

doi:10.13756/j.gtxyj.2026.250338.

光电子器件技术

陈宝宝,周佩奇,陈代高,等. 掺铒波导放大器的高性能化最新进展[J]. 光通信研究, 2026(1): 250338.

Chen B B, Zhou P Q, Chen D G, et al. Recent Advances in High-Performance Erbium-Doped Waveguide Amplifiers[J]. Study on Optical Communications, 2026(1): 250338.

掺铒波导放大器的高性能化最新进展

陈宝宝^{1,2,3}, 周佩奇³, 陈代高³, 王栋³, 谭旻¹, 肖希³

(1. 华中科技大学 集成电路学院, 武汉 430074; 2. 中国信息通信科技集团有限公司 光通信技术和网络全国重点实验室 武汉 430074; 3. 中国信息通信科技集团有限公司 国家信息光电子创新中心, 武汉 430074)

摘要:随着数据中心、第五/六代移动通信(5G/6G)及高性能计算对带宽需求的爆炸式增长,片上光子集成回路成为实现高密度和低损耗信息处理的关键。作为补偿光子芯片中信号损耗的关键器件,掺铒波导放大器(EDWA)凭借其小型化、低功耗与高集成度等优势,在光通信、传感与光电子系统中展现出重要应用价值。文章系统综述了掺杂稀土离子集成放大器的最新进展,深入分析了影响EDWA核心性能指标的关键因素,并比较了基于不同波分复用(WDM)方案的EDWA的性能优劣。最后,文章展望了高性能EDWA的发展方向,指出其在实现动态增益调控、异构集成与宽带化方面的潜力,为推动EDWA从实验室研究走向规模化通信应用提供了技术参考。

关键词:掺铒波导放大器;波分复用;异构集成;增益调控;高集成度

中图分类号: TN256

文献标志码: A

Recent Advances in High-Performance Erbium-Doped Waveguide Amplifiers

CHEN Baobao^{1,2,3}, ZHOU Peiqi³, CHEN Daigao³, WANG Dong³, TAN Min¹, XIAO Xi³

(1. School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. National Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, China Information Communication Technologies Group Corporation(CICT), Wuhan 430074, China; 3. National Information Optoelectronics Innovation Center, China Information Communication Technologies Group Corporation (CICT), Wuhan 430074, China)

Abstract: The explosive growth in bandwidth demand driven by data centers, the 5th/6th Generation Network(5G/6G) communications, and high-performance computing has made photonic integrated circuits crucial for high-density, low-loss information processing. As key devices for compensating signal loss in photonic chips, Erbium-Doped Waveguide Amplifier (EDWA)s have demonstrated significant application potential in optical communications, sensing, and optoelectronic systems due to its miniaturization, low power consumption, and high integration capability. This review systematically summarizes recent advances in rare-earth-ion-doped integrated amplifiers. It provides an in-depth analysis of key factors affecting core performance metrics of EDWA, and compares the performance advantages and limitations of different Wavelength Division Multiplexing(WDM) schemes. Finally, we outline future development directions for high-performance EDWA, highlighting their potential in dynamic gain control, heterogeneous integration, and broadband operation, thereby offering technical insights to facilitate the transition of EDWA from laboratory research to large-scale communication applications.

Key words: EDWA; WDM; heterogeneous integration; gain control; high integration density

0 引言

近年来,硅基光电子技术的快速发展正强有力地驱动光通信系统朝着高度集成化和小型化方向演进。掺铒波导放大器(Erbium-Doped Waveguide Amplifier, EDWA)作为传统掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)的片上替代方案,因其可在厘米甚至毫米尺度的波导上实现高效光放大,在器件小型化方面展现出巨大潜力,为实现全集成的片上光通信系统提供了关键技术^[1-2]。在

众多集成平台中,铌酸锂薄膜(Thin Film Lithium Niobate, TFLN)因其优异的电光与非线性特性备受关注。通过在TFLN平台上进行稀土离子掺杂,可构建一系列高性能有源器件,如窄线宽激光器和锁模激光器片上集成放大器等,该技术路径被认为是实现紧凑型、低功耗和高稳定性光子集成电路的一条富有前景的解决方案^[3-8]。然而,片上集成化的EDWA也面临着单位长度增益较低、泵浦效率不足和高浓度掺杂引发的合作上转换等挑战,这些因素共同制约着EDWA的最终性能与应用边界^[9-10]。

收稿日期:2025-10-29; 修回日期:2025-11-26; 纸质出版日期:2026-02-10

基金项目:中国博士后科学基金第75批面上资助项目(2024M753631);中国博士后科学基金第18批特别资助项目(2025T180223);湖北省自然科学基金青年资助项目(JCZRQN202501313);工信部高质量发展资助项目(2023GX169)

作者简介:陈宝宝(1996-),女,河南驻马店人。工程师,博士,主要研究方向为超低损耗光集成器件和片上集成光放大器件。

通信作者:肖希,教授级高工。E-mail: xiaoxi@noeic.com

© Editorial Office of Study on Optical Communications. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

为应对上述挑战,研究人员提出了多种技术路径,包括优化波导结构以增强泵浦光与增益介质的重叠积分、开发新型稀土共掺体系以提高能量转移效率与净增益等。其中,在提升泵浦转换效率方面,基于波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)合束的技术方案被广泛采纳,成为提升 EDWA 性能与集成度的关键路径^[11-15]。该技术通过高效复用泵浦光与信号光,并实现其独立管理,从根本上优化了泵浦效率与系统架构。WDM 技术根据集成方式的不同主要分为片外 WDM 合束与片上 WDM 合束两类。前者利用光纤与体光学元件,易于实现高功率输出;后者则通过平面光波导实现全片上集成,代表了技术发展的前沿与未来。因此将 WDM 引用到片上集成光放大系统是实现大规模和高集成度系统的关键路径之一。

本文旨在系统综述 EDWA 的最新研究进展。首先,回顾并对比了采用片外 WDM 合束 EDWA 的性能与发展现状;其次,重点梳理了片上 WDM 合束 EDWA 在不同材料平台(如硅基氮化硅(Si₃N₄)和 TFLN 等)上的创新结构与突破性性能;最后,讨论了该领域面临的关键挑战与未来发展趋势。

1 EDWA 性能提升的研究进展

EDWA 的性能优化路径主要围绕提升内部净增益、增强信号饱和功率、提高片上输出功率及扩展增益带宽等关键指标展开^[16]。当前主流优化策略可从波导结构、材料工艺和泵浦方案等多个维度系统归纳,本文从降低波导传播损耗、增强内部净增益和片上输出功率以及提高增益平坦度这 3 个维度对目前的研究进展做了对比分析。

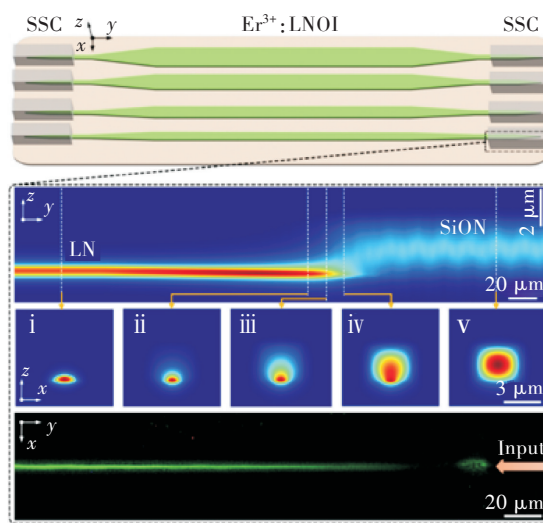
1.1 降低波导传播损耗

降低波导传播损耗是提升放大器性能最为直接有效的途径,它不仅能够增强净增益,还能显著提高泵浦光效率与器件稳定性。具体实施方案包括:首先,优化波导制备工艺^[17],通过选择合适的波导掩模材料、精细调控刻蚀参数并改进后处理流程,有效降低波导侧壁与表面的粗糙度,从而从根本上抑制散射损耗^[18];其次,提升薄膜材料质量,通过改进 TFLN 生长与沉积工艺,旨在降低其本征损耗,特别是减少由非激活铪离子所引起的吸收与散射;第三,调整波导的结构设计^[19],模式重叠积分量化了光场与增益区域内稀土离子的空间相互作用效率,较高的重叠积分意味着泵浦光能量能够更有效地传递给增益介质,是实现高增益放大器的先决条件。

通过优化波导的几何结构(脊形或条形波导),减小光场模式与波导粗糙侧壁界面的重叠积分,从而降低信号光和泵浦光的传播损耗。

1.2 增强内部净增益和片上输出功率

在低损耗波导的基础上,可以进一步通过优化材料与结构设计提升增益性能与带宽。首先,优化掺杂特性,高掺杂浓度引起的合作上转换是稀土离子掺杂材料中的一种非线性过程,当两个处于亚稳态的激发态离子相互作用时,一个离子将能量传递给另一个,使其跃迁至更高能级,最终通过辐射或非辐射方式弛豫。这一效应在高离子浓度下尤为显著,是限制 EDWA 增益效率的关键因素之一。精确调控铪离子浓度或选择引入镱离子作为敏化剂进行共掺,通过高效离子间能量转移,提升泵浦吸收效率与总体增益水平^[20-21]。2023 年,Zhang 等人利用铪镱共掺铌酸锂(Er-Yb:TFLN)波导放大器在 1 532 nm 信号波长下实现了 27 dB 的片上净增益^[22]。其次,降低耦合损耗,通过优化边缘或垂直光栅耦合器的设计,如模斑转换器(Spot Size Converter, SSC)结构方案,以降低泵浦和信号光的耦合损耗,从而有效提升可用泵浦功率与片上输出功率^[23-24],如图 1 所示。此外,在光路中集成特定滤波元件,以抑制特定波长的增益竞争,确保在整个 C 或 L 波段内获得平坦的增益谱。



注:Er³⁺:LNOI 为绝缘体上铪铌酸锂;SiON 为氮氧化硅;插图(i~v)所示为不同位置处的横截面模场分布,底部插图呈现了 SSC 的荧光显微镜图像。

图 1 集成 SSC 结构的 EDWA 芯片的示意图和 SSC 部分仿真模场演变过程^[23]

Figure 1 The schematic of the SSC-integrated EDWA chip and the simulated modal evolution in the SSC region^[23]

EDWA 的片外输出功率主要由内部净增益、饱和特性和耦合效率共同决定。通过设计大模场面积 (Large Mode Area, LMA) 波导可以使铈酸锂脊波导突破模场限制,以降低波导内的功率密度,从而直接提升 EDWA 的饱和功率,使其在更高输入信号功率下仍能维持高增益与线性度^[16, 23-25]。同时,通

过将低传输损耗、高饱和功率设计与低损耗耦合技术相结合,系统地最大化芯片的可用输出功率,满足其对长距离传输或驱动后续光子元件的需求。目前,输出功率超过 100 mW 的 EDWA 已经在超低损耗掺铒氮化硅 (Er:Si₃N₄) 波导和掺铒 TFLN (Er:TFLN) 波导中实现^[9, 20],如图 2 所示。

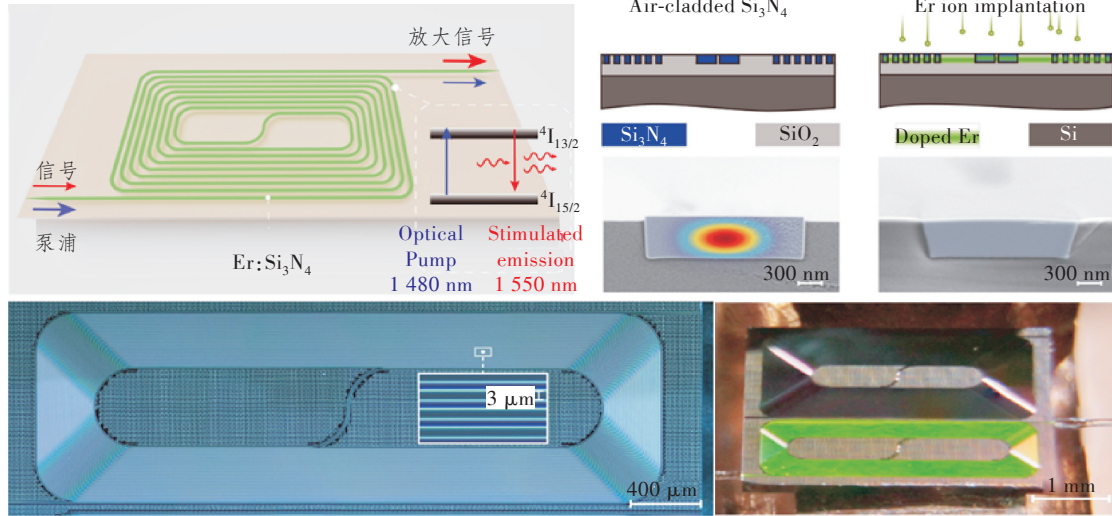


图 2 输出功率达 145 mW 的超低损耗 Er:Si₃N₄ 波导放大器^[9]

Figure 2 A 145 mW output-power Er:Si₃N₄ waveguide amplifier with ultra-low loss^[9]

基于片外光纤 WDM 的不同方案下 EDWA 的性能对比如表 1 所示。得益于集成光子平台上的传输损耗显著降低,针对基于 Si₃N₄、TFLN 和氧化铝 (Al₂O₃) 等先进平台的集成 EDWA 的研究已取得了系列突破性进展。2022 年, Liu 等人通过大马士革工艺研制的 Er:Si₃N₄ 波导放大器实现了 >

20 dBm 的片上输出功率和 >30 dB 的小信号增益。首次与商用 EDFA 相媲美,并超越了最先进的 III-V 异构集成半导体光放大器 (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)^[9]。该团队利用此 EDWA 实现了 16 个 WDM 通道在 81 km 光纤上多 Tbit/s 相干传输^[26]。

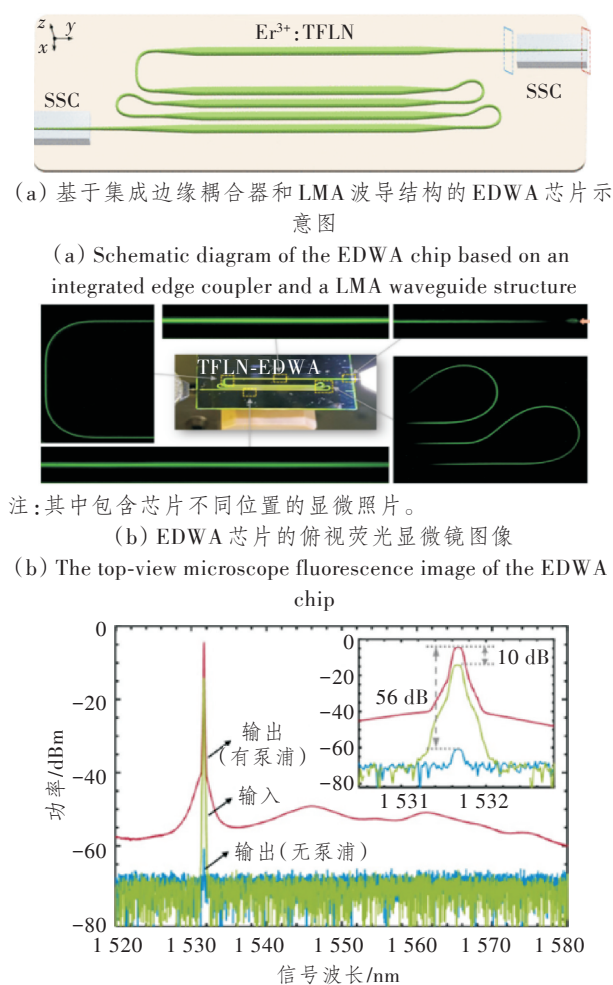
表 1 基于片外光纤 WDM 的不同方案下 EDWA 的性能对比

Table 1 Performance comparison of EDWA under different schemes based on off-chip fiber WDM

波导材料	泵浦波长 /nm	信号波长 /nm	波导长度 /cm	泵浦功率 /mW	Er ³⁺ 浓度 /cm ⁻³	增益 /dB	年份
Er:TFLN	1 480	1 532.0	8.50	200.00	7.50×10 ²⁰	18.00	2025 ^[23-24]
Er:TFLN	1 480	1 550.0	7.00	113.00	7.50×10 ²⁰	16.00	2025 ^[25]
Er:TFLN	1 484	1 531.0/1 550.0	10.00	120.00	7.20×10 ¹⁹	22.30/7.65	2024 ^[27]
Er:TFLN	1 460	1 531.0	5.60	101.00	1.05×10 ²⁰	18.80	2024 ^[16]
Er:TFLN	1 480	1 531.7	9.16	/	7.50×10 ²⁰	38.00	2024 ^[28]
Er-Yb:TFLN	976	1 532.0	15.00	60.00	1.50×10 ²⁰	27.00	2023 ^[22]
Er:TFLN	980	1 530.0	3.60	40.00	1.50×10 ²¹	18.00	2021 ^[29]
Er:TFLN	1 484	1 531.6	2.58	17.31	7.20×10 ¹⁹	16.00	2021 ^[30]
Er:TFLN	980	1 531.6	0.50	21.00	7.50×10 ²⁰	5.20	2021 ^[31]
Er:TFLN	980	1 530.0	0.53	10.78	1.50×10 ²¹	8.30	2021 ^[32]
Er:TFLN	974	1 531.5	0.50	61.00	1.50×10 ²⁰	15.00	2021 ^[33]
Er:TFLN	980	1 531.6	2.80	45.00	1.89×10 ²⁰	24.80	2021 ^[34]
Er:Si ₃ N ₄	1 480	1 550.0~1565.0	50.00	245.00	3.25×10 ²⁰	30.00	2022 ^[9]
Er:Al ₂ O ₃ :SiO ₂	1 480	1 532.0	12.90	200.00	3.90×10 ²⁰	33.50	2024 ^[15]
Er:Al ₂ O ₃ :SiO ₂	976	1 532.0	12.90	250.00	1.92×10 ²⁰	20.00	2014 ^[35]
Er:Al ₂ O ₃ :Si ₃ N ₄	1 480	1 533.0	0.16	18.00	1.11×10 ²¹	3.00	2020 ^[36]
Er:TaO ₂ :Si ₃ N ₄	1 470	1 558.0	6.70	200.00	2.50×10 ²⁰	5.00	2020 ^[37]

在 TFLN 平台上,基于电子束光刻和反应性离子刻蚀技术制备的短波导结构已实现高净增益的波导放大器^[30-34]。然而,受限于波导长度不足及掺铒区域荧光效率低等因素,掺铒铌酸锂波导放大器在增益方面仍面临挑战。为突破这些限制,研究团队从刻蚀工艺、优化掺杂和波导结构等多方面展开了探索。2021 年,华东师范大学程亚团队利用光刻辅助化学机械蚀刻技术研制出 3.6 cm 长的掺铒铌酸锂波导放大器,实现了 18 dB 的高净增益^[29];2023 年,该团队进一步通过优化铒离子掺杂浓度以抑制能量转移和扩散过程激发离子的猝灭,并结合铒铌共掺杂增加泵浦光吸收率,在 15 cm 长波导中将小信号内部增益提升至 27 dB^[22];2024 年,北京大学王兴军团队通过引入多模波导结构以降低传输损耗,在 9.16 cm 波导中实现了 38 dB 的内部净增益^[28];为了突破泵浦功率转换效率低的瓶颈,华东师范大学程亚团队开发了 LMA 波导方案,如图 3 所示,通过分段式 LMA 波导设计与绝热锥形波导结构实现高效模式转换,在弯曲处保持单模传输的同时,使放大信号功率实现数量级提升,最终获得 113 mW 的最大片上输出功率^[24-25]。采用波导宽度为 10 μm 的 LMA 波导,以减少高输入功率下的非线性损伤。LMA 波导在弯曲区前绝热渐变为宽度为 1 μm 的窄波导,以保证单模传输减少弯曲损耗。近期,该团队通过 SiON 薄膜覆盖的锥形 TFLN 波导结构,实现了绝热模式转换,所研制的 SSC 结构单端耦合损耗降至 -1.2 dB,较传统端面抛光对接耦合方案效率提升了 7 倍以上。如图 3(c) 所示,在输入功率为 -20 dBm 时测得约 1 532 nm 信号波长处 EDWA 芯片的光纤-光纤净增益。基于端面耦合器,在 Er: TFLN 平台上实现了片外(光纤-光纤)净增益 > 10 dB 和光纤输出放大功率 > 20 mW 的 EDWA^[23]。此外,利用该高增益 EDWA 作为外置增益芯片,结合光纤布拉格光栅构建激光腔,在 1 532 nm 波长附近产生片外输出功率 > 2 mW 的连续波激光。这类具有高光纤-光纤净增益的 EDWA 在需要具备高速可调谐增益元件应用场景中展现出巨大潜力。

Al_2O_3 凭借高稀土离子溶解度、低散射损耗以及宽带透明窗口等优异特性,成为稀土离子掺杂的理想基质材料之一^[38-39]。同时,其制备工艺已被证明可与 Si_3N_4 等成熟的无源波导平台兼容,为构建无源-有源器件的多层单片集成系统提供了可行路径^[40-42]。目前,掺铒光波导制备方案主要分为两种:一种是直接以增益材料作为波导芯层进行沉积

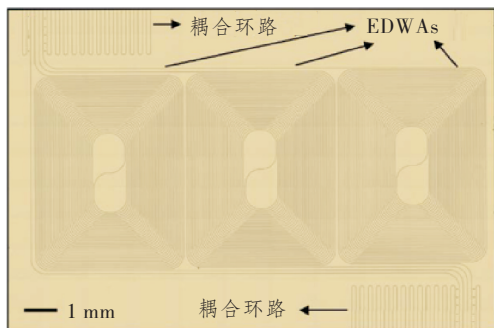


注:其中包含芯片不同位置的显微照片。
(b) EDWA 芯片的俯视荧光显微镜图像
(b) The top-view microscope fluorescence image of the EDWA chip
注:插图显示了信号波长周围的放大光谱。
(c) 在 -14 dBm 输入功率下测量的输入信号和带/不带泵浦的输出信号的频谱
(c) The spectra of the input signal and the output signal with/without pump measured at -14 dBm input power
图 3 基于 LMA 波导结构的 TFLN-EDWA 芯片设计^[24]

Figure 3 Design of the TFLN-EDWA chip base on LMA waveguide structure

和刻蚀,波导损耗由基底材料决定。荷兰特温特大学纳米技术研究所的 Bonnville 等人采用反应磁控溅射技术制备了掺铒 Al_2O_3 波导放大器,并利用双向泵浦实现了 30 dB 的小信号增益^[43];2025 年,该团队进一步将光纤阵列、热电控制模块与基于 Al_2O_3 的宽带 EDWA 共封装。图 4(a)所示为芯片的显微镜图像,其中包含 3 个 50 cm 长的波导放大器和芯片两端的耦合环路。图 4(b)所示为封装的主要组件,包括 EDWA 芯片,使用保偏光纤阵列进行双向泵浦,其具备可覆盖整个 C 波段及部分 L 波段的增益带宽,最大外部净增益达 24 dB,片外输出功率超过 54 mW^[44]。另一种方案则是将增益层与无源波导组合形成混合波导结构,即在无源波导表

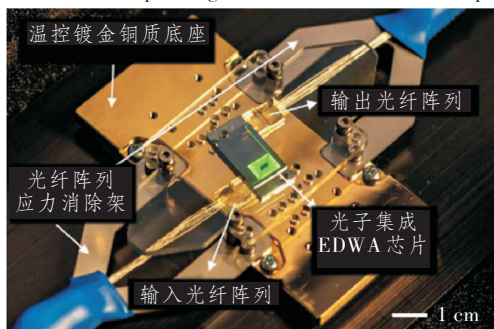
面覆盖增益材料,可以通过调控增益层与无源波导的空间分布增强光场交叠^[13, 14, 45]。芬兰阿尔托大学采用单片集成、互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)兼容且可扩展的原子层沉积(Atomic Layer Deposition, ALD)工艺,将掺铒 Al_2O_3 直接集成在 Si_3N_4 槽波导上,在亚毫米级长度波导上实现了高达 $20.10 \pm 7.31 \text{ dB/cm}$ 的单位长度净模场增益^[46]。



注:其中包含3个50 cm长的波导放大器和芯片两端的耦合环路

(a) $1.5 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ 芯片的显微镜图像

(a) Microscope image of the $1.5 \text{ cm} \times 1.0 \text{ cm}$ chip



注:其中包括EDWA芯片,使用保偏光纤阵列进行双向泵浦

(b) 封装主要组件的表征

(b) Characterization package showing the main components of the assembly

图4 基于 Al_2O_3 的集成封装EDWA^[44]

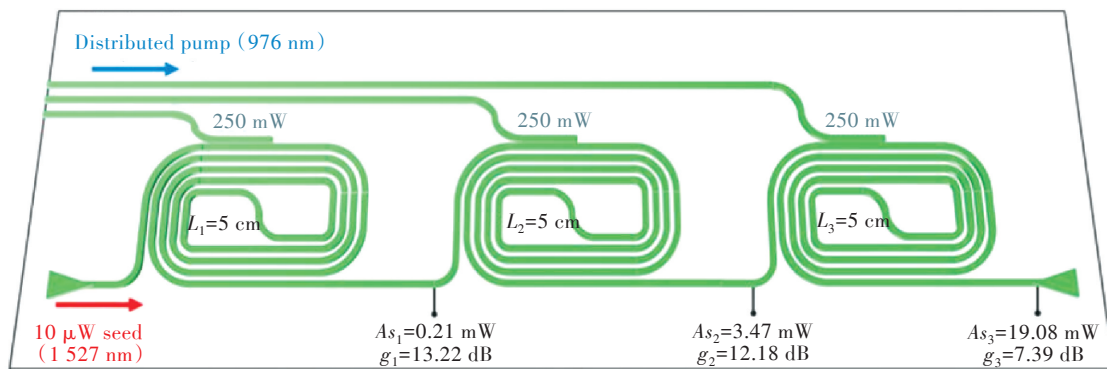
Figure 4 Al_2O_3 -based integrated-packaging EDWA^[44]

1.3 提高增益平坦度

泵浦方式作为决定EDWA器件整体增益性能的关键因素之一,直接主导着掺杂稀土离子的激发效率、波导内的光场约束能力、模式匹配程度和增益平坦度,并最终影响片上集成光子平台的兼容性。根据目前研究来看,EDWA的泵浦方式主要有端面泵浦、垂直顶泵浦和片上光源泵浦3大类^[24, 47-50]。其中端面泵浦是技术最成熟、应用最广泛的方案,在实验研究与实际系统应用中占据主导地位。该方案主要是通过波导芯片端面的耦合结构将泵浦光注入增益介质,其还可以分为空间光耦合与光纤耦合两类。前者主要是通过采用透镜组或自由空间光路系

统将泵浦光直接耦合至波导端面,适合于模场面积较大的耦合器设计,在精密对准情况下可获得较高的耦合效率,但对光路稳定性与环境振动极为敏感,通常需要配备复杂的稳定系统,在实际部署中受到一定限制^[47]。后者则通过片上或片外WDM将泵浦光与信号光合束后共同输入波导中,具有系统稳定和易于集成等优势。端面耦合根据泵浦光的传输方向可以进一步划分为正向、反向和双向泵浦3种类型。正向泵浦时信号光与泵浦光同向传输,有利于系统集成,但易导致波导远端泵浦功率下降,造成增益分布不均;反向泵浦可以改善增益平坦度,但会增强放大器自发辐射(Amplifier Spontaneous Emission, ASE)的放大;双向泵浦方案通过两端同时注入泵浦光,可在长波导中实现增益均匀分布,同时提升信噪比。特别适用于长波导结构,能够在提升整体增益的同时有效抑制噪声劣化。此外,多级分布式泵浦方案为高效激发铒离子、提升片上净增益提供了一种有效解决方案。与单泵浦方案相比,该方案通过在波导沿线分布式地注入泵浦能量,能够有效克服泵浦光随传输距离的指数衰减问题,从而实现更均匀的粒子数反转与增益分布。具体而言,该结构可采用级联式片上泵浦激光器或由多路光纤耦合器引入的外部泵浦源,对波导的不同区段进行协同泵浦^[48],如图5所示,在 Ta_2O_5 波导上级联3个相同的增益波导,对其进行分布式泵浦,可有效增强泵浦光的转换效率。这种设计不仅能显著提升整体增益和输出功率,更有助于抑制因局部增益饱和所引发的非线性效应与噪声,尤其适用于厘米级长波导或高功率输出的应用场景。因此,优化泵浦点的位置与功率配比,是充分发挥多级泵浦效能、最终实现放大器性能全局最优化的关键。

垂直顶泵浦作为一种新兴方案,如图6所示,采用宽谱光源(发光二极管(Light Emitting Diode, LED)阵列)从波导上方垂直辐照以实现能量注入。该方案具备系统简单、成本低和热负载小等优点,受到广泛关注^[49]。但由于LED的宽发散角与倏逝场耦合效率低,该方案目前仍面临泵浦光利用率偏低的问题,未来可通过集成纳米光栅和优化多层膜结构等方式提升泵浦光的局域化场强。随着异构集成与芯片工艺的发展,EDWA的泵浦方式正逐步从外部耦合向片上集成光源演进。片上光源泵浦通过在芯片上直接集成III-V族半导体激光器或垂直腔面发射激光器(Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, VCSEL)等泵浦光源,实现高效直接注入^[50],



注: $L_1 \sim L_3$ 分别为 3 段增益弯曲波导的长度; $A_{s1} \sim A_{s3}$ 分别为进入 3 段增益弯曲波导的光信号功率; $g_1 \sim g_3$ 分别为 3 段增益弯曲波导产生的增益。

图 5 Ta_2O_5 波导放大器的多级泵浦方案^[48]

Figure 5 Multi-stage pumping scheme for Ta_2O_5 waveguide amplifiers

图 7 所示为基于片上集成激光泵浦源的掺铒 Al_2O_3 光波导放大器设计方案。该方案能够从根本上解决耦合损耗与系统稳定性问题,为下一代全集成化掺铒放大系统提供关键技术支持。然而,片上光源泵浦在迈向实用化过程中仍存在若干关键瓶颈。首先是芯片尺寸与散热能力的限制,当前片上泵浦光源的输出功率尚难以满足高增益掺杂波导的阈值要求;其次是异质集成在兼容性与良率方面的挑战,制约了其规模化制备与成本控制。此外,非线性转换效率偏低也限制了整体泵浦效能的提升。展望未来,片上光源泵浦仍是推动掺杂稀土离子光波导放大器性能突破的核心方向。随着 III-V 族/硅异质集成技术、微纳光学结构设计与热管理方案的不断成熟,片上光源泵浦性能有望实现显著提升。同时,

混合泵浦架构与新兴模式匹配设计也将成为提升泵浦光与波导的耦合效率、实现更高集成度与性能稳定性的重要途径^[51]。

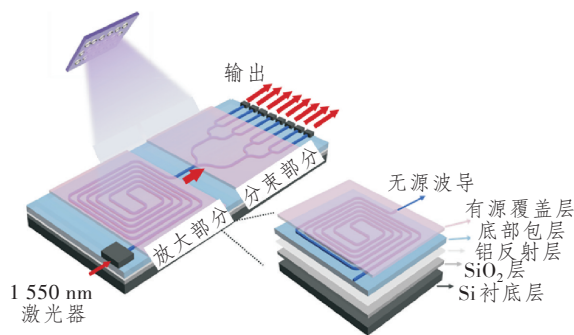
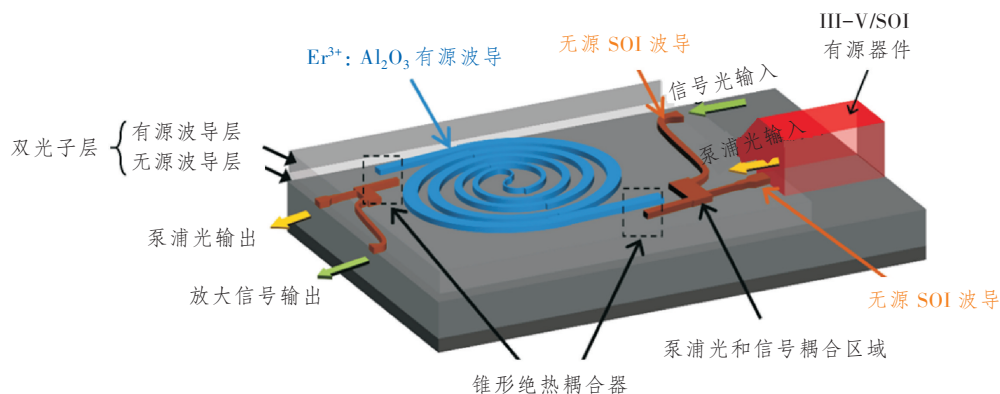


图 6 垂直顶泵浦方案示意图^[49]

Figure 6 Schematic diagram of the vertical top-pumping^[49]



注: SOI 为绝缘体上硅波导。

图 7 基于片上集成激光泵浦源的 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 光波导放大器设计^[50]

Figure 7 Design of an $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3$ optical waveguide amplifier with on-chip integrated laser pumping source

2 单片集成片上 WDM 的 EDWA 研究进展

片上 WDM 结构是实现泵浦光与信号光进行

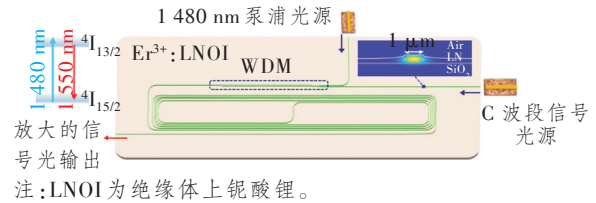
芯片级协同管理、传输以及提升集成度的关键技术。在 EDWA 中,片上 WDM 不仅能够实现对泵浦光与信号光的独立路由与灵活控制,满足高密度光子集成对光路分离式布线的需求,还支持将泵浦光源

紧凑地封装在同一芯片上。这种集成方式从根本上避免了传统方案中所依赖的大尺寸光纤连接与分立式光纤型 WDM 器件,为构建高集成度和高稳定性的放大器模块提供了核心技术路径。

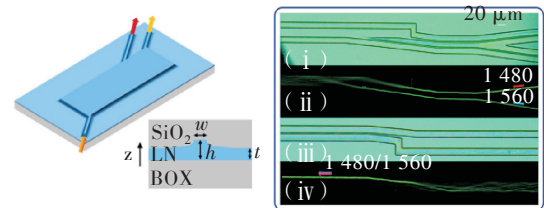
然而,实现高性能 WDM 器件与掺铒增益介质的单片集成,仍是构建全功能光子集成电路所面临的核心挑战。尽管无源 TFLN 等平台已在波长滤波与复用方面展现出卓越性能^[52-54],为了实现通信 C 波段的高频谱效率,在掺铒 TFLN 器件中实现这些功能仍是迫切需求。目前,针对铒离子在特定平台上选择性掺杂效率低的问题,技术发展主要遵循两条路径:其一,采用有源/无源晶圆直接拼接的混合集成方案,其设计自由度与制备效率上存在固有局限^[55];其二,是更具前景的单片集成路径,即将 WDM 等功能元件直接集成于掺铒波导介质内部,构建一体化多功能光子集成电路^[11]。

在各类片上 WDM 技术实现方案中,研究人员已在硅基、玻璃基和 III-V 族半导体等多种光子集成平台上提出了多元化的技术路径,典型结构包括阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)、可调谐微环滤波器、级联马赫-曾德尔干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)、基于弯曲定向耦合器(Directional Coupler, DC)的 MZI 衍生结构、级联多模波导光栅(Cascaded Multimode Waveguide Grating, CMWG)以及斜角多模干涉仪(Angled Multimode Interferometer, AMMI)等^[56-62]。其中,AMMI 因其结构紧凑、通道均匀性好、插入损耗低和工作带宽大等突出优势,被广泛视为粗 WDM 系统的高效多通道解决方案^[52-54]。该器件的典型应用之一是实现带内泵浦,即借助基于 AMMI 结构双通道波长多路复用器的其中一个通道,将 1 480 nm 泵浦激光注入片上 EDWA,同时利用另一个通道完成 C 波段信号的输入输出^[11]。如图 8 所示,器件制造工艺采用了由全掺杂铌酸锂块状晶体的“Smart”智能切割技术制成的 500 nm 厚 Z 型切 TFLN 晶圆。基于 AMMI 结构的片内 WDM

器件将波长为 1 480 nm 的泵浦光激光器连接到透镜光纤上,从而与 WDM 器件的输入波导对接耦合。图 8(b)展示了 AMMI 的结构示意图以及多模波导和输出波导的扫描电镜图。得益于高功率 1 480 nm 泵浦光激发的铒离子产生的可见上转换荧光。



注:LN01为绝缘体上铌酸锂。
(a) 集成 WDM 的 EDWA 芯片示意图
(a) The schematic of the WDM integrated EDWA chip



(b) 基于 AMMI 耦合器的 WDM 结构示意图与放大显微镜图像
(b) The schematic and enlarged microscope images of the AMMI based WDM structure

图 8 集成基于 AMMI 的 WDM 结构的 EDWA 芯片设计与制造^[11-12]

Figure 8 Design and fabrication of the EDWA chip with the AMMI based WDM structure^[11-12]

基于不同片上 WDM 方案的 EDWA 性能对比如表 2 所示。近年来,片上 WDM 结构在提升放大器性能与抑制寄生振荡方面展现出关键作用。2024 年,华东师范大学程亚团队通过集成 AMMI 型 WDM 结构的 EDWA 器件,揭示了集成 WDM 在抑制寄生激光方面的关键作用。此方案中的 WDM 结构可有效滤除从输出端反射回的自发辐射,从而抑制往返净增益,防止自激激光的形成^[12]。相比之下,未集成 WDM 的 EDWA 芯片易因端面反射在铒离子增益峰值(1 532 nm)处引发自激激光现象,严重消耗上能级粒子数,导致信号增益钳制。此方案可以在 1 545~1 565 nm 带宽范围内实现 10 dB 的片上净增益。

表 2 基于不同片上 WDM 方案的 EDWA 的性能对比

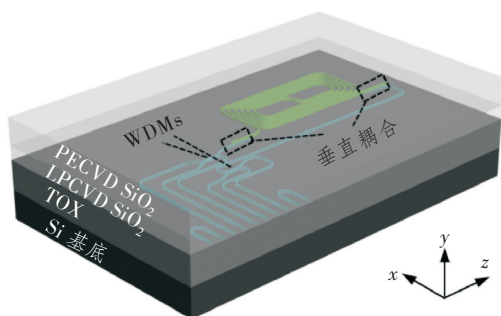
Table 2 Performance comparison of EDWA with different on-chip WDM schemes

波导材料	WDM 结构		泵浦光波长 / 信号光波长 /		波导长度 /		泵浦光功率 /	增益 / dB	年份
	方案	插损 / dB	带宽 / nm	nm	nm	cm	mW		
Er:Al ₂ O ₃ :Si ₃ N ₄	DC	0.50	80	980.0	1 520~1 640	30.0	691	16.3	2025 ^[45]
Er:TFLN	AMMI	0.68	15	1 480.0	1 545~1 565	4.6	20	10.0	2024 ^[11-12]
Er:Al ₂ O ₃ :Si ₃ N ₄	MMI	0.48	30	980.0	1 510~1 580	10.0	50	18.1	2020 ^[13]
Er:Al ₂ O ₃ :Si ₃ N ₄	MMI	0.40	180	976.2	1 532	5.9	390	10.0	2019 ^[14]

注:MMI为多模干涉仪。

为进一步降低放大器的功率损耗,研究者在波导结构与集成方式上持续开展创新。2019 年,荷兰特温特大学纳米技术研究所提出了一种 $\text{Er}:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层波导的单片集成结构。该方案摒弃了以往将掺铒 Al_2O_3 材料直接沉积在 Si_3N_4 上或溅射到 SiO_2 沟槽中的传统集成方法,而是将掺铒 Al_2O_3 波导与 Si_3N_4 波导分别置于由 SiO_2 薄膜分隔的两个独立层中。该集成方式使光学模式在各光子层中独立传输,从而可对增益区与无源区进行独立优化。其中 $\text{Er}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ 增益波导具备高度的模式限制与场强约束能力,有助于实现更高的模式能量密度,从而显著降低放大器获得净增益所需的泵浦功率阈值^[13-14]。两层之间的光模式转移通过垂直锥形绝热耦合器完成,该结构具有低损耗、大带宽以及高工艺容差等特性。此外,该集成方案采用基于 1×2 MMI 传统结构的 WDM 器件,实现了泵浦光与信号光的高效合束与分束,展现了多功能结构协同设计在提升放大器综合性能方面的潜力^[15]。基于此方案,该团队成功研制出长度为 10 cm 的 $\text{Er}:$

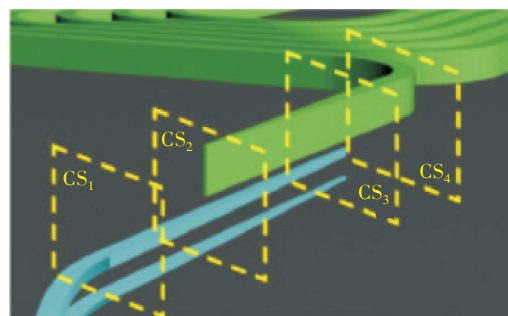
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Si}_3\text{N}_4$ 双层波导放大器,在 1 532 nm 波长处实现了高达 18.1 dB 的内部净增益,增益带宽超过 70 nm^[13]。然而,较高的光纤-芯片端面耦合损耗(单端面 10~12 dB)限制了其外部净增益的进一步提升。为克服上述耦合损耗问题,2025 年,Osornio-Martinez 团队实现了基于 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}$ 有源波导与无源 Si_3N_4 TriPleX 平台的进一步优化集成。图 9 所示为采用片上垂直耦合结构和基于锥形 DC 结构的 WDM 的 EDWA 方案原理图,该设计采用 DC 型片上 WDM 结构和双向泵浦机制,实现了更高效的泵浦光与信号光路由;同时借助优化的垂直耦合器完成波导层间的低损耗模式转换;并结合 16 通道保偏光纤阵列,将单端面耦合损耗在 1 470~1 640 nm 工作波长范围内控制在 2 dB 以下。最终实现的 EDWA 在 80 nm 带宽内小信号净增益超过 16 dB,噪声系数约 3 dB^[45]。该成果标志着面向硅光平台兼容的全集成有源-无源光子电路发展迈出了关键一步,为下一代高性能稀土离子掺杂放大器的片上全集成提供了重要技术路径。



注:PECVD SiO_2 为等离子增强化学气相沉积氧硅层;LPCVD SiO_2 为低压化学气相沉积氧硅层;TOX 为热生长氧硅层。

(a) 掺铒 Al_2O_3 与 Si_3N_4 双层集成三维结构示意图

(a) 3D schematic of the double-layer integration of $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ and Si_3N_4



注:CS₁~CS₄ 为四个截面。

(b) 垂直耦合器结构示意图

(b) Schematic of the vertical coupler

图 9 采用片上垂直耦合结构和基于锥形 DC 结构的 WDM 的 EDWA 方案原理图^[45]

Figure 9 Schematic of the EDWA design using on-chip vertical coupling structure and WDM based on a tapered DC configuration^[45]

3 结束语

本文系统分析了基于片外与片上 WDM 技术的 EDWA 研究进展。未来,该领域研究将聚焦于 3 个关键方向:①发展动态可调谐增益技术,实现对放大器增益谱与功率的实时精准调控,为构建智能光网络奠定基础,实现从“静态放大”到“自适应感知”的跨越。未来的研究将突破传统固定增益的工作模式,通过在光放大器芯片中集成微加热器、应力调节器或电光调制单元,实现对光放大器增益谱形与输出功率的实时精准调控。结合片上监测与人工

智能算法,EDWA 将能够自主感知网络信道状态、动态补偿链路损耗波动,在 WDM 系统中实现各信道的增益均衡,在时分复用系统中完成突发模式的快速响应。这种智能化放大单元将成为构建软件定义光网络和认知光网络的核心物理层基础,为第六代移动通信(The 6th Generation Network, 6G)移动前传和数据中心光交换等需要灵活资源调度的场景提供关键技术支撑。②突破异构集成瓶颈,致力于解决多材料体系间低损耗、高效率的集成工艺,实现从“分立器件”到“系统芯片”的演进。下一代 EDWA 将不再局限于单一功能,而是作为完整光传输

链路上的关键一环,与激光器、调制器和探测器等元件协同集成。这需要解决 III-V/Si/LN/ Al_2O_3 等多材料体系间的界面损耗、热应力匹配和工艺兼容性等核心问题。通过晶圆键合、微转印印刷和背面对准光刻等先进集成工艺,最终实现“泵浦激光—信号调制—功率放大—信号接收”的全功能片上系统。这种高度集成的光引擎将极大降低封装复杂度与系统功耗,为共封装光学和高性能计算光互联等新兴应用提供完整的片上解决方案,推动光模块从“可插拔”向“共封装”乃至“片上共集成”的范式变革。③拓展多种稀土离子共掺体系,以突破传统增益带宽的限制,实现覆盖 O 至 L 波段并延伸至中红外波段超宽带光放大。为满足未来通信容量指数增长的需求,单一铒离子的增益带宽已接近其物理极限。通过引入铥、钬和镨等多种稀土离子的协同掺杂,结合各离子特有的能级结构与光谱特性,可以构建覆盖 O/E/S/C/L 全波段的超宽带增益平台。特别值得关注的是,通过能级剪裁与光子结构设计,实现铒离子 $1.55\ \mu\text{m}$ 波段与铥离子 $2\ \mu\text{m}$ 波段的高效耦合与同时放大,将打开中红外硅基光子学的应用窗口。这种宽带增益能力不仅服务于传统光通信,更为片上光谱学、中红外传感和量子频率转换等新兴领域提供了关键器件支撑,推动光子集成电路从通信专用平台向多功能通用平台的转变。这些关键技术的突破将共同推动 EDWA 向智能化、高集成度与宽带化方向演进,为下一代光通信与光子计算系统提供核心支撑。

参考文献:

- [1] Becker P C, Olsson N A, Simpson J R. Erbium - Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology[M]. San Diego, USA: Academic Press, 1999.
- [2] Bradley J D B, Pollnau M. Erbium - Doped Integrated Waveguide Amplifiers and Lasers[J]. Laser & Photonics Reviews, 2011, 5(3): 368–403.
- [3] Belt M, Blumenthal D J. Erbium - Doped Waveguide DBR and DFB Laser Arrays Integrated within an Ultra-Low - Loss Si_3N_4 Platform[J]. Optics Express, 2014, 22(9): 10655–10660.
- [4] Bröske D, Suntsov S, Rüter C E, et al. Efficient Ridge Waveguide Amplifiers and Lasers in Er-Doped Lithium Niobate by Optical Grade Dicing and Three-Side Er and Ti in - Diffusion[J]. Optics Express, 2017, 25(23): 29374–29379.
- [5] Suntsov S, Rüter C E, Kip D. Er: Ti: LiNbO_3 Ridge Waveguide Optical Amplifiers by Optical Grade Dicing and Three - Side Er and Ti in - Diffusion[J]. Applied Physics B, 2017, 123(4): 118.
- [6] Liang Y, Zhou J, Liu Z, et al. A High-Gain Cladded Waveguide Amplifier on Erbium Doped Thin - Film Lithium Niobate Fabricated Using Photolithography Assisted Chemo-Mechanical Etching[J]. Nanophotonics, 2022, 11(5): 1033–1040.
- [7] Gao R, Fu B, Yao N, et al. Electro-Optically Tunable Low Phase - Noise Microwave Synthesizer in an Active Lithium Niobate Microdisk[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(5): 2200903.
- [8] Liu X, Yan X, Liu Y, et al. Tunable Single-Mode Laser on Thin Film Lithium Niobate[J]. Optics Letters, 2021, 46(21): 5505–5508.
- [9] Liu Y, Qiu Z, Ji X, et al. A Photonic Integrated Circuit-based Erbium - Doped Amplifier[J]. Science, 2022, 376(6599): 1309–1313.
- [10] Kik P G, Polman A. Cooperative Upconversion as the Gain-Limiting Factor in Er Doped Miniature Al_2O_3 Optical Waveguide Amplifiers[J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(9): 5008–5012.
- [11] Han J, Bao R, Wu R, et al. On-Chip Wavelength Division Multiplexing by Angled Multimode Interferometer Fabricated on Erbium-Doped Thin Film Lithium Niobate on Insulator[J]. Nanophotonics, 2024, 13(15): 2839–2846.
- [12] Han J, Li M, Dong Q, et al. Suppression of Parasitic Lasing in Erbium Doped Thin Film Lithium Niobate Waveguide Amplifier by Integrated Wavelength Division Multiplexer[J]. APL Photonics, 2024, 9(12): 126108.
- [13] Mu J, Dijkstra M, Korterik J, et al. High-Gain Waveguide Amplifiers in Si_3N_4 Technology via Double-Layer Monolithic Integration[J]. Photonics Research, 2020, 8(10): 1634–1641.
- [14] Mu J, Dijkstra M, García-Blanco S M. Monolithic Integration of Al_2O_3 : Er^{3+} Amplifiers in Si_3N_4 Technology[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe - EQEC). Munich, Germany: IEEE, 2019: 8873164.
- [15] Mu J, Vázquez-Córdova S A, Sefunc M A, et al. A Low-Loss and Broadband MMI-based Multi/Demultiplexer in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ Technology[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3603–3609.
- [16] Cai M, Li T, Zhang X, et al. Gain Dynamics in Integrated Waveguide Amplifier based on Erbium - Doped

- Thin - Film Lithium Niobate [J]. ACS Photonics, 2024, 11(11): 4923–4932.
- [17] Wu R, Wang M, Xu J, et al. Long Low-Loss-Litium Niobate on Insulator Waveguides with Sub-Nanometer Surface Roughness[J]. Nanomaterials, 2018, 7(11): 910.
- [18] Wang B, Sun D G, Shang H P. Investigation for Relationship between Sidewall Roughness of Silicon-on-Insulator Waveguide and Loss of Guided-Mode[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5): 151.
- [19] Stern L, Desiatov B, Goykhman I, et al. Nanoscale Light - Matter Interactions in Atomic Cladding Waveguides[J]. Nature Communications, 2013, 4: 1548.
- [20] Gill D, McCaughan L, Wright J. Spectroscopic Site Determinations in Erbium-Doped Lithium Niobate[J]. Physical Review B, Condensed Matter, 1996, 53(5): 2334–2344.
- [21] Strohhöfer C, Polman A. Absorption and Emission Spectroscopy in Er^{3+} - Yb^{3+} Doped Aluminum Oxide Waveguides[J]. Optical Materials, 2003, 21(4): 705–712.
- [22] Zhang Z, Li S, Gao R, et al. Erbium - Ytterbium Codoped Thin-Film Lithium Niobate Integrated Waveguide Amplifier with a 27 dB Internal Net Gain[J]. Optics Letters, 2023, 48(16): 4344–4347.
- [23] Han J, Li M, Wu R, et al. High Fiber-to-Fiber Net Gain in Erbium - Doped Thin Film Lithium Niobate Waveguide Amplifier as an External Gain Chip[J]. Opto-Electronic Science. 2025, 4(9): 250004.
- [24] Li M, Yu J, Wang Z, et al. Monolithic Low-Noise Erbium - Doped Thin - Film Lithium Niobate Waveguide Amplifier with 18 dB Fiber to Fiber Net Gain[J]. ACS Photonics, 2025, 12(11): 6388–6396.
- [25] Bao R, Fang Z, Liu J, et al. An Erbium-Doped Waveguide Amplifier on Thin Film Lithium Niobate with an Output Power Exceeding 100 mW[J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 19(1): 2400765.
- [26] Che D, Grillanda S, Liu Y, et al. First Demonstration of Erbium - Doped Waveguide Amplifier Enabled Multi-Tb/s (16×1.6 T) Coherent Transmission[C]//2023 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2023: 10116365.
- [27] Xue X, Qiu J, Ding T, et al. Integrated Erbium - Doped Waveguide Amplifier on Lithium Niobate on Insulator[J]. Optical Materials Express, 2024, 14(8): 1985–1994.
- [28] Wang Y, Wang B, Shen B, et al. Erbium-Doped Lithium Niobate on Insulator Waveguide Amplifier with Ultra-High Internal Net Gain of 38 dB[C]//2024 Conference on Lasers and Electro - Optics (CLEO). Charlotte, NC, USA: IEEE, 2024: 10727906.
- [29] Zhou J, Liang Y, Liu Z, et al. On - Chip Integrated Waveguide Amplifiers on Erbium - Doped Thin - Film Lithium Niobate on Insulator[J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(8): 2100030.
- [30] Cai M, Wu K, Xiang J, et al. Erbium-Doped Lithium Niobate Thin Film Waveguide Amplifier with 16 dB Internal Net Gain[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2022, 28(3): 8200608.
- [31] Chen Z, Xu Q, Zhang K, et al. Efficient Erbium - Doped Thin-Film Lithium Niobate Waveguide Amplifiers[J]. Optics Letters, 2021, 46(5): 1161–1164.
- [32] Yan X, Liu Y A, Wu J, et al. Integrated Spiral Waveguide Amplifiers on Erbium-Doped Thin-Film Lithium Niobate [EB/OL]. (2021 - 05 - 01) [2025 - 10 - 29]. <https://arxiv.org/abs/2105.00214>.
- [33] Luo Q, Yang C, Hao Z, et al. On - Chip Erbium - Doped Lithium Niobate Waveguide Amplifiers[J]. Chinese Optics Letters, 2021, 19(6): 060008.
- [34] Cai M, Xiang J, Wu K, et al. High - Gain Erbium - Doped Waveguide Amplifier on LNOI Platform[C]//2021 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC). Hong Kong, China: IEEE, 2021: 9866177.
- [35] Vázquez-Córdova S A, Bernhardt E H, Wörhoff K, et al. Erbium-Doped Spiral Amplifiers with 20 dB Gain on a Silicon Chip[J]. Silicon Photonics and Photonic Integrated Circuits IV, 2014, 9133: 913308.
- [36] Rönn J, Zhang J, Zhang W, et al. Erbium-Doped Hybrid Waveguide Amplifiers with Net Optical Gain on a Fully Industrial 300 mm Silicon Nitride Photonic Platform [J]. Optics Express, 2020, 28(19): 27919–27926.
- [37] Frankis H C, Mbonde H M, Bonneville D B, et al. Erbium-Doped TeO_2 -Coated Si_3N_4 Waveguide Amplifiers with 5 dB Net Gain[J]. Photonics Research, 2020, 8(2): 127–134.
- [38] Hendriks W A P M, Chang L, van Emmerik C I, et al. Rare-Earth Ion Doped Al_2O_3 for Active Integrated Photonics [J]. Advances in Physics: X, 2021, 6(1): 1833753.
- [39] Franken C A A, Hendriks W A P M, Winkler L V, et al. Hybrid Integrated near UV Lasers Using the Deep-UV Al_2O_3 Platform[EB/OL]. (2023-02-22) [2025-10-29]. <https://arxiv.org/abs/2302.11492>.

- [40] Chrysostomidis T, Mu J, Roumpos I, et al. 8×40 Gbps WDM Amplification in a Monolithically Integrated $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}\text{-Si}_3\text{N}_4$ Waveguide Amplifier[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33 (21) : 1177–1180.
- [41] Gaafar M A, Ludwig M, Wang K, et al. Femtosecond Pulse Amplification on a Chip[J]. Nature Communications, 2024, 15: 8109.
- [42] Su Z, Li N, Frankis H C, et al. High-Q-Factor Al_2O_3 Micro-Trench Cavities Integrated with Silicon Nitride Waveguides on Silicon[J]. Optics Express, 2018, 26(9): 11161–11170.
- [43] Bonneville D B, Osornio-Martinez C E, Dijkstra M, et al. High on-Chip Gain Spiral $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ Waveguide Amplifiers[J]. Optics Express, 2024, 32(9): 15527–15536.
- [44] Osornio-Martinez C E, Bonneville D B, Dijkstra M, et al. Broadband Packaged Erbium-Doped Polycrystalline Al_2O_3 Waveguide Amplifier with 24 dB External Net Gain[J]. Optics Express, 2025, 33(14): 28985–28994.
- [45] Osornio-Martinez C E, Bonneville D B, Hegeman I, et al. Monolithically Integrated Erbium-Doped Polycrystalline Al_2O_3 Waveguide Amplifier on Silicon Photonics Platform[J]. Optics Express, 2025, 33(11): 23491–23502.
- [46] Rönn J, Zhang W, Autere A, et al. Ultra-High on-Chip Optical Gain in Erbium-based Hybrid Slot Waveguides[J]. Nature Communications, 2019, 10: 432.
- [47] Tan Y, Shang Z, Vanga S K, et al. High-Gain Optical Waveguide Amplifier based on Proton Beam Writing of Nd: YAG Crystal[J]. Optics Express, 2015, 23(11): 14612–14617.
- [48] Vaid H, Saxena S, Ahuja J, et al. High-Gain on-Chip Er: Ta_2O_5 Amplifier with Multi-Stage Pumping[J]. Engineering Research Express, 2025, 7(3): 035335.
- [49] Zhu J, Zhang B, Huang Y, et al. Optical Gain at 1.55 μm of Er (TMHD)₃ Complex Doped Polymer Waveguides based on the Intramolecular Energy Transfer Effect[J]. Optics Express, 2023, 31(4): 5242–5256.
- [50] Xiao P, Wang B. Design of an Erbium-Doped Al_2O_3 Optical Waveguide Amplifier with on-Chip Integrated Laser Pumping Source[J]. Optics Communications, 2022, 508: 127709.
- [51] 王艺蒙, 王博, 沈碧涛, 等. 稀土掺杂集成光波导放大器最新进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2025, 55(9): 2133–2152.
- Wang Y M, Wang B, Shen B T, et al. Recent Advances in Rare-Earth-Doped Integrated Optical Waveguide Amplifiers[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2025, 55(9): 2133–2152.
- [52] Pohl D, Reig Escalé M, Madi M, et al. An Integrated Broadband Spectrometer on Thin-Film Lithium Niobate[J]. Nature Photonics, 2020, 14(1): 24–29.
- [53] Chen G, Ruan Z, Wang Z, et al. Four-Channel CWDM Device on a Thin-Film Lithium Niobate Platform Using an Angled Multimode Interferometer Structure[J]. Photonics Research, 2022, 10(1): 8–13.
- [54] Wang Z, Fang Z, Liu Z, et al. On-Chip Arrayed Waveguide Grating Fabricated on Thin-Film Lithium Niobate[J]. Advanced Photonics Research, 2024, 5(2): 2300228.
- [55] Zhou Y, Zhu Y, Fang Z, et al. Monolithically Integrated Active Passive Waveguide Array Fabricated on Thin Film Lithium Niobate Using a Single Continuous Photolithography Process[J]. Laser & Photonics Reviews, 2023, 17(4): 2200686.
- [56] Dong P. Silicon Photonic Integrated Circuits for Wavelength-Division Multiplexing Applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2016, 22(6): 6100609.
- [57] Horst F, Green W M J, Assefa S, et al. Cascaded Mach-Zehnder Wavelength Filters in Silicon Photonics for Low Loss and Flat Pass-Band WDM (de-) Multiplexing[J]. Optics Express, 2013, 21(10): 11652–11658.
- [58] Xu H, Shi Y. Flat-Top CWDM (de) Multiplexer based on MZI with Bent Directional Couplers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(2): 169–172.
- [59] Liu D, Zhang M, Shi Y, et al. Four-Channel CWDM (de) Multiplexers Using Cascaded Multimode Waveguide Gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(4): 192–195.
- [60] Hu Y, Jenkins R M, Gardes F Y, et al. Wavelength Division (de) Multiplexing based on Dispersive Self-Imaging[J]. Optics Letters, 2011, 36(23): 4488–4490.
- [61] Bucio T D, Khokhar A Z, Mashanovich G Z, et al. N-Rich Silicon Nitride Angled MMI for Coarse Wavelength Division (de) Multiplexing in the O-Band[J]. Optics Letters, 2018, 43(6): 1251–1254.
- [62] 吴俊宇, 敖学渊, 邓磊, 等. 基于放大器优化的无中继通信系统研究[J]. 光通信研究, 2024(4): 230003.
- Wu J Y, Ao X Y, Deng L, et al. Research of Unrepeatered Transmission System based on Amplifier Optimization[J]. Study on Optical Communications, 2024(4): 230003.