

新一代光传输网络关键器件和集成化技术研究



Key Devices and Integration Technology of Next-Generation Optical Transmission Network

罗勇/LUO Yong, 张冀/ZHANG Ji, 梁雪瑞/LIANG Xuerui

(武汉光迅科技股份有限公司, 中国 武汉 430205)
(Accelink Technology Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202506006

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/34.1228.TN.20251218.1430.004>

网络出版日期: 2025-12-19

收稿日期: 2025-10-20

摘要: 新一代光传输网络向着超大容量、超长距离、高灵活性和低能耗的方向发展, 其核心驱动力在于关键器件的创新与集成化技术的突破。围绕新一代光传输网络, 系统地综述了光电集成技术平台的特性与选择, 并深入探讨了可调谐光源、集成收发芯片、集成光波导放大器(EDWA)及智能光交换器件等关键器件的最新研究进展。在此基础上, 分析了这些技术在超大容量传输系统、数据中心互连(DCI)和5G承载网中的具体应用。最后, 总结了当前面临的主要挑战, 如多材料异构集成、热管理和封装成本等, 并展望了共封装光学(CPO)、晶圆级制造及智能化光网络等未来发展趋势。

关键词: 新一代光传输网络; 光电集成; 硅光子; 可调谐激光器; 光收发芯片; 可重构型光分插复用器

Abstract: Next-generation optical transmission networks are evolving toward ultra-high capacity, ultra-long distance, high flexibility, and low energy consumption. These advancements are driven mainly by innovations in key devices and breakthroughs in integration technologies. The characteristics and selection of optoelectronic integration platforms are systematically reviewed, and the latest research progress on key devices, including tunable light sources, integrated transceiver chips, integrated optical waveguide amplifiers (EDWAs), and intelligent optical switching devices, is thoroughly discussed and examined. Based on this analysis, the applications of these technologies in ultra-high-capacity transmission systems, data center interconnections (DCI), and 5G bearer networks are examined. Finally, the major challenges currently faced are summarized such as multi-material heterogeneous integration, thermal management, and packaging costs, and future trends, including co-packaged optics (CPO), wafer-level manufacturing, and intelligent optical networks are prospected.

Keywords: next-generation optical transmission network; optoelectronic integration; silicon photonics; tunable laser; optical transceiver chip; reconfigurable optical add-drop multiplexer

引用格式: 罗勇, 张冀, 梁雪瑞. 新一代光传输网络关键器件和集成化技术研究 [J]. 中兴通讯技术, 2025, 31(6): 39-48. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506006

Citation: LUO Y, ZHANG J, LIANG X R. Key devices and integration technology of next-generation optical transmission network [J]. ZTE technology journal, 2025, 31(6): 39-48. DOI: 10.12142/ZTETJ.202506006

随着互联网、物联网、大数据、云计算等新兴技术的飞速发展, 全球数据流量呈现爆发式增长。面对庞大的数据传输需求, 传统光传输网络逐渐暴露出容量有限、传输距离不足、能耗较高等问题。因此, 研发新一代光传输网络已成为全球通信领域的核心任务之一。关键器件作为光传输网络的核心组成部分, 其性能直接决定着网络的传输效率与质量。集成化技术则是解决网络复杂度高、成本居高不下、能耗偏大等一系列问题的重要途径, 能够显著提升系统的可靠性、稳定性与可扩展性。综上所述, 深入地研究新一代光传输网络中的关键器件与集成化技术, 对于推动全球通信网

络的升级、满足日益增长的数据传输需求具有非常重要的现实意义。

1 光网络关键技术发展

1.1 发展历程

自20世纪70年代第一代光传输网络诞生以来, 光传输技术已历经多次重大变革。从早期基于石英光纤与简单调制格式的低速传输系统, 到随后采用密集波分复用(DWDM)和外差检测技术实现长距离、大容量传输的第二代光传输网

络，再到如今融合了多种先进调制解调技术、数字信号处理及智能管控技术的新一代光传输网络，每一次技术演进均伴随着关键器件的创新突破与集成化水平的显著提升。

1.2 关键特性

新一代光传输网络具备以下主要特征：

1) 超大容量：系统单通道可实现 Tbit/s 级乃至更高传输速率，总容量可达数百 Tbit/s，可满足全球数据流量的爆发式增长需求。

2) 超长距离传输：借助先进的光放大与色散补偿技术，实现跨洲际的超长距离无中继传输，从而降低网络建设和维护成本。

3) 高灵活性与可扩展性：支持灵活的网络拓扑结构与动态带宽分配，能够依据业务需求快速调整网络资源配置，便于网络升级与扩展。

4) 低能耗：相较于传统光传输网络，在单位比特能耗方面实现大幅降低，符合全球节能减排的发展趋势。

光传输网络呈现更高速率、宽带化、全光化、新型网络融合一体化等趋势，其技术的发展驱动光器件和光芯片集成技术加速更迭。

2 集成化光芯片技术

2.1 平台选择与比较

在光电集成技术中，根据不同材料实现的器件可分为多种平台，以适应多样化功能需求。平台的选择对器件性能、制造成本及应用领域具有重要影响。其中，磷化铟 (InP) 基光电集成平台具有高效的光电转换特性，尤其适用于高速、高功率光电子器件，其制造工艺成熟可靠，在光通信领域应用广泛。然而，InP 平台的集成度相对较低，且成本较高、工艺复杂，制约了其大规模应用。

相比之下，硅光 (SiPh) 集成平台与现有互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺兼容，较高的芯包层折射率差可实现纳米级结构尺寸，有利于实现大规模集成，适用于低成本消费类电子产品。但受限于硅材料的晶格与能带特性，其光电转换效率较低，在下一代高速演进中存在带宽约束问题。

氮化硅 (Si_3N_4) 材料具有较低的光传播损耗，且在高温高功率环境下稳定性良好，适合高频、低损耗光学波导应用。尽管在集成度与性能优化方面不及硅光平台，氮化硅在某些高频、低损耗光通信系统中仍具备显著优势。

二氧化硅 (SiO_2) 平台以低损耗、机械稳定和温度不敏感等特点著称，尤其适用于长距离光通信。多种商用无源器

件如平面光波导光分路器 (PLC Splitter) 和阵列波导光栅 (AWG) 均基于该平台实现。然而， SiO_2 缺乏电光调制能力，且难以实现高密度集成。

薄膜铌酸锂 (TFLN) 材料具有突出的非线性效应和高电光调制效率，在高速光通信与量子信息处理等高端应用中表现优异。但其制备与 CMOS 工艺不完全兼容，集成度低，未来可通过与硅光进行异质集成，提升功能与性能。

综上所述，不同光电集成平台各具优势与局限，在实际研发中需根据具体应用场景、性能指标及成本等因素综合选择。当前，多材料融合集成已成为研究热点，通过材料协同与工艺创新突破单一材料限制，有望为下一代信息传输与处理提供关键支撑。表 1 总结了各平台的优缺点、应用场景及制备技术。

2.2 关键技术

关键技术包括以下 6 个方面：

1) 光无源结构设计技术，采用先进的模拟软件和优化算法，能够实现片上损耗低、光纤耦合效率高的光无源结构。

2) 高带宽调制技术，基于新型材料或结构，实现小型化、低偏压、低插损、高带宽光电调制器阵列芯片。

3) 高带宽探测技术，设计新型的探测器结构，在保证暗电流和响应度的同时，合理设计本征区，降低载流子渡越时间实现较大光电转换带宽。

4) 光电合封技术，将光芯片与电子芯片 (如 ASIC、交换芯片) 集成在同一基板上，通过缩短电信号传输路径来提升性能。其核心目标是通过光电协同设计，解决高速数据传输中的功耗、延迟和带宽瓶颈问题。

5) 耦合技术，通过精确的对准和键合工艺，可以实现芯片与光纤、芯片与芯片之间的高效耦合。

6) 热管理技术，研发了新型的散热结构和材料，如微通道冷却技术、石墨烯基散热涂层等，有效解决了光电子集成芯片在高速运行时产生的热量问题，保证了器件的稳定性和可靠性。

3 新一代光传输网络关键器件

图 1 展示了光传输网络核心光器件的技术演进趋势。在集成可调激光器组件 (ITLA) 方面，随着相干光模块速率从 100 Gbit/s 提升至 800 Gbit/s，激光器线宽从 300 kHz 压缩到 50 kHz，模块封装尺寸亦不断缩小——从 C 封装可插拔 (CFP) 发展到双密度四通道小型可插拔 (QSFP-DD)，对 ITLA 的出光功率与尺寸提出了更高要求，从而形成了 Nano-

表1 光芯片平台特性对比

| 平台 | 制备技术 | 应用场景 | 优点 | 缺点 |
|--------------------------------|---------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| InP | 外延生长、光刻、刻蚀、键合集成 | 相干收发芯片、长距离光传输系统、高速光通信、光放大器 | 直接带隙,支持激光器、探测器等有源器件,高光电转换效率,适合高速、大带宽通信 | 材料和工艺成本高,集成难度高 |
| SiPh | CMOS兼容工艺(SOI衬底)、光刻、干法刻蚀、金属互连 | 数据中心间互联、短距光互连、片上集成光子电路 | CMOS工艺兼容,可大规模低成本制造,集成度高,适合大规模光子电路 | 下一代演进调制带宽受限 |
| Si ₃ N ₄ | 薄膜沉积、CMP、光刻刻蚀 | 光学滤波器、微环谐振腔、光频梳、光子器件、低损耗传输 | 极低的光传输损耗,宽带透明窗口(400~2300 nm),良好的温度稳定性,非优秀的线性光学性能 | 无有源器件功能(需与InP/硅光集成),集成度有限 |
| SiO ₂ | 等离子体增强化学气相沉积、火焰沉积、离子交换 | 长距离光通信、光纤型无源器件、PLC分路器(Splitter)、AWG波分复用器 | 超低光损耗(dB/m级),工艺成熟,热稳定性好,成本低 | 无电光效应,无法实现有源器件,集成度低,尺寸较大 |
| TFLN | 晶体切割、薄膜键合、离子切片、刻蚀(ICP-RIE)、异质集成 | 高速调制器、微波光子学、量子信息处理、非线性频率转换 | 极高电光系数($r_{33} \approx 30$ pm/V),宽带、低损耗,高速相位/强度调制能力,非线性效应强 | 成本高,工艺复杂,片上光源和探测器需异质集成,尚未与CMOS工艺完全兼容 |

AWG:阵列波导光栅
CMOS:互补金属氧化物半导体
CMP:化学机械抛光

ICP-RIE:电感耦合等离子体-反应离子刻蚀
InP:磷化铟
PLC:平面光波导

SiO₂:二氧化硅
SiPh:硅光
Si₃N₄:氮化硅

SOI:绝缘衬底上硅
TFLN:薄膜铌酸锂

ITLA 与 Pico-ITLA 的规范要求。

针对相干收发光组件,当前 400G 光传输网络核心光器件已实现规模化应用,支撑着现有 400G DWDM 光传输网络。未来其发展将沿两个方向推进:一是速率由 128 Gbaud 提升至 256 Gbaud;二是波长范围由 C 波段扩展至 C+L 波段。

3.1 可调谐光源器件

新一代光传输网络要求激光光源具备低噪声、超宽调节范围、更窄谱线宽度及更低功耗。为克服传统半导体光源线宽的问题,高 Q 值无源外腔反馈被引入并证实为压缩线宽的有效方法。基于外腔光反馈技术的无源外腔可分为分立外腔、组合外腔和集成外腔 3 类。尽管采用上述非集成腔结构

可实现极窄线宽激光输出,但仍面临尺寸较大、对机械振动敏感、耦合损耗高、成本昂贵、调节范围有限、功耗偏大等问题。

相较之下,集成外腔反馈激光器在实现窄线宽的同时,显著减小了外腔的尺寸、体积与重量。硅光集成外腔可通过半导体批量工艺在单一衬底上制备,具备与其他光电子组件集成的能力,从而提升了系统的稳定性与可靠性。因此,硅光集成外腔可调激光器已成为下一代可调谐光源的关键技术。

从工艺实现角度,如图 2(b)与(c)所示,硅基集成外腔可调激光器可分为基于对接耦合技术的混合集成激光器和基于外延生长的异质集成激光器。其中,对接耦合技术发展较为成熟,具备对增益芯片和外腔分别进

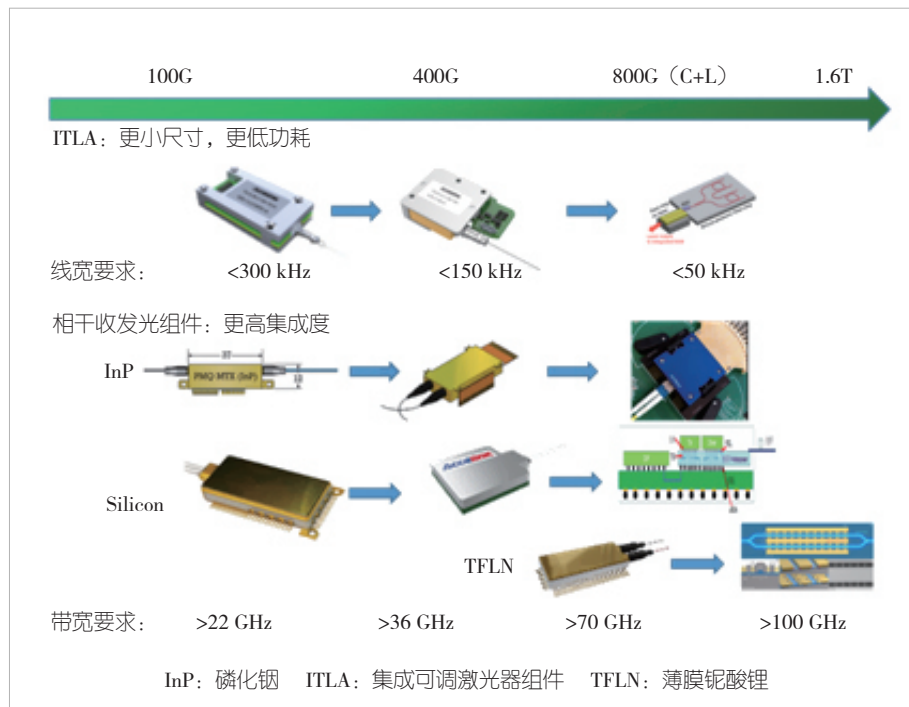


图1 光传输网络核心光器件技术演进趋势

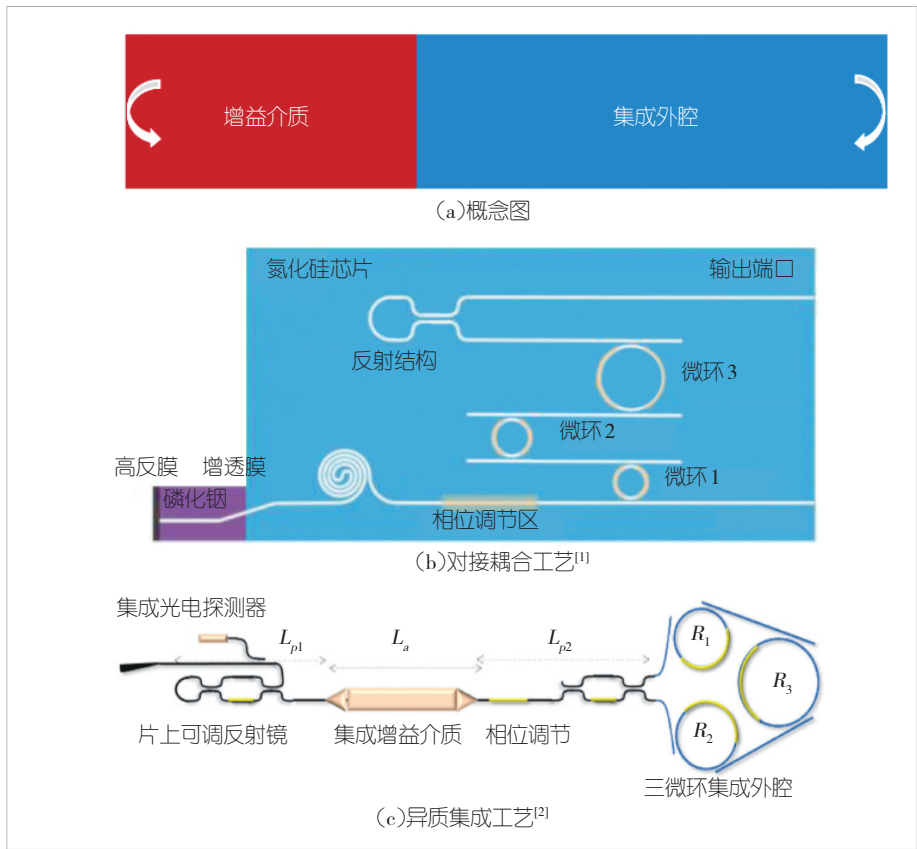


图2 集成外腔反馈半导体激光器及典型集成外腔结构

行优化的灵活性，因而备受关注。目前，硅、 SiO_2 和 Si_3N_4 等多种介质波导平台已被用于制备外腔，形成混合集成激光器^[1]。该工艺的关键难点在于尽可能降低增益芯片与外腔芯片间的对接耦合损耗，以确保激光器整体性能。在此方向开展代表性研究的有NEC公司、东北大学、清华大学、康奈尔大学及加州大学伯克利分校等。

异质集成技术通过将未加工的III-V族材料直接键合于硅波导顶部，或在硅晶圆上直接外延生长III-V族材料，实现与硅基CMOS工艺兼容，从而有效降低制造成本。与混合集成相比，在保证键合质量的前提下，异质集成器件对冲击、振动等具有更好的鲁棒性。

然而，键合质量实际上受诸多因素影响，如键合工艺过程、晶格失配、极化失配以及材料热膨胀系数差异等。与对接耦合技术相比，目前尚未有基于异质集成技术的商用激光器问世。如表2所示，异质集成已成为当前学术研究的热点，其有望通过倏逝波耦合技术降低耦合损耗与反射，进而提升激光器线宽与出光功率。随着键合技术的持续进步，若未来能实现可控的工艺良率，异质集成技术有望广泛应用于实际产品中。

3.2 集成化收发芯片与器件

随着云计算与人工智能的快速发展，超大规模数据中心集群的数据流量已提升至P比特量级，对超大容量、低功耗光互联的需求日益迫切。集成光子技术凭借其高带宽、低损耗等特性，成为应对上述需求的核心技术路径。集成化光收发芯片与器件主要基于InP、硅及铌酸锂等材料平台实现，以下简要介绍基于这3种材料的集成化光收发芯片与器件的研究进展。

InP光子集成技术具备高光电转换效率、大带宽与低功耗等优势，是支撑AI数据中心算力持续增长的关键推动力之一。日本NTT研究所于2023年研制出基于InP的相干驱动调制器与相干接收器，如图3(a)所示，该器件3 dB带宽超过了80 GHz，并实现了128 Gbaud的16QAM调制，刷新了当时同类器件的带宽记录^[8]。2024年，德国弗劳恩霍夫协会提出一种具有平坦频率响应的128 Gbaud相干接收机，该器件采用InP光波导集成相干光电探测器

器与双线性SiGe跨阻放大器，带宽同样超过80 GHz^[9]，如图3(b)所示。此外，美国Lumentum公司在2025年OFC展会上展示了单通道400 Gbit/s光链路及光学共封装器件，显著提升了光通信系统的传输速率与稳定性，适用于高速大容量传输场景。

基于硅光平台的收发集成芯片能够单片集成高速调制器与探测器，并借助2D/3D先进光电封装技术实现高密度、高集成度的光收发器件，该方案已成为当前光电器件的主流解

表2 集成硅基外腔激光器性能

| 作者 | 工艺技术 | 边模抑制比/dB | 调节范围/nm | 最小线宽/kHz |
|----------------------|------|----------|---------|----------|
| ZHU ^[3] | 混合集成 | 52 | 46 | 18 |
| ZHU ^[4] | 混合集成 | 50 | 47 | 85 |
| FAN ^[11] | 混合集成 | 60 | 70 | <0.04 |
| LIANG ^[5] | 异质集成 | >40 | 40 | 150 |
| TRAN ^[6] | 异质集成 | >50 | 55 | 50 |
| HUANG ^[7] | 异质集成 | >55 | — | 1 |
| TRAN ^[2] | 异质集成 | >45 | 40 | 2 |
| | 异质集成 | >40 | 110 | <0.22 |

决方案之一。硅光集成芯片具备除光源外的全功能集成能力,可包含马赫-曾德尔(MZ)硅光调制器、微环调制器、锗探测器(Ge PD)、多模干涉耦合器、热光调制器、硅波导、氮化硅波导及波导转换结构、端面耦合器、光栅耦合器等各类有源与无源单元。图4展示了台积电硅光平台所集成的典型功能单元^[10]。基于硅光芯片的光电共封装技术,主要采用陶瓷基板、有机基板、玻璃基板或硅基板将电芯片与硅光芯片进行系统集成。封装互联技术也从传统金丝键合向球栅阵列(BGA)等更高密度的方式演进,封装架构正由二维向三维光电共封装集成方向发展。

图5为光迅公司开发的、基于硅光技术的400 Gbit/s与800 Gbit/s相干光收发集成器件。该器件内部集成硅光相干收发芯片及高速驱动芯片(Driver)、跨阻放大器(TIA)电芯片,采用2D倒装先进光电共封装工艺,实现BGA形态的封装。作为数据中心间高速光互连的核心光器件,该器件主要应用于400ZR/ZR+和800ZR相干光模块,支持在400 Gbit/s 16QAM调制格式下实现长达450 km的传输距离,以及在800 Gbit/s 16QAM调制格式下实现长达120 km的传输。

美国Acacia公司采用先进的三维堆叠封装技术,将相干高速光电组件全部集成于单一封装内,如图6所示。该结构通过将数字信号处理器(DSP)裸片、光子集成芯片(PIC)、驱动器及TIA进行一体封装,显著缩小了光器件尺寸。同时,三维堆叠设计能够有效缩短射频(RF)接口之间的互连长度,从而改善其在130 GBaud等高波特率下的信号完整性。

与InP和硅光平台相比,薄膜铌酸锂(LiNbO₃)凭借其高电光系数、强模场约束能力以及宽透明波长窗口,已经成为高性能光子集成的重要平台,这就是下一代200 GBaud应用的关键调制技术。2023年,贝尔实验室研究团队基于TFLN平台的IQ调制器实现了260 GBaud单波长相干传输(调制器实物如图3(c)所示),并在100 km标准单模光纤

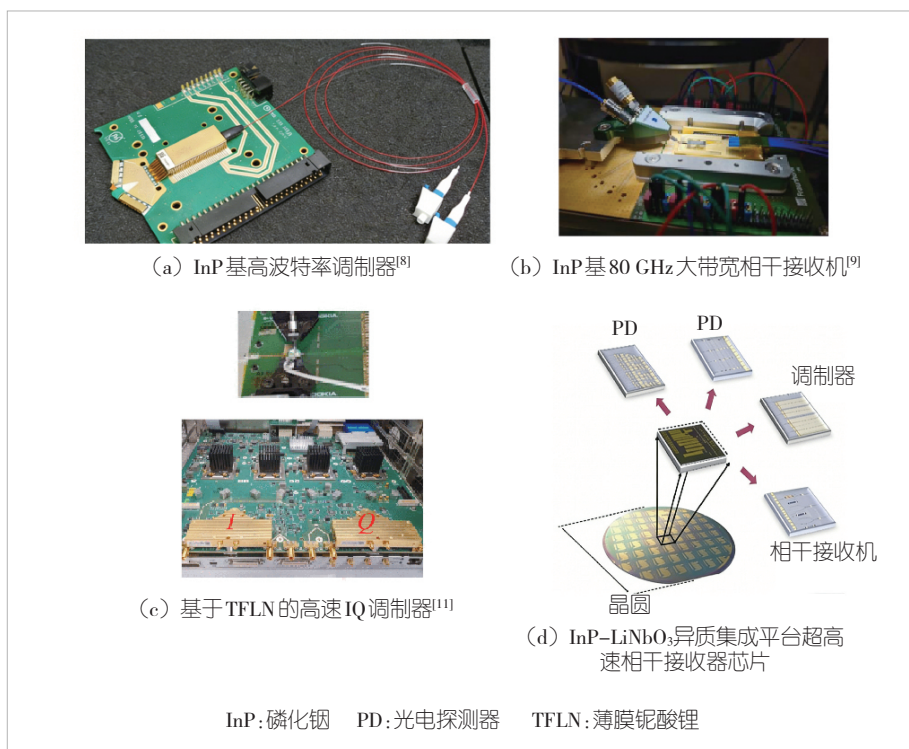


图3 InP材料和TFLN材料集成化光收发芯片结构图

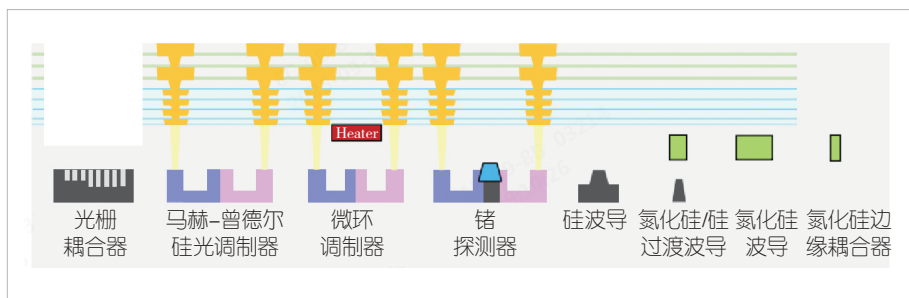


图4 TSMC硅光芯片平台集成化功能单元

上实现了800 Gbit/s的净传输速率。该工作首次在不依赖复杂数字信号处理的情况下,创下260 GBaud的相干传输记录^[11]。

2025年,以色列PacketLight Networks与日本富士通公司合作共同提出了一种基于薄膜铌酸锂与板载光学技术的800 Gbit/s光收发器件,并在光纤通信会议及展览会(OFC)上进行了演示。同年,中国铌奥光电在OFC展会上发布了基于TFLN平台的最新3.2 Tbit/s直调直检光收发器件。西南交通大学于2025年在InP-LiNbO₃混合集成平台上,单芯片集成了超高速相干接收器芯片,突破了TFLN平台在高速有源器件集成方面的核心瓶颈,实现了140 GHz超宽带光电探测器(PD)与3.584 Tbit/s相干接收芯片(器件结构示意图如图3(d)所示)。相比基于InP、SiGe等平台的相干接收芯

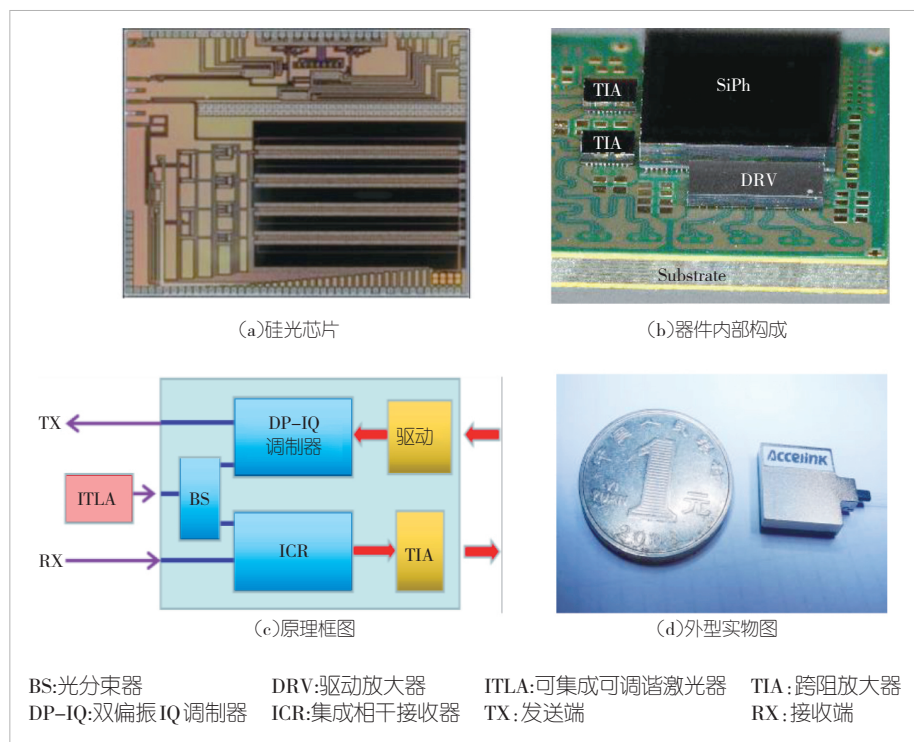


图5 基于2D共封装的硅光相干光电集成器件

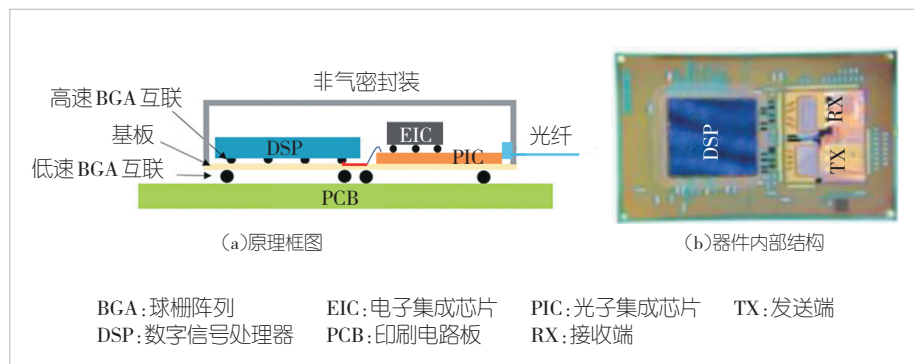


图6 基于3D共封装的硅光相干光电集成器件

片, 该异质集成方案在关键指标上取得了一些显著突破: 单PD带宽提升75% (达140 GHz), 单通道容量 (600 Gbit/s) 与总容量 (3.584 Tbit/s) 均创下纪录, 且能耗降低30%以上。其晶圆级制造流程也突破了传统芯片级集成在成本与可扩展性方面的限制, 为大规模应用奠定了基础^[12]。

3.3 新型光放大器

基于传统C波段掺铒光纤放大器 (EDFA) 的DWDM系统已难以满足云计算与数据中心等高要求业务对传输容量急剧增长的迫切需求, 光放大技术正面临波段扩展与新型光纤连接等多方面挑战。当前在光通信领域中, EDFA光放大器的核心部件——泵浦激光器仍高度依赖进口, 因此研发高

功率、大模场单模泵浦激光器芯片及封装技术是降低系统成本的关键因素。随着波段扩展及L波段EDFA的尺寸限制, 超宽谱低噪声半导体光放大器 (SOA) 芯片正逐步走向系统商用。例如, 华为设计了一款基于SOA阵列的双端口C+L双偏振放大器模块, 具备低损耗、低光串扰和无热退化等特性, 但在多波长放大时仍会面临由SOA非线性引起的光信噪比 (OSNR) 代价问题^[13]。此外, 掺稀土元素光波导放大器因具备易于集成、体积紧凑等优势, 随着流片工艺水平的不断提升, 正逐渐成为当前的研究热点。

集成光波导放大器 (EDWA) 是一种基于EDFA的集成光学器件, 适用于需要高增益与长距离传输的小型化场景, 尤其能够应对L波段EDFA在集成度方面的挑战。EDWA通过片上集成技术提升了光放大器的性能, 具备更紧凑的尺寸与更低的功耗。随着光通信系统对带宽与传输速率需求的持续增长, EDWA已成为集成光学器件研究的重要方向之一, 有望填补集成光子芯片在低噪声光放大技术方面的空白。

在过去30年里, 多家科研团队持续致力于稀土离子掺杂波导放大器的研究。20世纪90年代, 美国贝尔实验室率先开展了关于EDWA的工作。然而, 受限于当时采用的基于低折射率SiO₂的材料体系, 其器件体积大、损耗高, 且无法与现代微纳光子集成工艺兼容, 相关研究随后陷入停滞。

2022年, 瑞士洛桑联邦理工学院在0.5 m长的超低损耗氮化硅集成光波导中, 采用了高能铪离子注入实现掺杂, 获得了超过145 mW的片上连续光输出功率, 并在毫米尺度上实现了高于30 dB的片上连续光增益^[14]。2025年, 华东师范大学团队首次在掺铪铌酸锂薄膜光波导放大器中实现了高外部净增益 (>18 dB) 与低噪声系数 (5 dB)。

尽管EDWA展现出可观的应用潜力, 其在实际应用中仍面临诸多挑战。首先, 不同材料波导中铪离子掺杂的均匀性与浓度控制是难点, 掺杂分布不均会导致增益起伏与性能

不稳定。其次,随着集成度提升,EDWA的功耗与热效应问题日益突出。此外,由于波导双折射效应、材料增益固有各向异性,以及模场分布与有源区重叠的优化存在矛盾,EDWA的偏振相关增益(PDG)难以在整个工作带宽内维持在较低水平。因此,如何在高增益、低PDG、低功耗和良好热稳定性之间取得综合优化,仍是当前研究人员面临的重要挑战。

3.4 集成化光无源器件

基于传统SiO₂平台的光无源芯片及器件,以其超低传输损耗、良好的环境可靠性与成熟的低成本工艺,在光传输网络的演进中始终保持重要地位。即使作为功能单一的无源器件,其在系统升级中仍不可或缺。以阵列波导光栅(AWG)为例,随着光网络容量需求的提升,其光谱特性已从传统C波段平顶型向C+L超宽带型演进,通过增加信道数量与提升单信道速率,共同推动网络容量的扩展。

随着新一代光网络对智能化管控要求的提高,多功能集成化正成为光无源器件发展的新趋势。光网络中对于多信道的监控、调度与保护需求,催生了各类集成化光无源器件的发展。

信道监控主要包括信道能量监控、波长监控与偏振态监控;信道的调度与保护则涉及信道能量的控制及光路切换。信道能量监控通常借助特定分光比的分束器(Splitter)或抽头(Tap)功能的无源芯片结构^[15],并与光电探测器(PD)通过光路耦合与集成封装技术共同实现。

波长监控基于的原理主要包括相干波长检测与相干相位检测两类。前者采用基于180°光混频器结构的相干波长检测技术^[16];后者则通过对至少两路具有不同相位延迟的马赫-曾德尔干涉仪(MZI)光路进行相位检测与差值定标,再通过检测差值与定标值的比对实现波长判定。为进一步扩大检测范围,已衍生出检测波长范围嵌套型^[17]与叠加型^[18]等技术。

偏振态监控通常借助偏振分束结构^[19]与偏振旋转结构^[20]来实现。

信道的调度与保护主要通过可调光衰减器(VOA)实现强度调控,并通过光开关(OSW)完成光路的切换与保护。

通过将上述具备基础功能的无源光芯片结构单元进行集成,可衍生出多种新型集成化光无源器件形态,为光网络向智能化发展提供关键技术支持。

几种应用实例包括:

1) 基于VOA、OSW、分束器、抽头多功能集成结构的池化波分信道监控集成化光无源器件产品;

2) 基于VOA、OSW、分束器、抽头、光混频器结构的波长监控与信道保护集成化光无源器件产品;

3) 基于偏振分束器(PBS)、光混频器结构和带有相位延迟线MZI型波长锁定功能结构的光信道监控产品。

以上所述的多功能集成化光无源器件可在同质材料平台内实现。若要进一步提升光无源器件的集成度,并充分发挥不同材料平台功能结构的性能优势、实现功能互补,异质集成技术则成为该领域的核心发展方向。同时,异质集成也有助于突破无源与有源集成之间的技术瓶颈。目前实现异质集成的主要技术路线包括:微转移打印^[21]、晶圆键合、倒装芯片以及直接外延生长等。

3.5 智能光交换与ROADM器件

可重构光分插复用器(ROADM)可实现波长级动态调度,但仍面临多维冲突与阻塞等问题。新一代基于波长选择开关(WSS)的ROADM,结合软件定义网络(SDN)控制器实现光层自动化组网,已在城域网中大规模部署。WSS产品在发展过程中形成了多种技术方案。目前技术成熟且已大规模商用的主要是基于空间光调制器的WSS产品,按其调制器类型主要可分为3种:图7(a)基于微机电系统(MEMS)的WSS;图7(b)基于液晶堆叠(LC)的WSS;图7(c)基于硅基液晶(LCOS)的WSS。其中,基于MEMS的WSS因像素尺寸较大,难以适应灵活栅格的光网络需求;基于LC的WSS则受限于液晶单元数量,难以满足网络节点对高端口数量的要求。

相比之下,基于LCOS实现的WSS兼具灵活栅格、多端口支持和高频谱利用率等显著优势,已成为构建下一代弹性光网络的主流选择。未来几年,ROADM设备将主要朝着维度增加与波段扩展等方向发展:维度提升主要指WSS模块端口数量从1×20向1×48或1×64演进;同时,随着中国光通信系统逐步从C波段向L波段扩展,WSS模块的维度与带宽需求也将持续提升。

LCOS作为WSS的核心元件,其芯片性能具体包括分辨率、反射率与刷新率,都对WSS的技术指标具有决定性影响。LCOS结构如图8所示,LCOS分辨率从2K提升至更高,可在实现C+L一体化波段扩展的同时,进一步优化工作带宽。

当前主流的WSS产品主要工作在C波段,而L波段的WSS产品也已实现商业化应用。随着400G时代的成熟和800G技术的逐步演进,C+L波段的WSS产品正逐步进入市场并扩大应用规模。C+L波段WSS的实现难点在于,需在维持信道带宽的条件下扩展工作波长范围。从WSS的基本原

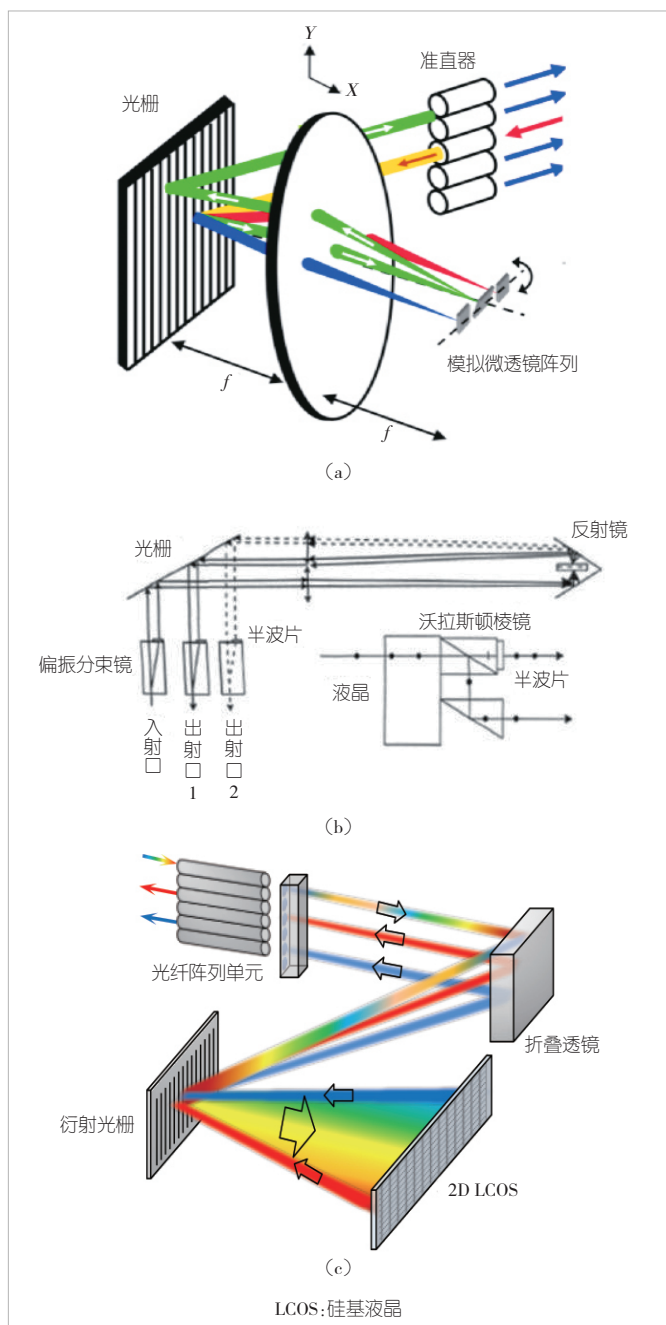


图7 波长选择开关技术方案

理出发，其主要技术手段是增大LCOS芯片的有效使用面积。在此基础上，通过进一步优化光学设计并改进封装工艺，可确保C+L波段WSS在插损、偏振相关损耗及带宽性能等其他关键指标上满足系统要求。图9展示了一款42端口C+L波段WSS的带宽性能。

4 面临的挑战

尽管新一代光传输网络器件与集成技术已取得显著进

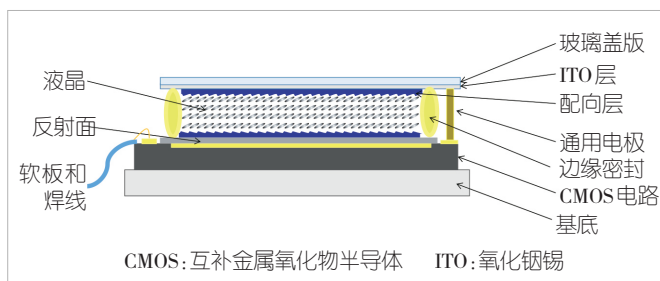


图8 硅基液晶器件像素单元的基本结构示意图

展，但仍面临诸多挑战：

1) 多材料异质集成挑战：将InP、TFLN等多种高性能材料集成到统一的硅基平台上，是发挥各自性能优势的关键路径，但该过程面临晶格失配、热膨胀系数差异、键合工艺复杂及质量控制困难等问题。应对策略包括发展先进的晶圆级键合与选择性区域外延生长技术，优化工艺流程，以提高集成良率和可靠性。

2) 功耗与热管理挑战：随着集成度快速提升，芯片功耗密度显著增大，产生的热量会影响激光器、调制器等核心器件的性能与工作寿命。需通过光电协同设计优化电路与器件结构以降低功耗，同时开发微通道冷却、三维堆叠散热等先进热管理技术，确保芯片稳定运行。

3) 封装与测试挑战：高密度光电芯片中，封装成本占总成本比重较高。光纤阵列与芯片的高效低成本耦合、高速电信号封装以及晶圆级光电测试均构成技术难点。应推动标准化封装流程与接口，发展晶圆级测试技术，引入自动化封装设备，以降低制造成本并提升生产效率。

4) 成本与规模化生产挑战：尽管硅光技术与CMOS工艺兼容，但TFLN、InP等平台的加工成本仍然较高。如何平衡性能、成本与规模化生产之间的关系，是相关技术能否实现广泛商业化应用的关键。需通过持续优化制造工艺、扩大晶圆尺寸、建立标准化工艺设计套件(PDK)等方式，降低设计门槛与流片成本。

5 结束语

5.1 研究工作总结

本文围绕新一代光传输网络中的关键器件与集成化技术展开研究，从光发射器件、光接收器件、光放大器件及光无源器件等关键方向的最新进展入手，系统探讨了光电子集成技术在提升系统容量、降低成本与能耗方面的核心作用。研究表明，新一代光传输网络关键器件与集成化技术的持续发展，为构建高速、高效、可靠的下一代通信网络奠定了坚实

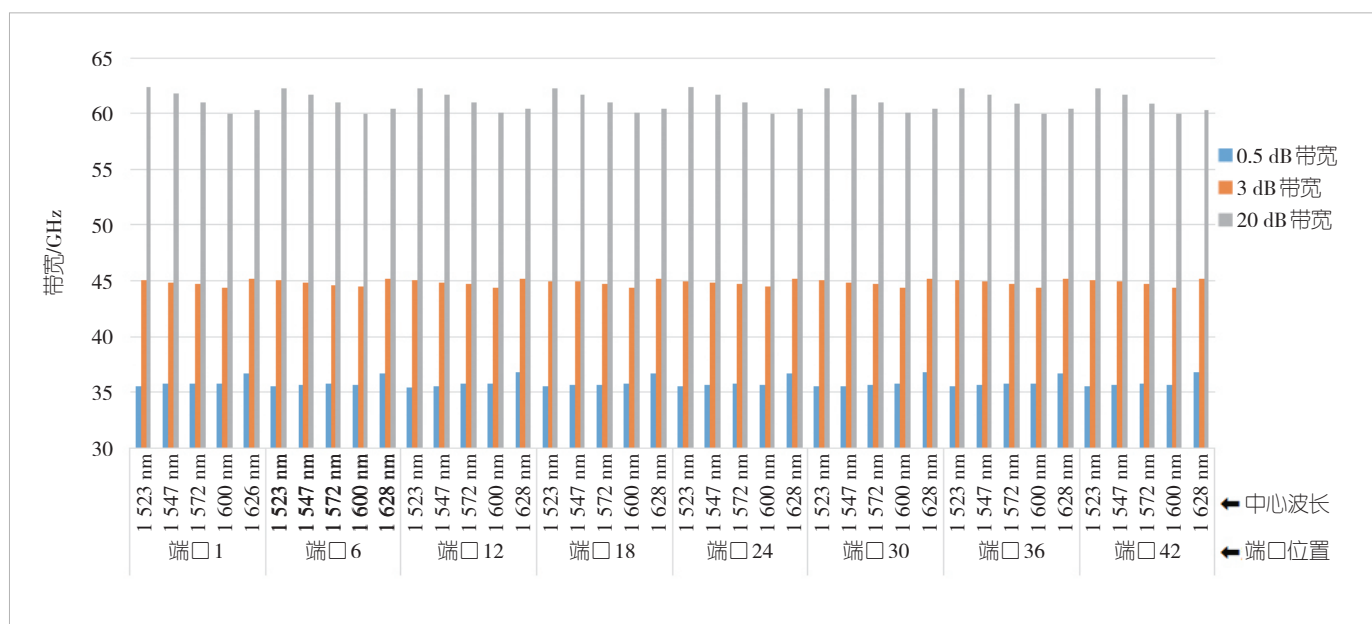


图9 C+L波长选择开关不同工作状态下的原始带宽指标

的技术基础，有力推动了全球通信网络的升级与演进。

5.2 未来发展趋势展望

先进封装技术支撑更高集成度的相干光收发器件：光电共封装是相干光收发器件发展的明确方向，其最终目标是实现光电子处理器的单片集成，从而无缝融合光层功能与数字处理能力。

随着单通道通信速率从400 Gbit/s向800 Gbit/s乃至1.6 Tbit/s迈进，系统不仅需要更优的链路信号完整性设计和更强大的数字信号处理芯片，也对调制器与探测器的带宽性能提出了更高要求。未来，具备极高调制带宽的新材料将获得更广泛的应用前景。其中，铌酸锂（LN）、掺铌钨钛酸铅（PLZT）、钛酸钡（BTO）等薄膜型电光材料将在下一代调制器技术中发挥关键作用，通过异质集成高性能电光材料，硅基光电子器件有望在下一代光收发系统中焕发新的活力。

激光器性能多维度提升：工作波长范围持续拓展，单片集成外腔芯片进一步压缩线宽、缩小尺寸并降低功耗，推动光传输系统在容量与距离上同步提升。

光传输器件波段扩展，逐步实现C+L一体化：包括C+L波段调制与解调技术、C+L波段单片外腔集成可调激光器芯片、适用于超宽带波长选择开关的高分辨率硅基液晶，以及新型光放大技术等。

总之，新一代光传输网络正处于技术革新与产业应用相互促进的关键阶段。持续的技术创新，尤其在多材料异质集成与光电协同设计方面，将成为未来网络演进的核心

驱动力。

致谢

感谢武汉光迅科技股份有限公司王永晨、赵先梦、杨睿、肖礼、陈宏刚、宋梦洋、江毅等专家对本研究工作的支持！

参考文献

- [1] FAN Y, VAN REES A, VAN DER SLOT P J M, et al. Hybrid integrated InP-Si₃N₄ diode laser with a 40-Hz intrinsic linewidth [J]. Opt express, 2020, 28(15): 21713 - 21728. DOI: 10.1364/oe.398906
- [2] TRAN M A, HUANG D N, GUO J, et al. Ring-resonator based widely-tunable narrow-linewidth Si/InP integrated lasers [EB/OL]. [2025-11-20]. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8805353>
- [3] ZHU Y Y, ZHU L. Narrow-linewidth, tunable external cavity dual-band diode lasers through InP/GaAs-Si₃N₄ hybrid integration [J]. Optics express, 2019, 27(3): 2354. DOI: 10.1364/oe.27.002354
- [4] ZHU Y Y, ZENG S W, ZHU L. Optical beam steering by using tunable, narrow-linewidth butt-coupled hybrid lasers in a silicon nitride photonics platform [J]. Photonics research, 2020, 8(3): 375. DOI: 10.1364/prj.382852
- [5] LIANG L J, HULME J, CHAO R L, et al. A direct comparison between heterogeneously integrated widely-tunable ring-based laser designs [EB/OL]. [2025-11-15]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7937313>
- [6] TRAN M A, KOMLJENOVIC T, HUANG D N, et al. A widely-tunable high-SMSR narrow-linewidth laser heterogeneously integrated on silicon [EB/OL]. [2025-11-16]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8426228>
- [7] HUANG D N, TRAN M A, GUO J, et al. High-power sub-kHz linewidth lasers fully integrated on silicon [J]. Optica, 2019, 6(6): 745. DOI: 10.1364/OPTICA.6.000745
- [8] OXAKI J, OGISO Y, HASHIZUME Y, et al. Over-85-GHz-

- bandwidth InP-based coherent driver modulator capable of 1-Tb/s/ λ -class operation [J]. Journal of lightwave technology, 2023 41 (11):3290-3296. DOI: 10.1109/JLT.2023.3236962
- [9] GLASEL J, SCHINDLER A, BOERMA H, et al. 128 GBaud coherent receiver engine with flat frequency response [C]//2024 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2024. DOI: 10.1364/OFC.2024.W1K.7
- [10] LU H Y, TANG C T, CHEN C H, et al. Low-loss high-uniformity silicon nitride optical building blocks integrated on silicon photonics platform [EB/OL]. [2025-11-10]. <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OFC-2025-Th1G.2>
- [11] ALMONACIL S, MARDOYAN H, JORGE F, et al. 260-GBaud single-wavelength coherent transmission over 100-km SSMF based on novel arbitrary waveform generator and thin-film niobate I/Q modulator [J]. Journal of lightwave technology, 2023, 41(12): 3674-3679. DOI: 10.1109/JLT.2023.3269740
- [12] XIE X J, WEI C, HE X C, et al. A 3.584 Tbps coherent receiver chip on InP-LiNbO₃ wafer-level integration platform [J]. Light science applications, 2025, (14): 172. DOI: 10.1038/s41377-025-01821-1
- [13] AZOU IQUI S L, HRAGHI A, DEMIRTZIOGLOU I, et al. Design and integration of a two-port C+L high performance amplifier in a module [EB/OL]. [2025-11-09]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/11263156>
- [14] LIU Y, QIU Z R, JI X R, et al. A photonic integrated circuit based erbium-doped amplifier [J]. Science, 2022, 376(6599): 1309-1313. DOI: 10.1126/science.abo2631
- [15] TANG X G, LIAO J K, LI H P, et al. A novel scheme for 1 \times N optical power splitter [J]. Optics express, 2010, 18(21): 21697. DOI: 10.1364/oe.18.021697
- [16] KURATA Y, NASU Y, TAMURA M, et al. Heterogeneously integrated PLC with low-loss spot-size converter and newly developed waveplate PBS for DC-DP-16QAM receiver [J]. Journal of lightwave technology, 2015, 33(6): 1202-1209. DOI: 10.1109/JLT.2014.2380814
- [17] IP E, LAU A P T, BARROS D J F, et al. Coherent detection in optical fiber systems [EB/OL]. [2025-11-09]. <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-16-2-753>
- [18] STERN B, KIM K, GARIAH H, et al. Athermal silicon photonic wavemeter with wide temperature range [C]//Proceedings of 2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). IEEE, 2023: 1-3. DOI: 10.23919/ofc49934.2023.10116501
- [19] WANG Q C, LU J W, CHEN Y F, et al. High-precision wide-range FBG interrogation based on AWG and ultra-lightweight machine learning model [EB/OL]. [2025-11-15]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030399225009314?via%3Dihub>

- [20] HASHIZUME Y, KASAHARA R, SAIDA T, et al. Integrated polarisation beam splitter using waveguide birefringence dependence on waveguide core width [J]. Electronics letters, 2001, 37(25): 1517 - 1518. DOI: 10.1049/el:20011012
- [21] TAN Y, NIU S P, BILLET M, et al. Micro-transfer printed thin film lithium niobate (TFLN)-on-silicon ring modulator [J]. ACS photonics, 2024, 11(5): 1920 - 1927. DOI: 10.1021/acsp Photonics.3c01869

作者简介



罗勇, 武汉光迅科技股份有限公司光电技术研发部总经理, 正高级工程师, 湖北省通信协会理事; 长期从事光电子器件设计及工艺技术开发、器件可靠性与失效分析等工作; 多次负责国家“863”计划项目、国家“973”计划项目等; 申请专利38项。



张冀, 武汉光迅科技股份有限公司光迅丹麦产品线经理, 高级工程师; 长期从事光波导芯片设计及开发、光电子器件设计及封装工艺技术开发等工作, 主导开发了多款无热AWG模块产品、数据通信用CWDM波分芯片、池化波分应用的CS光模块、传感应用光芯片产品; 发表论文3篇, 申请专利11项。



梁雪瑞, 武汉光迅科技股份有限公司器件研发部副经理, 高级工程师; 长期从事高速硅光芯片、薄膜铌酸锂芯片以及光电集成技术的研发及产品化工作; 承担重大科研项目10余项; 曾获湖北省科技进步奖一等奖、中央企业优秀团队奖、“3551光谷人才计划”优秀青年人才奖等; 申请国家发明专利30余项。