

微波光子与多学科交叉融合的前景展望 (特邀)

李 明^{1,2,3}, 郝腾飞^{1,2,3}, 李 伟^{1,2,3}

1. 中国科学院半导体研究所 集成光电子学国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049;
3. 中国科学院大学 材料科学与光电研究中心, 北京 100049)

摘 要: 微波光子学可借助光电子器件实现微波信号的产生、处理、接收和分配等功能, 具有宽带、低传输损耗、轻重量、快速可重构及抗电磁干扰等优势。随着微波光子学的理论方法和技术应用的不断发展, 微波光子与多学科交叉融合成为其核心发展方向。文中对微波光子与部分学科交叉融合的现状进行了总结, 并对微波光子与激光技术、集成光电子学、量子技术和人工智能等前沿学科的交叉融合进行了展望。

关键词: 微波光子学; 激光技术; 集成光电子学; 集成微波光子学; 量子技术; 人工智能
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211042

Prospects of cross research between microwave photonics and multidiscipline (*Invited*)

Li Ming^{1,2,3}, Hao Tengfei^{1,2,3}, Li Wei^{1,2,3}

1. State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Microwave photonics can be used for the generation, processing, receiving and distribution of microwave signals based on optoelectronic devices, with advantages such as broad bandwidth, low loss, light weight, fast reconfigurability and immunity to electromagnetic interference. With the rapid development of the theory and technology of microwave photonics, cross research between microwave photonics and multidiscipline has been the key of its direction of development. The research status of cross research between microwave photonics and some disciplines was summarized, and prospects of cross research between microwave photonics and disciplines such as laser technology, integrated optoelectronics, quantum technology and artificial intelligence were provided.

Key words: microwave photonics; laser technology; integrated optoelectronics; integrated microwave photonics; quantum technology; artificial intelligence

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB2201902, 2018YFB2201901, 2018YFB2201903); 国家自然科学基金 (61925505)

作者简介: 李明, 男, 研究员, 博士, 主要从事全光信号处理、微波光子学等方面的研究。

微波光子学^[1-2]是微波技术与光子技术交叉融合形成的一门学科,具有宽带、低传输损耗、轻质量、快速可重构及抗电磁干扰等优点,在国防、通信网络、成像和现代仪器等领域具有广泛的应用价值。

近些年来,微波光子学的理论方法和技术应用都有了长足的进步,未来微波光子学发展的核心方向之一是与多学科的交叉融合。一方面,微波光子学本身即为微波技术与光子技术交叉融合的产物,通过进一步的多学科交叉融合,有望发现微波和光波与其他物理场相互作用的新机理,并探索微波和光波间相互转

换与操纵的新方法;另一方面,多学科的交叉融合有望进一步提升现有微波光子器件和系统的性能,满足高性能无线通信、雷达、电子侦测、测量和传感等系统对微波光子技术的迫切需求。如图 1 所示,在科学层面上,微波光子有望从光与微波的交叉融合,发展到更广义的学科交叉融合与相互借鉴,包括光、电、力、磁、声、量子等,拓展知识边界;在技术层面上,有望发展出与 IP/工艺弱相关的“光子/光电面包板”和“微波光子芯粒”技术,寻求限制条件下的性能最优,并实现快速开发。

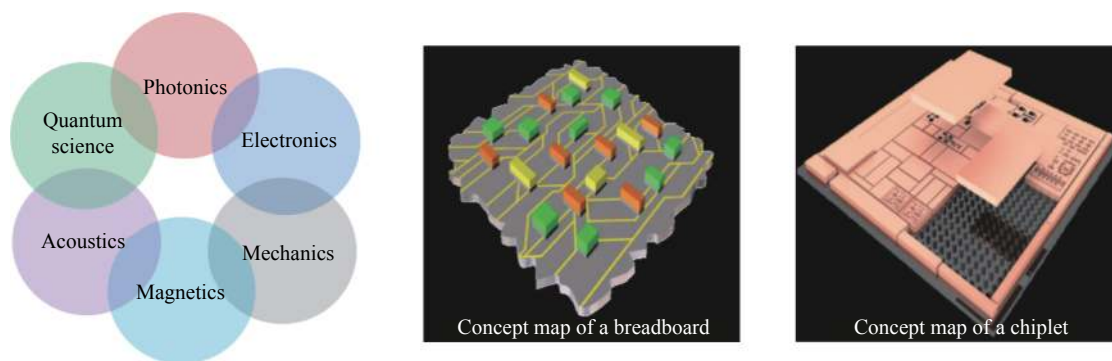


图 1 微波光子与多学科交叉融合示意图

Fig.1 Sketch map of cross research between microwave photonics and multidiscipline

例如,通过与激光技术的进一步交叉融合,激光技术中对光信号进行调控的机理与手段有望应用于微波光子学中,形成对微波信号进行调控的新方法和新手段;通过与集成光电学的交叉融合,可实现微波光子器件和系统的集成化、小型化、低功耗和高稳定性,进一步推动微波光子技术向实用化的方向发展;微波光子学还可以与量子技术、人工智能等前沿学科进一步交叉融合,有望构建新型微波光子器件和系统,并进一步提升现有微波光子器件和系统的性能。

近些年来,微波光子学在与激光技术的交叉融合方面取得了显著的进展^[3-7]。如图 2 所示为微波光子学与激光技术融合的三个典型案例。可以看到,通过借鉴傅里叶域锁模、宇称-时间对称和光参量振荡器等激光产生技术,可分别构建新型傅里叶域锁模光电振荡器、宇称-时间对称光电振荡器和光参量振荡器等。

事实上,微波光子学的迅猛发展主要集中在最近的 30 多年,而激光技术相对于微波光子学有几十多年的先发优势。激光技术与微波光子学的交叉融合

仍大有可为,有望继续借鉴光域丰富的信号调控的机理与手段,探索微波光子信号调控的新方法,在任意波形微波信号产生、宽带复杂微波信号处理和微波与光波的互相作用等领域取得新的突破。

微波光子学与集成光电子学的交叉融合也吸引了研究人员越来越多的关注,由此形成的集成微波光子学^[8]是微波光子继续向前发展并进一步迈向实用化的必然方向。如图 3 所示为微波光子与集成光电子学融合的一些典型案例,包括集成微腔光学频率梳、集成微波光子雷达、集成微波光子滤波器和集成光电振荡器等^[9-13]。

微波光子学与集成光电子学的交叉融合的趋势首先是实现关键微波光子器件的高性能集成,包括激光器、电光调制器、光电探测器、光放大器、光延迟线、光滤波器等,因为这些器件的性能往往决定着整个微波光子系统的性能。可通过设计新型器件结构、探索新的材料体系和工作机理等方法进一步提升这些器件的性能。此外,实用化的微波光子系统通常包含多种微波和光电子器件,因此光电子与微电子融合

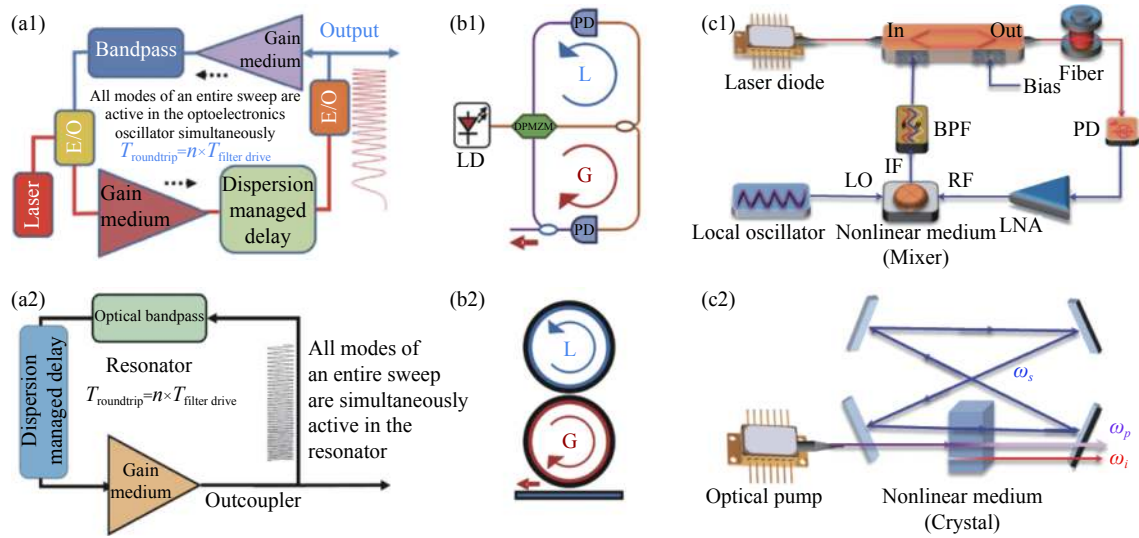


图 2 微波光子与激光技术融合的典型案例。傅里叶域锁模光电振荡器 (a1)^[3]和激光器 (a2)^[4]; 宇称-时间对称光电振荡器 (b1) 和激光器 (b2)^[5]; 光电参量振荡器 (c1) 和光参量振荡器 (c2)^[6]

Fig.2 Fused examples of microwave photonics and laser technology. Fourier domain mode locked (FDML) optoelectronic oscillator(a1)^[3]and laser(a2)^[4]; (b) Parity-time (PT) symmetric optoelectronic oscillator (b1) and laser (b2)^[5]; Optoelectronic parametric oscillator (c1) and optical parametric oscillator (c2)^[6]

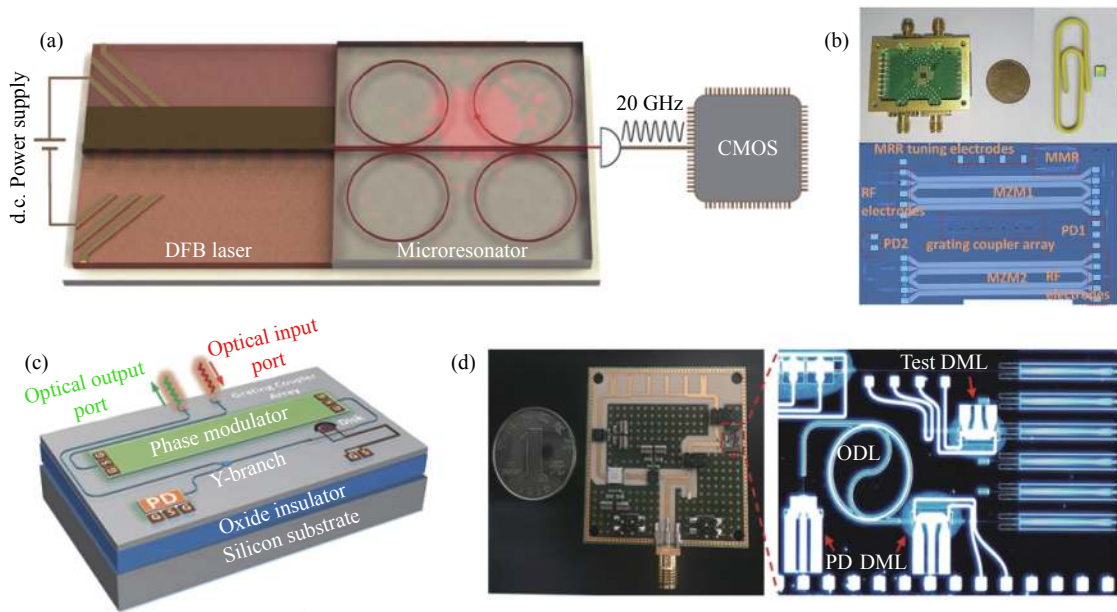


图 3 微波光子与集成光电子学融合的典型案例。(a) 集成微腔光学频率梳^[9]; (b) 集成微波光子雷达^[10]; (c) 集成微波光子滤波器^[11]; (d) 集成光电振荡器^[13]

Fig.3 Fused examples of microwave photonics and integrated optoelectronics. (a) An integrated soliton microcomb^[9]; (b) An integrated microwave photonic radar^[10]; (c) An integrated microwave photonic filter^[11]; (d) An integrated optoelectronic oscillator^[13]

集成也是微波光子学与集成光电子学交叉融合的必然趋势。光电子与微电子的融合集成有望通过引线互连型光电集成、单片光电集成和异质异构混合光电集成^[14-15]等手段完成,可实现集成化、小型化、低功

耗和高稳定性的微波光子系统。

微波光子学与量子技术的交叉融合是微波光子新兴的发展方向,有望克服微波光子现有的技术瓶颈,实现高速率、高灵敏度的量子微波光子系统^[16]。

目前,微波光子系统所需处理的信号带宽逐渐增大,且系统带宽与可探测的最低光功率的矛盾限制了兼具高速率与低功率探测能力的微波光子系统的研发。随着量子技术迅猛发展,光量子技术保证了对极低光功率的单光子信号处理的能力,且光子系统中低抖动单光子探测器可以实现对光子信号的高分辨率探测。因此,量子技术与微波光子技术的融合有望实现对超低功率、高速率信号的探测。此外,通过微波光子技术与量子技术的融合,可将经典微波信号、经典光信号和量子光信号有机的结合,探索非经典微波和光信号的产生、处理方式及其可能的应用场景。

微波光子与人工智能的交叉融合同样是新兴的微波光子技术方向,可利用人工智能的手段优化微波光子系统的综合性能^[17]。从广义上讲,人工智能是人工制造的机器展现出的智能,拥有智能学习与判决的能力。微波光子学与生俱来的高中心频率、快速可重构和宽带信号处理能力可与光神经网络等人工智能方案或算法结合,利用人工智能赋能微波光子器件和系统,实现微波光子器件和系统的智能优化或自主学习。

目前,微波光子与人工智能交叉融合的研究总体上处于起步阶段。通过对该方向的继续探索,有望将微波光子学的优势与人工智能技术充分融合,形成基于人工智能的新型高性能微波光子器件和系统。

随着微波光子学的理论方法和技术应用的不断发展,微波光子与多学科交叉融合成为其核心发展方向之一。通过微波光子学与更广义的学科交叉融合与相互借鉴,包括光、电、力、磁、声、量子等,有望发现微波和光波与其他物理场相互作用的新机理,探索微波和光波间相互转换与操纵的新方法,拓展知识边界;微波光子还有望发展出与IP/工艺弱相关的“光子/光电面包板”和“微波光子芯粒”技术,寻求限制条件下的性能最优并实现快速开发,进一步提升现有微波光子器件和系统的性能。

参考文献:

- [1] Yao J. Microwave photonics [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 314-335.
- [2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photon*, 2007, 1: 319-330.
- [3] Hao T, Cen Q, Dai Y, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator [J]. *Nature Commun*, 2018, 9: 1839.
- [4] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G. Fourier domain mode locking (FDML): a new laser operating regime and applications for optical coherence tomography [J]. *Opt Express*, 2006, 14: 3225-3237.
- [5] Liu Y, Hao T, Li W, et al. Observation of parity-time symmetry in microwave photonics [J]. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 38.
- [6] Hao T, Cen Q, Guan S, et al. Optoelectronic parametric oscillator [J]. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 102.
- [7] Ge Z, Hao T, Capmany J, et al. Broadband random optoelectronic oscillator [J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 5724.
- [8] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics [J]. *Nature Photon*, 2019, 13: 80-90.
- [9] Shen B, Chang L, Liu J. et al. Integrated turnkey soliton microcombs [J]. *Nature*, 2020, 582: 365-369.
- [10] Li S, Cui Z, Ye X, et al. Chip-based microwave-photonic radar for high-resolution imaging [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2020, 14: 1900239.
- [11] Zhang W, Yao J. A silicon photonic integrated frequency-tunable microwave photonic bandpass filter[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics, 2017.
- [12] Tang J, Hao T, Li W, et al. Integrated optoelectronic oscillator [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 12257-12265.
- [13] Hao T, Tang J, David D, et al. Toward monolithic integration of OEOs: From systems to chips [J]. *J Lightw Technol*, 2018, 36: 4565-4582.
- [14] Liu S, Khope A. Latest advances in high-performance light sources and optical amplifiers on silicon [J]. *J Semicond*, 2021, 42: 041307.
- [15] Guo X, He A, Su Y. Recent advances of heterogeneously integrated III-V laser on Si [J]. *J Semicond*, 2019, 40: 101304.
- [16] Yang Y, Jin Y, Xiang X, et al. Quantum microwave photonics[J]. arXiv, 2020: 2101.04078.
- [17] Xu S, Zou X, Ma B, et al. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion [J]. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 66.