模工程和产业应用,对社会生活产生重大 影响,如新一代高速计算、6G技术等[1];应用层面的交 叉融合和颠覆性创新,将改变现有应用方式,形成超越目前想象的新应用模式,如天地一体化网络、大数据人工智能等[2]。

信息与电子领域以信息的产生、传输、处理与利用为主线,建立在基础理论、材料与工艺之上,多学科深度融合,广泛渗透于不同的科研领域,与其他领域技术交叉融合,使其更成为科技创新发展的密集区,加速推动其他领域的创新发展。也正因此,信息与电子领域的颠覆性技术具有基础性、全局性、爆发性、融合交叉性的鲜明特点。基础性,是从基础理论带动全新技术的孕育;全局性,从点扩散到面,覆盖多个技术方向,辐射多个应用领域;爆发性,推动快速应用拓展和产业喷发;融合交叉性,如信息感知、处理和高速通信等技术的交叉融合,推动了物联网、人工智能等技术的创新应用,推动社会从信息化迈向智能化。本文将以碳基材料和信息超构材料、跨越光电技术、存算一体技术、大数据驱动下的人工智能技术为例浅析潜在的颠覆性技术。

2095-8099/© 2021 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

英文原文: Engineering 2021, 7(8): 1051-1056

引用本文: Yueguang Lyu, Yaxin Zhang, Yang Liu, Weifang Chen, Xilin Zhang, Wenyuan Xu, Changju Wu, Lan Wang, Hongxin Zeng, Xuan Sheng, Rui Yang, Zenghui Wang, Kun Kuang, Wu Fei. Analysis of Potential Disruptive Technologies in the Electronics and Information Field Towards the Intelligent Society. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.05.004



Basic mechanism and fundamental research

图1. 信息与电子领域潜在的颠覆性技术。

2. 碳基材料和数字信息超构材料

硅基芯片是现代信息技术发展的基石。随着芯片功 能、集成化程度以及工作频率的不断提升, 传统硅基芯片 正面临尺寸缩减带来的芯片性能提升的限制。2018年, 国际器件和系统路线图将碳基纳米材料列为未来集成电路 技术的一个选择,以延续摩尔定律所预测的趋势[3]。此 后,以碳纳米管(CNT)为核心的芯片的发展,为碳基芯 片带来了巨大的潜在发展空间。与传统硅基、GaAs等化 合物材料体系相比,碳基材料 CNT 具有低功耗、高载流 子传输(高达 10^5 cm²·V⁻¹·s⁻¹)[4]和超薄体(一维半导体) 的特点。与硅基场效应晶体管相比,这些特性使碳纳米管 场效应晶体管(CNFET)的能量效率提高一个数量级。 一个由CNFET组成的超越硅基的微处理器通过一个标准 的工业设计过程被证明可以克服整个晶圆基板的纳米级缺 陷。未来通过对碳纳米管的精确结构控制与生长实现超长 碳纳米管结构的精确控制与批量制备,以及通过高密度高 纯半导体阵列碳纳米管使得碳基集成电路实现晶圆级别等 将为新一代的芯片带来极大的性能提升。

超材料是一种人造材料,具备天然材料中不存在的特性。东南大学崔铁军院士提出的数字信息超材料通过精确设计微结构单元的几何形状、尺寸和排列,控制传统材料所不具备的宏观物理特性[5](如电磁、光学和声学特性)。特别是其基本思想是将数字控制信号应用于每个微结构单元以控制其电磁谐振特性。当电磁波与数字超材料相互作用时,它们会被数字控制信息所编码。这样,电磁波的相位、振幅、波束方向和轨道角动量都可以通过数字

控制信号连续改变,数字信息超材料只用一个部件就可以 完成调制、传输和波束的敏捷性。因此,数字信息超材料 可以改变成像、无线通信、智能感知系统等的模式[6-7]。

近年来,信息超材料被用来实现时间编码和空间-时 间编码数字超材料, 并与数字卷积定理和香农信息熵相结 合[8-9]。其中,研究者提出了360°相位准连续调谐和非 线性偏振合成技术, 且电磁波能量可以在数字控制下在空 间和频域内被分离出来。此外,这些材料可以打破互易 性,在空间和频率域隔离波的反射,这些非互易性效应可 以被动态地控制。目前,信息超材料已经实现了现场可编 程的全息成像,可以独立控制电磁波的近场/远场模式, 以及电磁波在不同偏振下的传输和反射模式,有望实现从 微波到太赫兹以及光学频段的全息成像。更为重要的是, 实现了具有极简结构的无线通信系统, 其中信息超材料已 被开发出多种功能,如传统系统中的信息加载、信息传输 和通信复用技术。信息超材料可以动态地、任意地操纵电 磁波,但需要人工控制在不同的功能之间切换。因此,信 息超材料有望实现电子器件的智能化,如图2所示。目 前,超材料的智能化主要体现在自适应超材料和与人工智 能的结合上。

3. 跨越光电技术

信息与电子工程领域的发展长期以来都是建立在对电磁频谱的利用和开发基础上,频谱资源也成为了该领域的核心资源,从微波到红外,从红外到可见光、紫外,不同的频谱对应着自己独有的信息产生和处理方法。然而随着

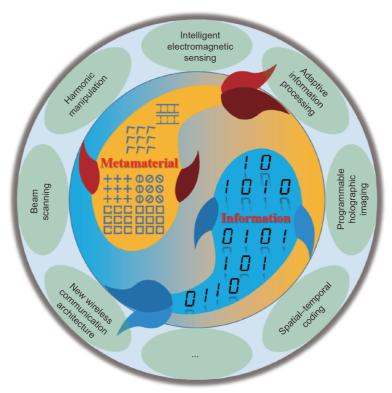


图2. 数字信息超材料技术。

电磁技术的发展,不同频谱领域技术逐渐呈现出了交叉融合的趋势,光和电的技术也在相互不断地渗透和共同发展。

从技术层面分析,以光电融合发展而衍生的微波光子学技术不仅将光发射、调制和探测与硅基芯片结合形成以硅光技术为核心的全新电子器件,同时以"光"传输调控、"电"信息处理的全新模式架构形成了新型雷达、成像、通信系统。近年来,微波光子学技术取得了系列性突破,2020年英特尔推出了一体封装光学以太网交换机,将1.6 Tbps的硅光引擎与12.8 Tbps的可编程以太网交换机进行集成,为未来网络带宽扩展提供了全新技术[10];2020年,中山大学的一个团队提出了一种高速硅光控制芯片,首次将铌酸锂薄膜和硅基芯片整合在一起。该芯片

大大改善了硅光芯片的性能,首次实现了1 Tbps以上的无线通信速率,创造了无线通信传输的世界纪录[11]。此外,集成光子学的发展使光子处理器具有更高的单位面积计算能力和更好的潜在可扩展性。2021年,麻省理工学院林肯实验室展示了一个使用集成波导和光栅耦合器的表面电极离子捕获芯片,为量子信息处理系统中更多数量的离子提供了完整和单独的控制方法[12]。

从频谱层面分析,位于微波电子学与红外光子学之间 的太赫兹频谱成为跨越光与电的频谱桥梁,如图3所示, 其特殊的频谱位置也决定了太赫兹科学技术将成为光、电 技术交叉融合的频谱区。近年来,随着宽带移动通信、高 帧频高分辨雷达、快速安检以及物质材料、生物分析等需 求的增加,太赫兹技术得到长足发展。

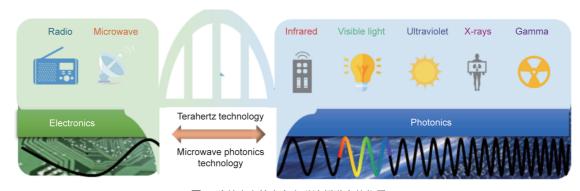


图3. 跨越光电技术在电磁波频谱中的位置。

太赫兹通信因其波束宽度适中、易于跟踪、带宽极宽、隐私性强等特点,已被确定为未来6G无线通信技术的八大潜在技术之一。尽管各种新材料和新结构的应用使太赫兹通信器件的性能有了飞跃,但现有的太赫兹器件在实现超高性能太赫兹通信技术的要求方面仍面临许多挑战。首先,分子吸收和自由空间损失,以及太赫兹设备有限的传输功率,限制了长距离地面通信的应用。此外,太赫兹通信的发射端能耗很低,但由于基带信号处理的高能耗,总能耗仍然很高。同时,在太赫兹通信中,随着传输功率的增加,设备更容易过热,因此对设备的微热耗散技术提出了更高的要求。最后,由于太赫兹通信技术在与新兴技术结合时仍面临着材料和传输功率等通信标准缺失的问题,跨学科合作还有很长的路要走。

4. 基于二维器件的可逆存算一体技术

人工智能与大数据等技术的发展,推动社会进入智能时代,而智慧城市、城市大脑等全新信息社会发展概念的提出,更催生了海量数据,带来海量数据高速智能处理的迫切需求,然而传统冯•诺依曼架构存在"存储墙"以及"能耗墙"的限制,算力以及由此带来的能量消耗,已成为智能社会进一步发展的新的瓶颈。最近,存算一体(CIM)作为一种有前途的替代方案出现了,其中的逻辑操作是在存储器单元内进行的。CIM已经被证明[13]是易失性存储器,如静态随机存取存储器和动态随机存取存储器,以及非易失性存储器,如闪存、相变存储器和电阻式随机存取存储器。

计算效率的持续提升面临着另一个重大挑战: 计算的可逆性。冯•诺依曼-兰道尔(VNL)限制为逻辑运算设定了一个基本的能量消耗限制: 擦除一位信息至少要消耗 $k_{\rm B}$ Tln2的能量($k_{\rm B}$: 玻尔兹曼常量; T: 温度)。对于逻辑门,如"AND"和"OR",在每个逻辑操作中都会擦除一位信息,导致不可避免的能量消耗。弗雷德金门是一种可逆逻辑门,可以克服 VNL 的限制,进行完整的布尔运算,

从而提供一种新的数字计算方法。将可逆逻辑与CIM结合起来,可以创造出先进计算的新范式(图4)。

二维材料(包括碳基材料)具有优异的电气和机械性能,因此在构建未来的 CIM 和可逆计算设备方面具有很大的前景。这些材料已经被用于实现并行内存数据搜索和内存中逻辑器件[14]。这些二维器件具有超小的尺寸和超低的功耗,可以与其他材料和器件集成,因此为创造未来的可逆 CIM 应用提供了更多的机会。

然而,用于可逆 CIM 的二维材料和器件,想要实现智能社会,在现实世界中的应用仍然面临很多挑战。首先,不同的二维计算设备表现出不同的优势和局限性,因此,最适合这种可逆 CIM 的二维设备仍有待确定。其次,虽然二维材料的薄膜生长在晶圆规模上进展迅速,但这些材料仍然存在均匀性和可靠性问题,这可能会影响器件性能。最后,这种器件的大规模异质集成以及与外部电路的异质集成仍然面临着一些技术挑战。因此,必须继续努力研究,以进一步澄清计算机制,优化材料生长技术,并促进集成能力。一旦这些关键的障碍被克服,我们设想能够实现可逆 CIM 的超低功耗和紧凑型二维器件将在未来的智能社会中被广泛应用。

5. 大数据驱动下的人工智能技术

智能社会驱动下人类社会、物理世界和信息空间这三元空间以不同形式不断涌现出海量数据,刻画个体和个体之间显性和隐式交互模式,反映人类生活方式、行为规律和社会趋势。三元空间大数据[15]正改变科学实验、模型归纳、模拟仿真的计算方式,推动建立数据密集型计算新范式。大数据驱动下人工智能计算范式是以人工智能手段对大数据进行深入分析,探析其隐含模式和规律的智能形态,实现从大数据到知识、进而决策的理论方法和支撑技术,如图5所示。从数据到知识、从知识到决策,有效整合不同来源的知识和数据进行服务,对加工数据进行深度分析,实现知识提取和利用,对各类数据源进行定位和连

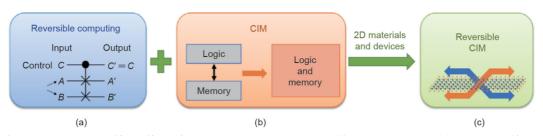


图4. 可逆CIM示意图。(a) Fredkin可以被用于构建逻辑电路,A、B和C表示Fredkin的输入,而A'、B'和C则表示Fredkin的输出;(b) CIM可以通过结合2D设备的独特功能来实现可逆CIM(c),实现了一种新的计算范式。

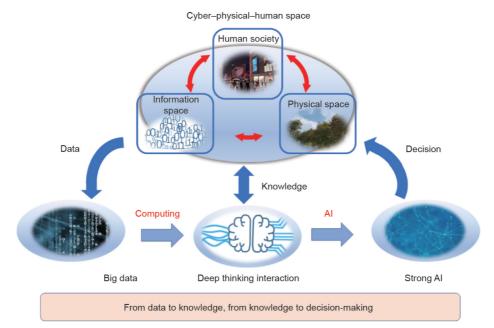


图5. 大数据驱动下的人工智能技术示意图。

接,实现数据的采集和汇聚。因此,其计算范式具有提升 泛化能力、抵抗攻击、过程可推理、复杂系统架构可实现 的特点。

因此,大数据驱动下人工智能的理论创新,如未知建模、模型鲁棒性和可解释性、不完全信息下的博弈、人在回路等,将有助于人工智能向强人工智能跃进[16],为自主无人系统、群体协作智能、混合增强智能提供技术支撑。由大数据驱动的人工智能的发展,最近被以各种方式用于实现自适应、自学习、自进化、安全、可验证的智能模型和基础理论算法、超大规模高性能机器学习范式等技术研究。人工智能可以提高未知模型的性能。例如,我们可以用它来优化碳基材料和超材料的设计过程。此外,它还可以用来帮助实现针对群体智能的游戏,并通过计算架构赋予机器学习能力。大数据驱动的人工智能将促进"数据+因果关系"[17]的科学研究方法,成为4+范式。4+范式的核心是在知识引导、数据驱动和经验学习的基础上研究模型方法,用知识引导的推导、数据驱动的归纳、环境反馈的循环规划等新理论和新技术来支撑智能社会。

然而,目前的人工智能技术仍存在感知智能适应性差、认知机制不清晰、通用人工智能发展不力等问题。人工智能亟需在算法上取得突破,形成新一代安全可靠的智能。该领域有以下热点:如何将数据驱动、知识引导和经验学习机制结合起来,形成更具有可解释性、稳定性、公平性和可操作性的模型,可以追溯模型的输出结果(具有可解释性和因果性),实现对可能错误的鲁棒性,并实现

对未知建模问题的学习能力。

6. 结论

在智能社会发展、新兴产业市场、工业技术发展、智能军事对抗等的驱动下,信息与电子工程领域在不同层面、不同技术领域涌现出了多项新兴技术,围绕着电子信息基础理论、电子信息材料和器件制备工艺及信息产生、传输、处理、利用等多方面形成了系列创新技术群,酝酿着颠覆性技术,从而影响生产、生活的方方面面,具有"润物细无声"的效果。本文仅抛砖引玉地列举了部分可能具有突破性的方向,而具有颠覆性可能的技术远不止此,在感知处理方面还有如柔性电磁材料和电子设备、基于自旋电子学的器件和设备、二维材料、智能传感等技术,在通信方面还有全新一代6G通信技术等,在网络方面还有天地一体化网络信息技术、区块链技术等,均为颠覆性技术的出现提供了肥沃的"土壤"。我们也相信在不久的将来,信息与电子工程领域将呈现出系列颠覆性技术再次改变人类社会的运行方式,并酝酿下一次工业革命。

致谢

本工作得到工程科技颠覆性技术战略研究项目(2019-ZD-27-04)的支持。

References

- Giordani M, Polese M, Mezzavilla M, Rangan S, Zorzi M. Toward 6G networks: use cases and technologies. IEEE Commun Mag 2020;58(3):55-61.
- [2] Wang Z, Tang K. Combating COVID-19: health equity matters. Nat Med 2020; 26(4):458.
- [3] Beyond CMOS: international roadmap for devices and systems [Internet]. Piscataway: IEEE; 2019 Aug 13 [cited 2021 Feb 26]. Available from: https://irds.ieee.org/editions.
- [4] Bai H, Gao H, Ma Y, Wang Q, Wu Y. First-principle crystal orbital insights to the unusual increase of carrier mobility in zigzag carbon nanotubes induced by Stone - Wales defects. Diam Relat Mater 2020;109:108013.
- [5] Cui TJ, Qi MQ, Wan X, Zhao J, Cheng Q. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. Light Sci Appl 2014; 3(10): e218
- [6] Dai JY, Tang WK, Zhao J, Li X, Cheng Q, Ke JC, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface. Adv Mater Technol 2019;4(7):1900044.
- [7] Zhao J, Yang X, Dai JY, Cheng Q, Li X, Qi NH, et al. Programmable time-domain digital-coding metasurface for non-linear harmonic manipulation and new wireless communication systems. Natl Sci Rev 2019;6(2):231–8.
- [8] Cui TJ, Li L, Liu S, Ma Q, Zhang L, Wan X, et al. Information metamaterial systems. iScience 2020;23(8):101403.
- [9] Zhang L, Chen XQ, Liu S, Zhang Q, Zhao J, Dai JY, et al. Space time-coding digital metasurfaces. Nat Commun 2018;9(1):4334.

- [10] Intel demonstrates industry-first co-packaged optics ethernet switch [Internet]. Westborough: Inside HPC; 2020 Mar 6 [cited 2021 Jan 24]. Available from: https://insidehpc.com/2020/03/intel-demonstrates-industryfirst-co-packaged-optics-ethernet-switch/.
- [11] He M, Xu M, Ren Y, Jian J, Ruan Z, Xu Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s_1 and beyond. Nat Photonics 2019;13(5):359-64.
- [12] Wu H, Dai Q. Artificial intelligence accelerated by light. Nature 2021; 589 (7840):25-6.
- [13] Yao P, Wu H, Gao B, Tang J, Zhang Q, Zhang W, et al. Fully hardware implemented memristor convolutional neural network. Nature 2020;577(7792):641-6.
- [14] Migliato Marega G, Zhao Y, Avsar A, Wang Z, Tripathi M, Radenovic A, et al. Logic-in-memory based on an atomically thin semiconductor. Nature 2020;587 (7832):72-7.
- [15] Frankel F, Reid R. Big data: distilling meaning from data. Nature 2008; 455 (7209):30.
- [16] Pei J, Deng L, Song S, Zhao M, Zhang Y, Wu S, et al. Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture. Nature 2019; 572(7767): 106–11.
- [17] Kuang K, Li L, Geng Z, Xu L, Zhang K, Liao B, et al. Causal inference. Engineering 2020;6(3):253-63.