Website: ycyk.brit.com.cn Email: ycyk704@163.com

光电微系统技术发展综述

崔大圣¹,刘 峰¹,王 璇¹,文 艺² (1 北京遥测技术研究所 北京 100076 2 北京宇航系统工程研究所 北京 100076)

摘要:光电微系统具有探测精度高、处理速度快、传输通量大等优势,在信息传输、目标探测和光子处理等方面 具有广泛应用。本文综合国内外光电微系统产品和技术现状,重点从信息传输、目标探测和光子处理三个方面展开叙述,讨论了激光器、调制器、波导等光电器件,并对三维集成技术和光电微系统平台进行简介。简述了国内外有关光 电微系统的发展计划,提出了国内发展独立的微系统平台和相关技术的迫切性和必要性。

关键词:光电微系统;三维集成;光电器件
中图分类号:TN29 文献标识码:A 文章编号:CN11-1780(2021)05-0003-15
DOI: 10.12347/j.ycyk.20210526001
引用格式:崔大圣,刘峰,王璇,等.光电微系统技术发展综述[J]. 遥测遥控,2021,42(5):28-42.

Development of optoelectronic microsystem technology

CUI Dasheng¹, LIU Feng¹, WANG Xuan¹, WEN Yi²

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The optoelectronic microsystem with the advantages of high detection accuracy, fast processing speed and large transmission flux, has been widely used in information transmission, target detection and photon processing. Based on the current situation of optoelectronic microsystem products and technologies at home and abroad, this paper focuses on information transmission, target detection and photon processing, discusses optoelectronic devices such as lasers, modulators and waveguides, and briefly introduces three-dimensional integration technology and optoelectronic microsystem platform. The development plans of photoelectric microsystem at home and abroad are briefly described, and the urgency and necessity of developing independent microsystem platform and related technologies in China are put forward.

Key words: Optoelectronic microsystem; 3D Integration; Optoelectronic devices

DOI: 10.12347/j.ycyk.20210526001

Citation: CUI Dasheng, LIU Feng, WANG Xuan, et al. Development of optoelectronic microsystem technology [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(5): 28–42.

引 言

光电微系统作为微系统的一个重要分支,是以微纳制造和微集成工艺为基础,融合微电子和微光子 等技术,将传感器、控制器、执行器、算法及各种接口一体化集成,实现单一或多类用途的综合性前沿 领域。光电微系统作为一项多学科交叉的新技术,在通信、航天、军事对抗等领域具有广泛的应用前景, 被公认为是集成电路之后下一个基础性和先导性产业^[1-3]。全球数据流量的爆炸式增长推动了高效率、高 集成度、低成本微系统的发展,以片上系统(SoC)、系统封装(SiP)和异质异构集成为代表的微系统 技术不断涌现。光电微系统将玻色子(光子)和费米子(电子)的优点结合,光子集成电路提供大带宽、 低延迟和低传输损耗,电子集成电路完成信号处理功能,这些都成为了新的研究热点。

1 光电微系统应用

光电微系统技术结合了以微电子为代表的集成电路技术超大规模、超高精度和光子技术超高速率

的优势,是集成电路技术、光子技术、封装技术等先进工艺的集合。通信、探测和处理领域日益增长的 应用需求是推动光电微系统发展的主要动力。

1.1 信息传输

21 世纪初, IBM、Intel、Sun Microsystems(后并入 Oracle)、NTT/NEC 等公司设立独立光电微系 统部门并投入大量资源和学术界一起对光电产业进行深入研究, IBM 和 Intel 也相继推出了光电微系统 产品。在产学研三方的努力下,近十年更是催生了 Luxtera、Kotura、Lightwire、Aurrion 和 Acacia 等一 批聚焦在光通信的公司^[4,5]。

2015年, IBM 在美国硅谷举行的年度激光和光电会议(Conference on Lasers and Electro Optics 2015) 上,展示了完全整合的波分复用 CMOS 光电芯片,为一种能让光与电并存的廉价、商业化芯片生产技术 铺路。如图1所示,芯片有4个激光信道,分别以25 Gbps的速度在芯片上运作。锗光学探测器以及光 学多任务器将融合的 100 Gbps 电子信号进行处理,并用干涉仪将该电子信号调变成四通道芯片外的激 光信号^[6]。



图 1 IBM 硅光子芯片

Fig. 1 The IBM silicon photonics chip

2019年,新兴公司 Ayar Labs 发布了多端口设计的 TeraPhy 小芯片,理论上能够实现每秒数十 TB 的带宽,如图 2 所示。这些 TeraPhy 小芯片具有高带宽的电接口方便与硅芯片转接。由于芯片之间的数 据传输采用光信号,芯片可将互连带宽密度提升1000倍的同时功耗仅为十分之一,很适合AI、云、高性 能计算、5G、激光雷达等新系统架构的应用^[7]。在 PIPES 项目的第一阶段, Avar Labs 的 TeraPHY 小芯片 与采用 AIB 接口和 Intel EMIB 硅桥封装的 Intel FPGA 共同封装,成功地用高效的光信号接口取代了先 进现场可编程门阵列(FPGA)的传统电输入/输出(I/O)——电串行器/解串器(SERDES)小芯片。 1.2 目标探测

在目标探测领域,不断发展的光电相控阵在成像、激光雷达、显示、传感和全息等方面潜力巨大。 光学相控阵可以通过液晶、微机电系统、光电微系统等多种方式实现。基于液晶的光电相控阵通过改变 加载在晶体分子上的电压来实现光束转向,通过改变液晶分子的取向来控制电磁波的相位,在光束转向 速度和转向范围上受到限制。基于微机电的光电相控阵通过转向镜实现光束转向,也存在着转向范围小、 转向速度慢、功率消耗大等缺点。光电微系统集成相控阵以其更好的稳定性和更大的波束转向范围而备 受关注,近年来有关光电相控阵的研究成果根据天线的排布可以分为一维相控阵和二维相控阵两种。

在一维相控阵领域, Acoleyen K V^[8]等人于 2009 年利用 SOI 工艺通过波导光栅天线实现了 1×16 相 控阵,基于热光效应可以实现 14.1°的波束扫描,如图 3(a)所示。随着集成光电相控阵天线规模不断 扩展, Chung^[9]等人在 2017 年引入子阵列概念, 并在多个移相器之间共享控制电路, 提出了一种可扩展 架构。这一方法实现了迄今为止天线数量最多的1×1024集成光电相控阵阵列,能够以0.03°的波束宽度 实现 45°范围内的波束扫描,如图 3 (b) 所示。随着三维异构集成技术不断发展,出现了将激光器、透 镜等模块一体集成的光电相控阵,如图3(c)和图3(d)^[10,11]所示。近年来,3D光子集成芯片技术成 为实现光电微系统的重要手段,不同于传统芯片工艺的层叠结构,3D 光子芯片通过垂直耦合形成三维 结构,提高了芯片面积的利用率,如图3(e)^[12]所示。上述相控阵都可以称之为面射型相控阵,除此之 外,端射相控阵也是相控阵的一个类型。图3(f)^[13]展示的端射相控阵通过64单元的波导辐射实现了 1.6°的波束宽度和180°的扫描范围。





Fig. 3 One dimensional integrated optoelectronic phased array

由于一维光电相控阵在二维波束控制上受限,所以研究二维光电相控阵势在必行。麻省理工学院电子研究实验室利用硅基 CMOS 工艺制备了 8×8 的纳米天线阵列,并为每个单元配备加热器,利用脊波导的热光效应移相,实现了二维的光束操控,如图 4 (a)^[14]所示。阵列整体尺寸为 576 µm×576 µm,在 1 550 nm 的固定波长下,可以实现±6°的波束控制。美国南加州大学基于 IBM 商用 SOI 工艺研制的单片集成光电相控阵芯片包括 8×8 个单元,每个单元包括一个热光可调移相器,一个热光可调衰减器,一个充当纳米光子天线的辐射光栅耦合器,以及完整的控制电路,如图 4 (b)^[15]所示。这一复杂的芯片集成了 300 多个不同的光学器件以及 74 000 种不同的电器件,可用于成像、遥感等探测应用。





(b) Thermo-optic phase shifter photoelectric phased array

图 4 二维光电相控阵示意图



1.3 光子处理

随着计算机性能需求的日益增长,传统电子计算机的运算速度由于互联速度和传统架构的限制已经 进入瓶颈,光子计算以其更高的理论计算速度成为一个研究热点。

1969年,美国麻省理工学院研究人员开启光子计算机研究。1984年,IBM 研发出第一台能够正常 工作的光子计算机,但只能在接近绝对零度的环境下工作。1990年,贝尔实验室成功研制了一台由棱镜、 透镜和激光器等元器件构成的光电混合型计算机。2006年,哈佛大学的研究者通过"冷冻"超低温原子 控制光线,形成光学电脑中央处理器(CPU)。2008年,英特尔公司研究者使用基于硅的雪崩光电探测 器实现创世界纪录的高性能,奠定了降低光学链路成本的基础。2012年,美国宾夕法尼亚大学研究 者用硫化镉纳米工艺研制出全光光子开关。美国加利福尼亚大学(UC)圣地亚哥分校研究者研制出 能使光停住并长时间保留在光腔中的超材料设备。2015年,美国杜克大学研究者研发出每秒钟能够 开关 900 亿次的 LED 灯管,奠定了光子计算机的硬件基础。同年,麻省理工学院的研究者研制出一种 可以与传统的计算机结合进行深度学习的新型光学计算芯片。2017年,麻省理工大学 Yichen Shen 等 人提出了一种基于纳米光子处理器和硅光电路的包含 56个可编程干涉仪的全新全光神经网络架构,如 图 5 所示。其优越的前向传播速度和功率效率可以允许神经网络直接在光子芯片上训练,显著提高计 算速度并降低功耗^[16]。

今年 Nature 连发两篇光子 AI 芯片论文。其中, Xingyuan Xu 等人演示了一种用于矢量处理的通用 光学卷积加速器,运行速度为11.3 TOPS,并基于矩阵的方法对 250 000 像素的大规模图像进行了卷积^[17], 如图 6 所示。研究者完成了手写数字图像的识别实验,准确率可达 88%。证明了光学计算在人脸识别和 临床应用中的病理扫描等实时大规模计算中的应用可能。





2021年9月

2 光电微系统关键技术

光电微系统作为一个前沿的研究方向,涉及器件、加工工艺和封装技术等多个技术领域。为了推动 光子学与电子学的快速融合,光学微系统现阶段的主要研究方向包括已有 IC 工艺线下新型光电器件的 研发、适用于光电混合集成的新工艺开发和新封装工艺的探索三个方面^[18-20]。

2.1 光电微系统器件

光电微系统的构成可以分为四个层次:器件、芯片、模块、系统。集成化的光电器件是构建光电微 系统的基础,主要包括激光器、调制器、波分复用及解复用器、耦合器和波导等。下文将针对一些关键 器件展开介绍。

2.1.1 集成激光器

在光电微系统中,激光器作为光信息的载体对响应时间、光谱带宽等指标有较高的要求。由于最常见的硅基载体无法满足激光器对发光效率的要求,所以,现在使用的半导体激光器大多采用 III-V 族发光材料与硅光电路混合集成^[21-23]。实现这种混合集成的技术方向主要有三种:

①将半导体激光器封装在激光盒体中,光通过光栅耦合器进入硅波导。这种技术以 Luxtera 公司为 代表,如图 7(a)所示。这种分离模块封装在一个盒体中的方式能够最大限度利用各个模块的性能,但 是不可避免地在集成度上有所欠缺。

② 将 III-V 族的激光器芯片倒装焊在 SOI 晶圆上,光通过端面耦合进入硅波导。欧洲和日本的研究单位对此技术研究较深,如图 7(b)所示。倒装焊的封装方式能够进一步提升激光器的集成度,芯片间的短互联有利于减小损耗提高性能,但是对封装工艺要求较高。

③ 在 SOI 晶圆键合 III-V 族材料,然后再制作激光器,通过倏逝波耦合将光耦合进入硅波导。Intel 的激光器多采用这种方式制备,如图 7 (c)所示。Intel 通过不同材料在硅基底上的生长键合,利用各个 材料的优势特性完成对应器件制备,具有很高的集成度和稳定性。但是涉及多种基底的生长和配合,对 工艺平台要求很高,技术有待进一步提升。



近几年,新的激光器形式不断出现。2017年, Jock Bpvington 等^[24]提出了一种可重构梳状激光器用于通道节约,如图 8(a)。通过可调谐的微环和环形滤波器阵列,实现光通道的自由调节。单个通道的光功率可达 2.8 mW,总功率大于 15 mW,效率不低于 12%。2021年,Yuyao Guo 等^[25]人介

绍了一种高性能 III-V 氮化硅外腔激光器,如图 8(b)所示,该激光器具有相对较快的开关时间。激光器外部反馈电路基于 800 nm 厚的氮化硅波导,光限制因子为 87%。两个非相邻激光波长之间的切换时间为 60.7 μs。在注入电流为 500 mA 时,最大输出功率为 34 mW。在 58.5 nm 的调谐范围内,边模抑制比大于 70 dB,激光器本征线宽为 2.5 kHz。



(b) 高性能III-V/Si $_3N_4$ 外腔激光器 (b) High performance III-V/Si $_3N_4$ external cavity laser

图 8 集成激光器最新研究成果 Fig. 8 Latest research achievements of integrated laser

2.1.2 调制器

从激光器发出的光信号需要经过调制器将外界电流、电压转换成光波的强度、幅值、相位、频率等 参数以实现信号的光学传输。光调制器根据原始信号的不同可以分为电光、热光、声光、全光四种,其 中,光电微系统中最常用的就是电光调制器^[26-28]。

光电调制器的研究近几年一直在持续。2015年, Po Dong 等^[29]人利用成熟的硅基工艺制备了一种用 于硅光电路具有片上光均衡器的调制器,如图 9(a)。它能够产生 56 GHz 带宽的正交移相键控信号, 并通过均衡器在误码率为 2.4×10⁻² 的条件下信噪比提升 2.5 dB。2016年,Xinru Wu 等^[30]人利用硅基集成 微环开发了一款调制器,如图 9(b)。这种可调微环调制器的线速率为 128 Gb/s,数据速率为 107.6 Gb/s, 实现了调制信号的 6.6 km 和 10 km 单模光纤传输,光纤传输的测量误码率远低于前向纠错阈值。硅微环 调制器具有面积小、每比特占用能量低等优点,但存在固有波长依赖性和调制带宽受谐振器带宽限制的 缺点。2018年,Jin-Kown 等^[31]人基于磷砷化铟的工艺制备了 Mach-Zehnderg 干涉仪光调制器,并基于研 发的工艺流程实现了驱动电路,为制备光电系统提供了一个新思路。2019年,Stefano Grillanda 等人研 发了超高速电吸收调制器。这种小尺寸、低功耗、低复杂度的光电调制器能够实现裸片 107 Gbit/s 的超 高比特率调制。



图 9 调制器结构图 Fig. 9 Structure diagram of modulator

2.1.3 其他器件

解决集成光电微系统与外部光信号的互联问题,需要用到光学耦合器件。最常用的耦合方式有两种, 端面 SSC 耦合和光栅耦合。端面 SSC 耦合是指光信号在波导横截面和光纤横截面直接耦合,优点在于 能够在不改变光路的情况下进行对准,耦合效率较高,但是加工难度大。光栅耦合是利用布拉格衍射效 应将光耦合到芯片,这种结构有很好的设计自由度,可以提高光纤与耦合器的对准容差。

2019 年, Hoppe N 等^[32]利用 250 nm 的绝缘体硅技术,设计了一款非周期光栅耦合器,在 C 波段实 现了 89%的耦合效率,如图 10 所示。制备的 30 μm×30 μm 聚焦光栅耦合器,在 1 549 nm 处测量的耦合 效率可达 81%,并利用扩展的背面金属镜条实现了高效的光栅耦合器阵列。



Fig. 10 Aperiodic grating coupler

光信号通过光纤通过耦合器进入光波导,然后通过光波导在芯片上传输。在光电微系统设计中集成 光波导是重要组成部分,常见形式是平面介质光波导和条形介质光波导。片上光波导和包层组合有硅/ 空气、硅/二氧化硅、氮化硅/二氧化硅、氮氧化硅/二氧化硅等,其中,硅/二氧化硅的波导结构由于损 耗低并且与成熟的 CMOS 工艺兼容被广泛使用。图 11 展示的 LioniX 基于 CMOS 工艺设计的片上光 波导损耗小于 0.1 dB/cm@1 550 nm,与单模光纤的耦合损耗小于 0.5 dB,芯片之间的耦合损耗小于 1 dB, 能够实现复杂结构设计^[33]。

2.2 光电微系统制备和集成

光电微系统的集成离不开光电芯片的制备和集成。与成熟的 CMOS 工艺不同,由于片上光器件的引入,光电微系统对芯片的工艺流程提出了许多特殊要求。而且为了利用不同基底材料的优点,得到性能更好的光电微系统,不同基底芯片的集成工艺也是研究的热点^[34-36]。

2.2.1 光电微系统平台

在过去的二十年里,在研发方面的公共和私人投资导致了光电微系统芯片技术的快速发展。不断出现 的成熟技术平台让第三方可以用最小的限制、最低的成本验证他们的设计创新。这种开放获取模式使无晶



圆厂企业获得在经济上可行的低壁垒访问,这些公司依靠现成的知识产权参与纯晶圆厂的技术流程。

图 11 LioniX 光波导示意图 Fig. 11 Schematic diagram of LioniX optical waveguide

随着集成电路和化合物半导体技术的发展,绝缘体上硅(SOI)、氮化硅、锗硅等工艺平台不断 涌现,绝缘体上硅工艺和氮化硅工艺是最常用的光电微系统平台。SOI作为最成熟的平台可以提供完 整的无源和有源器件集成功能,包括波导,分光器,滤波器,基于光栅的高效光纤耦合器,移相器, (高速)调制器和(高速)光电探测器等。但是 SOI材料不能应用于波长小于1100 nm 的光谱,也就 是说,SOI不适用于可见光和近红外,由此引出了氮化硅基材。基于氮化硅的光电微系统可以覆盖波长 范围为400 nm~4 µm。几种光电微系统工艺平台对比数据见图12。



(a)不同平台波导对比(a) Comparion of different platform waveguides

(b)不同平台适用频率对比

(b) Frequency comparison of different platforms



(c)不同平台的性能量化比较(a传播损耗,b层叠灵活性,c有源器件,d高效的IO,e后向散射, f大功率,g透明度,h热灵敏度,i弯曲半径;5分量化,分值越高性能越优)

(c) Performance comparison of different platforms (a propagation loss, b stack flexibility, c active devices, d high efficiency IO, e backscattering, f high power, g transparency, h thermal sensitivity, i bending radius; 5 points quantization, the higher the score, the better the performance)

图 12 光电微系统工艺平台对比 Fig. 12 Comparison of process platforms for optoelectronic microsystems

针对 SOI 平台, CORNERSTONE 每年提供 6 次的 MPW 班车,可以选择三种不同的 SOI 平台: 220 nm、340 nm 和 500 nm, 并且可以根据用户需求提供专门的制造批次, 产品见图 13 (a)。CORNERSTONE 有四个植入层、三个硅蚀刻深度和金属化步骤,其 PDK 可以使用 Luceda 的 IPKISS^[37,38]。而对于氮化硅 光电微系统工艺, LioniX 国际在商业上提供了基于氮化硅的平台 TriPleX, 产品见图 13(b)。该平台 的主要特点是损耗超低,工作波长范围宽(400 nm~2 350 nm),可以适应芯片上的模式特性。三层波导 平台基于 LPCVD 工艺, 横截面使用一层(单条纹)或多层 LPCVD 氮化硅来创建具有不同特性的波导。 单条纹截面在芯片边缘的光纤模式匹配或超低损耗波导中有广泛的应用^[39-41]。









2.2.2 光电微系统集成技术

由于单一芯片很难在光学和电学两个层面实现高性能,光电微系统对异质异构集成提出了需求。目 前,主要的光电微系统的异质异构工艺包括单片集成(外延生长)、混合集成(键合)和三维异质异构 集成。

单片外延生长实现光电微系统的集成方案一直是人们追求的目标,它在集成度上有着明显的优势, 但是异质外延生长面临晶格失配和生长缺陷等问题,还需要在基础工艺上作进一步研究。虽然如此,已 有的研究成果依然可喜。香港科技大学的 Wang Yating 等人在商用硅片上通过外延生长量子点微盘谐振 器实现了室温下的连续激光^[42],如图 14 所示。而对于通过键合的方式实现单片异质混合集成技术,国 内也开展了大量研究工作。去年,西安电子科技大学郝跃院士团队通过转印和自对准刻蚀技术实现了硅 和氮化硅晶圆级异质集成^[43],并利用此技术首次制备了硅和氮化硅晶圆级单片场效应管,如图 15 所示。 又以此为基础制造光电器件及光电集成电路,为提高光电微系统的集成度、降低研发成本提供了技术手段。



图 14 外延生长技术制备的集成激光器 Fig. 14 Integrated laser fabricated by epitaxial growth technology



图 15 转印技术示意图和显微照片 Fig. 15 Transfer technology schematic diagram and micrograph

三维集成能够进一步压缩光电微系统的体积,减小多个芯片之间的传输损耗,提高系统的可靠性。 三维集成技术离不开 TSV 垂直互连技术,这一技术的使用大大提高了芯片的集成度、急剧缩短了线长、 减小了芯片面积;但是,该技术在面积利用率、设计难度、散热等方面存在一系列的问题。IHM 的 Killge S 等人提出了一种二氧化硅包裹 SU-8 的 TSV 光波导,如图 16。实测传输损耗在 0.8 dB 到 3 dB 之间, 为光电微系统的三维集成提供了技术基础^[44]。

美国桑迪亚实验室完整地走通了光电集成的路线图和三五族化合物集成的路线图,具有完整的全套器件基础,从通信、计算、电子战以及传感四个方面对三维集成光电微系统展开研究,并取得了众多成果。图 17 展示的是基于 PIPES 计划设计的高性能光电互联模块,能够实现传输速度大于 1 Tbps/mm² 的数据通信^[45]。

3 光电微系统的发展规划

硅基光电芯片具有高数据传输率、大带宽以及低功耗等优势,在高性能计算、电信、军事、国防、 航空航天和医疗等领域前景可期。国内外研究机构针对光电微系统投入了大量资金,提出了众多发展 计划。

美国 2015 年成立集成光子制造创新机构,同时,美国国防部先进研究项目局先后提出了 UHPC、 ERIC、POEM 等光电微系统相关项目。MIT、Stanford 等高校和 Intel、IBM 等公司都针对光电微系统的 片上激光器、电光调制器、系统集成等方面展开研究,并取得了众多成果。

日本的筑波纳米技术革新平台和光子网络技术开发项目先后投入数亿美元进行光电微系统的研究。 东京大学、京都大学、NTT、NEC、富士通、日立、东芝等高校和公司在波长可调激光器、超低功耗热 光开关、低损耗波导、光电混合集成等领域研究成果颇丰。

欧洲展开欧盟 HORIZON 2020 计划集成光子项目 ICT26/ICT27/ICT28, 计划投入 1.5 亿欧元对光电

微系统关键技术进行研发。Gent、IMEC、Alcatel Lucent、3S Photonics 等高校和公司在电光调制器,片上激光器,光纤耦合器,光子单片集成方面处于领先水平。



图 16 TSV 光波导技术示意图 Fig. 16 Schematic diagram of TSV optical waveguide technology







国内,工信部发布《中国光电子器件产业技术发展路线图(2018~2022年)》并指出目前高速率光 电芯片国产化率仅3%左右,要求在2022年中低端光电子芯片的国产化率超过60%,高端光电子芯片国 产化率突破 20%^[46]。目前, 浙大、中科院、光迅科技、华为、海信等高校和企业都已经在光电子产业开展部署规划, 但是国内整体技术发展水平与发达国家仍有较大的差距。随着国内企业综合实力逐渐增强, 以及国家集成电路产业的扶持, 国内科研机构和厂商仍需要不断加快推进光电微系统研究。

4 结束语

光电微系统具有高数据传输率、大带宽、高集成度和低功耗的前景优势,对于下一代通信、航空航 天和国防至关重要。但是国内光电微系统与发达国家仍存在差距:在设计方面,架构不够完善,体积和 性能平衡的问题没有妥善解决;在制备方面,我国的高端光电芯片大部分都需要国外代工,对外依赖度 大;在封装方面,光电器件之间的耦合以及大密度集成仍然存在问题。因此,我们要积极与下游厂商对 接,增强企业垂直整合能力,做好长期投入的准备,助力我国光电微系统产业发展。

参考文献

- [1] 马福民,王惠. 微系统技术现状及发展综述[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(6): 12–19.
 MA Fumin, WANG Hui. Status and development of microsystem technology[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(6): 12–19.
- [2] 汤晓英. 微系统技术发展和应用[J]. 现代雷达, 2016, 38(12): 45-50.
 TANG Xiaoying. Development and application of microsystem technology[J]. Modern radar. 2016, 38(12): 45-50.
- [3] 代刚,张健.集成微系统概念和内涵的形成及其架构技术[J].微电子学,2016,46(1):101-106.
 DAI Gang, ZHANG Jian. Concept and architecture technology of integrated microsystem[J]. Microelectronics, 2016, 46(1): 101-106.
- [4] LIU Jifeng, SUN Xiaochen, RODOLFO C A, et al. Ge-on-Si laser operating at room temperature[J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 679–681.
- [5] 孙笑晨,张琦. 硅光子通信产品技术和商业化进程[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(5): 2-6.
 SUN Xiaochen, ZHANG Qi. Technology and commercialization process of silicon photonic communication products[J].
 ZTE technology, 2017, 23(5): 2-6.
- [6] 王巍. IBM 公司研制出了全集成波长多路复用硅光电芯片[J]. 军民两用技术与产品, 2015(11): 24.
- [7] WADE M, MEADE R, RAMAMURTHY C, et al. TeraPHY: A chiplet technology for low-power, high-bandwidth in-package optical I/O[J]. IEEE Micro, 2020, 40(2): 63–71.
- [8] VAN A K, BOGAERTS W, J J, et al. Off-chip beam steering with a one-dimensional optical phased array on silicon-oninsulator[J]. Optics Letters, 2009, 34(9): 1477–1479.
- [9] CHUNG S W, ABEDIASL H, HASHEMI H. A monolithically integrated large-scale optical phased array in silicon-oninsulator CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2017, 53(1): 1–22.
- [10] GUO W, BINETTI P, ALTHOUSE C, Et al. Two-dimensional optical beam steering with InP-based photonic integrated circuits[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 6100212.
- [11] HULME J C, DOYLEND J K, HECK M, et al. Fully integrated hybrid silicon two dimensional beam scanner[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 5861–5874.
- [12] YU Z, SHANG K, LING Y C, ET al. 3D integrated silicon photonic unit cell with vertical U-turn for scalable optical phase array[C]//CLEO: Science and Innovations, 2018.
- [13] PHARE C T, MIN C S, MILLER S A, et al. Silicon optical phased array with high-efficiency beam formation over 180 degree field of view[J]. 2018.
- [14] JIE S, ERMAN T, AMI Y, et al. Large-scale nanophotonic phased array[J]. Nature, 2013, 493(7431): 195–199.
- [15] ABEDIASL H, HASHEMI H. Monolithic optical phased-array transceiver in a standard SOI CMOS process[J]. Optics Express, 2015, 23(5): 6509–6519.
- [16] SHEN Y, HARRIS N C, SKIRLO S, et al. Deep learning with coherent nanophotonic circuits[J]. Nature, 2017: 189–190.
- [17] XU X, TAN M, CORCORAN B, et al. 11 tops photonic convolutional accelerator for optical neural networks[J]. Nature, 2021.

[18] 田中群, 孙建军. 微系统与电化学[J]. 电化学, 2000, 6(1): 1–9.

TIAN Zhongqun, SUN Jianjun. microsystems and electrochemistry[J]. Electrochemistry, 2000, 6 (1): 1-9.

- [19] 章维一, 侯丽雅. 微系统领域的关键技术[J]. 中国机械工程, 2000(11): 1305–1312.
 ZHANG Weiyi, HOU Liya. Key technologies in microsystem field[J]. China Mechanical Engineering, 2000(11): 1305–1312.
- [20] 徐泰然. MEMS 和微系统——设计与制造[M]. 机械工业出版社, 2004.
- [21] ZHANG H, TANG D Y, ZHAO L M, et al. Dark soliton fiber laser[J]. Optics Letters, 2019, 44(9).
- [22] OOSTERHUIS J W, VERSCHUEREN R C, EIBERGEN R, et al. The viability of cells in the waste products of CO2-laser evaporation of cloudman mouse melanomas[J]. Cancer, 2019, 49(1): 6–7.
- [23] LIN S, WANG D, KHAN F, et al. Grating coupled laser (GCL) for Si photonics[C]. Optical Fiber Communication Conference, 2020.
- [24] BOVINGTON J, ZHENG X, DJORDJEVIC S S, et al. III-V/Si vernier-ring comb lasers (VRCLs)[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(3): 15–22.
- [25] GUO Y, ZHAO R, ZHOU G, et al. Thermally tuned high-performance III-V/Si3N4 external cavity laser[J]. IEEE Photonics Journal, 2021: 1–1.
- [26] ZHANG X, LIU Z, ZHANG Z, et al. Photoelectric switch and triple-mode frequency modulator based on Dual-PIT in the multilayer patterned graphene metamaterial[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2020, 37(6).
- [27] JAIN S, RAJPUT S, KAUSHIK V, et al. High speed optical modulator based on silicon slotted-rib waveguide[J]. Optics Communications, 2019, 434: 49–53.
- [28] ELTES F, VILLARREAL-GARCIA G E, CAIMI D, et al. An integrated optical modulator operating at cryogenic temperatures[J]. Nature Materials, 2020: 1–5.
- [29] DONG P, XIE C, BUHL L L, et al. Silicon in-phase/quadrature modulator with on-chip optical equalizer[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(6): 1191–1196.
- [30] WU X, HUANG C, KE X, et al. 128-Gb/s line rate OFDM signal modulation using an integrated silicon microring Modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(19): 2058–2061.
- [31] JIN-KOWN P, SHINICHI T, MITSURU T. InGaAsP Mach–Zehnder interferometer optical modulator monolithically integrated with InGaAs driver MOSFET on a III-V CMOS photonics platform[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 4842.
- [32] HOPPE N, ZAOUI W S, RATHGEBER L, et al. Ultra-efficient silicon-on-insulator grating couplers with backside metal mirrors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 26(2): 1–6.
- [33] TRAN A T, CARR D W. Molecular detection using an optical waveguide fixed to a cantilever: US 6987898[P/OL]. 2006-01-17[2021-05-26]. https://www.freepatentsonline.com/6987898.pdf.
- [34] HAN W T, RADOSAVLJEVIC M, Jun K, et al. Gallium nitride and silicon transistors on 300 mm silicon wafers enabled by 3-D monolithic heterogeneous integration[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(12): 5306–5314.
- [35] BURON M, F GOASDOUÉ, MANOLESCU I, et al. Obi-Wan: ontology-based RDF integration of heterogeneous data[J]. Proceedings of the VLDB Endowment, 2020, 13(12): 2933–2936.
- [36] WIETSTRUCK M, MARSCHMEYER S, WIPF C, et al. BiCMOS Through-Silicon Via (TSV) signal transition at 240/300 GHz for MM-Wave & Sub-THz packaging and heterogeneous integration[C]//2020 50th European Microwave Conference (EuMC). 2021.
- [37] REED G T, PNG C. Silicon optical modulators[J]. Materials Today, 2005, 8(1): 40-50.
- [38] THOMSON D J, GARDES F Y, FEDELI J M, et al. 50-Gb/s silicon optical modulator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(4): 234–236.
- [39] BLUMENTHAL D J, HEI D M, GEUZEBROEK D, et al. Silicon nitride in silicon photonics[J]. Proceedings of the IEEE, 2018.
- [40] ROELOFFZEN C, HOEKMAN M, KLEIN E J, et al. Low loss Si3N4 TriPleX optical waveguides: technology and applications overview[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24(4): 1–1.
- [41] WORHOF K, HEI DE, LEINSE A, et al. TriPleX: a versatile dielectric photonic platform[J]. Advanced Optical Technologies, 2015, 4(2): 189–207.

- [42] YANGTING WANG, QIANG LI, ALAN Y, et al. Optically pumped 1.3 μm room-temperature InAs quantum-dot micro-disk lasers directly grown on (001) silicon[J]. Optics Letters, 2016, 41(7): 1664.
- [43] ZHANG J, ZHANG W, WU Y, et al. Wafer-scale Si-GaN monolithic integrated E-ode cascode FET realized by transfer printing and self-aligned etching technology[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(8): 3304–3308.
- [44] KALLI K, KANKA J, MENDEZ A, et al. Realization of optical multimode TSV waveguides for Si-interposer in 3D-chip-stacks[C]//Proc Spie, Micro-structured & Specialty Optical Fibres V, 2017.
- [45] LENTINE A L, DEROSE C T, DAVIDS P S, et al. Silicon photonics platform for national security applications[C]//2015 IEEE Aerospace Conference, 2015.
- [46] 杨洁. 工信部发布光电子器件发展五年路线图[J]. 变频器世界, 2018(1): 33.

[作者简介]

- 崔大圣 1992年生,博士,工程师,主要研究方向为射频 IC 和太赫兹成像。
- 刘 峰 1983年生,硕士,高级工程师,主要研究方向为微系统。
- 王 璇 1996年生,硕士,助理工程师,主要研究方向为模拟IC。
- 文 艺 1990年生,硕士,工程师,主要研究方向为空间飞行器电气系统综合设计。

(本文编辑: 杨秀丽)