

# 集成微波光子技术的现状 及其宇航应用浅析<sup>①</sup>

王杨婧<sup>1,2\*</sup>, 姜威<sup>1</sup>, 谭庆贵<sup>1</sup>, 谢拥军<sup>2</sup>

(1. 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710000; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

**摘要:**集成微波光子技术具有小尺寸、大带宽、可调谐和低功耗等优势,在未来高通量卫星载荷技术中极具应用前景。本文围绕集成微波光子技术宇航应用的两个关键技术——集成光子技术和集成封装技术,通过分析近几年国内外的的发展状况,对目前我国集成微波光子宇航应用所面临的几项挑战进行了总结与分析。

**关键词:**集成微波光子;集成光子;封装;宇航

**中图分类号:**V19 **文献标识码:**A **文章编号:**1674-7135(2020)04-0052-09

**D O I:**10.3969/j.issn.1674-7135.2020.04.008

## A Review of the Developments and the Aerospace Applications for Integrated Microwave Photonics

WANG Yangjing<sup>1,2\*</sup>, JIANG Wei<sup>2</sup>, TAN Qinggui<sup>1</sup>, XIE Yongjun<sup>2</sup>

(1. China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China;

2. Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Integrated microwave photonics (IMWP) has a great application prospect in the future high throughput satellite, with the advantage of compact size, broadband, tunable and low-power. This paper focuses on the two key technologies of the IMWP——integrated photonic circuit (PIC) and integrated packaging technology. By analyzing the advanced developments in recent years, summarize several challenges facing and look forward to the future for China's aerospace applications.

**Key words:** IMWP; PIC; Packaging; Aerospace

### 0 引言

微波光子(MWP: Microwave photonics)将射频工程和光电子技术相融合<sup>[1]</sup>,利用光子大带宽、可调谐、抗电磁干扰等优异特性,一方面可以实现直接在射频领域实现起来复杂或根本无法实现的功能,另一方面采用微波工程中使用的各种技术来改善光子通信网络和系统的性能,为现有的光电通信技术创造了新的机遇。经过数十年的发展,微波光子技术已经在很多领域,如在雷达系统<sup>[2]</sup>、光控相控阵天线<sup>[3]</sup>、无线通信网络<sup>[4]</sup>、ROF系统<sup>[5]</sup>等方面获得了一定程度的应用。由于微波光子技术具有低损耗、大

带宽、强抗干扰能力和高保密性等优点,在空间载荷中同样具有重要的应用前景。欧空局2017年发射了Amazonas-5通信卫星<sup>[6]</sup>,在该卫星上搭载了Ka波段微波光子交换转发实验载荷,实现了微波光子变频、微波光子本振馈送、微波光子转发等功能。以微波光子技术为基础的数字化高通量卫星载荷技术<sup>[7]</sup>,可将现有的通信容量提高上百倍,或将成为未来卫星通信的重要支撑技术,有望构建未来的6G或7G系统。

然而,传统的MWP系统和链路几乎完全依赖于分立的光电子器件、标准光纤以及基于光纤的元

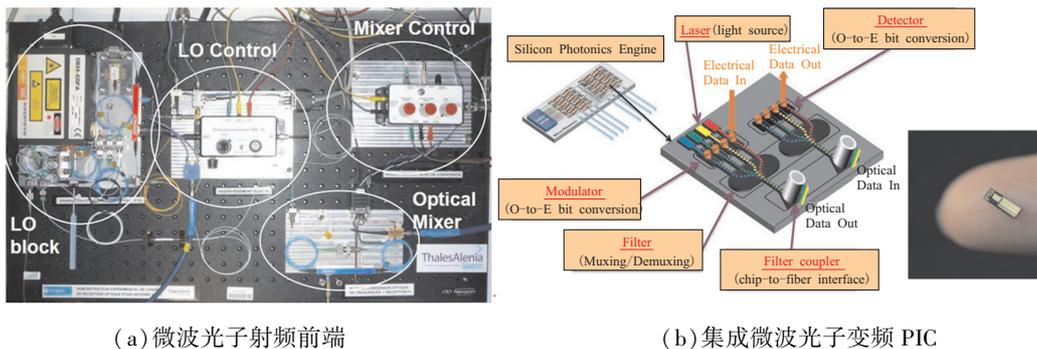
① 收稿日期:2020-06-08;修回日期:2020-07-22。

作者简介:王杨婧(1987—),硕士/工程师,主要研究方向:微电子混合封装工艺技术。E-mail:wangyj5@cast504.com

件,逐渐显现出了其价格昂贵、功耗高、可靠性及稳定性低等缺点<sup>[8]</sup>。因此,将 MWP 组件/子系统纳入集成光子电路,降低系统成本、尺寸、功耗,增加系统的可调谐、可编程、机械抗性及电磁抗等,这对实现低成本和高级模拟光学前端至关重要,这一要求衍生出新的研究方向:集成微波光子(IMWP: Integrated microwave photonics)<sup>[9]</sup>,即芯片化与集成化的微波光子技术。IMWP 的概念被提出不久后,很快就产生了深刻的影响,并且随着高性能的有源(如:激光器<sup>[10]</sup>、调制器<sup>[11]</sup>、探测器<sup>[10]</sup>等)和无源(如:光复用/解复用器<sup>[15]</sup>、可调光衰减器<sup>[10]</sup>、光子滤波器<sup>[15]</sup>、分路器/合路器<sup>[15]</sup>等)半导体集成光子电路(PIC: Photonic Integrated Circuit)技术持续发展,集成微波

光子技术开始逐步进入航空、航天等应用领域<sup>[15-24]</sup>。

早在 21 世纪初,欧空局(ESA)与法国国家太空研究中心(CNES),通过微波光子射频前端验证了 Ka/L 光变频技术,其系统组成如图 1(a)所示<sup>[23]</sup>,光子链路由分立的光/电子模块构建、并依赖光纤实现互联;随着 IMWP 技术的迅猛发展,载荷系统的光子链路可实现更高度的集成,ESA 的 EPFC ARTES-5.1 项目研究了基于 PIC 的 Ka/L 微波光子下变频器,其核心光子链路部分为采用了异质集成 PIC 芯片(如图 1(b)所示<sup>[24]</sup>),传统方案中的光纤及多个模块由多功能 PIC 芯片替代。相比之下,IMWP 技术为新一代载荷系统提供了更紧凑、更节能和更轻量的解决方案。



(a) 微波光子射频前端

(b) 集成微波光子变频 PIC

图 1 微波光子与集成微波光子的光变频方案对比

Fig. 1 MWP and IMWP for optical frequency converter

本文以 IMWP 技术的宇航应用需求为背景,介绍了 IMWP 芯片和封装技术目前的最新进展,并对未来的发展趋势进行了展望。

## 1 集成光子技术

IMWP 芯片的核心技术是集成光子半导体芯片,一方面,使用单一材料(单片)或多材料(混合或异质集成)的 PIC 半导体芯片技术取得了重大进步,使得 IMWP 系统的所有关键组件可以集成在单个芯片中;另一方面,基于 PIC 的 IMWP 系统,可以显著减少 MWP 系统的尺寸、降低系统复杂性,使其与 RF 电路相比更具优势。近几年,关于集成微波光子技术<sup>[1,8,9,23-27]</sup>与集成光子技术<sup>[28-38]</sup>的综述性文献大量涌现,主要围绕集成材料平台及应用两方面进行论述,然而大量的工作仍然停留在实验室或商用阶段。

PIC 半导体芯片按照功能可分为有源和无源两

大类,有源集成的材料平台有:磷化铟(InP)和砷化镓(GaAs)等 III-V 族化合物半导体、铌酸锂(LiNbO<sub>3</sub>)晶体等;无源集成的材料平台有:石英基平面光波导(PLC)、绝缘衬底硅(SOI)、二氧化硅/硅(SiO<sub>2</sub>/Si)、氮氧化硅/二氧化硅(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>)、聚合物等。其中:

InP 是有源集成光子技术应用最广泛的材料平台,以砷化镓(GaAs)/磷砷化铟镓(InGaAsP)/InP 等直接带隙半导体 III-V 族材料为基础,具有光发射、调制、放大和探测等功能,以 InP 为衬底的光子技术发展最早且在光通信领域的商业化应用较为成功<sup>[27-29]</sup>,近些年来随着空间激光终端的成功应用,以 InP 为衬底的半导体激光器单功能芯片也获得了宇航应用;

LiNbO<sub>3</sub> 晶体具有较好的电光调制特性,作为光电调制器已有几十年的历史<sup>[11]</sup>,且 LiNbO<sub>3</sub> 晶体的宇航应用可以追溯到上世纪,在 NASA(美国国家航

空航天局)/ESA 地球监测任务(AIR-C、ERSI、SAR-X、SEASAT)的 SAR 合成孔径雷达与遥感任务<sup>[32]</sup>中获得应用;

石英基 PLC 由于其极低的传输损耗特性(最优可达 1550 nm 波长的传播损耗仅 0.85 dB/m)而倍受青睐,被广泛应用于波分复用(WDM)传输和光纤到户(FTTH)系统的关键器件中<sup>[9]</sup>,PLC 无源光波导因发展较早且技术成熟,已获得宇航应用<sup>[39]</sup>,然而,由于光波导弯曲半径较大、集成度很低,进一步发展的潜力较小;

硅基 PIC 技术从 20 世纪 80 年代中期理论与模型建立开始就备受青睐,目前已发展成为一个单独的学科:硅光子学(SiPh),是一种基于 COMS 硅光

子学的低成本、高速率的光通信技术<sup>[40,41]</sup>,目前在 IBM、Intel 等 IT 巨头的推动下,商业化的数字应用较为成功,其宇航应用正在探索之中;

氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )光波导因具有芯包层折射率差大、器件尺寸小、与 CMOS 工艺相兼容<sup>[42]</sup>,并且比基于 SOI 衬底的损耗更低( $\text{Si}$  光波导损耗一般  $\geq 1$  dB/cm,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  光波导损耗  $\leq 0.4$  dB/cm)<sup>[43]</sup>,因此,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  更适合在 IMWP 芯片中应用,以此来实现射频模拟信号的低插入损耗需求。

近年来,随着 PIC 技术的不断成熟,逐渐涌现出了一些可大规模集成、性能优越、且具有宇航应用潜力的集成光子技术,如表 1 所示。

表 1 具有宇航应用潜力的 PIC 技术  
Table 1 PIC technologies with aerospace application potential

| 材料平台                           | 产品(或结构)                        | 功能(或特点)   | 时间   | 作者(或研究机构)   | 备注  |
|--------------------------------|--------------------------------|---|------|---|---|
| InP                            | 2.25 Tbit/s 光发射机芯片             | 1000 多个组件单片集成   | 2014 | 美国 Infinera 公司<br>J. Summers 等 <sup>[33,44]</sup>       | /   |
|                                | 光束跟踪传感与光电探测器芯片                 | 5.5 G it/s, 25000 km/h 的远距(5000 km)传输   | 2018 | 德国 Fraunhofer HHI 研究所                                   | 已获批应用于 Tesat-Spacecom 的星间数据传输               |
|                                | 10 Gbps 自由空间光通信发射机芯片           | 数据速率高达 5 Gbps 时 RZ-DPSK 调制  | 2019 | 美国 California 大学<br>Joseph Fridlander 等 <sup>[32]</sup> | NASA 创新基金,将用于 RZ-DPSK 发射机                   |
| LiNiO <sub>3</sub>             | 周期性极化 LiNbO <sub>3</sub> 薄膜光波导 | 混合集成电光(EO)频率梳、光子滤波器   | 2019 | 美国 Harvard 大学<br>John A. Paulson 等 <sup>[33]</sup>      | /   |
| 石英 PLC                         | 用于成像光谱仪的探测器芯片                  | 硅衬底上集成石英 PLC  | 2019 | 美国 Northrop Grumman 公司 <sup>[33]</sup>                  | NASA GSFC 支持                                |
| SOI                            | Tb 级光通信接收芯片                    | 石墨烯 3D 集成   | 2019 | 美国 Columbia 大学 <sup>[33]</sup>                          | NASA 创新基金                                   |
|                                | 自适应离散多载波天基光通信和测距芯片             | 微芯技术,可集成几十个 100 GHz 调制器   | 2019 | 美国加州大学圣地亚哥分校(UCSD) <sup>[33]</sup>                      | NASA 创新基金                                   |
|                                | 可重构脉冲调制(PPM)激光收发芯片             | InP-SOI 异质集成  | 2019 | 美国 Northwestern 大学和 Optonet 公司 <sup>[33]</sup>          | NASA 创新基金                                   |
|                                | 空间通信与传感芯片                      | 非线性晶体硅光子混合集成  | 2019 | 美国 Delaware 大学 <sup>[33]</sup>                          | NASA 创新基金                                   |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> | 光电探测芯片                         | 石墨烯-SOI 异质集成  | 2018 | 美国 Delaware 大学 <sup>[33]</sup>                          | 2019 年在国际空间站通过抗辐照测试,将在近地轨道国际空间站进行 6 个月稳定性测试 |
|                                | TripLeXTM 波束形成网络芯片             | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 与 SiO <sub>2</sub> 复合多层                          | 2015 | 荷兰 LioniX 公司 <sup>[45]</sup>                            | 已实现机载光控相控阵应用验证(商用)                          |
|                                | 新型二维(2D)材料                     | Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 波导复合单层 WS <sub>2</sub> -HfO <sub>2</sub> -ITO 电容 | 2019 | 美国 Columbia 大学 <sup>[33]</sup>                          | NASA 创新基金                                   |

与集成电路(IC: Integrated Circuit)一样, PIC技术的宇航应用,需要兼顾性能、寿命、可靠性与抗辐照等多项综合因素。在美国NASA的2016年科技报告中,Alt. Shannon<sup>[46]</sup>对PIC技术的发展、应用、特别是可靠性与抗辐照性能进行了研究,发现异质集成芯片的封装类型会影响辐照结果,并且InP和Si基PIC设备在高能物理测试环境中(如欧洲核子研究中心的量子对撞机)可以观察到性能退化。

但是,值得注意的是,根据2019年Michael Krainak等人<sup>[33]</sup>的报道,NASA资助研制的混合集成石墨烯-Si高速光电探测芯片,在Si衬底上集成了石墨烯、SiO<sub>2</sub>和掺杂PIN结光电二极管,可实现高速(>50 GHz)同时寻址和低噪声(40 GHz调制速度下的信噪比>50 dB)运行,如图2所示,该有源硅光子器件已于2019年在国际空间站通过了抗辐照测试,并准备在近地轨道国际空间站上进行6个月的稳定性测试。

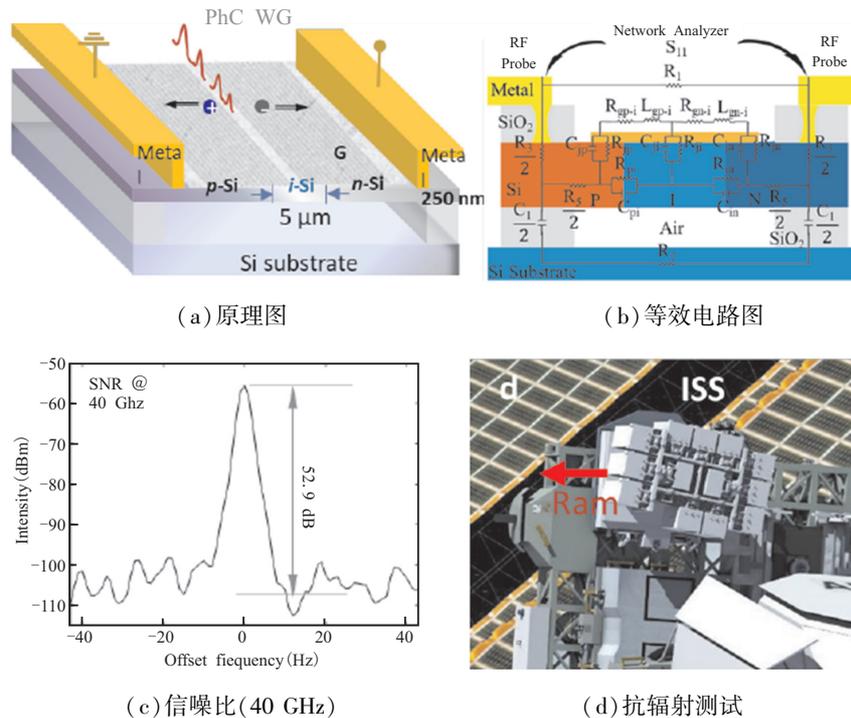


图2 石墨烯-Si高速光电探测器

Fig. 2 Graphene-Si high-speed photodetector

因此可以推断,美国NASA或已通过某种方式在Si基PIC芯片的抗辐照问题上有了进展,并且与宇航应用相关的高低温性能、空间寿命、可靠性等问题也有了保障措施,未来可能牵引全球宇航级PIC芯片技术的进一步发展,并推动IMWP技术的宇航应用,实现更优性能、更轻量化和更高集成度的高通量卫星通信。

目前为止,国内PIC技术的发展非常缓慢,仅有几个小型的石英基PLC和Si基PIC流片线,均为商用服务且工艺能力有限,近期只可能是集成无源PLC或PIC的一些宇航应用与验证,并且高低温性能、空间寿命、可靠性及抗辐照等一系列问题还亟待

解决。因此,近几年国产化的MWP载荷暂时依然需要基于传统的分立光电子器件与光纤组构建,国产化IMWP载荷的研制、攻关和宇航应用道阻且长,其核心的集成光子芯片或以自主研发设计、海外代工流片的方式逐步推进。

## 2 集成封装技术

典型的MWP系统由激光光源、光调制器、光信号处理器和光电探测器等组成<sup>[23]</sup>,无论是基于分立元器件的MWP系统,还是基于PICs的IMWP系统,最终的工程化应用均离不开封装。IMWP系统集成封装的核心是PICs集成封装技术,这不仅是实

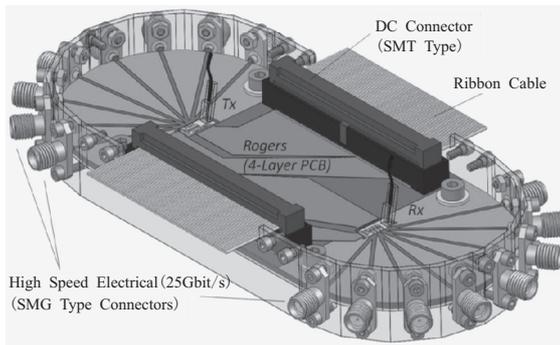
用化的最后一步,对器件能够实现良好的高频响应有着至关重要的意义;而且是目前决定 IMWP 系统的可靠性、成本、尺寸与功耗的最主要因素之一。

PICs 集成封装技术的基础为光电子组装与封装技术 (Optoelectronics Assembly and Packaging Technology), 根据 IPC/J-STD-040 标准<sup>[47]</sup> 中的定义,光电子封装可分为 4 个等级:

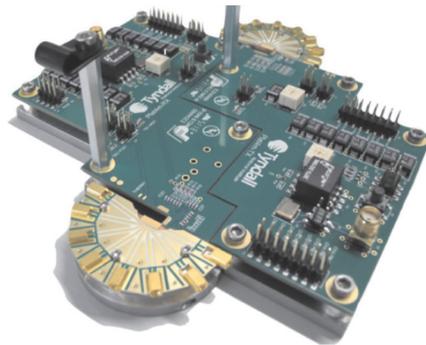
- ◆ OPTO Level 0: 无外壳分立元器件/组件;
- ◆ OPTO Level 1: 单功能或多功能器件封装;
- ◆ OPTO Level 2: 多芯片模块或系统组件封装;
- ◆ OPTO Level 3: 带有子系统或布线的系统

封装。

PICs 系统封装是集成封装技术发展的最终目标,因难度大和成本高而更具挑战性<sup>[48-50]</sup>,需要同时具备微纳级光路对准、高精度实时温控、亚微米级垂直或水平电气互连等非常苛刻的工艺能力。目前为止,复杂 PICs 系统已在数字通信、生物医学、自主导航等领域获得了一定的应用效果,减小了尺寸、重量、功率和成本限制,具有一定的空间应用潜力。然而,如图 3 所示<sup>[50]</sup>,较为流行的无外壳的系统封装因可靠性、抗辐照等一系列问题暂未解决,无法实现宇航应用。



(a) 原理示意图



(b) 实物照片

图 3 集成光子收/发信机

Fig. 3 Integrated photonic receiver/transmitter

与 ICs 封装一样,具有高可靠性的多芯片组件技术 (MCM: Multichip Module)<sup>[51]</sup> 是目前宇航应用较为可行的一种方案,将 PICs、微光学元件、ICs 和光电子芯片等进行混合集成封装,可以实现模拟 RF 射频与 PIC 的集成,例如:比利时的 Antwerp Space

卫星通信公司,在 EPFC ARTES-5.1 项目中,应用 PICs 与 ICs 的混合封装 MCM 技术,实现了 IMWP 光电变频子系统封装<sup>[24]</sup>,对未来我国 IMWP 技术的宇航应用提供了思路,如图 4 所示:

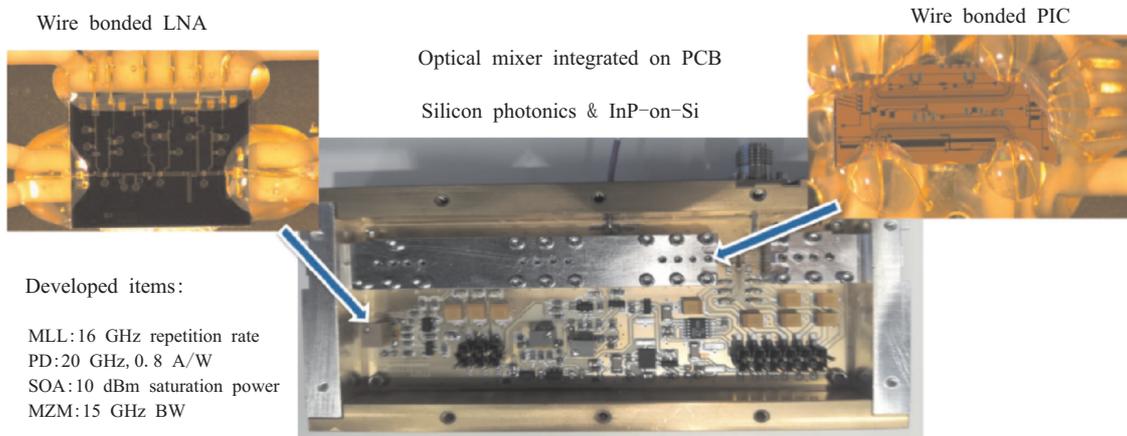


图 4 IMWP 光电变频器

Fig. 4 Photoelectric converter for IMWP

另外,一些新兴的新技术,从可靠性、稳定性和性能容错性方面为 PICs 集成封装提供了更优的解决方案,颇具宇航应用前景。例如:德国 Christian Koos 教授研究团队研制的光子引线 (PWB) 技

术<sup>[52]</sup>、德国 Karlsruhe 研究所的微纳米透镜打印技术<sup>[53]</sup>、Juniyali Nauriyal 等人提出的永久稳定与高可靠光波导熔接技术<sup>[54]</sup>,如图 5 所示。

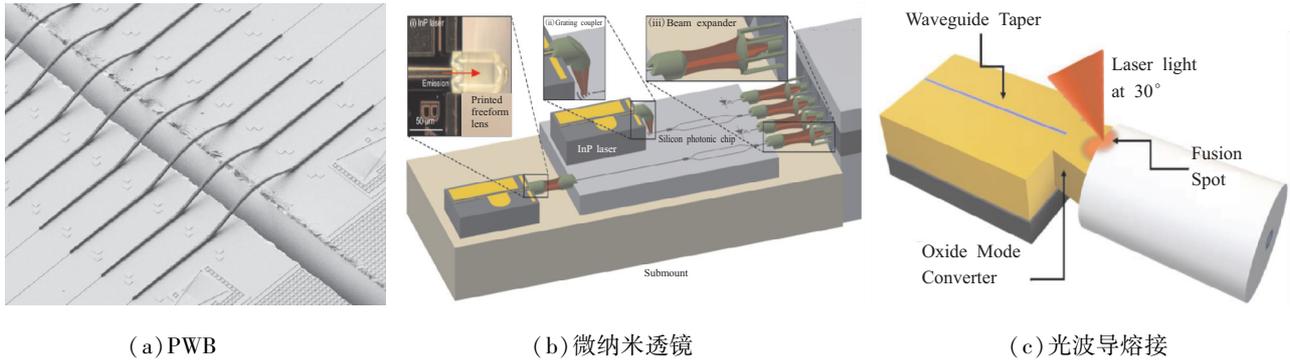


图 5 新兴的互连技术  
Fig. 5 Advanced photonic interconnection technologies

目前为止,国际上 PICs 的集成封装以劳动密集型的手工组装为主,并且我国是集成封装生产的大国,拥有天然的人员技术优势,通过国际多项目晶圆 (MPW; Multi Project Wafer) 流片后再集成封装,很可能成为我国 IMWP 技术宇航应用的重要方式之一。但遗憾的是,高性能的 PICs 芯片、封装过程材料、封装仪器设备,甚至集成封装的核心技术产权均来源于美国、欧洲和日本等发达国家。因此,如何突破技术壁垒,将目前的商用封装技术进行升级,综合可考虑高低温性能、可靠性、稳定性和抗辐照性能等因素,进而实现宇航应用,将是未来几年研究和攻关的重点。

### 3 未来发展与挑战

集成化、芯片化的 IMWP 系统在未来通信、雷达、航空、航天等领域都具有非常大的应用潜力。近些年,随着 PIC 技术的进一步发展,基于混合多材料异质集成 PIC 片上系统,有可能构成全新的 IMWP 系统,包括 CW(连续波)、MMI(多模干涉)、 $f-2f$ (倍频)、高分辨率滤波器、新型调制器、低噪声源等等,从而实现更高的性能、例如更大的调制带宽、更高的光谱分辨率、更低的噪声和更灵活的可重构性能,如图 6 所示<sup>[23]</sup>。

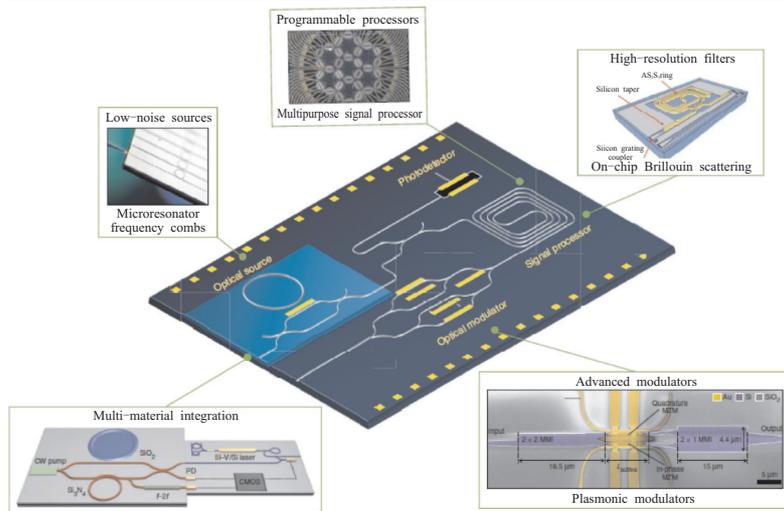


图 6 可用于 IMWP 的先进技术  
Fig. 6 Advances and technologies in IMWP

然而,伴随 PIC 技术的迅速发展,出现了两方面突出问题:一方面,PIC 制造成本较高、周期长、批量能力有限,光互连和光源集成仍然是目前的瓶颈所在;另一方面,国内外尚未出现被广泛认可的行业标准,PIC 芯片的通用性非常差,主要以小批量的原型光子封装为主,无法有效地转向大规模批量生产,实现大规模应用。因此,IMWP 技术的全球化商业推广与应用还有诸多的难题需要攻克,其宇航应用则更具挑战。

目前,IMWP 技术的宇航应用面临着两项巨大挑战:一是温度、振动敏感性等工程应用的可靠性问题暂未彻底解决:一方面 PIC 芯片以半导体的光波导为基础结构,其内部传输的光子信号对温度非常敏感,PIC 芯片在空间大范围的急速温变环境中,无法正常工作;另一方面目前较为成熟的 PIC 集成封装技术,PIC 芯片之间的互连是通过微纳级精度的空间自由光对准来实现,随着 IMWP 载荷产品所经历的一系列可靠性试验,芯片之间的光路对准精度可能会降低,进而使得组件或系统的性能恶化甚至失效。二是 PIC 芯片的辐射效应尚未掌握,IMWP 系统的在轨运行还面临很多未知风险。另外,对于我国 IMWP 技术的宇航应用来说,还面临着国内 PIC 芯片制造能力不足,高性能集成封装设备与工艺材料的生产能力欠缺,可用于调制模拟信号的高性能有源光子芯片只能依赖进口等问题。

根据报道,美国 NASA 与工业界和学术界合作,在传感器、模拟 RF 应用(微波光子)、计算、自由空间通信等方面开发 PIC 技术,已经在光子结构三维整体集成、集成石墨烯、Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 二维材料、可调谐 RF 振荡器、多功能 InP 平台等方面获得技术突破,有望在射电天文学、光谱学、雷达、通信、生物传感等方面获得应用;欧盟以 OPTIMA 和 BEACON 项目为牵引,由 Airbus 牵头,包括 DAS、CORDON、IMEC 等多家商业公司参与,对 MWP 载荷原理进行全方位验证,同时在载荷的芯片化和多芯片光电集成方面开展工作,并计划最早在 2020 年实现在轨演示。因此,我国 IMWP 技术的宇航应用,也同样需要联合工业制造、学术研究和商业资源,充分发挥各相关行业的优势,才有可能在军事领域、航空与航天领域大放异彩。

#### 4 结论

本文对具有宇航应用潜力的集成光子技术和集

成封装技术的最新研究现状进行了总结,分析了当前我国 IMWP 技术宇航应用所面临的难点与优势,提出了集成光子芯片以自主研发设计、海外代工流片的方式逐步推进,提出了集成封装以商用技术为基础进行升级、综合考虑宇航应用背景进行可靠性筛选的方式进行技术突破。另外,对未来 IMWP 技术宇航应用的发展与挑战进行了阐述,结合欧美等先进国家的技术发展模式,指出联合并发挥各相关行业的优势,才能真正实现我国 IMWP 技术的宇航应用。

#### 参考文献:

- [1] Capmany, José, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [2] 潘时龙,张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. *科技导报*, 2017(20): 38-54.
- [3] 高晖,邓晔,张金平,等. 微波光子相控阵的技术分析与展望[J]. *雷达学报*, 2019, 8(02): 85-95.
- [4] Zwickel H, Kemal J N, Kieninger C, et al. Electrically Packaged Silicon-Organic Hybrid Modulator for Communication and Microwave Photonic Applications [C]//CLEO: Science and Innovations. 2018.
- [5] Paoletta A C, Desalvo R, Middleton C, et al. Hybrid Integration of RF Photonic Systems [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(21): 5067-5073.
- [6] 苑艺. 亚马逊-5 卫星[J]. *卫星应用*, 2017(10): 72.
- [7] 田坤,范忱,王宝杰,等. 光子定义无线电: B5G/6G 未来移动通信的新范式 [C]//2018 中国信息通信大会论文摘要集. 2018.
- [8] Maram R, Kaushal S, Azaña, José, et al. Recent Trends and Advances of Silicon-Based Integrated Microwave Photonics [J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 1-40.
- [9] Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, 7(4): 506-538.
- [10] Latkowski S, Williams K., Bente E A J M. Monolithically integrated laser sources for applications beyond telecommunications [C]//Proc. SPIE 11274, Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XXVIII. March, 2020.
- [11] Li Mingxiao, Ling Jingwei, He Yang, et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator [C]//Applied Physics. March, 2020.
- [12] Zamani S, Farghadan R. Graphene Nanoribbon Spin-Photodetector [J]. *Physical Review Applied*, 2018, 10(3): 1-9.

- [13] Fazea Y , Mezhuyev V . Selective mode excitation techniques for mode-division multiplexing; A critical review [J]. *Optical fiber technology*, 2018, 45 ( NOV. ) : 280-288.
- [14] Wan J, F, et al. Extensible chip of optofluidic variable optical attenuator[J]. *Optics Express*, 2016.
- [15] 李元栋, 王荣, 蒲涛, 等. 高带外抑制比微波光子滤波器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 055 (002) : 44-51.
- [16] Poonam, Jindal, Harsimran, et al. Different Configurations of Photonic Crystal Power Splitters for PIC's - A Review[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2018. 9500-9508.
- [17] Look P V . Analog COMSAT payloads; status, future plans, and expectation from photonic technology [ C ] // International Conference on Space Optics-icso. 2019.
- [18] Gasse K V . Integrated photonics for high throughput satellite [ C ] // International Conference on Space Optics-icso. 2019.
- [19] Chania, Greece. Optical communications systems for NASA's human space flight missions [ C ] // International Conference on Space Optics (ICSO), 2018.
- [20] Iezekiel S , Burla M , Klamkin J , et al. RF Engineering Meets Optoelectronics; Progress in Integrated Microwave Photonics [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8) : 28-45.
- [21] Marpaung D , Yao J , Capmany, José. Integrated microwave photonics [J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2) : 80-90.
- [22] 钱广, 钱坤, 顾晓文, 等. 微波光子集成芯片技术 [J]. *雷达学报*, 2019(2) : 262-280.
- [23] Sotom M. , Bénazet B. , Kernec A. Le, Maignan M. Microwave Photonic Technologies for Flexible Satellite Telecom Payloads [ C ] // European Conference on Optical Communication Sept. 2009.
- [24] Gasse K V . Integrated photonics for high throughput satellite [ C ] // International Conference on Space Optics-icso. 2019.
- [25] 王振, 廖柯, 瞿鹏飞. 异质集成微波光子器件发展现状 [J]. *半导体光电*, 2018, v. 39; No. 197(03) : 4-10.
- [26] 李嘉恒, 余建国, 李依桐, 等. 高集成硅基微波光子芯片的研究进展及趋势 [J]. *光通信研究*, 2017, 000 (003) : 1-4, 56.
- [27] 陈智宇, 顾杰, 周涛, 等. 面向宽带信息系统的集成微波光子技术研究进展及趋势 [J]. *真空电子技术*, 2019(4). 1-5.
- [28] 王磊. 磷化铟基集成光子器件及其关键工艺技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [29] Smit M , Williams K , Tol J V D . Past, present, and future of InP-based photonic integration [J]. *APL Photonics*. 4, 050901. 2019. 1-10.
- [30] Meint Smit. InP-based Generic Integration Technology [ C ] // Photonics in Switching. 2014.
- [31] 郑秀, 刘永. 基于多项目晶圆流片的规模化光子集成技术 [J]. *激光与光电子学进展*. 54, 050001. 2017. 1-9.
- [32] Fridlander J , Rosborough V , Sang F , et al. Photonic integrated transmitter for space optical communications [ C ] // Free-space Laser Communications XXXI. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [33] Michael Krainak, Mark Stephen, Elisavet Troupaki, Sarah Tedder, Baraquiel Reyna, et al. Integrated photonics for NASA applications [ C ] // Components & Packaging for Laser Systems V. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [34] Armenise M N , Passaro V M N , Matteo A M . Performance limits of guided-wave devices for space applications [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 1997, 3124(1) : 66-76.
- [35] 郭进, 肖志雄, 冯俊波, 等. 硅光工艺特殊性分析 [J]. *微纳电子与智能制造*, 2019, 1(03) : 48-54.
- [36] 王书晓, 汪巍, 方青, 等. 硅光集成工艺平台及关键工艺的介绍 [J]. *微纳电子与智能制造*, 2019, 1(03) : 110-118.
- [37] Lonar M . Integrated Lithium Niobate Photonics and Applications [ C ] // Nonlinear Optics. 2019.
- [38] Stephanie Sandor-Leahy, Richard Davis, et al. Integrated photonics for hyperspectral sensing [ C ] // Proc. SPIE 11388, Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications VII, 2020.
- [39] Zhang H , Bidnyk S , Yang S , et al. Hybrid planar light-wave circuits for defense and aerospace applications [J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, 2010, 7700.
- [40] 硅光子技术. 百度百科 [ OB/OL ]. <https://baike.baidu.com/item/硅光子技术>.
- [41] Wang Jing. CMOS-Compatible Key Engineering Devices for High-Speed Silicon-Based Optical Interconnections [M]. Singapore Springer Singapore 2019. 2019.
- [42] 刘盼盼. 低损耗氮化硅可重构微波光子滤波器 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [43] Zhuang L , Marpaung D , Burla M , et al. Low-loss, high-index-contrast Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> optical waveguides for optical

- delay lines in microwave photonics signal processing [J]. *Optics Express*, 2011, 19(23): 23162-23170.
- [44] Summers J, et al. Monolithic InP-based coherent transmitter photonic integrated circuit with 2.25 Tbit/s capacity [J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(16): 1150-1152.
- [45] Iezekiel S, Burla M, Klamkin J, et al. RF Engineering Meets Optoelectronics: Progress in Integrated Microwave Photonics [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2015, 16(8): 28-45.
- [46] Alt, Shannon. Photonic Integrated Circuit (PIC) Device Structures: Background, Fabrication Ecosystem, Relevance to Space Systems Applications, and Discussion of Related Radiation Effects [R]. GSFC-E-DAA-TN34661. NASA Goddard Space Flight Center; Greenbelt, MD United States. 2016.
- [47] Optoelectronics Assembly Subcommittee (5-25) of the Assembly & Joining Processes Committee (5-20) of IPC. IPC/J-STD-040 Optoelectronic Assembly and Packaging Technology [S]. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES. 2003.
- [48] Lee C, Jun-Su L, Carmelo S, et al. Photonic Packaging: Transforming Silicon Photonic Integrated Circuits into Photonic Devices [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(12).
- [49] Morrissey P E, O'Brien P, Carroll L, et al. Packaging of silicon photonic devices: from prototypes to production [C]//Silicon Photonics XIII. 2018.
- [50] Pavarelli N, Lee J S, O'Brien P A. Packaging challenges for integrated silicon photonic circuits [C]//Silicon Photonics & Photonic Integrated Circuits IV. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [51] Janta-Polczynski, Alexander, Cyr, Elaine, Bougie, et al. Towards co-packaging of photonics and microelectronics in existing manufacturing facilities [C]//Optical Interconnects XVIII. 2018.
- [52] Billah M R, Blaicher M, Hoose T, et al. Hybrid integration of silicon photonics circuits and InP lasers by photonic wire bonding [J]. *Optica*, 2018, 5(7): 876-883.
- [53] Trappen M, Blaicher M, Dietrich P I, et al. 3D-Printed Optics for Wafer-Scale Probing [C]//2018 European Conference on Optical Communication (ECOC). 2018.
- [54] Juniyali Nauriyal, Meiting Song, Raymond Yu, Jaime Cardenas. Fiber to Chip Fusion Splicing for Robust, Low Loss Photonic Packaging [J]. *Optica*, 2019, 6, 549-552.