

## 面向信号与信息智能处理的光电融合与集成技术 (特邀)

邹卫文, 马博文, 徐绍夫, 邹秀婷

(上海交通大学 电子信息与电气工程学院 区域光纤通信网与新型光通信系统  
国家重点实验室 智能微波光波融合创新中心, 上海 200240)

**摘要:** 传统的信号、信息处理流程相对独立且繁琐,人工智能 (AI) 技术通过引入“信号变换+信息识别”的处理策略,提升了整体处理的智能化水平。然而,未来应用中信号与信息高度密集,要求更高的系统能效、更灵活的决策能力。文中提出了通过光电融合与集成技术有望实现信号与信息兼容一体的新型处理范式:利用光子与电子技术在电磁尺度、物理性质、实现方法等层面的互补优势,针对信号与信息整体进行直接处理,并且具有融合深层智能技术的潜力。回顾了光电融合形式下的新兴信号与信息处理体制,指出了光电混合集成对光电融合处理技术的重要支撑意义。

**关键词:** 光电融合与集成技术; 光电智能处理技术; 光电混合集成技术

**中图分类号:** O438      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20211043

## Optoelectronic harmonized integration technology for intelligent processing of signal and information (*Invited*)

Zou Weiwen, Ma Bowen, Xu Shaofu, Zou Xiuting

(Intelligent Microwave Lightwave Integration Innovation Center (imLic), State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Traditional signal and information processing technologies are relatively independent and complicated. Artificial intelligence (AI) technology introduces a processing scheme of signal conversion plus information recognition to improve the level of intelligence in system processing. However, a high intensity of signals and information in future applications demand for more efficient systems and more flexible decision-making capabilities. It was proposed that optoelectronic integration technology was promising to realize the processing of signal and information as a new processing paradigm. Taking the complementary advantages of photonic and electronic technologies in electromagnetic scales, physical advantages, and practical implementations, overall and direct processing of signal and information was achieved and had the potential to integrate deeper levels of intelligence technology. Emerging signal and information processing paradigms enabled by optoelectronic integration were reviewed. The supportive significance of optoelectronic hybrid integration on optoelectronic integration processing technology was demonstrated.

**Key words:** optoelectronic integration technology; optoelectronic intelligent processing technology; optoelectronic hybrid integration technology

收稿日期:2021-04-11; 修订日期:2021-05-10

基金项目:国家重点研发计划 (2019YFB2203700); 国家自然科学基金 (61822508)

作者简介:邹卫文,男,教授,博士,主要从事光电融合与集成方面的基础和应用研究。

智能技术的兴起推动着信号与信息处理策略发生深层次的范式转变。图 1(a) 给出了信号与信息处理策略的发展趋势示意图。如图 1(b) 所示,传统的信号与信息处理体系相对独立,往往涉及到多次的初级变换与提取操作才能获得有价值信息,导致综合决策的效率较低。近年来,人工智能(AI)技术凭借强大的特

征学习与高效的信息识别能力,能够直接实现复杂的处理目标,大大简化了传统处理流程。图 1(c)~(d) 表明了“信号变换+信息识别”的顺序处理策略。尽管光子辅助的 AI 加速技术能够缓解部分信息域中的处理压力<sup>[1]</sup>,但是 AI 高昂的训练成本与受限的处理灵活性使其仍难以用于复杂的决策任务。

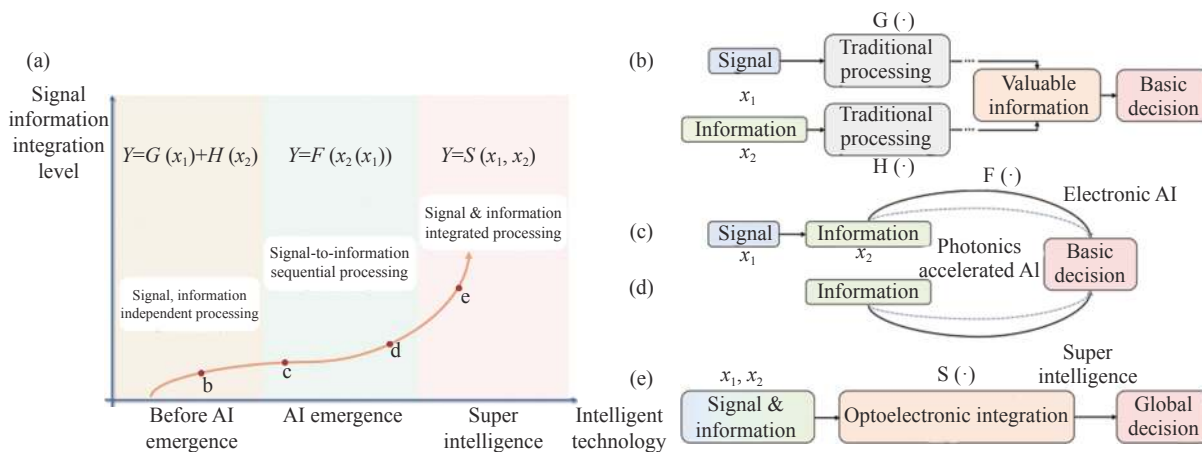


图 1 信号与信息融合处理的发展趋势 (a) 与策略 (b)~(e) 示意图。图 (b)~(e) 分别对应图 (a) 中的 b~e 阶段点

Fig.1 Schematics of the trend (a) and the schemes (b)~(e) of the integrated processing for signal and information. Figures (b)~(e) correspond to the b-e stages pointed out in Fig. 1(a), respectively

未来,在 5G/6G、国防等复杂应用场景中,信号与信息相互交织且动态变化,将给处理系统带来严峻的挑战:例如,信号输入速率与处理复杂度的增长速度越发难以匹配,系统处理效率与处理功能多样性的矛盾越发突出,高级信息的获取与整合评估越发困难。因此,如图 1(e) 所示,信号与信息处理必将迈向兼容一体的“融合处理”策略:在不同尺度上对信号与信息进行直接处理,打破单一的处理模式并构建灵活的信号/信息通路,大幅提升系统的紧凑度与处理效率,同时,深度融入高速发展的智能技术,为全局决策目标提供实时、灵活的决策能力。然而,传统的电子学方法电磁尺度有限,并且存在固有的能效瓶颈,仅仅依靠电子处理系统难以支撑信号与信息高效兼容的融合处理。

带来信号尺度的广域扩展。电磁频谱应用正在向太赫兹 (THz) 延伸,密集的频谱通道将成为包罗万象的信息库。让信号“进得来”才能“看得清”,光与电的融合将带来全频谱覆盖的处理能力;其次,光子与电子的物理优势确保在信息尺度上的灵活调控。光子流水式处理速率高,电子精细化处理易操控,相互借力的同时融合深层的智能技术,有望满足高度复杂的处理需求;最后,光子与电子技术在芯片制备上同样具备融合潜力。芯片尺度上光子与电子技术能效互补、成熟度互补,有望突破处理效率与密度瓶颈,实现高效的智能化处理系统。

光电融合与集成技术有望引领信息与信号处理策略在电磁尺度、物理优势、实现方法等不同层面的融合突破。如图 2 所示,“集成技术”包含功能集成与芯片集成,是突破系统可靠性、稳定性、实用性的基础,“光电融合”凸显系统的灵活配置,充分发挥光子与电子技术的互补优势:首先,光子与电子融合能够

近年来,光电融合的趋势推动了传统处理体制的变革,涌现出了全新的处理模式与功能,促进了光电混合集成技术的突破发展。利用有效的电子控制方法,传统单一功能的光子信号处理系统正在朝着可编程、多功能、高效率的方向不断发展<sup>[2]</sup>,为光电融合的智能化信号处理提供支撑;将成熟的光子和电子处理系统进一步有效衔接,显著提高了光电融合下的系统处理性能: Xu 等人将 AI 技术应用于光模数转换 (PADC) 系统,实现了有效比特位数的跨越式提升<sup>[3]</sup>;多学科交

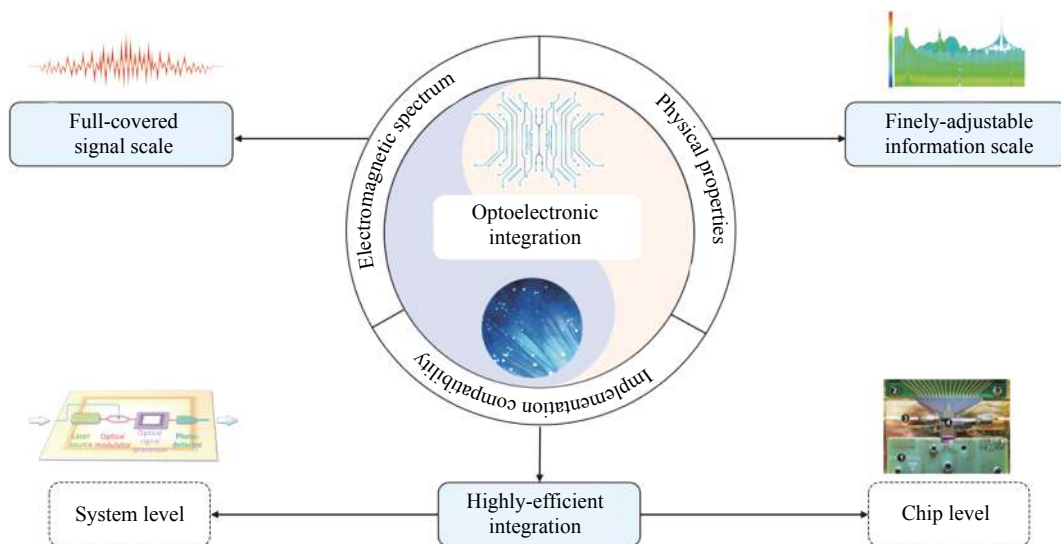


图 2 光电融合与集成技术示意图

Fig.2 Schematic of optoelectronic integration technology

又下的新兴处理原理更是为光电融合提供了丰富的系统形态,通过将光电子技术深度融入神经网络计算、神经拟态处理等体制,实现了处理能效与能力的突破。光子技术能够实现流水式的零功耗神经网络运算<sup>[4]</sup>,提供高速率的神经拟态动力学响应<sup>[5]</sup>,而电子技术擅长灵活精细的调控,实现了非线性激活<sup>[6]</sup>、反馈控制<sup>[7]</sup>等功能,上述光电融合处理技术具有智能化提取高级信息的潜力。光电混合集成技术旨在突破光电器件的材料、工艺、结构兼容性挑战,可分为单片同质集成与异质集成路线:Atabaki 等人提出基于硅基材料构建光电集成芯片的方法<sup>[8]</sup>;Wang 等人通过外延生长在硅基衬底上制备了单片 III-V 族-硅基激光器<sup>[9]</sup>。单片异质集成能够充分发挥不同材料体系的优势,优化功能器件的性能,但是带来了材料兼容性的挑战。混合异质集成的方式虽然能够避免材料间的晶格失配,降低工艺难度,但是牺牲了部分集成度。未来,不断成熟的光电混合集成技术将支撑光电融合处理的高效片上实现。

综上,光电融合与集成技术具有独特的物理性质、实现方法优势,有望满足不同尺度下的信号与信息智能化融合处理需求。随着光电融合的新兴处理体制、光电混合集成等研究取得突破,迫切需要挖掘并建立深层次的智能融合处理原理及评估体系,同时深度聚焦规模化光电集成系统中的关键挑战,兼顾工艺方法实现与芯片整体性能。

参考文献:

- [1] Shastri B J, Tait A N, Lima T F, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 102-114.
- [2] Bogaerts W, Perez D, Capmany J, et al. Programmable photonic circuits [J]. *Nature*, 2020, 586: 207-216.
- [3] Xu S, Zou X, Ma B, et al. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion [J]. *Light: Science & Applications*, 2019, 8: 66.
- [4] Shen Y, Harris N, Skirlo S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11: 441-447.
- [5] Feldmann J, Youngblood N, Wright C, et al. All-optical spiking neurosynaptic networks with self-learning capabilities [J]. *Nature*, 2019, 569: 208-214.
- [6] Fard M, Williamson I, Edwards M, et al. Experimental realization of arbitrary activation functions for optical neural networks [J]. *Optics Express*, 2020, 28: 12138-12148.
- [7] Zhou T, Lin X, Wu J, et al. Large-scale neuromorphic optoelectronic computing with a reconfigurable diffractive processing unit [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 367-373.
- [8] Atabaki A, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip [J]. *Nature*, 2018, 556: 349-354.
- [9] Wang Z, Tian B, Pantouvaki M, et al. Room-temperature InP distributed feedback laser array directly grown on silicon [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 837-842.