面向空间应用的集成光电子技术

陶源盛¹, 王兴军^{1,2*}, 韩昌灏¹, 金明¹, 舒浩文¹

1. 北京大学信息科学技术学院电子学系, 区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学教育部纳光电子前沿科学中心, 北京 100871

*联系人, E-mail: xjwang@pku.edu.cn

收稿日期: 2020-01-16; 接受日期: 2020-03-11; 网络出版日期: 2020-12-31

国家自然科学基金(编号: 61635001)和北京市重点研发计划(编号: Z19110004819006)资助项目

摘要 随着空间技术的蓬勃发展, 微电子集成电路已不能满足空间信息系统对传输容量、通信速率、电磁兼容方面的要求. 基于分立器件搭建的传统光电子系统在尺寸、重量、功耗和成本方面存在限制. 集成光电子技术是解决上述瓶颈问题的关键途径, 逐渐成为近年来的研究热点. 本文从介绍砷磷、硅、氮化硅、薄膜铌酸锂等目前主要的集成光学材料的特性及研究基础出发, 系统性地回顾了集成光电子技术在空间信息系统中的激光通信、微波光子、光学传感、自主导航与天文成像等应用方向的最新研究进展、技术瓶颈问题与发展思路. 同时, 对集成光电子器件在太空工作环境下的辐射效应和器件可靠性进行了介绍与分析. 最后, 对集成光电子技术在未来空间信息系统中的发展方向和应用前景做了分析与展望.

关键词 集成光电子, 空间应用, 光通信, 光传感, 辐射效应

PACS: 42.82.Et, 07.87.+v, 42.79.Sz, 42.79.Pw, 61.82.Fk

1 引言

20世纪60年代以来, 以硅为主的微电子技术按照“摩尔定律”飞速发展, 已应用在信息社会的各个领域. 然而随着微电子器件尺寸不断减小, 电互连在功耗、噪声、串扰等方面的问题愈渐突出, 加工设备已接近工艺极限, 摩尔定律即将失效^[1,2]. 为满足信息产业发展的更高需求, 人们开始将目光投向集成光电子技术.

集成光路的概念最早由贝尔实验室的Miller在1969年提出^[3], 即类似微电子集成电路, 利用光刻工艺在平面介质薄膜上制备光路图案, 实现光通信、光计

算等特定信息功能. 与集成电路不同的是, 集成光电子芯片包含的器件有多种, 如激光器、探测器、调制器、光波导等, 且制备工艺、基体材料各不相同, 目前难以在单一介质上实现全部光电子器件的集成. 因此, 一直以来光电子集成技术的发展较为缓慢, 目前尚未形成完善的行业标准及发展规律, 困难挑战与发展潜力并存.

空间技术的蓬勃发展, 对航天器及飞行器的信息系统提出了更高要求. 基于集成光电子技术, 可以显著提升信息系统在带宽、尺寸、重量、功耗和成本等方面的性能, 突破传统的电子信息系统与分立光电系

引用格式: 陶源盛, 王兴军, 韩昌灏, 等. 面向空间应用的集成光电子技术. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2021, 51: 024201

Tao Y S, Wang X J, Han C H, et al. Integrated photonics for space applications (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2021, 51: 024201, doi: 10.1360/SSPMA-2020-0010

统所面临的技术瓶颈, 这对于发展未来的航天业务具有颠覆性意义, 尤其在微型卫星(立方体卫星)的实现、深空探测任务、空间站建设等方面. 近年来在国际上, 美国的National Aeronautics and Space Administration (NASA)、欧盟的European Space Agency (ESA)、日本的Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)等均在集成光电子技术的空间应用领域大量投入, 开展较为广泛的前沿基础研究、集成模块产品开发和空间辐射环境测试等^[4-7]. 例如, NASA戈达德空间飞行中心于2016年公布了世界首台面向空间应用的硅基集成光电子调制解调器的发展规划, 并预计将于2020年在国际空间站进行空间激光通信中继(Laser Communications Relay Demonstration, LCRD)演示实验及测试^[8]. 我国目前在天基平台集成光电子技术领域的投入较少, 针对集成器件辐射效应的研究较多^[9-11], 而面向具体空间应用的研究及产品很少.

目前, 国际上在集成光电子技术的空间应用领域尚起步, 总体处于前沿探索阶段. 研究者们尝试将集成光电子技术应用到空间系统中的各种方面, 包括高速激光通信、微波光子、光学传感、医疗健康、自主导航、天文成像等方面, 如图1所示, 论证了集成光电子技术在空间系统中的应用能力、发展潜力与技术优势. 此外, 集成光电子器件在太空工作环境下的抗辐照能力、器件可靠性也得到了研究者的广泛关注.

本文围绕集成光电子技术的空间应用, 首先介绍了集成光电子产业的主流工艺平台与发展现状. 在当前光电子集成工艺与技术基础上, 系统地综述了国际上在集成光电子技术的各类空间应用方向中的重要研

究进展、关键技术难题与未来发展思路, 阐述了集成光电子器件在太空工作环境下的抗辐照能力与器件可靠性. 最后, 针对制约集成光电子技术面向空间应用的核心瓶颈问题, 对该领域的未来发展方向和应用前景进行了分析与展望.

2 集成光电子工艺平台

集成光电子有多种不同的基体材料平台, 主要包括硅(Si)、氮化硅(Si_3N_4)、III-V族材料(InP, GaAs等)、玻璃材料(硫系玻璃等), 以及近几年兴起的铌酸锂单晶薄膜(Lithium Niobate Thin Films)、二维材料(石墨烯、黑磷、过渡金属二硫化物等). 各类光电子集成的基体材料具有不同的性能和工艺优劣特点, 目前尚没有一种集成材料可以制备出性能良好的全部光电子器件. 表1比较了几种用于光电子集成的基体材料及特性^[12-19].

硅(Si)材料作为衬底已可制备出多种光波导器件, 包括相当规模的光波导、微环/微盘谐振腔、Mach-Zehnder干涉仪等结构, 可组合成复杂的集成光子回路. 硅波导传输损耗范围0.1–3 dB/cm^[12], 取决于光波导结构及刻蚀工艺. 基于硅的载流子色散效应可以实现电光带宽高达40 GHz以上的Mach-Zehnder结构电光调制器^[16]. 利用硅上外延生长锗材料的工艺, 目前已可以制备出带宽高达50 GHz的集成光电探测器^[12]. 但由于硅是间接带隙的半导体, 发光效率很低, 片上光源和光放大问题一直亟待解决.

氮化硅(Si_3N_4)材料可用于制备超低损耗(~0.01 dB/cm)的各类无源光波导器件, 包括波导延迟线、高Q值微环谐振腔、大规模光开关阵列等, 但在有源器件研究方面尚处在起步阶段. 氮化硅材料具有良好的CMOS工艺兼容性, 目前已有包括新加坡AMF, Compound-Tek等多家国外先进的硅光子加工生产线, 可基于双层波导工艺实现Si, Si_3N_4 器件的单片混合集成.

磷化铟(InP)材料是人们最初期实现光电子集成的材料平台, 发展起步早, 工艺成熟度高. 例如, 2013年美国Infinera公司基于InP材料单片集成了包括放大器、激光器、调制器、探测器、无源波导等各类光电子器件, 实现了速率高达500 Gb/s的发射机和接收机的光电子集成回路^[20]. InP材料在有源器件方面具有显著的性能优势, 但无源波导器件的传输损耗较高. 同时,

图1 (网络版彩图)集成光电子技术的主要空间应用领域
Figure 1 (Color online) Space applications of integrated photonics technologies.

表 1 集成光电子的基体材料性能比较**Table 1** Comparison of the main material platforms for optoelectronic integration

性能参数	硅(Si)	氮化硅(Si ₃ N ₄)	磷化铟(InP)	铌酸锂单晶薄膜
折射率	3.5	2.1	3.1	2.21
光损耗 (dB/cm)	0.1–3 ^[12]	0.01–0.2 ^[13]	1.5–3 ^[14]	0.2 ^[15]
非线性系数 (m ² W ⁻¹)	4.5×10 ⁻¹⁸	2.6×10 ⁻¹⁹	1.5×10 ⁻¹⁷	1.8×10 ⁻¹⁹
调制器(带宽)	40 GHz ^[16]	N/A	55 GHz ^[17]	>70 GHz ^[18]
探测器(带宽)	50 GHz ^[12]	N/A	40 GHz ^[14]	N/A
激光器(输出光功率)	N/A	N/A	>20 mW ^[19]	N/A
工艺成本	低	低	高	高
CMOS兼容性	良好	良好	N/A	较差
产业化程度	较高	较高	较高	N/A

InP材料不能与现有标准的CMOS工艺兼容, 因而工艺成本高昂, 难以实现规模量产和低成本制造。

铌酸锂单晶薄膜是近几年兴起的一种新型光子集成材料, 因其优异的光学特性, 包括较低传输损耗^[15] (~0.2 dB/cm)、极佳的光学调制特性^[18]吸引了越来越多研究者的兴趣, 在国际上掀起了针对基于铌酸锂单晶薄膜的集成光电子器件的研究热潮。目前, 基于铌酸锂单晶薄膜已实现了超高带宽的电光调制器^[18]、高 Q 值的光学谐振腔^[21]等。2019年, 中山大学蔡鑫伦教授研究团队^[22]报道了基于键合工艺制备的硅基-铌酸锂复合型高速调制器(>67 GHz), 初步揭示了铌酸锂单晶薄膜与硅基平台混合集成的潜力, 但距离实现良好的CMOS兼容能力和产业化还有很长的路。

当前, 世界各国均在大力投入与建设光电子集成的工艺平台, 推动光电子集成技术的产业化、实用化和行业标准化。2014年, 美国政府投入2亿美元资金建立了“国家光子计划”产业联盟, 并于2015年7月成立了集成光子研究院(AIM Photonics), 推动光电子集成芯片的设计、制造、封装与测试, 形成该领域覆盖基础研究、样品研发到产品制造的全产业链光电集成生态平台^[23]。欧盟整合了全欧洲范围内在InP基集成技术研究与产业化水平较高的研究机构和公司, 建立了InP基光电子集成芯片研究与成果转化平台机构JEPPIX^[24]。欧洲微电子研究中心(IMEC)基于CMOS工艺开发出的硅光子工艺平台, 在Si, Si₃N₄基集成光电子器件方面处在世界领先水平。日本尖端研究开发的FIRST计划, 将光电融合系统基础技术开发作为重要的一部分, 计划在2025年实现“片上数据中心”。

国内的光电子集成工艺平台建设虽然起步较晚, 但近年来在国家自然科学基金、国家重点研究计划等支持与布局下发展迅速。2015年, 中国科学院微电子研究所基于8英寸CMOS工艺线开展硅光子工艺与PDK的开发, 可支持无源/有源硅光子、MEMS等器件研发。2017年, 上海微技术工业研究院在上海市重大专项支持下启动了8英寸硅基光电研发中试线平台的建设。2018年, 重庆市成立联合微电子研究中心, 计划投入100亿元经费布局建设硅基光电子、异质异构三维集成、锗硅射频等高端工艺研发平台, 建立自主可控IP库, 打造基于IP复用的网络化集成产品协同设计国际化平台。近年来光电子集成工艺平台的蓬勃发展为我国集成光电领域积累了技术基础和人才储备, 一定程度上缩小了与国际领先水平的差距, 但未来仍任重道远。

整体来说, 经过几十余年的发展, 国内外均已在集成光电子领域形成了一定的技术积累和工艺基础, 推动着集成光电子技术的应用领域不断拓展, 近些年开始逐渐将触角伸向各类空间应用, 旨在取代现有空间平台中的集成电路系统与分立光电系统。

3 集成光电子技术的空间应用

3.1 高速激光通信

空间技术的快速发展, 首先带来的是航天信息系统中通信数据量的持续增长。传统的电子通信总线技术在通信容量、传输距离上难以满足日益增长的航天业务量, 而由分立器件搭建的通信系统在体积、重

量、能耗方面也难以进一步降低. 因此, 实现集成化的高速激光通信芯片, 可以突破能耗、重量和稳定性方面的限制, 实现航天通信系统的高速小型一体化.

当前, 商用集成光通信技术正逐渐走向成熟, 主要应用于芯片间互连及数据中心内部通信, 已被证明可提供更高的通信带宽和拥有更优的功耗表现. 过去几年, 美国的研究机构与工业界共同推进了商用集成光电收发机的发展. 长距通信方面, Acacia通信公司于2015年首次发布了商用400 Gbps的高速相干传输模块^[25]; 数据中心应用方面, 2018年Intel公司基于粗波分复用CWDM技术实现了8通道400 G的硅光收发模块^[26].

在商用集成光电子通信应用日趋成熟的同时, 面向空间通信系统的应用场景和特定需求, 人们开始研发空间平台用的高速激光通信芯片、器件和集成模块, 以取代航天器一直以来依赖的低速射频通信和分立激光通信系统. 近年来已取得一些初步进展, 主要围绕自由空间光通信用集成芯片和低功耗短距光通信用集成芯片两个方面.

自由空间光通信系统通常由发射、接收与捕获、跟踪及瞄准(ATP)三部分组成. 信息加载到激光载波上发射出去, 经大气信道传输, 最后通过ATP系统捕获, 由接收组件探测与解调. 自由空间光通信是卫星与地面、卫星与卫星间数据通信的重要技术途径. 美国的研究者们最近实现了自由空间光通信中发射组件的片上集成. 片上集成光发射机有利于降低光损耗, 优化系统体积, 充分利用集成内建反馈系统进行自检, 对于提升自由空间光通信系统的性能具有重要意义.

2018年, 美国加州大学圣塔芭芭拉分校(UCSB)的研究者在NASA的早期创新奖项目(Early Stage Innovations Award)支持下, 研制出InP基集成自由空间激光通信用的光发射机原型样片^[27], 原理图如图2所示, 集成了图中虚线框内的分布式布拉格光栅激光器、半导体放大器及Mach-Zehnder高速电光调制器等组件, 工作波长主要在C通信波段(1521–1565 nm). 他们搭建了自由空间光通信收发链路模型(图2), 调制格式为二进制振幅键控(OOK), 空间光信号在输入输出端分别由准直仪耦合进入光纤, 等效传输距离由接收端前部的可调衰减器模拟. 测试在3 Gbps数据速率下, 该传输系统的无误码传输距离达180 m, 而在1 Gbps数据速率下无误码传输距离可提升至300 m. 实验初步证

图2 (网络版彩图) 铟磷基自由空间通信光发射机^[27]

Figure 2 (Color online) InP based integrated transmitter for free-space communication^[27].

明了该发射机在自由空间激光通信中的可行性, 但有效传输距离与实用情况仍存在巨大差距.

归零型差分移相键控(RZ-DPSK)调制信号格式更有利于降低信息传输的误码率, 更适用于远距离传输. 研究者们也实现了支持RZ-DPSK调制格式的空间通信发射机芯片^[28], 架构与图2所示类似, 不同的是在Mach-Zehnder调制器后增加了一个电吸收型调制器产生了归零型调制包络, 并通过延迟时钟控制实现数据符号对准. 该系统成功实现了速率2.5 Gbps的RZ-DPSK调制, Mach-Zehnder调制器偏置于零点, 使用50%占空比归零信号达到平均11 dB消光比的调制结果.

上述两款芯片均基于成熟的InP基集成工艺制备, 工艺成本高昂, 因而不利于规模量产. 于是, 最近人们开始将目光投向廉价的硅基平台, 而硅基光源因硅材料本身原理性的发光难题, 一直是业内关注的焦点. 面向空间通信的应用需求, 近年来基于混合集成工艺的硅基复合型激光器也得到了不错的发展.

2016年, 在NASA青年学者项目支持下, 研究人员提出一种新型硅基3D片上激光器集成技术^[29], 其技术方案如图3所示, 带有自反射结构的铟磷半导体光放大器被直接键合在硅基无源衬底之上, 放大的光信号由硅基光栅结构垂直耦合进入硅基衬底. 分布式布拉格光栅结构提供了额外的反馈和相位控制功能. 该激光器实现了2 mW光耦合进硅波导, 相对噪声强度-132 dB/Hz, 激光线宽1.5 MHz. 该器件的集成工艺处于生产链最后端, 避免了材料工艺不兼容性对大规模集成的影响, 对提升高功率片上集成激光器的量产能

图 3 (网络版彩图) 硅基混合集成高功率激光器^[29]

Figure 3 (Color online) High power silicon-based hybrid integrated laser^[29].

力大有裨益. 2017年, 根特大学研究者在ESA的项目支持下^[30], 研制出一种InGaAs-Si复合型波导频梳激光源, 将高效率III-V族量子阱激光源和低损耗的螺旋线硅波导谐振腔单片集成, 10 dB光谱输出范围达12 nm, 实现了1 GHz重频, 高于1400根光频梳产生, 同时实现了稳定锁模, 输出频梳的激光线宽约400 kHz, 具有非常好的应用潜力.

采用光互连方案取代传统的电互连, 可有效地降低芯片内部、芯片间、板间等短距互连场景中的能耗、成本和通信速率. 相比地基系统, 能耗和速率提升对于航天器内的短距通信应用具有更大意义. 近年来, 美国NASA资助了多个面向短距光互连用集成器件的研究项目, 旨在进一步优化功耗与通信容量.

传统集成基体材料III-V族、Si制备的电光调制器的调制效率较低, 器件功耗难以优化. 为解决该难题, 在NASA的早期创新项目资助下, 哥伦比亚大学的研究人员另辟蹊径, 提出了一种基于新型二维材料石墨烯与氮化硅波导混合集成的材料平台^[31,32], 借助石墨烯的超高光学带宽和电光调制效率, 大幅度提升了电光调制器在功耗及尺寸方面的表现. 他们将双层石墨烯薄膜电容结构直接转移到氮化硅波导上方形成调制有源区, 通过施加电场, 改变微环环内的损耗或Mach-Zehnder结构中调制臂的相移量, 实现了高速率的电光调制. 微环调制器的工作带宽超过30 GHz, 并成功在25 GHz超窄间隔密集波分复用系统上演示验证, 为空间系统中的大容量Tbit量级低功耗短距光通信提供了潜在的解决方案. 美国特拉华大学研究者基于CMOS硅光工艺发展出高探测效率的小型化石墨烯-硅基波导PIN光电探测器^[33], 基于石墨烯优良特性实现了>50 GHz带宽和>50 dB的信噪比, 并于2019年在近地

轨道国际空间站进行辐照测试^[4].

面向未来空间平台应用对密集波分复用激光通信的需求, 在NASA研发资金支持下美国西北大学与Optonet公司联合开发出结构紧凑的片上波导衍射光栅型光分束/合束器^[4,34], 并基于此器件实现了10通道波分复用传输, 实验验证单通道速率1 Gb/s, 总传输速率10 Gb/s.

面向空间系统的集成激光通信虽然在系统和器件层面均取得了不错进展, 尤其是在通信速率上, 但在功耗、集成度等其他多个方面仍不能满足实际应用的需求. 究其根源, 主要的问题是: 光耦合效率低、有源区增益弱等原因致使片上激光器的输出功率远低于光纤激光器, 直接影响着通信距离、探测效率和链路噪声; 有源调制/探测器件的光电互转换效率低, 驱动电压高, 器件功耗尚存在1个数量级以上的优化空间. 因此, 未来仍需要从集成工艺和器件结构设计上着手, 在核心通信器件上, 尤其是各类有源器件方面持续提升性能.

3.2 微波光子系统

宇航飞行器的无线通信系统中, 需要进行大量的微波射频信号的发送、接收及处理. 随着微波通信频段向更高频微波及毫米波的不断提升, 借助光波微波融合技术(即微波光子技术)以提升飞行器射频系统性能成为各国研究者的共同选择.

典型微波光子系统一般由激光器、光调制器、光处理单元、探测器与微波天线等组件构成, 实现微波信号的产生、传输、处理、测量等功能. 微波光子系统的基本工作原理为: 微波信号 f_{RF} 通过天线接收, 经由电光调制器调制而加载到光载波 f_c 上形成两个微波边带 $f_c \pm f_{RF}$, 光处理单元对光域上的微波边带进行滤波、相移等信号处理, 最后经光电探测器拍频再还原回电域上. 面向未来的航天任务需求, 微波光子系统也呈现出集成化和低功耗的发展趋势^[35]. 各国研究者们对微波光子各类功能器件与系统(振荡器、滤波器、混频器、相移器、波束成形器等)的片上集成开展了前沿探索与研究.

高质量的微波本振信号是航天器中各类微波系统中的基础, 如空间雷达、导航等均需要高频谱纯度、高稳定性的高频微波信号. 针对高性能微波信号的片上产生, 2018年美国加利福尼亚大学戴维斯分校联合OEwaves公司的研究者, 在美国宇航局Small Business

Technology Transfer (STTR)项目资助下, 研制出一种基于 MgF_2 材料的超高品质因子回音壁模式的集成光学谐振腔^[36], 如图4(a)所示, 实验测得 Q 值高达 1.9×10^9 . 基于该超高品质因子的光学谐振腔, 与DFB激光器、对准透镜、驱动电路等其他器件采用蝶形封装方式封装在单个模块中(图4(b)), 可以实现超小尺寸集成封装的Kerr光频梳源. 实验成功观测到26 GHz重频的光频梳, 将该光频梳源输入进光电探测器中进行拍频, 可用于产生频谱纯净、低相位噪声的Ka波段微波信号, 在航天器的微波光子系统中具有应用潜力.

在空间任务中, 宇航飞行器与地面间的微波通信需要构建可重构、功能强大的通信有效载荷^[37], 支持多频道(>20个)的并行微波通信^[38], 这就需要利用不同的微波频率段. 因此, 技术关键在于实现集成化的微波发射机和接收机. 在欧洲, 阿莱尼亚宇航公司(Thales Alenia Space)一直以来在卫星通信间的微波收发机方面开展研究^[37]. 比利时根特大学Van Gasse等研究者^[39], 在欧空局ARTES项目“电光频率转换器”(Electro-Photonic Frequency Converter)支持下, 基于IMEC的先进硅光工艺线对片上集成的微波上下变频、微波发射机/接收机^[40,41]开展广泛研究, 取得了较好成果. 他们基于III-V-on-Si复合集成工艺, 实现了硅基片上锁模激光器和Mach-Zehnder调制器, 基于此开展了微波信号的上/下变频实验演示. 图5(a)所示是微波信号上变频的系统框图, 成功将120 Mbit/s的64-QAM OFDM格式LTE信号上变频加载到5 GHz的微波载波上发射出去. 图5(b)所示是光电混合集成封装的微波接收机, 将Ge-Si探测器和基于BiCMOS工艺的TIA通过金丝键合方式连接, 实现了64-QAM OFDM信号的接收解调, 星座图质量良好. 在微波射频接收机研究中, 国内清华大学陈明华教授课题组^[42]也开展了长期深入的研究, 该课题组在2016年报道了基于氮化硅微环滤波器的全波段(L-W波段)射频前端接收机, 系统信号滤波的带外抑制比达40 dB, 线性度为111.6 dB Hz^{2/3}, 具有较好的性能.

相控阵天线是空间飞行器中的关键仪器设备. 基于光电子集成技术的片上光学相控阵可打破传统机械式光束扫描相控阵的体积、质量、机械惯性等多项弊端, 是未来研究的重要方向^[43]. 该技术的关键在于实现对微波的相位控制、延迟与波束成形. 2018年的国际空间光学会议(International Conference on Space

图4 (网络版彩图) (a) 基于 MgF_2 的超高 Q 值谐振腔; (b) 封装后的Kerr光频梳源的示意图^[36]

Figure 4 (Color online) (a) Ultrahigh- Q resonator based on MgF_2 ; (b) schematic of packaged Kerr optical frequency comb source^[36].

图5 (网络版彩图) (a) 微波上变频的系统框图^[40]; (b) 微波接收机的封装芯片图^[41]

Figure 5 (Color online) (a) Schematic diagram of the RF photonic upconversion^[40]; (b) image of the packaged RF photonic receiver^[41].

Optics)上, 来自荷兰、意大利的研究者们分别介绍了他们在微波相位控制方面的研究进展. 荷兰LioniX公司基于液晶元(Liquid Crystal Cell)和氮化硅波导复合型的新颖技术^[44], 开发出超低损耗(<0.01 dB)和超低驱动电压(2.5V@2 π)的相位调制器, 如图6(a)所示. 意大利TeCIP研究所基于硅光工艺研制出快速可重构的微波光子相移器(MWP-PS)^[45], 芯片原理图如图6(b)所示, 可调相移0–400°, 工作频段为10–16 GHz/36–42 GHz, 器件响应速度在纳秒量级. 意大利巴里理工大学研究团队基于石墨烯-氮化硅复合型波导实现了快速可调

图 6 (网络版彩图) (a) 液晶元-氮化硅复合型芯片^[44]; (b) 硅基集成微波光子相移器的设计原理图^[45]

Figure 6 (Color online) (a) Picture of liquid crystal-Si₃N₄ chip^[44]; (b) schematic of the silicon photonic integrated phase shifter^[45].

谐的光延迟线器件^[46,47], 器件基本结构由级联的螺旋线波导和Mach-Zehnder结构光开关组成, 仿真计算出的延迟量达920 ps, 可用于实现Ka工作波段、分辨率达几十厘米量级的合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR), 根据文献报道^[35]其性能有望超过目前已在轨卫星中的SAR系统。

目前, 上述报道的空间平台用集成微波光子研究尚处在原理样片/样机阶段, 而要真正在空间平台发挥作用必须要解决链路损耗、动态范围和系统噪声三个主要瓶颈问题。上述瓶颈问题的根源及解决思路: 目前的集成工艺, 无论是Si基还是InP基, 当集成规模较大时光损耗问题都非常显著, 而光损耗将以二次方的转换关系映射为微波域上的损耗^[48], 同时经较大损耗后的光波输入进光电探测器中接收, 也将增大系统噪声。因此, 未来首先最需要解决是光传输损耗的问题, 这需从优化刻蚀工艺和采用低损波导结构的方向入手。针对系统的动态范围, 则主要应从提高调制器的线性和探测器的饱和光功率等基本元器件的关键性能出发。

3.3 传感及生物应用

基于集成光电子技术的传感器系统, 在航空航天任务中已有非常重要的应用。目前已经报道的集成光电子传感芯片已经出现在人类太空探索的多种应用场

景中: 宇航员的健康监测、太空微量气体探测、航天器的机械状态监测等。在具体太空传感应用中, 除了集成光学传感芯片之外, 通常还需要高效率、结构紧凑的光学封装技术给片上宽带光谱输入输出提供途径, 及特制的光学组件技术(例如等离子波导, 微流体)为包含样品信息的光学信号采集提供保障。

目前, 应用在空间任务中的集成光学传感器件, 根据传感方式主要分为直接传感(Direct Sensing)和无接触传感(Remote Sensing)两种。直接传感一般放置在待测环境中, 器件表面可直接接触对待测目标/物体, 多采用微环或Mach-Zehnder等波导结构。无接触传感指距离待测物体一定距离进行探测, 无需直接接触待测物, 具体来说例如激光测距、光谱分析鉴别物质等应用场景。

在空间探索中, 直接传感器件多用于对宇航员生命体征的快速检测。例如, 利用集成光学传感芯片可以实时监测分析宇航员血液中的生理指标: 氧浓度、pH值及沙门氏菌浓度等。这为分析和研究影响宇航员身体状况的太空因素提供了科学数据。基于波导结构的生物传感器一般包含三部分: 集成光子回路、生物修饰分子和微流控系统。传感具体机理为: 光束通过耦合进入片上波导中, 通过被生物分子修饰后的微环谐振腔, 注入的待测样品会与生物分子特异性结合, 引起波导有效折射率的改变, 直观反映在微环谐振峰的漂移上, 如图7(a)所示。样品的不同浓度与类别会引起不同漂移量, 从而实现生物检测的目的。微环传感器的探测灵敏度 S 定义为单位折射率改变对应的谱线漂移, 即 $S = \Delta\lambda / \Delta n$ 。探测的灵敏度定义为

$$\text{LOD} = \frac{\lambda}{Q \cdot S},$$

LOD的单位为RIU(折射率单元), Q 为微环谐振腔的品质因子, λ 为光波波长。

在欧洲, 研究人员在欧盟太空应用研究课题的支持下发起了空间应用的光学生物传感器(Photonic Biosensor for Space Application, PBSA)项目^[49,50]。在PBSA项目中, 他们基于氮化硅集成工艺制备传感芯片, 光子芯片中包含12个微环谐振器, 分别可以采用不同的生物分子功能化修饰, 实现多种物质同时检测, 并通过与微流体的集成(图7(b)), 及外围的电路和管壳封装(图7(c)), 增强了生物传感器空间应用的可靠性和稳定性。整个传感器模块的尺寸仅115 mm × 115 mm × 130 mm,

重量不到1 kg, 理论上的探测极限为 10^{-9} RIU^[50].

在NASA的项目支持下, 美国Omega Optics公司, 德克萨斯大学奥斯汀分校和乔治华盛顿大学研究者们共同开发出无标记生物检测硅基光子传感芯片^[4]. 该集成光电子芯片的光源采用低廉的VCSEL激光器, 采用生物分子修饰后的硅基光子晶体波导微腔探测物质信息. 整个光学传感模块可以用便捷插拔方式与外围电路系统组合成用于空间站的生物监测的便携套件, 采用通用的电接口使其可以将数据快速记录在系统中保存. 该集成光电子光学传感器具有多项优势: 大规模、并行、大流量、微型和无标记的多种生物分子探测; 所需分析物少, 分析响应时间短, 光学测试原理简单; 匹配的生物分子特异性结合和对其他物质的排他性确保生物检测准确性; 是生物分子(DNR, RNA等)进行检测的理想平台.

在无接触式传感应用中, 美国Luna Innovation公司在NASA项目支持下, 正致力于开发一套片上集成的光学频域反射计(Optical Frequency Domain Reflectometry, OFDR)测试系统. 按照该公司的构想, 集成OFDR系统的出现将可使航天器状态监测的传感系统的重量大大降低, 实现小型化, 可用于航天器表面应力、温度监测、设备损伤检测等关键应用, 如图8(a)所示. 最近, 该研究项目已取得了阶段性的进展. 在OFDR系统中, 最为关键的器件是高精度窄线宽的扫

描激光器. 针对这个问题, 美国UCSB高校研究者开发出了片上集成的可调谐窄线宽激光器^[51]. 该激光器原型机采用硅基异质集成技术(图8(b)), 器件尺寸仅 $2.5\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 可实现1538–1593 nm的调谐范围(图8(c)). 在整个波长范围内边模抑制比大于50 dB, 在1543 nm附近的线宽只有52.5 kHz. 该激光器线宽和扫描范围已完全可以满足集成OFDR系统的需求, 为全集成OFDR模块产品的实现做出了重要的推动作用.

光谱分析是实现太空生化物质鉴别探测的重要技术途径, 因而光谱分析仪是无接触式传感器件的核心部分. 传统的光谱仪基于机械光栅分光计, 需要较大的体积. 为实现结构紧凑的微型片上光谱仪, 宾夕法尼亚州立大学研究者们第一次将超表面和波导结合, 通过倏逝场耦合, 超表面单元将给光场引入相移, 从而

图 7 (网络版彩图) (a) 基于微环谐振器的光子传感器^[49]; (b) 微流控光子芯片集成的传感器件^[50]; (c) 集成封装的生物传感器(尺寸: $115\text{ mm} \times 115\text{ mm} \times 130\text{ mm}$)^[49]

Figure 7 (Color online) (a) Photonics sensor based on micro-ring resonator^[49]; (b) the integrated photonics sensor with microfluidics^[50]; (c) packaged photonics biosensor (size: $115\text{ mm} \times 115\text{ mm} \times 130\text{ mm}$)^[49].

图 8 (网络版彩图) (a) 硅基异质集成OFDR系统在空间系统中的应用; (b) 适用于OFDR系统的可调谐激光器; (c) 激光器的可调输出波长^[51]

Figure 8 (Color online) (a) Heterogeneous silicon photonic OFDR for space applications; (b) image of the tunable laser for OFDR; (c) tunable output wavelength of the laser^[51].

改变光波的传播特性^[52-54]. 利用这些超表面单元的波长敏感特性, 可以将物质的光谱信息转变成为可探测的光场信息. 具体是将不同波长的光定位在波导不同的出射位置, 从而创建出随波长变化的空间分布信息. 光电探测器通过检测光场的分布, 最终得到光谱信息, 实现光谱仪的功能. 这项研究为轻巧便携式光谱仪的实现创造了可能, 未来有望将其用于可穿戴设备中, 用于宇航员的健康监测和太空物质分析.

集成光电子技术为提升航天器内传感器的体积、重量、探测灵敏度、检测速度等性能提供了可行方案. 目前面临的问题主要是传感器的探测性能受工艺影响很大, 如微环谐振腔的 Q 值往往直接决定了探测极限与灵敏度, 这对集成工艺提出很高的要求, 进而影响了成本与良品率; 高集成度带来的传感元件间的串扰问题也比较严重; 此外, 与微流控、外围电路/控制系统必要组件的集成封装也是实用化必须考虑的问题.

3.4 自主导航

集成光电子技术在空间定位与自主导航中同样具有良好的应用前景. 最为典型的应用是片上集成的光学陀螺仪, 可以基于微环谐振腔实现.

光学陀螺器件能够感应和测定待测物体相对于惯性空间的角速度, 因而在定位中具有重要作用^[55]. 目前, 技术成熟的光纤陀螺仪已经在卫星导航系统得到广泛应用, 而探索发展新型的集成化片上光学陀螺仪, 在未来取代分立的光纤陀螺仪, 可以进一步提高空间定位系统的可靠性和稳定性, 显著降低系统的体积重量、制造成本和运行功耗, 是发展微型航天器的关键科学技术之一.

片上集成光学陀螺仪(Integrated Optical Gyro, IOG)基于Sagnac效应进行工作. 即光源发出的光经过分束器分成两束完全相同的光, 分别以逆时针方向和顺时针方向在同一闭合环形谐振腔中传输, 该闭合环形谐振腔相对于惯性空间产生的转动角速度 Ω , 将使两路光产生一定时延, 并通过光的干涉产生一个可测量的相位差

$$\Delta\varphi_{\text{Sagnac}} = \frac{4N\pi RL\Omega}{\lambda c},$$

式中, N 为环形谐振腔的匝数, R 和 L 分别为环形谐振腔的半径和周长, λ 为光波波长, c 为光速.

目前, 研究者们已经基于不同的集成材料平台和结构设计, 研发和提出了多个IOG原型芯片. 这些研究成果显示出了在空间环境中应用IOG的潜力和优势: 包括无需拆卸机械零件, 维护成本低以及发射过程中振动所引起的机械损坏少.

2012年, Guo等人^[56]基于PECVD工艺制备出 SiO_2 波导谐振腔, 波导传输损耗仅为 0.02 dB/cm , 可以达到很高的 Q 值, 以环形谐振腔为基础构建IOG, 检测精度极限为 $1.7^\circ/\text{h}$. 2013年, 国内东南大学和苏州大学的研究者们^[57]提出一种基于表面等离子体极化波导谐振腔的IOG, 基于新颖的长程表面等离子体激元(LRSPP)波导结构来克服传统波导在传播损耗/极化消光比方面的缺点. LRSPP环形谐振腔为传感元件, 由Si衬底、Ag条形波导和掺Er磷酸盐玻璃组成, 仿真计算显示单匝和多圈谐振腔的检测灵敏度分别可以达到 10^{-3} 和 $10^{-4}^\circ/\text{h}$, 最大零漂移比传统的波导结构低4个数量级. 2016年, Ciminelli等人^[58]基于InP平台制备出高 Q 值传感腔(Q 因子 5.9×10^5), 其传感元件为螺旋线型环形谐振腔, 如图9所示, 通过MMI耦合器耦合到直总线波导, 工作波长为 1550 nm , 实验测试的分辨率可达 $150^\circ/\text{h}$, 零偏稳定性低至 $4^\circ/\text{h}$, 器件尺寸仅 10 mm^2 . 研究者们预测通过将螺旋线型谐振腔的尺寸扩大至 200 mm^2 , 陀螺仪器件的灵敏度和零漂可分别提升至 10 和 $1^\circ/\text{h}$, 而加工成本可低至 $10 \text{ 欧元}/\text{mm}^2$. 2018年, 加州理工学院研究者基于硅基光电子集成工艺, 结合一种交互灵敏度增强的新技术^[59], 实现了高灵敏度的新型片上集成光学陀螺仪, 器件尺寸仅为 2 mm^2 , 是此前尺寸最小的光纤陀螺仪的 $1/500$, 而可测量到的最小Sagnac相移量为

图9 (网络版彩图) InP基高 Q 值微腔的光学陀螺仪^[58]

Figure 9 (Color online) Integrated optical gyros based on InP ring resonator [58].

3 nrad (1 rad=57.2958°).

从近些年来文献报道的IOG研究可以看出, 集成光学陀螺仪正朝着更高分辨率和更低零漂方向发展. 为实现在未来的空间系统和卫星中的使用, 取代现有的光纤陀螺仪, 集成光学陀螺仪除了大幅度缩减器件尺寸重量, 更重要的是需要不断提升检测的分辨率和零漂稳定性, 分别达到0.01和1°/h的水平^[60], 才能真正满足实际的空间应用要求.

3.5 天文成像

集成光电子技术在天文光学领域也得到了较为广泛的应用和发展, 推动着诸多天文光学成像仪器的微型化. 将光学成像所需的各个器件在片上集成, 可以改善成像系统的灵活重构性, 机械鲁棒性以及对环境干扰因素的抵抗性等. 目前, 在天文成像的应用领域中, 主要的研究集中在对接收信号进行空间滤波, 从而用于进行恒星干涉测量及提高光谱成像稳定性等方面^[61].

“光子灯笼”是一种连接单个多模波导与多个单模波导的低损耗转换器件, 可使单模光子技术在多模系统中得以应用^[62,63]. 基于“光子灯笼”器件, 可以将天文望远镜接收的多模光信号(Seeing-Limited)聚焦转换成单模光信号(Diffraction-Limited)进行高分辨率光谱探测, 同时滤除杂散光信号, 提升天文望远镜的探测极限. Spaleniak等人^[64]使用激光直写技术制备出集成光子灯笼, 结构如图10(a)所示, 工作波长在1550 nm波段, 光转换损耗和器件尺寸均有优良表现, 未来在高分辨率的微型天文成像设备中具有良好的应用前景.

美国NASA的创新先进概念计划(NIAC)支持了一个低重量集成化光电子成像传感器项目, 该项目研究基于集成光电子技术代替传统的分立大尺寸光学望远镜^[65]. 该项目提出了用于光电勘测的分段平面成像检测器(Segmented Planar Imaging Detector for Electro-optical Reconnaissance, SPIDER)的概念. 器件顶部的透镜阵列将入射探测光聚焦, 耦合进集成片上光波导干涉阵列中(图10(b)), 干涉后的光由探测器阵列接收, 转换成电信号经底部DSP电路系统处理得到成像信号, 整体原理结构示意如图10(c). 该集成平面化成像传感器有望取代由分立光学器件组成的传统望远镜, 有效降低成本、重量与体积, 同时成像光路的平面化更可以显著提升系统的机械稳定性. 该成像传感器计

图 10 (网络版彩图) (a)集成光子灯笼示意图^[64]; (b) SPIDER中的集成光电子芯片^[65]; (c) SPIDER的结构图与原理示意^[65]

Figure 10 (Color online) (a) Schematic of the integrated photonic lantern [64]; (b) the PIC of the SPIDER [65]; (c) the structure and working principle of the SPIDER [65].

划应用在欧罗巴(Europa)木星探测计划中的成像传感系统, 用于高分辨率成像及行星表面的变化过程探测.

目前, 国内鲜有开展基于集成光电子学在天文成像应用方向的研究和探索, 需要在该方向加大相关投入, 加强相应的工艺积累和技术储备.

4 集成光电子器件的辐射效应

在苛刻的太空工作环境下, 集成光电子器件需要应对压力变化、机械振动、极端温度、太空辐射等各种形式的环境变化. 其中, 最为重要且普遍的是要求器件能够承受长期的太空电离辐射^[66,67], 维持良好的器件可靠性和稳定性. 太空仪器中的集成器件一旦在辐射中受损, 便难以维修和更换, 对系统正常运作产生不可修复的影响. 尽管人们已经开展了很多辐射效应对微电子集成器件^[68]和光纤器件^[69]性能影响的研究, 但关于电离辐射对集成光电子器件所产生的影响却了解很少.

一般来说, 电离辐射源主要有X射线、 γ 射线、中子、质子和 α 粒子等类型. 在不同的空间任务和应用场

景中, 器件所遇到的辐射源类型和辐射强度也各不相同. 目前, 基于不同辐射源的光电子器件的辐射效应测试实验均有所开展.

电离辐射对不同集成光电器件的损耗机制不尽相同. 对于无源光波导器件, 器件在辐照环境影响下会出现晶格缺陷、网络结构致密化或表面氧化等现象^[67], 进而改变波导材料的折射率, 影响多种器件性能, 尤其是AWG、微环谐振腔等折射率敏感型器件. 对于有源器件, 激光器和探测器起主导作用的是位移损伤^[66], 产生的深能级会影响载流子响应导致器件性能劣化, 对于基于载流子效应的电光调制器起主导作用的是电离损伤, 产生的缺陷电荷会影响载流子浓度分布从而影响载流子调制效应.

针对基于III-V族的集成光电子器件在高压辐照条件下的工作稳定性, 2013年荷兰埃因霍温理工大学Gajana等人^[70]实验测试了InP基高速Mach-Zehnder电光调制器(图11(a))的抗辐照能力. 器件辐射实验利用欧洲核子研究中心(CERN)的IRRAD-1型号仪器开展, 将器件置于24 GeV/c剂量的质子辐射环境下, 如图11(b)所示. 测试结果表明, 器件暴露在总剂量达 10^{15} proton/cm²辐射中, 调制响应将会非常微弱. 由于实验处理方式不当, 在更低辐射剂量下的实验数据没有采集成功. 2018年, 国内重庆光电技术研究所樊鹏等人^[9]对高速In-GaAs光电探测器的辐射效应进行了实验研究, 施加给探测器器件不同剂量及剂量率的 γ 辐照, 结果显示器件的暗电流会随着辐照剂量增大而有所增加, 但并未严重影响器件正常工作, 而响应度和3 dB带宽基本不变, 具备较强抗辐照能力. 而针对基于III-V族材料的其他重要光电子器件, 例如激光器、半导体光放大器的辐射效应研究确非常少, 是未来待研究的热点之一.

图 11 (网络版彩图) 砷磷集成Mach-Zehnder电光调制器(a)及辐射测试环境(b)^[70]

Figure 11 (Color online) InP based integrated Mach-Zehnder modulator (a) and radiation test environment (b) ^[70].

近年来的相关研究表明, 过去基于垂直腔表面发射激光器(VCSEL)的光学链路将在辐射量日渐增加的空间光通信应用中逐渐失去优势, 硅基光电子器件是目前应对这一挑战较有前途的技术之一. 中国科学院上海微系统所的周悦等人^[67]对硅基光电子器件辐射效应的研究进展做了系统性地总结, 同时他们对辐射影响硅基器件性能的具体机理也进行了分析与阐述. 在过去10年中, 针对硅基无源光子器件^[71-73]的辐射效应已开展了广泛研究, 而在最近两年中主要是关于硅基有源光电子器件(调制器^[74-76]和探测器^[77,78])的研究报道. 表2列出了一些典型的硅基光电子无源器件和有源器件的辐射实验及结果.

欧洲微电子研究中心(IMEC)的Dumon等人^[71]使用 γ 射线对硅基的微环谐振腔进行了电离辐射效应测试. 总辐照剂量为300 krad(以下单位中rad表示吸收剂量, $1 \text{ rad}=10^{-2} \text{ Gy}$), 辐照后谐振腔的谱线漂移最高达到0.39 pm/krad, 可见受到的影响较为显著, 原因在于该类谐振干涉器件对折射率变化非常敏感. Ebeleing等人^[72]针对CMOS工艺制备的硅基微环谐振腔、MMI耦合器等几种硅基无源光子器件进行了 γ 射线、高能电

表 2 硅基光电子器件的辐照测试结果

Table 2 Radiation effects on silicon integrated photonic devices

器件类型	辐射类型	剂量率	总剂量	测试结果	辐照损伤机制
硅基微环谐振腔 ^[71]	γ 射线	82 rad/min	300 krad	电离辐照后谐振波长漂移量: 0.23–0.39 pm/krad	晶格缺陷、网络结构致密化或表面氧化
氮化硅微环谐振腔 ^[73]	质子	NA	1.52×10^{10} – 6.0×10^{10} proton/cm ²	谐振峰线宽变化幅度1%以内; 器件Q值未改变	晶格缺陷、网络结构致密化或表面氧化
硅基电光调制器 ^[74]	X射线	1.1 kGy/min	1.3 MGy	器件漏电流增加12 nA; 失去电光调制效应	电离损伤
硅基光电探测器 ^[77]	X射线	30.3 krad/min	5 Mrad	器件暗电流、S参数和响应度性能参数并未受到明显影响	位移损伤

子和质子辐射测试. 实验结果显示, 器件暴露在较低水平的 γ 射线(剂量 10 krad)和电子束辐射(剂量 $10^{12}\text{--}10^{15}\text{ e/cm}^2$)作用下, 器件性能基本不受影响, 然而在较大剂量的质子辐射下(剂量 $10^{15}\text{ proton/cm}^2$), 器件损耗明显增大, 微环谐振峰发生明显漂移. 对于基于氮化硅(Si_3N_4)波导的集成光子器件, Brasch等人^[73]实验研究了有二氧化硅包层的 Si_3N_4 波导微环谐振腔在质子辐照环境下的性能影响, 质子辐射的剂量分别设置为 18.3 , 30.7 , 61.6 和 99.7 MeV . 研究表明, 施加的几种剂量质子辐照均不会导致 Si_3N_4 微环谐振腔的 Q 值降低, 因而不会对 Si_3N_4 微腔的一些重要应用(如光频梳产生等)产生影响, 具有较好的抗辐照能力.

硅基有源光电子器件的辐射效应研究方面, 由于大型强子对撞机(LHC)升级到High Light (HL)-LHC后, 传输数据量在未来10年中将增长接近一个数量级, 因此需要利用硅光子技术提升传输能力^[74]. 基于迫切的需求, CERN的研究人员开展了一些硅基有源器件的实验研究^[74-76]. 2015年, CERN的研究人员在硅基高速Mach-Zehnder光电调制器上开展了中子辐射($1.2\times 10^{15}\text{ neutrons/cm}^2$)和X射线(1.3 MGy)辐射测试^[74]. 测试结果揭示, 硅基调制器不会受到非电离辐射的影响, 而对电离辐射的影响较为敏感. 器件的性能在电离辐射总剂量超过几百kGy后将会受到影响, 在辐射总剂量达~MGy后将会完全失去调制效果. 为优化提升调制器的抗辐照能力, CERN通过后续的研究发现, 通过提高相移臂的掺杂水平^[75], 增加slab平板层厚度, 改变反向偏置电压^[76]等措施可以帮助减轻电离辐射的影响. 对于Ge-Si高速光电探测器, 2019年美国乔治尼亚理工大学的Goley等人^[77]对集成锗硅p-i-n型 70 GHz 高速光电探测器施加X射线辐照, 在辐射剂量 $100\text{ krad--}5\text{ Mrad}$ 作用下, 测试器件的暗电流、 S 参数和响应度三项关键性能参数均未受到明显影响. 而对Ge-Si探测器件施加 γ 射线辐照, 当剂量高于 1 Mrad 时, 会引起器件的暗电流显著增加^[78].

未来, 关于集成光电子器件的辐射效应仍存在一些问题. 例如, 基于各种集成光学材料的光电子器件的抗辐照能力差异, 器件加工工艺不同对器件抗辐照能力的影响, 不同器件光电封装形式的抗辐照能力差异. 进一步提升器件的抗辐照能力, 需要对器件辐射效应的具体机制进行细致研究, 建立完善的理论和计算模型.

5 总结与展望

相比于地面系统, 卫星及各种航天器等天基平台更为关注信息系统的体积、重量和能耗三项关键性能指标(Size, Weight and Power, SWaP^[4]). 集成光电子技术为解决SWaP的瓶颈问题提供了理想途径, 高度满足空间应用对有效载荷小型化、轻量化、低功耗的迫切要求, 近年来得到了各国研究人员的关注. 美国的NASA和欧盟的ESA均在面向空间应用的集成光电子技术领域投入研究经费, 开展较为广泛的前沿探索和技术论证. 我国目前在该领域的投入较少, 尚未形成完整布局, 因而相关的研究成果也鲜有报道.

当前的科学研究, 主要集中在将过去应用到空间系统中的分立光电系统芯片化、集成化和模块化, 围绕激光通信、微波光子、光学传感、医疗健康、导航和成像等多个应用方向. 与此同时, 针对集成光电子器件与芯片的空间环境测试和辐射效应的研究也在同步开展. 鉴于集成光电子技术在能耗、成本和可靠性封装方面的问题尚未得到有效解决, 因而距离集成光子芯片和产品真正应用在空间任务中, 尚有很长的一段道路要走. 在未来, 需要解决的主要技术瓶颈问题和发展方向如下.

(1) 不断降低器件功耗. 以光互连应用为例, 与电互连的能耗(~ 1 pJ/bit)相比, 光互联的能耗需要降低至~ 100 fJ/bit 才能体现出优势. 实现 100 fJ/bit 的光互连能耗目标, 要求光调制器的能耗低于 10 fJ/bit ^[79], 而目前应用较广的硅基Mach-Zehnder光电调制器, 其目前能耗水平在~ 400 fJ/bit ^[80]. 可以看出, 未来仍需要通过不断优化工艺和创新器件设计, 提升集成器件的光/电互转换效率(例如, 降低光调制器的驱动电压), 进而大幅度地降低集成系统的运行功耗.

(2) 实现高可靠性芯片封装. 目前的研究大多是光电子芯片的裸片测试, 而要适应宇航器中的恶劣太空工作环境, 对光芯片/电芯片的可靠、稳定的集成封装至关重要. 以芯片光耦合封装为例, 目前耦合损耗通常高达 $3\text{--}4\text{ dB/端}$ ^[81], 光栅阵列间距多采用 250 或 $127\text{ }\mu\text{m}$ ^[12], 从当前的损耗和体积指标上均难以满足规模化/阵列化的封装需求. 因而, 未来需要不断摸索解决芯片间高效光耦合问题, 实现更大规模的光封装(采用 $25\text{ }\mu\text{m}$ 及更小的排布间隔)及光电混合高频封装. 同时, 面向空间应用, 芯片的封装技术方案还需要考虑集成

器件在高能辐射、强机械振动等条件下保持长时间稳定工作的能力.

(3) 光电集成工艺的产业化, 具备量产能力, 降低加工成本. 目前, InP基集成工艺相对成熟, 但芯片加工对工艺条件和设备要求高, 与CMOS工艺不兼容, 因而目前全球具备产业化能力的商用机构并不多, 加工成本很高, 很多研究人员都选择采用MPW (Multi Project Wafer)形式进行流片^[14]. Si基平台具备与CMOS工艺的兼容能力, 具有低成本优势, 然而用于电器件与光器件的加工工艺仍存在一定差异, 目前的工艺尚不成熟, 光电单片集成更存在挑战. 为了使集成光电子技术像微

电子集成技术一样在空间系统中得到广泛应用, 未来仍需不懈努力, 开发多材料体系光电混合集成工艺, 建设标准化的器件库和设计规则, 逐步优化工艺消除工艺缺陷, 实现激光器、探测器、调制器、无源波导等光电器件与驱动电路的单片/混合集成及规模量产能力.

可以预见的是, 未来宇航事业的发展建设, 光电子集成技术是突破空间信息系统所面临的带宽、能耗、重量、智能化与可重构等技术瓶颈的关键科学途径, 虽然面临的挑战一直存在, 但必将在空间应用中发挥越来越重要的作用.

参考文献

- Atabaki A H, Moazeni S, Pavanello F, et al. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip. *Nature*, 2018, 556: 7701
- Wang X J, Su Z T, Zhou Z P. Recent progress of silicon photonics (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2015, 45: 014201 [王兴军, 苏昭棠, 周治平. 硅基光电子学的最新进展. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2015, 45: 014201]
- Miller S E. Integrated optics: An introduction. *Bell Syst Technical J*, 1969, 48: 2059–2069
- Krainak M, Stephen M, Troupaki E, et al. Integrated photonics for NASA applications. Components and Packaging for Laser Systems V. In: *Proceedings of the Industrial Laser, Laser Source, and Laser Application Conference (LASE)*. San Francisco, 2019. 10899: 108990F
- Krainak M, Stephen M, Klamkin J, et al. NASA integrated photonics. In: *Proceedings of the IEEE Photonics Conference (IPC)*. Reston, 2018. 1–2
- Karafolas N, Armengol J M P, McKenzie I. Introducing photonics in spacecraft engineering: ESA's strategic approach. In: *Proceedings of the IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, 2009. 1–15
- Guilhot D, Ribes-Pleguezuelo P. Laser technology in photonic applications for space. *Instruments*, 2019, 3: 50
- Cornwell D. Space-based laser communications break threshold. *Opt Photon News*, 2016, 27: 24
- Fan P, Fu Q, Shen Z H. Research on γ irradiation of high-speed InGaAs photodetector (in Chinese). *Semicond Optoelectron*, 2018, 4: 35–38 [樊鹏, 付清, 申志辉. 高速InGaAs光电探测器 γ 辐照实验研究. *半导体光电*, 2018, 4: 35–38]
- Gao X, Wang J, Feng Z Z, et al. Radiation damage of high-speed InGaAs-PIN photodiode devices used for space laser communication (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2019, 2: 139–145 [高欣, 王俊, 冯展祖, 等. 空间高速InGaAs-PIN光电二极管辐射损伤效应试验研究. *航天器环境工程*, 2019, 2: 139–145]
- Xiang Z J, Zheng M. Experimental research of gamma-ray radiation on the key photoelectric devices of optical satellite communication system (in Chinese). *Laser J*, 2014, 7: 87–88 [向志军, 郑茂. 卫星光通信系统光电核心器件的伽马辐射实验研究. *激光杂志*, 2014, 7: 87–88]
- Thomson D, Zilkie A, Bowers J E, et al. Roadmap on silicon photonics. *J Opt*, 2016, 18: 073003
- Roeloffzen C G H, Zhuang L, Taddei C, et al. Silicon nitride microwave photonic circuits. *Opt Express*, 2013, 21: 22937–22961
- Smit M, Leijtens X, Ambrosius H, et al. An introduction to InP-based generic integration technology. *Semicond Sci Technol*, 2014, 29: 083001
- He Y, Yang Q F, Ling J, et al. Self-starting bi-chromatic LiNbO₃ soliton microcomb. *Optica*, 2019, 6: 1138–1144, arXiv: 1812.09610
- Patel D, Ghosh S, Chagnon M, et al. Design, analysis, and transmission system performance of a 41 GHz silicon photonic modulator. *Opt Express*, 2015, 23: 14263–14287
- Smit M, Williams K, van der Tol J. Past, present, and future of InP-based photonic integration. *APL Photon*, 2019, 4: 050901
- Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages. *Nature*, 2018, 562: 101–104
- Marpaung D, Yao J, Capmany J. Integrated microwave photonics. *Nat Photon*, 2019, 13: 80–90

- 20 Pleumeekers J, Strzelecka E, Yap K P, et al. Manufacturing progress for InP-based 500 Gb/s photonic integrated circuits. In: Proceedings of the International Conference on Compound Semiconductor Manufacturing. New Orleans, 2013
- 21 Zhang M, Buscaino B, Wang C, et al. Broadband electro-optic frequency comb generation in a lithium niobate microring resonator. *Nature*, 2019, 568: 373–377, arXiv: [1809.08636](#)
- 22 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. *Nat Photon*, 2019, 13: 359–364, arXiv: [1807.10362](#)
- 23 Wang J M, Xu P X, Wang D C. Review of photoelectric integration technology (in Chinese). *Optoelectron Tech*, 2017, 3: 56–62 [王绛梅, 徐鹏霄, 王东辰. 光电集成技术研究综述. *光电子技术*, 2017, 3: 56–62]
- 24 Leijtens X. JePPIX: The platform for indium phosphide-based photonics. *IET Optoelectron*, 2011, 5: 202–206
- 25 Geyer J C, Rasmussen C, Shah B, et al. Power efficient coherent transceivers. In: Proceedings of the 42nd European Conference on Optical Communication. Dusseldorf: VDE, 2016. 1–3
- 26 Driscoll J B, Doussiere P, Islam S, et al. First 400G 8-channel CWDM silicon photonic integrated transmitter. In: Proceedings of the IEEE 15th International Conference on Group IV Photonics. Cancun, 2018. 1–2
- 27 Zhao H, Pinna S, Song B, et al. Indium phosphide photonic integrated circuits for free space optical links. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2018, 24: 1–6
- 28 Fridlander J, Pinna S, Rosborough V, et al. RZ-DPSK photonic integrated transmitter for space optical communications. In: Proceedings of the Industrial Laser, Laser Source, and Laser Application Conference (LASE). San Francisco, 2018. 10524: 105240Y
- 29 Song B, Stagaescu C, Ristic S, et al. 3D integrated hybrid silicon laser. *Opt Express*, 2016, 24: 10435–10444
- 30 Wang Z, van Gasse K, Moskalenko V, et al. A III-V-on-Si ultra-dense comb laser. *Light Sci Appl*, 2017, 6: e16260
- 31 Phare C T, Daniel Lee Y H, Cardenas J, et al. Graphene electro-optic modulator with 30 GHz bandwidth. *Nat Photon*, 2015, 9: 511–514
- 32 Datta I, Phare C T, Dutt A, et al. Integrated graphene electro-optic phase modulator. In: Proceedings of the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). San Jose: Optical Society of America, 2017
- 33 Wang Y, Wei Y, Huang Y, et al. Silicon/III-V laser with super-compact diffraction grating for WDM applications in electronic-photonic integrated circuits. *Opt Express*, 2011, 19: 2006–2013
- 34 Li T, Mao D, Petrone N W, et al. Spatially controlled electrostatic doping in graphene p-i-n junction for hybrid silicon photodiode. *npj 2D Mater Appl*, 2018, 2: 36
- 35 Dell’Olio F, Brunetti G, Conteduca D, et al. Integrated microwave photonics: Overview and promising space applications. In: Proceedings of the International Conference on Applications in Electronics Pervading Industry, Environment and Society. Rome, 2017. 107–112
- 36 Liu G, Ilchenko V S, Su T, et al. Low-loss prism-waveguide optical coupling for ultrahigh-*Q* low-index monolithic resonators. *Optica*, 2018, 5: 219–226
- 37 Sotom M, Aveline M, Barbaste R, et al. Flexible photonic payload for broadband telecom satellites: From concepts to system demonstrators. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Biarritz, 2017. 10562: 105621Y
- 38 van Gasse K, Wang Z, Uvin S, et al. Ka-band to L-band frequency down-conversion based on III-V-on-silicon photonic integrated circuits. *CEAS Space J*, 2017, 9: 531–541
- 39 van Gasse K, Verbist J, Li H, et al. Silicon photonics radio-over-fiber transmitter using GeSi EAMs for frequency up-conversion. *IEEE Photon Technol Lett*, 2018, 31: 181–184
- 40 van Gasse K, Bogaert L, Breynne L, et al. Analog radio-over-fiber transceivers based on III-V-on-silicon photonics. *IEEE Photon Technol Lett*, 2018, 30: 1818–1821
- 41 van Gasse K, van Kerrebrouck J, Abbasi A, et al. III-V-on-Silicon photonic transceivers for radio-over-fiber links. *J Lightwave Technol*, 2018, 36: 4438–4444
- 42 Yu H, Chen M, Guo Q, et al. All-optical full-band RF receiver based on an integrated ultra-high-*Q* bandpass filter. *J Lightwave Technol*, 2016, 34: 701–706
- 43 Heck M J R. Highly integrated optical phased arrays: Photonic integrated circuits for optical beam shaping and beam steering. *Nanophotonics*, 2017, 6: 93–107
- 44 Wörhoff K, Ryabchun A, Hoekman M, et al. Liquid crystal phase modulator integration on the TriPleX photonic platform. In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Chania, 2019. 11180: 1118077

- 45 Porzi C, Serafino G, Sans M, et al. Photonic integrated microwave phase shifter up to the mm-wave band with fast response time in silicon-on-insulator technology. *J Lightwave Technol*, 2018, 36: 4494–4500
- 46 Tatoli T, Conteduca D, Dell’Olio F, et al. Graphene-based fine-tunable optical delay line for optical beamforming in phased-array antennas. *Appl Opt*, 2016, 55: 4342–4349
- 47 Conteduca D, Dell’Olio F, Ciminelli C, et al. Resonant graphene-based tunable optical delay line. *IEEE Photonics J*, 2015, 7: 1–9
- 48 Marpaung D, Roeloffzen C, Heideman R, et al. Integrated microwave photonics. *Laser Photon Rev*, 2013, 7: 506–538, arXiv: [1211.4114](#)
- 49 De Diego-Castilla G, Pantoja S, Geidel S, et al. A photonic biosensor for space applications (PBSA). In: Proceedings of the 46th Lunar and Planetary Science Conference. Woodlands, 2015. 46: 2109
- 50 Pantoja S, Parro V, Nestler J, et al. Nanophotonic biosensor for space exploration (PBSA instrument). In: Proceedings of the International Conference on Space Optics. Biarritz, 2017. 10563: 10563D
- 51 Ohanian O J, Yakusheva A A, Kreger S T, et al. OFDR on photonic circuits: Fiber optic sensing infrastructure and applications. In: Proceedings of the 26th International Conference on Optical Fiber Sensors. Lausanne, 2018
- 52 Yu N, Capasso F. Flat optics with designer metasurfaces. *Nat Mater*, 2014, 13: 139–150
- 53 Kildishev A V, Boltasseva A, Shalaev V M. Planar photonics with metasurfaces. *Science*, 2013, 339: 1232009
- 54 Chang S, Guo X, Ni X. Optical metasurfaces: Progress and applications. *Annu Rev Mater Res*, 2018, 48: 279–302
- 55 Matsko A B, Savchenkov A A, Ilchenko V S, et al. Optical gyroscope with whispering gallery mode optical cavities. *Opt Commun*, 2004, 233: 107–112
- 56 Guo L, Shi B, Chen C, et al. A large-size SiO₂ waveguide resonator used in integration optical gyroscope. *Optik*, 2012, 123: 302–305
- 57 Zhang T, Qian G, Wang Y Y, et al. Integrated optical gyroscope using active long-range surface plasmon-polariton waveguide resonator. *Sci Rep*, 2014, 4: 3855
- 58 Ciminelli C, D’Agostino D, Carnicella G, et al. A high-*Q* InP resonant angular velocity sensor for a monolithically integrated optical gyroscope. *IEEE Photonics J*, 2016, 8: 1–19
- 59 Khial P P, White A D, Hajimiri A. Nanophotonic optical gyroscope with reciprocal sensitivity enhancement. *Nat Photon*, 2018, 12: 671–675
- 60 Dell’Olio F, Tatoli T, Ciminelli C, et al. Recent advances in miniaturized optical gyroscopes. *JEOS:RP*, 2014, 9: 14013
- 61 Jovanovic N, Spaleniak I, Gross S, et al. Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical instrumentation I: The multimode waveguide. *Opt Express*, 2012, 20: 17029–17043, arXiv: [1207.0153](#)
- 62 Yang H, Chen Z L, Liu W G, et al. Recent progress in photonic lantern (in Chinese). *Laser Optoelectron Prog*, 2018, 55: 19–31 [杨欢, 陈子伦, 刘文广, 等. 光子灯笼研究进展. *激光与光电子学进展*, 2018, 55: 19–31]
- 63 Norris B, Bland-Hawthorn J. Astrophotonics: The rise of integrated photonics in astronomy. *Opt Photon News*, 2019, 30: 26–33, arXiv: [1909.10688](#)
- 64 Spaleniak I, Jovanovic N, Gross S, et al. Integrated photonic building blocks for next-generation astronomical instrumentation II: The multimode to single mode transition. *Opt Express*, 2013, 21: 27197–27208, arXiv: [1311.0578](#)
- 65 Su T, Scott R P, Ogden C, et al. Experimental demonstration of interferometric imaging using photonic integrated circuits. *Opt Express*, 2017, 25: 12653–12665
- 66 Johnston A H. Radiation effects in optoelectronic devices. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2013, 60: 2054–2073
- 67 Zhou Y, Hu Z Y, Bi D W, et al. Progress of radiation effects of silicon photonics devices (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2019, 68: 204206 [周悦, 胡志远, 毕大伟, 等. 硅基光电子器件的辐射效应研究进展. *物理学报*, 2019, 68: 204206]
- 68 LaBel K, Barnes C, Marshall C, et al. A roadmap for NASA’s radiation effects research in emerging microelectronics and photonics. In: Proceedings of the IEEE Aerospace Conference. Big Sky, 2000. 5: 535–545
- 69 Girard S, Baggio J, Bisutti J. 14-MeV neutron, γ -ray, and pulsed X-Ray radiation-induced effects on multimode silica-based optical fibers. *IEEE Trans Nucl Sci*, 2006, 53: 3750–3757
- 70 Gajanana D, van Beuzekom M, Smit M, et al. Irradiation tests on InP based Mach Zehnder modulator. *J Inst*, 2013, 8: C02025
- 71 Dumon P, Baets R, Kappeler R, et al. Measured radiation sensitivity of silica-on-silicon and silicon-on-insulator micro-photonics devices for potential space application. In: Proceedings of the Optics and Photonics. San Diego, 2005. 5897: 58970D
- 72 Ebeleing R, Yang S, Bodis P, et al. Radiation hardness of silicon integrated nano photonic devices. In: Proceedings of the Symposium of the IEEE Photonics Benelux Chapter. 2010. 217–220

- 73 Brasch V, Chen Q F, Schiller S, et al. Radiation hardness of high- Q silicon nitride microresonators for space compatible integrated optics. [Opt Express](#), 2014, 22: 30786–30794, arXiv: [1406.0297](#)
- 74 Seif El Nasr-Storey S, Boeuf F, Baudot C, et al. Effect of radiation on a Mach-Zehnder interferometer silicon modulator for HL-LHC data transmission applications. [IEEE Trans Nucl Sci](#), 2015, 62: 329–335
- 75 Zeiler M, El Nasr-Storey S S, Detraz S, et al. Radiation damage in silicon photonic Mach-Zehnder modulators and photodiodes. [IEEE Trans Nucl Sci](#), 2017, 64: 2794–2801
- 76 Zeiler M, Detraz S, Olantera L, et al. Comparison of the radiation hardness of silicon Mach-Zehnder modulators for different DC bias voltages. In: Proceedings of the 2016 IEEE Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD). Strasbourg, 2017. 1–2
- 77 Goley P S, Tzintzarov G N, Zeinolabedinzadeh S, et al. Total ionizing dose effects in 70-GHz bandwidth photodiodes in a SiGe integrated photonics platform. [IEEE Trans Nucl Sci](#), 2018, 66: 125–133
- 78 Hoffman G B, Gehl M, Martinez N J, et al. The effect of gamma radiation exposure on active silicon photonic device performance metrics. [IEEE Trans Nucl Sci](#), 2019, 66: 801–809
- 79 Reed G T, Mashanovich G Z, Gardes F Y, et al. Recent breakthroughs in carrier depletion based silicon optical modulators. [Nanophotonics](#), 2014, 3: 229–245
- 80 Streshinsky M, Ding R, Liu Y, et al. Low power 50 Gb/s silicon traveling wave Mach-Zehnder modulator near 1300 nm. [Opt Express](#), 2013, 21: 30350–30357
- 81 Carroll L, Lee J S, Scarcella C, et al. Photonic packaging: Transforming silicon photonic integrated circuits into photonic devices. [Appl Sci](#), 2016, 6: 426

Integrated photonics for space applications

TAO YuanSheng¹, WANG XingJun^{1,2*}, HAN ChangHao¹, JIN Ming¹ & SHU HaoWen¹

¹ State Key Laboratory of Advanced Optical Communication Systems and Networks, Department of Electronics, School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China;

² Nano-optoelectronics Frontier Center of Ministry of Education, Peking University, Beijing 100871, China

Since the flourish of the space technology, microelectronic integrated circuits can no longer meet the urgent requirement of the space-based systems in terms of transmission capacity, communication speed and electromagnetic compatibility. The conventional space-based optoelectronic systems are now based on a bulk optical device, which have been seen to possess some fundamental restrictions as regards its size, weight, power and cost. Integrated photonics provides an ideal solution for the above bottlenecks that existed in current space-based systems, and this tends to be an emerging research focus in recent years. In this paper, we focused on the technology of integrated photonics for space applications. First, we briefly introduced the characteristic and the development of several main material platforms for integrated photonics, which are indium phosphide, silicon, and silicon nitride and thin-film lithium niobate. Then, we systematically reviewed the progress of the integrated photonics for various fields of space-based application: high-speed laser communication, microwave photonics, optical sensing, biological health, autonomous navigation and astronomy imaging. The recent breakthrough, which is related to the working principles and critical limitations of these space-based integrated photonics technologies, has been described in detail. Since its operation is utilized in practical space missions and satellites, the integrated photonics devices should therefore, undergo testing of harsh space environments, especially under exposure to different forms of ionizing radiation. Therefore, we also analyze the radiation effects and reliability of the integrated photonics devices which are based on different material platform. Finally, the main achievements which have been recorded in the space-based integrated photonics technology are summarized and the future prospects presented: (i) reducing the power consumption of the integrated photonics circuits; (ii) realizing the photonics chip package with high reliability; (iii) industrialization and low-cost fabrication for the optoelectronic integration.

integrated photonics, space applications, optical communication, optical sensing, radiation effects

PACS: 42.82.Et, 07.87.+v, 42.79.Sz, 42.79.Pw, 61.82.Fk

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0010](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0010)