

微波光子集成及前沿展望 (特邀)

李 明^{1,2,3}, 郝腾飞^{1,2,3}, 潘时龙⁴, 邹喜华⁵, 恽斌峰⁶, 邹卫文⁷, 李 伟^{1,2,3}, 闫连山⁵

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;
4. 南京航空航天大学 电子信息工程学院, 江苏 南京 211106;
5. 西南交通大学 信息科学与技术学院, 四川 成都 611756;
6. 东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096;
7. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 微波光子学是一门融合了微波技术和光子技术的交叉学科,是研究光波和微波在媒质中的相互作用以及在光频域实现微波信号的产生、处理、传输及接收的微波光波融合系统。由于现有的微波光子系统大多由分立器件组成,在体积、功耗、稳定性、成本等方面仍有待提升,因此集成化是微波光子技术发展的必然趋势。文中探讨了微波光子集成技术面临的主要科学与技术问题,总结了该技术的发展现状和前沿研究进展,并对其未来发展前景进行了展望。

关键词: 微波光子学; 集成微波光子学; 光电子学; 光电集成; 光子集成电路

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211048

Frontiers and prospects of integrated microwave photonics (*Invited*)

Li Ming^{1,2,3}, Hao Tengfei^{1,2,3}, Pan Shilong⁴, Zou Xihua⁵, Yun Bin Feng⁶, Zou Weiwen⁷, Li Wei^{1,2,3}, Yan Lianshan⁵

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;
4. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
5. School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
6. School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
7. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Microwave photonics is an interdisciplinary subject of microwave engineering and photonics technology. It is a fused microwave and optical system that studies the interaction between optical and microwave signals in the medium and the generation, processing, transmission, and receiving of microwave signals in the optical domain. Integration is an inevitable trend of microwave photonics since the performances of current discrete devices-based microwave photonic systems are poor in terms of size, power consumption, stability and cost. The main scientific and technical issues of integrated microwave photonics were discussed, its development status and frontier research progresses were summarized, and an outlook of its future prospects was given.

Key words: microwave photonics; integrated microwave photonics; optoelectronics; optoelectronic integration; photonic integrated circuit

收稿日期:2021-04-03; 修订日期:2021-05-25

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。

0 引言

微波光子学是融合了微波(射频)技术和光子技术的新兴交叉学科,基于光域实现对高频宽带微波信号的产生、处理、传输及接收,并以此为基础实现微波光波融合系统^[1]。微波光子技术充分发挥了无线灵活泛在接入和光纤宽带低耗传输的各自优势,可以实现单纯无线技术和光纤技术难以完成甚至无法完成的信息接入、处理与传输组网功能,具有带宽大、传输损耗低、重量轻、快速可重构及抗电磁干扰等优点,是未来信息处理与接入的必然发展趋势与有效解决途径。随着微波光子学的发展,在通信、传感、生物、医学、军事和安全等不同领域都可望凸显优势,尤其在 5G/6G/B6G 移动通信与无线接入^[2]、多波束光控相控阵雷达^[3]以及电子战系统^[4]中有着广泛的应用前景。

由于可利用光子技术的大带宽来突破传统射频系统的带宽瓶颈,微波光子学使高速感知和操控微波信号的时、频、空分布成为可能。随着智能化社会发展的不断深入,人类对射频信息系统能力和性能的需求不断提高,亟待在光波和微波的相互变换与操控机理,非线性的产生机理与抑制方法,以及光电磁热等多物理场的作用机理与调控方法上取得新进展和新突破。比如,随着无线通信不断向更高频段、更大带宽、更密集布站和更广域协同发展,迫切需要发展阵列微波光子互转换器件、阵列信号光纤稳相传输方法^[5]、阵列微波光子频率变换、分布式光控波束成形^[6]等微波光子新技术。而雷达正朝着高分辨率、高实时性、多功能一体、抗干扰、抗截获和高集成度等方向发展。但受电子瓶颈限制,目前工作带宽受限,实时信号处理困难,因而对低相噪基准信号光产生^[7]、宽带微波光子可重构波形产生^[8]、大动态模拟光链路、全光射频采样、全光模拟信号处理^[9]等微波光子技术提出新的发展需求。在电子侦测、测量与传感等场合中,要求测量范围越来越大、分辨率越来越高、误差越来越小、实时性越来越好,需要发展微波参与与光学参量单调映射机理、光电互转换中的非线性抑制方法、实时光傅里叶变换^[10]等微波光子新方法和新技术。

然而目前基于微波光子的链路和系统大部分都由分立的光电子器件和光纤构成,因此存在价格昂贵、功耗高、可靠性及稳定性差等缺点。要克服这些缺点,一个最为有效的途径就是采取类似集成电路的方法进行光子回路片上集成。通过集成和小型化,系统体

积和功耗将大幅降低,既避免了对每个器件单独进行封装的成本,还减小了器件间的耦合损耗,使得系统稳定性得到大幅提升。此外,集成化与小型化的微波光子器件/模块更能满足大规模阵列化应用需求^[11]。

集成化是目前微波光子技术发展的主要方向之一,也是微波光子技术走向实用化的前提,可望满足未来无线通信、仪器仪表、航空航天及国防等领域应用对带宽、安全性、探测精度、测量范围、体积、重量、功耗等要求。对集成微波光子技术从理论、关键技术到系统应用进行体系化研究,可有效降低本领域对国外的依赖,完善国内产业链,实现本领域的创新突破和自主可控。文中对微波光子集成技术进行了综述,探讨了该技术面临的主要科学与技术问题,总结了该技术的发展现状和前沿研究进展,并对其未来发展前景进行了展望。

1 面临的主要科学与技术问题

微波光子集成致力于研发宽带微波光子信号产生、传输、处理、接收的核心光电芯片与集成模块,提供小尺寸、低功耗、阵列化以及快速可重构智能化的微波光子系统实施方案,是微波光子学走向全面实用化的关键,也将成为未来空天地信息一体化网络、下一代宽带无线接入网以及雷达、电子对抗系统等的基础和核心技术。

经过 30 多年的发展,微波光子学在理论方法和系统方案层面都已经取得了长足进展,目前规模化工程应用的瓶颈主要集中在器件及系统的集成化。因此,微波光子面临的主要科学技术问题集中在芯片化与集成化领域。

(1) 微波光子单元芯片与单片集成技术。目前功能单元基本上都有相应芯片原型器件报道,如窄线宽半导体激光器芯片^[12]、高转换效率光电探测器芯片^[13]和高线性电光调制器芯片^[14],少量研究成果已实现产业转换。但一旦实施多类异构器件单片集成,无论是单元器件还是片上系统的性能与分立器件和系统相比处于劣势;而且单片集成度还较低,亟待加强技术与应用迭代。

(2) 异质异构微波光子集成技术。当前仍缺乏面向微波光子集成的新材料、新结构、新器件的系统性探究,以及缺乏片上多物理场(如光/电/热场)的有效调控机理与相互作用方法等支撑。一般意义上,多物理场的相互作用与调控是微波光子学的理论基础,包

括分辨率、动态范围、线性度、大带宽、低噪声、高稳定等极限指标几乎都需要立足这些基础理论去寻求解决途径^[15]。尤其突出的是在微波光子集成芯片流片制备过程中,光信号产生、传输、调控、处理和接收器件的最佳材料衬底和制造工艺差异很大,传统的单一材料和单一工艺体系无法满足未来微波光子集成与芯片的发展要求^[16]。因此,迫切需要发展微波光子系统单片集成、异质集成、混合集成、微组装等工艺技术,并解决不同材料体系的兼容与高效耦合问题,以及实现多种材料芯片的兼容制造与封装测试等。

(3) 面向泛在接入与一体化系统需求的微波光子集成技术。单一功能或固定功能的微波光子芯片可能无法满足未来泛在接入与一体化需求^[17],多波段、多通道、多功能、高重构性、高集成度、智能化的微波光子芯片与封装也是当前面临的巨大挑战。

2 国内外发展现状

微波光子集成芯片研究大致可以分为建模与设计、流片与封测、验证与实用化三个阶段。针对建模与设计平台、流片与封测阶段,目前欧美已联合构建了基本完善的仿真与设计工具软件体系、流片工艺平台与测试封装平台,并依托这些联合平台开发了一系列微波光子集成芯片,并即将替代微波光子系统中部分分立器件进入实用化阶段。目前我国仿真与设计的自主工具软件几乎为空白,而在芯片制备和封测方面,国内的工艺平台在数量、水平以及完整性方面与国外仍有较大差距,同时也缺乏较为完整的微波光子芯片测试封装研发平台。

2.1 微波光子单元器件发展现状

2.1.1 高功率低噪声半导体激光器发展现状

在高功率低噪声 DFB 激光器方面,国外主要研究机构有美国 Emcore、Infinera、EM4、Apic、JDSU 公司,法国 III-V 实验室、3Sphotonics 公司以及日本 Furukawa 公司等。针对微波光子传输应用的连续低噪声 DFB 激光器,美欧等国开展了大量研究工作,美国 Emcore 实现了输出功率 ≥ 100 mW, $RIN \leq -163$ dB/Hz 的半导体激光器;美国 Apic 公司实现了输出功率 ≥ 200 mW, $RIN \leq -165$ dB/Hz 的半导体激光器;法国 Thalès 公司实现了输出功率 ≥ 200 mW, $RIN \leq -163$ dB/Hz 的半导体激光器;美国林肯实验室报道了输出功率 370 mW, $RIN \leq -163$ dB/Hz 的半导体激光器。目前国内在 III-V 外延片制造技术主要集中在部分高校和科

研院所,如中国科学院半导体研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等,激光器研发以及产业化主要包括华为海思、海信宽带、南京大学、福建中科光芯、华兴激光等,探测器研发包括清华大学、中国科学院半导体研究所和中国电子科技集团第四十四研究所等,但是其主要产品主要还是光通信器件,在微波光子领域专用的高功率低噪声激光器、宽带高饱和光电探测器领域研发较少。在高功率低噪声半导体激光器方面,福建中科光芯公司成功研制了输出功率 ≥ 120 mW, $RIN \leq -163$ dB/Hz 的高功率低噪声半导体激光器;在高功率激光器阵列芯片领域,南京大学基于重构等效啁啾 (REC) 技术研制成功了 8 通道高功率激光器阵列芯片,输出功率 ≥ 100 mW。部分高功率低噪声半导体激光器的实物图如图 1 所示。

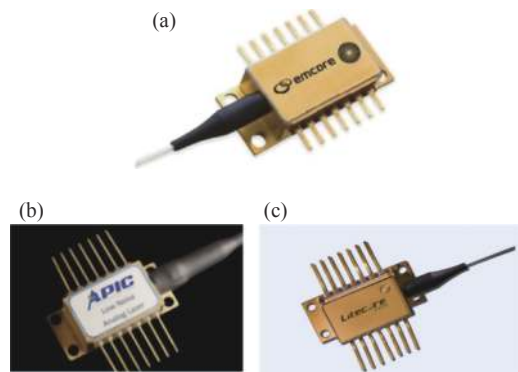


图 1 高功率低噪声半导体激光器。(a)~(c) 分别为美国 Emcore 公司^[18]、美国 Apic 公司^[19]和中科光芯公司^[20]的大功率低噪声半导体激光器

Fig.1 Semiconductor laser with high power and low noise. (a)-(c) are the semiconductor laser made by Emcore^[18] in the U.S.A., Apic^[19] in the U.S.A. and Z.K. Litecore^[20] in China, respectively

2.1.2 宽带低半波电压电光调制器发展现状

在宽带低半波电压电光调制器方面,国外主要的研究机构包括美国 EOspace 公司、法国 Photline 公司、美国 Oclaro 公司、日本 Fujitsu 公司、日本 NTT、德国 HHI、美国 Harvard 大学等。目前商用的传统铌酸锂电光调制器 3 dB 带宽可以达到 40 GHz,对应的半波电压 $V_{\pi} \leq 5$ V, $V_{\pi}L$ 为 20 Vcm;通过采用新型薄膜铌酸锂波导可以将电光调制器的 $V_{\pi}L$ 降低一个数量级,至 2 Vcm,并可以大大提高调制器带宽,目前已报道了超过 100 GHz 的薄膜铌酸锂调制器,但是其商用化还需要解决规模化生产工艺以及低插损、超宽带、高稳定的封装技术;另外,结合超高电光系数聚合物

材料和表面等离子体纳米光波导, 可以将电光调制器的 $V_{\pi}L$ 再降低两个数量级, 至 0.01 Vcm, 且目前已有带宽 ≥ 500 GHz 的电光调制器芯片报道^[21], 但该技术的商用化还需解决聚合物稳定性、规模化生产工艺以及低插损、超宽带的封装技术。另一方面, 针对微波光子模拟应用的高线性度需求, 国际上开展了基于 InP 的量子限制斯塔克效应和 SOI 波导非线性吸收效应的高线性度电光调制器研究, 实现了链路无杂散动

态范围 SFDR-120 dB·Hz^{2/3}。对于传统铌酸锂调制器, 国内主要研制单位有中国电子科技集团第四十四研究所和北京世维通科技公司, 产品目前能覆盖 18 GHz, 且已具备 30 GHz 调制器芯片研发能力; 对于薄膜铌酸锂调制器芯片, 国内目前研究单位有中山大学、华中科技大学、济南晶正科技 (主要从事铌酸锂薄膜材料制作) 等机构, 目前技术水平与国外哈佛大学、剑桥大学相当, 目前还没有产品化。图 2 给出了一些

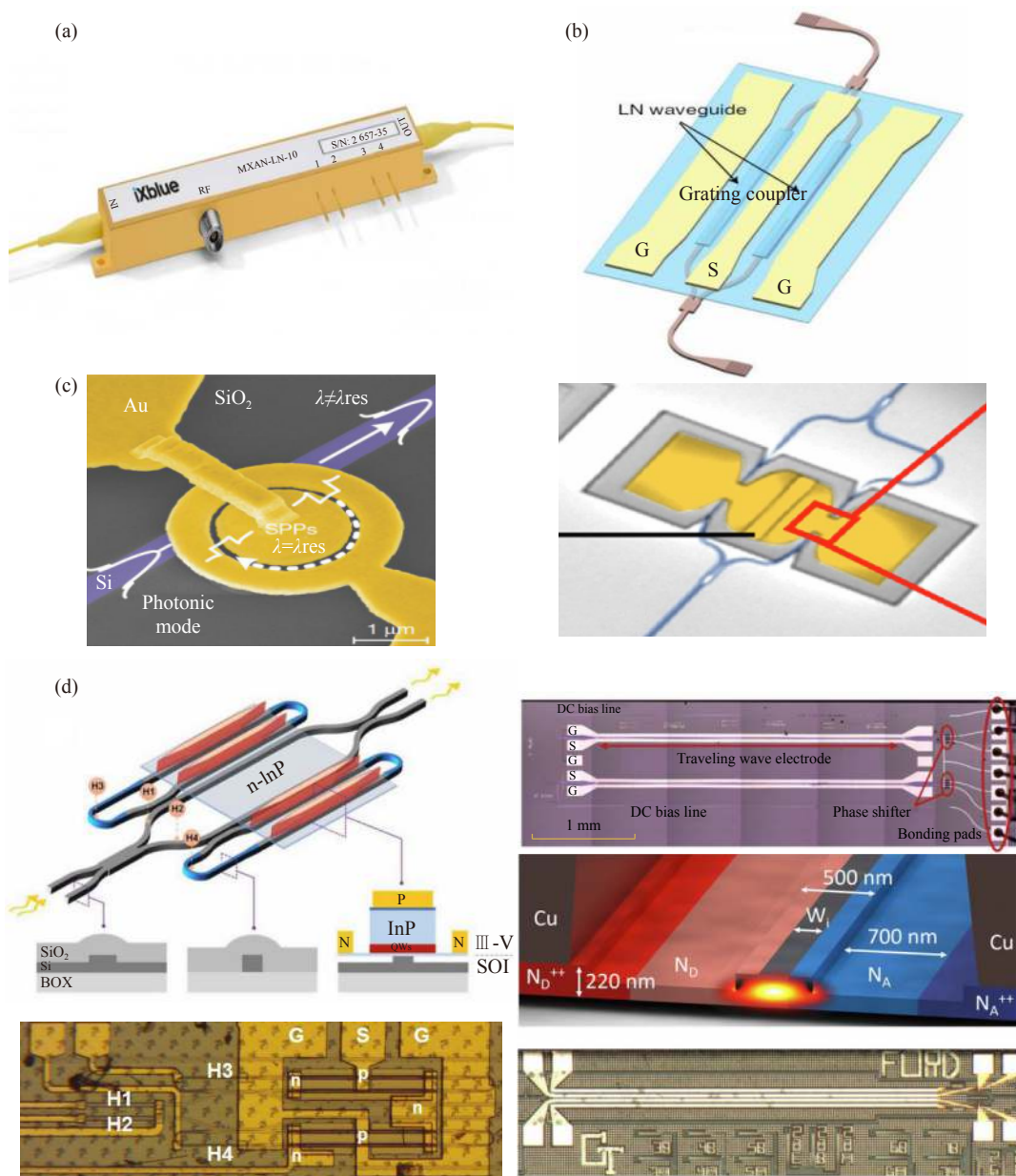


图 2 宽带低半波电压电光调制器。(a) 传统铌酸锂调制器^[22]; (b) 薄膜铌酸锂调制器^[23]; (c) 等离子体激元调制器^[14, 21]; (d) 高线性度 InP 和硅基电光调制器^[24-26]

Fig.2 Electro-optic modulator with broad bandwidth and low half-wave voltage. (a) Traditional lithium niobate modulator^[22]; (b) Thin-film lithium niobate modulator^[23]; (c) Plasmonic modulator^[14, 21]; (d) InP and silicon modulator with high linearity^[24-26]

典型的基于不同材料体系的宽带低半波电压电光调制器。

2.1.3 宽带高饱和光电探测器发展现状

在宽带高饱和光电探测器方面,国外主要的研究机构包括美国 Finisar、Lucent、Apic、Discovery,日本 NTT、法国 Alcatel 以及美国 Virginia 大学等。目前美国 Finisar(现已被 II-VI 公司收购)商用化的高饱和光电探测器带宽已经达到 100 GHz、饱和光功率 20 mW 的指标,实验室研发芯片指标已经达到带宽 200 GHz,未来传统的 InP 光电探测器带宽将覆盖 200 GHz 以

上,同时平衡光电探测器带宽也将覆盖 100 GHz 以上;为了与硅基光电集成融合,未来还将发展 InP on SOI 和 Ge on SOI 宽带高饱和光电探测器技术,目前 InP on SOI 和 Ge on SOI 光电探测器带宽已覆盖 70 GHz 和 40 GHz。国内宽带高饱和光电探测器研发包括清华大学、中国科学院半导体研究所、中国电子科技集团第四十四研究所等,中国电子科技集团第四十四研究所已成功研发带宽 40 GHz、饱和光功率 100 mW 的光电探测器产品。一些典型的宽带高饱和功率的光电探测器如图 3 所示。

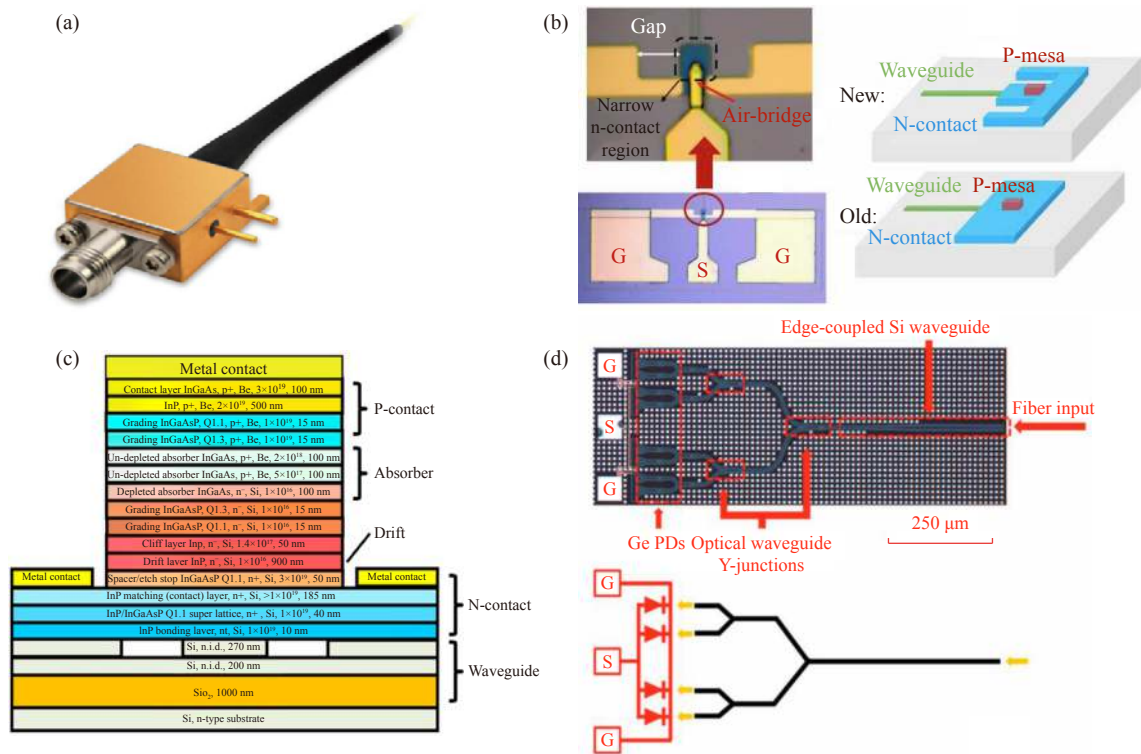


图 3 宽带高饱和光电探测器。(a) II-VI 公司的光电探测器产品^[27]; (b) InP 光电探测器产品^[28]; (c) InP on SOI 光电探测器芯片^[29]; (d) Ge on SOI 光电探测器芯片^[30]

Fig.3 Photodetector with high saturation power. (a) Product of photodetector by II-VI Incorporated^[27]; (b) Chip of InP photodetector^[28]; (c) Chip of InP on SOI photodetector^[29]; (d) Chip of Ge on SOI photodetector^[30]

2.2 微波光子集成芯片发展现状

2.2.1 波束控制与形成芯片

微波光子波束形成芯片主要用于相控阵天线的波束扫描,其真延时特性可以解决宽带应用场景下传统微波移相器引入的“斜视”效应。目前集成微波光子波束控制与形成芯片主要有两种结构:(1)基于路径选择的延时切换;(2)基于微环色散调控的延时

调谐。

对基于路径选择的延时切换方案,其优点是调制方案相对简单、瞬时带宽大、延时精度高,缺点是只能切换延时量,无法实现延时的连续调谐。Morton Photonics 公司推出了宽带可调波导光延时线器件(延时 535 ps@20 GHz 带宽,632 ps@10 GHz 带宽);2019 年,美国加州大学圣芭芭拉分校通过将光开关和延时

波导集成, 实现了如图 4(a) 所示的 4 通道氮化硅 5 bit 光开关切换延时芯片^[31], 用于 93 GHz (W-Band) 波束控制, 可以实现 $\pm 340^\circ$ 的波束角度偏转; 2017 年, 东南大学基于低损耗的大截面 SOI 光波导, 实现了光开关切换延时波导的 8 通道 7 bit 光开关切换延时芯片, 用于 8~12 GHz (X-Band) 波束控制, 可以实现 $\pm 52.5^\circ$ 的波束角度偏转; 2019 年, 东南大学通过将二氧化硅 AWG 和延时波导集成实现了如图 4(c) 所示的 8 通道 5.5 bit 的波长选择切换延时芯片^[32], 用于 8~12 GHz(X-Band) 波束控制, 可以实现 $\pm 52.5^\circ$ 的波束角度偏转; 2020 年, 上海交通大学通过将调制器、分束器、光开关、可调衰减器、探测器等单片集成, 实现了如图 4(d) 所示的硅光集成 8 通道 5 bit 波束控制芯片^[33], 用于 8~18 GHz 波束控制, 可以实现 $\pm 75^\circ$ 的波束角度偏转。

对基于微环色散调控延时方案, 其优点是延时可以连续调谐, 缺点是调制方案较复杂、带宽受限、驱动控制复杂。2014 年, 荷兰 Twente 大学基于低损耗氮化硅平台, 通过级联微环实现了如图 5(a) 所示的多波长可调延时芯片^[34], 用于 2~10 GHz 信号波束形成, 瞬时带宽达到 8 GHz, 结合波分复用技术可以实现 4x4 天线阵列的接收; 2017 年, 美国 UCSB 大学基于低损耗氮化硅平台, 通过级联微环实现了如图 5(b)

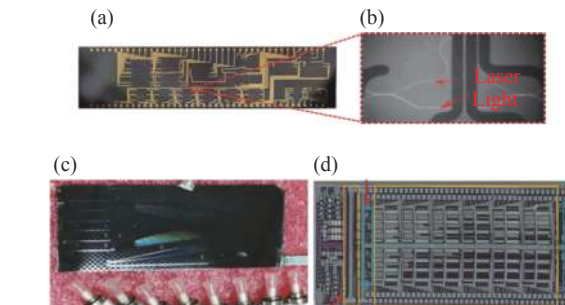


图 4 基于路径选择延时切换的波束形成芯片。(a) 氮化硅 4 通道 5 bit 延时芯片^[31]; (b) 二氧化硅 8 通道 5.5 bit 延时芯片^[32]; (c) 硅基 8 通道 5 bit 波束控制芯片^[33]
Fig.4 Beamformer chips based on path selection to switch different delays. (a) Silicon nitride 5-bit delay chip with 4 channels^[31]; (b) Silicon dioxide 5.5-bit delay chip with 8 channels^[32]; (c) Silicon 5-bit beam control chip with 8 channels^[33]

所示的 4 通道可调延时芯片^[35], 用于 80 GHz 信号的波束控制, 瞬时带宽达到 6 GHz, 结合波分复用技术可以实现 1x4 天线阵列的信号发射; 2018 年, 美国的 Texas A & M 大学基于 SOI 平台, 通过将调制器、分束器、级联微环和光电探测器单片集成, 实现了如图 5(c) 所示的 4 通道波束控制芯片^[36], 用于 30 GHz 信号的波束控制, 可以实现 $\pm 30^\circ$ 的波束角度偏转; 荷兰 SATRAX 公司推出了应用于智能天线系统的集成

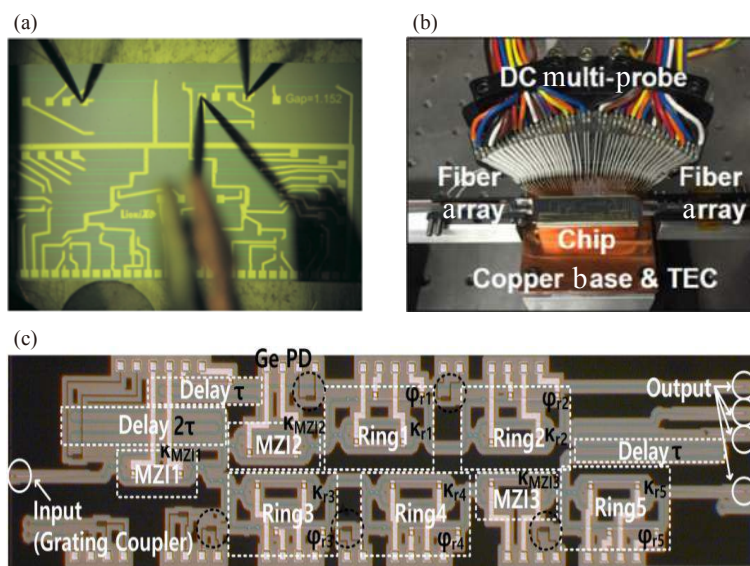


图 5 基于微环谐振腔色散调控的波束形成芯片。(a) 氮化硅多波长可调延时芯片^[34]; (b) 氮化硅 4 通道可调延时芯片^[35]; (c) 硅基 4 通道波束控制芯片^[36]

Fig.5 Beamformer chips based on dispersion tuning of microring resonators. (a) Silicon nitride multi-wavelength tunable delay chip^[34]; (b) Silicon nitride tunable delay chip with 4 channels^[35]; (c) Silicon beam control chip with 4 channels^[36]

光控波束成形芯片。

2.2.2 微波光子滤波芯片

集成微波光子滤波是将微波调制到光频域,通过集成光子芯片对光载宽带微波信号进行滤波,最后再经光电转换下变频到微波域从而实现滤波。相比传统的电学滤波器,微波光子滤波器具有可重构性能优异的优势,但在滤波精细度和稳定性方面有待提高。2016年,清华大学基于低损耗氮化硅平台,可调微环实现了如图 6(a)所示的频率调谐范围为 1~110 GHz、带宽约 420 MHz 的可调谐微波光子滤波^[37]; 2016年,悉尼大学采用 As_2S_3 波导的窄带受激布里渊散射(SBS)效应实现了如图 6(b)所示带宽调谐范围为 33~88 MHz 高频率分辨率的微波光子

滤波器,并实现了 1~30 GHz 的频率调谐^[38]; 2018年,澳大利亚悉尼大学采用 4 个级联氮化硅微环,结合优化控制算法调控微环的耦合系数和相位,实现了如图 6(c)所示带宽调谐范围为 300 MHz~25 GHz 可编程滤波^[39]; 2017年,渥太华大学在硅基平台上,将调制器、微盘、光电探测器单片集成,实现了如图 6(d)所示频率调谐范围为 3~10 GHz,带宽为 1.93 GHz 的微波光子可调谐滤波^[40]; 2016年,西班牙瓦伦西亚大学在 InP 平台,将激光器、调制器、微环、光电探测器等有源/无源器件单片集成,实现了如图 6(e)所示首个全单片集成的微波光子可重构滤波器^[41]。

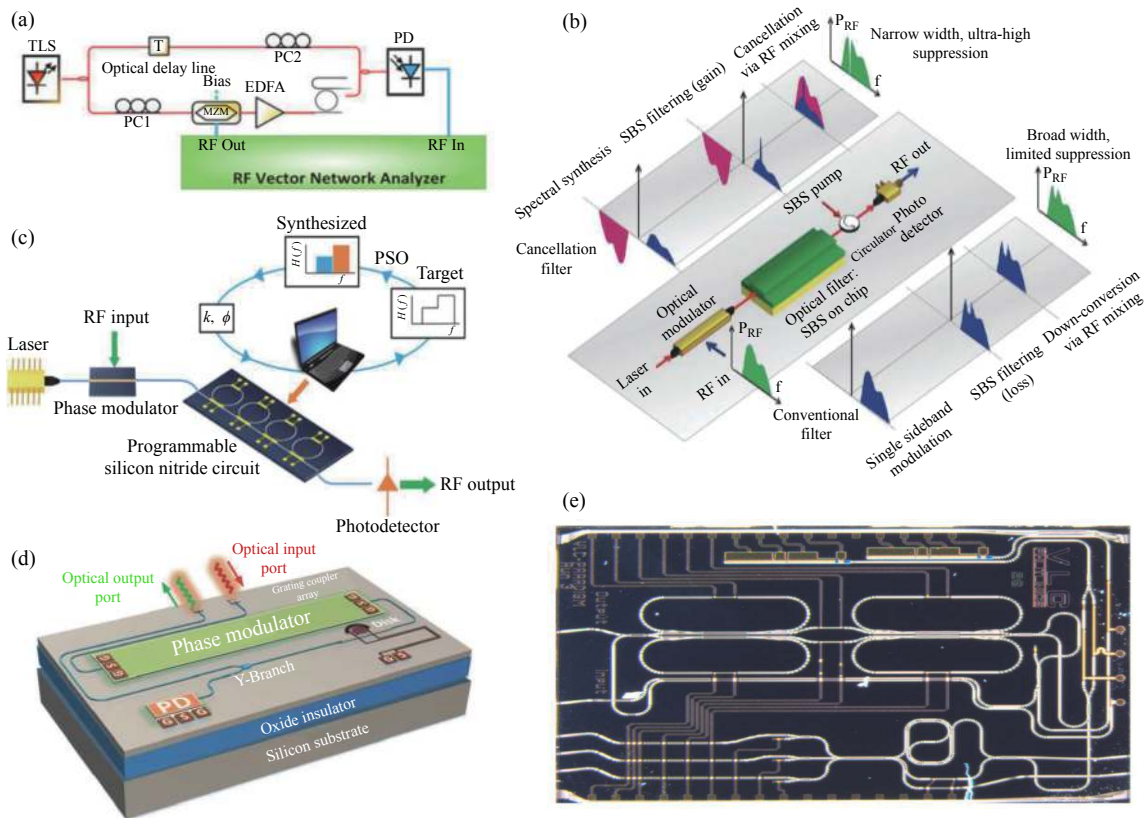


图 6 集成微波光子滤波器。(a) 基于氮化硅微环的微波光子滤波器^[37]; (b) 基于 SBS 效应的微波光子滤波器^[38]; (c) 基于级联氮化硅微环的微波光子滤波器^[39]; (d) SOI 单片集成微波光子滤波器^[40]; (e) InP 全单片集成微波光子滤波器^[41]

Fig.6 Integrated microwave photonic filters. (a) Microwave photonic filter based on silicon nitride microring resonator^[37]; (b) Microwave photonic filter based on SBS effect^[38]; (c) Microwave photonic filter based on cascaded silicon nitride microring resonators^[39]; (d) SOI integrated microwave photonic filter^[40]; (e) Monolithically integrated InP microwave photonic filter^[41]

2.2.3 微波光子信号产生芯片

集成微波光子信号产生是通过片上集成光电系

统产生微波信号,可以产生诸如频率可调谐微波信号、任意波形微波信号、宽带线性调频微波信号

等。相比传统电学微波信号产生,具有结构简单的优势。美国 OEwaves 公司研制出小型光电振荡器(频率范围 28~36 GHz,输出射频功率 5 dBm,相噪 -110 dBc/Hz@10 kHz),已经在无人机等小型军用平台上得到应用。2018 年,中国科学院半导体研究所基于 InP 平台,将直调激光器、延时线和光电探测器单片集成,实现了如图 7(a) 所示的输出频率约 7.3 GHz 的集成光电振荡器芯片^[42],相噪约为 -91 dBc/Hz@1 MHz;2018 年,加拿大渥太华大学基于 SOI 平台,将相位调制器、可调谐微环和光电探测器单片集成,实

现了如图 7(b) 所示的输出频率范围 3~7 GHz 的可调谐光电振荡器芯片^[43],相噪约为 -80 dBc/Hz@10 kHz;2015 年,美国普渡大学基于 SOI 平台,将调制器和微环阵列集成,实现了如图 7(c) 所示的可重构的任意波形合成与产生芯片^[44],信号频率可以达到 40 GHz;2016 年,加拿大渥太华大学基于 SOI 平台,将电光可调的线性啁啾波导光栅引入片上迈克尔逊干涉器,通过结合频谱整形和波长-时间映射实现了如图 7(d) 所示的线性调频信号产生芯片^[45]。

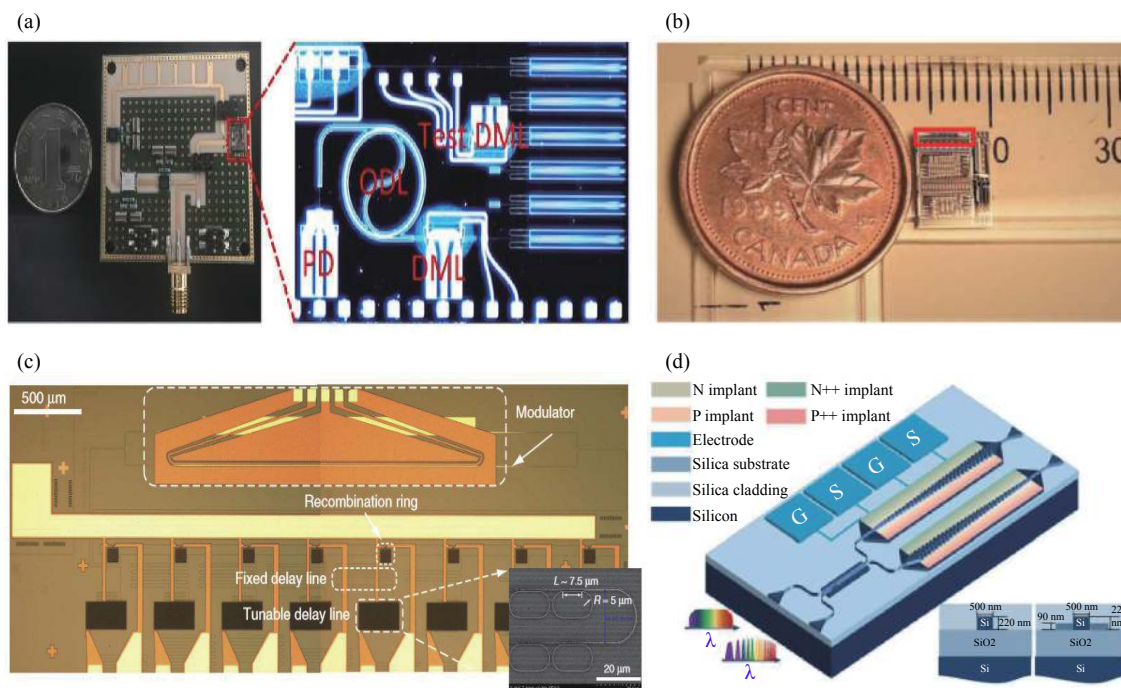


图 7 集成微波光子信号产生芯片。(a) InP 单片集成微波光子振荡器芯片^[42]; (b) SOI 集成微波光子振荡器芯片^[43]; (c) SOI 集成任意波形产生芯片^[44]; (d) SOI 线性调频信号产生芯片^[45]

Fig.7 Integrated microwave photonic signal generation chips. (a) InP monolithically integrated microwave photonic oscillator chip^[42]; (b) SOI integrated microwave photonic oscillator chip^[43]; (c) SOI integrated arbitrary microwave waveform generation chip^[44]; (d) SOI integrated chip for the generation of linearly chirped microwave signals^[45]

2.2.4 微波光子变频芯片

集成微波光子变频是通过片上光电集成实现微波信号上/下变频的芯片,相比传统电子变频系统,具有瞬时带宽大、线性度好和抗电磁干扰的优势。2016 年,美国麻省大学达特茅斯分校基于 InP 平台,将 DFB 半导体激光器、耦合器、非线性相位调制器、光电探测器调制器单片集成,制备了如图 8(a) 所

示的集成微波光子变频芯片^[46],实现了 200 MHz~4 GHz 微波信号至 20 MHz 的下变频, SFDR 约为 112 dB·Hz^{2/3};2020 年,美国佐治亚理工大学基于 SOI 平台,将双平行马赫-曾德调制器和平衡探测器单片集成,制备了如图 8(b) 所示的集成微波光子变频芯片^[47],实现了带宽为 11.2 GHz 的微波光子下变频, SFDR 约为 92 dB·Hz^{2/3}。

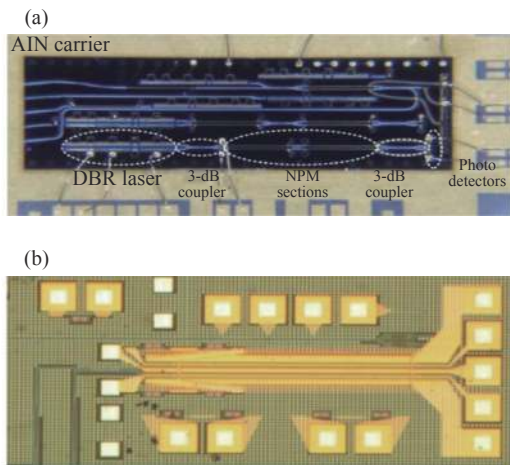


图 8 集成微波光子变频芯片。(a) InP 单片集成微波光子变频芯片^[46]；(b) SOI 集成微波光子变频芯片^[47]

Fig.8 Integrated microwave photonic frequency conversion chips. (a) InP monolithically integrated microwave photonic frequency conversion chip^[46]；(b) SOI integrated microwave photonic frequency conversion chip^[47]

2.2.5 光模数转换芯片

2012 年, 美国麻省理工学院通过将调制器、滤波器阵列、探测器阵列单片集成, 并和多通道低速 ADC 模块化封装实现了如图 9 所示的硅基集成光模数转换器, 实现了对 10 GHz 信号的模数转换^[48]; Rockwell Collinson 公司在 DARPA 的支持下研制高性能光子 ADC; Photonic Systems 公司推出了基于光子射频对消技术的高隔离度收发模块和光子辅助的 ADC。上海交通大学基于并行解复用架构^[49]结合频域测试分析方法^[50]和人工智能赋能手段^[51], 通过将调

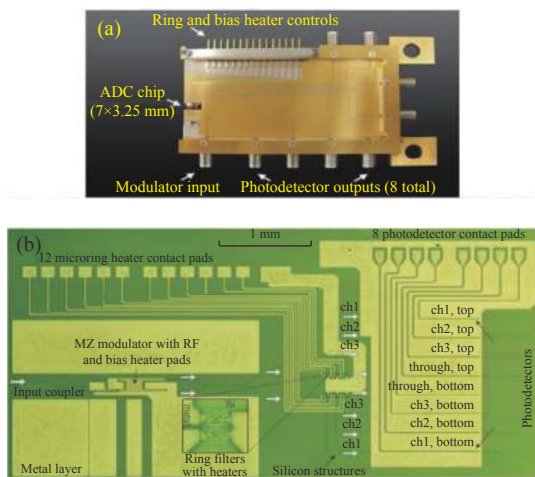


图 9 硅基光模数转换芯片^[48]

Fig.9 Silicon photonics analog to digital conversion chip^[48]

制器、可调延时线等单片集成, 实现了总采样率 40 GSa/s 的硅基集成光模数转换芯片。

2.2.6 可编程微波光子信号处理芯片

目前为止, 大多数围绕应用开发的微波光子信号处理芯片基本上是特定应用导向的专用微波光子信号处理芯片, 其实现的微波光子信号处理功能是固定不变的, 大大增加了芯片功能验证的成本。借鉴于集成电路中“FPGA”, 开发可编程光子集成芯片可以在同一个光电芯片上通过光路径的动态调控实现各种微波光子信号处理功能的片上重构, 可以大大降低芯片功能验证的成本, 同时可以实现具有多功能重构的微波光子信号处理。2017 年, 西班牙瓦伦西亚理工大学基于 SOI 平台, 通过将 30 个可调 2x2 马赫-曾德尔耦合器按照六边形拓扑结构单片集成, 实现了如图 10(a) 所示的可编程微波光子集成芯片, 并实现了滤波、延时等多种功能的重构^[52]; 2020 年, 加拿大渥太华大学基于 SOI 平台, 通过将 32 个可调谐微盘谐振腔和交叉波导耦合成网络拓扑结构, 实现了如图 10(b) 所示的可编程微波光子集成芯片, 并实现了滤波、延时、微分器、频谱整形等多种微波光子信号处理功能的重构^[53]。

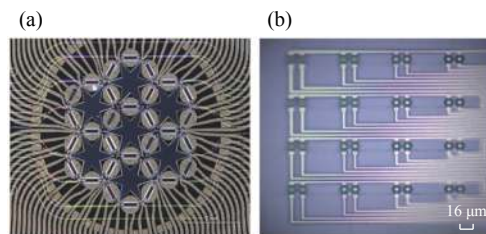


图 10 可编程微波光子信号处理芯片。(a) 基于可调 MZI 单元的集成可编程微波光子信号处理芯片^[52]；(b) 基于可调微盘的集成可编程微波光子信号处理芯片^[53]

Fig.10 Programmable microwave photonic signal processing chips. (a) Programmable microwave photonic integrated signal processing chip based on tunable MZI units^[52]；(b) Programmable microwave photonic integrated signal processing chip based on tunable microdisks^[53]

2.3 国外系统与应用发展现状

集成微波光子系统的研究包含架构设计、芯片制备、封装测试等, 是一个非常复杂的系统性工程, 难以由少量单位完成。目前国际上大多采用类似集成电路的发展模式, 专门机构从事芯片加工、封装技术的

研究,采用多项目晶圆的模式进行流片。欧盟和美国都已围绕微波光子集成芯片与器件构建了从芯片设计、制造、测试、封装的一体化研发平台,同时也构建了完善的研发机构联盟。

美国 DARPA 在 2004 年推出 EPIC (Electronic and Photonic Integrated Circuits on Si) 计划,研究硅基光电集成回路,并从 2007 年开始实施 UNIC (Ultra-performance Nanophotonic Intrachip Communication) 计划,继续对高性能硅基集成光互联进行研发。2015 年成立的美国集成光子研究所 (AIM-Photonics, 原称 IP-IMI) 旨在开发新型快速的光子集成制造技术和工艺方法,促进光子集成电路的设计、封装、测试与互连,构建从基础研究到产品制造的、全产业链集成光子生态平台,从而解决高动态范围、超低损耗、宽带光子集成芯片和微波频率电集成芯片的大规模制造难题。AIM-Photonics 由 55 家公司、20 所综合性大学、33 个学院、和 16 个非营利组织构成。欧盟的 Jeppix 和 ePIXfab 也打通了芯片设计、制造、封装与测试,实现了一体化的微波光子集成芯片与器件研发平台。

在面向雷达系统的集成微波光子技术研究方面,美国、欧洲、日本、俄罗斯等国家均开展了研究,其中意大利国家光子技术研究中心 PHODIR 项目于 2009 年底启动,研制出首台全数字微波光子雷达系统,已在微波光子雷达技术方面处于国际领先地位。而后在 2015 年 2 月,PHODIR 项目小组基于一个 MLL 将激光雷达系统和微波光子雷达系统集成起来,减小了硬件和功耗负担,提供了多角度环境感知的能力。同期,欧盟设立了 EWOCSS 项目,由 BAE 系统公司牵头,成功研制出微波光子电子战吊舱。

面向无线通信的微波光子集成技术也一直是欧洲重点发展的领域之一。在过去十余年中,欧盟连续资助了一系列研究项目用于支持微波光子的通信技术研究,在元器件、关键技术和系统架构方面均取得了显著的成果。欧空局 (ESA) 在基于微波光子技术的新型卫星载荷方面进行了大量研究。针对提升星上数据交换能力,ESA 开展了以光子技术为基础的 OTUS 计划,目的在于实现支持 Tb/s 级容量的交换技术,以支持星上包交换和突发交换应用。针对多波束的大容量通信卫星信号处理能力,ESA 进行了“微波和数字信号的光学处理”项目研究,利用微波光子技

术完成卫星转发功能,目前 ESA 已经完成了系统级的地面演示验证试验,并即将进行在轨实验。

2.4 国内发展现状

对于微波光子集成芯片设计仿真平台,国内起步较晚,华大九天通过多年积累研发的 Aether 设计工具具有微电子芯片的全链条仿真设计能力^[54];山东大学团队开发完成了光电子集成仿真设计工具;西南交通大学开发了微波光子系统传输仿真平台^[55];上海东骏公司的电磁仿真软件 EastWave 可进行微波器件和系统仿真^[56]。但国内目前还无完善的微波光子芯片仿真与版图设计软件。

对于微波光子集成芯片流片平台,目前国内 III-V 外延片制造技术主要集中在中国科学院半导体研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等高校和科研院所,但缺乏能实现基于 InP 材料体系的微波光子单片集成公共流片平台;国内铌酸锂高速电光调制器研究规模较小,目前能够小批量提供调制器产品,以中山大学为代表的铌酸锂薄膜调制器研究单位已达到国际先进水平^[23, 57];对于 SOI 硅光集成芯片平台,目前国内流片平台主要集中在科研院所,如上海微技术工业研究院的 8 inch (1 inch=2.54 cm) 硅光工艺平台等^[58],但硅光流片平台在工艺水平以及稳定性方面与国外一流机构还有较大差距,尤其是有源硅光芯片还有待突破。

对于微波光子封装测试平台,主要集中在激光器、探测器、调制器等单元器件的封装,具备了一些封装企业如苏州旭创、中国电子科技集团第四十四研究所等;在硅光集成芯片的封装领域,国内才开始起步,主要有中国电子科技集团第三十八研究所、清华大学等。但微波光子芯片封装还局限在基于单个材料平台研发芯片的封装,无法提供多个材料体系芯片的混合封装,另外在模拟高频封装、高速光电封装领域与国外有较大差距。

在系统应用层面,微波光子技术在我国宽带无线接入、国家重大工程、军民融合等领域的应用已经初具规模。

基于光纤无线融合传输的集中式基带池技术、面向大规模协作阵列天线的多域复用光载射频传输技术、大规模协作配置下时变光纤信道与空间信道联合

信道估计技术等被认为是未来 5G 网络的关键技术, 华为等企业已推出相应的技术方案, 代表性平台包括分布式智能光载无线通信与接入平台、面向高移动场景(高铁等)的宽带光载无线接入平台及 5G 外场基地等^[59-60]。

面向支撑多波束、多功能、可重构的通用卫星转发器应用需求, 北京邮电大学与中国电子科技集团第五十四研究所合作, 研制了信道带宽可变的微波光子混合柔性转发系统原理样机, 并交付中电集团进行天基信息基础设施地面演示验证。南京航空航天大学联合中国空间技术研究院航天五院、上海航天技术研究院成功构建了基于微波光子技术的多通道通信卫星载荷演示系统, 实现了四路无压缩高清视频信号的交换^[61]。

微波光子雷达方面, 中国科学院电子学研究所团队对雷达总体光子架构设计、雷达信号光子产生和光子压缩处理, 以及成像算法等关键技术进行了攻关, 在经过实验平台原理验证、微波暗室转台实验、系统集成联调和外场试验等一系列测试后, 成功实现了对空中随机目标(波音 737 飞机)的快速成像^[62]。上海交通大学利用一台锁模激光器同时实现了 Ka 波段宽带线性调频信号的产生和接收, 成功实现了高精度距离探测^[63]。

在稳相高精度微波光子天线阵列测控系统方面, 北京邮电大学微波光子学团队搭建了集成化、小型化、软硬件结合的高精度时频传递原理样机, 该样机在航天飞控中心的相关平台进行了相关验证, 成功采集了嫦娥三号卫星 X 波段信标信号^[64]。

3 总结与展望

未来微波光子集成芯片和系统在军事领域和民用市场都有巨大前景, 尤其是军用领域。由于现有微波光子系统(大多由分立器件组成)在体积、功耗、稳定性、成本等方面相比电子解决方案尚处于劣势, 因此, 集成化是微波光子实现追赶和超越传统电子系统的必由之路。针对未来主要应用场景(超宽带无线通信、空天地信息一体化、高性能新体制雷达以及电子战等), 迫切需要解决微波光子集成器件和功能芯片乃至集成系统在仿真与设计、流片与封测等阶段的关

键问题。

(1) 单一功能器件的集成。微波光子系统核心器件包括半导体激光器、电光调制器以及光电探测器。进一步提升这些核心器件在功率、噪声、带宽、插损方面的性能, 并提高芯片集成度和产业化, 是未来研究工作的关键所在。例如, 亟需研发高功率、低噪声、窄线宽的半导体激光器芯片^[12], 宽带、高饱和光功率和高响应度的光电探测器阵列芯片^[13], 以及宽带、低半波电压、高线性度的电光调制器阵列芯片^[14]。这些将有助于集成微波光子芯片的功能单元种类不断增加、性能不断提升, 从而逐步替代传统系统中的各类核心电子组件, 为微波光子集成芯片的实用化和产业化奠定坚实基础。

(2) 光电融合的功能芯片集成。在集成化微波光子芯片研发过程中, 必须高度重视光电子与微电子融合集成^[16]。结合强大的微电子集成技术基础, 构建从单一材料体系向多材料体系混合集成的高集成度微波光子集成芯片研发模式^[16], 从光子集成向光子-微波混合单片集成的微波光子功能芯片推进。重点研发异质混合集成的微波光子芯片, 实现高功率低噪声激光源、高效电光调制器和高饱和、光电探测器的单片集成, 实现光电混合封装与测试、大规模芯片驱动与控制关键技术等。与此同时, 大力研究新材料、新结构、新机制, 对片上的光、电、热串扰进行有效消除或抑制, 大幅度提升集成化规模。

(3) 多功能、多通道、可重构的系统化集成。研发面向不同应用场景的功能集成芯片, 包括集成化波束形成、光子模拟信号处理、光电振荡器、光频梳、任意波形产生、混频与对消、光模数转换、模拟信号光电收发、光纤稳相稳时传输芯片与模块等^[65-68]; 并提升不同功能的芯片和单元组件的集成化程度, 实现微波光子多功能集成发展。同时, 逐步研发多通道多波段的芯片和阵列化封装技术, 满足大规模阵列化需求。在此基础上, 通过多芯片微组装的混合集成实现小型化微波光子系统, 推进微波光子模块的系统应用。此外, 为提高芯片的通用性, 通过众多有源或无源可调谐单元器件大规模网络化集成^[69-70], 研发功能可重构的微波光子集成芯片, 实现片上通用微波光子信号处理和运算功能(如光子 FPGA、模拟光子计算

机等)^[17]。

(4) 智能化的微波光子集成。在多功能、阵列化和可重构集成的基础上,微波光子集成芯片还可以与人工智能深度融合^[71]。基于人工智能算法和方案赋能微波光子集成芯片和系统,从而推动微波光子技术综合性能提升和实用化进程。

参考文献:

- [1] Yao J. Microwave photonics [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27: 314-335.
- [2] Liu C, Wang J, Cheng L, et al. Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32: 3452-3460.
- [3] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507: 341-345.
- [4] Ghelfi P, Scotti F, Onori D, et al. Photonics for ultrawideband RF spectral analysis in electronic warfare applications [J]. *IEEE J Sel Top Quant Electron*, 2019, 25: 1-9.
- [5] Wang X, Liu Z, Wang S, et al. Photonic radio-frequency dissemination via optical fiber with high-phase stability [J]. *Opt Lett*, 2015, 40: 2618-2621.
- [6] Serafino G, Porzi C, Hussain B, et al. High-performance beamforming network based on Si-photonics phase shifters for wideband communications and radar applications [J]. *IEEE J Sel Top Quant Electron*, 2020, 26(5): 6101011.
- [7] Maleki L. The optoelectronic oscillator [J]. *Nature Photon*, 2011, 5: 728-730.
- [8] Yao J. Arbitrary waveform generation [J]. *Nature Photon*, 2010, 4: 79-80.
- [9] Willner A E, Khaleghi S, Chitgarha M R, et al. All-optical signal processing [J]. *J Lightwave Technol*, 2013, 32: 660-680.
- [10] de Chatellus H, Cortés L, Azaña J. Optical real-time Fourier transformation with kilohertz resolutions [J]. *Optica*, 2016, 3: 1-8.
- [11] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R et al. Integrated microwave photonics [J]. *Lasers Photon Rev*, 2013, 7: 506-538.
- [12] Xiang C, Morton P A, Bowers J E. Ultra-narrow linewidth laser based on a semiconductor gain chip and extended Si₃N₄ Bragg grating [J]. *Opt Lett*, 2019, 44: 3825-3828.
- [13] Lin Y, Lee K H, Bao S, et al. High-efficiency normal-incidence vertical P-I-N photodetectors on a germanium-on-insulator platform [J]. *Photonics Res*, 2017, 5: 702-709.
- [14] Haffner C, Chelladurai D, Fedoryshyn Y, et al. Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator [J]. *Nature*, 2018, 556: 483-486.
- [15] Eggleton B J, Poulton C, Rakich P, et al. Brillouin integrated photonics [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13: 664-677.
- [16] Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13: 80-90.
- [17] Pérez D, Gasulla I, Capmany J. Toward programmable microwave photonics processors [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2018, 36: 519-532.
- [18] EMCORE. CATV Lasers & Components [EB/OL]. [2021-04-01]. https://emcore.com/product-category/fiber-optic-lasers-receivers-photodiodes/catv-lasers-components/#products_main.ct.
- [19] APIC Corporation. Analog and CW Lasers [EB/OL]. [2021-04-01]. <https://www.apichip.com/buy-our-ultra-low-noise-high-power-lasers-today/>.
- [20] Litecore. High power 1550nm DFB Laser [EB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.litecore.com.cn/#/product/detail/0000000021>.
- [21] Burla M, Hoessbacher C, Heni W, et al. 500 GHz plasmonic Mach-Zehnder modulator enabling sub-THz microwave photonics [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(5): 56106.
- [22] iXblue Photonics. Mach-Zehnder modulators [EB/OL]. [2021-04-01]. <https://photonics.ixblue.com/store/lithium-niobate-electro-optic-modulator/intensity-modulators>.
- [23] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit s⁻¹ and beyond [J]. *Nat Photonics*, 2019, 13: 359-364.
- [24] Zhang C, Morton P A, Khurgin K B, et al. Ultralinear heterogeneously integrated ring-assisted Mach-Zehnder interferometer modulator on silicon [J]. *Optica*, 2016, 3: 1483-1487.
- [25] Zhou Y, Zhou L, Wang M, et al. Linearity characterization of a dual-parallel silicon Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8: 7805108.
- [26] Bottenfield C G, Thomas V A, Ralph S E. Silicon photonic modulator linearity and optimization for microwave photonic links [J]. *IEEE J Sel Top Quant*, 2019, 25: 3400110.
- [27] II-VI Incorporated. 70 GHz High-speed Photodetector [EB/OL]. [2021-04-01]. <https://ii-vi.com/product/70-ghz-high-speed-photodetector/>.
- [28] Li Q. Waveguide-integrated high-speed and high-power photodiode with >105 GHz bandwidth[C]//2017 IEEE Photonics Conference (IPC), 2017: 49-50.

- [29] Sun K, Beling A. High-speed photodetectors for microwave photonics [J]. *Applied Sciences*, 2019, 9: 623.
- [30] Sun K, Costanzo R, Tzu T, et al. Ge-on-Si waveguide photodiode array for high-power applications [C]//IEEE Photonics Conference 2018, IEEE, 2018: MB2.3.
- [31] Liu Y, Isaac B, Kalkavage J, et al. 93-GHz signal beam steering with true time delayed integrated optical beamforming network[C]//Optical Fiber Communication Conference 2019, OSA, 2019: Th1C. 5.
- [32] Hu G, Cui Y, Yang Y, et al. Optical beamformer based on diffraction order multiplexing (DOM) of an arrayed waveguide grating [J]. *J Lightwave Technol*, 2019, 37(13): 2898-2904.
- [33] Zhu C, Lu L, Shan W, et al. A silicon integrated microwave photonic beamformer [J]. *Optica*, 2020, 7(9): 1162-1170.
- [34] Burla M, Marpaung D, Zhuang L, et al. Multiwavelength-integrated optical beamformer based on wavelength division multiplexing for 2-D phased array antennas [J]. *J Lightwave Technol*, 2014, 32(20): 3509-3520.
- [35] Liu Y, Wichman A, Isaac B, et al. Tuning optimization of ring resonator delays for integrated optical beam forming networks [J]. *J Lightwave Technol*, 2017, 35(22): 4954-4960.
- [36] Choo G, Madsen C, Palermo S, et al. Automatic monitor-based tuning of an RF silicon photonic 1×4 asymmetric binary tree true-time-delay beamforming network [J]. *J Lightwave Technol*, 2018, 36(22): 5263-5275.
- [37] Yu H, Chen M, Guo Q, et al. All-optical full-band RF receiver based on an integrated ultra-high-Q bandpass filter [J]. *J Lightwave Technol*, 2016, 34(2): 701-706.
- [38] Marpaung D, Morrison B, Pagani M, et al. Low-power, chip-based stimulated Brillouin scattering microwave photonic filter with ultrahigh selectivity [J]. *Optica*, 2015, 2(2): 76-83.
- [39] Jiang H, Yan L, Marpaung D. Chip-based arbitrary radio-frequency photonic filter with algorithm-driven reconfigurable resolution [J]. *Opt Lett*, 2018, 43(3): 415-418.
- [40] Zhang W, Yao J. A silicon photonic integrated frequency-tunable microwave photonic bandpass filter[C]//2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), 2017: 17398281.
- [41] Fandiño J, Muñoz P, Doménech D, et al. A monolithic integrated photonic microwave filter [J]. *Nat Photonics*, 2017, 11(2): 124-129.
- [42] Tang J, Hao T, Li W, et al. Integrated optoelectronic oscillator [J]. *Opt Express*, 2018, 26(9): 12257-12265.
- [43] Zhang W, Yao J. Silicon photonic integrated optoelectronic oscillator for frequency tunable microwave generation [J]. *J Lightwave Technol*, 2018, 36(19): 4655-4663.
- [44] Wang J, Shen H, Fan L, et al. Reconfigurable radio-frequency arbitrary waveforms synthesized in a silicon photonic chip [J]. *Nat Commun*, 2015, 6: 5957.
- [45] Zhang W, Yao J. Silicon-based on-chip electrically-tunable spectral shaper for continuously tunable linearly chirped microwave waveform generation [J]. *J Lightwave Technol*, 2016, 34(20): 4664-4672.
- [46] Jin S, Xu L, Rosborough V, et al. RF frequency mixer photonic integrated circuit [J]. *IEEE Photonic Tech Lett*, 2016, 28(16): 1771-1773.
- [47] Bottenfield C, Ralph S. High-performance fully integrated silicon photonic microwave mixer subsystems [J]. *J Lightwave Technol*, 2020, 38(19): 5536-5545.
- [48] Khilo A, Spector S, Grein M, et al. Photonic ADC: overcoming the bottleneck of electronic jitter [J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 4454-4469.
- [49] Yang G, Zou W, Yu L, et al. Compensation of multi-channel mismatches in high-speed high-resolution photonic analog-to-digital converter [J]. *Opt Express*, 2016, 24(21): 24061-24074.
- [50] Qian N, Yu L, Chen J, et al. Influence of the demultiplexer on channel-interleaved photonic analog-to-digital converters [J]. *IEEE Photon J*, 2020, 12(5): 1-10.
- [51] Xu S, Zou X, Ma B, et al. Deep-learning-powered photonic analog-to-digital conversion [J]. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 66.
- [52] Pérez D, Gasulla I, Crudgington L, et al. Multipurpose silicon photonics signal processor core [J]. *Nat Commun*, 2017, 8: 636.
- [53] Zhang W, Yao J. Photonic integrated field-programmable disk array signal processor [J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 406.
- [54] 华大九天. 模拟/数模混合IC设计全流程 [EB/OL]. [2021-04-01]. <http://www.emyrean.com.cn/products/eda/analog-and-mixed-signal.html>.
- [55] 闫连山. 非线性链路宽带微波光子信号可控传输研究[J]. *科技创新导报*, 2016, 11: 174-175.
- [56] 上海东峻. EastWave产品简介 [EB/OL]. [2021-04-01]. <http://eastfdd.com/product.aspx?id=2 & mid=2>.
- [57] Xu M, He M, Zhang H, et al. High-performance coherent optical modulators based on thin-film lithium niobate platform [J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 1-7.
- [58] 上海微技术工业研究院. 8英寸“超越摩尔”研发中试线 [EB/OL]. [2021-04-01]. <https://www.sitrigroup.com/platform/>

- micro-fabrication-line/?lang=zh-hans.
- [59] Lim C, Tian Y, Ranaweera C, et al. Evolution of radio-over-fiber technology [J]. *J Lightwave Technol*, 2019, 37(6): 1647-1656.
- [60] Zou X, Bai W, Chen W, et al. Microwave photonics for featured applications in high-speed railways: communications, detection, and sensing [J]. *J Lightwave Technol*, 2018, 36(19): 4337-4346.
- [61] Pan S, Zhu D, Liu S, et al. Satellite payloads pay off [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8): 61-73.
- [62] Li R, Li W, Ding M, et al. Demonstration of a wideband microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 14334-14340.
- [63] Xu S, Zou W, Yang G, et al. Ultra-high range resolution demonstration of a photonics-based microwave radar using a high-repetition-rate mode-locked fiber laser [J]. *Chin Opt Lett*, 2018, 16: 062801.
- [64] Zhang A, Dai Y, Yin F, et al. Phase stabilized downlink transmission for wideband radio frequency signal via optical fiber link [J]. *Opt Express*, 2014, 22: 21560-21566.
- [65] Pan S, Zhang Y. Microwave photonic radars [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2020, 38: 5450-5484.
- [66] Yi X, Chew S X, Song S, et al. Integrated microwave photonics for wideband signal processing [J]. *Photonics*, 2017, 4: 46-49.
- [67] Hao T, Tang J, Domenech D, et al. Toward monolithic integration of OEOs: From systems to chips [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2018, 36: 19, 4565-4582.
- [68] Xiang Y, Li G, Pan S. Ultrawideband optical cancellation of RF interference with phase change [J]. *Opt Express*, 2017, 25: 21259-21264.
- [69] Liu S, Khope A. Latest advances in high-performance light sources and optical amplifiers on silicon [J]. *J Semicond*, 2021, 42: 041307.
- [70] Guo X, He A, Su Y. Recent advances of heterogeneously integrated III-V laser on Si [J]. *J Semicond*, 2019, 40-101304.
- [71] Shiu R K, Chen Y, Peng P, et al. Performance enhancement of optical comb based microwave photonic filter by machine learning technique [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2020, 38: 5302-5310.